UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID
Escuela Técnica Superior de Edificación

Aprovechamiento energético de las infraestructuras urbanas subterráneas. Modelo integrado de aplicación.

TESIS DOCTORAL

Presentada para optar al título de Doctor por:

Luis de Pereda Fernández
Arquitecto

Madrid, 2023

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID
Escuela Técnica Superior de Edificación

Doctorado en Innovación Tecnológica en Edificación

Aprovechamiento energético de las infraestructuras urbanas subterráneas. Modelo integrado de aplicación.

TESIS DOCTORAL

Presentada para optar al título de Doctor por:

Luis de Pereda Fernández
Arquitecto

Bajo la dirección de:
Dra. María De las Nieves Gonzalez García
Dra. Inmaculada Martínez Pérez

Madrid, 2023

Título: Aprovechamiento energético de las infraestructuras urbanas subterráneas. Modelo integrado de aplicación.

Autor: Luis de Pereda Fernández.

Programa de Doctorado: Doctorado en Innovación Tecnológica en Edificación

Dirección de tesis:

Dra. María de las Nieves González García, Catedrática de Universidad, Universidad Politécnica de Madrid

Dra. Inmaculada Martínez Pérez, Profesora Contratada Doctora, Universidad Politécnica de Madrid

Revisores externos:

Tribunal de tesis:

Fecha de defensa:

A mis padres

A mi mujer

A mi hija

Agradecimientos

Doy gracias a mis Directoras Nieves González e Inmaculada Martínez por haber impulsado la realización de este trabajo y tutelado con inagotable paciencia y rigor el laborioso proceso que lleva a esta Tesis Doctoral. La responsabilidad de no defraudar sus expectativas ha sido determinante para llegar a culminar esta fase.

Gracias a Maya Rodero. Ningún reto profesional ha resultado inviable cuando se cuenta con el talento y la capacidad de sacrificio de Maya. Tampoco este.

Gracias a Alfonso Cobo por su confianza y generosidad.

Gracias a Ana Iglesias por apoyar desde el rigor intelectual y la más firme convicción innovadora todas las iniciativas y proyectos que me han permitido ejecutar y aprender ejecutando.

Gracias Carlos López Jimeno por llevarme e impulsarme por la senda de la investigación, la innovación, la práctica y la docencia. Gracias también por ser, para mí y para muchos un modelo de referencia en la Universidad, en la Administración Pública, en la Investigación y en la Amistad.

Gracias a José Fernández Alvarez. Esta tesis se nutre de muchas experiencias compartidas, discutidas y construidas por los dos desde la ilusión, la creatividad y el esfuerzo.

Gracias a Eduardo Catalán de Ocón por más de veinte años compartiendo vocación y apoyo mutuo.

Gracias a Mauricio Perico por ser el contrapunto, el apoyo y el compañero leal en una ya larga y nada previsible trayectoria profesional.

Gracias a Françoise Schneider por estar detrás y delante de todo.

Gracias a Victoria de Pereda Schneider porque verla crecer le ha dado proyección a mi trabajo.

Abstract

Half of the energy waste generated by buildings and industry is low-intensity or low-grade energy that is emitted and discharged by our systems into the environment. The potential energy resource is wasted.

This work raises the need to conceive, design, execute and evaluate an integrated application model for the recovery and use of residual energy from underground urban infrastructure.

The powerful integrated model concept is based on principles that emanate directly from the logic of ecosystems: the systemic approach, components of ecologically inspired systems, low-exergy systems, dimensions of the ecological city, hybrid dynamics between the circular and linear economies that generate a variable spiral economy, Sustainable Development Goals and their structural derivatives, and the change of paradigms that accompany the deepening of efficiency objectives in all areas of action.

This paper explains the nature of low-grade energy and clearly orients its recovery and use to moderate temperature thermal resources that are supported by low-speed, low-power and low-pressure media. They are abundant resources that are widely distributed under our cities, and so are potentially accessible to all areas of activity.

The urban subsoil is an essential means for providing resources to the city. It includes the subterranean space allocated to infrastructure, equipment, and services. This allows the recovery of social space on the surface of the city and environmental quality improvement of the airspace.

In its energetic dimension, the subsoil is a tempered medium due to the terrain and hydrogeological systems' geothermal condition. Underground urban infrastructure, designed as supply networks that reach all the points of resource consumption and all the mobility and transport network nodes, also channel the energy of the underground components through the subsoil. This includes building, mobility, transport, water and air systems. In the interaction between the ground and buried infrastructure, valuable energy resources are preserved until they are eliminated by discharge into the environment. These can be injected into the building for use in the cooling, heating and tempering systems for fresh air ventilation.

This paper outlines how integrated low-grade urban energy ecosystem can be achieved. It explains the state-of-the-art energy recovery in underground urban infrastructure, low-exergy building, competent to use low-grade energy in a high-efficiency framework, 5th generation and low-temperature district cooling and heating networks, and the integration logic of all these planes. Case studies are also presented to demonstrate their effectiveness.

The presented Integrated Application Model for the recovery and use of energy from underground urban infrastructure networks has been applied to the conventional site plans included in this study to transform their thermal capacity.

It establishes comprehensive action in a real context, including Guidelines and Proposals for Energy Efficiency in the New Ministries Complex in Madrid. Special emphasis is provided on the 5th generation Ecodistrict Network and the integrated control system that resolves the integration between the historic complex of buildings and open spaces, the underground environment's thermal resources and those multifaceted resources poured by each ministry into the network.

An evaluation of the multiple benefits generated by this action and the general conclusions complete this work.

Resumen

El 50% del residuo energético generado por la edificación y la industria corresponde a energía de baja intensidad o bajo grado, emitida por nuestros sistemas, vertida al medio y desperdiciada.

Este trabajo plantea la necesidad de concebir, diseñar, ejecutar y evaluar un modelo integrado de aplicación para la recuperación y uso de la energía residual de las infraestructuras urbanas subterráneas.

La concepción de un modelo integrado se fundamenta en poderosos principios lógicos que emanan directamente de la lógica de los ecosistemas: el enfoque sistémico, las componentes de los sistemas de inspiración ecológica, la lógica de los sistemas de baja exergía, la consideración de las dimensiones de la ciudad ecológica, las dinámicas híbridas entre economía circular y economía lineal que generan una economía espiral variable, la orientación hacia los Objetivos de Desarrollo Sostenible y sus derivadas estructurales, y el cambio de paradigmas que acompañan en todos los ámbitos de actuación a la profundización en los objetivos de eficiencia.

Se expone y explica la naturaleza de la energía de bajo grado, que orienta claramente su recuperación y uso hacia ámbitos afines al uso de recursos térmicos de temperatura moderada sustentada en medios de baja velocidad, baja potencia y baja presión. Son recursos abundantes y con una distribución extensa bajo nuestras ciudades, bajo todos nuestros ámbitos de actividad.

El subsuelo urbano es un medio imprescindible para la dotación de recursos a la ciudad, entre otros el espacio destinado a las infraestructuras, el equipamiento, y los servicios que permiten la recuperación del espacio social en la superficie de la ciudad y la mejora de la calidad ambiental del espacio aéreo. En su dimensión energética el subsuelo es un medio atemperado por la condición geotérmica del terreno y los sistemas hidrogeológicos. Las infraestructuras urbanas subterráneas, están trazadas como redes de suministro, que alcanzan todos los puntos de consumo de recursos y todos los nodos de las redes de suministro de recursos y de movilidad y transporte. También canalizan energía de bajo grado preservada en la componente subterránea de la edificación, de los sistemas de movilidad, de transporte, de agua y, aire. En la interacción entre el terreno y las infraestructuras enterradas se preservan, hasta su eliminación por vertido al medio, valiosos recursos energéticos que pueden ser inyectados en la edificación y destinados a ser

utilizados en los sistemas de refrigeración, calefacción y atemperamiento del aire de renovación.

Este trabajo explica cómo se integra un ecosistema urbano de energía de bajo grado y explica e ilustra con casos ejecutados en nuestro entorno el estado del arte en las áreas de recuperación de energía en las infraestructuras urbanas subterráneas, la edificación de baja exergía, competente para usar en un marco de alta eficiencia la energía de bajo grado, las redes de distrito de refrigeración y calefacción de 5ª generación y baja temperatura, y la lógica de integración de todos estos planos.

La exposición del Modelo integrado de aplicación para la recuperación y uso de las energías de las redes de infraestructuras urbanas subterráneas se realiza volcando todos los planos de este estudio sobre el desarrollo de una propuesta de actuación integral en un contexto real, las Directrices y Propuestas para la Eficiencia Energética en el Complejo de Nuevos Ministerios en Madrid, incidiendo especialmente en la Red de Ecodistrito de 5ª generación y el sistema integrado de control que resuelven la integración entre el complejo histórico de edificios y espacios libres, los recursos del medio subterráneo y los recursos vertidos por cada ministerio a la red. La evaluación de los múltiples beneficios generados por esta actuación y las conclusiones generales a las que nos da acceso culminan este trabajo.

Tabla de Contenido

Agradecimientos ..... *v*
Abstract ..... *vii*
Resumen ..... *ix*
Lista de Figuras ..... *xv*
Lista de Tablas ..... *xxxii*
Abreviaturas y Acrónimos ..... *xxxvi*

1. Introducción y objetivos **43**

1.1. Introducción 44
1.1.1. Problemas causados por el sistema energético actual 48
1.1.2. Una nueva dimensión del sistema energético 50
1.2. Objetivos de la Tesis 56

2. Principios lógicos para un modelo integrado de aplicación a los sistemas para la recuperación y uso de energía recuperada en las redes de infraestructuras urbanas subterráneas **59**

2.1. Principios lógicos de eficiencia en los ecosistemas energéticos 60
2.2. Las dimensiones de la ciudad de inspiración ecológica 63
2.3. Dinámica helicoidal. Hibridación entre lógica circular y lógica lineal en el uso de los recursos 67
2.4. Cualificación y reutilización de la energía. Energía de bajo grado y exergía 70
2.4.1. Cualificación de los recursos. 73
2.4.2. Exergía 73
2.5. Baja exergía en los sistemas integrados 76
2.6. Orientación hacia los objetivos de desarrollo sostenible 81
2.6.1. Un cambio prometedor hacia el desarrollo sostenible 85
2.7. Cambio de paradigmas 86

3. Múltiples dimensiones de la recuperación y reinyección de la energía de bajo grado procedente de las infraestructuras urbanas subterráneas **89**

3.1. El nuevo concepto de la eficiencia energética 90
3.2. Eficiencia y calidad de la energía 98
3.3. La energía del siglo XXI: la energía residual 99

3.4. Urbanización e infraestructuras urbanas 100
3.5. Infraestructuras urbanas subterráneas 108
3.6. Aprovechamiento energético de las infraestructuras subterráneas 111
3.7. Infraestructuras urbanas y sistemas subterráneos habitados. Geotermia en la generación y almacenamiento de energía 114
3.8. Recursos subterráneos en la ciudad 114

4. Ámbito de aplicación del modelo integrado. El ecosistema urbano de energía de bajo grado y simbiosis urbana 119

4.1. El aprovechamiento energético de las Infraestructuras Urbanas Subterráneas (UUI) 121
4.1.1. Ecosistemas 122
4.1.2. Interacciones y flujos dentro del ecosistema humano en el que se encuentra el ecosistema energético 123
4.1.3. Espacio subterráneo y urbanismo ecológico 124
4.1.4. Condición térmica del espacio subterráneo urbano 125
4.1.5. Intercambio Geotérmico 127
4.1.6. Aprovechamiento del potencial geotérmico de las infraestructuras y el terreno. 128
4.2. Infraestructuras urbanas subterráneas. Ámbitos y técnicas de intercambio energético 132
4.2.1. Intercambio de energía con la componente subterránea de la edificación. Sótanos y aparcamientos 133
4.2.2. Caso 1, de intercambio con la componente subterránea de un edificio. Ejecución de un aparcamiento semiautomático con intercambiador geotérmico en la rehabilitación de un edificio 139
4.2.3. Caso 2, de intercambio con la componente subterránea de un edificio. Ejecución de un sótano de aparcamiento con intercambiador geotérmico en la rehabilitación integral de un palacete para oficinas de la administración en Madrid 143
4.2.4. Caso 3, de intercambio con la componente subterránea de un edificio. Aparcamiento mixto de rotación y para residentes subterráneo al pie del salón de Isabel. Segovia. 147
4.3. Intercambio de energía con redes de agua residual y redes de distribución de agua 152
4.3.1. Captación de energía térmica de bajo grado en las aguas residuales 153
4.3.2. Rentabilidad. Contemplar todos los costes 172
4.3.3. Gestión municipal. Los ayuntamientos motores de la innovación 175
4.3.4. La promoción. Las diferentes etapas en la concepción y realización de una instalación 180
4.3.5. Caso 1. Intercambio con un colector presurizado de aguas residuales en la Universidad de Aveiro. Portugal. 184
4.3.6. Caso 2. Intercambio con la red de aguas residuales para el Polideportivo Municipal de Moratalaz. Madrid 190
4.3.7. Caso 3. Intercambio con la red de agua potable en el polideportivo de Ansoain. Navarra. 204
4.4. Intercambio de energía con la infraestructura enterrada de la red de metro y sistemas de transporte colectivo 207
4.4.1. Caso 1. Intercambio mediante geoestructuras energéticas integradas en la estación de Metro de Conde de Casal 218
4.5. Intercambio de energía con la infraestructura de túneles 227
4.5.1. La energía geotérmica en túneles 227
4.5.2. El aprovechamiento geotérmico en los túneles 227
4.5.3. El aprovechamiento térmico del agua drenada por los túneles 233

4.5.4. Caso 1. Recuperación y uso de energía de la galería de servicio del túnel del Bypass de Calle 30. Madrid 234

4.6. Condiciones de la edificación para el aprovechamiento de las energías de bajo grado en un contexto de baja exergía 244

4.6.1. Consideración de la arquitectura como medio de transformación y cualificación de la energía..... 244
4.6.2. Cualificación del entorno..... 252
4.6.3. Activación de la inercia de los edificios 258
4.6.4. Caso 1. Rehabilitación integral de un palacete protegido para oficinas de la administración en Madrid 286
4.6.5. Caso 2. Rehabilitación del Cuartel De Daoíz y Velarde, como teatro infantil y centro cultural (Ayuntamiento de Madrid) 289
4.6.6. Caso 3. Facultad universitaria, CICFANO, en el campus de la universidad de Aveiro, Portugal..... 292
4.6.7. Caso 4. Rehabilitación integral de edificio de oficinas en la calle Apolonio Morales en Madrid. 293

4.7. Medios de transferencia. Redes de 5ª generación 313

4.7.1. Introducción al concepto general del sistema energético compartido..... 313
4.7.2. Clasificación de las redes 5GDHC 319
4.7.3. Comunidades locales de energía térmica 321
4.7.4. Modelos de negocio..... 326
4.7.5. Análisis de riesgos y beneficios 327
4.7.6. Casos prácticos 333

5. Modelo integrado de aplicación en el ecodistrito energético de Nuevos Ministerios 341

5.1. Presentación..... 342

5.1.1. Antecedentes..... 343
5.1.2. Objeto 347
5.1.3. Alcance..... 349
5.1.4. Simulación energética de la propuesta y evaluación de las mejoras y de las estrategias sugeridas. 363

5.2. Estudio de la viabilidad de implantación de un eco-distrito en el complejo de los NNMM de Madrid. Actuaciones transversales 372

5.2.1. Escala individual y escala colectiva..... 372
5.2.2. Escala colectiva del complejo de los NNMM. La importancia de la integración..... 376
5.2.3. Actuaciones para la reducción de la demanda energética y las emisiones, previa a la producción y actuaciones para la reducción del consumo y emisiones correspondientes a la generación eficiente de la energía que cubre la demanda resultante 378
5.2.4. Actuaciones para la reducción del consumo correspondiente a la generación de la energía que cubre la demanda final y reducción de emisiones correspondiente a dicha reducción del consumo..... 414

5.3. Directrices para la transición desde el modelo actual al modelo propuesto 464

5.4. Beneficios múltiples de la eficiencia energética correspondientes a las actuaciones propuestas en el complejo de NNMM 466

5.4.1. Nivel individual + nivel transversal..... 467
5.4.2. Beneficios Múltiples a escala Macro 468
5.4.3. Beneficios Múltiples a escala Micro. 469
5.4.4. Múltiples Beneficios y Objetivos de Desarrollo Sostenible..... 469
5.4.5. Beneficios de la Eficiencia Energética. El cálculo de la monetización. 471
5.4.6. El enfoque hacia el Ciclo de Vida y la optimización de los costos..... 473

5.4.7. Actuaciones para la Eficiencia Energética en el Complejo de NNMM. Un enfoque integral con beneficios múltiples. 474
5.4.8. Relación de beneficios múltiples generados por las actuaciones propuestas en los dos ministerios, MITES, MITMA y en el complejo de NNMM. 474
5.4.9. Esquema de la aplicación, fases y dimensiones, del modelo integrado de aplicación para el aprovechamiento energético del aprovechamiento energético de las infraestructuras subterráneas 479

6. Conclusiones 481

7. Futuras líneas de investigación 485

Referencias 489

Lista de Figuras

Figura 1-1. Emisiones de gases de efecto invernadero, consumo energético y calentamiento global: la tendencia imparable [3]. A) Población mundial y emisiones de gases de efecto invernadero. Datos de la base de datos del Banco Mundial [4]. B) Consumo mundial de energía primaria. Reproducido de BP Statistical Review of World Energy 2018 [5]. C) Índice de temperatura tierra-océano, 1880 al presente, con período base 1951-1980. Reproducido del Instituto Goddard de Estudios Espaciales de la NASA [6]. D) Tendencias de las emisiones de CO2 de la aviación internacional. Reproducido del informe ambiental de la ICAO de 2016 [4]. 46

Figura 2-1. Arquitectura de una construcción urbana, de infraestructura y de un sistema construido de inspiración ecológica. Fuente: Instituto Europeo de Innovación - Eneres. 60

Figura 2-2. Los tres planos del urbanismo ecosistémico. Fuente: Rueda-Palenzuela, Salvador. Agencia para la Ecología Urbana de Barcelona [13]. 64

Figura 2-3. Dinámica helicoidal energética, económica, social. Fuente: elaboración propia. 67

Figura 2-4. Transformación de economía circular a economía helicoidal y los elementos impulsores mostrados en verde [15]. 69

Figura 2-5. Escala de la calidad de la energía [19]. 72

Figura 2-6. Clasificación y cualificación de los recursos energéticos. Fuente: Propia 73

Figura 2-7. Ciclos de uso, degradación y reutilización de la energía. Fuente: Propia..... 74

Figura 2-8. Esquema, en el ámbito de la Exergía, del fujo de la energía a través de los sistemas edificados. Fuente: Instituto Europeo de Innovación - Eneres. 77

Figura 2-9. Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) [24]. 82

Figura 2-10. Beneficios Múltiples de la Eficiencia Energética - MBEE [26]. 83

Figura 2-11. Cambio de paradigma de sistemas de generación y distribución de energía. Fuente: Instituto Europeo de Innovación - Eneres. 85

Figura 2-12. Rasgos de los sistemas energéticos según los nuevos paradigmas. Fuente: Propia. 87

Figura 3-1. Emisiones de gases de efecto invernadero por economía y PIB, UE, primer trimestre de 2020 - primer trimestre de 2023 [32]..... 90

Figura 3-2. Tasas de crecimiento de las emisiones de gases de efecto invernadero por parte de la economía, UE, primer trimestre de 2023 (Variación % respecto al mismo trimestre del año anterior) [32]. 91

Figura 3-3. Tasas de crecimiento de las emisiones de gases de efecto invernadero por economía y PIB, primer trimestre de 2023 (variación porcentual respecto al mismo trimestre del año anterior) [32]. 91

Figura 3-4. Intensidad de CO_2 de producción económica en 2019. Kg de CO_2 por el PIB PPAs de 2017 vs PIB per cápita (Precio e inflación ajustados en PPA 2017). Fuente: https://www.gapminder.org 93

Figura 3-5. Emisiones de CO_2 totales (Territorial) vs PIB per cápita (Precio e inflación ajustados en PPA 2017). Fuente: https://www.gapminder.org..... 93

Figura 3-6. Consumo de energía por persona (2021) [34]. 95

Figura 3-7. Generación de desperdicio por persona en 2018. Modificado por el autor de [35]. 95

Figura 3-8. Exergía. Incorporación de todos los elementos que influyen en la eficiencia en la climatización.[37]. 99

Figura 3-9. Población urbana estimada y proyectada del mundo, las regiones más desarrolladas y las regiones menos desarrolladas, (1950-2050) [39]. 101

Figura 3-10. Megaciudades del mundo en 2018 y 2030 [43]. 102

Figura 3-11. Desarrollo de los suburbios en las aglomeraciones urbanas. El tamaño de cada parte del mapa es proporcional a la tasa de crecimiento de las áreas urbanas suburbiales. 103

Figura 3-12. Recursos del subsuelo urbano [44]. 104

Figura 3-13. Recurso del subsuelo renovables y no renovables [45]. 105

Figura 3-14. El plan preliminar para el desarrollo y la utilización del espacio subterráneo en Singapur [46]. 107

Figura 3-15. Relación entre la densidad de población en las zonas urbanas y los volúmenes UUI para instalaciones, transporte y resto de usos [48]. 109

Figura 3-16. Densidad de población urbana y dos indicadores de uso del espacio subterráneo urbano [49]. 109

Figura 3-17. Relación entre la densidad de población en las zonas urbanas y los volúmenes de UUI [48]. 110

Figura 3-18. La Ciudad Inteligente en su dimensión superficial. Fuente: propia. 112

Figura 3-19. Intercambio geotérmico integrado en un aparcamiento mecánico subterráneo. Apolonio Morales 29. 2010 Fuente: Instituto Europeo de Innovación. 116

Figura 4-1. Guía de Aprovechamiento Energético de las Infraestructuras Urbanas Subterráneas. 2011. Fundación de la Energía de la Comunidad de Madrid. 120

Figura 4-2. Marco conceptual de las interacciones entre biodiversidad, servicios ecosistémicos, bienestar humano e impulsores del cambio [51]. 122

Figura 4-3. Vínculos entre la biodiversidad, los servicios ecosistémicos y el bienestar del ecosistema humano en el que se encuentra el ecosistema energético [51]. 123

Figura 4-4. Integración del ecosistema urbano de baja energía. 131

Figura 4-5. Ejemplos de Red inteligente tipo 2 - Edificios subterráneos dotaciobnales. Fuente: Instituto Europeo de Innovación 133

Figura 4-6. Cimentaciones termoactivas. Pilotes, pantallas y losas termoactivados en obras de ejecución de aparcamientos subterráneos. Fuente: Enercret 135

Figura 4-7. Ejemplos de Red inteligente tipo 2 - Edificios subterráneos terciarios. Fuente: Instituto Europeo de Innovación. 137

Figura 4-8. Rehabilitación energética del edificio de oficinas en la Calle Apolonio Morales 29 de Madrid. Fuente: Instituto Europeo de Innovación. 139

Figura 4-9. Diseño del intercambiador geotérmico. Gráfica de la cobertura mensual de la demanda energética para refrigeración y calefacción y temperaturas del terreno en la Fuente: Eneres. 140

Figura 4-10. Esquema del sistema de intercambiador geotérmico mixto integrado en el aparcamiento semiautomático Climapark Parklift, bomba de calor geotérmica (GSHP) y forjados termoactivos. Fuente: Instituto Europeo de Innovación. 141

Figura 4-11. Ejecución de la pantalla de pilotes termoactivos del vaso del aparcamiento. Detalle de la viga de atado con los circuitos del colector horizontal. Fuente: Eneres. 142

Figura 4-12. Esquema del sistema de intercambiador geotérmico mixto integrado en el aparcamiento semiautomático Climapark Parklift, bomba de calor geotérmica (GSHP) y forjados termoactivos. Fuente: Eneres. 143

Figura 4-13. Vistas generales del edificio su estado previo a la rehabilitación. Fuente: Eneres. 144

Figura 4-14. Vistas del proceso de ejecución de los intercambiadores verticales y los pilotes termoactivos del sistema Climapark en los espacios ajustados del edificio protegido en rehabilitación. Fuente: Eneres. 144

Figura 4-15. Sección por el sistema integrado de aparcamiento mecánico e intercambiador geotérmico Climapark Levelparker 590 para 27 vehículos. En la figura se aprecia también el sistema de losas termoactivas que resuelve la climatización del edificio, como sistema. Fuente: Eneres. 146

Figura 4-16. Diagramas de consumo anual (€/año) en los sistemas de climatización del edificio según el proyecto original (izquierda) y el finalmente ejecutado (derecha). Fuente: Eneres. 146

Figura 4-17. Vistas del patio y del aparcamiento mecánico que integra el sistema de intercambio geotérmico, tras la obra de rehabilitación integral. Fuente: Sistemas Avanzados Sostenibles. 147

Figura 4-18. Vista general desde el sur del casco histórico de la ciudad de Segovia. En el centro de la imagen el talud ajardinado que soporta el Salón de Isabel II, bajo el que se construye el aparcamiento. Fuente: Instituto europeo de Innovación. 147

Figura 4-19. Vistas generales y planta del aparcamiento mixto de rotación y residentes que se construye completamente integrado bajo el talud, al pie del Salón de Isabel II. Fuente: Instituto Europeo de Innovación. 148

Figura 4-20. Perfiles estratigráficos el Salón de Isabel II y el talud que lo sustenta. Se aprecia claramente el perfil de los estratos rocosos de la colina y los niveles de rellenos que configuran el perfil del talud y el paseo actual. Fuente: Sistemas Avanzados Sostenibles... 150

Figura 4-21. Esquema del sistema de intercambio geotérmico integrado en la pantalla de micropilotes del aparcamiento que alimenta los circuitos de atemperado del pavimento del Salón de Isabel II. Sistema de aprovechamiento geotérmico directo mediante recirculación de agua. Fuente: Instituto Europeo de Innovación. 151

Figura 4-22. Detalle de los circuitos de atemperado del pavimento integrados en la solera de base. Fuente: Instituto Europeo de Innovación. 151

Figura 4-23. Estadísticas de consumo de agua caliente en Europa [54]. 153

Figura 4-24. Esquema de la implantación de una instalación de intercambio para una instalación centralizada de climatización. Fuente: EnergieInnovation 154

Figura 4-25. Bombas de calor en una instalación de intercambio con aguas residuales. Intercambiador, de 200 m de longitud, de la instalación de Zurich-Wipkingen. Fuente: Enercret. 155

Figura 4-26. Posibles ubicaciones para la instalación de recuperación e intercambio de calor en la red de recolección y tratamiento de aguas residuales [55]. 157

Figura 4-27. Distintas técnicas de fabricación, soldadura lineal, soldadura y soplado, y soldadura por puntos en la fabricación de intercambiadores de acero inoxidable. Construcción modular de las secciones, y ensamblaje. Fuente: Enercret. 158

Figura 4-28. Ejecución de las obras de instalación de intercambiadores. Instalado en un colector ovoide existente, e integrado en el hormigón un conducto de sección circular en una nueva construcción. Fuente: Enercret. 159

Figura 4-29. Ejecución de las obras de instalación de un intercambiador. Instalado en un colector ovoide existente, e integrado en el hormigón un conducto de sección circular en una nueva construcción. Fuente: EnergieSchweiz. 164

Figura 4-30. Ejecución de las obras de instalación de intercambiadores: instalado en un colector ovoide existente, e integrado en el hormigón un conducto de sección circular en una nueva construcción. Fuente: EnergieSchweiz. 166

Figura 4-31. Comparación de la eficiencia energética. Para producir la misma cantidad de calor (energía útil), una instalación de aguas residuales de recuperación de calor, con bomba el calor y producción combinada de calor y electricidad consume dos veces menos energía fósil que un sistema convencional. Fuente: Enercret 171

Figura 4-32. Las instalaciones de recuperación de calor de las aguas residuales están formadas por componentes cuya vida útil puede llegar a los 50 años, como por ejemplo un intercambiador de calor. Fuente: Enercret. 172

Figura 4-33. Comparación de costes en instalaciones de intercambio de aguas residuales y de calefacción de gas. Fuente: Eneres 174

Figura 4-34. Plan energético de la ciudad de Uster. Fuente: Basler + Hofmann 176

Figura 4-35. Binningen: escuelas, la administración y piscina comunitaria Se calientan las aguas residuales. Fuente: EnergieSchweiz 179

Figura 4-36. La clave del éxito es una buena coordinación entre todas las partes interesadas en el proyecto: el promotor, el municipio, el contratista, el explotador de la red de saneamiento y los técnicos del proyecto. La renovación de un colector cerca de un edificio

es una oportunidad inmediata para implantar una instalación de intercambio de energía con las aguas residuales. Fuente: EnergieSchweiz.....180

Figura 4-37. Ejemplo de Red inteligente 3. Red de Aguas Residuales. Fuente: Propia. 184

Figura 4-38. Ubicación del intercambiador de aguas residuales [57]. 185

Figura 4-39. Esquema de la red de pilotes termoactivos [57]. 186

Figura 4-40. Instalación del intercambiador de calor de 32m en emisario bypass, junto al edificio de la Rectoría de la UA y conexión al edificio CICFANO en 2 tuberías de PE Ø90mm PN10 [57]. 186

Figura 4-41. Sala técnica con colectores, depósitos y bombas geotérmicas [57]. 187

Figura 4-42. Capturas de pantalla del programa para la gestión automática de todo el edificio desde un ordenador personal [57]. 188

Figura 4-43. Ejemplo de Red inteligente 3. Aguas residuales y sanitarias. Fuente: Propia. ..190

Figura 4-44. Instalaciones de la piscina cubierta e instalaciones del CDM [59]. 192

Figura 4-45. Detalles técnicos del colector de aguas residuales [59]. 193

Figura 4-46. Esquema general de los componentes para la recuperación del calor de las aguas residuales [59]. 194

Figura 4-47. Distintos tipos de intercambiador térmico la recuperación del calor de las aguas residuales [59]. 194

Figura 4-48. Esquema de las secciones del intercambiador [59]. 195

Figura 4-49. Uso del calor reciclado para calentar la piscina y producir agua caliente sanitaria. El tratamiento contra la legionela del ACS (70 ºC) y la generación de calor para la deshumidificación se resolverán utilizando dos calderas de gas [59]. 196

Figura 4-50. Aplicación del calor recuperado a la calefacción de la piscina y a la producción de agua caliente [59]. 197

Figura 4-51. Fases y lugares de ejecución de la obra civil y puesta en marcha de los equipos, necesarios para la instalación del intercambiador en el colector y la conexión a la sala técnica de la piscina [59]. 198

Figura 4-52. Izquierda, plano de sección y fotografía de la presa de contención y de la instalación de bombeo que permite la instalación, en zona de trabajo seca, del intercambiador y de la derivación de bombeo de aguas residuales. A la derecha, fotografía y sección del pozo de acceso. 199

Figura 4-53. Esquema y fotografías del delicado proceso de introducción de las 48 secciones de 3 m del intercambiador, apiladas en el pozo, pivotando hacia la galería del colector y colocadas a lo largo de ella [59]. 199

Figura 4-54. Esquema e imágenes de la instalación de conexión en el lado del edificio. [59]. 200

Figura 4-55. Instalación de conexión en el lado del colector y el intercambiador. [59]. 200

Figura 4-56. Interface de usuario del sistema de control que permite la gestión integrada del sistema [59].....201

Figura 4-57. El resultado económico del ahorro generado por la valorización de energía residual y la combinación de diferentes sistemas [59]. 203

Figura 4-58. Ejemplo de Red inteligente 3. Aguas residuales y sanitarias. Fuente: Propia. ..204

Figura 4-59. Ejemplo de Red inteligente 3. Aguas residuales y sanitarias. Fuente: Propia. ..205

Figura 4-60. La estructura subterránea del Metro de Madrid. 2023. 295 km de túneles, 302 estaciones. Un gigantesco intercambiador geotérmico. Fuente: Metro de Madrid. 207

Figura 4-61. Distribución porcentual de las cargas térmicas en la red de metro de Madrid. Fuente: Metro de Madrid. 210

Figura 4-62. Potencial Energético y Geotérmico del Metro de Madrid. Dirección General de Infraestructuras de Transporte Colectivo. Fuente: Comunidad de Madrid. 211

Figura 4-63. Esquema conceptual de un sistema de refrigeración de estaciones mediante el aprovechamiento del agua de escorrentía en una estación del Metro de Madrid [63]. 213

Figura 4-64. Sección esquemática de la solución aportada por Metro de Madrid para el sistema de refrigeración de estaciones mediante el aprovechamiento del agua de escorrentía en la estación de avenida América [64]. 213

Figura 4-65. Sección esquemática de la solución de integración de sistemas de losa radiante en los andenes de las estaciones de Metro. [64]. 215

Figura 4-66. Esquema del sistema de ventilación del Metro de Madrid [65]. 216

Figura 4-67. Extracción directa del calor que se genera en la parte inferior de los trenes. Fuente: Metro de Madrid. 217

Figura 4-68. Red subterránea de infraestructuras de transporte. 218

Figura 4-69. Componentes del sistema de integración de geoestructuras [66]. 219

Figura 4-70. Esquema sistemas de intercambio geotérmico integrados en las estructuras enterradas de la nueva estación de Conde Casal. Fuente: Instituto Europeo de Innovación - Eneres. 220

Figura 4-71. Muros pantalla sección termoactivada .Fuente: Instituto Europeo de Innovación - Eneres. 221

Figura 4-72. Imágenes de ejecución de muros pantalla de sección termoactivada. Fuente: Instituto Europeo de Innovación - Eneres. 222

Figura 4-73. Red de conductos en zonas altas de la pantalla, red de conductos sobre el nivel de la losa del andén, colectores de paso y colector terminal en la sala de geotermia. Fuente: Instituto Europeo de Innovación - Eneres. 222

Figura 4-74. Esquemas de conexión con las salas técnicas del intercambiador de transportes. Fuente: Instituto Europeo de Innovación - Eneres. 223

Figura 4-75. Esquema de la gestión integrada de los proyectos [66]. 224

Figura 4-76. Esquema de mejoras en los sistemas de clima y aire del intercambiador de transporte. Fuente: Instituto Europeo de Innovación - Eneres. 226

Figura 4-77. Redes Inteligentes 5. Recursos de la infraestructura de movilidad enterrada. Fuente: Propia. 227

Figura 4-78. Esquema conceptual de la activación térmica del revestimiento segmentado del túnel y su conexión a un sistema de bomba de calor en el edificio superior [68]..... 230

Figura 4-79. Esquema en sección de los túneles del bypass sur de Calle 30. Fuente: Madrid Calle 30. 234

Figura 4-80. Localización de los proyectos piloto realizados en los túneles del Bypass de C30 [71] 236

Figura 4-81. Ubicación 1 de los CT de la prueba piloto [71]. 237

Figura 4-82. Ubicación 2 de los CT de la prueba piloto [71]. 238

Figura 4-83. Esquema conceptual de las acciones a implementar en el proyecto piloto para C30 [71]. 238

Figura 4-84. Recursos disponibles en el sistema de C30. Fuente: Eneres 239

Figura 4-85. Esquema del sistema de control [71]. 240

Figura 4-86. Resultados CT1 [71]. 242

Figura 4-87. Resultados CT2 [71]. 242

Figura 4-88. Estudio preliminar de eficiencia en el Centro de Control C30 en Méndez Álvaro mediante el intercambio con el aire de los túneles de C30. Fuente: Eneres. 243

Figura 4-89. Esquema concepto de Exergía. Fuente: Instituto Europeo de Innovación-Eneres. 245

Figura 4-90. Ciclo de Vida. Fuente: Marcel Gomez Consultoría Ambiental. 249

Figura 4-91. Evaluación del Ciclo de Vida de los edificios. Prof. Dr. Niklaus Kohlet. Karlsruhe Instituto of Technology (KIT) 250

Figura 4-92. Análisis del impacto. Inventario y categorías de daño. Fuente: Marcel Gómez Consultoría Ambiental. 251

Figura 4-93. Diagrama de Givoni para la ciudad de Alcalá de Henares [74]. 255

Figura 4-94. Ejemplo de Diagrama del efecto Isla de calor en Madrid [75]. 257

Figura 4-95. Esquemas de refrigeración pasiva o “free-cooling” y de geotermia del Centro Empresarial en Oliveira de Azemeis. Portugal. Arquitecto: Joaquim Morais. Concepto energético ENERES. Fuente: Eneres. 259

Figura 4-96. Principio básico de intercambio entre el medio interior del edificio y el terreno a través de estructuras termoactivas. Fuente: Eneres - Enercret. 262

Figura 4-97. Esquema de un sistema geotérmico de intercambio con cimentaciones termoactivas y estructuras termoactivas [77]. 264

Figura 4-98. Demanda anual de calefacción y refrigeración. Fuente: Eneres. 265

Figura 4-99. El mecanismo de transferencia de calor entre el terreno y las cimentaciones termoactivas [78]. 267

Figura 4-100. Esquemas de distintas opciones de colectores geotérmicos [79]. 268

Figura 4-101. Temperaturas generadas por pilotes termoactivos. Fuente: Eneres - Enercret. 269

Figura 4-102. Red de colectores horizontales. Fuente: Eneres - Enercret. 271

Figura 4-103. Pilotes termoactivos ejecutados in situ. Fuente: Eneres - Enercret. 271

Figura 4-104. Pantalla y solera termoactivas. Fuente: Eneres - Enercret. 272

Figura 4-105. Fabricación de pilotes termoactivos. Fuente Nagelebau- Eneres - Enercret. 273

Figura 4-106. Instalación de los conductos de PE integrados dentro de una losa termoactiva en ejecución. Fuente: Rehau - Eneres. 275

Figura 4-107. Instalación de intercambiadores y colectores de una losa termoactiva. Fuente: Uponor - Eneres 276

Figura 4-108. Circuitos de intercambio premontados sobre un entramado de acero. Fuente: Uponor - Rehau. 277

Figura 4-109. Proceso de termoactivación de un forjado. Fuente: Eneres. 278

Figura 4-110. El edificio está concebido para la interacción con el individuo [82]. 279

Figura 4-111. Relación entre el consumo energético del cuerpo humano (W/m²), temperatura del aire, y temperatura radiante media de los paramentos. Fuente: Lowex - Eneres. 280

Figura 4-112. Mecanismos de intercambio térmico del cuerpo humano. Fuente: Modificado por el autor [82]. 281

Figura 4-113. Instalación de pretratamiento geotérmico de aire. Fuente: Eneres. 282

Figura 4-114. Esquema de una bomba de calor. Fuente: Modificado por el autor [77]. 283

Figura 4-115. Bombas de calor agua-agua. Fuente: Eneres. 284

Figura 4-116. Oficinas de la Administración del Estado en un palacete protegido en el Barrio de Chamberí de Madrid. Fuente: Eneres - Fernández Molina Obras y Servicios. 287

Figura 4-117. Esquema del sistema de intercambio de energía entre el edificio y el terreno a través de cimentaciones y estructuras termoactivas. Fuente: Eneres - Fernández Molina Obras y Servicios. 289

Figura 4-118. Esquema del funcionamiento del sistema de renovación de aire con pretratamiento geotérmico y recuperación de energía. Fuente: Eneres - Fernández Molina Obras y Servicios. 290

Figura 4-119. Fotos de la Rehabilitación del Cuartel de Daoiz y Velarde para Teatro Infantil. Fuente: Eneres - Fernández Molina Obras y Servicios. 291

Figura 4-120. Esquema de funcionamiento de las losas termoactivas e intercambiadores geotérmicos. Fuente: Eneres - Fernández Molina Obras y Servicios. 291

Figura 4-121. Esquema energético edificio CICFANO. Fuente: Eneres. 292

Figura 4-122. Fotos de la ejecución del proyecto CICFANO. Fuente: Eneres 293

Figura 4-123. Fotos del edificio previas a su rehabilitación. 2007. Fuente: Instituto Europeo de Innovación. 294

Figura 4-124. Imágenes del edificio rehabilitado. 2007. Fuente: Instituto Europeo de Innovación.....295

Figura 4-125. Integración de sistemas de captación solar pasiva para calentamiento de aire. Fuente: Instituto Europeo de Innovación. 296

Figura 4-126. Sistema de aparcamiento mecánico IPS Parklift con estructura resuelta con pilotes termoactivos. Fuente: Instituto Europeo de Innovación. 297

Figura 4-127. Sistemas de control y filtrados solar en la envolvente sur y este.. Fuente: Instituto Europeo de Innovación. 300

Figura 4-128. Esquema de principio de la componente geotérmica de la instalación, con doble salida a los forjados termoactivos y a las baterías de la UTA. Fuente: Eneres. 300

Figura 4-129. Circuito de intercambio de calor instalado en la cisterna del edificio de oficinas Apolonio Morales 29 [53]. 303

Figura 4-130. Diagrama del sistema HVAC (lado de la fuente) y los tres tipos de intercambiadores de calor (A), (B), (C). (b) Sistema de monitorización en el sistema de alcantarillado y el hipotético intercambiador de calor (D) [86]. 304

Figura 4-131. Imágenes del aparcamiento mecánico del edificio de oficinas de Apolonio Morales 29, Madrid. Fuente: Instituto Europeos de Innovación. 306

Figura 4-132. Activación de las losas termoactivas. Montaje de la red de los circuitos de intercambio en el forjado y ejecución del plastón posterior. Fuente: Eneres. 307

Figura 4-133. Climatización principal mediante la masa del forjado inercial (refrigeración y calefacción). Fuente: Eneres. 308

Figura 4-134. Dispositivos de control y regulación instalados. Fuente: Eneres.....309

Figura 4-135. Informe de funcionamiento. Fuente: Eneres.....310

Figura 4-136. LEED v4.1 O + M Existing Building Platinum de Apolonio Morales 29, Madrid. Fuente: Eneres.....312

Figura 4-137. Esquema del desarrollo de las redes energéticas a lo largo de la historia. Adaptado por el autor de [92]. 316

Figura 4-138. Esquema de las redes comunitarias como mercados populares asequibles. Fuente: Propia. 322

Figura 4-139. Representación circular de una red comunitaria 5GDHC [95]. 323

Figura 4-140. Temperaturas de funcionamiento. Los intervalos azules indican el modo de funcionamiento de verano. Los valores de temperatura promedio se visualizan con un intervalo de 2 K [96]. 324

Figura 4-141. Fuentes de calor para redes 5GDHC [96]. 325

Figura 4-142. Resumen del año (previsto) de puesta en servicio de los distritos estudiados. La red de 1981 no está representada [96]. 326

Figura 4-143. Sistema DHC Paris Saclay: reciclaje, intercambio y distribución de energía. Modificado por el autor de [99]. 334

Figura 4-144. Redes propuestas en el complejo París-Saclay [99]. 334

Figura 4-145. Modos de operación en las redes propuestas en el complejo París-Saclay [97] 335

Figura 4-146. Mapa de casos de estudio analizados y sus modelos de gobernanza [100]. ..337

Figura 4-147. Cuadro sinóptico de casos de estudio y sus fuentes de energía [100]. 339

Figura 5-1. Objetivos Históricos de la Construcción del Complejo de Nuevos Ministerios. Fuente: Biblioteca Nacional 345

Figura 5-2. Componentes de complejo de Nuevos Ministerios. Fuente: Instituto Europeo de Innovación. 346

Figura 5-3. Actuaciones individuales y transversales para el ecodistrito de Nuevos Ministerios. Fuente: Instituto Europeo de Innovación. 347

Figura 5-4. Objetivos para la eficiencia, escala de trabajo, instrumento de trabajo y resultados, en la actuación en el CNNMM Fuente: Instituto Europeo de Innovación. 359

Figura 5-5. Factores de salubridad y bienestar en la actuación del CNNMM. Fuente: Instituto Europeo de Innovación. 360

Figura 5-6. Rehabilitación del espacio exterior para servicios ecosistémicos en el CNNMM. Fuente: Instituto Europeo de Innovación. 361

Figura 5-7. Compactación del espacio de aparcamiento y liberación de espacio libre en el CNNMM. Fuente: Instituto europeo de Innovación. 362

Figura 5-8. Rehabilitación integral de la envolvente, implementación de sistemas de calidad del aire, climatización de temperatura moderada e iluminación. Fuente: Instituto Europeo de Innovación. 362

Figura 5-9. Resultados de la simulación energética del estado actual. Fuente: Instituto Europeo de Innovación. 365

Figura 5-10. Ahorro en consumos de energía eléctrica totales (kWh) generados por la rehabilitación integral de la envolvente del edificio y de zonas de influencia (espacios verdes) para reducir la demanda. Fuente: Instituto Europeo de Innovación. 367

Figura 5-11. Ahorro en consumos de energía de gasoil (kWh) generados por la rehabilitación integral de la envolvente del edificio y de zonas de influencia (espacios verdes) para reducir la demanda. Fuente: Instituto Europeo de Innovación. 367

Figura 5-12. Reducción general en consumos de energía generada por la aplicación integrada de las actuaciones de la envolvente, ventilación, free-cooling, tratamiento de espacios exteriores, iluminación, sistemas de producción, transformación, distribución y emisión de energía térmica (cambio de equipos). Fuente: Instituto Europeo de Innovación. 368

Figura 5-13. Reducción de las emisiones de CO2 generada por la aplicación integrada de las actuaciones de la envolvente, ventilación, free-cooling, tratamiento de espacios exteriores, iluminación, sistemas de producción, transformación, distribución y emisión de energía térmica (cambio de equipos). Fuente: Instituto Europeo de Innovación. 368

Figura 5-14. Escala numérica de sensación térmica usada por Fanger (PMV). Fuente: Instituto Europeo de Innovación. 369

Figura 5-15. Porcentaje previsto de insatisfechos (PPD) en relación con el Voto Medio Previsto (PMV) [103]. 370

Figura 5-16. Resultados del análisis de confort realizada con el método de Fanger. Temperatura interna de las oficinas. Fuente: Instituto Europeo de Innovación. 370

Figura 5-17. Resultados del análisis de confort realizada con el método de Fanger. Voto Medio Previsto (PMV). Fuente: Instituto Europeo de Innovación. 371

Figura 5-18 Resultados del análisis de confort realizada con el método de Fanger. Porcentaje de Personas en Disconfort (PPD). Fuente: Instituto Europeo de Innovación. 371

Figura 5-19. Esquema gráfico del estado actual los 3 Ministerios a escala individual. Fuente: Instituto Europeo de Innovación. 373

Figura 5-20. Esquema gráfico de estado actual de los 3 Ministerios a escala individual. Fuente: Instituto Europeo de Innovación 374

Figura 5-21. Esquema gráfico la propuesta para la rehabilitación de cada uno de los 3 Ministerios a escala individual. Fuente: Instituto Europeo de Innovación 375

Figura 5-22. Esquema cada uno de modelos individuales por separado y sus ahorros. Fuente: Instituto Europeo de Innovación. 376

Figura 5-23. Esquema concepto de Exergía aplicado a las actuaciones transversales. Fuente: Instituto Europeo de Innovación. 377

Figura 5-24. Esquema de la integración de las actuaciones transversales. Fuente: Instituto Europeo de Innovación. 379

Figura 5-25. Plano de la propuesta de vegetación y rediseño de los espacios exteriores del CNNMM. Fuente: Instituto Europeo de Innovación. 388

Figura 5-26. Plano de la sección de la propuesta de vegetación y rediseño de los espacios exteriores. Fuente: Instituto Europeo de Innovación. 388

Figura 5-27. Modelación de la interacción del edificio con el terreno mediante el método de “Dominios” en DesigBuilder (modelación de “Losas” y “Basamentos”).. Fuente: Instituto Europeo de Innovación. 390

Figura 5-28. Captura de pantalla de los Parámetros considerados en DesigBuilder con el método de “Dominios”. Fuente: Instituto Europeo de Innovación. 391

Figura 5-29. Factores involucrados en la estimación de la evapotranspiración ETc. Fuente: Instituto Europeo de Innovación. 392

Figura 5-30. Parámetros físicos del terreno. Fuente: Instituto Europeo de Innovación. 393

Figura 5-31. Captura de pantalla de la definición de los parámetros físicos del terreno para la localidad de Madrid en DesigBuilder. Fuente: Instituto Europeo de Innovación. 393

Figura 5-32. Modelación de los espacios exteriores, NNMM. Fuente: Instituto Europeo de Innovación. 394

Figura 5-33. Captura de pantalla de las propiedades superficiales del asfalto en DesigBuilder. Fuente: Instituto Europeo de Innovación. 395

Figura 5-34. Captura de pantalla de las propiedades superficiales estimadas para zonas de pavimento duro en DesigBuilder. Fuente: Instituto Europeo de Innovación. 395

Figura 5-35. Captura de pantalla de las propiedades superficiales estimadas para zonas de pavimento permeable y parterre en DesigBuilder. Fuente: Instituto Europeo de Innovación. 395

Figura 5-36. Balance energético a través de la cubierta vegetal. Fuente: Instituto Europeo de Innovación. 396

Figura 5-37. Captura de pantalla de los parámetros relacionados con la cubierta vegetal en DesigBuilder. Fuente: Instituto Europeo de Innovación. 397

Figura 5-38. Estudio solar de la propuesta de espacios exteriores, NNMM. Fuente: Instituto Europeo de Innovación. 398

Figura 5-39. Propuesta para la plantación y ubicación de especies arbóreas. Fuente: Instituto Europeo de Innovación. 399

Figura 5-40. Estudio de la incidencia solar. Fuente: Instituto Europeo de Innovación. 400

Figura 5-41. Estudio de las temperaturas superficiales exteriores, Fuente: Instituto Europeo de Innovación. 401

Figura 5-42. Variación de las ganancias solares [W/m_2] a lo largo de un día tipo de verano (15 de Julio de 2019) en el edificio y en una zona de oficinas con orientación oeste bajo cubierta. Fuente: Instituto Europeo de Innovación. 402

Figura 5-43. Variación de la temperatura operativa [ºC] en una zona de oficinas bajo cubierta a lo largo de un día tipo de verano (15 de Julio de 2019). Fuente: Instituto Europeo de Innovación. 402

Figura 5-44. Solución de aparcamiento subterráneo mecanizado. Fuente: Instituto Europeo de Innovación. 408

Figura 5-45. Plano del estado actual de los espacios exteriores, NNMM. Fuente: Instituto Europeo de Innovación. 410

Figura 5-46. Plano de Propuesta de vegetación y rediseño de los espacios exteriores. Fuente: Instituto Europeo de Innovación. 411

Figura 5-47. Plano de Propuesta de vegetación y rediseño de los espacios exteriores. Fuente: Instituto Europeo de Innovación. 412

Figura 5-48. Geoestructuras energéticas en las instalaciones del aparcamiento subterráneo. Fuente: Instituto Europeo de Innovación. 419

Figura 5-49. Colector de aguas residuales del Barrio de Ríos Rosas bajo el patio del CNNMM. Fuente: Instituto Europeo de Innovación. 420

Figura 5-50. Ámbito físico de implantación de la red de distrito de 5ª generación en el CNNMM. Fuente: Instituto Europeo de Innovación. 422

Figura 5-51. Esquema de la Red de 5ª generación. Fuente: Instituto Europeo de Innovación.. 424

Figura 5-52. Modelo de gestión integrada, flexible, reactiva orientada al servicio y la eficiencia. Fuente: Instituto Europeo de Innovación. 426

Figura 5-53. Modelo de gestión integrada de gestión y control a nivel local y en el eco distrito. Fuente: Instituto Europeo de Innovación. 428

Figura 5-54. Esquema de la implementación de estrategias de recuperación y transferencia de energía almacenamiento, a escala local y a escala superior en el Complejo de los NNMM. Fuente: Instituto Europeo de Innovación. 430

Figura 5-55. Esquema de la integración transversal para una operación y mantenimiento eficientes. Fuente: Instituto Europeo de Innovación. 431

Figura 5-56. Esquema de la transición desde el modelo tradicional de mantenimiento al modelo de gestión integral de activos, operación y mantenimiento / Facility Management. Fuente: Instituto Europeo de Innovación. 445

Figura 5-57. Sistema de información para la gestión de la energía. EMIS: Fuentes de datos e información, capacidades e integración en el sistema integrado de gestión. Modificado por el autor de [107], [108]. 455

Figura 5-58. Esquema del ciclo de funcionamiento para la eficiencia de las EMIS. Modificado por el autor de [107]. 456

Figura 5-59. Esquema de los ahorros agregados por la incorporación de las herramientas EMIS. Fuente: Instituto Europeo de Innovación. 457

Figura 5-60. Esquema de la Red de 5ª generación propuesta en el CNNMM. Fuente: Instituto Europeo de Innovación. 459

Figura 5-61. Capacidades de almacenamiento e intercambio en distintas escalas de la red de 5ª generación del CNNMM. Fuente: Instituto Europeo de Innovación. 460

Figura 5-62. Reducción de la demanda y reducción de emisiones por actuaciones en la red de eco distrito de 5ª generación bajo el sistema integrado de control. Fuente: Instituto Europeo de Innovación. 461

Figura 5-63. Distribución de la Cobertura de la demanda y reducción de emisiones mediante actuaciones en el ecodistrito de 5ª generación bajo el sistema integrado de gestión O+M/M+V. Fuente: Instituto Europeo de Innovación. 462

Figura 5-64. Esquema de la integración y el ahorro generado a través de la red de ecodistrito de 5ª generación en el CNNMM. Fuente: Instituto Europeo de Innovación. 463

Figura 5-65. Beneficios Múltiples de la Eficiencia energética - MBEE [26]. 466

Figura 5-66. Objetivos de Desarrollo Sostenible. [24] 471

Figura 5-67. Esquema de la aplicación, fases y dimensiones, del modelo integrado de aplicación para el aprovechamiento energético del aprovechamiento energético de las infraestructuras subterráneas.....479

Lista de Tablas

Tabla 2.1. Principales fuentes de calor residual y su rango de temperatura [17]. Modificado por el autor. 71

Tabla 2.2. Tabla beneficios múltiples a escala macro y ODS asociado. 84

Tabla 4.1. Emisiones anuales según el proyecto original (proyectado) y el finalmente ejecutado (estudio) y balance de reducción de emisiones (ahorro). Fuente: Eneres. 145

Tabla 4.2. Comparación de las emisiones de CO_2 de los diferentes sistemas de energía. Fuente: Enercret. 171

Tabla 4.3. Datos del proyecto [57]. 184

Tabla 4.4. Evaluación financiera de CICFANO [57]. 188

Tabla 4.5. Consumos anuales y emisiones del CDM [59]. 191

Tabla 4.6. Balance de reducción de emisiones del sistema integrado [59]. 202

Tabla 4.7. El resultado económico del ahorro generado por la valorización de energía residual y la combinación de diferentes sistemas [59]. 202

Tabla 4.8. Costos de las estrategias implementadas. Fuente: Propia 205

Tabla 4.9. Datos sobre la infraestructura del Metro de Madrid y sobre su crecimiento exponencial a lo largo del periodo 1980 / 2021. Elaborado a partir de datos de Metro de Madrid [60], [61]. 208

Tabla 4.10. Plan de aprovechamiento de aguas freáticas del Metro de Madrid [62]. 212

Tabla 4.11. Tipos de ventilación y sus caudales en Metro de Madrid [65]. 216

Tabla 4.12. Estudio de las épocas de lluvia y meses más secos y nivel de precipitaciones de Madrid. Fuente: AEMET. 254

Tabla 4.13. Cálculo la distribución mensual de energía demandada de calefacción y refregeración del edificio. Fuente: Instituto Europeo de Innovación. 296

Tabla 4.14. Análisis DAFO aplicado a la tecnología 5GDHC [88]. 318

Tabla 4.15. Principales características complejo París-Saclay [97]. 336

Tabla 5.1. Resultados de la simulación energética del estado actual. Fuente: Instituto Europeo de Innovación. 365

Tabla 5.2. Resultados estimados de la implementación por fases de las medidas de mejora. Fuente: Instituto Europeo de Innovación. 366

Tabla 5.3. Resumen de las reducciones de demanda energética y de emisiones correspondientes a la energía no demandada y a la reducción del consumo. Fuente: Instituto Europeo de Innovación. 380

Tabla 5.4. Áreas de actuación, superficies y acciones a acometer sobre la envolvente del CNNMM. Fuente: Instituto Europeo de Innovación. 383

Tabla 5.5. Reducción de la demanda de energía de la correspondiente reducción de emisiones, obtenidas mediante las actuaciones de la envolvente en los tres Ministerios, MITECO, MITES y MITMA, del CNNMM. Fuente: Instituto Europeo de Innovación. 384

Tabla 5.6. Resumen de las reducciones de demanda energética y la reducción de emisiones correspondientes a las actuaciones transversales sobre la envolvente. Fuente: Instituto Europeo de Innovación. 385

Tabla 5.7. Reducción de la demanda y reducción de emisiones obtenida mediante las actuaciones en los espacios libres. Fuente: Instituto Europeo de Innovación. 389

Tabla 5.8. Definición de los parámetros de referencia del terreno del modelo de Kusuda-Achenbach, para la localidad de Madrid. Fuente: Instituto Europeo de Innovación. 394

Tabla 5.9. Reducción de la demanda de refrigeración mediante las actuaciones en los espacios libres. Fuente: Instituto Europeo de Innovación. 403

Tabla 5.10. Reducción de la demanda y reducción de emisiones obtenida mediante las actuaciones en los espacios libres. Fuente: Instituto Europeo de Innovación. 403

Tabla 5.11. Especies vegetales recomendadas para la propuesta (arboles). Fuente: Instituto Europeo de Innovación. 404

Tabla 5.12. Especies vegetales recomendadas para la propuesta (arbustos). Fuente: Instituto Europeo de Innovación. 405

Tabla 5.13. Especies vegetales recomendadas para la propuesta (vivaces). Fuente: Instituto Europeo de Innovación. 406

Tabla 5.14. Especies vegetales recomendadas para la propuesta (trepadoras y tapizantes). Fuente: Instituto Europeo de Innovación. 406

Tabla 5.15. Comparativa de la energía incorporada y de las emisiones de gases con efecto invernadero correspondientes a sistemas de aparcamiento convencional y

semiautomático, en edificio subterráneo. Fuente: Guía de Ahorro Energético en Garajes y Aparcamientos. [105] 413

Tabla 5.16. Comparativa de la energía consumida y de las emisiones de gases con efecto invernadero correspondientes a sistemas de aparcamiento convencional y semiautomático, en la operación de un aparcamiento subterráneo y en la circulación de los vehículos dentro del aparcamiento. Fuente: Guía de Ahorro Energético en Garajes y Aparcamientos. [105] 413

Tabla 5.17. Comparativa de la energía consumida y de las emisiones de gases con efecto invernadero correspondientes al trayecto hasta y desde el punto de trabajo. Fuente: Guía de Ahorro Energético en Garajes y Aparcamientos. [105] 413

Tabla 5.18. Esquema comparativo de los contratos actuales de mantenimiento integral y la propuesta de contratos. Puntos fuertes y puntos débiles. Fuente: Instituto Europeo de Innovación. 435

Tabla 5.19. Esquema de actuaciones hacia un modelo de gestión integrada. Fuente: Instituto Europeo de Innovación. 436

Tabla 5.20. Esquema de las ventajas de un Gestor de Facility Management vs un Gestor de Contrato. Fuente: Instituto Europeo de Innovación. 440

Tabla 5.21. Esquema de la gestión integral de activos, operación y mantenimiento de MITECO, MITES y MITMA. FACILITY MANAGEMENT. Fuente: Instituto Europeo de Innovación. 441

Tabla 5.22. Servicios de Facility Management. Fuente: Instituto Europeo de Innovación. .442

Tabla 5.23. Reducción de la demanda y reducción de emisiones por actuaciones en la red de eco distrito de 5ª generación bajo el sistema integrado de control. Fuente: Instituto Europeo de Innovación. 461

Tabla 5.24. Estimación de reducción de la demanda y reducción de emisiones mediante actuaciones en la red de ecodistritos de 5ª generación bajo el sistema integrado de gestión O+M/M+V. 462

Tabla 5.25. Listado de Beneficios Múltiples de la Eficiencia Energética a escala Macro (social) [101]. 468

Tabla 5.26. de Beneficios Múltiples de la Eficiencia Energética a escala micro (individuales) [101]. 469

Tabla 5.27. Beneficios Múltiples de la Eficiencia Energética a escala Macro y ODS asociados [101]. 470

Tabla 5.28. Beneficios a incluir en los cálculos económicos monetizados y superposición de actuaciones en el cómputo de beneficios globales [101]. 472

Abreviaturas y Acrónimos

2GDHC	Red de Distrito de Calefacción y Refrigeración de 2ª Generación o su término en inglés 2nd Generation District Heating and Cooling
3GDHC	Red de Distrito de Calefacción y Refrigeración de 3ª Generación o su término en inglés 3rd Generation District Heating and Cooling
4GDHC	Red de Distrito de Calefacción y Refrigeración de 4ª Generación o su término en inglés 4th Generation District Heating and Cooling
5GDHC	Red de Distrito de Calefacción y Refrigeración de 5ª Generación o su término en inglés 5th Generation District Heating and Cooling
ACS	Agua Caliente Sanitaria
ADAC	Asociación de Empresas de redes de Calor y Frío
AGE	Agencia General del Estado
AM	Gestión de Activos o su término en inglés Asset Management
APP	Asociación Público Privada
ASO	Optimización de Tienda de Aplicaciones o su término en inglés App Store Optimization
BAS	Sistemas de Automatización de Edificios o su término en inglés Building Management Systems
BEMS	Sistema de Gestión Energética de Edificios o su término en inglés Building Energy Management Systems
BIM	Modelado de Información de Construcción o su término en inglés Building Information Modelling
BMCS	Sistema de Gestión y Control de Edificios o su término en inglés Building Management and Control System
BMS	Sistema de Gestión del Edificio, también conocido Building Management System
C30	Calle 30
CAE	Coordinación de Actividades Empresariales
CAPEX	Gastos de Capital o su término en inglés Capital Expeditare
CCF	Término Fijo de los Costes de Comercialización
CCTV	Circuito Cerrado de Televisión
CDM	Centro Deportivo Municipal
CECs	Comunidades Ciudadanas de Energía o si término en inglés Citizen Energy Communities
CENER	Centro Nacional de Energías Renovables
CH	Enfriadora o su término en inglés Chiller
CHP	Planta Central de Calefacción o su término en inglés Central Heating Plant

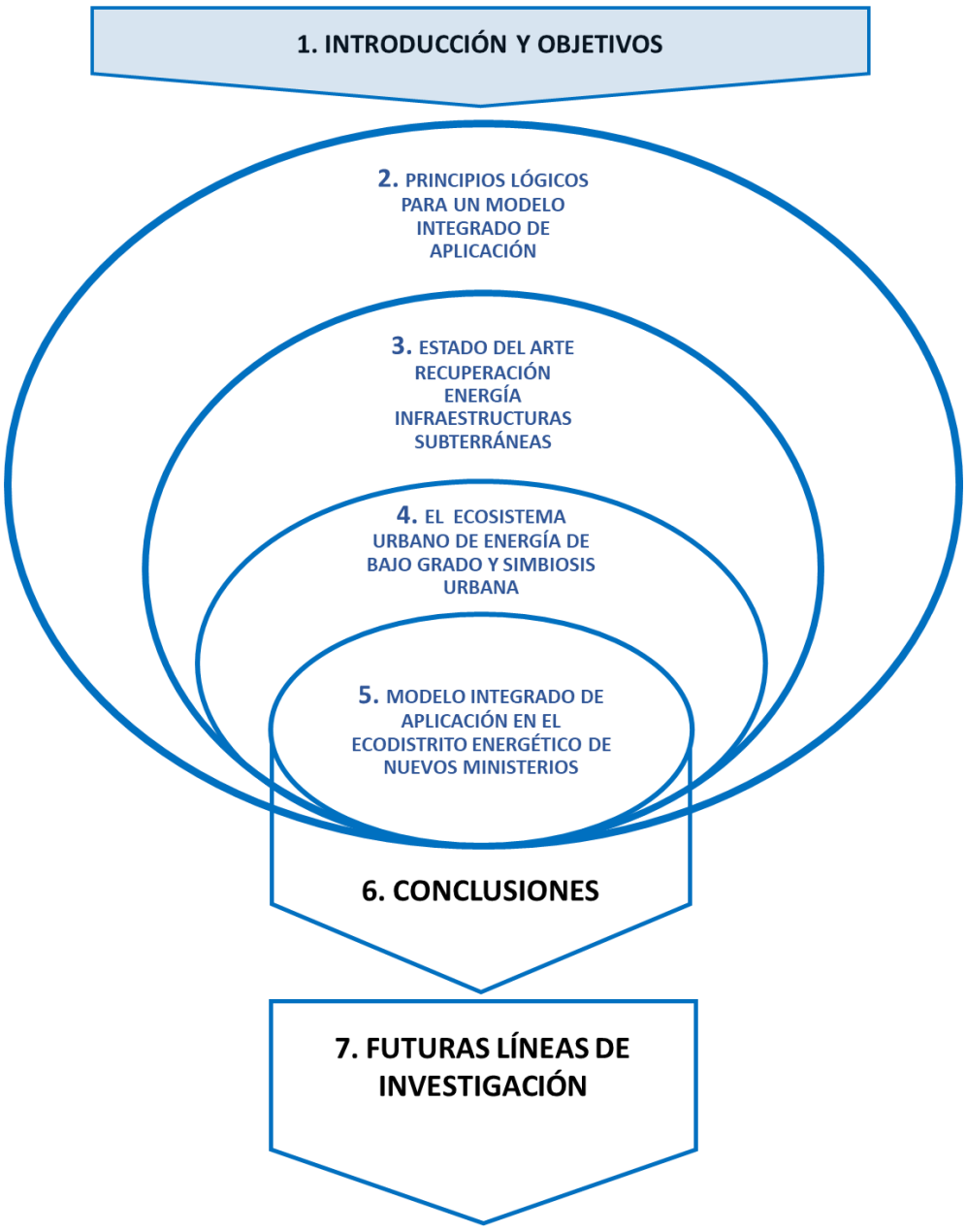
CICFANO	Complejo Interdisciplinario de Ciencias Físicas. Aplicada a la Nanotecnología y la Oceanografía de la Universidade de Aveiro, o su nombre en portugués Complexo Interdisciplinar de Ciências Físicas. Aplicadas à Nanotecnologia e à Oceanografia
CNNMM	Complejo de Nuevos Ministerios
COMBI	Project Calculating and Operationalising the Multiple Benefits of Energy Efficiency Improvements in Europe
COP	Coeficiente de Rendimiento o su término en ingles Coefficient of Performance
CRE	Gestión de la Cartera de Edifico o su término en inglés Corporate Real State
CT	Centro de Transformación
CT	Cuarto Técnico
CV19	Covid 19
DAFO	Debilidades, Amenazas, Fortalezas y Oportunidades
DBO	Diseño, Construcción y Operación o su término en inglés Design, Build and Operate
DC	Red de Refrigeración, o su nombre en inglés District Cooling
DDD	Desinsectación, Desratización y Desinfección
DGE	Energía Geotérmica Profunda, o su término en inglés Deep Geothermal Energy
DH	Red de Calefacción, o su término en inglés District Heating
DH&C	Red de calefacción y Refrigeración, o su término en inglés District Heating & Cooling
DHC	Red de Urbana de calefacción y refrigeración o su término en inglés District Heating and Cooling
DHW	Consumo Doméstico de Agua Caliente o su término en ingles Domestic Hot Water Usage
DRE	Energías Renovables Distribuidas, o en inglés Distributed Renewable Energy
EAWAG	Instituto Federal Suizo para la Ciencia y la Tecnología Acuática, o su nombre en alemán Eidgenössische Anstalt für Wasserversorgung, Abwasserreinigung und Gewässerschutz
EBCx	Puesta en Marcha de Edificios Existentes o su término en ingles Existing-Building Commissioning
EE	Eficiencia Energética
EED	Directiva de Eficiencia Energética o su término en inglés Energy Efficiency Directive
EER	Ratio de Eficiencia Energética o su término en inglés Energy Efficiency Ratio
EIS	Sistema de Información de la Energía o su término en inglés Energy Information Systems
EMIS	Sistema de Gestión de la Energía o su término en inglés Energy Management Information System

ENERTUN	Segmento prefabricado de túnel energético, o su término en inglés Energy Tunnel Segmental Lining
EPA	United States Environmental Protection Agency
EPAPS	Establecimiento Público de Urbanismo de París Sacley o su término en francés Etablissement Public d'Amenagement Paris Saclay
EPDB	Directiva de Eficiencia Energética en Edificios o su término en inglés Energy Performance of Buildings Directive
ES	Energía, Eficiencia y Sostenibilidad
FAO	Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación o su término en inglés Food and Agriculture Organization
FDD	Detección y Diagnóstico de Fallas o su término en inglés Fault Detection and Diagnostics
FENERCOM	Fundación de la Energía de la Comunidad de Madrid
FM	Gestión de Instalaciones o su término en inglés Facility Management
FS	Facilities Servicies
FSP	Fundación Biodiversidad
GIV	Gestor Inteligente de Ventilación
GMAO	Gestión de Mantenimiento Asistida por Ordenador
GSHP	Bomba de Calor Geotérmica o su término en inglés Ground Source Heat Pump
H&C	Calefacción y Refrigeración, o su término en inglés Heating & Cooling
HE	Intercambiador de Calor, o su término en inglés Heat Exchanger
HP	Bomba de Calor o su término en inglés Heat Pump
HPs	Bombas de Calor o su término en inglés Heat Pumps
HT DHC	Calefacción Urbana de Alta Temperatura, o su término en inglés High Temperature District Heating and Cooling
HVAC	Calefacción, Ventilación y Aire Acondicionado, o su término en ingles Heating, Ventilation and Air Conditioning
ICAO	The International Civil Aviation Organization
IDEA	Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía
IEA	Agencia Internacional de la Energía también conocida como International Energy Agency
IFM	Gestión Integral de Instalaciones o su término en inglés Integrated Facility Management
IoT	Internet de las cosas, se refiere a la red colectiva de dispositivos conectados, o su término en inglés Internet Of Things
IPC	Índice de Precios de Consumo
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
IPMVP	Protocolo Internacional de Medida y Verificación del Ahorro Energético o su término en inglés International Performance Measurement and Verification Protocol

IRENA	Agencia Internacional de Energías Renovables o su nombre en inglés International Renewable Energy Agency
IT	Incapacidad temporal
LCA	Análisis del Ciclo de Vida o su término en inglés Life Cycle Assessment
LCCA	Análisis de Costes del Ciclo de Vida o sus siglas en inglés Life Cycle Cost Analysis
LEC	Comunidades Locales de Energía o su término en inglés Local Energy Communities
LED	Diodo emisor de Luz o su término en inglés Light-Emitting Diode
LEED	Líder en Eficiencia Energética y Diseño
M+V	Medida y verificación de los resultados
MBCx	Puesta en Marcha Basada en Monitorización o su término en inglés Monitoring-Based Commissioning
MBEE	Los Beneficios Múltiples de la Eficiencia Energética o su término en inglés, Multiple Benefits of Energy Efficiency
MITECO	Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico
MITES	Ministerio de Trabajo y Economía Social
MITMA	Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana
NACE	Nomenclatura de Actividades Económicas Europea o su término en inglés Nomenclature of Economic Activities
NEXT	Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia
NMS	Sistemas de Monitoreo y Administración de Redes, también conocidos Network Management System
NNMM	Nuevos Ministerios
O+M	Operación y Mantenimiento
ODS	Objetivos de Desarrollo Sostenible
OM	Oficialías Mayores
ONU	Organización de Naciones Unidas o su término en inglés United Nations
OPEX	Gastos Operacional o su término en inglés Operating Expenses
PCI	Protección Contra Incendios
PE	Polietileno
PIB	Producto Interior Bruto
PM	Gestión Integrada de Proyectos o su término en inglés Project Management
PMV	Voto Medio Previsto o su término en ingles Predicted Mean Vote
PNUMA	Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente
PPA	Paridad del Poder Adquisitivo
PPD	Porcentaje Previsto de Insatisfechos o su término en inglés Predicted Percentaje of Dissatisfied
PPP	Partenariado Público Privado

PRL	Prevención de Riesgos Laborales
PRTR	Registro Estatal de Emisiones y Fuentes Contaminantes
RECs	Comunidades en Energías Renovales o su término en ingles Renewable Energy Communities
RES	Fuentes de Energía Renovables, o su término en inglés Renewable Energy Sources
RITE	Reglamento Instalaciones Térmicas en los Edificios
RMS	Sistema de Gestión de Recursos o su término en inglés Resource Management System
SAI	Sistema de Alimentación Ininterrumpida
SES	Sistemas de Energía Compartida, o su término en inglés Shared Energy Systems
SGE	Energía Geotérmica Superficial, o su término en inglés Shallow Geothermal Energy
SGE	Sistema de Gestión de la Energía o su término en inglés Energy Management Information System
SGU	Sistema de Gestión Urbana
SIA	Normas de la Sociedad Suiza de Ingenieros y Arquitectos o su término en alemán Schweizerische Ingenieur- und Architektenverein
SLA	Acuerdo de Nivel de Servicio o su término en inglés Service Level Agreement
SPF	Factor de Rendimiento Medio Estacional Estimativo o su término en inglés Seasonal Performance Factor
T/HR	Temperatura y Humedad Relativa
TABS	Estructuras Termoactivas, también denominadas en inglés Thermally Activated Building Structures
TES	Almacenamiento de Energía Térmica o su término en inglés Thermal Energy Storage
TIC	Tecnologías de la Información y las Comunicaciones
UE	Unión Europea
UN	Naciones Unidas o su término en inglés United Nations
UTA	Unidad de Tratamiento de Aire
UUI	Infraestructura Urbana Subterránea o su término en inglés Urban Underground Infrastructure
UUS	Espacio Subterráneo Urbano, o su término en inglés Urban Underground Space
VSA	Asociación Suiza Protección de las Aguas o su nombre alemán Verband Schweizer Abwasser
WP	Gestión de Espacios de Trabajo o su término en inglés Work Place
WSHP	Bombas de Calor Agua-Agua Descentralizadas o su término en inglés Water Source Heat Pump

1. Introducción y objetivos



1.1. Introducción

Tal como se viene planteando desde los años 70 del siglo pasado y sucesivamente, se va poniendo en evidencia en episodios climáticos, sociales, económicos y geopolíticos cada vez más agudos, intensos y críticos, que el metabolismo energético contemporáneo no es sostenible [1].

Desde un punto de vista sistémico básico, solo orientado a la evaluación de la entrada y salida de recursos de lo que actualmente es un sistema abierto y dependiente de fuentes externas, se detectan problemas críticos tanto en la entrada de recursos en el sistema como en la salida del mismo de parte de los mismos transformados en residuos.

Aunque los combustibles fósiles y los recursos minerales asequibles están disminuyendo, los impactos de los actuales sistemas de producción y consumo (especialmente sobre el cambio climático, los ecosistemas y la salud humana) tienen costos ambientales, sociales y económicos cada vez mayores [1].

La mayoría de los desafíos que afronta la humanidad están vinculados a la estructura económica del sistema energético, fundamentado en la explotación lineal de recursos de la litosfera y la combustión, y la cuestión crucial es si a escala global se puede lograr una transición rápida hacia una alternativa sostenible, basada en fuentes renovables incluyendo la reducción y reutilización de los residuos.

El concepto de transición está vinculado al de hibridación dinámica y a una evolución progresiva, nunca completa, desde la linealidad de la explotación de los recursos de la litosfera a la circularidad en el uso de recursos en el ámbito de la biosfera.

La forma actual de generar, distribuir y consumir energía, constituye el negocio más grande del Planeta el más impactante y el de más trascendencia social a todas las escalas. El negocio actual de la energía se consolida y expande a escala global a través de una combinación de factores como la longevidad de la infraestructura asociada a la extracción [1], generación distribución y comercialización; a la revolución de la tecnología de la información, al crecimiento de la población mundial e incluso a las recientes crisis regionales y globales de poder, seguridad, dominio financiero, preeminencia política y justicia social.

Es evidente que en condiciones de recesión y crisis el sector de las nuevas energías y cualquier planteamiento vinculado a la eficiencia con extensión social masiva, sufre mucho más que el muy consolidado sector de la energía convencional.

Casi dos años después de la invasión de Ucrania por Rusia, que ha provocado el realineamiento político, económico y energético de Europa y a la que ahora se une un recrudecimiento local del conflicto crónico que desde Oriente Medio afecta a toda la cuenca mediterránea, nos encontramos sumidos en un proceso de reinterpretación y ajuste de los paradigmas y taxonomías que estructuraban las estrategias a corto plazo, 2030, y medio plazo, 2050, para la eficiencia energética en nuestro contexto europeo. Estas fracturas y tensiones ponen en una situación crítica los acuerdos globales que han planteado desde hace décadas las instituciones y cumbres internacionales para afrontar en un consenso global los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de las Organización de Naciones Unidas (ONU). La situación económica general presenta un panorama desfavorable, caracterizado por una inflación continua, incremento en los intereses de los préstamos, altos niveles de deuda y un aumento en el sufrimiento social.

No hay ningún país que sea una entidad energética aislada, y todos los países están expuestos a los peligros del cambio climático y la desigualdad social. La colaboración se ha vuelto más necesaria que nunca antes. En estos tiempos de gran tensión, los gobiernos deben hallar métodos para salvaguardar la colaboración en asuntos energéticos y climáticos, lo cual implica establecer un sistema de comercio global que se base en reglas, responsabilidades y promueva la innovación y la transferencia de tecnología. Si no aprovechamos los beneficios de tener mercados energéticos interconectados y equilibrados, el actual modelo energético podría causar impactos irreversibles. Además, si no se logra una armonización en el funcionamiento de estos mercados para enfrentar los desafíos imprevistos a nivel internacional, la seguridad energética y la seguridad en general podrían estar en peligro [2].

En la actualidad, la temperatura promedio de la superficie de la Tierra ha aumentado aproximadamente 1,2 ºC en comparación los valores anteriores a la industrialización. Esto está dando lugar a eventos climáticos extremos como olas de calor, a pesar de que las emisiones de gases de efecto invernadero todavía no han alcanzado su máximo. El sector de energía se encuentra en el centro de la problemática del aire contaminado, el cual afecta a más del 90% de la población global y se relaciona con más de 10 millones de fallecimientos prematuros cada año. En algunos países, se ha observado una desaceleración e incluso un retroceso

en los avances para proporcionar acceso a la electricidad y cocinas no contaminantes [2].

La cifra de inversión en energías renovables ha experimentado un incremento del 40% a partir del año 2020. Además del impulso para disminuir las emisiones, existen otros motivos cruciales. Además, hay fuertes razones de índole económica que respaldan el uso de tecnologías consolidadas para generar energía renovable. Además de eso, son relevantes la estabilidad energética, especialmente en naciones que dependen de la importación de combustibles, las tácticas empresariales y el interés por generar oportunidades laborales en la industria de energías renovables [2].

Aunque las tecnologías limpias no están avanzando al mismo ritmo, existen casos destacados que demuestran que el cambio se está acelerando [2] (Figura 1-1):

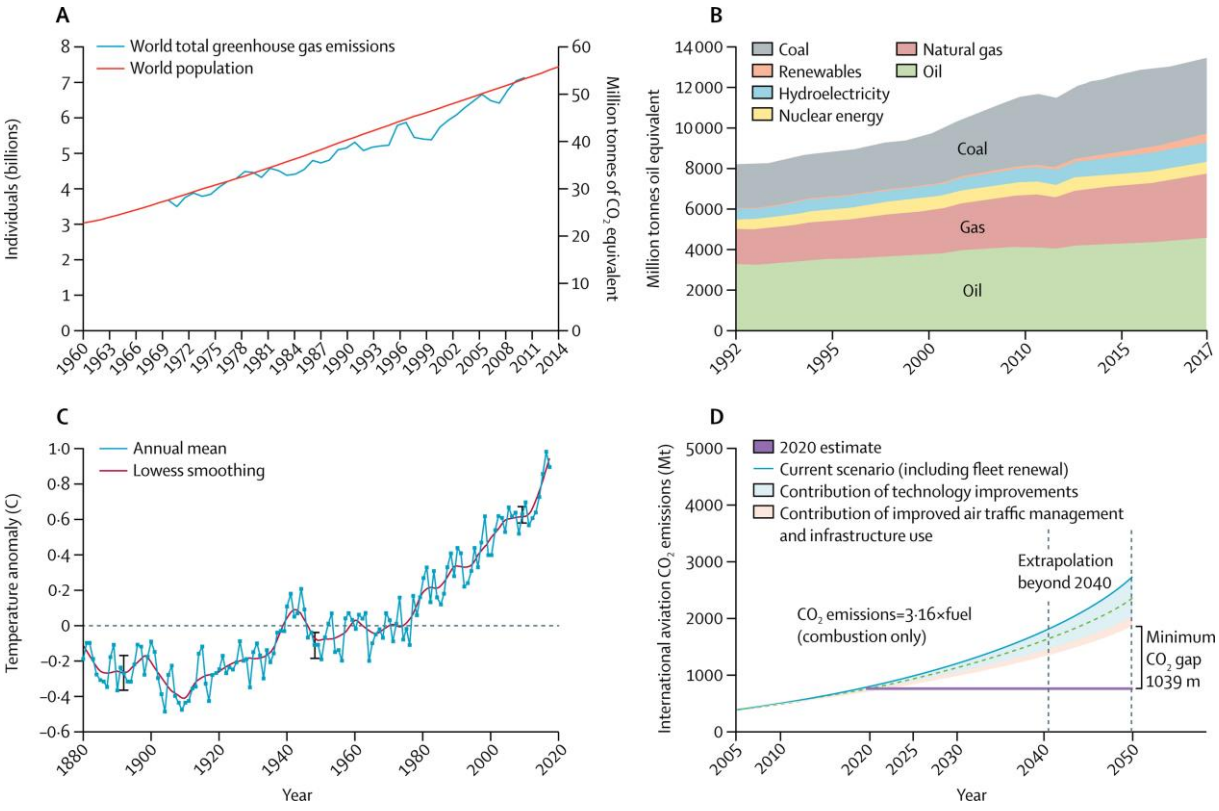


Figura 1-1. Emisiones de gases de efecto invernadero, consumo energético y calentamiento global: la tendencia imparable [3]*. A) Población mundial y emisiones de gases de efecto invernadero. Datos de la base de datos del Banco Mundial [4]. B) Consumo mundial de energía primaria. Reproducido de BP Statistical Review of World Energy 2018 [5]. C) Índice de temperatura tierra-océano, 1880 al presente, con período base 1951-1980. Reproducido del Instituto Goddard de Estudios Espaciales de la NASA [6]. D) Tendencias de las emisiones de CO2 de la aviación internacional. Reproducido del informe ambiental de la ICAO de 2016 [4].*

Tal como se ilustra en las gráficas recogidas en la Figura 1-1, la población mundial sigue creciendo y de la misma forma las emisiones de gases de efecto invernadero Figura 1-1A). El 85 % de la energía que alimenta el desarrollo mundial está basado en el carbono. En 2017, el 85 % de la energía mundial todavía se generaba a partir de combustibles fósiles; el resto de energías provienen de fuentes hidroeléctrica (7 %), nuclear (4,4 %) y renovables (3,6 %), (Figura 1-1B). El consumo de estos recursos provoca irremediablemente el calentamiento global. En el índice de temperatura tierra-océano, 1880 al presente, con período base 1951-1980, la línea azul sólida es la media anual global, la línea roja sólida es el mínimo suave de 5 años, las barras de incertidumbre azules (límite de confianza del 95 %) sólo representan el muestreo espacial incompleto (Figura 1-1C). El calentamiento tierra-océano tiene consecuencias desastrosas. Por lo tanto, es imperativa la reducción rápida del consumo de recursos. El modelo global dominante basado en la competencia, los viajes múltiples (Figura 1-1D), la rápida rotación de bienes y la acumulación de nuevas actividades, llevan a los humanos y las máquinas al límite de su capacidad. Sin embargo, hay soluciones. La figura Figura 1-1D ilustra las tendencias de las emisiones de CO_2 de la aviación internacional. Esta cifra considera las emisiones de CO_2 asociadas con la combustión de combustible para aviones, suponiendo que 1kg de combustible para aviones quemado genera 3,16 kg de CO_2 y teniendo en cuenta las mejoras operativas. La Organización de Aviación Civil Internacional, o su nombre en inglés International Civil Aviation Organization (ICAO), estima que el uso de biocombustibles, en lugar de combustible para aviones, podría garantizar que las emisiones no superen los niveles de 2020, llenando así la brecha de 1.039 Mt de CO_2 [4].

A pesar de que el sistema energético actual genera una serie de efectos negativos, muchos de los cuales perturban el clima y amenazan los ecosistemas de los que se depende, y que esos efectos se conocen desde hace varias décadas, y de que la sostenibilidad es una aspiración generalizada, no se ha producido una mitigación real de las causas: la generación y el uso de fuentes de energía convencionales.

De hecho, aunque la proporción combinada de recursos fósiles y nucleares en el suministro total de energía primaria del mundo se ha mantenido estable desde 1973, el suministro absoluto de estos recursos se ha multiplicado varias veces (aproximadamente un 600 %) en los últimos 45 años. Paralelamente a este aumento, ha aumentado el poder, la multiplicación de los beneficios y la concentración de beneficiarios entre los agentes económicos inversores y en el ámbito del gobierno corporativo del sector energético.

1.1.1. Problemas causados por el sistema energético actual

La generación de energía para la industria y los consumidores tiene múltiples efectos secundarios negativos; entre otros, las cantidades precarias de emisiones de CO_2, la contaminación del aire, la tierra y el agua, los residuos nucleares; los conflictos geopolíticos, la inminente escasez de ciertas reservas energéticas y el aumento de los precios de los alimentos [1].

De hecho, la conciencia pública y política de la problemática sobre los impactos del uso de energía fósil y nuclear han aumentado desde la década de 1970 [5]. Se han establecido tratados, reglamentos y leyes para combatir estos impactos a nivel nacional e internacional [6].

Desde principios de la década de 1990, y acelerándose a principios y mediados de la década de 2000, las políticas para promover la energía y la tecnología sin efectos secundarios negativos significativos han aumentado sustancialmente en número. Sin embargo, en el mismo período no se ha producido una disminución relativa significativa de la explotación de las fuentes de energía convencionales. En términos absolutos, el suministro mundial de energía procedente de fuentes primarias convencionales se ha más que duplicado desde 1973 [1].

Los efectos negativos de la generación y el uso de la energía se describen mejor dividiendo el sistema energético mundial ("el sistema energético") en dos subsistemas [1]:

- Sistema convencional con fuentes de energía (y tecnologías asociadas) que generan impacto y problemas ambientales, sociales y económicos.

  Comprende petróleo, carbón, gas natural, uranio y biocombustibles como insumo de energía y, entre otros, la gasificación, craqueo y refinamiento del carbón, y el secuestro de CO_2 como tecnologías.

- Sistema alternativo con fuentes de energía (y tecnologías) que no lo hacen.

  El sistema de energía alternativa comprende la energía solar, eólica, geotérmica e hidroeléctrica; entre sus tecnologías asociadas se encuentran la tecnología solar concentrada y las turbinas eólicas. Este sistema no genera (casi) contaminación del aire, la tierra o el agua y no genera emisiones de CO_2; es abundante en términos de sol, viento, calor geotérmico y agua; su producción causa el estrés geopolítico mínimo; y no ejerce ninguna influencia en los precios mundiales de los alimentos.

- Esto no quiere decir que el sistema alternativo no generará serios problemas a largo plazo, pero sí que en la actualidad sus tecnologías energéticas tienen la capacidad de mitigar los problemas actuales del sistema energético.

Las fuentes y tecnologías de estos subsistemas se distinguen en función de:

- Sus implicaciones ambientales (por ejemplo, la contaminación del aire, la tierra o el agua; emisiones de CO_2; generación de residuos nucleares).
- La finitud de su disponibilidad.
- El estrés geopolítico que acompaña a su extracción y comercialización.
- Su impacto en la disponibilidad de tierras de cultivo y los precios de los alimentos (específicamente en el caso de los biocombustibles).

A escala global las cifras de crecimiento de la explotación y uso de energías alternativas respecto a las de la energía convencional llevan a la conclusión ineludible de que, en números absolutos, el crecimiento de la oferta de energía alternativa es totalmente superado por el crecimiento de la oferta de energía convencional.

Por otra parte, la Agencia Internacional de la Energía, IEA, constata que, debido a las crisis financieras, la inversión en generación de electricidad basada en energías renovables disminuyó relativamente más que la inversión en otros tipos de capacidad de generación de energía a finales de 2008 y principios de 2009, y sin incentivos fiscales gubernamentales, habría disminuido en casi un 30 % [2].

Entre 2010 y 2022 el desarrollo técnico asociado a la explotación solar fotovoltaica, eólica, al desarrollo del vehículo y el almacenamiento eléctrico y, recientemente nuevas formulaciones tecnológicas de la generación nuclear ha impulsado un crecimiento importante de la explotación y uso de recursos renovables que, no obstante, en Europa y las economías occidentales viene acompañado de un impulso estratégico de la explotación de fuentes no renovables a través de nuevas técnicas de prospección y extracción y nuevas tecnologías de transformación. Y ello también porque en un marco de superpotencias emergentes y el refuerzo de bloques geoestratégicos de países en desarrollo, regiones y culturas, la seguridad del suministro vinculada al desarrollo sostenido y el estado del bienestar en occidente están sometidas a una capacidad de respuesta, flexibilidad y búsqueda permanente de alternativas.

La seguridad del suministro y la autarquía energética emergen en este momento como aspectos fundamentales en la supervivencia del modelo político democrático,

del modelo de bienestar social y de la estructura sustentante de valores éticos de Europa y Occidente. Supervivencia que también está vinculada a la capacidad de cambio y adecuación en esas tres dimensiones de las reglas del modelo europeo: capacidad de respuesta, flexibilidad y búsqueda permanente de alternativas.

La dotación de recursos públicos para la relocalización industrial de los sectores de energías renovables, y el desarrollo acelerado de capacidades de producción en este frente es enorme, creciente y se orienta a objetivos cada vez más ambiciosos y a cada vez más corto plazo. Es una cuestión de supervivencia. El sistema energético occidental se ha sustentado durante más de un siglo sobre los modelos colonial y postcolonial de extracción y explotación de los recursos primarios de países en subdesarrollo o en vías de desarrollo. Este modelo se perpetua pero en paralelo surgen directrices políticas que reaccionan ante él y se legitiman con variantes del modelo que, aunque sustancialmente equivalentes en su mecánica de explotación, están entregando el protagonismo a nuevos agentes, superpotencias y bloques emergentes y a una variante radicalizada y fraccionada del bloque occidental.

Este contexto invita, a ampliar las dimensiones de nuestra prospección, a multiplicar las perspectivas, a buscar soluciones más allá de los planteamientos actuales, fundamentados en el debate sobre la cualidad renovable o no y del impacto de las fuentes primarias de energía utilizadas, y a buscarlas a la vez más acá, haciendo un ejercicio de introspección sobre el medio local y las oportunidades del contexto de transformación, aprovechamiento y uso de la energía.

1.1.2. Una nueva dimensión del sistema energético.

La crisis ecológico-social actual ha revelado que la falta de preocupación por los fundamentos lógicos, biofísicos y ecológicos de nuestra economía, así como la prioridad dada a los flujos monetarios y el comercio, termina teniendo consecuencias trágicas, como la destrucción del medio ambiente, el sufrimiento humano y la extinción de la vida [7].

En las últimas décadas, y con especial atención en los últimos 40 años, se han dedicado numerosos esfuerzos a reconfigurar la teoría económica de manera que incluya la "economía" de la biosfera. Esto implica que la economía también depende de la ecología, del funcionamiento de todos los organismos y a su vez, todo depende del buen estado de salud de las personas, del planeta Tierra y de sus ecosistemas [7].

Se realizan grandes esfuerzos para comprender mejor la contribución de disciplinas científicas naturales, tales como la física, biología y estudio de ecosistemas, en el campo de la economía. Por ejemplo, conocimientos sobre los límites que tiene el sistema energético a causa de su inserción y la de todos los sistemas antrópicos en los sistemas biofísicos y los ecosistemas naturales. Los límites lógicos de los ecosistemas antrópicos integrados [7].

Una de las ideas fundamentales para entender la Economía de los ecosistemas creados por el hombre son las leyes de la termodinámica, especialmente la 2ª Ley o principio de entropía. Estas leyes establecen las limitaciones que los principios termodinámicos imponen en los procesos socioeconómicos.

A pesar de que, de acuerdo con la 1ª Ley de la termodinámica, la materia y la energía no desaparecen, sino que se transforman, es importante tener en cuenta el segundo principio (o 2ª Ley) de la termodinámica, el cual establece que no todos los tipos de energía almacenada son igualmente convertibles en trabajo útil. Si se desea expresar de manera diferente: hay distintos tipos de energía que pueden ser considerados como de "alto" o "bajo" grado para nosotros [7].

La entropía es un indicador de la energía disponible: cuantifica la cantidad de energía que ya no puede ser utilizada para realizar trabajo. Un incremento en la entropía conlleva una reducción en la energía utilizable: el carbón y el petróleo no pueden ser quemados en múltiples ocasiones y ciclos.

Podemos establecer una conexión entre la entropía y los recursos naturales que utilizamos para nuestra supervivencia de la siguiente manera: el recurso natural más esencial y primordial es la materia-energía de baja entropía (es decir, materia-energía con un alto grado de orden y disponibilidad) [7].

En nuestro planeta se encuentran de manera inherente "reservas de baja entropía", áreas de entropía negativa o "neguentropía" que durante la era de la Revolución Industrial hemos agotado velozmente. Estas comprenden los suministros de combustibles fósiles, los depósitos minerales, entre otros. Malgastar de manera irresponsable los recursos naturales que representan estos "depósitos de baja entropía" limita cada vez más las posibilidades de vida para las generaciones futuras de seres humanos. Podríamos expresar el objetivo de una sociedad ecológicamente sostenible como el objetivo de reducir al mínimo la entropía [7].

La economía convencional ha tomado en consideración la 1ª Ley de la termodinámica hasta cierto punto, aunque no ha prestado la debida atención a la 2ª Ley, la cual es significativamente más crucial en términos prácticos. Si se observa la representación tradicional del proceso económico en los libros de texto, se puede notar que en realidad se asemeja más a una máquina de movimiento perpetuo, es decir, un objeto que no puede existir en la realidad. Los diagramas circulares, los cuales representan la interacción entre producción y consumo en un sistema autosuficiente, no se ajustan a la realidad según la enseñanza de la termodinámica [7].

La economía convencional no toma en cuenta el hecho de que el sistema económico está integrado en sistemas biofísicos que conforman una biosfera extremadamente compleja. También ignora el hecho de que el sistema económico depende de fuentes de materiales de baja entropía y de lugares para desechar los desechos de alta entropía que produce. Además, no considera que el principio de entropía rige todos los procesos en el mundo material. La economía sostenible o ecológica, contrariamente, se centra en la 2ª Ley de la termodinámica. Se basa en la idea de que el proceso económico es caótico en todas sus fases materiales. Las consecuencias económica y ecológica de la 2ª Ley de la termodinámica son significativas. Lo que se evidencia es principalmente que la actividad económica se encuentra limitada por ciertas barreras inamovibles. De esta manera, se evidencian las restricciones del reciclaje: "el reciclado perfecto es imposible" [7].

Solo se logra recuperar una fracción de los materiales, siempre habrá una porción que se pierde para siempre sin posibilidad de recuperación. Además, la cuestión se traslada al ámbito de la entropía energética: el acto de reciclar siempre implica el empleo de energía, en cantidades que pueden ser enormes e inasequibles. Es posible reciclar los neumáticos, sin embargo, no se pueden eliminar las partículas de neumático que se adhieren al asfalto. Es posible recuperar la mayoría del plomo contenido en las baterías, pero no ocurre lo mismo con el plomo liberado a la atmósfera junto con los gases de escape de los vehículos. Es imposible lograr el completo cierre de ciclos y es inevitable tener pérdidas en materia [7].

Como Rober U. Ayres señala "El reciclado perfecto es un imposible termodinámico" [8] y se podría volver a definir el segundo principio de la termodinámica también de la siguiente forma: la energía no puede reciclarse, y la materia no puede reciclarse completamente [7].

El uso de los recursos naturales también está restringido por la 2ª Ley de la termodinámica. La mayoría de las veces, la estructura entrópica de nuestro mundo

es la causa de las diferentes leyes de rendimientos decrecientes que enfrentamos como seres humanos. Por poner un ejemplo, en relación a los recursos naturales: a medida que agotamos los depósitos de minerales de mayor calidad y los depósitos de combustibles fósiles más accesibles, sólo nos quedan (en una corteza terrestre en constante desorden) depósitos de materia-energía con una mayor cantidad de entropía, y por ende, menos disponibles, menos útiles, menos explotables y cada vez más costosos de aprovechar [7].

Según Christian Schütze "Cada vez nos acercamos más al momento en que la obtención de una tonelada de petróleo implique el consumo de tanta energía como la que contiene ese petróleo. En esa tesitura de nada sirve ya la sabiduría del economista, según la cual todo es sólo una cuestión de precios, pues el precio debe ser pagado en la única divisa fuerte de este mundo, a saber, en energía" [7].

Otra dimensión del sistema energético está cobrando relevancia y tiene que ver además de con el suministro y las emisiones, con las condiciones internas del metabolismo energético que determinan la eficiencia prestaciones versus impactos, del sistema.

Se trata de una amplia y poderosa dimensión en la que nos enfocamos a potenciar la componente útil de la energía creando las condiciones de demanda, utilización recuperación y generación que transforman un volumen ingente de recursos energéticos desperdiciados en recursos primarios.

Se trata de utilizar la denominada energía de "bajo grado", "baja calidad", "baja disponibilidad" o Low Grade Energy. El grado de convertibilidad de la energía (trabajo almacenado) en trabajo aplicado a menudo se denomina disponibilidad. La energía en formas que tienen alta disponibilidad se llama energía de alto grado. La energía de baja calidad es aquella de la que sólo una pequeña fracción puede convertirse en trabajo aplicado. Un ejemplo de energía de alta calidad es la energía almacenada en los combustibles fósiles y la electricidad. La luz del sol es un ejemplo de energía de baja calidad [9].

La energía térmica es un caso especial. Cuanto mayor es la diferencia entre la fuente de calor y su entorno, mayor es la disponibilidad. El núcleo caliente de un reactor nuclear es energía de alta disponibilidad, mientras que el de un radiador doméstico es de baja disponibilidad o energía de baja calidad.

El calor es, por definición energía de bajo grado. El calor todavía se puede usar para hacer el trabajo (por ejemplo, un calentador hirviendo agua), pero se disipa rápidamente. Las moléculas en las que se almacena este tipo de energía (moléculas

de aire y agua) se distribuyen más aleatoriamente que las moléculas de carbono de un carbón. Este estado desordenado de las moléculas y la energía disipada se clasifican como energía de bajo grado.

La energía de bajo grado, energía térmica de baja intensidad y temperatura moderada, abunda en nuestro entorno tanto en el medio natural aéreo climático y subterráneo climático-hidrogeológico, como en el medio antrópico urbano aéreo, mesoclima y microclima urbano, como subterráneo infraestructuras enterradas. De hecho es el tipo de energía más común y fácil de intercambiar en nuestro entorno.

También los seres vivos convierten la energía concentrada en energía de bajo grado. Los animales, las plantas y los seres humanos utilizan los cambios de energía para moverse, crecer, alimentarse y reproducirse. Mediante la respiración celular la mayoría de los seres vivos convierten la energía concentrada de los alimentos en energía térmica y de trabajo. Nuestros cuerpos hacen esto controlando reacciones químicas complejas en las que la energía concentrada, de alto grado, se mueve cuidadosamente de niveles más altos de energía de enlace molecular a energías de enlace molecular más bajas. Por el camino, parte de la energía (no toda) es capturada por las moléculas de trifosfato de adenosina, o ATP, y es utilizada por nuestras células para realizar las funciones descritas anteriormente.

Al hacer ejercicio, parte de la energía de los alimentos se convierte en trabajo muscular, pero la mayor parte se convierte en energía térmica de bajo grado. De hecho, más del 60 % de la energía de los alimentos se convierte en energía térmica que calienta el cuerpo y produce sudor durante el metabolismo de la energía de los alimentos. Eso deja solo el 40 % para hacer un trabajo útil en las células. Si también se tiene en cuenta la energía necesaria para digerir los alimentos y bombearlos en sangre a todas las células, el número final puede ser significativamente inferior al 40 %. Eso es más o menos lo mismo que muchos de nuestros motores hechos por el hombre. Y, al igual que con las máquinas, dispositivos, edificios, infraestructuras, ciudades y territorios hechos por el hombre, todo el trabajo mecánico realizado por las células también termina como calor de bajo grado (energía térmica), perdido para siempre. La cantidad total de energía no ha cambiado (1ª Ley), pero ya no se puede usar (2ª Ley), o mejor dicho no se puede transformar en energía de alto grado pero si puede recuperarse como energía de bajo grado aplicable como un valioso recurso dentro de los sistemas edificados en los que vivimos y trabajamos. Para ello necesario también preparar

nuestros edificios para su uso y generar las vías y estrategias para su recuperación y uso. Al hacerlo se recupera como recurso primario calor, que en otras circunstancias se hubiese perdido, en lugar de producirlo con energía de alto grado. Es decir se sustituyen recursos primarios de alto grado por energía de bajo grado recuperada.

Existe incluso la posibilidad de utilizar la energía de alta calidad aplicada a un flujo mayor de energía de baja calidad para producir una cantidad energía de alta calidad superior a la utilizada para la transformación. Un flujo de 10 unidades de energía de alta calidad que se utiliza para transformar un flujo de 100 unidades de energía de baja calidad en un flujo de 20 unidades de energía de alta calidad. Durante el proceso de transformación se genera un flujo de 90 unidades de energía térmica. Esta estrategia puede a menudo acompañar a la de la recuperación neta y la reutilización en los edificios de energía de bajo grado. Juntas pueden resolver la cobertura de escenarios generales de demanda de energía de intensidad moderada y de escenarios puntuales de demanda de energía de alta intensidad.

Esta tesis doctoral presenta la investigación desarrollada sobre las dimensiones fundamentales de la recuperación y uso de los recursos energéticos de bajo grado en el contexto urbano y presenta un modelo de actuación para su aplicación a la edificación.

Las infraestructuras urbanas subterráneas concentran una cantidad muy significativa de los recursos energéticos de bajo grado que en la ciudad resultan de la transformación térmica y mecánica de recursos de alto grado para la prestación de servicios de movilidad, transporte, suministro y calentamiento de agua, preservados en el subsuelo en virtud de la condición geotérmica de la transferencia de calor en el medio subterráneo. *Per se*, estas infraestructuras son recursos de canalización preservación, almacenamiento e intercambio de energía térmica de intensidad y temperatura moderada.

Una de las dimensiones de esta investigación es revisar la importancia de los principios lógicos, las tecnologías y las estrategias de recuperación de calor residual como medio para lograr un desarrollo energético sostenible.

Además de la situación que se ha descrito sucintamente para el contexto europeo y occidental la mayoría de los países en vías de desarrollo del mundo se enfrentan una la enorme disipación y desperdicios de calor residual de baja temperatura al medio ambiente.

A diferencia de los residuos de material que son claramente visibles, el calor residual puede ser difícil de identificar y evaluar tanto en términos de cantidad como de calidad [10]. Por lo tanto, comprender la disponibilidad de calor residual y la capacidad de recuperarlo ofrece una gran oportunidad para reducir los costos de energía y los impactos ambientales asociados.

Se considera que la utilización de energía de baja calidad procedente de fuentes de calor residual ofrece una contribución significativa a la mejora de la eficiencia energética general en los sectores industriales [10], residenciales y terciarios de gran consumo energético, en el territorio, la ciudad, las infraestructuras y la edificación.

Alrededor del 72 % del consumo mundial de energía primaria se pierde después de la conversión, mientras que el 63 % de los flujos de calor residual considerados surgen a una temperatura inferior a 100 °C [11]. Las conclusiones de esta tesis exponen cómo una cantidad considerable de calor residual puede recuperarse técnica y económicamente a través de tecnologías sostenibles con capacidad prospectiva para el tan deseado desarrollo de la sustitución de fuentes de energía convencionales por fuentes de energía sostenible. La utilización en profundidad de los recursos de calor residual puede moderar de manera muy efectiva agotamiento de los combustibles fósiles y reducir las emisiones tóxicas dentro de límites aceptables, que sean acordes con el despliegue progresivo, en el tiempo y en el espacio de la utilización de fuentes de energía renovables.

En esta tesis se explica el concepto de calor residual industrial, se identifican las posibles fuentes de calor residual en la ciudad y se presentan los principios, metodología, técnicas, tecnologías y estrategias a integrar para la recuperación y utilización del calor residual, centrándose en el que se vierte, canaliza y almacena en las redes de infraestructuras urbanas subterráneas.

1.2. Objetivos de la Tesis

Las infraestructuras urbanas subterráneas tienen un extraordinario potencial de aprovechamiento energético distribuido, la técnica que permite realizar el intercambio y recuperación de recursos energéticos tiene ya un grado de desarrollo que ha permitido su utilización en países del entorno español y la técnica que permite la utilización de estos recursos en la ciudad, la edificación y la industria

también es de uso común. Hay experiencias técnicas individuales que ilustran ambos aspectos.

La experiencia profesional del doctorando incluye la ejecución a lo largo de los últimos 15 años de proyectos de este tipo en España y fuera de España, y de su experiencia ha concluido que las barreras que impiden una aplicación generalizada y extensa de esta recuperación e intercambio de recursos es la falta de instrumentos integrados técnicos, legales (incluyendo urbanísticos), económicos, de concertación y de contractualización entre instituciones y público-privada, para la implementación de este tipo de aprovechamiento.

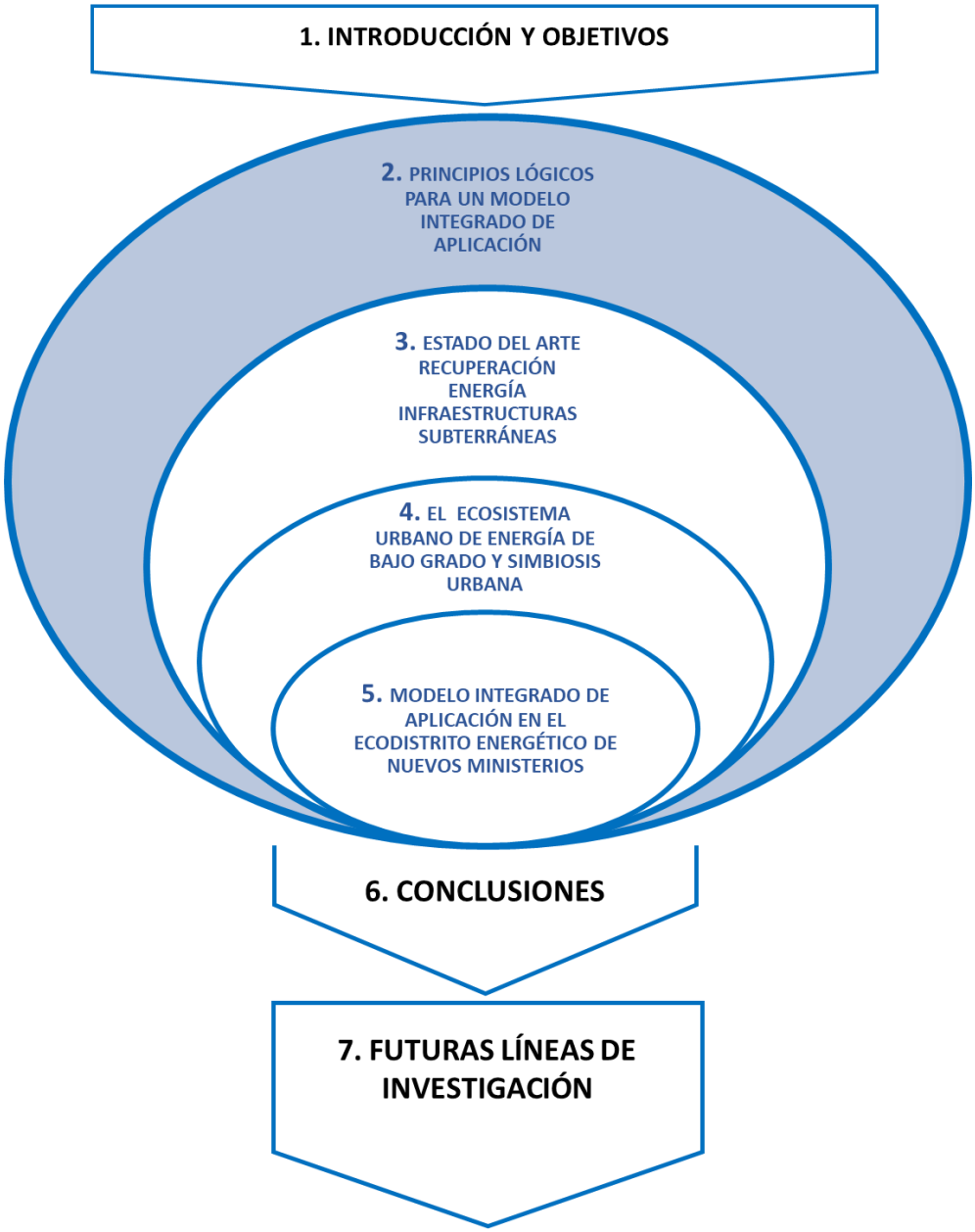
El objetivo de la tesis es investigar todos estos aspectos y proponer un modelo integrado del sistema técnico y operativo que permita resolver en distintos contextos la aplicación del aprovechamiento de los recursos energéticos procedentes de las redes de infraestructuras urbanas subterráneas y su utilización en la ciudad, la edificación y la industria.

Este objetivo general se aborda en la tesis a través de la integración de objetivos parciales:

- Definición del ámbito de influencia del sistema:
    - Ámbito físico. Estructura y dimensiones del espacio
    - Ámbito energético. Naturaleza y condiciones de la energía.
    - Ámbito técnico y tecnológico. Sistemas técnicos y constructivos, sistemas de información.
    - Ámbito de integración. Estrategias lógicas, sistemas e instrumentos de gestión.
    - Ámbito económico. Lógica de uso de los recursos e hibridación.
    - Ámbito social.
- Identificación de los fundamentos, la metodología, las herramientas y recursos operativos, necesarios para la integración de los recursos energéticos recuperados desde los sistemas de infraestructuras urbanas subterráneas.
- Selección y presentación de casos ilustrada con trabajos ejecutados bajo la dirección del autor de esta en la Península Ibérica, que ilustran de manera tangible cada uno de los aspectos previos a la exposición del Modelo integrado de Aplicación:

  - Recuperación de energía térmica de bajo grado en las infraestructuras urbanas subterráneas.
  - Uso de recursos energéticos de bajo grado en edificios de baja exergía.
  - Integración de los dos subsistemas bajo redes de distrito de 5ª generación.
- Presentación del modelo de aplicación integrado desarrollado en el ecodistrito de 5ª generación del Complejo de Nuevos Ministerios de Madrid, CNNMM.
- Conclusiones. Incluyendo las que vinculan estas actuaciones al cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible y las directrices de la Comisión Europea para la consecución de los objetivos múltiples, ambientales, económicos y sociales de la Eficiencia Energética,
- Nuevas líneas de investigación, que se identifican como nichos de conocimiento a ser desarrollados como consecuencia de la realización de la tesis.

2. Principios lógicos para un modelo integrado de aplicación a los sistemas para la recuperación y uso de energía recuperada en las redes de infraestructuras urbanas subterráneas



2.1. Principios lógicos de eficiencia en los ecosistemas energéticos

En el mundo prácticamente ya no existe ningún ecosistema natural en estado inalterado. Los territorios, el campo y las ciudades son un campo antrópico puro y claro. Sin embargo, nada que sea antrópico, deja de estar fuera de la lógica de la naturaleza. Es decir, la civilización humana y su milenaria acción de transformación del medio ocupan un lugar dentro de una estructura general que está regida por la lógica de la naturaleza. Ni el hombre ocupa un lugar central, ni es él quién determina cuál es lógica de la naturaleza, a la que todos los sistemas están subordinados, naturales o artificiales.

Dentro de esa estructura natural, hay unos principios para la preservación de la energía y sobre todo para la consecución eficiente de los "objetivos" de los sistemas. Porque los sistemas, son estructuras creadas para cumplir un objetivo y para ello utilizan recursos, vías por donde fluyen esos recursos, subsistemas para regularlos y lógica para determinar escenarios de funcionamiento.

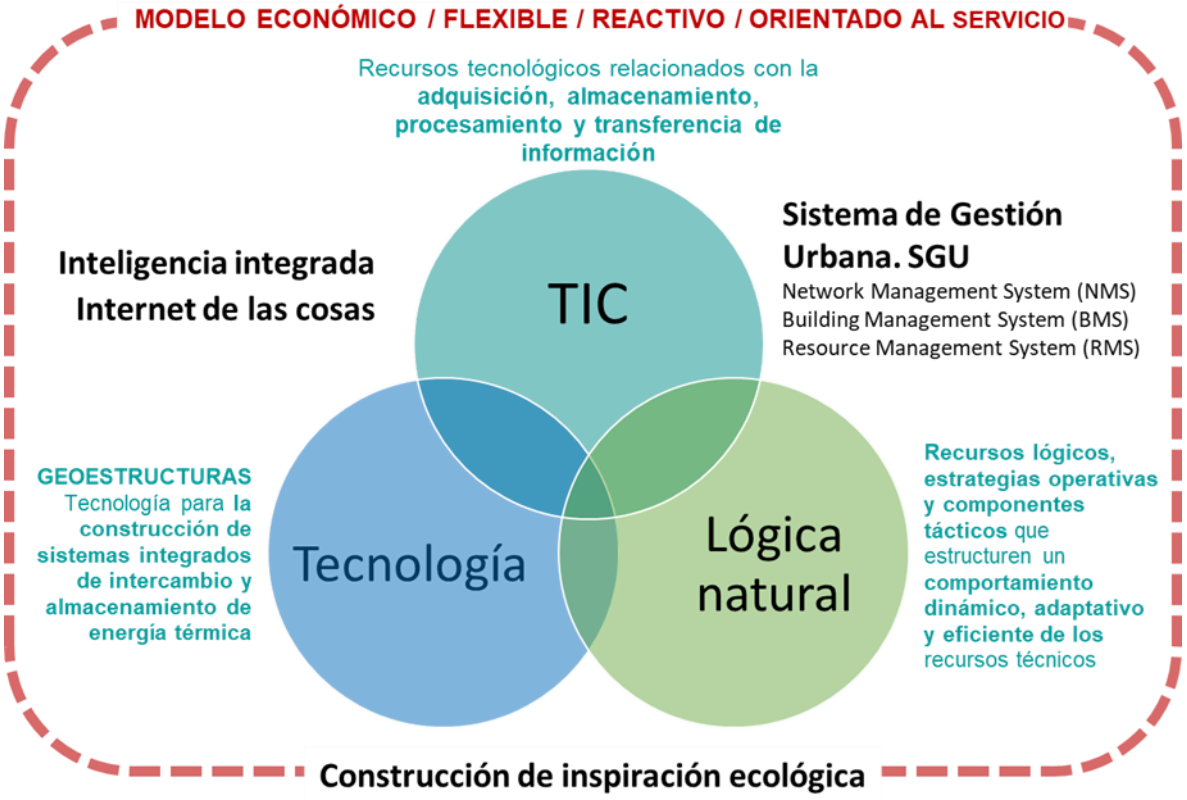


Figura 2-1. Arquitectura de una construcción urbana, de infraestructura y de un sistema construido de inspiración ecológica.
Fuente: Instituto Europeo de Innovación - Eneres.

Como se muestra en la Figura 2-1, la lógica natural es una adecuada combinación de técnica y tecnología física, tradicional para la construcción estructural de los sistemas; y técnica y tecnología de información para la recogida de información y la alimentación de ciclos continuos de mejora en base a identificar las reacciones de los sistemas, la lectura de las reacciones y la mejora de su funcionamiento.

La realimentación induce al sistema un funcionamiento dinámico gestionando el equilibrio inestable que se da a lo largo de todas las transformaciones del medio y del uso, para poder reposicionarlo de una manera dinámica en una situación de equilibrio. Todo esto para conseguir los objetivos con un mínimo impacto sobre el medio, incluyendo el consumo de recursos primarios, de materiales y el de energía. Y de esta forma, conseguir los objetivos en una situación óptima de rendimiento y de prestaciones, resolviendo la interacción sistémica entre el medio y el hombre.

Línea base de la lógica (y del sentido común) es que cualquier sistema natural eficiente no desperdicia los recursos, aunque tenga la capacidad de generar más, y minimiza la entropía que se genera al transformar los recursos como recurso de supervivencia. Esta entropía es inevitable ya cualquier transformación arroja una subdivisión y arroja una pérdida. Sin embargo, esa pérdida, esa subdivisión, esa transformación, se puede dar de una manera lo más equilibrada y razonable posible, para minimizar esa componente desperdiciada.

En el proceso de búsqueda del equilibrio, pasan por nosotros, flujos de materiales y energía que, entran y salen de nuestros territorios, nuestras ciudades, nuestras edificaciones, nuestras envolventes personales; y que participan en un ciclo que puede ser más o menos circular, lineal o helicoidal (o espiral) de recuperación.

Esa línea base, que es permanente, implica que hay un vector de eficiencia, que no está ligado necesariamente a la extracción de recursos energéticos, materias primas, y a la producción; sino que se basa en la recuperación de los recursos que ya han sido utilizados y que tienen una posible segunda o tercera vida dentro de los sistemas.

Si los sistemas están preparados para esto y si existen esas vías de conexión física y de información entre los usuarios que demandan recursos y los medios que los canalizan y almacenan es posible aplicar las tecnologías de transferencia y las estrategias de utilización que permiten transferir la energía entre ambos medios, evitar su disipación y su pérdida, y transferirla para que los usuarios puedan utilizarla.

El reto no es sólo poner en contacto a un usuario consumidor con un medio que produce, a través de un medio que transfiere; sino que se tiene que definir tecnológicamente y lógicamente el nivel de información, el medio que produce, el medio que transfiere y el medio que consume para que los tres medios sean armónicos, en cuanto a la naturaleza de la energía reutilizada.

Para lograr esa armonía energética los sistemas deben fundamentarse en la lógica de la baja exergía.

El concepto de exergía se asocia a la energía útil en un sistema capturada en el entorno próximo y gestionada en sus sucesivas transformaciones con un mínimo de perdida entrópica. Permite el crecimiento, la perpetuación y el desarrollo armónico de los ecosistemas [12].

En la naturaleza, los sistemas con mayor longevidad son aquellos que tienen menor tasa metabólica. Por otro lado, también hay animales endotermos, que generan energía y trabajo dentro de sí a partir de recursos de alto grado. Estos animales tienen poca longevidad y muchísima intensidad vital y producen la energía dentro de ellos por transformación, por una constante alimentación, explosividad vital, velocidad, voracidad (alta tasa metabólica); situándose en el vértice de la pirámide de la depredación o de la pirámide trófica.

Otros animales, que están en la base de la pirámide trófica, viven fundamentalmente de absorber o ceder energía al medio, son ectotermos, capturan energía de bajo grado del medio, generan internamente poca energía, tienen poca intensidad energética (baja tasa metabólica, necesitan menos energía para cumplir sus objetivos), viven muchos años. El hombre, forma parte de un sistema muy depredador y de los más intensos de todos los seres vivos.

Entre estos extremos, hay diferentes grados de "consciencia", dentro del papel que cada ser vivo juega en la naturaleza. El hombre, ocupa el máximo nivel de consciencia y ciertos organismos, prácticamente minerales, tienen el mínimo nivel de consciencia, pero todos tienen un grado evolutivo de consciencia. Hay animales más próximos al hombre que son conscientes, que tienen sentimientos, que se reconocen socialmente y que tienen habilidades. Sin embargo, hay sistemas vegetales complementarios que también desarrollan ciertos niveles de "consciencia" que hacen, por ejemplo, que un árbol sea capaz de transmitirle recursos a un árbol más pequeño, que está en una zona donde no le da sol, dándole un aporte complementario de alimento a través de una red de hongos que está en el subsuelo, interaccionando con sus raíces. Esta "conciencia" en los sistemas

vegetales permiten la comunicación, el alimento, el uso de otros sistemas en régimen de simbiosis para efectuar comunicación, transferencia de recursos, etc. Esta "consciencia" tiene que ver con la estrategia y con la manera de enfrentarse al consumo energético en función de la actividad y de la intensidad.

La baja exergía nos orienta hacia sistemas longevos, sistemas equilibrados, económicos, que pueden alimentarse con recursos de bajo grado procedentes del entorno que pueden captar, recuperar, almacenar, usar con eficiencia y reciclar; y que, en el proceso de reciclaje, aunque pierden intensidad se pueden estabilizar en torno a unos parámetros lógicos, que responden al medio que les rodea.

Estos parámetros también son lógicos en relación al hombre, porque también están próximos a la temperatura corporal y a nuestra tasa metabólica basal, bandas de temperaturas que van entre 10 y 40 ºC. Si los sistemas de intercambio térmico de las edificaciones trabajan en este rango de temperatura, la temperatura de los recursos de bajo grado que abundan en nuestro entorno natural y antrópico, los sistemas pueden incorporar recursos del medio y transformarlos en un marco de bajo desperdicio y baja entropía, son sistemas de con baja exergía.

A los efectos de esta tesis, la recuperación y uso de energía de bajo grado, recursos térmicos a temperatura moderada, en las redes de infraestructuras urbanas subterráneas, multiplica su rendimiento, su calidad y su rentabilidad.

La concepción y la ejecución de los sistemas que intervienen en los procesos de recuperación, transferencia y consumo debe estar inspirada en los criterios de baja exergía.

2.2. Las dimensiones de la ciudad de inspiración ecológica

El modelo ecológico de desarrollo urbano está vinculado a la recuperación de espacios libres y servicios ecosistémicos que multiplican el valor de la ciudad a través de la interacción de: el espacio comercial superficial, el espacio de trabajo y el espacio residencial, y el espacio subterráneo y los recursos materiales y energéticos. El subsuelo proporciona espacio de servicios para el intercambio, el almacenamiento y la gestión de recursos (Figura 2-2). Las geoestructuras también son un poderoso medio de gestión.



Figura 2-2. Los tres planos del urbanismo ecosistémico.
Fuente: Rueda-Palenzuela, Salvador. Agencia para la Ecología Urbana de Barcelona [13].

La complejidad de los sistemas urbanos está vinculada a una cierta mezcla de orden y caos y se puede examinar, en cierta medida, empleando el concepto de diversidad. Los seres vivos, especialmente los seres humanos y sus organizaciones, son depositarios de conocimientos (información) y conservan de manera dinámica, en el transcurso del tiempo, rasgos que revelan tanto el nivel de acumulación de información como la habilidad para tener un impacto relevante en el presente y dominar el futuro [14].

La especie humana ejerce una fuerte presión en sus sistemas urbanos, lo cual afecta de manera negativa a los ecosistemas de la Tierra. Estos desequilibrios, catalogados como insostenibles, ponen en peligro la supervivencia de nuestra especie. Las ciudades están sometiendo a una gran presión a los ecosistemas de la Tierra debido a la explotación de recursos y la generación de contaminación. Esto está provocando una simplificación caótica de los ecosistemas y está rebasando los límites de diversas variables vitales para la vida tal y como la conocemos. En el futuro cercano, en un lapso de unas pocas décadas, es posible que se produzcan desplazamientos masivos de personas en busca de sobrevivir, debido a los impactos del cambio climático, la extinción de especies y la disminución de la biodiversidad [13].

La amplitud y el alcance de los efectos y desajustes han requerido la formulación de normas que consideren todas las variables involucradas. La Ecología es el único

marco conceptual que posibilita esto. Las urbes son entornos urbanos en los cuales los individuos son la fuerza central que los conforma. Los ecosistemas urbanos son los sistemas más integrales construidos por el ser humano [13].

Las ciudades son como ecosistemas urbanos en los cuales los seres humanos son los principales protagonistas y componentes. Los entornos urbanos representan los sistemas más integrales que ha desarrollado la humanidad [13].

El metabolismo urbano se enfoca en asegurar la eficiencia de los flujos físicos (materiales, agua y energía) que son esenciales para el funcionamiento de cualquier ciudad, con el objetivo de mantener su estructura organizada y protegerla contra la contaminación. Es necesario que la administración de los recursos naturales se realice de manera eficiente y con el menor impacto posible en los ecosistemas que los sustentan, siguiendo los principios del cuarto régimen metabólico. Dado el conjunto de características propias de los ecosistemas en entornos urbanos, es necesario que la propuesta metabólica vaya más allá y los integre dentro de su contexto regional más amplio. En este contexto, podrán llevar a cabo sus funciones esenciales de generación, regeneración y reproducción. La clave para desarrollar estrategias para la autosuficiencia con recursos renovables es utilizar una escala regional que adapte las geometrías de los componentes metabólicos [13].

El urbanismo ecosistémico tiene como objetivo principal establecer los lineamientos para la creación de ciudades sostenibles, enriqueciendo con su contenido los urbano intencional son enriquecidos con contenido. El objetivo es resumir las claves para la regeneración y diseño de nuevos desarrollos urbanos utilizando quince principios [13].

El urbanismo ecológico define tres niveles en la ciudad, en lugar del uso de superficie que es que actualmente se utiliza y regula. Al nivel de superficie deben añadirse, el nivel aéreo o de cubierta y el subsuelo [13].

En el nivel de superficie se desarrollan todas las actividades humanas. Es el plano de la calle, los locales comerciales, las oficinas a pie de calle, etc. En el nivel aéreo están los usos más privados. Y en el nivel de subsuelo, están todas las infraestructuras de servicios que son el eje de esta investigación.

Tomado como ejemplo el sistema vegetal de un bosque, integrado por árboles de gran altura, árboles pequeños, y los hongos. Los hongos, de forma subterránea son

una red de comunicación que interacciona con las raíces de los árboles. Los árboles utilizan esa red para transferir los recursos a otros árboles o transferírselos entre ellos. Según la información objetiva a través de las redes de hongos, un árbol grande puede producir más azúcares porque le da más el sol, y transferirle recursos a un árbol más pequeño que se encuentra en sombra. A simple vista, si se contempla el nivel aéreo del bosque no se puede ver la red subterránea que conecta a lodos los integrantes de ese sistema vegetal. Esta lógica que se da en los sistemas vegetales, se puede aplicar al ecosistema de las ciudades.

La ciudad en el territorio es el medio natural aéreo, es el medio natural subterráneo y es la interacción o la superposición o la interferencia o la invasión de uno y otro por sistemas antrópicos.

Por un lado, están la naturaleza y el medio superficial, con su clima, con su medio ambiente y su ciclo del agua, con sus vientos, con sus circunstancias térmicas, con su entrada de radiación desde el sol, etc. Todo lo que está pasando en nivel aéreo tiene una relación termodinámica poderosísima con el subsuelo.

El nivel subterráneo o de subsuelo es otro medio que tiene sus condicionantes, tiene sus dinámicas, tiene sus gradientes, tiene sus densidades, tiene sus flujos, tiene sus estructuras. Y la ciudad tiene también un ámbito lógico de distribución estructural, porque el medio aéreo es el medio de la vida, es la biosfera y el medio subterráneo es el medio, hasta cierto nivel también de la vida, pero sobre todo para nosotros es un medio utilitario. Ese es el territorio donde se pueden desarrollar infraestructuras, almacenamientos, extracción de recursos minerales, canalización de recursos hídricos, redes e infraestructuras.

El medio subterráneo de la ciudad debería ser el medio de conexión en el cual la ciudad regulara el resto de sus sistemas.

A los efectos de esta tesis, la puesta en carga de todas las capacidades del medio subterráneo es parte esencial de las estrategias de integración de un ecosistema eficiente para la gestión y la recuperación circular y local de los recursos energéticos de bajo grado en las infraestructuras subterráneas, su transferencia, que también tiene una importante dimensión subterránea y su uso en el propio medio subterráneo o en el superficial.

2.3. Dinámica helicoidal. Hibridación entre lógica circular y lógica lineal en el uso de los recursos

La economía lineal impulsada por el consumismo, la base subyacente que ha impulsado la economía global desde la Revolución Industrial, es intrínsecamente defectuosa y plantea un riesgo económico, ambiental y social significativo para las generaciones actuales y futuras. La economía circular tiene raíces en muchos otros temas, pero la premisa general es mantener los recursos en uso durante el mayor tiempo posible y luego capturarlos y reutilizarlos en nuevos productos para reducir el consumo general de recursos y energía. Sin embargo, no aborda explícitamente los cambios necesarios en los niveles de producto, proceso y sistema [15].

La economía circular sugiere un modelo económico regulado de acuerdo a las leyes de la naturaleza. Se ha utilizado para abordar la dimensión ambiental de la sostenibilidad a través de los ciclos de recursos y productos y los ciclos de residuos, con la dimensión social considerada como un subproducto.

Lo logra limitando el flujo de producción a un nivel que la naturaleza tolera y utiliza los ciclos de los ecosistemas en los ciclos económicos respetando sus tasas de reproducción natural.

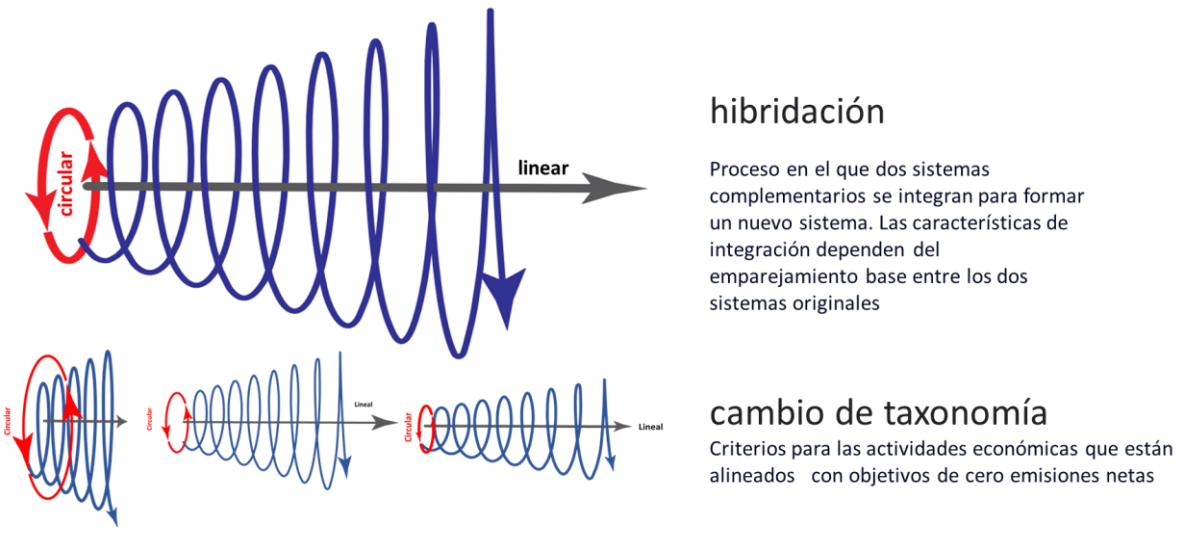


Figura 2-3. Dinámica helicoidal energética, económica, social.
Fuente: elaboración propia.

Al promover la adopción de patrones de producción de circuito cerrado dentro de un sistema económico, la economía circular tiene como objetivo aumentar la eficiencia en el uso de los recursos, con especial énfasis en los residuos urbanos e

industriales, para lograr un mejor equilibrio entre las tres dimensiones de sostenibilidad reconocidas de Economía, Medio Ambiente y Sociedad.

Esto implica la adopción de patrones de producción más limpia, un aumento de la responsabilidad y conciencia de productores y consumidores, el uso de tecnologías y materiales renovables, así como la adopción de políticas y herramientas adecuadas, claras y estables [16].

Por esta razón, se requiere un cambio de paradigma para pasar del sostenimiento a la sostenibilidad para "producir más con menos" a través de enfoques de fabricación convergentes innovadores y transformadores arraigados en el rediseño de productos y procesos de próxima generación. Es decir, una transformación de la economía circular a la economía helicoidal o espiral. La economía helicoidal cambia el paradigma de la gestión de residuos y rediseña la infraestructura de fabricación a nivel de producto, proceso y sistema (Figura 2-3) [15].

Sin embargo, una parte importante de recursos utilizados que va haciendo que la espiral sea más plana y más circular y otros reutilizados que si son más intensos, en determinados momentos, prolonguen esa espiral. Es decir, la variabilidad de los recursos y la variabilidad de la utilización a lo largo del tiempo.

Por esta razón, no es una espiral estática, sino que es una espiral dinámica que se contrae y se expande en función de los momentos de demanda, de las circunstancias de demanda, del clima, etc. Esa espiral que se expande y se contrae, tiene que ver mucho con el ritmo de utilización de recursos recuperados, renovables y no renovables. Y los recursos renovables no son circulares al 100 %, son parcialmente circulares.

Los recursos de la litosfera y los extraídos del subsuelo son claramente lineales e incrementales y generan una problemática de consumo de energía, adicional en el tratamiento de sus residuos y de sus procesos. Y, por otro lado, los recursos recuperados son claramente circulares (Figura 2-4).

Sin embargo, ningún recurso es completamente circular, ya que al recurso renovado hay que añadirle el consumo energético de la recuperación y la renovación.

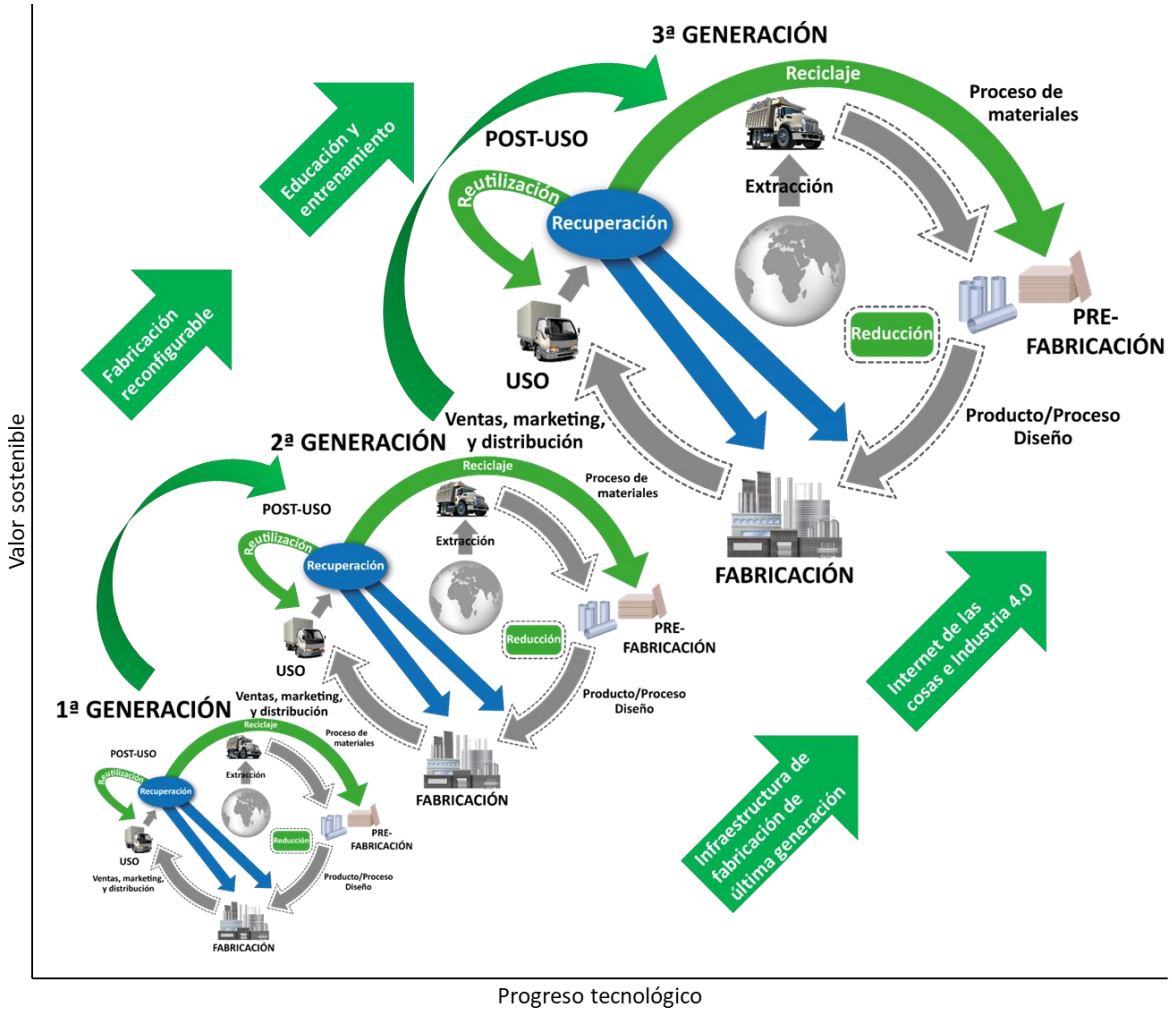


Figura 2-4. Transformación de economía circular a economía helicoidal y los elementos impulsores mostrados en verde [15].

A los efectos de esta tesis, no existen los planteamientos puros ni la pureza de los planteamientos es la garantía de sostenibilidad optima. La eficiencia es un factor dinámico en equilibrio inestable. La capacidad de los sistemas para garantizar unos óptimos niveles de eficiencia es la hibridación entre sistemas con distinto grado de circularidad e impacto bajo sistemas de gestión y control orientados al cumplimiento de los objetivos prestacionales que manejan estrategias reactivas para la combinación inteligente de los recursos tecnológicos y constructivos implementados. Sistemas adecuados a contextos con distintas posibilidades técnicas y económicas, en distintos contextos territoriales o sociales y, en cualquier caso, capaces de modular su comportamiento con una tendencia permanente a la mejora basada en la retroalimentación de información y la experiencia.

2.4. Cualificación y reutilización de la energía. Energía de bajo grado y exergía

La creciente demanda de energía, el aumento de los precios de la energía y las preocupaciones medioambientales, como el calentamiento global, nos obligan a buscar fuentes de energía más limpias y sostenibles.

La recuperación de energía térmica es un campo muy prometedor para capturar el calor disponible libremente e introducirlo en sistemas preparados para su utilización. El calor "gratuito" está disponible para nosotros principalmente en dos formas: calor residual y calor natural [17].

Más de la mitad de la energía producida a partir de diversos recursos renovables y no renovables en todo el mundo se vierte al medio ambiente, principalmente en forma de calor residual. En paralelo, los recursos naturales como el calor geotérmico y el calor solar son los enormes recursos energéticos que permanecen sin explotar. Existen muchas reservas de energía térmica de este tipo en nuestro entorno urbano y en todo el mundo, que liberan miles de julios de energía cada segundo a la atmósfera ambiente. Indiscutiblemente, un método rentable para recuperar el calor residual y utilizar el calor natural en nuestros sistemas industriales, urbanos y edificados, que hoy consumen ineficientemente valiosos e insustituibles recursos energéticos de alto y medio grado puede revolucionar la producción de energía renovable [17].

Según la temperatura, el calor generalmente se clasifica en tres categorías y grados[18]:

- Alto grado (400C y superior)
- Grado medio (100º C a 400ºC)
- Bajo grado (100º C e inferior).

Normalmente, el calor de grado alto y medio es fácil de recuperar; mientras que el calor residual de baja calidad, que constituye más del 50 % del calor residual total, es lamentablemente el más difícil de recuperar [17], si pretendemos transformarlo en recursos de grado alto o medio. No así si lo aplicamos a sistemas edificados de baja exergía como recurso energético para a la refrigeración, la calefacción o el atemperamiento del aire de renovación de los edificios.

La Tabla 2.1 muestra algunas de las principales fuentes de calor residual junto con el rango de temperatura:

Rango de Temperatura	Fuente	Temperatura (°C)	Ventajas	Desventajas Barreras
Alto >1200 °F >650 °C	Horno de refinación de níquel	1370–1650	• Energía de alta calidad. • Disponible para una diversa gama de usos finales con diferentes requisitos de temperatura. • Alta eficiencia de generación de energía. • Alta tasa de transferencia de calor por unidad de área.	• Las altas temperaturas crean mayores tensiones térmicas en los materiales de intercambio de calor. • Aumento de actividad y/o corrosión química.
	Horno de arco eléctrico de acero	1370–1650		
	Horno de oxígeno básico	1200		
	Horno de reverbero de aluminio	1100–1200		
	Horno de refinación de cobre	760–820		
	Horno de calentamiento de acero	930–1040		
	Horno de reverbero de cobre	900–1090		
	Plantas de hidrógeno	650–980		
	Incineradores de humos	650–1430		
	Horno de fundición de vidrio	1300–1540		
	Horno de coque	650–1000		
	cúpula de hierro	820–980		
Medio 450–1200 °F 230–650 °C	Escape de caldera de vapor	230–480	• Más compatible con los materiales de los intercambiadores de calor. • Práctico para la generación de energía.	
	Escape de turbina de gas	370–540		
	Escape alternativo del motor	320–590		
	Tratamiento térmico horno	430–650		
	Hornos de secado y cocción	230–590		
	Horno de cemento	450–620		
Bajo <450 F <230 °C	Gases de escape que salen de los dispositivos de recuperación en calderas de gas, hornos de etileno, etc.	70–230	• Grandes cantidades de calor a baja temperatura contenido en numerosos flujos de productos **RECURSO**	• Pocos usos finales para calor a baja temperatura. • Generación de energía de baja eficiencia. • Para los gases de escape de combustión, la recuperación de calor a baja temperatura no es práctica debido a la condensación ácida y la corrosión del intercambiador de calor.
	Condensado de vapor de proceso	50–90		
	Agua de refrigeración de:			
	puertas del horno	30–50		
	hornos de recocido	70–230		
	compresores de aire	30–50		
	Combustión interna	70–120		
	Motores: aire acondicionado	30–40		
	Hornos de secado, horneado y curado	90–230		
	Líquidos/sólidos procesados en caliente	30–230		

Tabla 2.1. Principales fuentes de calor residual y su rango de temperatura [17]. *Modificado por el autor.*

Las diferentes formas de energía difieren en su capacidad para realizar un trabajo útil. Una caloría de calor disperso no puede hacer ningún trabajo. La luz solar debe concentrarse primero para poder hacer un trabajo útil. Sin embargo, los diferentes tipos de energía no son igualmente convertibles en trabajo útil. Se necesita energía para concentrar la energía. Hay que degradar parte de la energía para concentrar lo que queda.

La Figura 2-5 muestra la escala de calidad de la energía y algunos de los factores de conversión para pasar de una forma de energía a otra. Estos factores incluyen

el costo de energía para cualquier tecnología pueda requerir en el proceso de conversión.

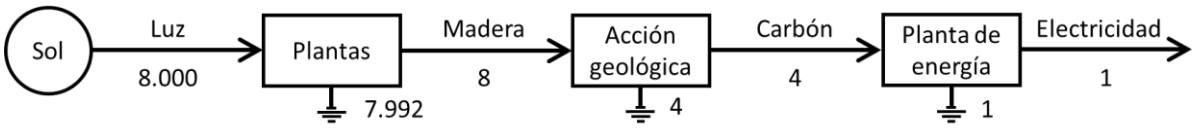


Figura 2-5. Escala de la calidad de la energía [19].

El grado de convertibilidad de la energía, trabajo almacenado, en trabajo aplicado se denomina a menudo disponibilidad o grado. La energía en formas que tienen alta disponibilidad se denomina energía de alto grado. Un ejemplo de energía de alta calidad es la energía almacenada en los combustibles fósiles y la electricidad.

La energía de bajo grado es la energía que solo una pequeña fracción puede convertirse en trabajo aplicado. La luz solar es un ejemplo de energía de bajo grado.

La energía térmica es un caso especial. Cuanto mayor sea la diferencia entre la fuente de calor y su entorno, mayor será el grado de la energía. El núcleo caliente de un reactor nuclear es energía de alto grado, mientras que el de un radiador doméstico o la vertida en el agua residual es de baja disponibilidad o energía de bajo grado [9].

Una fuente de energía se puede clasificar en términos del nivel de energía de la fuente, la medida de su intensidad energética en términos de energía por unidad de masa, y su grado energético es una medida de la calidad de la energía. Un sistema de alto nivel de energía tiene las características de alta temperatura, alta presión o entalpía (calor de combustión).

Las formas de energía calorífica (calor de fusión/fisión, calor de combustión y calor de fricción) se clasifican en orden descendente según la temperatura de la fuente. El grado energético de una fuente sirve para calificar el nivel de energía.

La eficiencia de Carnot es la eficiencia máxima que puede tener un motor térmico funcionando entre dos temperaturas [20]. La eficiencia de Carnot disminuye al 24 % cuando la temperatura de funcionamiento está entre 150 °C y 50 °C. Esta baja eficiencia hace que el proceso de recuperación sea económicamente inviable utilizando ciclos de energía tradicionales y que, sin embargo, podamos aportar un enorme rendimiento y utilidad a la aplicación de los recursos energéticos directamente a usos como la climatización de edificios en los que se canaliza el calor directamente a los sistemas que lo utilizan con una transformación menor del rango de intensidad, habitualmente resuelta a mediante bombas de calor[17].

2.4.1. Cualificación de los recursos.

Los recursos físicos, como los recursos energéticos y materiales, aparecen en parte como flujos y en parte como reservas (Figura 2-6).

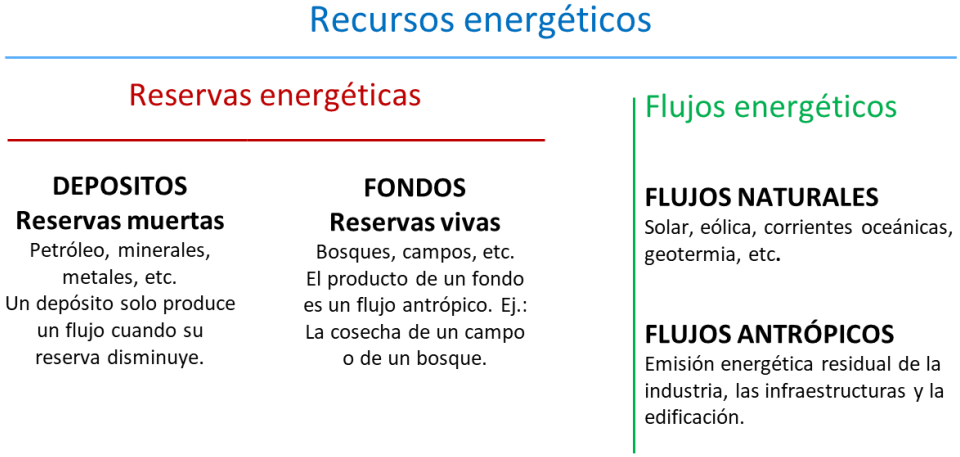


Figura 2-6. Clasificación y cualificación de los recursos energéticos. Fuente: Propia

Un flujo natural tiene un tamaño o potencia limitados, pero generalmente dura mucho tiempo. Un ecosistema como un bosque configura un sistema vivo. Se construye a partir de flujos naturales y da lugar a un flujo (rendimiento) que se puede extraer del sistema sin disminuir el stock. Por otro lado, las existencias muertas, como los depósitos de petróleo, solo pueden producir un flujo si se agotan gradualmente. Los flujos de los yacimientos también contaminan el medio natural [21]. Por lo tanto, diferenciamos entre existencias muertas o depósitos y acciones o fondos vivos. Los depósitos y fondos se definen respecto al momento de la producción. Los flujos naturales, los antrópicos recuperados y los flujos recuperados de fondos de reservas vivas, de fondos a menudo también se denominan flujos renovables [21].

2.4.2. Exergía

Hoy en día, el uso de la energía y otros recursos en el mundo industrializado ha alcanzado un nivel nunca alcanzado. Lo percibimos como un proceso progresivo y constante de agotamiento de los recursos naturales y como un aumento de la destrucción y contaminación de nuestro entorno natural.

Al mismo tiempo, los sistemas y las técnicas de conversión de recursos se están volviendo muy complicados. Las mejoras técnicas a menudo se concentran en conversión de recursos para fines menos importantes con fines comerciales, que no mejoran la eficiencia ni ponen en juego la totalidad de recursos a nuestro alcance. Las soluciones técnicas a veces incluso se vuelven más sofisticadas en lugar de más eficientes, por ejemplo, la electricidad producida por la energía nuclear es utilizada para la calefacción de espacios o el aire acondicionado, uso que podrían satisfacerse sobradamente con recursos de menor grado y mucho menor impacto.

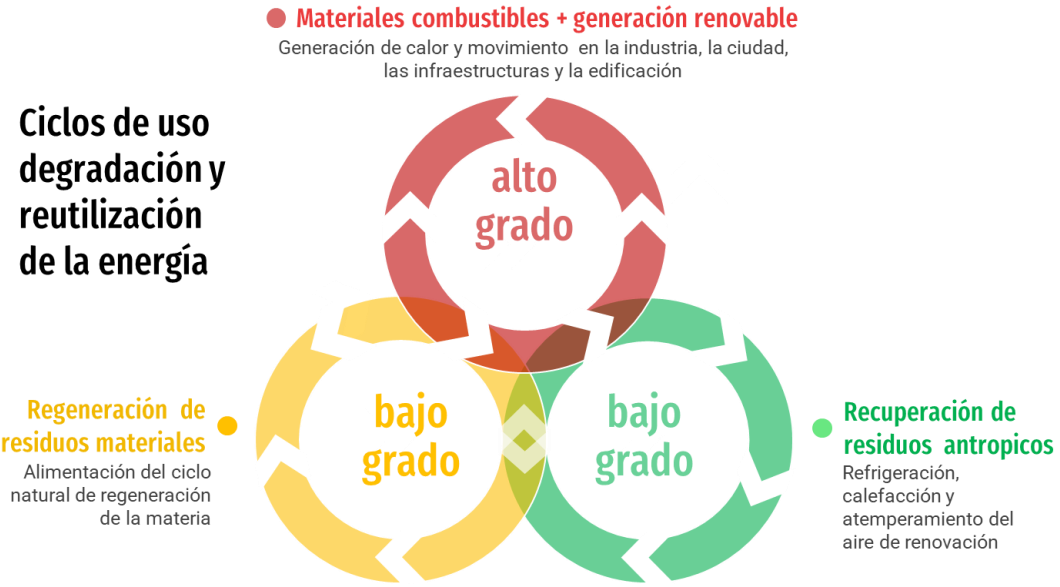


Figura 2-7. Ciclos de uso, degradación y reutilización de la energía. Fuente: Propia

Al describir el uso de los recursos en la sociedad en términos de exergía (Figura 2-7), podemos obtener un conocimiento específico sobre estos matices y alcanzar un grado de comprensión importante al respecto de su eficiencia. Podemos encontrar áreas importantes de aplicación en las que se pueden y deben realizar grandes mejoras mediante el uso de tecnología eficiente en aplicada a recuperar y convertir recursos más eficientes, como es el caso de la reinyección de energías de bajo grado en el ciclo energético de la edificación, e incluso en los ciclos naturales de recuperación de la materia que alimentan posteriormente el ciclo energético de alto grado. Eso permitiría una incorporación decidida de recursos recuperados y renovables a las escalas que pueden resolverse con energía recuperada de bajo grado.

A pesar de que el enfoque de la exergía puede considerarse un método simple y sólo aproximado, es una herramienta muy eficaz en el estudio del uso de los recursos en la sociedad, con el objetivo de mejorar su selección, utilización y eficiencia.

Podemos expresar los conceptos de energía y exergía en los siguientes términos simples [21]:

(1) Energía es movimiento o capacidad de producir movimiento.

(2) Exergía es trabajo o capacidad de producir trabajo.

Las leyes de la termodinámica pueden formularse de la siguiente manera [21]:

(1) La energía siempre se conserva en un proceso (1ª Ley, ley de conservación de la energía).

(2) La exergía siempre se conserva en un proceso reversible, pero siempre se consume en un proceso irreversible (real) (2ª Ley, ley de la exergía).

Con la Fórmula 1, la exergía E de un sistema puede escribirse [21]:

$$E = S\,(T - T_0) - V\,(p - p_0) + ni\,(\mu i - \mu i_0\, i \sum)$$

Fórmula 1. Cálculo de la Exergía

Los parámetros extensivos son la entropía **S**, el volumen **V** y el número de moles de la sustancia **ni**, y los parámetros intensivos son la temperatura T, la presión **p** y el potencial químico de la sustancia **μi** para el sistema.

El subíndice **0** describe el estado de referencia cuando se establece el equilibrio termodinámico con el entorno de referencia. Se puede ver que la exergía se acerca a cero a medida que el sistema se acerca al equilibrio.

Los efectos de la electricidad, el magnetismo, la gravedad, la radiación, etc. también pueden añadirse fácilmente a esta expresión. La exergía es el elemento fundamental que impulsa a los sistemas disipativos, es decir, a aquellos sistemas que se mantienen mediante la transformación de energía y materiales. Ejemplos de estos sistemas pueden ser una célula viva, un organismo, un ecosistema, la superficie terrestre con sus procesos materiales o incluso una sociedad. En este sentido, se podría usar sistemáticamente el concepto de exergía para describir científicamente esos sistemas [21].

El concepto de exergía se utiliza principalmente en la ingeniería energética, donde se trabaja con energía de diferentes calidades. Sin embargo, el campo de aplicación puede extenderse a la totalidad de las conversiones energéticas y materiales en la sociedad. Esto proporciona una descripción uniforme del uso de los recursos físicos y de los impactos ambientales relacionados con este uso [21].

Los recursos naturales se dividen tradicionalmente en recursos energéticos y otros recursos. A menudo, esta separación es solo aproximada. El petróleo, por ejemplo, suele considerarse como un recurso energético y la madera como un recurso material. Sin embargo, esta distinción no es muy significativa, porque el petróleo también se puede utilizar para producir materiales útiles y la madera se puede utilizar como combustible. Sería más apropiado considerar estos recursos conjuntamente [21]. En principio, un material se puede cuantificar en unidades de exergía simplemente multiplicando su cantidad por un factor de transformación para el material. La unidad de dicho factor de transformación podría ser, por ejemplo, J/m^3 o J/kg. Este sería el comienzo de una presupuestación ampliada de los recursos y un primer paso hacia una integración con la presupuestación energética tradicional. Por lo tanto, la exergía por cantidad unitaria es el valor físico de un recurso que se puede comparar con el precio, que es el valor económico de un recurso. Y ambos valores se ven afectados por el entorno en cuestión [21].

2.5. Baja exergía en los sistemas integrados

Los análisis de energía convencionales generalmente se basan en la 1ª Ley de la termodinámica. Este tipo de análisis realiza un proceso simple de "contabilidad energética", donde sólo la energía de entrada y de salida del sistema y su transformación a lo largo de la cadena energética son consideradas. De esta forma, el aporte energético obtenido a partir de recursos externos (combustibles, electricidad, etc.) se transforma en productos útiles (calefacción, iluminación, ACS, etc.). Los flujos de energía que no se utilizan son considerados como pérdidas energéticas. En consecuencia, el análisis basado en la 1ª Ley sugiere que la ineficiencia de un dispositivo o un proceso se debe a estas pérdidas, por lo tanto, cuantos mayores sean las pérdidas, mayor la ineficiencia.

Por el contrario, cuando se utiliza el análisis exergético basado en las dos primeras leyes de la termodinámica, se cuantifica la irreversibilidad de los procesos y las ineficiencias se definen mejor. El análisis de la exergía permite evaluar directamente las pérdidas reales de un proceso, es decir, evalúa la disminución del trabajo disponible de las distintas fuentes de energía [22]. La baja exergía nos permite analizar, concebir, proyectar, construir y operar los edificios de una manera lógica en función, no del suministro de la energía, sino de la preservación de la energía, de la gestión de la energía y de la utilización de la energía en el medio (Figura 2-8).

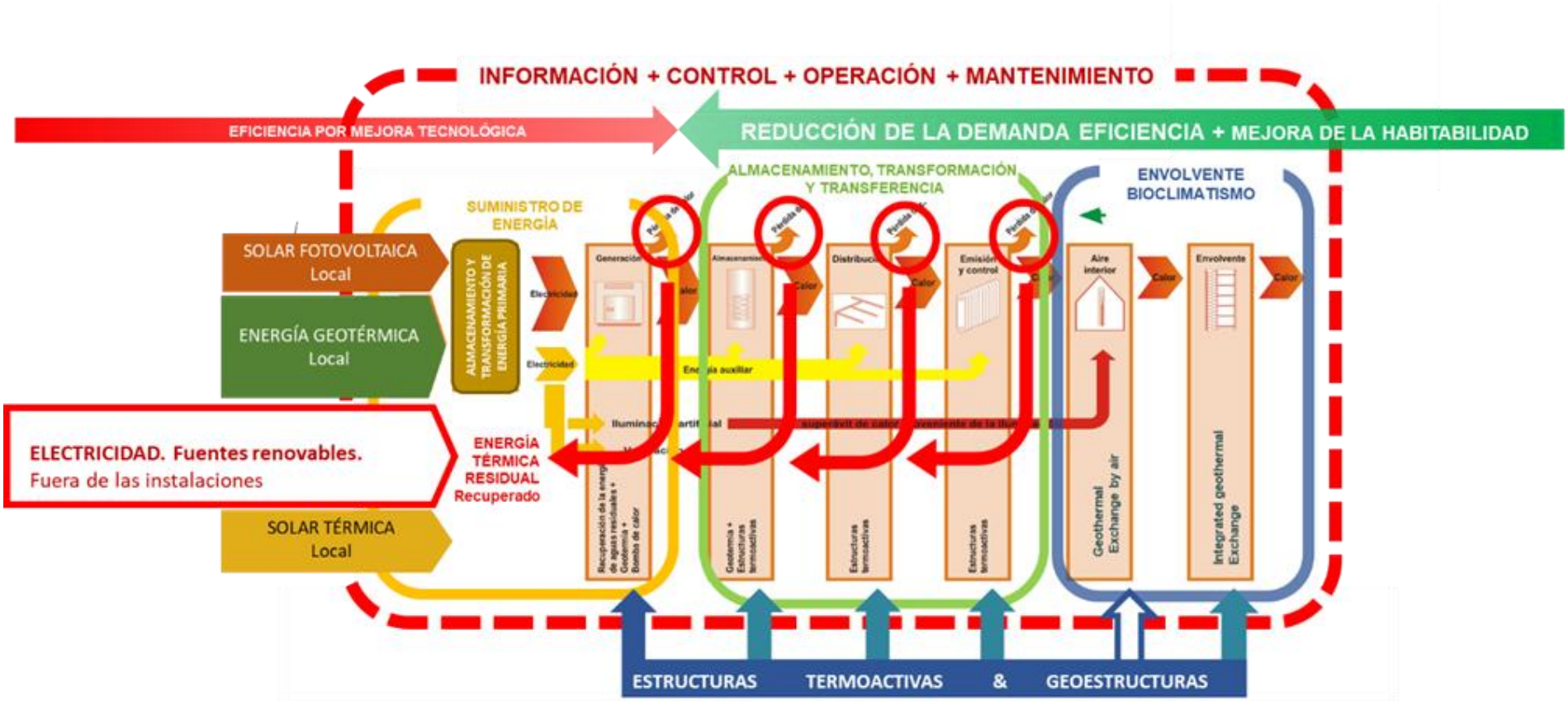


Figura 2-8. Esquema, en el ámbito de la Exergía, del fujo de la energía a través de los sistemas edificados. Fuente: Instituto Europeo de Innovación - Eneres.

Este análisis comprende:

- La reducción de la demanda a través de las envolventes, las pieles que intercambian, la actitud de intercambio con la luz, la actitud de intercambio con el aire.
- La definición de sistemas de climatización o de transferencia de energía.
- La consideración de que el hombre es interactivo con los sistemas energéticos.
- El uso de sistemas inerciales.
- El uso de sistemas de baja temperatura.
- El uso de sistemas hidrónicos usan fundamentalmente agua para transferir la energía.
- El adecuado almacenamiento energético.
- La gestión de los recursos construidos y técnicos para interaccionar con el medio con estrategias bioclimáticas, entre el clima y las personas. Los recursos que se dan en invierno no se dan en verano. Los que se dan durante el día se dan o no se dan durante la noche. Lo mismo sucede con todos los factores variables en el tiempo, y todos los factores de cambio so oportunidades de eficiencia.
- El uso de tecnologías de producción de última generación con alto rendimiento en el rango de temperaturas de la energía de bajo grado.
- La posible incorporación de recursos recuperados.

El estudio de la exergía en los edificios brinda la oportunidad de realizar análisis más precisos y entender de manera más completa la forma en que fluye la energía. Además, tiene un potencial mayor para ahorrar energía en comparación con el enfoque tradicional basado únicamente en la cantidad de energía y la energía primaria. Esto preparará el terreno para futuras interacciones en niveles más amplios, en donde se podrán aprovechar otros recursos y otros edificios en el marco de una simbiosis urbana.

Mediante este análisis se puede diferenciar la calidad de diversos tipos de energía, basándose en su capacidad para generar trabajo provechoso. De esta manera, es posible encontrar dos tipos de energía:

- Energía de alto grado, tanto en términos de efecto como de precio, incluye los combustibles fósiles y la electricidad, que tienen la capacidad de generar trabajo útil y transformarse en otras formas de energía.

- Energía de bajo grado o intensidad: la temperatura de un fluido (aire o agua) o la temperatura del terreno.

Al incorporar la variable del entorno en el concepto de exergía aplicado a la construcción, se considera al edificio como un sistema termodinámico capaz de absorber, retener e intercambiar exergía con su ambiente. Esto implica tener en cuenta todos los flujos de energía que están involucrados en la edificación. Considerando las fluctuaciones que ocurren en ese sistema, es posible reconocer las formas fundamentales de intercambio para beneficiarse de manera directa de las condiciones térmicas y de humedad del entorno:

- Aprovechar la inercia del terreno como interacumulador estacional aprovechando gracias al salto térmico estacional.
- Aprovechar la inercia del edificio como interacumulador diario gracias al salto térmico diario.
- Calentar el agua y el aire aprovechando la radiación solar indirecta.
- Climatizar con ventilación natural y nocturna, con recuperación de calor (free cooling), mediante el intercambio con el aire.
- Climatizar por intercambio geotérmico con el terreno.
- Transferir el calor por conducción y radiación desde el edificio hacia el exterior del mismo.

Por lo general, la temperatura agradable en los edificios suele rondar los 20-25 ºC. La cantidad de energía necesaria para lograr esta condición varía según la temperatura del entorno. En Madrid, la diferencia de temperatura con los sistemas de intercambio disponibles es mínima, generalmente no supera los 10-15 ºC para temperaturas promedio. Por lo tanto, la demanda de energía también es muy reducida.

Es por esto que, con el fin de emplear la energía de manera efectiva, es necesario adaptar el tipo o la calidad de la energía que se desea utilizar a las necesidades específicas: es recomendable aprovechar fuentes de energía próximas y renovables, que estén fácilmente disponibles en el entorno, y reservar las fuentes de energía de alta calidad únicamente para una pequeña parte de los procesos de transformación que las requieran.

Los factores que determinan una baja disponibilidad de energía son:

- Disminuir cargas térmicas por medios pasivos.
- Implementar sistemas de sistemas de climatización de baja exergía.
- Utilizar fuentes de energía renovables que se encuentren disponibles en el entorno cercano.
- Minimizar el empleo de recursos provenientes de combustibles fósiles y restringir el consumo de energía eléctrica a equipos con alta eficiencia.

La aplicación de la metodología de análisis exergético es de gran relevancia en la evaluación y creación de sistemas de climatización. Brinda más detalles acerca de las pérdidas y la disipación de exergía, incluyendo su ubicación, medida y origen, durante el proceso completo de suministro y transformación de energía. Esto resalta la gran cantidad de exergía que se pierde, especialmente en los procesos de alta generación de calor utilizando métodos convencionales, algo que no es evidente bajo el enfoque energético convencional. Los sistemas de baja exergía son aquellos que mantienen la temperatura de suministro lo más cercana posible a la temperatura de confort. Así, se reduce el consumo de exergía al minimizar la diferencia de temperaturas de trabajo entre los sistemas.

Dentro de las opciones de sistemas de baja exergía que se proponen, se incluyen:

- El intercambio geotérmico con el terreno utilizando sistemas de agua o aire.
- El uso de paneles solares, como los paneles térmicos y los fotovoltaicos, e incluso algunos que combinan las dos tecnologías.
- La recuperación del calor residual resultante de procesos de transformación térmica, o del aprovechamiento de agua caliente.
- El uso de sistemas de difusión que cuentan con amplias superficies de intercambio: sistemas de emisión que funcionan a una temperatura moderada, como los radiadores ubicados en las paredes, techos y suelos.
- La termo activación de componentes estructurales como los pilotes, las losas y los muros, que aprovechan también la inercia térmica.
- El uso de depósitos de inercia que permiten almacenar calor y aprovechar el cambio de temperatura diario para liberar calor durante la noche.
- La utilización de materiales con capacidad de cambio de fase para aprovechar el calor almacenado en ellos.

El uso de sistemas de climatización de baja exergía ofrece estos beneficios:

- Emplean energía de escasa potencia que se puede obtener a través de fuentes renovables presentes en el entorno cercano, así como la energía residual proveniente de fuentes de calor.
- Aprovechan las pequeñas variaciones de temperatura, demostrando una mayor eficiencia energética. Además, las calderas y bombas ofrecen un rendimiento óptimo, reduciendo las pérdidas de calor al circular a temperaturas cercanas al entorno. También se destaca una mejor capacidad de intercambio de calor en las superficies radiantes.
- Disminuyen el gasto de energía.
- Mejoran el confort al ofrecer temperaturas en las superficies similares a las del cuerpo humano, una distribución más uniforme de la diferencia de temperatura y una mejor calidad del aire en circulación.
- Son adaptables, ya que pueden obtener energía de diferentes fuentes de manera versátil.

A los efectos de esta tesis, la comprensión de criterios de baja exergía en cada contexto, es un poderoso recurso aplicable tanto a la recuperación de recursos y la rehabilitación, como al diseño de nuevos sistemas. Las consecuencias de un análisis sistémico con estos criterios sustentan el estudio del medio y la detección de oportunidades, la definición de estrategias, la implementación de soluciones, la elección de sistemas, componentes y materiales; y la operación y gestión en el Ciclo de Vida. Las soluciones no son estándares son consecuentes en cada caso con los requerimientos del contexto y las determinaciones para la eficiencia local.

2.6. Orientación hacia los objetivos de desarrollo sostenible

Los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de las ONU están en el corazón de las políticas y las inversiones, ya que ambos se preocupan por planificar e invertir para el bienestar a largo plazo de sus beneficiarios. Los ODS son de vital importancia para la salud de la economía mundial y tienen como objetivo crear un modelo viable para el futuro en el que se logre todo el crecimiento económico sin comprometer el medio ambiente ni imponer cargas injustas a la sociedad [23]. La eficiencia energética se considera fundamental para alcanzar los ODS, y se

considera uno de los tres objetivos clave de la Energía Sostenible para Todos (SE4all) de la ONU, que se alcanzarán para 2030 (Figura 2-9):

Asegurar que todos tengan la posibilidad de acceder a los servicios de energía modernos.

- Duplicar la tasa global de mejora de la eficiencia.
- Duplicar el porcentaje de energía renovable en la combinación de fuentes energéticas a nivel global



Figura 2-9. Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) [24].

"Lograr cada uno de los tres objetivos lograría múltiples y sustanciales beneficios para los países, las empresas y la sociedad. La energía es la industria más grande del mundo, y la transición a sistemas de energía sostenibles proporciona quizás una de las mayores oportunidades económicas globales del siglo XXI, particularmente importante en un momento de dificultades financieras en muchas naciones" [25].



Figura 2-10. Beneficios Múltiples de la Eficiencia Energética - MBEE [26].

Los beneficios de la Eficiencia Energética (EE) van mucho más allá de la reducción de consumos, los ahorros energéticos o la reducción de emisiones de CO_2 que se puedan lograr. Los Beneficios Múltiples de la Eficiencia Energética o su término en inglés, Multiple Benefits of Energy Efficiency (MBEE), suelen ser menos tangibles y más difíciles de cuantificar que el ahorro de energía. Además, las herramientas de toma de decisiones políticas requieren que los beneficios se moneticen para permitir la comparación con los costos de los programas de eficiencia energética. El término MBEE abarca una amplia gama de impactos, incluidos los económicos, la salud y el confort físico, sociales y ambientales (tanto

locales como globales), entre otros. La identificación de todos los beneficios directos e indirectos de la eficiencia energética es un campo en evolución pero importante es importante para la evolución de los proyectos [27]. La Figura 2-10ilustra diversos beneficios de la EE.

Categoría	Co-beneficio	ODS
Medio ambiente	**Ahorro de energía**	**OBJETIVO 12:** Consumo y producción responsables **OBJETIVO 13**: Acción por el clima **OBJETIVO 11**: Ciudades y comunidades sostenibles
Medio ambiente	**Impactos de emisiones de GEI**	**OBJETIVO 13:** Acción climática
Medio ambiente	**Reducción de la contaminación atmosférica**	**OBJETIVO 7**: Energía asequible y limpia
Medio ambiente	**Gestión de recursos**	**OBJETIVO 12:** Consumo y producción responsables **OBJETIVO 11**: Ciudades y comunidades sostenibles
Económico	**Efectos en el trabajo**	**OBJETIVO 8:** Trabajo decente y crecimiento económico
Económico	**PIB**	**OBJETIVO 8:** Trabajo decente y crecimiento económico
Económico	**Presupuesto Público**	**OBJETIVO 8:** Trabajo decente y crecimiento económico
Económico	**Seguridad energética**	**OBJETIVO 7:** Energía asequible y limpia **OBJETIVO 11:** Ciudades y comunidades sostenibles **OBJETIVO 12:** Consumo y producción responsables
Económico	**Innovación y Competitividad**	**OBJETIVO 9:** Industria, Innovación e Infraestructura **OBJETIVO 11:** Ciudades y Comunidades Sostenibles
Social	**Salud y bienestar: reducción de la mortalidad**	**OBJETIVO 3:** Buena salud y bienestar
Social	**Salud y bienestar: morbilidad**	**OBJETIVO 3:** Buena salud y bienestar
Social	**Alivio de la pobreza**	**OBJETIVO 1:** No a la pobreza **OBJETIVO 7:** Energía asequible y limpia **OBJETIVO 10:** Reducción de la desigualdad
Social	**Productividad mejorada**	**OBJETIVO 4:** Educación de calidad **OBJETIVO 8:** Trabajo decente y crecimiento económico

Tabla 2.2. Tabla beneficios múltiples a escala macro y ODS asociado.

Los MBEE destacados para este estudio están directamente relacionados con muchos de los ODS de la ONU. Los ODS se enumeran y vinculan con los MBEE como se sintetiza en la Tabla 2.2.

2.6.1. Un cambio prometedor hacia el desarrollo sostenible

La comunidad científica internacional, que se ocupa del desarrollo sostenible está de acuerdo en con declaración de Ban Ki-moon, Secretario General de la ONU, 2006-2017, que afirmó "La energía es el hilo dorado que conecta el crecimiento económico, una mayor equidad social y un medio ambiente sano". El desarrollo sostenible no es posible sin energía sostenible". En diciembre de 2012 la ONU declararon la década 2014-2024 como la Década de la Energía Sostenible para Todos [28] e introdujeron el nuevo Objetivo de Desarrollo Sostenible 7: Garantizar el acceso a servicios asequibles, fiables, Energía sostenible y moderna para todos [29].

Aunque la energía es el sector industrial dominante en el mundo, los actuales sistemas energéticos centralizados y no renovables están lejos de ser capaces de llevar la energía a todos de forma sostenible Necesitamos un cambio de paradigma del sistema energético hacia las llamadas Energías Renovables Distribuidas, o en inglés Distributed Renewable Energy (DRE) [29].

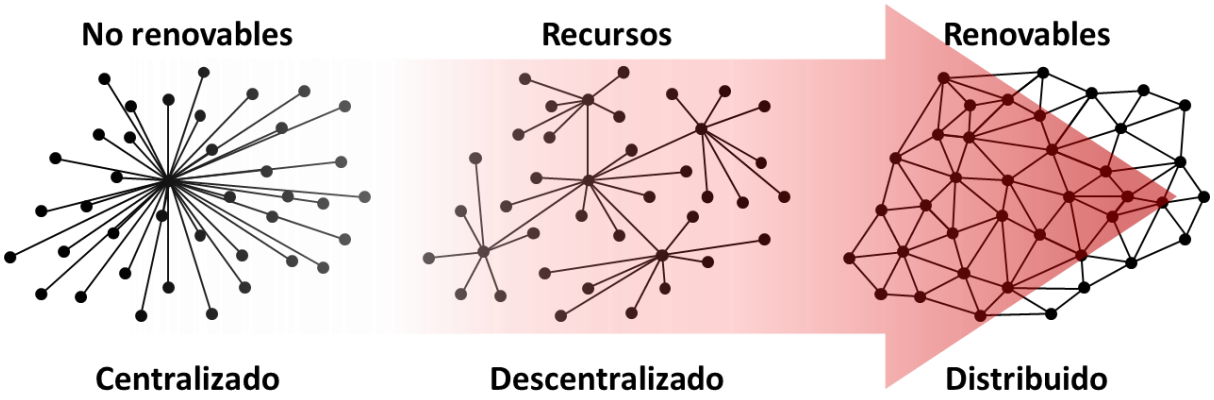


Figura 2-11. Cambio de paradigma de sistemas de generación y distribución de energía. Fuente: Instituto Europeo de Innovación - Eneres.

La generación de DRE podría definirse de la siguiente manera[30]:

"Plantas de generación a pequeña escala que aprovechan los recursos de energía renovable (como el sol, el viento, el agua, la biomasa y la energía geotérmica), en el punto de uso o cerca de él, en el que los usuarios son los productores, ya sea individuos, pequeñas empresas y/o una comunidad local. Si las plantas de generación a pequeña escala también están conectadas entre sí (por ejemplo, para compartir el excedente de energía), se convierten en una Red Local de Energía Renovable, que a su vez puede estar conectada con redes similares cercanas."

Para aclarar, los sistemas de DRE presentan las siguientes características de sostenibilidad ambiental, económica y socioética [29]:

- Se basan en recursos inagotables reduciendo así las emisiones de gases de efecto invernadero y el impacto ambiental para su extracción, transformación y distribución.
- Se instalan como plantas de generación a pequeña escala, lo que conlleva una reducción de la inversión económica.
- Son fáciles de instalar, mantener y administrar, lo que permite a las personas y comunidades locales instalar/administrar plantas. Esta característica favorece la democratización del acceso a los recursos, al tiempo que mejora el empleo local y la difusión de las competencias.

2.7. Cambio de paradigmas

El cambio de paradigma tiene que ver con las conferencias internacionales sobre el medio ambiente y el clima, con los ODS y demás esfuerzos internacionales por alcanzar el equilibrio económico y social.

Tiene mucho que ver también con el cambio de tendencias desencadenado a escala mundial por conflictos bélicos, y las tensiones geopolíticas asociadas que han cambiado las reglas de juego políticas. Los países desarrollados siguen ejerciendo la hegemonía económica y las grandes corporaciones y potencias económicas siguen explotando los recursos minerales y productivos de países en desarrollo, a menudo aprovechando sus debilidades institucionales y políticas. Esta es una etapa en la que las grandes corporaciones y las potencias emergentes ejercen el poder político-económico sobre los recursos energéticos con especial intensidad táctica y en un marco cada vez más polarizado.

Mientras la confrontación internacional distorsiona cualquier planteamiento lógico sobre la disponibilidad universal de recursos energéticos primarios, en paralelo, la UE impulsa proyectos de transición orientados a incorporar la energía de bajo grado, e incluso para hibridarla en un ejemplo paradigmático de transición helicoidal, a redes urbanas con recursos de alto grado.

Low2HighDH [31] es un proyecto de 3 años de duración que apoya a 30 emplazamientos de Calefacción Urbana de Alta Temperatura, o su término en inglés High Temperature District Heating and Cooling (HT DHC) en Lituania, Polonia y Eslovaquia en el proceso de implementación de tecnologías de calor

residual o de baja calidad, promoviendo las ventajas de estas fuentes de energía y proporcionándoles un plan de inversión para cumplir los criterios propuestos para la "calefacción y refrigeración urbanas eficientes" de la Directiva de Eficiencia Energética en un plazo de 10 años.

Las tecnologías de Fuentes de Energía Renovables, o su término en inglés Renewable Energy Sources (RES), de bajo grado que se explorarán incluirán al menos la energía solar térmica, la geotérmica de baja temperatura y las bombas de calor. Esta última se tomará como "la tecnología habilitante" para aprovechar las fuentes de calor de bajo grado, así como para utilizar el calor residual.

Al ser eléctricas, las bombas de calor pueden utilizar electricidad renovable, por ejemplo, eólica y fotovoltaica.

El proyecto generará y difundirá materiales de desarrollo de capacidades para ser utilizados por otros sitios con redes de distrito de alta temperatura, incluida una cartera de soluciones técnicas y financieras que se ajusten a las situaciones más comunes.

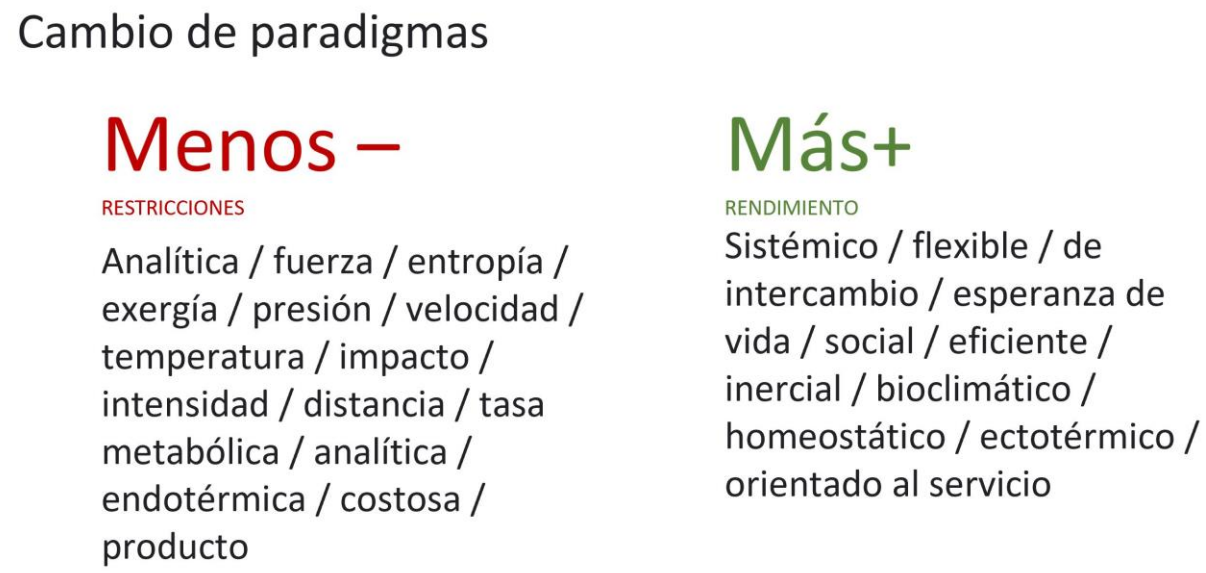


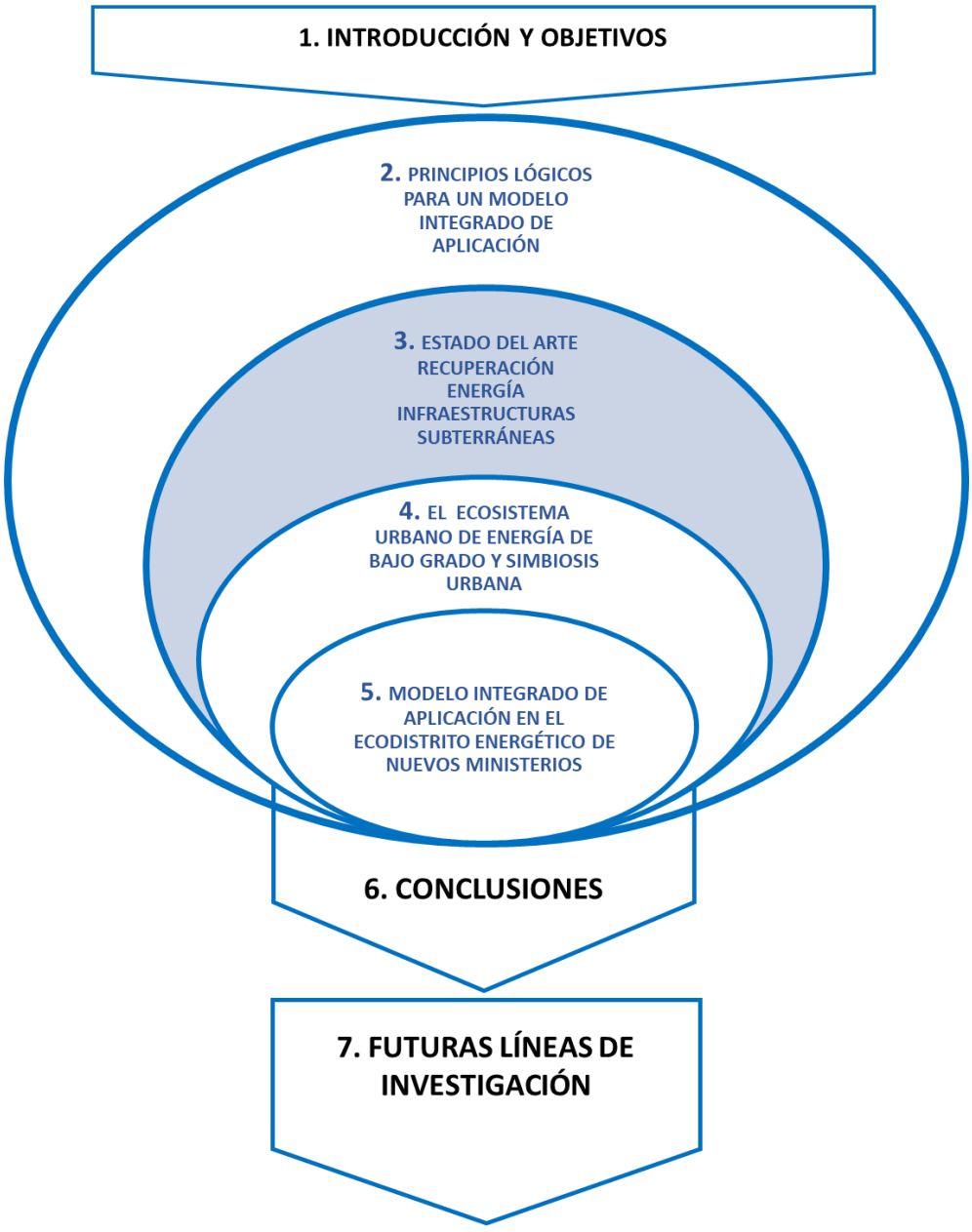
Figura 2-12. Rasgos de los sistemas energéticos según los nuevos paradigmas. Fuente: Propia.

La creación de una amplia red de participantes en los 3 países estudiados permitirá una fase de participación activa, difusión y replicación: 3 comunidades nacionales de partes interesadas, 30 grupos de enlace locales, así como una comunidad de embajadores en todo el proyecto.

Se espera que el proyecto genere 454 millones de euros en inversiones en energía sostenible (tecnologías térmicas RES + calor residual), para reemplazar 1 TWh/año de combustibles fósiles y reducir 291 mil toneladas de emisiones de CO_2.

A los efectos de esta Tesis, a medida que el escenario energético internacional se torna más conflictivo e imprevisible, el progreso en el desarrollo de sistemas eficientes de recuperación de recursos de bajo grado se manifiesta como una de las vías paralelas de eficiencia, autarquía energética, seguridad y equidad energética. Tal como era previsible la hibridación de sistemas de alto y bajo grado, la transición en los modos de uso de redes de distrito para la climatización urbana va a propiciar la puesta en valor de los recursos recuperables en las redes de infraestructuras urbanas subterráneas.

3. Múltiples dimensiones de la recuperación y reinyección de la energía de bajo grado procedente de las infraestructuras urbanas subterráneas



3.1. El nuevo concepto de la eficiencia energética

En el siglo XXI se observa un hecho que ha ido planteando cada vez con más preocupación durante décadas: el concepto de "desarrollo" tal como lo hemos entendido hasta ahora es insostenible. Este desarrollo se basa en un crecimiento constante que implica la concentración de recursos, una redistribución deficiente y un enorme desperdicio.

Se proponen medidas para avanzar hacia un desarrollo sustentable desde el punto de vista ambiental, en el cual se prioriza la redistribución en lugar del crecimiento constante. Se reconoce que ya existe una gran cantidad de riqueza en un espacio limitado, por lo que resulta complicado seguir acumulando más. Además, se busca evitar considerar como un éxito económico el hecho de que el consumo de recursos y energía aumente continuamente.

Las Figura 3-1, Figura 3-2, Figura 3-3 y Figura 3-4 ilustran la relación entre la intensidad energética y el producto interior bruto de los países y la que existe entre emisiones de gases de efecto invernadero y el producto interior bruto.

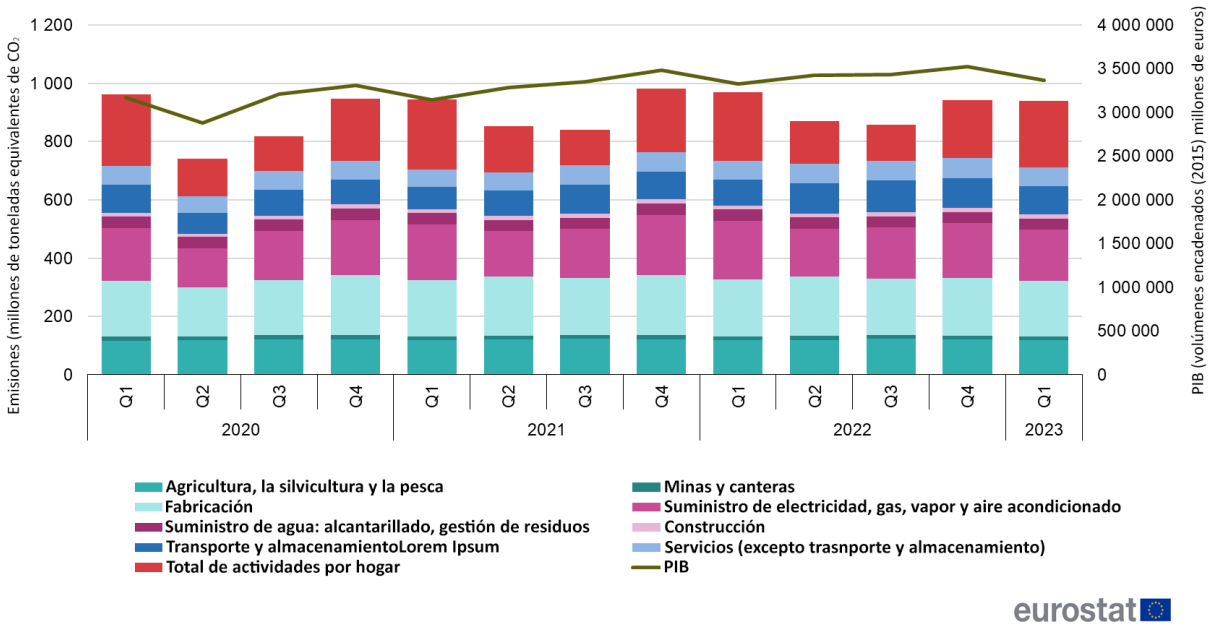


Figura 3-1. Emisiones de gases de efecto invernadero por economía y PIB, UE, primer trimestre de 2020 - primer trimestre de 2023 [32].

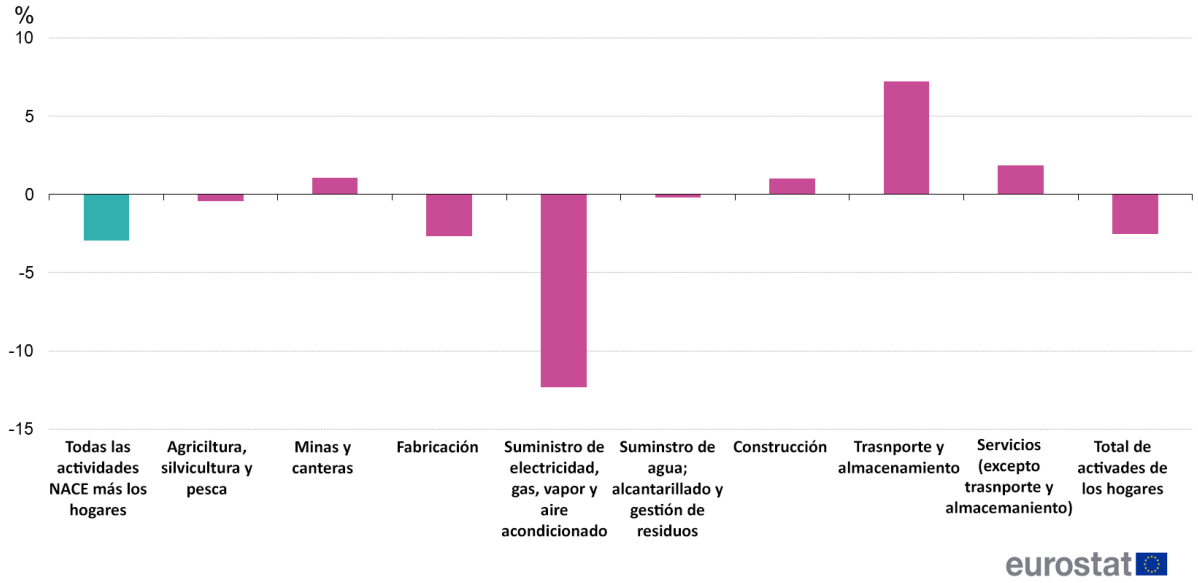


Figura 3-2. Tasas de crecimiento de las emisiones de gases de efecto invernadero por parte de la economía, UE, primer trimestre de 2023 (Variación % respecto al mismo trimestre del año anterior) [32].

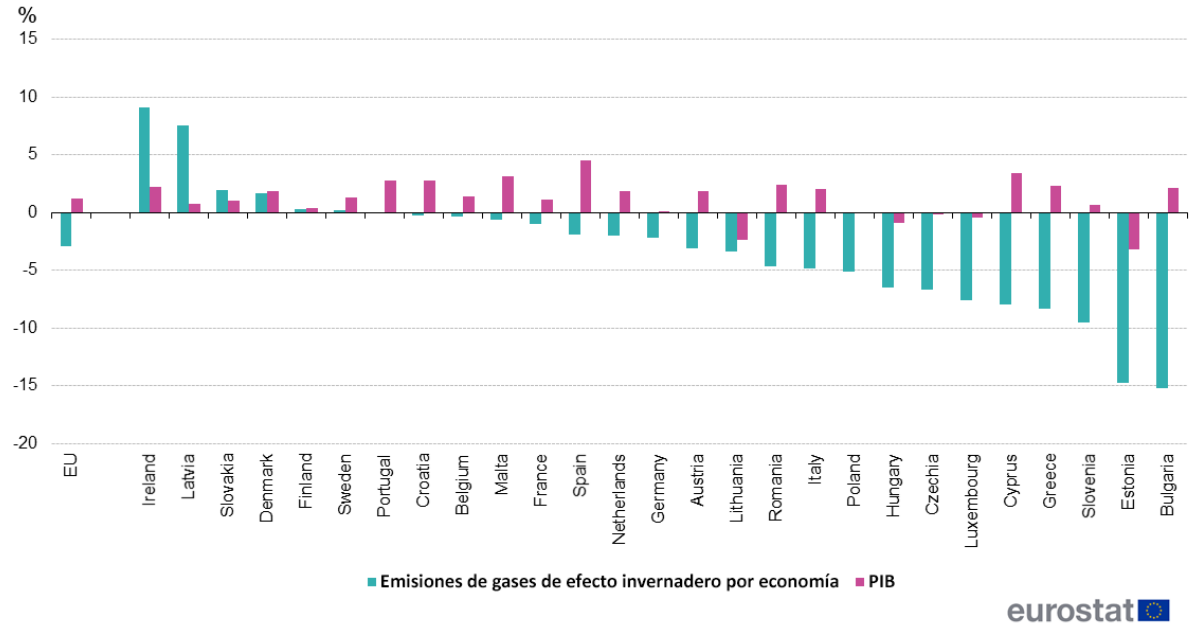


Figura 3-3. Tasas de crecimiento de las emisiones de gases de efecto invernadero por economía y PIB, primer trimestre de 2023 (variación porcentual respecto al mismo trimestre del año anterior) [32].

En el primer trimestre de 2023, las emisiones de gases de efecto invernadero de la UE ascendieron a 941 millones de toneladas equivalentes de CO_2, lo que supone un descenso del 3 % en comparación con el mismo trimestre de 2022 (969 millones de toneladas de equivalentes de CO_2) [33].

Este descenso va acompañado de un cierto repunte económico, como demuestra el aumento del 1,2 % del producto interior bruto (PIB) de la UE en el primer trimestre de 2023, en comparación con el mismo trimestre de 2022.

En el primer trimestre de 2023, los sectores económicos responsables de las mayores emisiones de gases de efecto invernadero fueron los hogares (24 %), la industria manufacturera (20 %), la electricidad, el suministro de gas (19 %), la agricultura, la silvicultura y la pesca (13 %), seguidos del transporte y el almacenamiento (10 %).

Los datos muestran que, en comparación con el primer trimestre de 2022, las emisiones disminuyeron en 5 de los 9 sectores económicos. El mayor descenso se registró en el suministro de electricidad y gas (-12,3 %). El principal sector en el que aumentaron las emisiones fue el transporte y almacenamiento (+7,2 %).

Las emisiones en el primer trimestre de 2023 disminuyeron en la mayoría de los países de la UE en comparación con el mismo trimestre de 2022, excepto en Irlanda (+9,1 %), Letonia (+7,5 %), Eslovaquia (+1,9 %), Dinamarca (+1,7 %), Finlandia (+0,3 %) y Suecia (+0,2 %), donde aumentaron. Este grupo de miembros de la UE también vio aumentar su PIB. Entre los países de la UE que redujeron las emisiones de gases de efecto invernadero, los mayores descensos se registraron en Bulgaria (-15,2 %), Estonia (-14,7 %) y Eslovenia (-9,6 %).

De los 21 países de la UE que experimentaron una disminución de las emisiones, solo 6 registraron una disminución de su PIB (Chequia, Estonia, Lituania, Luxemburgo, Hungría y Polonia), lo que significa que 15 países de la UE (Portugal, Croacia, Bélgica, Malta, Francia, España, Países Bajos, Alemania, Austria, Rumanía, Italia, Chipre, Grecia, Eslovenia y Bulgaria) lograron reducir las emisiones al tiempo que aumentaban su PIB.

Se puede ver en los últimos datos publicados por Eurostat [32], cómo ámbitos concretos como son algunos países de la UE el crecimiento del PIB discurre en paralelo a la disminución de emisiones de gases de efecto invernadero. Esta es la tendencia general en el marco de las políticas de lucha contra el cambio climático, si bien muchos contextos, regiones o países no pueden sostener a corto plazo esta tendencia como se puede también comprobar a través de la Figura 3-4 y la Figura 3-5:

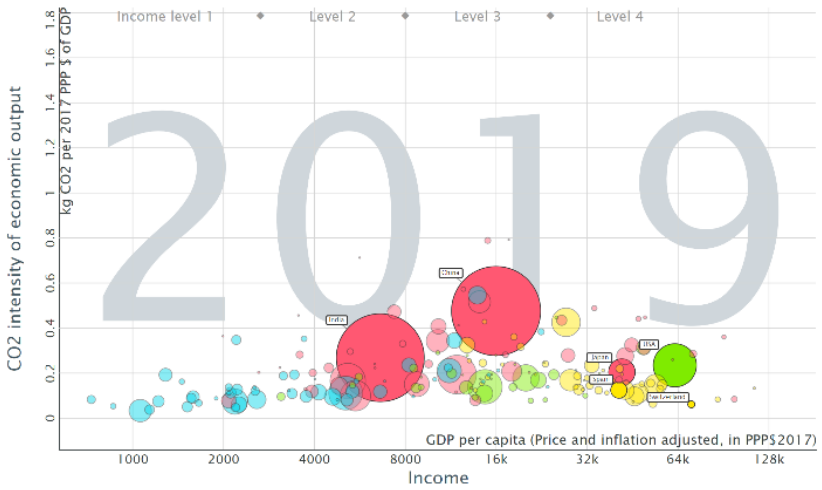


Figura 3-4. Intensidad de CO_2 de producción económica en 2019. Kg de CO_2 por el PIB PPAs de 2017 vs PIB per cápita (Precio e inflación ajustados en PPA 2017).
Fuente: https://www.gapminder.org

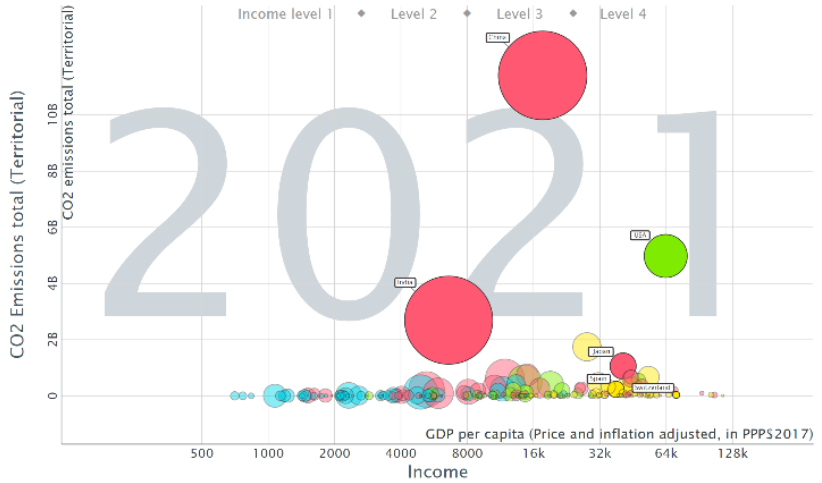


Figura 3-5. Emisiones de CO_2 totales (Territorial) vs PIB per cápita (Precio e inflación ajustados en PPA 2017).
Fuente: https://www.gapminder.org

El incremento constante del consumo como medida del progreso no es una meta alcanzada. El verdadero logro sería encontrar formas de mejorar la calidad de los bienes y servicios sin aumentar el uso de recursos. Esto se puede lograr a través de un mayor ahorro y eficiencia en ciertos sistemas, lo que resultaría en una distribución más equitativa a nivel territorial y en todas las áreas del ecosistema energético.

El cambio del sistema energético, tema que ha sido objeto de numerosos debates, no puede simplemente reducirse a reconsiderar las fuentes de producción y

modificar nuestros conceptos sobre la combinación de energías o la clasificación, en relación con los compromisos adquiridos tanto a nivel europeo como mundial en cuanto a energías "limpias".

El sistema energético es una estructura compleja que engloba diversos elementos como materia, energía, información, espacio, agua, residuos, emisiones, política, tecnología, conductas y dinero. El sistema debe funcionar de manera eficiente, equilibrada y sostenible para que sea realmente efectivo. Los flujos de estos elementos dentro del sistema no deben ser lineales, sino que deben moverse en múltiples direcciones y sentidos dentro del espacio del sistema.

Es necesario tener en cuenta el cambio en el sistema y modelo energético para volver a comprender el verdadero significado del concepto de energía. La energía no se utiliza como objeto de consumo, sino que se transforma para realizar tareas específicas. Se pueden costear los servicios relacionados con la transformación y aplicación de la energía, pero en esencia, la energía se define como la capacidad de hacer un trabajo o lograr algo a partir de algo. La eficiencia se refiere a la disponibilidad de energía, mientras que la sostenibilidad se refiere al equilibrio. En dicho cambio, se busca minimizar cualquier efecto negativo en el medio ambiente, la comunidad, el clima, la salud y las personas.

De manera global, contamos con la capacidad necesaria para generar una cantidad adecuada de energía, sin embargo, carecemos de eficiencia en su gestión y transformación. La cuestión primordial radica en la creación de medios que permitan optimizar la transformación de energía, aumentando su utilidad y disminuyendo su desperdicio. El inconveniente no reside en la producción en sí misma.

En la era posindustrial del siglo XXI, los recursos y métodos para administrar, transferir y almacenar energía están impulsando un cambio importante. Este cambio implica aumentar la utilidad y disminuir la falta de orden en la energía, lo que resulta en un aumento del valor de los recursos naturales. Las Tecnologías de la Información y de la Comunicación (TIC) desempeñan un papel fundamental en este proceso de transformación.

Las nuevas tecnologías de la información y comunicación están generando un impacto significativo en la estructura social actual. La información fusiona y combina todos los niveles del sistema energético. En la evolución de la sociedad, hemos transitado de vivir en un entorno donde predominaban las mercancías tangibles a un entorno donde las mercancías digitales y la información son las

protagonistas. La información lo es todo. Esta mercancía digital se ha vuelto tan preciada que se deben realizar todos los esfuerzos necesarios para garantizar, en primer lugar, su acceso a la mayor cantidad de personas posible. En segundo lugar, debido a su contribución al ahorro de energía en comparación con el uso convencional de materiales, es importante expandirla en todo el sistema. Es importante tener en cuenta que ahorrar materia también implica ahorrar energía, ya que la transformación de la materia requiere de energía.

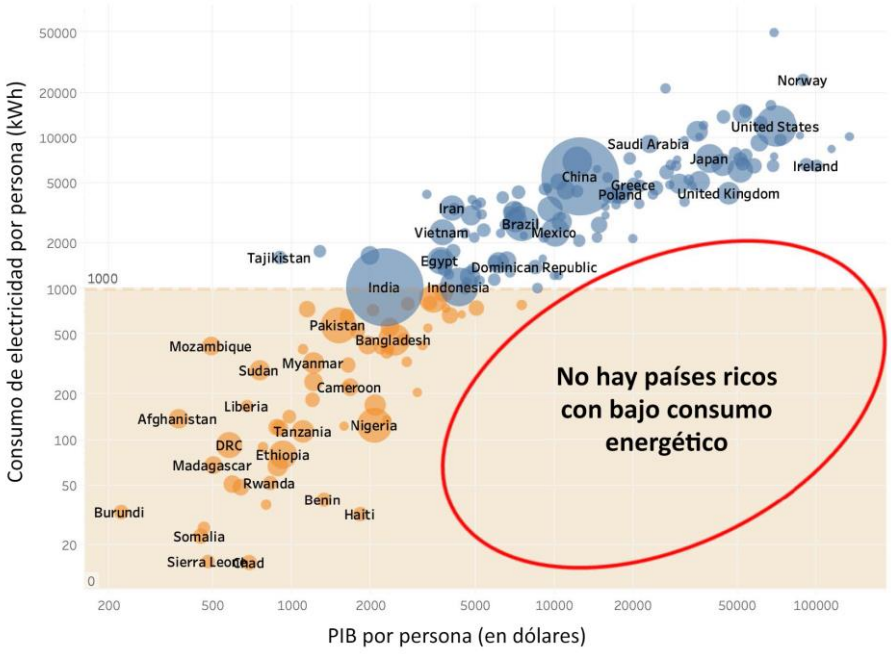


Figura 3-6. Consumo de energía por persona (2021) [34].

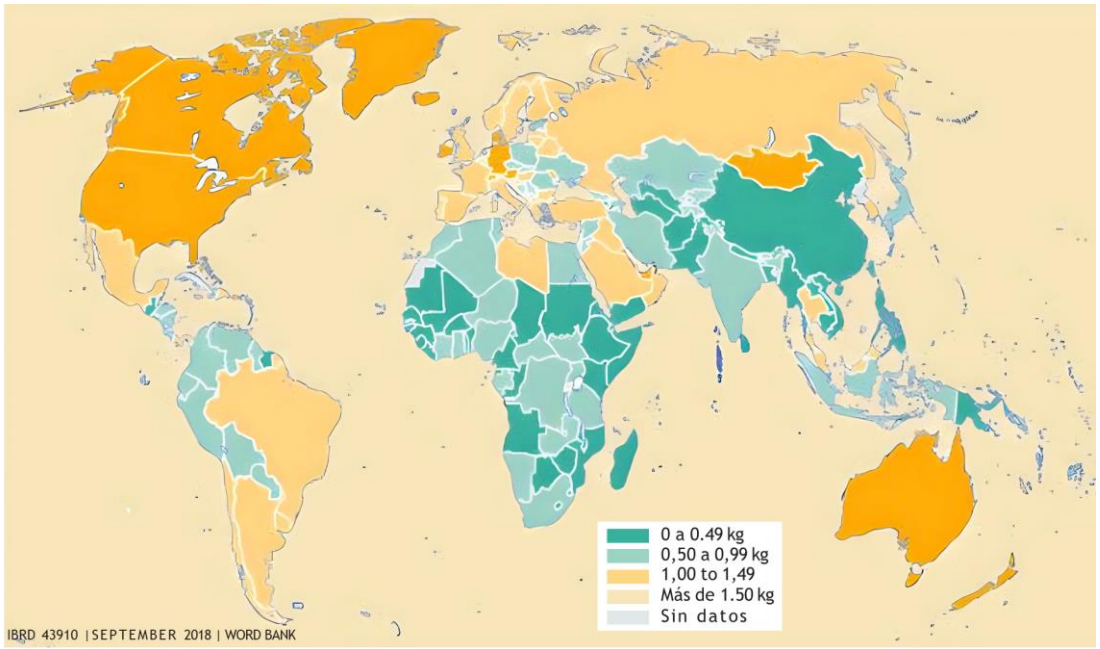


Figura 3-7. Generación de desperdicio por persona en 2018. Modificado por el autor de [35].

En los próximos 50 años, no se vislumbran alternativas evidentes para una transformación completa y libre de contaminación de la generación de energía de una generación a otra. Debemos, por ende, trabajar en el mejoramiento del uso actual de la energía, incrementar la eficiencia en el empleo de las fuentes energéticas disponibles y aprovechar grandes cantidades de energía actualmente desaprovechada y sin utilidad. La conclusión a la que se llega es la necesidad de aumentar la eficiencia en el consumo de energía y utilizar una amplia gama de recursos energéticos adicionales, provenientes del desperdicio.

Nuestra sociedad se caracteriza por ser derrochadora, ya que desechamos un gran porcentaje de lo que poseemos, incluso si tiene algún valor. No poseemos habilidades para aprovechar de manera eficiente, o simplemente no tenemos el deseo, de optimizar la mayoría de la energía que convertimos. Existe un camino muy prometedor de mejora que aún no se ha investigado lo suficiente.

Cuando comparamos el concepto de civilización del desperdicio con el concepto de desarrollo sostenible, se hace evidente que no se puede lograr un desarrollo sostenible sin abordar este estilo de vida derrochador. En esta civilización, la medida de la riqueza de las sociedades se basa en la cantidad de residuos que generan a diario, incluyendo todos los productos residuales de nuestro sistema, incluyendo una cantidad significativa de energía transformada.

Las Figura 3-6 y Figura 3-7 ilustran el consumo de energía y los residuos que generan, por persona, en el mundo. Es una paradoja que está llena de posibilidades.

Desafortunadamente hoy, en el sistema mundial a escala global, la cantidad de desperdicio aumenta en proporción a la riqueza. Cualquier intento por convertir en virtual lo que es material resultará en una mayor eficiencia en los procedimientos. Al aplicar de manera eficaz las TIC a la gestión inteligente de la transformación energética, se puede aprovechar una parte considerable de los desechos como fuente principal de materiales y energía. Por consiguiente, existe una gran expectativa en cualquier avance que permita que las TIC, así como el ámbito de la tecnología en general, progresen hacia métodos más eficientes de expansión. Esto solo puede ser beneficioso para el equilibrio global del sistema y de la sociedad, ya que probablemente lograremos mucho más a través de estos medios que con los métodos tradicionales.

Es necesario establecer un ecosistema energético equilibrado y sostenible. Hay que buscar crear una comunidad energética a diferentes niveles: global, continental,

nacional, territorial, urbana, intraurbana y doméstica. Además, de estudiar los factores físicos que influyen en este entorno, los procesos de interacción entre los componentes del sistema energético, y los cambios y ciclos de energía que determinan el campo del ecosistema energético.

Por esta razón, es muy importante estudiar la relación entre todos componentes del sistema y su interacción con el entorno en el que se desarrollan. Además, es necesario investigar la sostenibilidad y eficiencia energética en diferentes niveles, como el individual, el de la población, el de la comunidad y el del ecosistema energético.

Los estudios en todas las escalas se centran en analizar la forma en que diferentes agentes y estructuras energéticas interactúan, ya sea como consumidores o productores de recursos, o como competidores que comparten necesidades y recursos. Ver el sistema energético como un ecosistema permite comprender su comportamiento en su totalidad.

Las redes encargadas de administrar la transformación se solapan con las redes dedicadas a distribuir energía eléctrica y térmica. El entendimiento es que el plano de la red integrada de información para la efectiva gestión de recursos eléctricos debe ser único, formando parte de una red global integrada para la eficiente gestión de recursos. Esta red contemplaría esquemas de administración inteligente en distintos ámbitos, como la tierra, el agua, el espacio, los materiales, además de la alimentación, la salud, la educación y los recursos monetarios [36].

La base de una red eficaz y sofisticada radica en el equilibrio dinámico, que se sustenta en dos elementos únicamente: la comunicación y la distribución. El sistema tiene que ser capaz de lidiar eficientemente con la inestabilidad de un entorno que está en constante cambio. Es fundamental buscar un equilibrio a nivel mundial para asegurar la sostenibilidad del sistema. Es imprescindible considerar una visión global e inclusiva al diseñar las redes inteligentes, ya que su papel es vital para mantener un equilibrio en el ecosistema biológico. Es importante promover los intereses individuales dentro del marco de la responsabilidad social [36].

3.2. Eficiencia y calidad de la energía

En el siglo XXI, la eficiencia energética abarca más que solo la tecnología y el rendimiento de equipos, maquinaria y sistemas de climatización. Hoy en día, la eficiencia en climatización se entiende como una estrategia gradual que utiliza recursos de alto rendimiento y bajo impacto en cada uno de los factores que determinan la eficiencia de un sistema de infraestructuras, un conjunto de edificios, un nuevo edificio o un edificio renovado.

El objetivo es que el propio sistema edificado, edificios, infraestructura, ciudades, se convierta en un dispositivo eficiente de transformación de energía, integrando todos los aspectos de rendimiento energético. Estos aspectos incluyen el aprovechamiento pasivo de la energía del entorno, el diseño óptimo de la envolvente del edificio, el espacio y la masa para reducir la demanda energética, así como los mecanismos de transferencia de energía de alta capacidad y baja potencia para la climatización. Además, se busca una transformación eficiente de la energía proveniente de fuentes renovables y residuales para su uso en climatización. También es importante mantener una operación y un mantenimiento eficientes durante todo el ciclo de vida del sistema.

En la actualidad, es crucial asegurar la sostenibilidad y eficiencia en la construcción y, especialmente, en el sistema de climatización. Esto se debe a la necesidad urgente de detener la degradación ambiental y reducir el impacto negativo en los ecosistemas de un mundo cada vez más urbanizado. Es crucial reemplazar el enfoque convencional, que se basa en análisis numéricos, centralización y suposiciones, en el ámbito de la transformación y utilización de la energía, con una perspectiva que se base en la calidad, distribución y solidaridad..

La visión exegética de los procesos energéticos nos impulsa a diseñar sistemas, infraestructuras, construcciones y dispositivos que maximicen el uso efectivo de la energía útil (exergía) y disminuyan al mínimo la energía residual y desordenada (entropía).

Tiene completo sentido y es lógico promover el avance de técnicas y tecnología enfocadas en aumentar hasta diez veces el rendimiento y la utilidad de los recursos primarios que ya se están utilizando en la actualidad.

Insistir en incrementar la producción de energía inicial, la conversión inicial, en lugar de enfocarnos en mejorar la implementación, transferencia y gestión

operativa de los edificios, es adoptar una postura peligrosa que nos lleva inevitablemente a un destino desastroso.

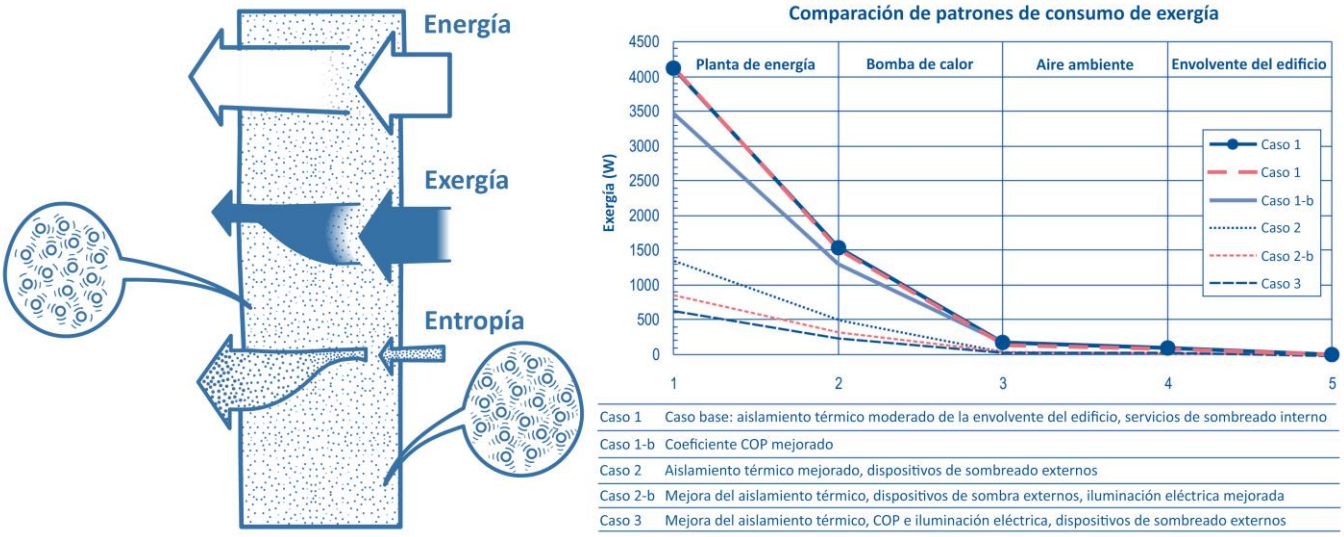


Figura 3-8. Exergía. Incorporación de todos los elementos que influyen en la eficiencia en la climatización.[37].

El tema radica en el manejo adecuado de los recursos, no en la creación de los mismos.

El problema no está en la generación sino en la gestión del uso de los recursos.

3.3. La energía del siglo XXI: la energía residual

En entornos donde se busca minimizar el consumo de energía y reducir el desperdicio, es importante considerar el uso de fuentes de energía primaria valiosas para asegurar la climatización de los edificios. Estas fuentes de energía son abundantes en los alrededores y se generan como subproductos en diversos procesos y sistemas urbanos.

La industria, las infraestructuras y el transporte son sistemas que continuamente producen grandes cantidades de energía que se transforma irreversiblemente en formas que no se pueden utilizar en sus propios procesos. Actualmente se presenta una paradoja en la que la disipación de energía en la atmósfera, el agua y el suelo ocasiona impacto y contaminación ambiental, generando grandes inversiones y gastos durante la operación y la explotación. Podría ser considerada una valiosa fuente de recursos energéticos rentables y sostenibles para la climatización. A lo largo de la historia, se han desarrollado diversas técnicas de captación,

almacenamiento y transferencia de energía a temperaturas medias y bajas en los edificios. Además, los avances tecnológicos de las últimas décadas han permitido mejorar significativamente las capacidades y eficiencia de los dispositivos de intercambio de energía térmica y los sistemas de gestión y control en los edificios, lo que facilita la implementación de estrategias y escenarios de eficiencia energética a lo largo de su vida útil.

El tema de la energía de temperatura media y baja, también conocida como energía de bajo grado, es especialmente claro debido a que las fuentes de este tipo de energía se encuentran tanto dentro como fuera de los edificios. En otras palabras, la generación de energía térmica a baja y media temperatura ocurre directamente en las zonas urbanas, permitiendo su recuperación y uso inmediato sin necesidad de transporte ni pérdidas en la transferencia a larga distancia. En el contexto de las infraestructuras urbanas subterráneas, se almacena la energía proveniente de nuestros hogares y de nuestros cuerpos, así como la energía suministrada por los aparatos y equipos que nos brindan servicios o nos transportan, o la energía que transferimos al medio para acondicionarlo.

La energía de baja intensidad es un recurso muy valioso y escaso, por lo que es necesario recuperar y reutilizar de la manera más cercana posible al punto de consumo. Además, es muy sencillo aprovecharla para la climatización en entornos urbanos.

3.4. Urbanización e infraestructuras urbanas

El crecimiento demográfico, la urbanización, y el calentamiento global son los factores más importantes que rigen el cambio ambiental global.

En 1950 un 25 % de la población mundial vivía en las áreas urbanas, esta cifra aumentó casi a la mitad de la población en 2020. Se proyecta un nuevo aumento hasta casi el 60% para 2070 [38]. Se estima que la población urbana mundial crecerá en 2.500 millones de habitantes urbanos entre 2018 y 2050 (Figura 3-9) [39]. 2018 existían 33 “megaciudades”, de 10 millones de habitantes, en 20 países del mundo De 2018 a 2030, se espera que 10 ciudades se sumen al grupo de megaciudades actuales, de modo que en 2030, 43 aglomeraciones urbanas de 10 millones de habitantes o más albergarán a alrededor de 730 millones de personas en todo el mundo. El número de “metaciudades”, con 20 millones de habitantes o más, por su parte, aumentará de 6 a 12 durante ese mismo período [39].

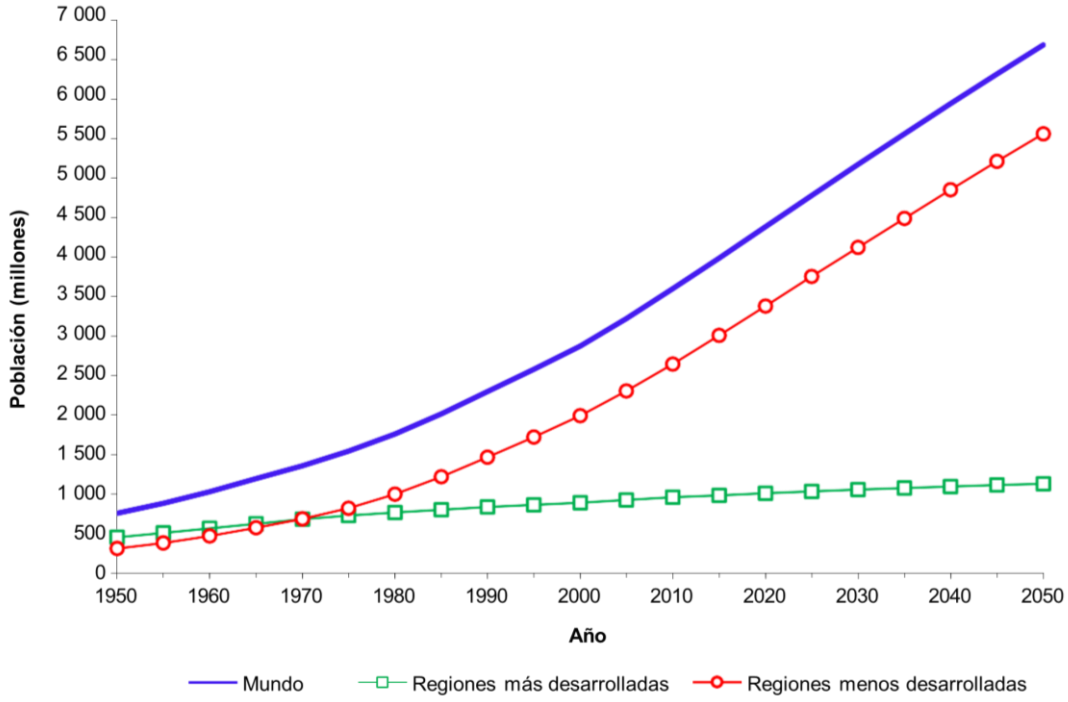


Figura 3-9. Población urbana estimada y proyectada del mundo, las regiones más desarrolladas y las regiones menos desarrolladas, (1950-2050) [39].

Algunos países desarrollados, como por ejemplo España, han seguido urbanizando según una tasa apenas un poco menor que los países en desarrollo, a pesar de tener un crecimiento de la población mucho menor.

La superficie terrestre urbana mundial aumentó de 239.000 km² en 2000 a 519.800 km² alrededor de 2020. Esta expansión mundial del suelo urbano se produjo principalmente en Asia, América del Norte y Europa que representó el 84,94% de la expansión total área. La expansión urbana en América del Sur, África y Oceanía ha sido más lenta en los últimos 20 años [40].

Para el año 2000, ya se estimaba un aumento del área construida en los países industrializados se estima en un incremento de superficie de los 300.000 km² del año 2000 hasta 700.000 km² en 2030, y en los países en desarrollo de 250.000 km² en el año 2000 a 820.000 km² en 2030 [41]. El análisis de estos datos indicaba que la urbanización en términos de área global de la ciudad física va a experimentar un crecimiento del 276% entre 2000 y 2030, mucho más rápido que el crecimiento demográfico de las ciudades que se estima en un 66% en el mismo periodo, 2000 a 2030 [42]. Esta enorme brecha se explica por el crecimiento urbano en el mundo desarrollado, ligado al aumento del nivel de vida, y no al crecimiento demográfico. Ambos factores, el crecimiento en área construida y el crecimiento demográfico

implican la necesidad de ampliar significativamente las infraestructuras físicas de las ciudades, incluidas las infraestructuras urbanas subterráneas.

De las 33 megaciudades del mundo (es decir, ciudades con 10 millones de habitantes o más) en 2018, 27 están ubicadas en las regiones menos desarrolladas o el "Sur global". Solo China albergaba 6 megaciudades en 2018, mientras que India tenía 5. Nueve de las 10 ciudades que se prevé se convertirán en megaciudades entre 2018 y 2030 están ubicadas en países en desarrollo (Figura 3-10) [43].

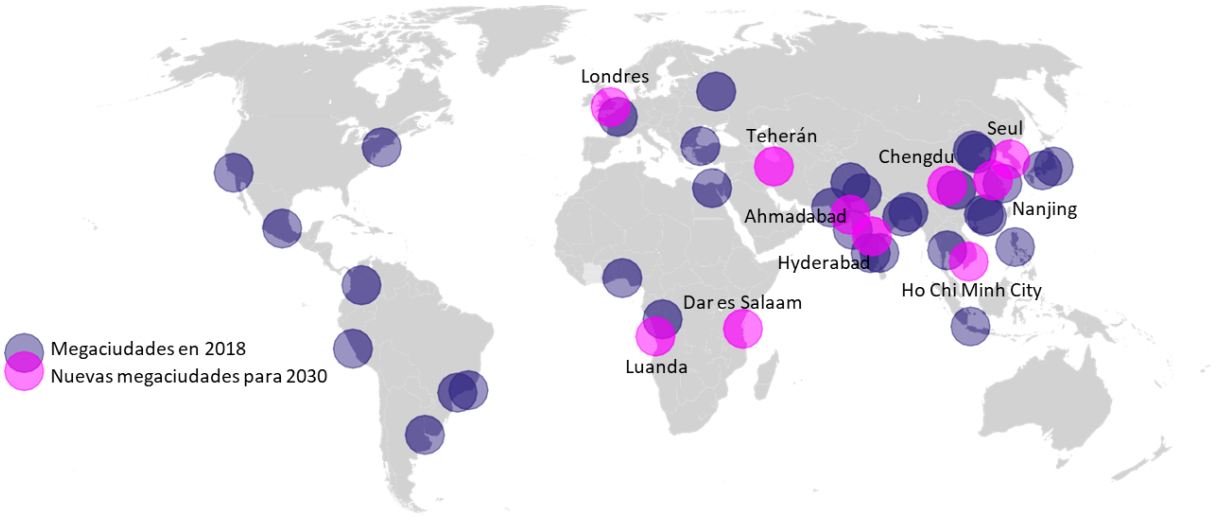


Figura 3-10. Megaciudades del mundo en 2018 y 2030 [43].

Por otro lado, las ciudades se han expandido dramáticamente, en la mayoría de las ocasiones sin ningún tipo de control. Las consecuencias de la expansión de la ciudad son el aumento de la congestión del tráfico, la elevación de los niveles de contaminación del aire, la falta de espacios verdes o el insuficiente suministro de agua.. Este desarrollo es inconsistente e incompatible con el equilibrio inherente a la armonía natural con el entorno, el desarrollo humano y la sostenibilidad.

El desarrollo de ciudades más compactas o la recuperación de ciudades compactas y complejas es un camino hacia a la sostenibilidad. La optimización del uso del subsuelo permite la compactación de las ciudades. El subsuelo, que está infrautilizado, facilita un espacio nuevo para el desarrollo urbano. Algunas de las funciones de la ciudad, infraestructuras, red logística, red de transporte, usos comerciales, ocio, almacenamiento, se pueden transferir al subsuelo.

El espacio no es el único recurso del subsuelo. El agua, los geomateriales, y la energía geotérmica tienen un importante potencial de aprovechamiento que debe

ser preservado para lograr la condición de equilibrio que late en el fondo del concepto de sostenibilidad.

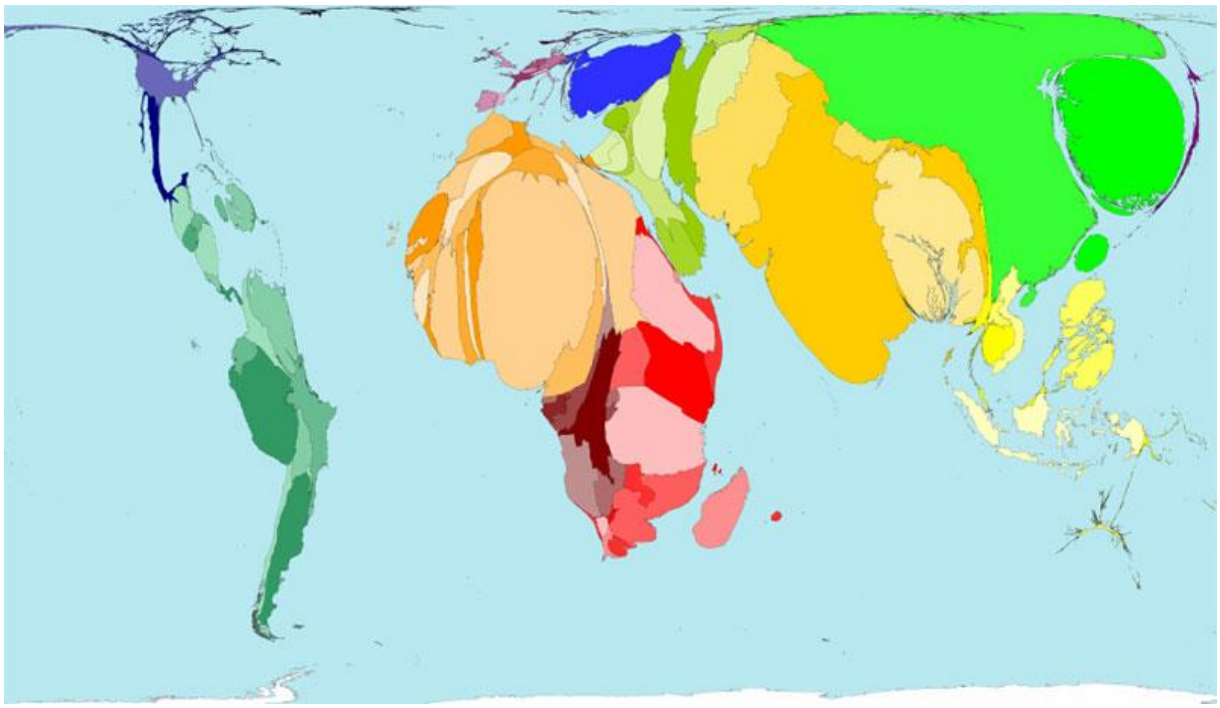


Figura 3-11. Desarrollo de los suburbios en las aglomeraciones urbanas. El tamaño de cada parte del mapa es proporcional a la tasa de crecimiento de las áreas urbanas suburbiales.

La transferencia de recursos al subsuelo desde la superficie es un reto no resuelto. Cada vez explotan más los recursos subterráneos, pero es una explotación hecha sin una planificación real y sin estrategia. Ya que cada intervención en el subsuelo, a medida que se abre un espacio subterráneo, tiene consecuencias irreversibles sobre los sistemas que lo constituyen, es necesaria una gestión precisa y real del potencial del subsuelo para evitar que también este valioso recurso se transforme en desperdicio.

El conocimiento del subsuelo urbano (Figura 3-12) sigue siendo muy pobre, por varias razones. La mayoría de las investigaciones sobre el subsuelo se limitan a la escala construida, a la consideración del subsuelo como un medio de interacción mecánica con las estructuras de edificios e infraestructuras urbanas enterradas. En consecuencia, la información generada y disponible es pobre, limitada, y no es suficiente para abordar el cambio de escala que implica operar en un medio distinto. Las vías de actuación en este sentido no son en absoluto evidentes, y exigen tomar datos de diversas fuentes de información para luego integrarlos. Muchas veces los datos están dispersos entre distintos departamentos públicos o

privados, o ni siquiera han sido nunca recabados en detalle, y su recopilación y coordinación es una labor penosa

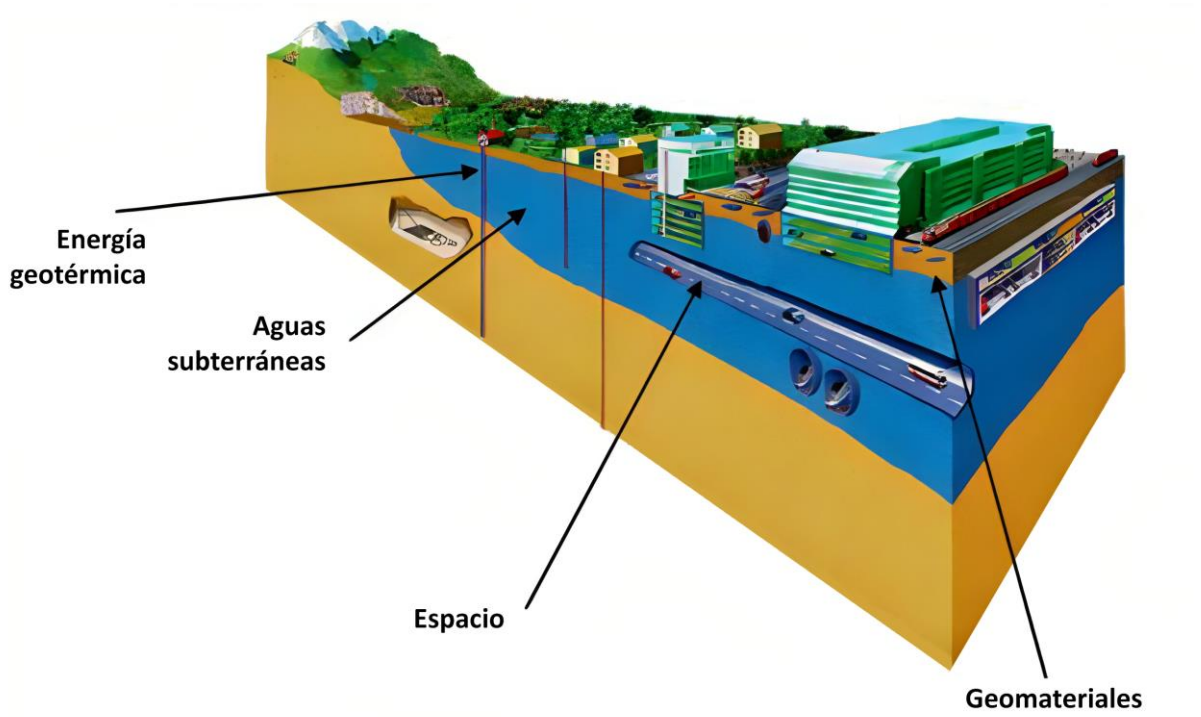


Figura 3-12. Recursos del subsuelo urbano [44].

Los especialistas de las distintas áreas que afectan al subsuelo, como gestores técnicos y políticos, geólogos, ingenieros de obras públicas, hidrogeólogos, ingenieros medioambientales, no colaboran entre ellos lo suficiente como para abordar una acción multidisciplinar integrada sobre un medio que, por ser complejo, lo exige. No se comparte ni transfiere información, no se tienen en cuenta las interacciones entre los distintos usos del subsuelo, y se hace manifiesta la falta de cooperación. En general la información sobre el subsuelo está en manos de especialistas. Los promotores y los usuarios solo tienen un acceso parcial a esta información y, además, sin la capacidad para interpretarla y explotarla. Por eso hay un conocimiento muy pobre y básico del valor del subsuelo y de su potencial para el desarrollo urbano y por extensión una degradación de la percepción que la sociedad tiene de las posibilidades de intervención en este medio.

El subsuelo debe ser explotado no sólo en términos de espacio, como se hace habitualmente, sino al nivel de sus cuatro recursos fundamentales: espacio, agua, energía y materiales. Hay que investigar para poder definir el uso potencial de los

recursos subterráneos en la ciudad y evaluar el efecto de este uso en el espacio y en el tiempo.

La planificación de futuros espacios subterráneos (Figura 3-13) debe apuntar a identificar lugares de trabajo, conflicto y colaboración entre las muchas actividades involucradas. Posteriormente, se deben definir los objetivos y criterios de sostenibilidad en función de las condiciones, urbanas, geológicas, biológicas, económicas, culturales, etc. En esta labor es fundamental la gestión de la información y el desarrollo de herramientas y sistemas de información geográfica que den soporte a una acción analítica profunda y permitan configurar una imagen clara de los recursos del subsuelo. Los sistemas de información y las tecnologías de la información que los soportan son la salsa que liga los diversos ingredientes de este sistema complejo y multidimensional. A ningún cocinero se le ocurriría servir los ingredientes sueltos a sus comensales. Ningún sistema soporta la falta de armonía entre sus partes.

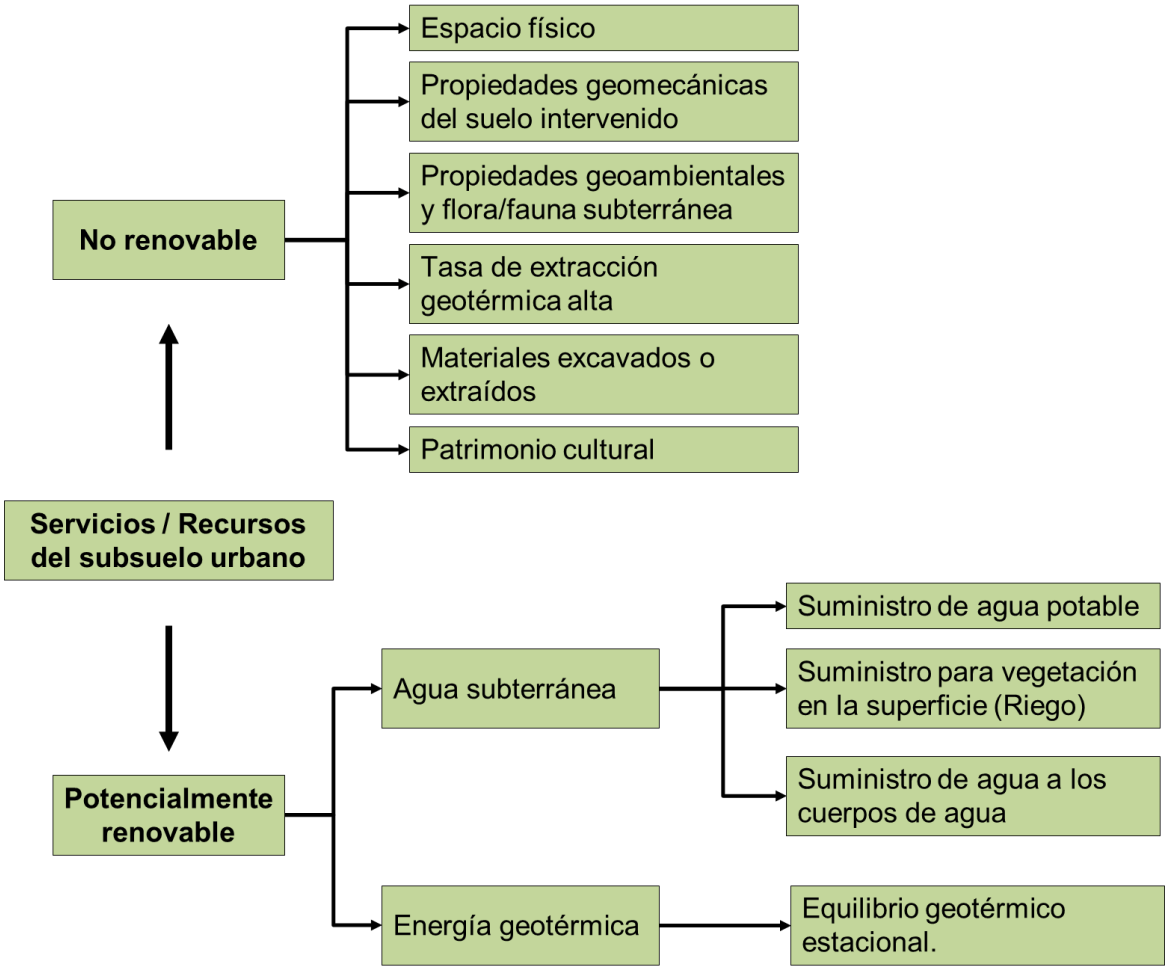


Figura 3-13. Recurso del subsuelo renovables y no renovables [45].

El desarrollo del subsuelo urbano está influido por varios factores:

- Condiciones ambientales y técnicas.
- Conocimiento del terreno y sus características. Existencia de modelos de representación del subsuelo y base de datos de sus características.
- Posibilidades arquitectónicas y urbanísticas.
- Aspectos legales y administrativos, referentes a la propiedad, al uso del suelo, a la protección ambiental, a la regulación de la construcción.
- Factores económicos. coste del suelo, diferencia de coste entre la construcción sobre y bajo rasante, coste del Ciclo de Vida.
- Aspectos psicosociológicos.

El objetivo final es explotar este potencial maximizando los beneficios para el entorno, la sociedad y la economía. Una aproximación puramente técnica es completamente insatisfactoria, en la medida en que el desarrollo del subsuelo solo puede ser realizado con éxito si es social y políticamente aceptable, económicamente viable y legalmente posible. Así que lo interesante es estudiar todas estas posibilidades de uso y desarrollo a la luz de los aspectos que determinan la adecuación del hombre a su ámbito, como son la biología, la economía, la sociología, las leyes y el urbanismo. Hay que adecuar la utilización de los recursos del subsuelo a los valores públicos, institucionales, y económicos de la sociedad; y encontrar el equilibrio en el uso de los cuatro recursos del subsuelo (espacio, agua, energía, y materia) en un contexto sostenible.

El uso del subsuelo urbano puede ayudar a las ciudades a alcanzar los objetivos de un desarrollo equilibrado, no fundamentado en el crecimiento y en el aumento del consumo, (consumo = destrucción), sino, en la mejora, el valor añadido y el óptimo aprovechamiento de los recursos.

No existe una verdadera planificación del subsuelo y, hasta la fecha, no se considera el complejo campo de interacciones que se da en la explotación de los cuatro recursos básicos del subsuelo. Como sucede en otros campos se ha desintegrado el sistema subsuelo, en campos individuales, a penas interconectados, sobre los que se hace un análisis individual, que no es en sí mismo criticable, porque es un paso en la dirección correcta, pero la planificación del subsuelo urbano debe hacerse considerando todos los factores y la complejidad de sus vínculos e interrelaciones, como un organismo dotado de un frágil equilibrio. La aproximación a esta planificación de usos y desarrollo multidimensional tiene

necesariamente que ser holística y considerar no sólo los efectos geológicos y ambientales, sino también la eficiencia económica y la percepción social del desarrollo del espacio subterráneo, y todo ello con el objetivo de que las ciudades hagan un uso más intenso y extenso de los recursos subterráneos sin comprometer los recursos de las próximas generaciones.

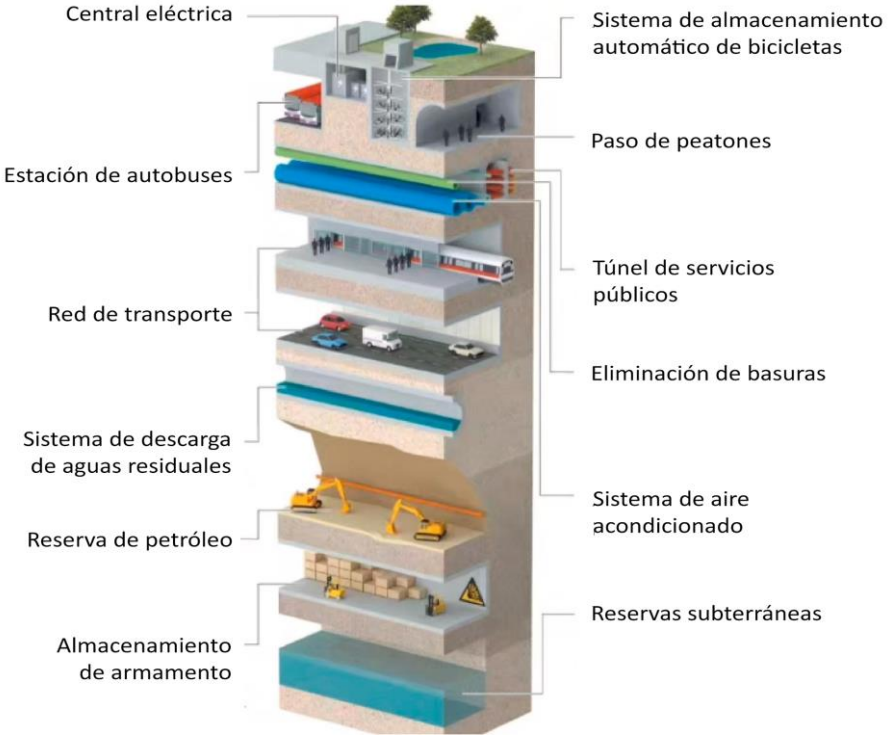


Figura 3-14. El plan preliminar para el desarrollo y la utilización del espacio subterráneo en Singapur [46].

Las infraestructuras urbanas pueden ser "físicas" como las redes de agua, saneamiento, energía, transporte y los sistemas de comunicación, o "institucionales" como la vivienda, la asistencia sanitaria, el suministro de alimentos, la seguridad, y los dispositivos de protección y de emergencia (Figura 3-14).

Las infraestructuras urbanas son un componente vital de una ciudad, que incluyen las redes de servicios públicos y el transporte, la distribución y recogida de agua, las estructuras de gestión de inundaciones y catástrofes, las redes de metro, etc... La infraestructura física está formada por puentes, carreteras, canalizaciones para fluidos, redes de transporte, etc.

Las infraestructuras urbanas, consideradas globalmente, como un sistema tienen dos características fundamentales: la interdependencia y la convergencia. Estos dos rasgos tienden a incrementarse durante la continua evolución de las

infraestructuras. Por evolución hay que referirse a los avances tecnológicos y al aumento de la diversidad y la complejidad de la infraestructura en su conjunto.

La interdependencia significa que los servicios prestados por una infraestructura sean utilizados por otra infraestructura, en lugar de por sus usuarios finales. Por ejemplo: las líneas de distribución de electricidad que proporcionan la energía para los equipos de telecomunicaciones, así como a los hogares, que son los usuarios finales de electricidad, pero no de la electricidad para la línea de telecomunicaciones. El ejemplo anterior ilustra sobre la interdependencia funcional. La interdependencia física significa que existen conexiones físicas entre los elementos estructurales de diferentes infraestructuras. Por ejemplo: las alcantarillas de aguas pluviales se pueden integrar en túneles de transporte rodado o ferroviario. Esta interdependencia física aumenta la vulnerabilidad de las infraestructuras integradas y obliga a establecer condiciones de seguridad para el conjunto ante situaciones límite, por ejemplo, inundaciones, accidentes con fugas químicas, fallos geotécnicos, etc.

La convergencia implica que varios sistemas originalmente independientes de infraestructuras o servicios convergen en una infraestructura física. Por ejemplo: los operadores de telecomunicaciones ofrecen al mismo tiempo a través de un sólo cable de telefonía, Internet y acceso a los servicios de radiodifusión y televisión. O la infraestructura de galerías de servicios que incluyen alcantarillado, líneas de electricidad y tuberías de agua. O el sistema de gestión de aguas pluviales en un túnel de carretera en Kuala Lumpur, Malasia, que normalmente funciona como una autopista de dos pisos, y durante las inundaciones el túnel está cerrado al tráfico y funciona como un colector de aguas pluviales [47].

3.5. Infraestructuras urbanas subterráneas

Las Infraestructuras Urbanas Subterráneas, o su término en inglés Urban Underground Infrastructure (UUI) se refieren a un grupo de estructuras ubicadas por debajo del nivel de la superficie de la ciudad, que están físicamente y/o funcionalmente conectadas. El espacio subterráneo de la ciudad abarca las diferentes infraestructuras de los sistemas funcionales presentes: almacenamiento (como alimentos, agua, aceite, productos industriales y desechos, incluyendo los peligrosos), industria (como plantas de energía), transporte (como ferrocarriles, metro, intercambiadores y estaciones, calles, carreteras y túneles peatonales), servicios públicos y comunicaciones (como agua, alcantarillado, gas, electricidad y

cables), servicios públicos (como centros comerciales, hospitales y estructuras de protección civil) y servicios privados (como aparcamientos).

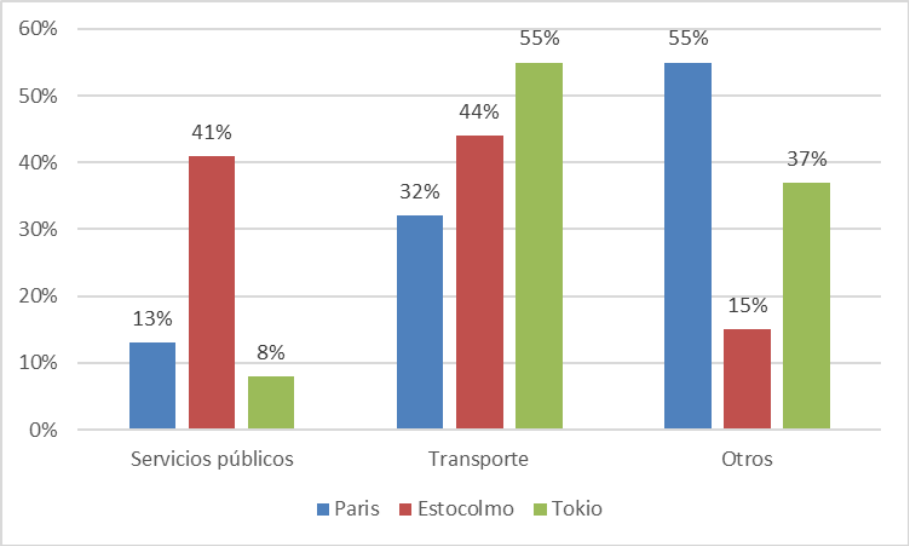


Figura 3-15. Relación entre la densidad de población en las zonas urbanas y los volúmenes UUI para instalaciones, transporte y resto de usos [48].

El espacio urbano subterráneo se utiliza con intensidad. La Figura 3-15 muestra el nivel de utilización del subsuelo de tres ciudades con infraestructuras destinadas a distintos usos. En numerosas ciudades, existe una considerable saturación en el subsuelo ubicado a una profundidad de 5 a 10 m. Dentro de las instalaciones subterráneas que ocupan una parte considerable en esta área se encuentran las redes de servicios y suministro públicas, así como el sistema de transporte público subterráneo.

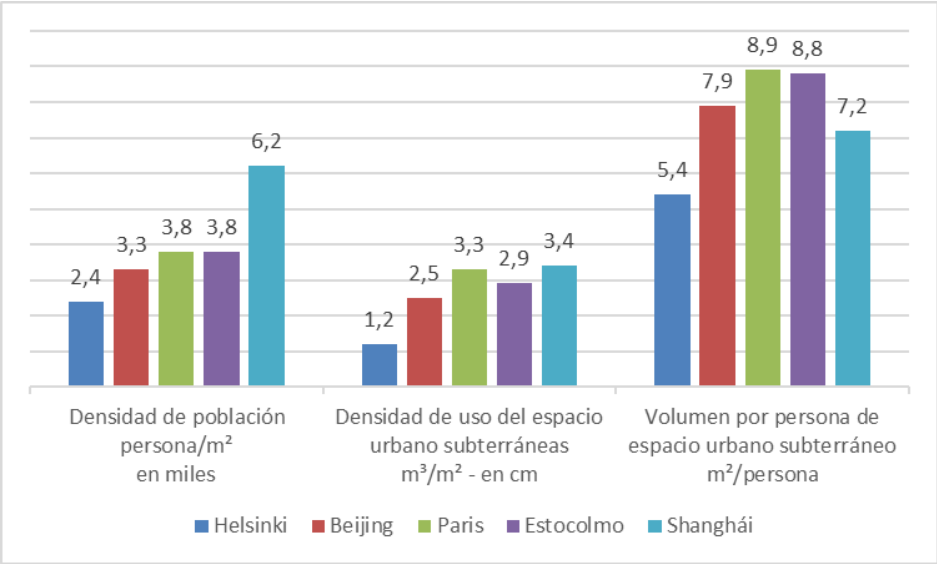


Figura 3-16. Densidad de población urbana y dos indicadores de uso del espacio subterráneo urbano [49].

Existen otras infraestructuras polivalentes que abarcan áreas de aparcamiento de coches y espacios comerciales, alcanzando una profundidad de hasta 20 m, mientras que los túneles del sistema de transporte público se desarrollan a profundidades de hasta 60 m (Figura 3-16).

- Los impactos asociados al cambio climático en las UUI son un tema particularmente interesante e importante para el estudio debido a una serie de razones.
- Las UUI incluyen muchas instalaciones críticas, de las cuales depende la vida de las ciudades. Por ejemplo, protección civil, tratamiento de aguas, etc.
- Las UUI pueden ayudar a mitigar los impactos del cambio climático sobre el medio ambiente urbano. Por ejemplo, proporcionar un régimen de temperatura estable en los edificios.
- Las UUI son vulnerables a los impactos catastróficos del cambio climático. Por ejemplo, las inundaciones.

Las UUI se pueden cuantificar mediante la estimación de su volumen, entendiendo por volumen el espacio físico que ocupan en el subsuelo. La Figura 3-17 presenta la relación entre las densidades de población en las zonas urbanas y los volúmenes de infraestructuras urbanas subterráneas, y se refiere a las ciudades de los países desarrollados. En los países en desarrollo los volúmenes de infraestructuras son mucho más bajos.

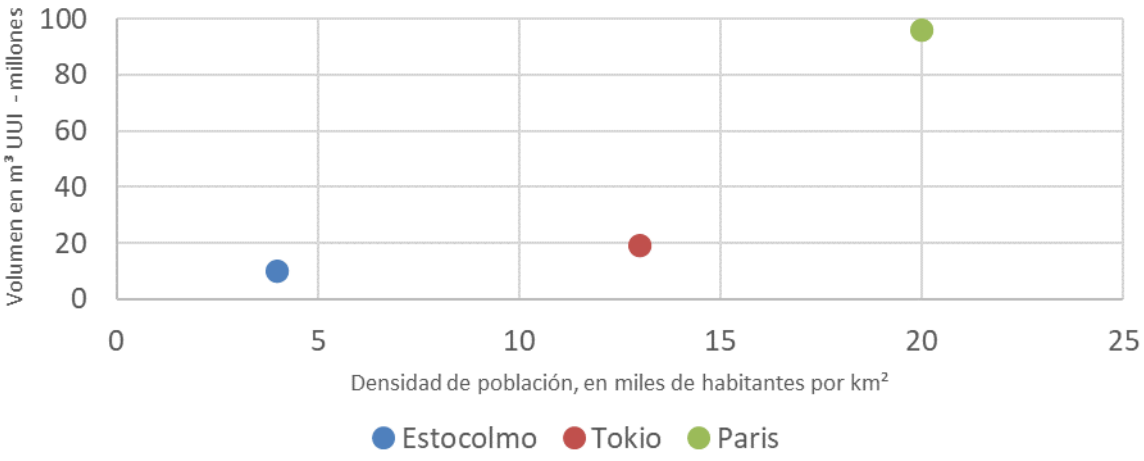


Figura 3-17. Relación entre la densidad de población en las zonas urbanas y los volúmenes de UUI [48].

La relación entre volumen de infraestructuras y población de la Figura 3-17 representa una proporcionalidad directa lo que sugiere que las ciudades de los países en vías de desarrollo van a potenciar de forma muy activa el desarrollo de infraestructuras urbanas subterráneas a medida que se desarrollen sus ciudades. En la actualidad las técnicas de construcción subterránea permiten desarrollar infraestructuras urbanas subterráneas en casi todas las condiciones geológicas, por tanto, las limitaciones financieras son el único obstáculo para el crecimiento de este tipo de infraestructuras en los países en desarrollo.

3.6. Aprovechamiento energético de las infraestructuras subterráneas

El campo de desarrollo de propuestas en favor de la sostenibilidad y el ahorro de energía sigue creciendo y las áreas de intervención se están multiplicando a medida que la sociedad aprende de sus experiencias, aciertos y errores, en cada etapa de la lucha actual por restablecer el equilibrio ambiental.

Aplicar el método científico favorece el análisis detallado del problema, dividiéndolo en áreas de especialización. El sistema económico actual, en el que el crecimiento está ligado al consumo, fomenta la explotación veloz de los diferentes nichos de mercado, la obtención de beneficios inmediatos y la existencia de compartimentos aislados dentro de las empresas. En el ámbito político, es necesario tomar medidas rápidas que produzcan resultados notorios debido a la presión del tiempo.

En los últimos años, cada vez que se ha promovido la aplicación de políticas energéticas para garantizar la sostenibilidad, se ha producido una etapa crítica en la que se han evaluado los resultados y se ha realizado un ajuste necesario. A lo largo del camino, se han perdido muchos recursos donados por los ciudadanos para la ejecución de políticas y la construcción de estructuras e infraestructuras fundamentales. En general, estos recursos han sido utilizados en beneficio de la comunidad, pero también, en ocasiones, se han aprovechado en exceso para intereses individuales, incluso más de lo que se hubiera esperado.

La humanidad está actualmente en punto decisivo. Después de destinar grandes cantidades de recursos al desarrollo de la generación eficiente de energía, en la actualidad se están revelando las limitaciones de un modelo de producción

centralizado, un sistema de distribución ineficiente y unidireccional y un concepto global que descuida la reducción de la demanda energética, que es fundamental para resolver el problema.

Con una visión más amplia del problema, la estrategia es considerar la ciudad como un ecosistema energético equilibrado y sostenible. Es decir, considerar a la ciudad como una comunidad energética, y los elementos físicos que conforman su entorno, así como los procesos de interacción entre los diversos componentes del sistema energético. Los cambios y ciclos de energía son los elementos cruciales que definen el ámbito del ecosistema energético.

Las infraestructuras urbanas subterráneas constituyen una dimensión hoy no integrada en las redes de información y energía que sí integran en la dimensión superficial los sistemas de generación distribuida, almacenamiento y consumo, interactuando bajo gestión inteligente en interacción con otros sistemas gestores y consumidores de la red (Figura 3-18).

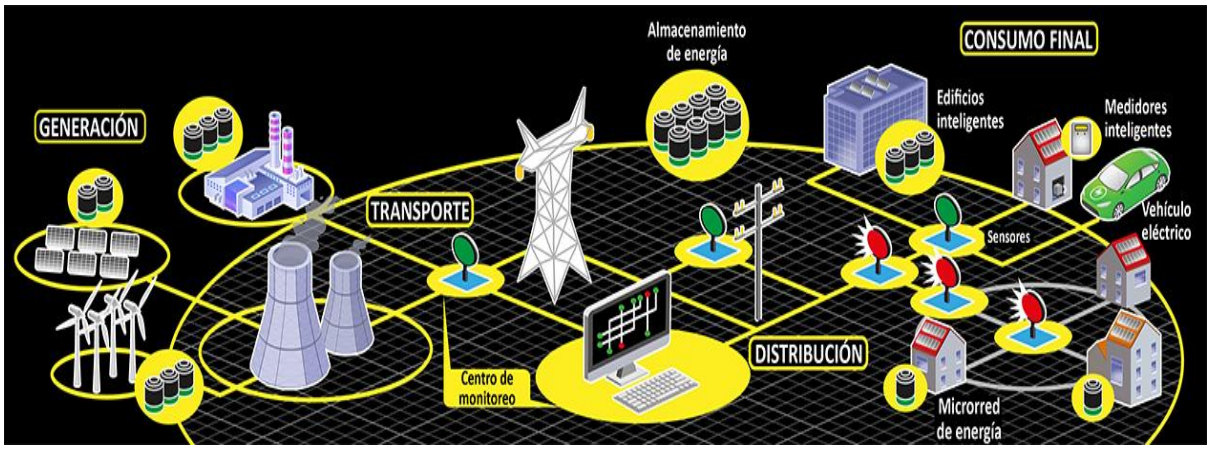


Figura 3-18. La Ciudad Inteligente en su dimensión superficial.
Fuente: propia.

Los estudios a escala urbana examinan cómo los distintos tipos de agentes y estructuras energéticas interaccionan como consumidores o generadores de recursos o como competidores con las mismas necesidades y sobre recursos comunes. La visión del sistema energético como un ecosistema permite ver cómo se comporta en conjunto. En lugar de centrarse en el estudio de los casos particulares se van a ver los aspectos operativos más importantes del sistema. Por ejemplo, la cantidad de energía que se produce e introduce dentro del sistema, cómo fluye la energía en los distintos escalones en la cadena "alimenticia" del consumo

energético, o los factores que determinan la tasa de desperdicio energético o la tasa de reutilización de la energía residual dentro del sistema [50].

En el presente escenario se está planteando y comenzando a llevar a cabo una transformación en el sistema energético, especialmente en los métodos de generación y producción de energía, así como en las redes de distribución y gestión. Esta transformación posibilitará la integración de dispositivos de generación, consumo y almacenamiento energético en diferentes ubicaciones, y permitirá implementar procesos de medición, control, gestión e interacción inteligentes tanto dentro del propio ecosistema energético como entre distintos ecosistemas eficientes de energía.

La incorporación de dispositivos de generación y almacenamiento de energía distribuidos en una red integrada, posibilita la creación de procesos equilibrados para garantizar la estabilidad del sistema energético y procesos simbióticos para la interacción entre diferentes subsistemas mediante la transferencia de energía residual de uno a otro, permitiendo obtener beneficios tanto en términos de energía como económicos.

En la administración efectiva de la producción y el uso de energías provenientes de fuentes renovables como la solar o la geotérmica, junto con las energías residuales y las generadas de manera distribuida, adquieren gran relevancia en la red los dispositivos que posibilitan la acumulación, el almacenamiento y la utilización de energías de intensidad media y baja.

El intercambio geotérmico, a través de la utilización de la inercia del terreno junto con la masa de los edificios e infraestructuras, permite almacenar una gran cantidad de energía térmica de baja intensidad y rangos moderados de temperatura. Por lo tanto, funciona como una forma de almacenar la energía térmica producida y a menudo considerada desechada, por sistemas industriales y estructuras urbanas, para promover su reutilización a un costo muy bajo y con un ciclo de vida prolongado. También es posible utilizar la acumulación de energía térmica en el suelo en sistemas de captura solar térmica integrados y distribuidos [50].

La geotermia también se puede utilizar para generar energía térmica de manera distribuida. Con el uso de bombas de calor geotérmicas en sistemas abiertos o cerrados, es posible extraer e intercambiar energía proveniente de fuentes renovables, así como aprovechar energías "residuales" de diversas fuentes.

3.7. Infraestructuras urbanas y sistemas subterráneos habitados. Geotermia en la generación y almacenamiento de energía

En las ciudades existen diversas y amplias redes y sistemas de infraestructuras que interactúan con el entorno, generando, captando y canalizando diferentes tipos de energía. Dentro de estas se incluyen varias redes y sistemas de infraestructuras subterráneas, tales como aparcamientos, sótanos, galerías de circulación y servicios, amplias galerías de saneamiento urbano, sistemas completos como el Metro, túneles para el tráfico de vehículos, redes subterráneas de distribución de agua, entre otras muchas. Estas infraestructuras se encuentran enterradas y en contacto directo con el suelo. La relación termodinámica entre los tres elementos que se encuentran involucrados en esta situación, es decir, el suelo, el aire y el líquido, ofrece una gran variedad de oportunidades para el intercambio, la obtención, la introducción, la conservación y la utilización de la energía.

3.8. Recursos subterráneos en la ciudad

En la interacción con el entorno natural, como el aire, el agua, los sistemas mecánicos y las personas, es precisamente mediante el contacto directo con la tierra que todas estas infraestructuras pueden intercambiar energía con ella y ejercer su función como:

- Captadores de la energía geotérmica que se encuentra en abundancia alrededor y se origina principalmente por la radiación solar que llega a la superficie terrestre, aunque también proviene en menor medida del interior de la tierra y sus procesos nucleares profundos. Esto se manifiesta en el hecho de que a poca profundidad, la temperatura del suelo en reposo se mantiene constante e independiente de la temperatura externa, y se acerca a la temperatura promedio anual del lugar.
- Los intercambiadores se utilizan para absorber o usar la energía del terreno en las estructuras subterráneas o en otros medios con los que interactúan.
- Los acumuladores son utilizados para almacenar energía durante periodos de generación excesiva o en momentos de bajo consumo energético, ya sea en infraestructuras subterráneas o en otras áreas con las que se relacionan.

Existen diferentes métodos para aprovechar el potencial geotérmico de estos sistemas subterráneos, dependiendo de cómo se vaya a utilizar la energía extraída o inyectada en el suelo. Uno de los sistemas subterráneos que se pueden encontrar son los conductos por los que circulan fluidos, como agua o aire, y que intercambian energía directamente con el suelo. Otro sistema son las estructuras subterráneas construidas con hormigón o materiales similares, que tienen una alta capacidad de conducción térmica. Estas estructuras pueden ser activadas térmicamente para ser utilizadas como intercambiadores de energía. En su interior, estos intercambiadores cuentan con circuitos que transportan un fluido caloportador, que es el medio más común utilizado para realizar la transferencia de energía. También existen otras formas de transferencia energética, como aprovechar la energía de las aguas infiltradas en los túneles, intercambiar energía con las capas freáticas presentes o realizar un intercambio entre la tierra y el aire en instalaciones que tratan el aire de ventilación de los edificios.

Los elementos termoactivables de captación geotérmica desarrollados hace más de 30 años y aplicados ya en muchas infraestructuras subterráneas. Estos elementos ahora se utilizan como pantallas de pilotes, muros pantalla, losas de cimentación activadas por calor, pilotes, dovelas de túneles activadas por calor, revestimiento interior activado por calor en túneles, intercambiadores verticales y horizontales, anclajes intercambiadores, entre otros. Con su ayuda, se puede construir una nueva estructura subterránea, ya sea un túnel o un edificio, que ya esté equipada con dispositivos desde el principio para funcionar como un intercambiador. También es posible adaptar edificaciones existentes para realizar la misma función mediante la termoactivación [50].

La energía se transfiere desde la infraestructura que intercambia energía con el suelo hacia el lugar donde se aprovechará, como un edificio, una infraestructura, una industria o espacios exteriores acondicionados térmicamente. Esto se logra mediante el uso de una bomba de calor agua-agua que se encarga de mover la energía entre los dos puntos de calor mediante el consumo de energía eléctrica. Cuando el salto de temperatura entre el servidor y el intercambio energético es menor, la bomba de calor geotérmica, o su término en ingles Ground Source Heat Pump (GSHP) requerirá menos energía eléctrica para realizar su función. Es fundamental seleccionar rangos de temperaturas operativas adecuados para lograr sistemas eficaces, que tengan tasas de rendimiento global anual (COP) superiores a 4. Es fundamental gestionar de manera adecuada las situaciones de baja exergía

que suelen ocurrir en las instalaciones geotérmicas, con el fin de alcanzar el equilibrio y la coordinación óptima. Asimismo, se busca optimizar los costes y maximizar la eficiencia [50].

La correcta selección de los rangos de temperatura y los métodos de transferencia de energía en los circuitos principales y secundarios permitiría en ciertos momentos del año que la transferencia de energía ocurra sin la necesidad de la bomba geotérmica, ya que el fluido circularía libremente con un consumo de energía prácticamente nulo y un COP muy alto, cercano a 50 [50].

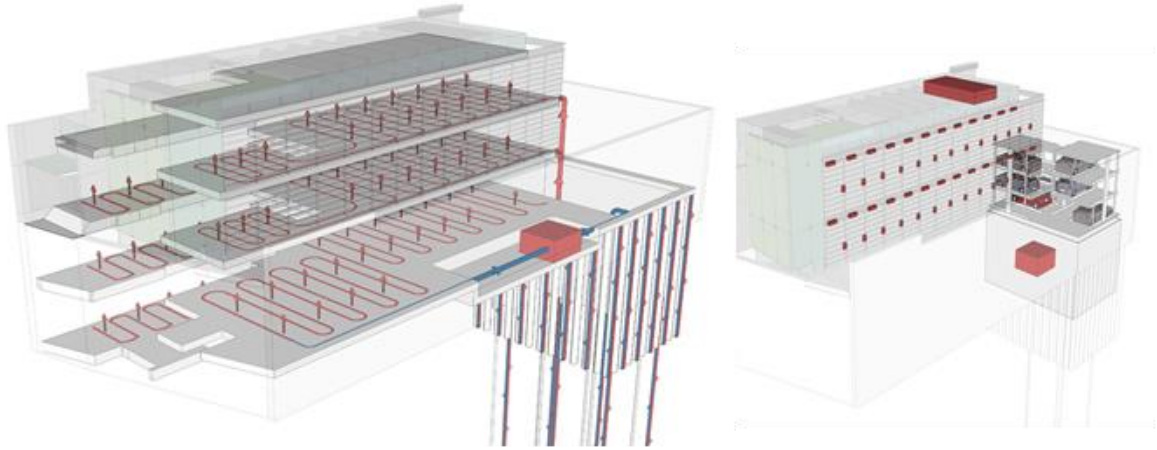


Figura 3-19. Intercambio geotérmico integrado en un aparcamiento mecánico subterráneo. Apolonio Morales 29. 2010
Fuente: Instituto Europeo de Innovación.

En lo referente al uso de energía para climatizar edificios, infraestructuras y espacios, se logra un rendimiento óptimo mediante sistemas que funcionen a temperaturas bajas en invierno y altas en verano. Estos sistemas, que tienen una baja exergía y una gran superficie, como los forjados y las estructuras termoactivas, Figura 3-19, aprovechan la alta capacidad de retención de calor de las estructuras horizontales de los edificios. Esto permite mantener temperaturas uniformes en el interior durante todo el año y proporcionar un alto nivel de confort radiante.

En base a los requerimientos de energía del edificio durante todo el año, el terreno se utiliza como un sistema de equilibrio energético anual. Esto se debe a las características geológicas, geotécnicas, mecánicas, físicas y químicas del terreno, las cuales determinan su comportamiento en términos de varios coeficientes que se utilizan en simulaciones. Estos coeficientes incluyen la conductividad térmica, capacidad térmica, difusividad e inercia, y se utilizan para evaluar la capacidad

del terreno para conducir energía y determinar cómo el calor se mueve a través de él y a qué velocidad.

Cuando sea posible según las características del terreno, se aprovechará el invierno para almacenar frío en el suelo y utilizarlo durante el verano. De la misma manera, durante el verano se cargará de calor el terreno para poder aprovecharlo en el invierno. Al evaluar tanto las demandas energéticas del edificio como las propiedades del suelo, se puede confirmar mediante la simulación del sistema de intercambio que el terreno logra un equilibrio estable durante los 50 años de su ciclo de vida. Esto cumple con los requisitos establecidos por las Normativas Europeas más sofisticadas y se mantiene a lo largo del tiempo. Si no se realiza de esta manera, se pone en riesgo de manera significativa la estabilidad funcional, el rendimiento y la eficiencia de la instalación de intercambio.

Las superficies de aparcamiento subterráneas, que están en contacto con el suelo y se activan térmicamente para extraer energía y calentar el edificio ubicado encima. Los sótanos de los edificios también intercambian energía con el suelo, así como las galerías subterráneas que permiten el pretratamiento del aire al hacerlo circular a través de ellas. Las cimentaciones termoactivas y los campos de intercambiadores verticales se utilizan para climatizar edificios o proporcionar energía a procesos industriales. Además, las losas de cimentación pueden funcionar como intercambiadores energéticos. También se pueden utilizar colectores en la red de saneamiento o en la distribución de agua, todos estos elementos mantienen contacto con el suelo y son pasivos. En otras palabras, la energía que se puede obtener de estos elementos depende únicamente de su capacidad de interacción con el terreno.

4. Ámbito de aplicación del modelo integrado. El ecosistema urbano de energía de bajo grado y simbiosis urbana

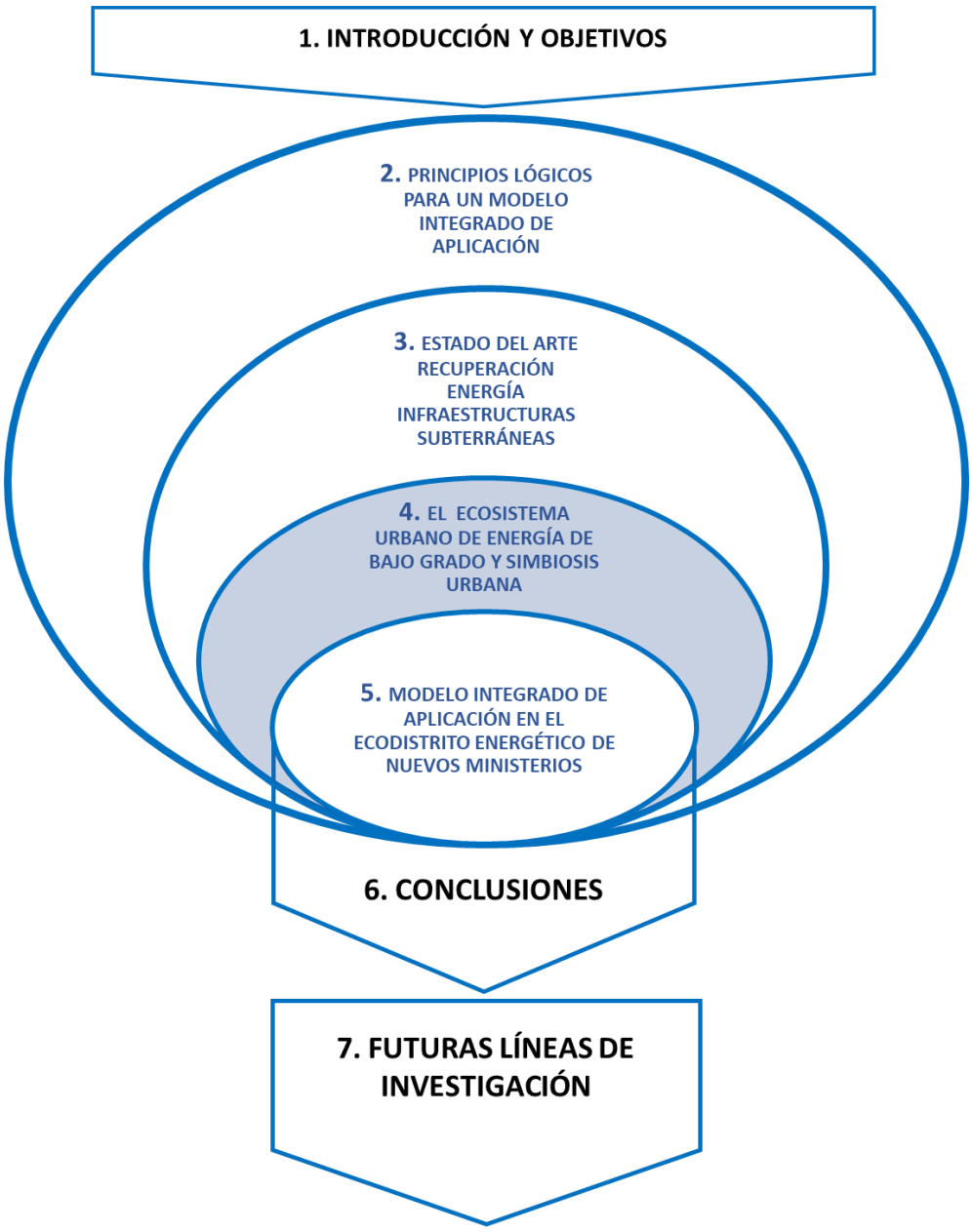




Figura 4-1. Guía de Aprovechamiento Energético de las Infraestructuras Urbanas Subterráneas. 2011. Fundación de la Energía de la Comunidad de Madrid.

La Figura 4-1 ilustra la portada y la jornada de presentación de la Guía sobre Aprovechamiento Energético de las Infraestructuras Urbanas Subterráneas, publicada en 2011 bajo el impulso de D. Carlos López Jimeno, Presidente de la Fundación de la Energía de la Comunidad de Madrid, FENERCOM, y Director General de Industria Energía y Minas de la Comunidad de Madrid. La guía fue editada por la Fundación de la Energía de la Comunidad de Madrid (FENERCOM), dirigida y coordinada por el autor de esta tesis y escrita por expertos en la ejecución de proyectos relacionados con la extracción e intercambio de energía a través de construcciones e infraestructuras subterráneas. Además, se contó con la participación de las principales organizaciones públicas y empresas especializadas en este campo en España, Suiza, Austria, Portugal y otros países europeos.

Esta publicación fue la primera que en nuestro país abordaba como un área específica de actuación el ámbito de la recuperación y uso de recursos térmicos de bajo grado. El planteamiento era recopilatorio y divulgativo. Tenía como objetivo establecer el contexto y documentar las acciones que se habían estado llevando a cabo durante varios años en diferentes países, especialmente en Europa, en relación al aprovechamiento energético de los recursos térmicos de bajo grado que son un residuo en las infraestructuras urbanas subterráneas como túneles, metro, aparcamientos y redes de aguas residuales.

Hasta la fecha no se ha editado en España ninguna otra publicación monográfica sobre este tema, aunque se ha avanzado en actuaciones en ámbitos afines, como es el geotérmico.

El objetivo de recopilar y documentar información se originó en la necesidad de proponer una alternativa al actual modelo energético. Esta propuesta se basó en el aprovechamiento de los enormes volúmenes de residuos energéticos que se generan en los diferentes sistemas del ecosistema energético, incluyendo las infraestructuras enterradas. Estos residuos serían utilizados como fuente de energía primaria para satisfacer la demanda de estos sistemas, así como de otros sistemas cercanos o superpuestos, como es habitual en las infraestructuras urbanas.

La distribución, el intercambio y el uso de la energía son elementos comunes a todos los ejemplos mencionados, ya que se trabajan con un recurso energético abundante pero de bajo potencial. Además de seguir de manera lógica la estructura argumental y documental de cada capítulo, la Guía también realiza un breve análisis del potencial de cada una de las infraestructuras. Además, utiliza el ejemplo de las intervenciones realizadas en el Metro de Madrid para proponer intervenciones que saquen provecho del potencial energético total de todos los recursos disponibles, como la geotermia, el aire y el agua, que están conectados con las redes de infraestructuras existentes.

La Guía presenta los mecanismos y principios para aprovechar el intercambio de energía geotérmica a través del terreno, el agua y el aire. Las redes subterráneas actúan como intercambiadores, permitiendo aprovechar la energía gratuita en diferentes entornos. Estos conceptos se aplican en la climatización de edificios y espacios públicos mediante técnicas de transferencia geotérmica, utilizando bombas de calor y sistemas eficientes de transferencia de energía a los espacios habitados o a procesos industriales.

4.1. El aprovechamiento energético de las Infraestructuras Urbanas Subterráneas (UUI)

Se ha ilustrado en capítulos anteriores la necesidad de operar según un nuevo modelo energético, de un nuevo contexto para la eficiencia energética orientado al equilibrio y que superando el actual, centralizado analítico y unidireccional, focalizado a la generación y la venta de energía, y generador de ingentes cantidades de residuos; permita potenciar mediante la aplicación de la lógica natural, la utilización del residuo energético de bajo grado como recursos energéticos primarios del mismo grado para la ciudad y la edificación. Esta transformación

cualitativa es hoy posible porque se dispone de los conocimientos y los recursos, metodológicos, técnicos y tecnológicos, algunos de ellos de fundamento muy antiguo, que permiten su realización, y que tienen mucho que ver con las características y la naturaleza no solo de la energía utilizada sino también con su origen, estructura de distribución, medio edificado de utilización y sistema de integración y gestión.

4.1.1. Ecosistemas

Es importante comprender que los diversos sistemas y subsistemas urbanos no están separados, aunque a menudo se manejen de manera aislada en un entorno administrativo fragmentado. En cambio, están interconectados en una realidad compleja en la que los flujos energéticos no solo ocurren dentro de cada plano, sino también entre ellos en múltiples direcciones (Figura 4-2 y Figura 4-3).

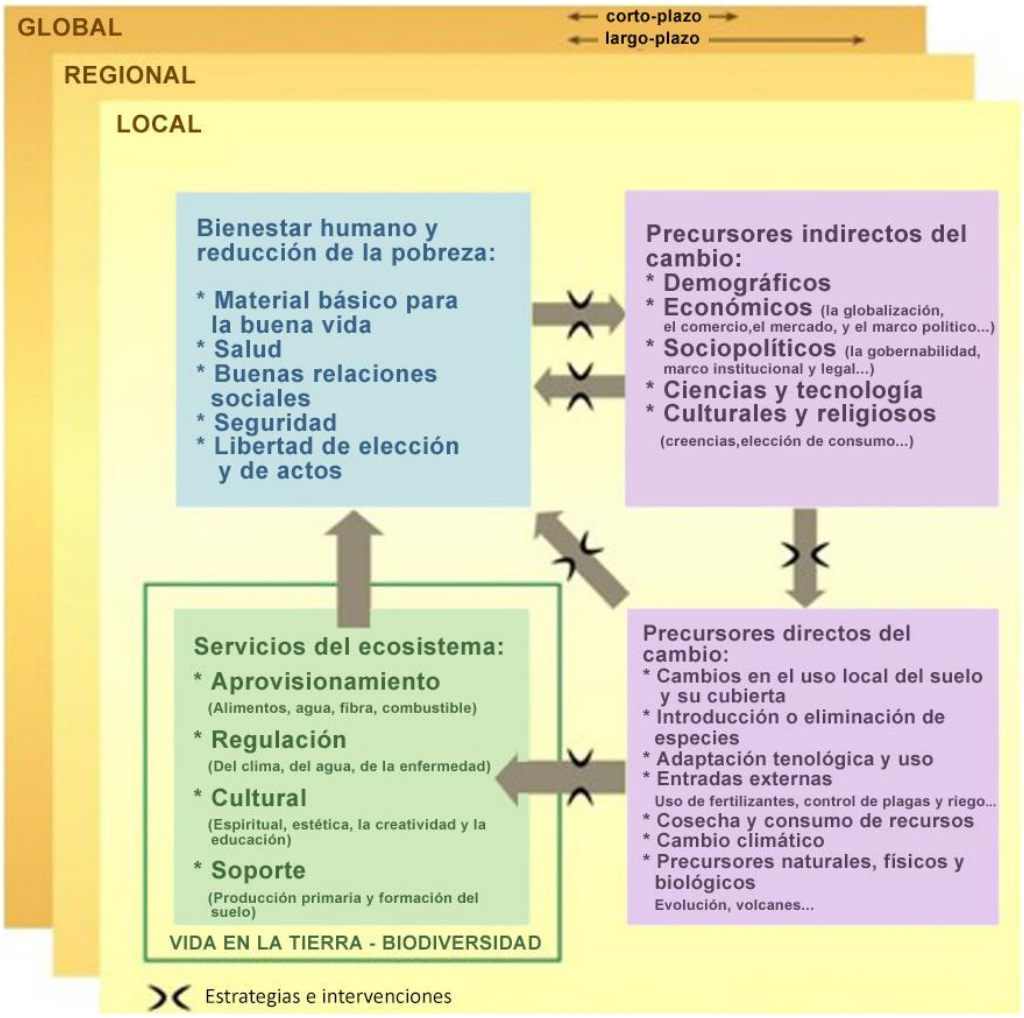


Figura 4-2. Marco conceptual de las interacciones entre biodiversidad, servicios ecosistémicos, bienestar humano e impulsores del cambio [51].

El objetivo es proporcionar equilibrio, sostenibilidad y capacidad de prestar servicios (Figura 4-3) para el bienestar humano a este ecosistema que forma parte de nuestra realidad integrada. Comprendiendo esto, resulta sencillo entender que para mantener el equilibrio en un ecosistema, los recursos energéticos que están en exceso en una zona deben transferirse a otra donde se necesite energía. También es importante tener en cuenta la capacidad de modificar la configuración energética de todo el ecosistema, corregir cualquier desequilibrio que se presente y promover la interacción simbiótica entre los diferentes sistemas y subsistemas.

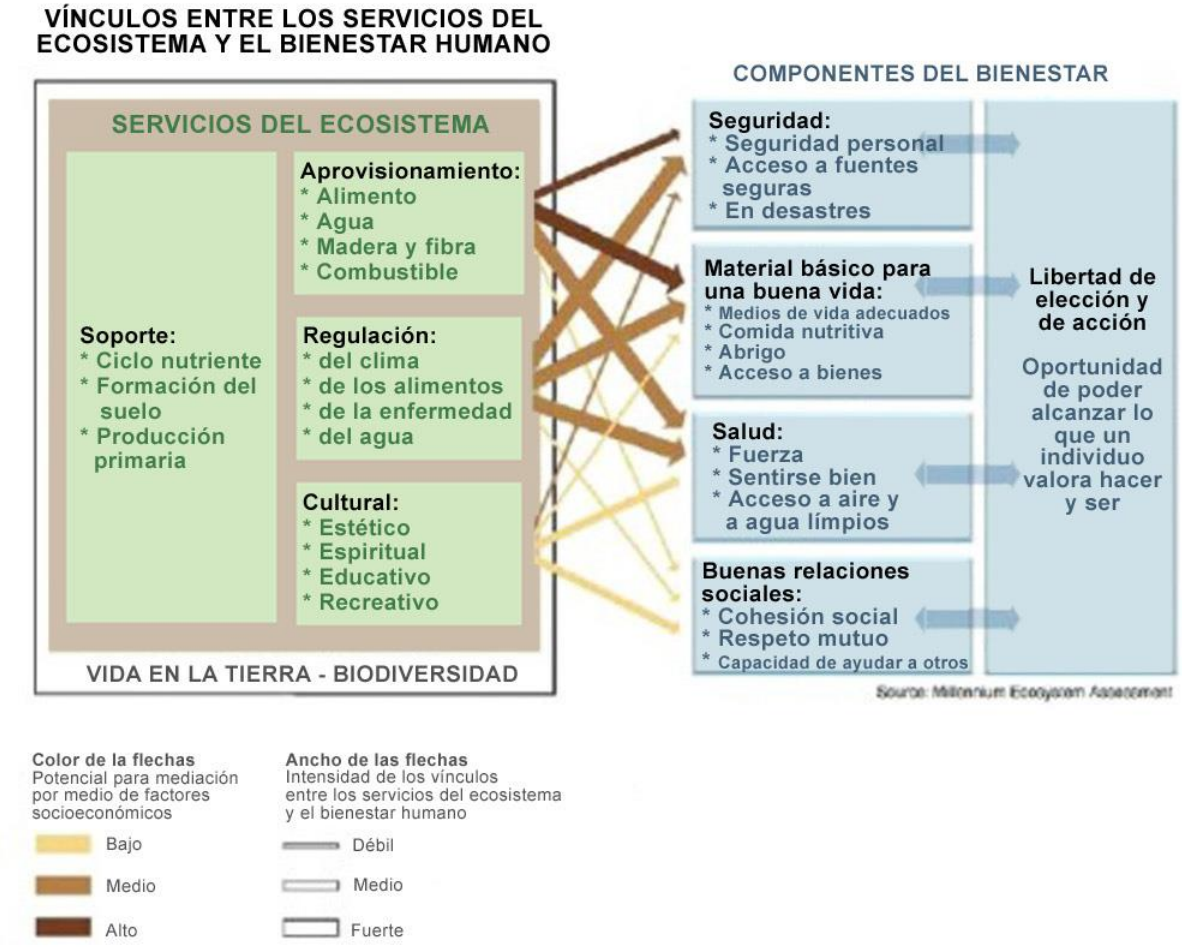


Figura 4-3. Vínculos entre la biodiversidad, los servicios ecosistémicos y el bienestar del ecosistema humano en el que se encuentra el ecosistema energético [51].

4.1.2. Interacciones y flujos dentro del ecosistema humano en el que se encuentra el ecosistema energético

Las tecnologías de la información son fundamentales en el ámbito energético ya que respaldan las actividades de adquisición de conocimientos, interpretación de datos, toma de decisiones y ejecución de acciones. Estas actividades permiten

ajustar en tiempo real las interconexiones internas del ecosistema con el objetivo de lograr la máxima eficiencia.

El desafío consiste en superar los actuales modelos de gestión individual, política y económica en los sistemas que transforman, distribuyen y canalizan los recursos. Se busca crear los canales, principios y métodos de gestión necesarios para facilitar el flujo natural de energía y otros recursos entre ellos, con el objetivo de lograr un equilibrio global.

4.1.3. Espacio subterráneo y urbanismo ecológico

Si se examina el entorno en busca de posibilidades, se puede apreciar que el crecimiento de la población y el cambio en el clima son los principales impulsores del desarrollo global en los próximos años.

En las próximas décadas, habrá una estrecha relación entre el crecimiento de la población y la urbanización a nivel mundial. Se espera que las zonas urbanas experimenten un rápido desarrollo y surjan nuevas megalópolis como resultado de este fenómeno.

El progreso equilibrado de las urbes está vinculado a la armonía entre su densidad y su complejidad, lo cual facilita la diversidad de interacciones que definen a la vida en la ciudad.

Sería imposible lograr la resolución física de los sistemas y los recursos que sustentan esta variedad de actividades sin contar con una red adecuada de infraestructuras esenciales en la ciudad, las cuales aseguran los derechos y servicios de los residentes. El aprovechamiento completo de todas las expansiones del espacio subsuelo.

La recuperación gradual del espacio urbano para ser utilizado por la comunidad y el logro de un equilibrio en todos los aspectos de la ciudad a través del urbanismo ecológico requiere que nos enfoquemos en el desarrollo de infraestructuras, servicios y dotaciones subterráneas. No solamente el subsuelo proporciona espacio, sino también cuenta con agua, materiales y energía.

Es esencial llevar a cabo una planificación integral y una gestión apropiada de los recursos del espacio subterráneo. Esta acción debe centrarse en establecer las interacciones, conflictos y sinergias entre los diversos usos que se integran en el subsuelo. Además, es necesario definir los objetivos y criterios de sostenibilidad

teniendo en cuenta las condiciones urbanas, geológicas, biológicas, económicas y culturales.

La gestión integrada de los recursos subterráneos brinda un amplio espectro de oportunidades, entre las cuales se destaca la posibilidad de utilizar los recursos energéticos presentes en el subsuelo para captar, intercambiar y almacenar energía.

4.1.4. Condición térmica del espacio subterráneo urbano.

El Espacio Subterráneo Urbano, o su término en inglés Urban Underground Space (UUS), es el suelo debajo de las zonas urbanas que está sometido a un proceso continuo de calentamiento lo que da lugar a una componente subterránea de las islas de calor urbanas [52].

Este cambio climático subterráneo tiene dos tipos de causas: antropogénicas y meteorológicas [52]:

- La causa principal, que se desarrolla a lo largo de escalas de tiempo de años, consiste en perturbaciones térmicas del subsuelo debido a la actividad antropogénica. Los edificios y las infraestructuras inyectan continuamente calor en el suelo debido a las pérdidas térmicas asociadas a la calefacción interior y a los equipos en edificios e infraestructuras.

  El transporte subterráneo impacta repetidamente en el campo de temperatura del subsuelo con el calor emitido por los trenes que frenan, o los automóviles y las personas que viajan. Las tuberías subterráneas, las alcantarillas, los cables de alta tensión y los sistemas de calefacción urbana también calientan el suelo.

- La otra causa de las islas de calor subsuperficiales, que se desarrollan a lo largo de siglos de tiempo, son las influencias meteorológicas. El aumento de la temperatura del aire sobre el suelo debido a la absorción diaria de la radiación solar y otras fuentes de calor por parte de los materiales de construcción está dando lugar a islas de calor meteorológicas urbanas.

  La temperatura del terreno en la capa superficial (por ejemplo, más allá de los 4-6 m menos de profundidad hasta los 50-100 m) suele estar cerca de la temperatura media anual del aire exterior, y como la temperatura del aire está aumentando debido a las islas de calor urbanas, el suelo también se está calentando. Por lo tanto, las islas de calor urbanas subterráneas pueden

considerarse en parte como la huella térmica subterránea de las islas de calor urbanas meteorológicas y microclimáticas.

Proporcionales a la densidad urbana y a la población, y dependientes de la topografía y la hidrogeología del espacio urbano, las islas de calor urbanas subsuperficiales pueden llegar a ser un fenómeno alarmante para las zonas urbanas, que a menudo pueden ser más intensas que su contraparte superficial. Una revisión reciente de la literatura sugiere que las islas de calor subsuperficiales están causando en varias ciudades del mundo un aumento de la temperatura media del suelo entre 0,1 y 2,5 °C por década hasta los 100 m de profundidad. Los estudios destacan los múltiples impactos del aumento de la temperatura del subsuelo en las zonas urbanas. El aumento de la temperatura del subsuelo puede afectar al estado bioquímico y al estado hidrogeológico del subsuelo urbano, lo que provoca cambios en el crecimiento de las plantas y la contaminación térmica de las aguas subterráneas, entre otros problemas [52].

Los aumentos de temperatura en el subsuelo también pueden causar problemas de infraestructura de transporte y salud pública, como rieles de metro sobrecalentados que obligan a los trenes a reducir la velocidad o detenerse para evitar incidentes con costos económicos significativos asociados con el retraso de los servicios de transporte público, y temperaturas extremas del aire subterráneo que causan incomodidad térmica y enfermedades inducidas por el calor [52].

Por el contrario, el aumento de la temperatura del subsuelo representa una oportunidad, ya que las tecnologías geotérmicas pueden aprovechar y reutilizar el calor adicional del suelo [52].

Por lo tanto, la identificación y mitigación de las islas de calor subsuperficiales representan nuevas prioridades para las estrategias de planificación urbana. Un enfoque para mitigar las islas de calor del subsuelo se basa en la utilización de tecnologías geotérmicas para absorber el calor residual, energía de bajo grado, del subsuelo para su uso en edificios y redes de energía de distrito.

De manera que, la recolección de calor residual del suelo generalmente mejorará la capacidad de calefacción de las tecnologías geotérmicas, lo que representa una estrategia valiosa para mitigar el cambio climático subterráneo en ciudades. Las islas de calor subsuperficiales representan no solo una amenaza, sino también un recurso para la descarbonización y la mejora de la sostenibilidad de las áreas urbanas.

4.1.5. Intercambio Geotérmico

El intercambio geotérmico permite aprovechar la inercia térmica del suelo y de los edificios e infraestructuras para almacenar grandes cantidades de energía térmica con potencias y temperaturas moderadas. Esto implica acumular la energía térmica residual generada por sistemas industriales y urbanos, para reutilizarla con costos reducidos y una larga vida útil. La relación entre la acumulación de energía térmica en el suelo y la administración de las oportunidades que brindan los sistemas integrados y distribuidos de captación de energía solar térmica y fotovoltaica también puede establecerse.

La geotermia también se puede utilizar para generar energía térmica de manera distribuida. A través de la utilización de la GSHP, ya sea con captación abierta o en circuito cerrado, es posible extraer e intercambiar energía proveniente de fuentes renovables, así como aprovechar energías "residuales" provenientes de diversas fuentes.

Las infraestructuras urbanas subterráneas que se integran a las redes energéticas cumplen funciones de generación distribuida, almacenamiento y consumo al interactuar con otros sistemas de la red.

Las ciudades cuentan con amplias y variadas redes de infraestructuras que interactúan con el entorno y gestionan diferentes tipos de energías. Dentro de ellas se encuentran diversas redes y sistemas de infraestructuras subterráneas, como estacionamientos subterráneos, sótanos, pasajes subterráneos, galerías de servicios, amplias galerías para el saneamiento urbano, sistemas de transporte como el Metro, túneles para la circulación de vehículos, redes subterráneas para la distribución de agua, entre muchas otras. Todas estas infraestructuras se encuentran enterradas y en contacto directo con el terreno. El intercambio de energía entre el suelo, el aire y el agua en este escenario ofrece innumerables oportunidades para la extracción, almacenamiento y uso de energía. Esta interacción termodinámica entre los elementos involucrados no tiene límites en su potencial.

Por lo tanto, al tener un contacto directo con el entorno, que engloba el aire, el agua, los dispositivos mecánicos y las personas, todas estas estructuras tienen la capacidad de realizar intercambios de energía con el terreno y cumplir con funciones tales como:

- Los captadores de la energía geotérmica aprovechan la abundante fuente de energía que nos rodea, la cual proviene principalmente de la radiación solar que llega a la superficie terrestre y en menor medida del interior de la tierra y de sus procesos nucleares profundos. Esta energía se traduce en el hecho de que, a poca profundidad, la temperatura del suelo se mantiene constante y no depende de las fluctuaciones de temperatura exteriores, siendo similar a la temperatura media anual del lugar.
- Los intercambiadores se utilizan para almacenar o absorber la energía del suelo que se destina a las infraestructuras subterráneas o a otros sistemas con los que se relacionan.
- Los acumuladores se utilizan para almacenar energía y compensar la diferencia entre los momentos en que se genera energía y los momentos en que se consume, ya sea en infraestructuras enterradas o en otros sistemas con los que interactúan.

4.1.6. Aprovechamiento del potencial geotérmico de las infraestructuras y el terreno.

Para aprovechar al máximo el potencial geotérmico de estos sistemas subterráneos, existen diversas opciones y métodos, dependiendo del uso que se le pretenda dar a la energía extraída o inyectada en el suelo.:

- Intercambio con los recursos térmicos canalizados por las infraestructuras. Algunos de estos sistemas de infraestructuras subterráneas son redes de conductos por los que circulan vehículos, fluidos, agua o aire, que portan e intercambian directamente energía de bajo grado con el terreno. La energía aportada desde el exterior por los sistemas de túneles, redes de alcantarillado, redes de distribución de agua o galerías de servicio ventiladas, es preservada un medio subterráneo atemperado por su condición geotérmica y tiene un potencial importante de aprovechamiento en procesos de intercambio para la refrigeración/calefacción de edificios o aporte térmico a la renovación de aire en la ventilación.
- La recuperación de los recursos se resuelve en estos casos mediante intercambiadores térmicos agua-agua, aire-agua o aire-aire, que, con intermediación de bombas de calor, transfieren el calor entre la red de intercambio de calor integrada en las infraestructuras y la red de emisión o

absorción de calor, o la red de tratamiento térmico del aire de renovación, integrada en los edificios.

- Geoestructuras. La mayoría de estructuras subterráneas, como muros, galerías y conducciones, que están construidas con materiales de buena conductividad térmica, como obra de fábrica u hormigón, tienen la capacidad de ser consideradas termoactivadas, capacitadas como estructuras de intercambio térmico o geoestructuras, incorporando circuitos de transferencia de energía por los que circula en su interior un fluido caloportador, normalmente agua. Es la técnica de la termoactivación, que habitualmente se ejecuta en el mismo proceso de construcción de los elementos constructivos termoactivados.
- La termoactivación de estructuras subterráneas ya construidas, sótanos, túneles o galerías, ha sido objeto de investigación y desarrollo de sistemas tecnológicos desde hace más de 20 años. Así se experimentó con láminas geotextiles dotados de circuitos de intercambio para revestir la superficie interior de muros y bóvedas en contacto con el terreno. Sólo en los últimos años ha culminado el desarrollo y puesta en el mercado de sistemas modulares de paneles de alto rendimiento integrados por placas de intercambio ligeras y flexibles, fabricadas mediante técnicas industriales de control numérico y soldadura avanzada, que resuelven con mucha flexibilidad y rendimiento la posterior termoactivación de construcciones existentes.
- Las geoestructuras son intercambiadores geotérmicos que, con intermediación de bombas de calor, transfieren el calor entre la red de intercambio de calor integrada en las infraestructuras y la red de emisión o absorción de calor, o la red de tratamiento térmico del aire de renovación, integrada en los edificios.
- Aprovechamiento de recursos del medio capturados por las redes de infraestructuras subterráneas. En su trazado subterráneo las redes de infraestructuras a menudo interfieren o interaccionan con los flujos de otros recursos subterráneos que, atemperados por el terreno, preservan y conducen energía de bajo grado. Se trata de la energía de las aguas de infiltración de túneles, que es drenada, canalizada y bombeada fuera de las instalaciones, con las que se puede realizar un proceso de intercambio térmico, también el intercambio abierto con capas freáticas a distinta temperatura o el intercambio tierra-aire en instalaciones subterráneas ventiladas y que, mediante intercambio térmico pueden proporcionar energía para atemperar el aire exterior utilizado para la ventilación de los edificios.

Pertenecen a estos casos las siguientes soluciones de intercambio integrado en infraestructuras subterráneas:

- La superficie envolvente de un aparcamiento subterráneo, en contacto directo con el suelo, está diseñada para funcionar como un sistema de intercambio de calor y suministrar energía de baja temperatura para regular la temperatura de un edificio cercano.
- Los sótanos de los edificios que utilizan el terreno para obtener energía.
- Las infraestructuras subterráneas que facilitan el tratamiento previo del aire mediante su circulación a través de ellas.
- Las cimentaciones termoactivas y los campos de intercambiadores verticales se utilizan tanto para proporcionar climatización a edificios como para suministrar energía a procesos industriales.
- Las losas de cimentación como intercambiadores energéticos
- La red subterránea de saneamiento que canaliza las aguas residuales a una temperatura moderada y estable debido a las características geotérmicas asociadas.
- La red general de distribución de agua potable.

En todos los casos se trata de elementos en contacto con el terreno y pasivos, es decir la cantidad y calidad de la energía que se puede sacar de ellos responde exclusivamente a su capacidad directa de intercambio con el terreno y de la indirecta que el intercambio geotérmico pasivo ejerce sobre los fluidos, aire o agua, que están canalizadas por las infraestructuras subterráneas.

Pero, además de las características, las capacidades de intercambio térmico y el potencial de aprovechamiento cruzado de las infraestructuras urbanas subterráneas, la recuperación y uso de los recursos implica, y depende también de:

- La adecuación a estos recursos energéticos de bajo grado de los edificios en los que se va a utilizar la energía de bajo grado recuperada. Básicamente deben ser edificios de baja demanda energética y aptos y competentes en el uso y la gestión de energía térmica a temperatura moderada. Los edificios son también la interfaz entre los recursos térmicos recuperados y los usuarios que los aprovechan, y como medio de transferencia y emisión deben estar dotados de los recursos tecnológicos, de construcción, equipamiento e información, y de los

recursos lógicos que resuelven el intercambio entre los dos medios a través de redes de información y energía.

- La adecuada naturaleza y funcionamiento de las redes de transferencia de información y energía que permiten la interacción y el aprovechamiento cruzado de recursos entre las infraestructuras subterráneas y la edificación.

Cada una de estas tres componentes tiene una naturaleza propia y debe configurarse bajo principios lógicos comunes con las otras dos, que se perfeccionan a través de estrategias de integración sistémica, eficiencia y gobierno que se ejercen a través del cuarto componente que es el sistema de gestión, control, operación y mantenimiento, O+M, y medida y verificación de resultados, M+V, que recoge, analiza y reinyecta en el proceso la información que permite una mejora continua y dinámica de las estrategias de eficiencia.

El esquema de la Figura 4-4 muestra la estructura de integración tridimensional de la "ciudad inteligente" sobre una red inteligente vinculada a las redes inteligentes de distintos subsistemas de infraestructuras urbanas subterráneas.

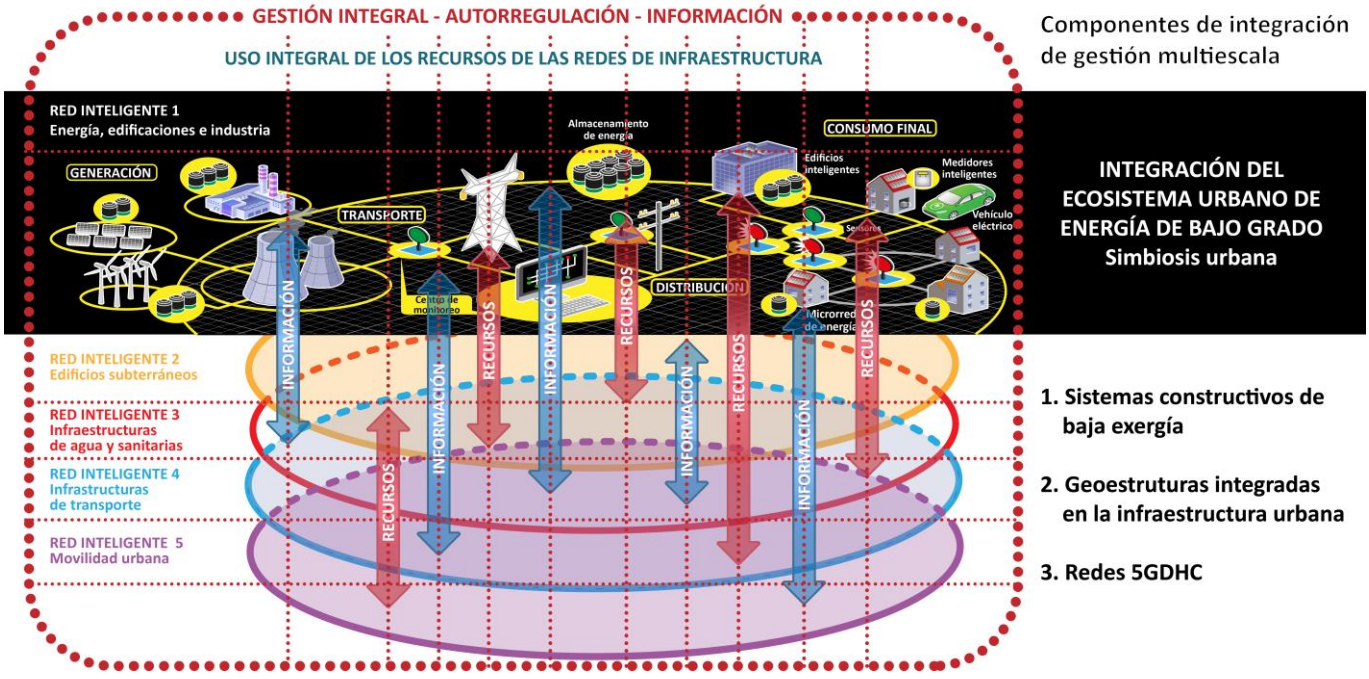


Figura 4-4. Integración del ecosistema urbano de baja energía.

Los subsistemas de infraestructuras urbanas subterráneas, estructurados como redes inteligentes independientes, están progresivamente mejor gestionados gracias a la incorporación de poderosos recursos de medición y control, pero están aislados y eso pone un techo a su potencial de eficiencia. Acceden a un grado

superior de eficiencia cuando son integrados en una red transversal que canaliza información y energía entre ellas y desde ellas hacia los sistemas consumidores. Este aprovechamiento cruzado se sustenta sobre una rasgo fundamental de las redes urbanas que es la proximidad entre fuentes y usuarios, lo que permite reducir las pérdidas, producir y consumir localmente según redes y microrredes más proporcionadas, descentralizadas, de baja temperatura y bajo grado, con capacidad para integrar muchas y diversas fuentes de recursos de baja temperatura procedentes del medio natural, del medio urbano y de los edificios, conectados, y acudir a todos los usuarios que estén preparados para intercambiar y usar energía de bajo grado. Este planteamiento desarrolla las prescripciones de Naciones Unidas sobre la necesidad de poner los recursos renovables y recuperados de bajo grado al alcance de todos los ciudadanos, a costes de inversión operación y suministro asequibles y en redes cortas, locales y colectivas.

La integración de los componentes de todas las escalas bajo un sistema colectivo de gestión, autorregulación e información, construye una arquitectura del sistema energético un ecosistema urbano, en el que el recurso energético de bajo grado es puesto en valor e intercambiado según la lógica de la simbiosis urbana.

4.2. Infraestructuras urbanas subterráneas. Ámbitos y técnicas de intercambio energético

Se exponen y se ilustran los distintos ámbitos de aprovechamiento energético en distintos tipos de infraestructura urbana subterránea. Utilizamos la exposición de casos de edificios e instalaciones vinculadas a distintos tipos de infraestructura, técnica y tecnología de intercambio, proyectadas y en algunos casos ya ejecutados ejecutadas por el autor de esta Tesis Doctoral.

Este apartade se centra en la presentación de las técnicas de captación e intercambio de recursos energéticos de bajo grado, en posteriores apartados de este estudio se desarrolla la explicación sobre las condiciones de transferencia y utilización de estos recursos, pero ya están presentes en esta explicación las premisas lógicas de una integración eficiente.

4.2.1. Intercambio de energía con la componente subterránea de la edificación. Sótanos y aparcamientos

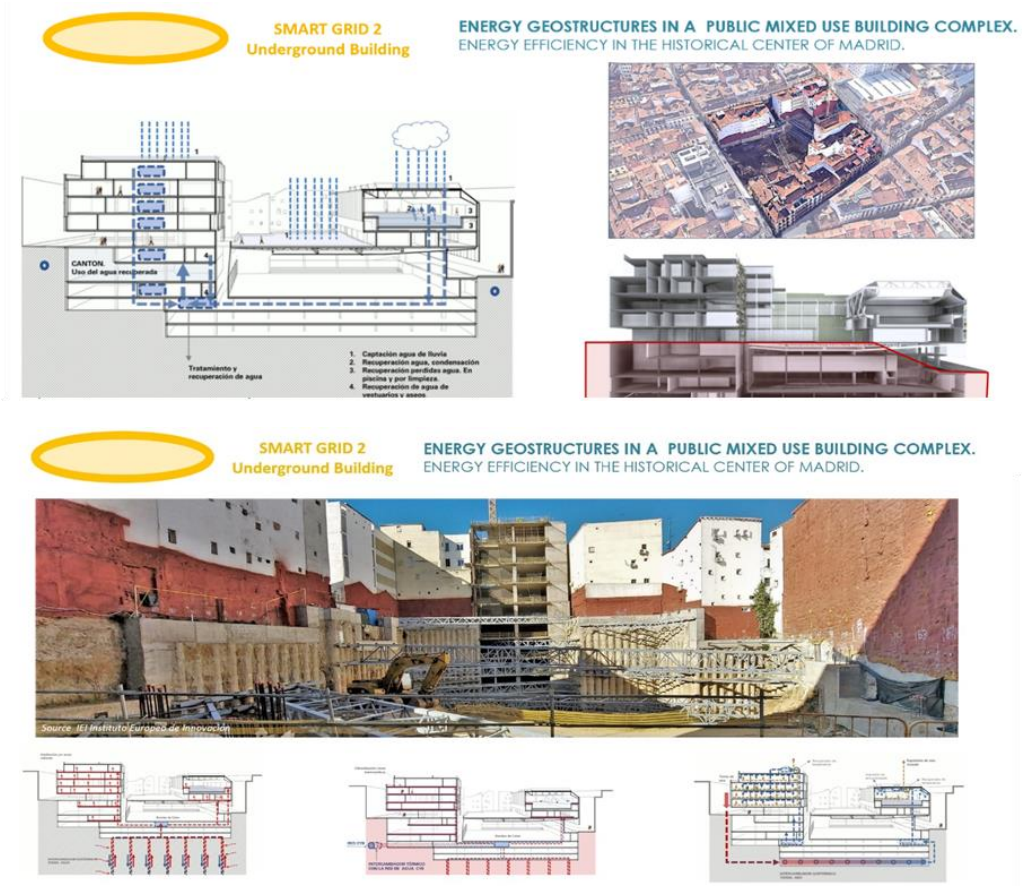


Figura 4-5. Ejemplos de Red inteligente tipo 2 - Edificios subterráneos dotaciobnales. Fuente: Instituto Europeo de Innovación

La importancia del espacio público y privado en nuestras ciudades es cada vez mayor, ya que su diseño y distribución juegan un papel fundamental en la influencia del entorno urbano en la salud de las personas, el clima, los ecosistemas y los recursos naturales. Por lo tanto, se está llevando a cabo un proceso constante de recuperación y adaptación de estos espacios para su uso por parte de los ciudadanos.

El aprovechamiento del espacio subterráneo está relacionado con la recuperación de áreas sin construir en las ciudades establecidas. Muchas de las infraestructuras fundamentales y redes de distribución, almacenamiento e intercambio de recursos se encuentran ubicadas en el subsuelo de las plazas, calles, patios y edificios de la ciudad.

La ubicación subterránea de los sótanos y los aparcamientos les proporciona la capacidad de intercambiar energía. Esto se logra gracias a la masa de sus

estructuras que se encuentra en contacto con el suelo, así como al aire que circula dentro de ellos y al agua que recolectan y drenan. La capacidad de intercambio de energía en los aparcamientos subterráneos, a través de su superficie perimetral, puede variar entre potencias ponderadas de 30 a 50 w/m². Este valor de referencia está sujeto a cambios según la profundidad del aparcamiento, la forma del edificio, la composición del suelo y las condiciones climáticas del entorno. Se trata de una fuente de energía que, al ser utilizada en edificios de bajo consumo y bajo impacto ambiental, contribuye de manera significativa a la eficiencia energética. Además, es una opción con bajo costo y alto rendimiento, y se encuentra disponible localmente.

La capacidad de los espacios subterráneos para intercambiar y aprovechar energía es particularmente relevante en entornos urbanos densos donde se construyen estas infraestructuras. En estos casos, la energía puede utilizarse directamente para climatizar los edificios que están sobre los sótanos y estacionamientos, así como también en otros edificios cercanos, áreas abiertas o instalaciones urbanas

4.2.1.1. Intercambio geotérmico a través de estructuras termoactivas

La posibilidad de incluir circuitos de intercambio geotérmico en la construcción de espacios subterráneos nos permite utilizar el estacionamiento como una forma altamente eficiente de aprovechar la energía renovable. En este sentido, es factible integrar en la estructura elementos como pilotes, pantallas o losas, para lograr este objetivo. La incorporación de circuitos de intercambio de energía en pilotes, pantallas o losas se vuelve accesible y rentable gracias a las técnicas de termoactivación estructural. Estos circuitos se integran en sistemas de alta eficiencia energética a través de bombas de calor geotérmicas que alcanzan un coeficiente de rendimiento (COP) entre 3,5 y 5. Si la eficiencia aumenta considerablemente cuando se utiliza energía geotérmica para la climatización de edificios, espacios públicos o equipamientos aprovechando sistemas inerciales y radiantes.



Figura 4-6. Cimentaciones termoactivas. Pilotes, pantallas y losas termoactivados en obras de ejecución de aparcamientos subterráneos.
Fuente: Enercret

La integración innovadora de los sistemas termoactivos en las estructuras de los aparcamientos, es una técnica que ha demostrado ser especialmente interesante en procesos de intervención en contextos urbanos porque en una misma actuación se resuelve la dotación de aparcamiento y la de captación e intercambio eficiente de energía de fuentes renovables. Se resuelven situaciones que sin un planteamiento innovador, en la integración de técnicas constructivas y energéticas, no serían viables.

La incorporación de sistemas de captación y utilización de energías renovables en la construcción es particularmente desafiante en el contexto de la renovación urbana. Las intervenciones en el parque ya construido y en los espacios urbanos existentes se destacan por ser complicadas desde el punto de vista constructivo, dado que deben ajustarse a la forma, orientación y características arquitectónicas de los edificios y espacios existentes, lo cual impacta en el rendimiento de los sistemas de captación de manera negativa.

En el campo de la microgeneración eólica urbana, todavía hay un problema sin resolver, y en el caso de la captación solar, solo se ha resuelto parcialmente. Sin embargo, cuando se trata de captación geotérmica, es evidente que hay muy pocas acciones llevadas a cabo en la rehabilitación de edificios y áreas urbanas densas. Esto es especialmente notorio en los centros urbanos consolidados de nuestras ciudades. El desconocimiento de la técnica constructiva es una de las principales causas de las dificultades físicas en la ejecución de los sistemas de intercambiadores durante la rehabilitación. Estas dificultades se deben principalmente a la falta de espacio y la complicación para introducir la maquinaria y equipos auxiliares necesarios en el proceso de perforación. Aprovechar la construcción de un sótano o un aparcamiento para integrar en ellos

dispositivos de intercambio geotérmico puede generar un ahorro del 50 % en comparación con la instalación individual de un sistema de intercambio geotérmico. No se puede desaprovechar la ocasión de aprovechar las habilidades térmicas y energéticas de la construcción.

El uso de la geotermia como una fuente de energía renovable presenta grandes beneficios y despierta un interés particular en las áreas urbanas establecidas y en los proyectos de restauración. Existen distintos motivos que explican este interés::

- La orientación existente de los edificios, su geometría o espacio disponible, la presencia de sombras de edificios cercanos y las restricciones de protección patrimonial no suponen un obstáculo para la captación geotérmica.
- La captación alcanza su máximo rendimiento cuando se realiza un diseño adecuado, se calcula correctamente y se dimensiona el intercambiador, además de asegurar una instalación de calidad y gestionar y mantenerla adecuadamente.
- La instalación de sistemas de aire climatización, calefacción y refrescamiento, con GSHP es especialmente práctica y puede ser fácilmente adaptada en los espacios ya existentes de los edificios. De hecho, en muchas ocasiones, esta opción permite reducir y simplificar el área necesaria para las instalaciones.
- Los sistemas de climatización con fuente geotérmica, como los derivados de la captación geotérmica y los sistemas inerciales y radiantes, pueden ser fácilmente integrados en los elementos constructivos y estructurales de edificios rehabilitados y espacios públicos de equipamientos. Esto permite eliminar una gran cantidad de componentes y equipos de los sistemas convencionales, al mismo tiempo que se mejora considerablemente los factores que contribuyen al confort ambiental.
- El área que presenta mayor oportunidad de ahorrar energía y reducir emisiones en los edificios existentes es la rehabilitación para mejorar la eficiencia energética. Sin embargo, es también el área que requiere más investigación e innovación para desarrollar y aplicar nuevas soluciones, sistemas y métodos constructivos y operativos que permitan implementar eficientemente la captación, gestión y uso de la energía.
- La combinación de sistemas de intercambio y almacenamiento geotérmico en estacionamientos promueve la generación y uso propio de energía, lo cual es

fundamental para una gestión energética eficiente que aún no está muy desarrollada en las zonas urbanas.

A partir de este punto, la solución para la implementación de sistemas de intercambio geotérmico en edificios y cascos antiguos se encuentra en los procesos de rehabilitación que se enfocan en la restauración funcional y económica de los bienes inmuebles y áreas libres. Estos procesos abordan la mejora y actualización de las características y equipamientos de dichos espacios.

En España, durante la última década del siglo pasado, se produjo un gran impulso para la rehabilitación de los centros históricos. En ese momento, los enfoques se centraban en aspectos sociales y urbanísticos, mientras que en la actualidad estamos centrados en aspectos energéticos. El desafío consistió en encontrar soluciones técnicas para la renovación urbana y arquitectónica. Rápidamente, estas soluciones se integraron plenamente en los campos de la movilidad y la sostenibilidad en las ciudades.



Figura 4-7. Ejemplos de Red inteligente tipo 2 - Edificios subterráneos terciarios. Fuente: Instituto Europeo de Innovación.

Enunciamos varios casos ejecutados en Madrid:

- El desarrollo de microaparcamientos urbanos para residentes y en red, no sólo evita la concentración de la carga de circulación y aparcamiento en puntos muy concretos y sobrecargados de la trama urbana, sino que al difundir de manera distribuida el recurso subterráneo del aparcamiento crea una red distribuida de

captación e intercambio de energía de baja potencia aplicada a la climatización de edificios, espacios libres y equipamientos.

- La integración de diversos usos dotacionales en un edificio de promoción pública con mínimo impacto ambiental. Se ofrecen viviendas en alquiler para jóvenes en Margaritas 52, ubicadas en el barrio de Tetuán en Madrid. Además, en el mismo edificio, se proporcionan instalaciones para los Servicios Municipales de Limpieza y Medio Ambiente, así como aparcamiento exclusivo para los residentes, dotado con un sistema de intercambio geotérmico que hibridado con un sistema solar térmico cubre la totalidad de las necesidades de energía térmica del edificio.
- Rehabilitación integral de un inmueble destinado a oficinas Apolonio Morales 29, en la ciudad de Madrid. Edificio cuyos sistemas geotérmicos y termoactivos cubren todas las necesidades de calefacción y refrigeración con alta eficiencia, en él se han mejorado los métodos que posibilitan la incorporación de un producto tecnológico industrializado en una obra de rehabilitación realizada utilizando técnicas in situ, en el complicado entorno urbano, que presenta desafíos adicionales para la ejecución de proyectos de este tipo. (Figura 4-7).

Después de comprobar que las obras y la implementación de sistemas en la rehabilitación de edificios son viables y rentables, el enfoque ha cambiado hacia la exploración del potencial termodinámico de las estructuras y cimientos. Esto implica aprovechar los aparcamientos como intercambiadores geotérmicos, que se convierten en una fuente de energía limpia, gratuita y distribuida para la ciudad.

Como se ha mencionado previamente, en los últimos veinte años se ha trabajado en la investigación y desarrollo de métodos para capturar energía de forma pasiva mediante las estructuras y el atemperamiento del aire en los estacionamientos mecánicos. Estas soluciones buscan aprovechar su potencial térmico para climatizar los edificios. En el caso de obras de rehabilitación, la creación de espacios adicionales para instalaciones, servicios o aparcamientos ocurre en la mayoría de los casos debajo de los edificios. Esto representa un desafío en términos de construcción, pero no supone dificultad alguna para la incorporación de sistemas termoactivos de captación geotérmica. Esta tecnología forma parte de la renovación completa de edificios que requieren altos niveles de eficiencia energética en áreas urbanas consolidadas, donde es difícil acceder a otras fuentes de energía renovable.

Además, suelen presentar el desafío adicional de trabajar en edificios y entornos urbanos protegidos, lo cual aumenta su complejidad.

4.2.2. Caso 1, de intercambio con la componente subterránea de un edificio. Ejecución de un aparcamiento semiautomático con intercambiador geotérmico en la rehabilitación de un edificio



Figura 4-8. Rehabilitación energética del edificio de oficinas en la Calle Apolonio Morales 29 de Madrid. Fuente: Instituto Europeo de Innovación.

Como parte inicial del proceso de diseño del intercambiador geotérmico, se realizó el cálculo de la cantidad de energía requerida mensualmente por el edificio, considerando su modo de uso, ocupación, horarios y cargas estimadas. Se utilizó la distribución mensual de la demanda como punto de partida en el cálculo y la simulación del comportamiento del terreno como un dispositivo que acumula e intercambia energía térmica de bajo grado.

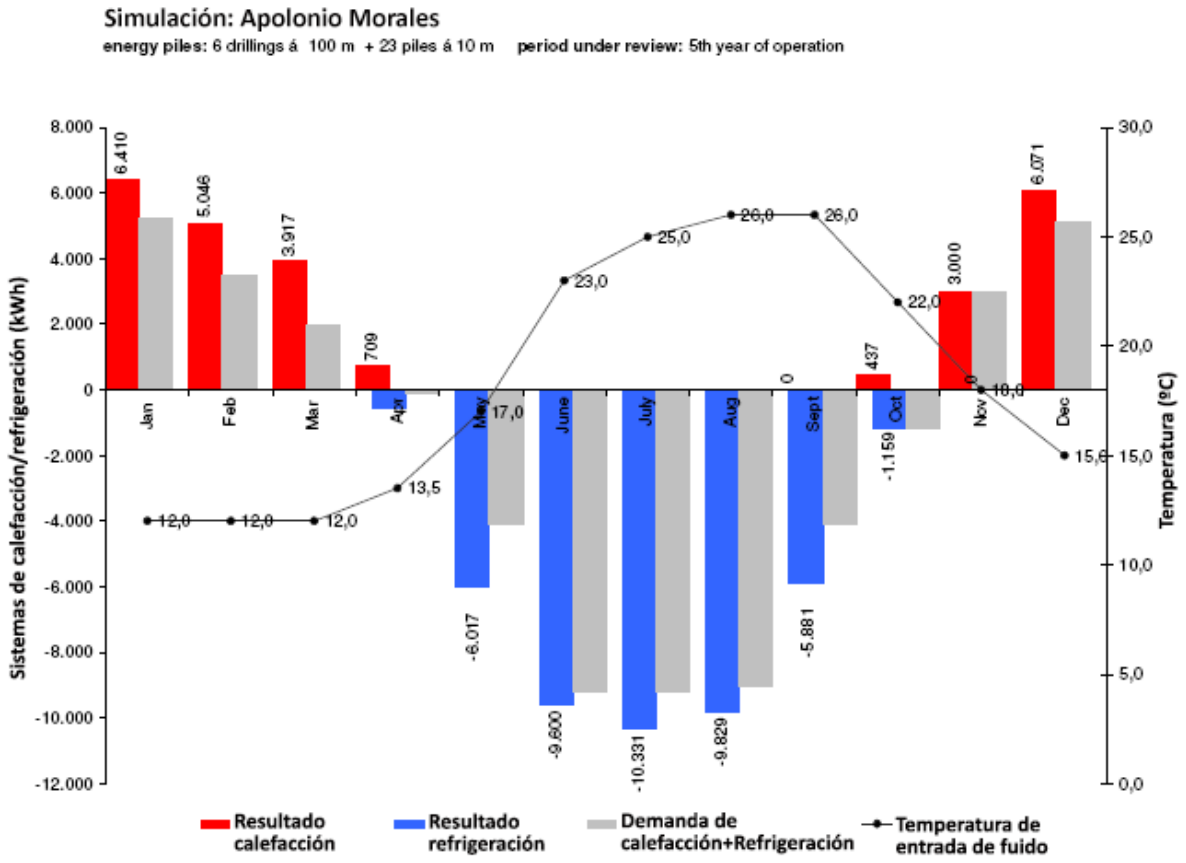


Figura 4-9. Diseño del intercambiador geotérmico. Gráfica de la cobertura mensual de la demanda energética para refrigeración y calefacción y temperaturas del terreno en la Fuente: Eneres.

Se construyó un estacionamiento debajo del patio trasero del edificio y se excavó un vaso de 6 metros de profundidad para alojarlo. Los muros pantalla tienen 46 pilotes de 45 centímetros de ancho y 10 metros de profundidad, 23 de los cuales están activados para el intercambio de calor.

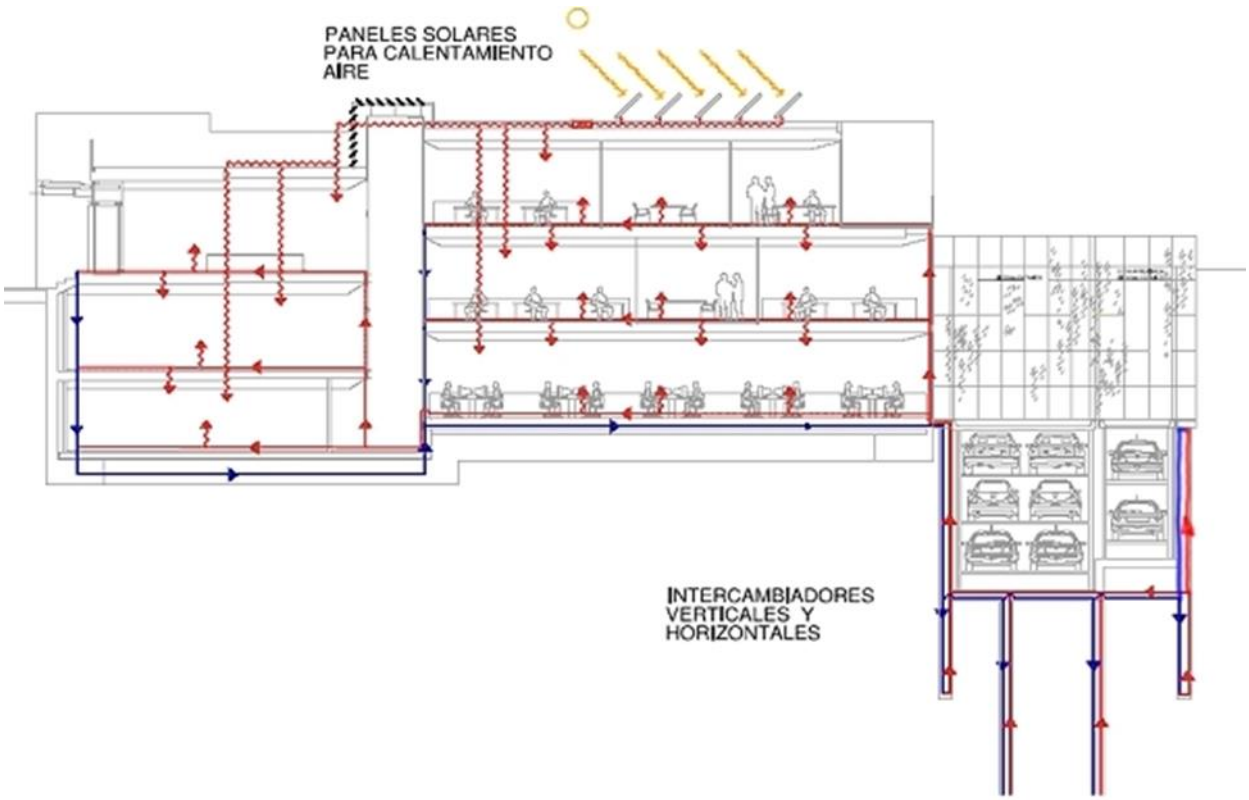


Figura 4-10. Esquema del sistema de intercambiador geotérmico mixto integrado en el aparcamiento semiautomático Climapark Parklift, bomba de calor geotérmica (GSHP) y forjados termoactivos.
Fuente: Instituto Europeo de Innovación.

En un área de suelo compacto y arenoso con corrientes de agua de alta capacidad a una profundidad cercana a los 4 m, los 23 pilotes termoactivos que se encuentran en el sótano del estacionamiento intercambian el 25% de la energía necesaria para el funcionamiento del edificio. El 75% restante se genera mediante la utilización de 6 intercambiadores verticales de 100 m de profundidad que han sido perforados directamente en el suelo del estacionamiento [53].

Se incorporó la forma del intercambiador geotérmico en el cálculo del modelo para verificar que se satisfacían por completo las demandas de calefacción y refrigeración del edificio mediante la energía geotérmica. El agua cercana y la permeabilidad del suelo han contribuido de manera significativa a la capacidad de enfriamiento, la cual era más desafiante que la capacidad de calefacción. Las temperaturas del suelo varían entre 14 ºC después del invierno y 26 ºC después del verano.

Las condiciones de realización estuvieron determinadas por el acceso al patio trasero, que tenía una rampa de 25 m de largo y 3 m de ancho, y por el espacio limitado del patio, que medía 12 por 15 m. Allí se llevaron a cabo la instalación de

los 23 pilotes termoactivos y los 6 intercambiadores verticales utilizando máquinas pequeñas de pilotaje y perforación. El mismo panel de pilotes también funciona como apoyo para el muro perimetral de 7 metros de altura que rodea el patio en tres de sus lados. El edificio ocupa el cuarto lado, y su fundación fue eliminada para llevar a cabo el vaciado.



Figura 4-11. Ejecución de la pantalla de pilotes termoactivos del vaso del aparcamiento. Detalle de la viga de atado con los circuitos del colector horizontal. Fuente: Eneres.

La red de conductos horizontales recoge los circuitos de los pilotes termoactivos y los conecta con el colector de la sala de bombas de climatización. Estos conductos se ubican dentro de la viga de atado, la cual recoge las cabezas de todos los pilotes del área de estacionamiento. La losa de fondo del vaso contiene una red horizontal que recoge los circuitos de los seis intercambiadores verticales.

El estudio detallado de la interacción y compatibilidad entre los sistemas estructurales, mecánicos y energéticos fue crucial para la planificación y ejecución sin contratiempos de la construcción de estos tres sistemas de manera simultánea

y en un tiempo limitado. Se adoptaron medidas preventivas y se implementaron mecanismos para evitar cualquier error durante el proceso constructivo.

El uso de intercambiadores geotérmicos en la construcción del estacionamiento permite ahorrar un 40 % en el costo de la instalación de kilovatios geotérmicos en comparación con los intercambiadores verticales. El edificio ha logrado disminuir su consumo energético en un 87 % en comparación con su estado anterior. La disminución de los gastos de utilización de electricidad en un 75 % y la disminución de los gastos de conservación de la instalación en un 63 %.

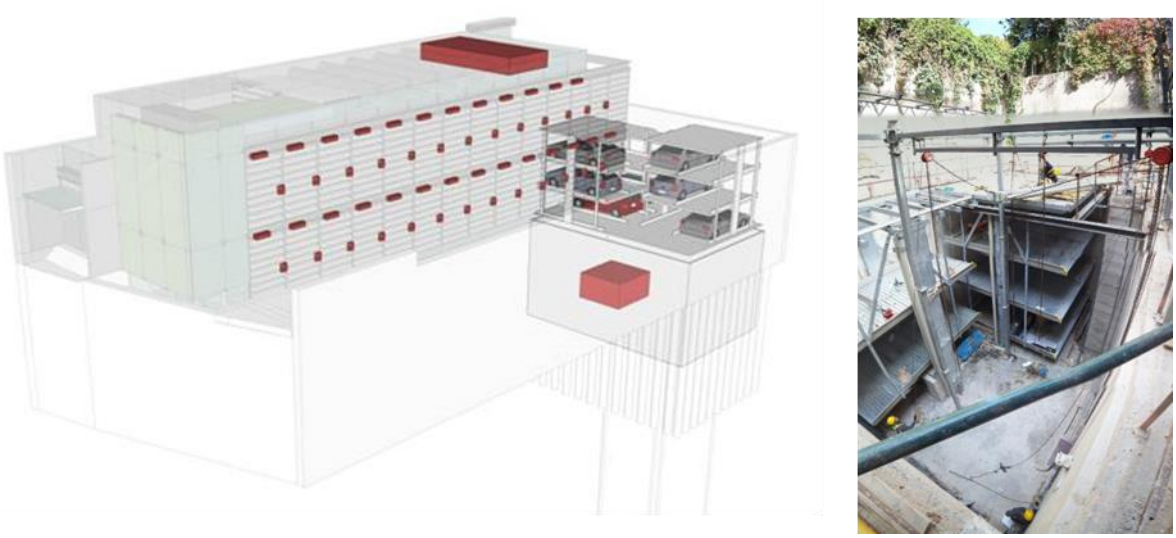


Figura 4-12. Esquema del sistema de intercambiador geotérmico mixto integrado en el aparcamiento semiautomático Climapark Parklift, bomba de calor geotérmica (GSHP) y forjados termoactivos.
Fuente: Eneres.

4.2.3. Caso 2, de intercambio con la componente subterránea de un edificio. Ejecución de un sótano de aparcamiento con intercambiador geotérmico en la rehabilitación integral de un palacete para oficinas de la administración en Madrid

El segundo escenario que se presenta conlleva un nivel de complejidad adicional en la realización del intercambiador, ya que implica la rehabilitación completa de un palacete construido a principios del siglo pasado. Este edificio, protegido por su valor arquitectónico, se encontraba en un estado estructural muy deteriorado, por

lo tanto, debía ser reconstruido y restaurado manteniendo todos los muros portantes que conformaban su configuración original.



Figura 4-13. Vistas generales del edificio su estado previo a la rehabilitación. Fuente: Eneres.

En este escenario se planea construir un edificio altamente eficiente que aproveche la energía geotérmica, utilizando una bomba de calor geotérmica (GSHP) para la climatización a través de la incorporación de elementos termoactivos en la estructura horizontal. La nueva estructura estará compuesta por losas de hormigón visto con un espesor considerable de 25/30 cm y una masa de 600/720 kg/m², que tendrán la capacidad de absorber, transferir y almacenar energía en rangos de temperatura moderados durante largos periodos de tiempo.



Figura 4-14. Vistas del proceso de ejecución de los intercambiadores verticales y los pilotes termoactivos del sistema Climapark en los espacios ajustados del edificio protegido en rehabilitación. Fuente: Eneres.

La configuración de la instalación de captación es una combinación de diferentes sistemas. Una parte de esta configuración se resuelve utilizando el vaso subterráneo que aloja un sistema mecánico de aparcamiento que puede albergar hasta 27 vehículos y cuenta con 45 pilotes termoactivos. Estos pilotes están dispuestos en una pantalla discontinua y tienen una longitud de 20 metros y un diámetro de 45 centímetros, alternándose con otros pilotes no activados. Este sistema atiende alrededor del 25 % de la demanda total del edificio, mientras que 14 intercambiadores geotérmicos verticales de 150 m de profundidad resuelven el resto de la cobertura de la demanda.

En este caso, el diseño del intercambiador geotérmico se llevó a cabo tomando en cuenta diversos aspectos. Se consideraron los análisis del terreno, la demanda de energía del edificio, la planificación de los elementos constructivos y de cimentación, así como la consideración especial del proceso de perforación. También se tuvo en cuenta la maquinaria necesaria para cada parte del intercambiador, la accesibilidad a las diferentes áreas del edificio donde se requería la instalación de pilotes o perforaciones, y los plazos de ejecución que implicaban la combinación de todos estos factores. En este aspecto, esta obra se destaca por su innovación, ya es el primer proyecto ejecutado que implementa un sistema de intercambio geotérmico dentro de un edificio protegido. Este sistema tiene una potencia instalada de 100 kW en calefacción y 119 kW en refrigeración.

Por último, es importante mencionar que en este proyecto, inicialmente resuelto mediante sistemas convencionales de bomba de calor aire-aire y caldera de gas, la solución final en construcción, a pesar de las difíciles y complicadas condiciones de trabajo, resultó ser más económica en términos de ejecución que la propuesta inicial. Además, resuelve la integración arquitectónica en el aparcamiento subterráneo, fusionándose perfectamente con el edificio renovado. También mejora las condiciones de comodidad y logra un ahorro del 66 % en los costes de energía utilizada para climatizar, así como una reducción del 60 % en las emisiones, como se detalla en los diagramas y tablas que siguen.

Componente	Proyectado	Estudio	Ahorro	%
CO^2 (kg)	124.569	47.216	77.353	62%
SO^2 (kg)	184	71	113	61%
NO_x (kg)	157	65	92	59%

Tabla 4.1. Emisiones anuales según el proyecto original (proyectado) y el finalmente ejecutado (estudio) y balance de reducción de emisiones (ahorro).
Fuente: Eneres.

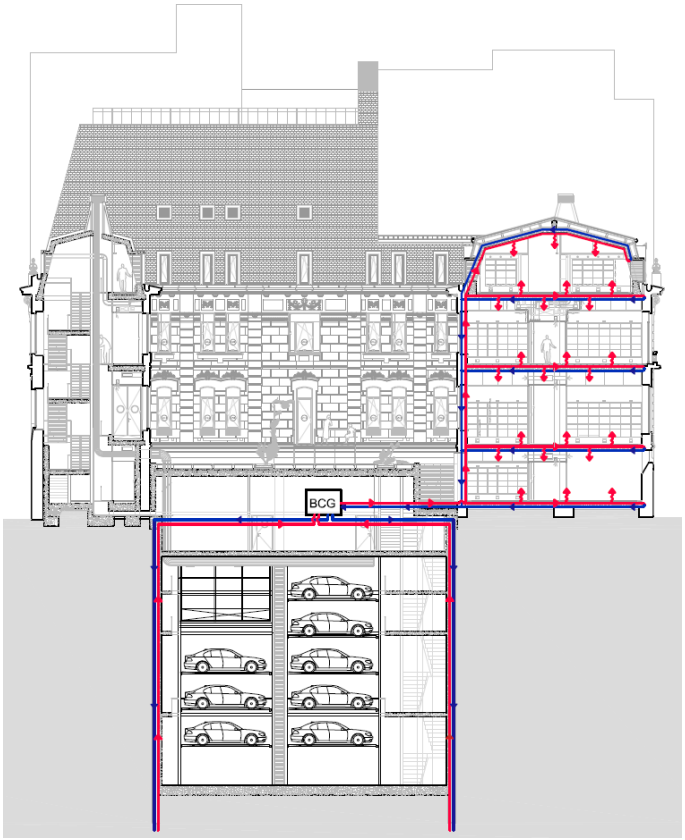


Figura 4-15. Sección por el sistema integrado de aparcamiento mecánico e intercambiador geotérmico Climapark Levelparker 590 para 27 vehículos. En la figura se aprecia también el sistema de losas termoactivas que resuelve la climatización del edificio, como sistema.
Fuente: Eneres.

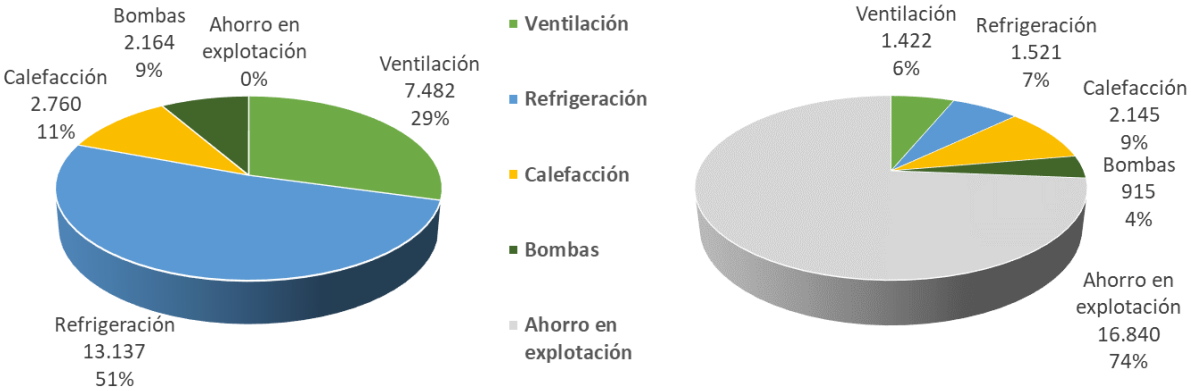


Figura 4-16. Diagramas de consumo anual (€/año) en los sistemas de climatización del edificio según el proyecto original (izquierda) y el finalmente ejecutado (derecha).
Fuente: Eneres.



Figura 4-17. Vistas del patio y del aparcamiento mecánico que integra el sistema de intercambio geotérmico, tras la obra de rehabilitación integral.
Fuente: Sistemas Avanzados Sostenibles.

4.2.4. Caso 3, de intercambio con la componente subterránea de un edificio. Aparcamiento mixto de rotación y para residentes subterráneo al pie del salón de Isabel. Segovia.



Figura 4-18. Vista general desde el sur del casco histórico de la ciudad de Segovia. En el centro de la imagen el talud ajardinado que soporta el Salón de Isabel II, bajo el que se construye el aparcamiento.
Fuente: Instituto europeo de Innovación.

El salón de Isabel II es un jardín decimonónico construido al pie del lienzo sur de la muralla de Segovia y sostenido por un talud ajardinado que resuelve un desnivel de 22 metros de cota entre la ciudad histórica y la vega del río que rodea la ciudad. Constituye un vestíbulo a la ciudad histórica a través de las murallas que en este punto tienen dos puertas de acceso, y a la vez es un espacio de estancia y

actividades públicas de enorme potencial por su privilegiada situación y su vínculo a una zona muy densa de la ciudad.

Bajo el talud se propone construir una estructura subterránea que resuelva desde el nivel inferior el aparcamiento de los visitantes, y el de los residentes que desde aquí pueden acceder andando al centro histórico, liberando los espacios de la ciudad monumental de la carga del estacionamiento de vehículos.

La configuración del aparcamiento es muy singular, pues su geometría se adapta, muy ajustada al perfil irregular del talud y a los alabeos del terreno, sin invadir en ningún momento la parte inferior de los jardines. La práctica desaparición de la infraestructura del aparcamiento bajo el talud, sin modificar su geometría, su configuración original y su ajardinamiento, es una condición de partida en el proyecto que responde estrictamente al alto nivel de la protección patrimonial de la ciudad y en particular a la importancia de preservar intacta la imagen de la misma en este punto.

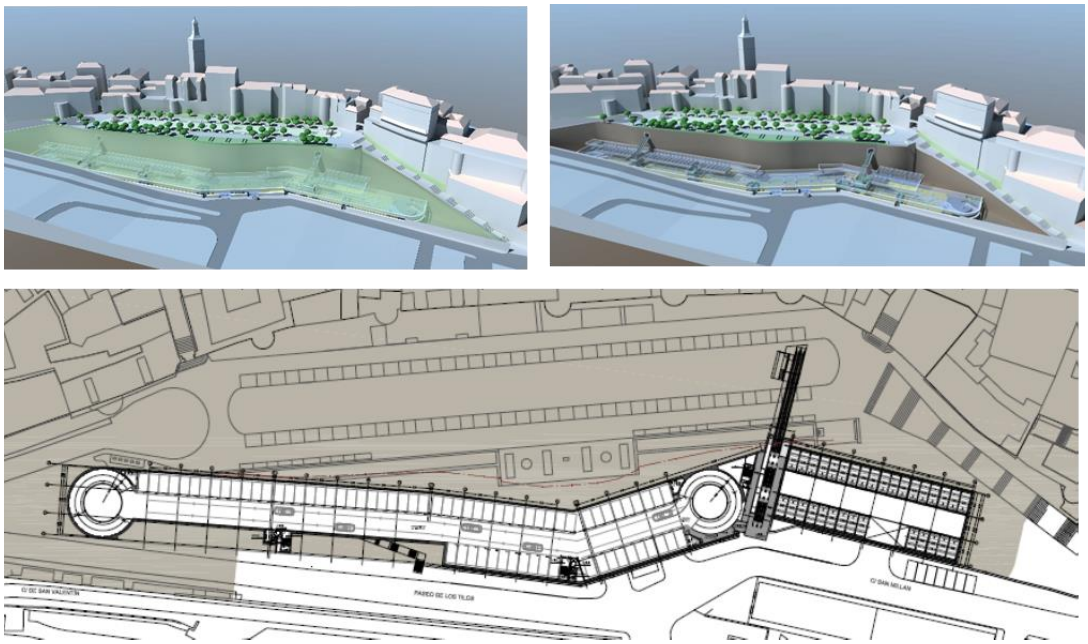


Figura 4-19. Vistas generales y planta del aparcamiento mixto de rotación y residentes que se construye completamente integrado bajo el talud, al pie del Salón de Isabel II. Fuente: Instituto Europeo de Innovación.

Sin embargo la condición subterránea del aparcamiento da lugar a la posibilidad de prestaciones complementarias de intercambio energético con el terreno, que aplicadas al acondicionamiento térmico del Salón de Isabel II potenciarán su uso y generarán la posibilidad de revitalizar con actividades ciudadanas esta zona de la ciudad, incluso en los meses más duros del año.

Hay varios factores básicos de interés para plantear en este ámbito de Segovia esta solución, todos relacionados con las condiciones del medio:

- El primero procede de la propia climatología de Segovia. La temperatura media anual es de 11,9 ºC, y durante un periodo entre 5 y 6 meses al año las temperaturas son significativamente inferiores a la media anual, con temperaturas medias bajas, y mínimas muy bajas, entre los meses de noviembre y marzo.
- El segundo es que por su orientación y configuración el Salón constituye un espacio soleado y resguardado, donde las personas pueden, incluso en invierno, disfrutar de actividades al aire libre si se modera la absorción de energía desde la masa fría del suelo.
- El tercero es que las características geológicas del terreno son propicias a la acumulación de calor en los estratos rocosos inmediatamente inferiores a los rellenos que configuran la plataforma del Salón y el talud que lo sustenta. Se trata de estratos rocosos compactos y con buena conductividad, que permiten acumular calor en verano y extraerlo en invierno con efectividad, con un intercambiador geotérmico. La temperatura del terreno en estos estratos que se encuentran a una profundidad variable de entre 5 y 10 m bajo los estratos superiores de rellenos, está en torno a los 12 ºC a lo largo de todo el año, en estado de reposo.

Las condiciones de partida son favorables. En este contexto climático y de ubicación, un terreno con estas características reaccionará favorablemente a la recarga térmica durante los meses más cálidos del año y partiendo de una temperatura del terreno varios grados superior a la media anual en el mes de septiembre, entre 15 ºC y 19 ºC podrá ceder energía al sistema de intercambio geotérmico y a los dispositivos de atemperamiento instalados bajo los pavimentos del Salón para mantener en el suelo temperaturas moderadas en torno a los 10 ºC.

El proyecto plantea la integración de un sistema de geotermia con recirculación directa integrado en las pantallas de micropilotes del aparcamiento. Se trata de una pantalla discontinua de perfil y profundidad variable que en un 70 % de su superficie está en contacto con los estratos rocosos del subsuelo. Los micropilotes están dotados de circuitos cerrados de tubería de polietileno e inyectados con mortero conductor de adecuada resistencia estructural. Se trata de aproximadamente 2.000 m de pantalla termoactiva con una potencia estimada de

intercambio en torno a 25 / 30 kW. Los circuitos de los micropilotes se recogen por secciones, mediante redes horizontales de tubería integradas en la cabeza de los muros y se conducen a los colectores de cada sección que están conectados a los circuitos horizontales construidos bajo el Salón, con la intermediación de bombas de recirculación alojadas junto a los colectores en una arqueta enterrada en cada sector.

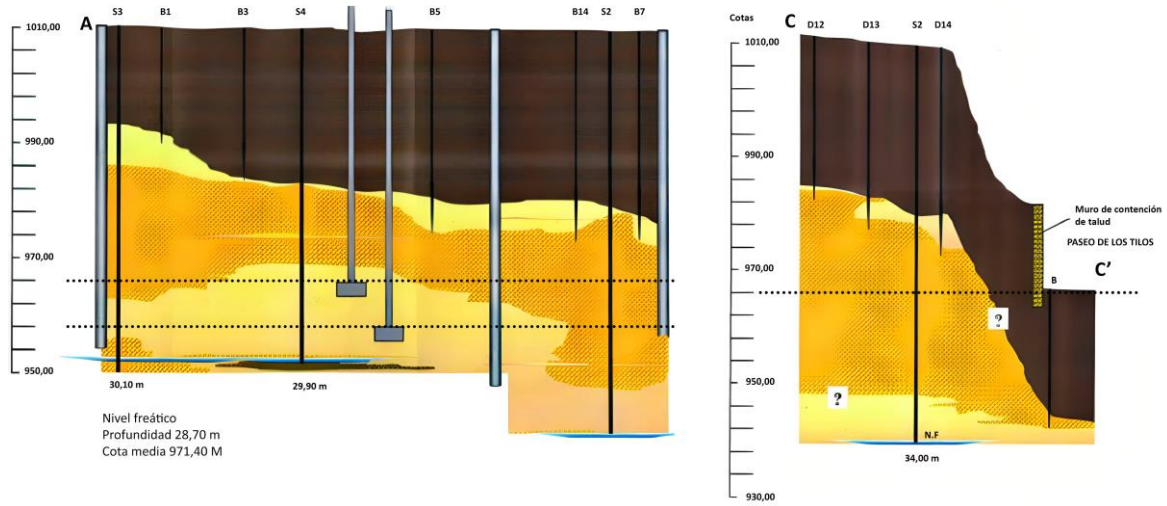


Figura 4-20. Perfiles estratigráficos el Salón de Isabel II y el talud que lo sustenta. Se aprecia claramente el perfil de los estratos rocosos de la colina y los niveles de rellenos que configuran el perfil del talud y el paseo actual.
Fuente: Sistemas Avanzados Sostenibles.

Los circuitos para el atemperamiento del Salón se construyen bajo los niveles del pavimento, se trata de circuitos cerrados de tubería de polietileno reticulado embebidos en una solera de hormigón. Los circuitos actuaran como dispositivo disipador de la energía extraída del terreno durante los cinco meses más fríos del año y como dispositivo absorbedor de energía durante los cuatro meses más cálidos. La energía disipada en el suelo del Salón procede de los estratos rocosos y acumuladores del terreno, que alternativamente acumulan la energía absorbida en el Salón durante los meses cálidos. El sistema de intercambio geotérmico utiliza el subsuelo del Salón como acumulador y el régimen de funcionamiento, cesión y acumulación de energía se controla a través de la recirculación de agua. Un sencillo campo de sensores de temperatura del agua procedente del terreno, y del pavimento ubicados en los colectores y de la temperatura ambiente del Salón permitirá al control de funcionamiento para aprovechar en cada momento del año, acumular o ceder energía en el terreno para optimizar las posibilidades de este

recurso y lograr las condiciones de confort que permitan un uso continuado del Salón de Isabel II a lo largo del año.

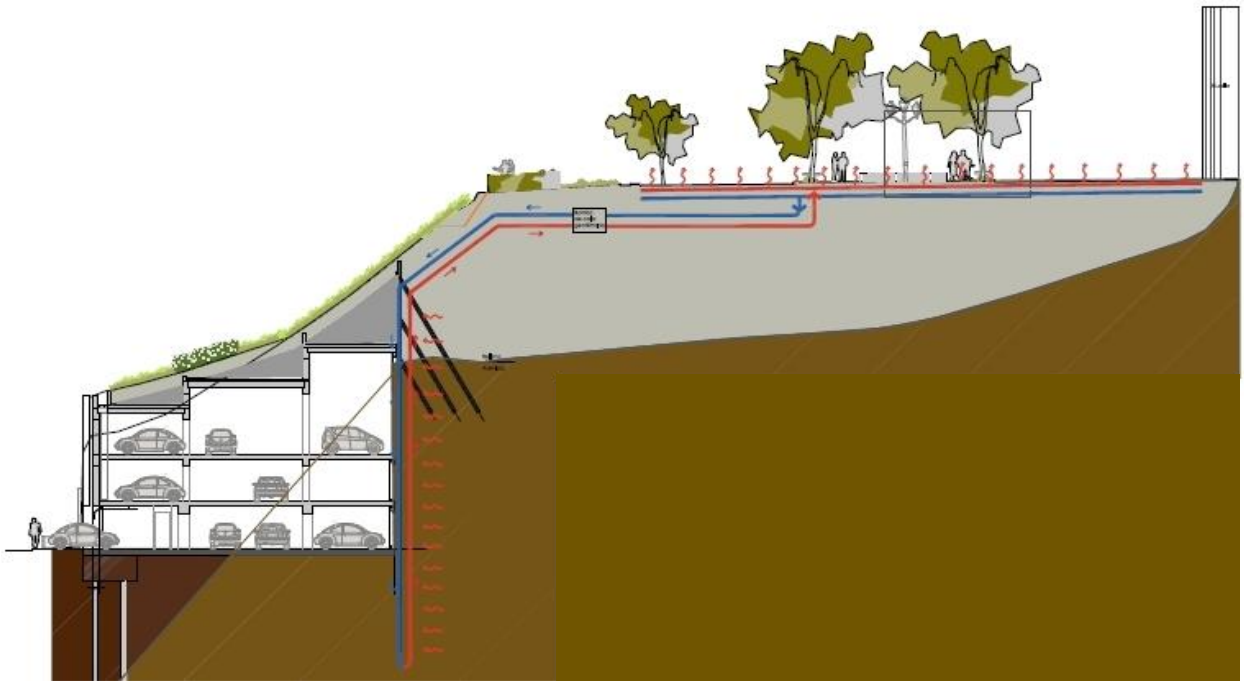


Figura 4-21. Esquema del sistema de intercambio geotérmico integrado en la pantalla de micropilotes del aparcamiento que alimenta los circuitos de atemperado del pavimento del Salón de Isabel II. Sistema de aprovechamiento geotérmico directo mediante recirculación de agua. Fuente: Instituto Europeo de Innovación.

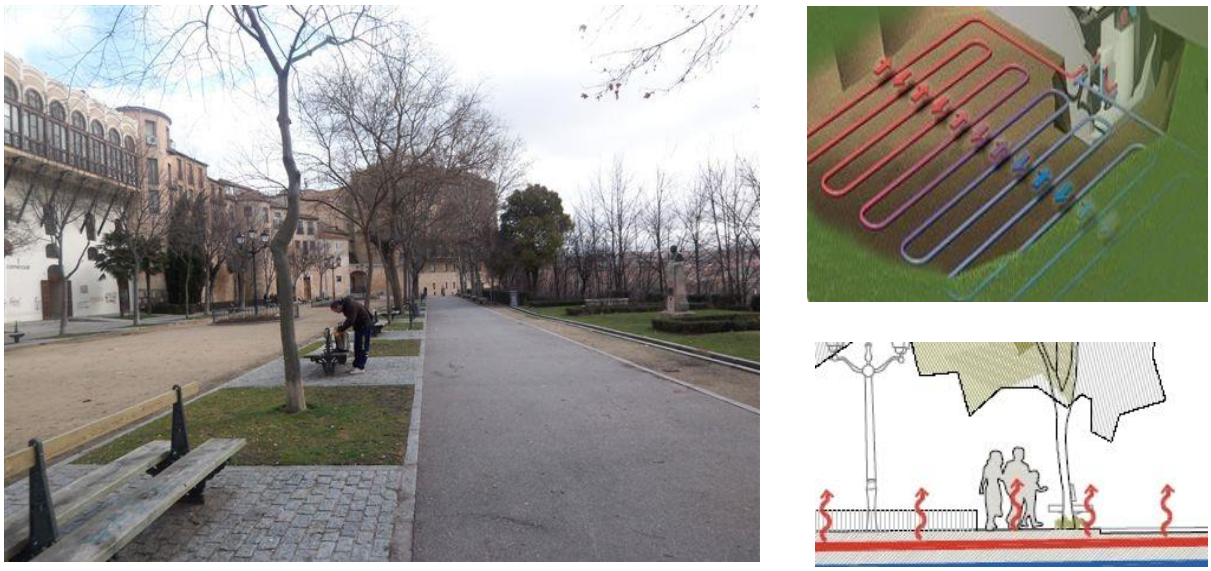


Figura 4-22. Detalle de los circuitos de atemperado del pavimento integrados en la solera de base.
Fuente: Instituto Europeo de Innovación.

4.3. Intercambio de energía con redes de agua residual y redes de distribución de agua

Al realizar actividades con agua como ducharse, lavar o cocinar, se liberan grandes cantidades de agua caliente al sistema de alcantarillado, el cual es una fuente de energía de baja calidad que se puede utilizar para calentar los edificios sin costo adicional.

Existe la capacidad, la tecnología y la técnica para llevar a cabo este proceso: utilizando bombas de calor, es posible intercambiar energía con el agua residual y proporcionar calor, calefacción y agua caliente sanitaria, o extraer calor para refrigerar edificios y producir agua fría, sin generar emisiones de CO_2 u otros gases y sustancias nocivas.

Las instalaciones presentan una rentabilidad significativa, ya que cuentan con una gran disponibilidad de materia prima que se encuentra distribuida en las redes subterráneas que atraviesan nuestro entorno urbano.

Ayudar al avance de la implementación de esta técnica también beneficia a nuestra economía, ya que es una fuente de suministro local y distribuido, segura y rentable a largo plazo. Además, está enfocada en el desarrollo local y tiene un impacto mínimo en el medio ambiente, los recursos materiales y energéticos, la salud humana y los ecosistemas durante todo su ciclo de vida.

Al desarrollar esta vía, se logra completar el ciclo de recuperación de la energía desperdiciada, aportando de manera importante a los objetivos de política energética y medioambiental de nuestra región y país. En la mayoría de las localidades, existen sistemas de recolección y traslado de aguas residuales que poseen la capacidad de generar energía, así como edificios adecuados para aprovechar dicha energía recuperada de estas aguas residuales.

En el territorio español, se registra la presencia de energía en las aguas residuales capaz de generar calor para más de 1.800.000 hogares. En nuestro país, muchos

edificios se utilizan para implementar sistemas de climatización mediante el aprovechamiento de las aguas residuales.

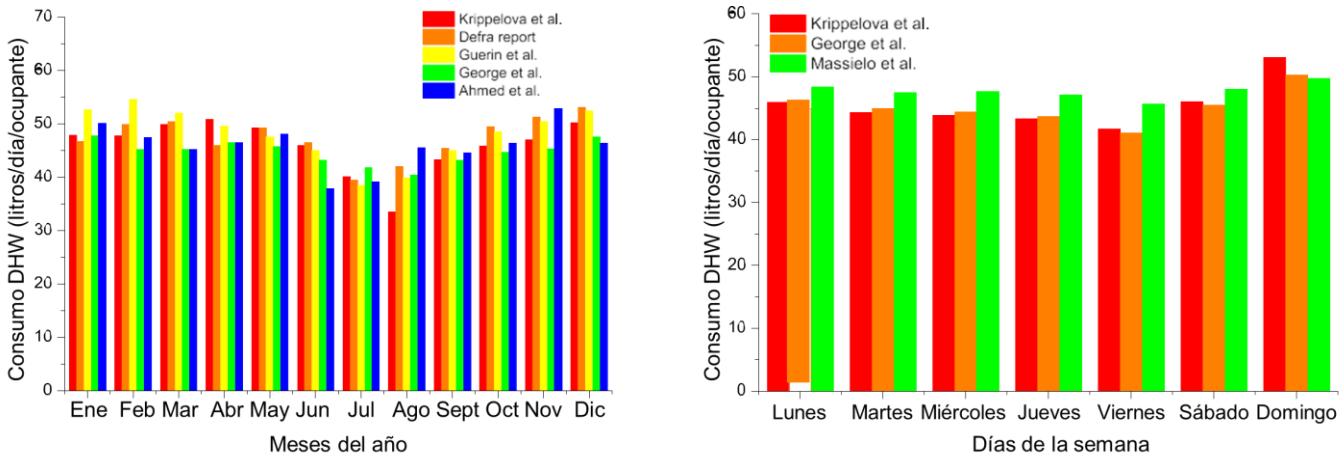


Figura 4-23. Estadísticas de consumo de agua caliente en Europa [54].

Varios estudios han evidenciado cómo el promedio por persona de Consumo Diario de Agua Caliente, o su término en inglés Domestic Hot Water Usage (DHW)en hogares puede variar según el mes del año. En promedio, las viviendas consumen alrededor de 120 litros de agua caliente al día, considerando que hay una media de 2,5 personas por hogar. Según diversos estudios en residencias, se ha observado que el día de la semana tiene un impacto en la cantidad promedio de agua caliente consumida por persona diariamente [54].

Estos sistemas pueden ser instalados en edificios administrativos, urbanizaciones, edificios comerciales, instituciones de salud y atención social, escuelas, así como en centros y espacios deportivos. Las circunstancias son especialmente propicias en comunidades residenciales grandes o vecindarios con un alto consumo de calor, y que se encuentran cerca de grandes conductos de desagüe y eliminación de aguas residuales, o de instalaciones de tratamiento y purificación.

4.3.1. Captación de energía térmica de bajo grado en las aguas residuales

El agua residual posee una considerable cantidad de energía debido a las variaciones de temperatura que oscilan entre 10 y 20 °C a lo largo del año. Durante la temporada de invierno, es evidente que la temperatura en el interior es más alta que en el ambiente exterior, lo que permite una oportunidad para aprovechar y recuperar el calor. En la época estival, sucede lo opuesto y los edificios pueden ser enfriados utilizando este recurso. La tecnología utilizada para aprovechar el calor de estas aguas es simple, está bajo control y se preocupa por el medio ambiente. El núcleo del dispositivo se compone de un sistema de transferencia de calor que

captura la energía procedente del agua residual y una bomba de calor encargada de regular la temperatura de los edificios.

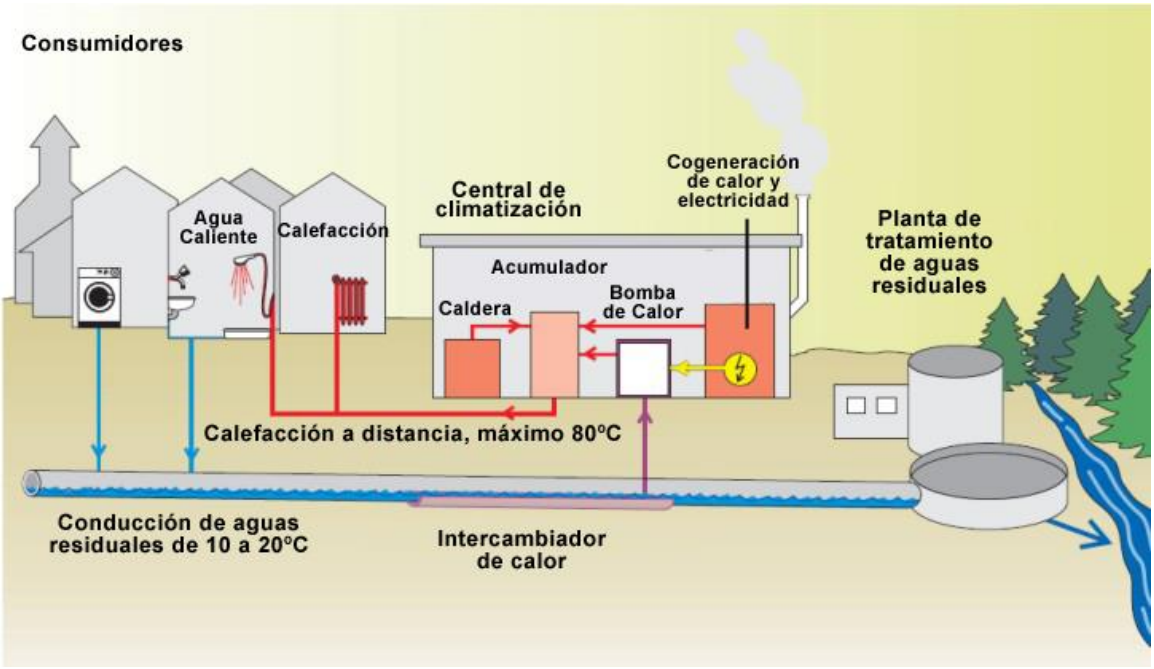


Figura 4-24. Esquema de la implantación de una instalación de intercambio para una instalación centralizada de climatización.
Fuente: EnergieInnovation

Si las instalaciones de intercambio de calor con las aguas residuales son correctamente diseñadas, implementadas y operadas, no causarán ningún problema en el funcionamiento de las canalizaciones y estaciones de depuración, ni representarán un riesgo para la calidad del agua. En Suiza, se han establecido reglamentos por parte de la Asociación Suiza Protección de las Aguas, o su nombre alemán Verband Schweizer Abwasser (VSA) y se han llevado a cabo investigaciones por parte del Instituto Federal Suizo para la Ciencia y Tecnología Acuática, o su nombre en alemán Eidgenössische Anstalt für Wasserversorgung, Abwasserreinigung und Gewässerschutz (EAWAG), para confirmar la importancia de este tema.

La recuperación y la transferencia de energía térmica

En los edificios, se colocan sistemas de bombas de calor para elevar la temperatura del agua y regular la temperatura ambiente utilizando la energía obtenida de las aguas residuales. Estas bombas de calor tienen la capacidad de proporcionar energía a múltiples edificios a una distancia determinada, dentro de un sistema de calefacción central. El rendimiento de las instalaciones mejora debido al uso de

una temperatura de distribución más baja. Durante la temporada estival, también es posible emplear la energía proveniente de las aguas residuales con el fin de enfriar. El funcionamiento de la bomba de calor es contrario al de un refrigerador. En ocasiones, no es preciso activar la bomba de calor para enfriar, siempre y cuando el sistema de aire acondicionado esté diseñado para ello. En su lugar, se puede aprovechar la frescura natural de las aguas residuales utilizando un intercambiador de calor.

La bomba de calor es un dispositivo utilizado para transferir calor de un lugar a otro, con el fin de calentar o enfriar un espacio.

La temperatura de las aguas residuales no alcanza los niveles necesarios para ser utilizada de manera directa. La bomba de calor es necesaria para ajustar la temperatura a un nivel adecuado para su uso. Las bombas de calor que utilizan el agua residual pueden generar temperaturas de 5 ºC a 70 ºC para su uso. Sin embargo, se obtienen mejores resultados al conectar el sistema a dispositivos de climatización con temperaturas más moderadas, lo que permite que las bombas funcionen entre 15 ºC y 35 ºC. En toda la instalación de climatización, se logran coeficientes de rendimiento (COP) globales de entre 4 y 4,5.

Los edificios que han sido renovados o construidos recientemente, y que cuentan con un aislamiento térmico efectivo y un sistema de calefacción por suelo radiante a baja temperatura, son especialmente eficientes al utilizar la climatización a través de una bomba de calor y el intercambio de energía con las aguas residuales.





Figura 4-25. Bombas de calor en una instalación de intercambio con aguas residuales. Intercambiador, de 200 m de longitud, de la instalación de Zurich-Wipkingen. Fuente: Enercret.

El intercambiador de calor

El intercambiador de calor es un dispositivo que permite transferir calor de un fluido a otro fluido sin que estos se mezclen entre sí. Además, no solo posibilita la recuperación de la energía térmica presente en las aguas residuales, sino que también garantiza una completa separación entre el sistema de aguas residuales y los dispositivos de climatización. No existe posibilidad alguna de que las aguas residuales se mezclen con el agua del sistema de climatización.

El intercambiador se coloca en la parte inferior del conducto de drenaje de aguas residuales o en la planta de tratamiento misma. En el primero, se aprovecha la energía de las aguas residuales sin procesar, mientras que en el segundo se intercambia energía con el agua tratada.

También es posible añadir intercambiadores de calor en las tuberías ya existentes o incorporarlos en secciones que necesiten ser reparadas o actualizadas. En la modernización de las infraestructuras de saneamiento, se están empleando cada vez con mayor frecuencia tuberías preconstruidas que incluyen sistemas de intercambio de calor integrados. Esta alternativa disminuye tanto el tiempo requerido para instalar como los gastos asociados.

4.3.1.1. Evaluar el potencial energético

En España, las redes de tuberías están altamente interconectadas. Esto aumenta las opciones de instalación ya que existen numerosos lugares propicios para aprovechar el calor de las aguas residuales. Antes de seleccionar una ubicación, se debe evaluar si la cantidad de agua disponible satisface los requisitos de la climatización. Existen algunas fórmulas sencillas que posibilitan la valoración del potencial energético y realización de una estimación numérica.

a) Identificar los sitios idóneos para llevar a cabo una instalación

En varios lugares, se pueden aprovechar la energía de las aguas residuales para su recuperación en estructuras con un elevado requerimiento de agua, en las tuberías de desagüe y en las instalaciones encargadas de tratar las aguas residuales.

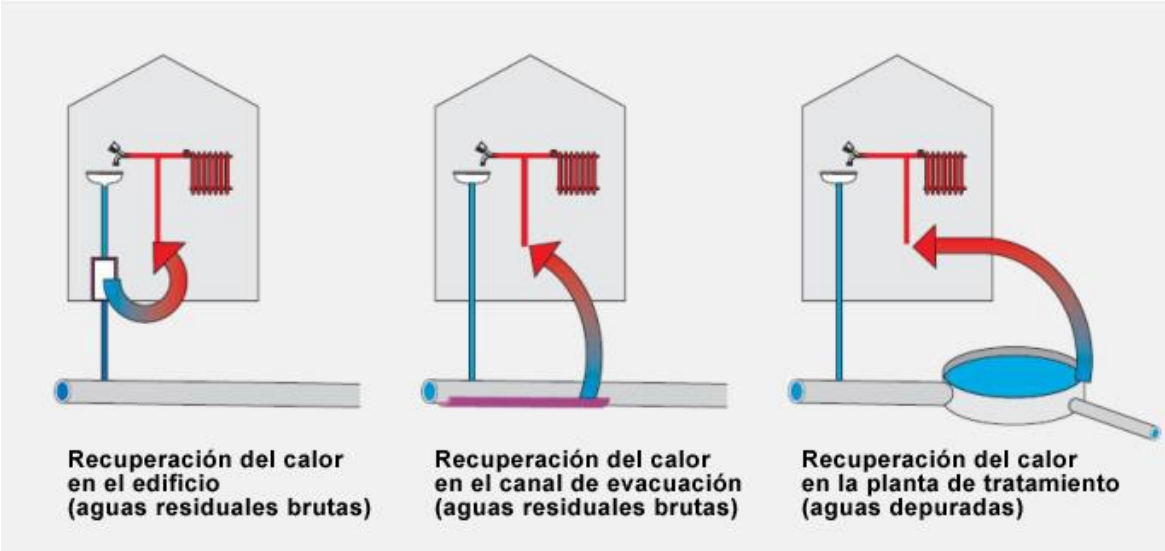


Figura 4-26. Posibles ubicaciones para la instalación de recuperación e intercambio de calor en la red de recolección y tratamiento de aguas residuales [55].

- Dentro de los edificios, se puede aprovechar el calor de las aguas residuales en aquellos lugares donde se utiliza una gran cantidad de agua de forma regular, como hospitales, hoteles, piscinas cubiertas y lavanderías. Con este fin, antes de ser descargadas en el sistema de alcantarillado, las aguas residuales se retienen en un tanque donde se aprovecha su calor. Esta técnica brinda la posibilidad de experimentar temperaturas elevadas, aunque demanda una limpieza regular del dispositivo de intercambio térmico.
- En los colectores de agua de gran tamaño, por lo general se cuenta con un caudal adecuado para aprovechar la energía. Este caso tiene el mayor potencial en España debido a que la mayoría de las grandes agrupaciones de edificios se encuentran en áreas que cuentan con una amplia infraestructura de alcantarillado.
- De los sistemas de tratamiento de aguas residuales que ofrecen la posibilidad de aprovechar el calor del agua depurada. El proceso de recuperación facilita la recuperación de frío de manera más sencilla y efectiva. Al contrario, frecuentemente la distancia es un factor limitante para aplicar las soluciones, ya que las plantas de tratamiento tienden a estar ubicadas lejos de las viviendas.

b) Determinar el volumen de agua y evaluar el potencial de intercambio de energía

Las siguientes fórmulas pueden ayudar a hacer una estimación preliminar de la cantidad de energía necesaria para calentar un edificio, un grupo de edificios, o un barrio, y el volumen de agua necesario para ello. La referencia es el flujo de agua

en verano, la estación más seca en su caso. La empresa gestora de la red de saneamiento, puede proporcionar este dato, sin problemas.

- Cantidad necesaria de aguas residuales:

  CAUDAL NECESARIO (l/s) = Potencia térmica requerida (kW) dividida por 32.

  El caudal medio diario en tiempo seco se toma como el valor de dimensionamiento. Por razones técnicas, el caudal en la canalización debe ser igual o superior a 15 l/s.

  La potencia térmica requerida es la necesaria para calentar el agua y alimentar los sistemas de climatización de los edificios.

- Potencial energético de una canalización de aguas residuales:

  POTENCIA MÁXIMA DE INTERCAMBIO (kW) = caudal medio diario en tiempo seco (l / s) multiplicado por 8.

Las fórmulas se basan en los siguientes supuestos:

- Enfriamiento medio en las aguas de la canalización, inducido por el intercambio de calor, 3 grados.
- Factor de seguridad: 0,64.
- Coeficiente de rendimiento (COP) de la bomba de calor: 4

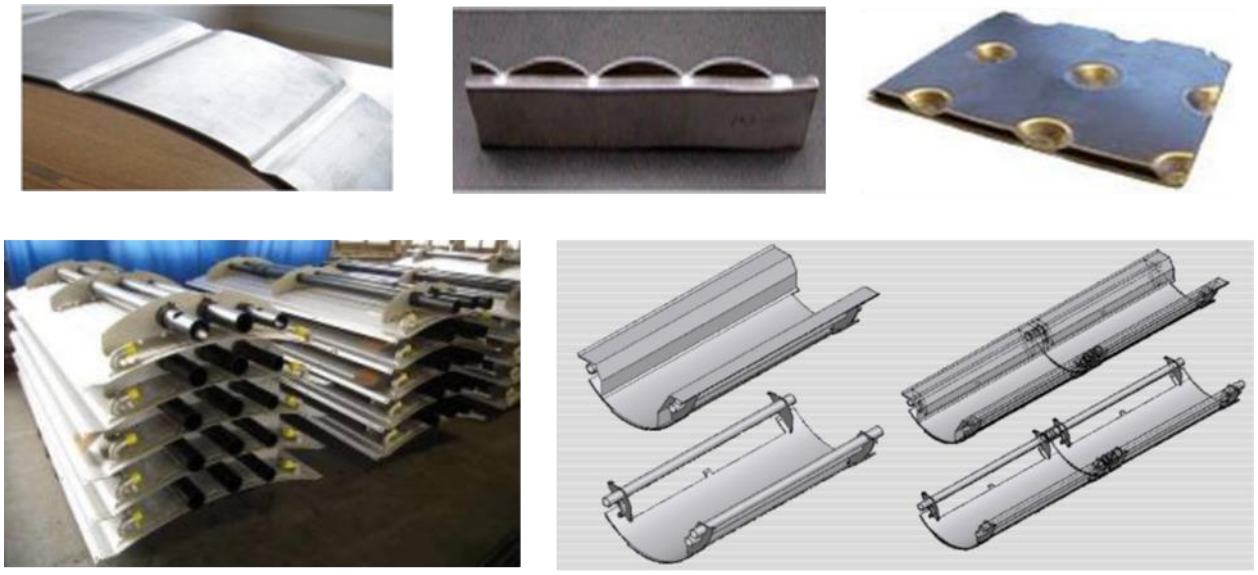


Figura 4-27. Distintas técnicas de fabricación, soldadura lineal, soldadura y soplado, y soldadura por puntos en la fabricación de intercambiadores de acero inoxidable. Construcción modular de las secciones, y ensamblaje.
Fuente: Enercret.

c) Diferentes técnicas de recuperación de calor

- Instalación de un intercambiador de calor en las canalizaciones: la mayoría de las bombas de calor utilizadas para recuperar energía de las aguas residuales emplean un intercambiador de calor que se encuentra instalado dentro de la galería del colector de aguas. Los intercambiadores de calor son diseñados para ser instalados en una tubería preexistente. La tubería debe tener un grosor mínimo de 80 cm, encontrarse en óptimas condiciones y haber estado en funcionamiento por un largo periodo de tiempo. Sin embargo, al enfrentarse al reemplazo o la construcción de una nueva tubería, se recomienda utilizar componentes de hormigón prefabricado que cuenten con un intercambiador de calor incorporado. En esta situación, se requiere que el diámetro de la tubería sea al menos de 50 cm. Existe una amplia variedad de soluciones disponibles para todas las secciones de tuberías.
- Instalación de un intercambiador de calor dentro de un bypass de una tubería: la construcción de un desvío en una tubería de aguas residuales presenta excelentes oportunidades y beneficios para la instalación de un intercambiador de calor. En la etapa de construcción, apenas se verá afectado el caudal de las aguas residuales. Además, no se requiere desviar las aguas residuales durante el proceso de construcción debido a la inexistencia de riesgos de inundación. En un tercer aspecto, se puede observar una clara distinción en el régimen de propiedad de la instalación. Finalmente, se puede calcular y mejorar el tamaño del intercambiador de calor y del conducto de desvío para ajustarse al flujo requerido.





Figura 4-28. Ejecución de las obras de instalación de intercambiadores. Instalado en un colector ovoide existente, e integrado en el hormigón un conducto de sección circular en una nueva construcción.
Fuente: Enercret.

d) Transporte de la energía hasta la instalación de climatización

El transporte de la energía hasta la instalación de climatización es un proceso que implica llevar la energía necesaria hasta el lugar donde se encuentra el sistema de climatización. Es necesario llevar la energía transferida desde la tubería o la planta de tratamiento de aguas residuales hasta el sistema de aire acondicionado, refrigeración o calefacción. Se consideran dos opciones:

- Sistema a un solo tubo. Este enfoque solo es válido para sistemas que utilizan agua ya procesada. En esta situación, se introduce el agua de manera directa en la bomba de calor, sin necesidad de hacer uso de un intercambiador de calor. Después de haberse aprovechado la energía en el evaporador, el agua es liberada en una tubería para recolectarla.
- Sistema a dos tubos. Si se desea aprovechar el calor de las aguas residuales sin tratar, es necesario asegurar una conexión segura entre la red de alcantarillado y el sistema de climatización. Para ello, se recomienda utilizar un circuito cerrado con dos tuberías, una para la entrada y otra para el retorno de agua. Para implementar esta solución se necesita una considerable inversión, sin embargo, también se obtienen beneficios como la facilidad para combinar diversas fuentes de calor, como aguas residuales, aguas subterráneas e intercambio de energía geotérmica. Además, se puede aprovechar la energía residual de actividades industriales y realizar intercambios abiertos con acuíferos, entre otros recursos disponibles.

e) Mantenimiento del intercambiador de calor

El mantenimiento del intercambiador de calor es de vital importancia para garantizar su adecuado funcionamiento. Con el paso del tiempo, el intercambiador de calor acumula suciedad y residuos que afectan su capacidad de transferir calor de manera eficiente. Por esta razón, es necesario llevar a cabo una limpieza periódica del intercambiador de calor. Durante el proceso de limpieza, se remueven los depósitos de suciedad y se eliminan los residuos acumulados en las superficies del intercambiador de calor. Esto se puede realizar utilizando métodos como la limpieza con agua a presión, la aplicación de productos químicos específicos o la utilización de cepillos especiales. Es importante destacar que la limpieza del intercambiador de calor debe ser realizada por personal especializado, ya que se requiere conocimiento y experiencia para garantizar un correcto procedimiento. Además, es necesario tomar precauciones adicionales para evitar daños en las

delicadas superficies del intercambiador de calor. En conclusión, la limpieza regular del intercambiador de calor es esencial para mantener su eficiencia y prolongar su vida útil. Este mantenimiento preventivo ayuda a evitar problemas como la obstrucción de los conductos de transferencia de calor y la disminución en la capacidad de intercambio térmico. Por tanto, es fundamental contar con un plan de mantenimiento adecuado para garantizar un funcionamiento óptimo del intercambiador de calor.

Al dimensionar el intercambiador de calor, es importante considerar el acúmulo de suciedad que se crea con el paso del tiempo en la superficie interna, lo cual disminuye su eficiencia en la transferencia de calor. Existen dos opciones para resolver este dilema: una opción consiste en realizar limpiezas regulares del intercambiador, dependiendo de la calidad de las aguas residuales empleadas. Dicho método posibilita reducir las pérdidas ocasionadas por la acumulación de suciedad, sin embargo, demanda un mantenimiento de elevado costo. Una alternativa adicional es seleccionar un intercambiador de calor que no se vea afectado de forma negativa por la contaminación, evitando así que su eficiencia se vea comprometida y asegurando un desempeño óptimo del sistema. La mayoría de las veces, se requiere una inversión inicial considerable en este tipo de intercambiador. Independientemente de la opción seleccionada, se debe considerar tanto los gastos durante todo el ciclo de vida de la instalación como la pureza del agua.

4.3.1.2. Producción y utilización de la energía

La clave para aprovechar la energía de las aguas residuales es la bomba de calor. Ella permite aprovechar y utilizar la energía para calentar o enfriar el agua y las construcciones. Las bombas de calor tienen la capacidad de generar agua a una temperatura de hasta 65 °C. En algunos casos, se combinan con calderas de gas o dispositivos de producción de calor y electricidad para lograr temperaturas más altas o mejorar su rendimiento. Durante la temporada de verano, es posible emplear las bombas de calor como dispositivos de enfriamiento en los sistemas de refrigeración.

a) Alternativa número 1: utilización exclusiva de bombas de calor al 100%

La forma en que se diseñe una instalación de calefacción utilizando aguas residuales se basa principalmente en los objetivos establecidos. Si se pretende

aprovechar al máximo la energía de las aguas residuales y evitar la utilización de combustibles fósiles, será necesario que la bomba de calor sea la única fuente de calor. Así es como funciona en un solo modo. Para modificar la potencia de calor, simplemente se puede utilizar conjuntos de 2 a 4 compresores o conectar múltiples bombas de calor en paralelo. Los grupos se conectan de forma escalonada para adaptarse con precisión a la demanda de operación. Las instalaciones monovalentes presentan índices de rendimiento anual más bajos en comparación con otros sistemas y demandan grandes volúmenes de agua para su funcionamiento.

b) Alternativa número 2: utilización de una caldera para satisfacer las necesidades de mayor consumo

En áreas con bajas temperaturas, algunas instalaciones de calentamiento de agua residual combinan el uso de una bomba de calor y una caldera, tanto para asegurar la garantía como para mejorar el rendimiento del suministro. A este método de funcionamiento se le conoce como bivalente. Este aparato asegura el suministro de energía incluso en situaciones donde no se cuenta con el calor proveniente de la red de saneamiento de agua debido a cualquier circunstancia. Durante el funcionamiento común, la caldera solo se enciende cuando hay un pico de demanda.

La bomba de calor elimina la necesidad de utilizar una caldera para cubrir toda la demanda de energía base, lo que facilita el manejo durante períodos de alta demanda. Esto se refleja en una mejora en la eficiencia de la bomba de calor y en una inversión más baja en comparación con la solución 1, que es monovalente. A pesar de ello, la proporción de energía obtenida del agua residual es ligeramente menor en comparación con un sistema de bomba de calor exclusivo.

c) Alternativa número 3: técnica combinada

La combinación de instalaciones de bomba de calor y producción de calor y electricidad es la manera más efectiva de obtener resultados óptimos en términos de eficiencia energética. Estas instalaciones generan tanto calor como electricidad para alimentar y hacer funcionar la bomba de calor. Si consideramos el proceso completo de producción de energía (generación de electricidad y consumo de calor en el edificio), esta opción se destaca por ser la más efectiva en términos de utilización de energía primaria. La operación versátil exige una inversión mayor, pero ofrece diversas ventajas, como la incorporación de la generación de energía eléctrica. Además, se pueden aprovechar distintas fuentes de calor que se

encuentran a disposición, como las aguas subterráneas, los sistemas de refrigeración, los procesos industriales, las emisiones de humo o las instalaciones de aire comprimido.

4.3.1.3. Refrigerar con aguas residuales

Gran cantidad de edificaciones que utilizan el calor recuperado de las tuberías de desechos también requieren emplear esta misma técnica para enfriar. Incluso durante la temporada de verano, las redes de agua residual mantienen una temperatura que no supera los 20 °C, lo cual podría ser aprovechado como una forma de enfriamiento para edificios. Esta solución ofrece una gran ventaja al aprovechar sinergias muy valiosas: los elementos principales empleados en la recuperación de calor (intercambiador de calor, circuito intermedio, y bomba de calor) también pueden emplearse para generar frío, sin necesidad de invertir en instalaciones adicionales. Existen tres opciones diferentes para generar enfriamiento a través del uso de aguas residuales:

- Generación de frío: con la producción de frío se genera un exceso de calor que se añade al agua residual utilizando tanto el circuito intermedio como el intercambiador de calor del colector de residuales. En la temporada estival, es común emplear este método de funcionamiento.
- Generación simultánea de frío y calor: el calor obtenido durante el proceso de producción de frío se aprovecha al mismo tiempo para la calefacción, en conjunción con la obtención de calor desde el agua residual. La utilización de esta solución resulta particularmente atractiva en aplicaciones tanto artesanales como industriales que demandan la generación de calor y frío al mismo tiempo. En otro escenario, es preciso impedir la generación de frío y calor al mismo tiempo, lo cual se asemejaría a la acción de frenar y acelerar un automóvil simultáneamente. Esto se logra mediante la transferencia de energía internamente dentro del edificio.
- Free cooling: en lugar de desechar el calor excedente, se aprovecha de forma gratuita utilizando un intercambiador de calor que lo transfiere al agua residual. Este sistema se utiliza cuando la temperatura de funcionamiento del sistema de enfriamiento del edificio es superior a la temperatura del agua residual. Esto ocurre en los sistemas inerciales, losas termoactivas, techos y vigas frías, así como en otros elementos constructivos que tienen la función de

refrescar. En esta situación, los resultados obtenidos son excepcionalmente elevados.

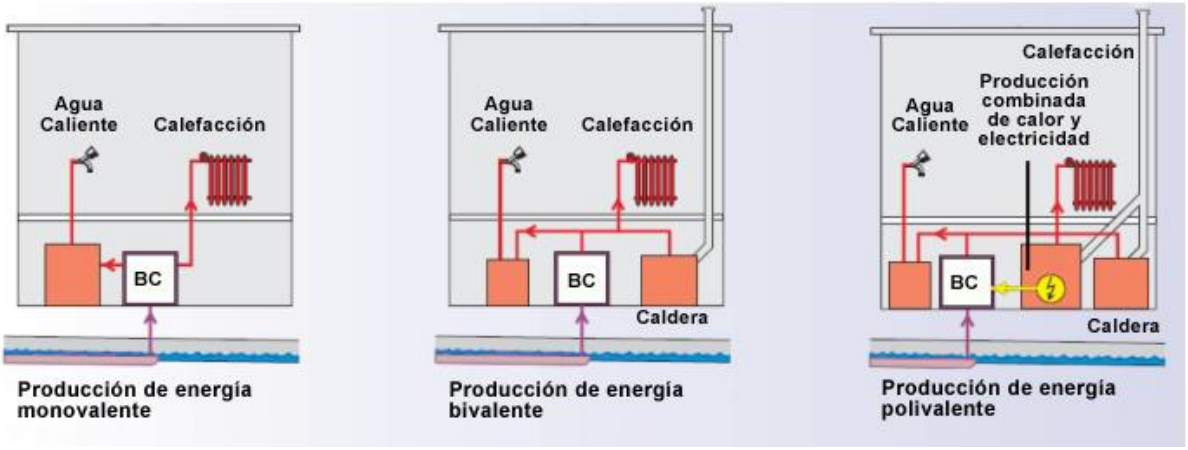


Figura 4-29. Ejecución de las obras de instalación de un intercambiador. Instalado en un colector ovoide existente, e integrado en el hormigón un conducto de sección circular en una nueva construcción.
Fuente: EnergieSchweiz.

4.3.1.4. Sistemas centralizados y descentralizados

Para competir con eficacia con los sistemas convencionales (calderas, máquinas refrigeración), los dispositivos de energía renovable deben alcanzar una eficiencia similar o incluso superior. Es fundamental que sean capaces de producir la misma cantidad de energía que los sistemas convencionales, pero de manera más limpia y sostenible. Además, deben ser competitivos en términos de costo para que las personas estén dispuestas a adoptarlos de forma masiva. Para lograr esto, es necesario invertir en investigación y desarrollo de tecnologías renovables, así como en la mejora de los procesos de producción y fabricación. También es importante contar con incentivos económicos y políticas adecuadas para fomentar la adopción de energías renovables. Solo de esta manera podremos hacer frente al desafío del cambio climático y alcanzar una transición exitosa hacia un futuro más sostenible.

Para que las plantas de recuperación de energía de aguas residuales sean efectivas, es necesario que tengan un tamaño apropiado. Frecuentemente, los requerimientos de un edificio solitario no son adecuados para garantizar un funcionamiento rentable de una bomba de calor. En esta situación, es necesario tener en cuenta un sistema de climatización colectiva que satisfaga las demandas de diversos edificios. La elección que se debe hacer es si se elige un diseño con una unidad central o con múltiples unidades descentralizadas.

La elección se ve influenciada de manera significativa por los factores que se mencionan a continuación:

- La separación entre los consumidores.
- La cantidad de espacio disponible para la instalación.
- La integración con los sistemas ya existentes, como la caldera, el alcantarillado y el suministro de agua.
- El proceso de calentamiento o enfriamiento del agua.
- Las variadas necesidades térmicas según el uso requerido.
- Las interacciones entre los propietarios.
- El financiamiento y el modelo de operación.

4.3.1.5. Energía de bajo grado y red a baja temperatura

a) Red a baja temperatura

La energía se genera de manera descentralizada a través de múltiples unidades dentro de un sistema interconectado. El líquido se transporta a una temperatura fría, oscilando entre los 8 y los 15 grados Celsius. El uso de esta solución es comúnmente aplicado cuando hay una considerable separación entre el punto de generación de energía (como un conducto de saneamiento o una planta de tratamiento de aguas residuales) y los usuarios finales. Las ventajas que presenta son las siguientes:

- Disminución de la fuga de calor.
- Posibilidad de emplear tuberías de materiales sintéticos sin aislamiento, lo cual resulta en una opción más económica.
- Posibilidad de uso a distancias que superan el 1 km.
- Consideración de las diversas temperaturas requeridas por los consumidores en función de sus necesidades.
- Posibilidad de realizar la ejecución por etapas..

b) Red a alta temperatura

La red de altas temperaturas se refiere a un sistema en el que se distribuye energía térmica a una temperatura elevada. Este tipo de red es utilizada para suministrar

calor a diferentes instalaciones, como industrial, residencial y comercial, con el objetivo de satisfacer sus necesidades de calefacción y agua caliente sanitaria. Asimismo, la red de altas temperaturas se caracteriza por utilizar fuentes de energía renovable o no renovable, dependiendo de la disponibilidad y la infraestructura existente en cada lugar. Esta red es considerada una alternativa eficiente en comparación con sistemas individuales de calefacción, ya que permite aprovechar la sinergia entre diferentes consumidores y optimizar el uso de energía.

El calor se origina en una ubicación específica y se transfiere a altas temperaturas (entre 65 y 80 °C) a diferentes usuarios. Es necesario invertir una cantidad significativa en el aislamiento de los conductos. Este sistema se utiliza mayormente cuando los consumidores se encuentran en proximidad uno del otro. Las ventajas que presenta son las siguientes:

- Simplificación del mantenimiento y servicio mediante la centralización.
- Facilita la producción combinada de calor y electricidad.
- Simplificación de las condiciones de contratación.
- Inversión económica en una sola caldera de gran tamaño, que requiere menos recursos que invertir en varias unidades pequeñas.
- Disminución del espacio necesario para instalaciones técnicas en los edificios.

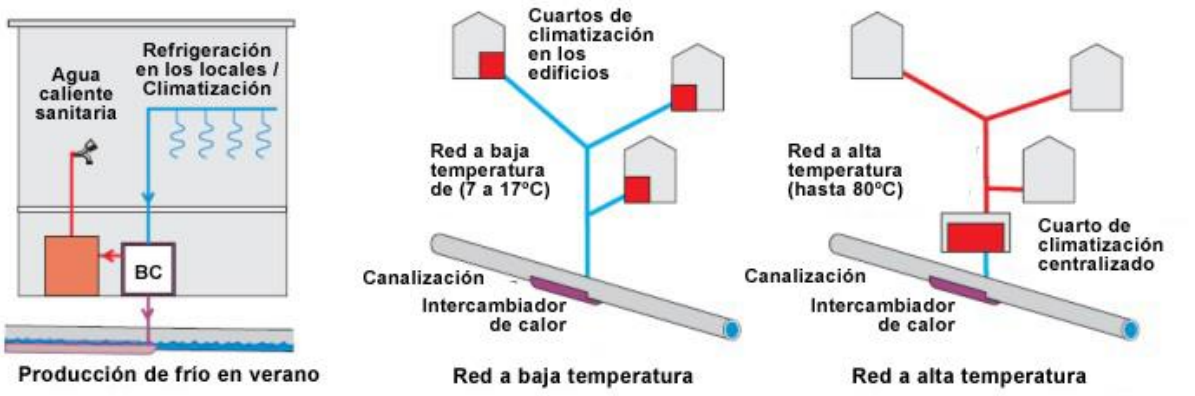


Figura 4-30. Ejecución de las obras de instalación de intercambiadores: instalado en un colector ovoide existente, e integrado en el hormigón un conducto de sección circular en una nueva construcción.
Fuente: EnergieSchweiz.

4.3.1.6. Los edificios y la recuperación de energía de las aguas residuales

Las bombas de calor que aprovechan la energía de las aguas residuales son ideales para su uso en complejos de gran tamaño y sistemas de climatización en comunidad. Estas calderas son especialmente adecuadas para proveer calefacción a edificios de apartamentos, conjuntos urbanos, establecimientos comerciales, colegios, instalaciones médicas, complejos deportivos y áreas acuáticas. No obstante, no resultan ser la opción ideal para casas unifamiliares o para clientes que necesiten calor industrial.

Para que una instalación de recuperación de calor resulte lucrativa, es fundamental contar con una potencia mínima de aproximadamente 100 kW y estar en proximidad de una planta de aguas residuales o de una red de alcantarillado en uso.

a) Exigencias de las construcciones de edificios

Las instalaciones de intercambio de calor con aguas residuales se adaptan tanto a edificios nuevos como a los edificios que ya están construidos. El nuevo edificio facilita una integración más sencilla y económica de los sistemas de bomba de calor, tanto en la sala de máquinas como en las canalizaciones de saneamiento. Es importante tomar en consideración la ubicación de las redes de aguas residuales al construir edificios que se encuentren en áreas urbanas ya desarrolladas. Tanto en uno como en otro caso, la captación de la energía de las aguas residuales deberá satisfacer los siguientes requisitos:

Potencia térmica: es importante para aquellos edificios o conjuntos que necesitan al menos 100 kilovatios (kW) de energía térmica. Los sistemas de bombas de calor pueden aprovechar las aguas residuales como fuente de energía en esta situación. Este nivel de energía es equivalente a aproximadamente la cantidad necesaria para abastecer a cincuenta apartamentos.

Cercanía a una canalización de saneamiento: cuanto más cerca se encuentre un edificio de una red de aguas residuales, más beneficioso será el intercambio de energía. En un contexto de construcción, se requiere que la distancia entre el edificio y la red sea de 100 a 300 m, teniendo en cuenta el consumo energético del edificio. En áreas sin construir, esta distancia puede aumentar aún más, llegando incluso a más de 1 km para instalaciones de gran tamaño.

La densidad de construcción: puede aumentar la rentabilidad de un sistema de climatización colectiva al aprovechar la energía residual de las aguas desechadas. La cercanía de los edificios que se benefician de esta instalación permite fusionar las instalaciones de aire acondicionado de varios edificios en un radio de 100 m.

Temperatura de funcionamiento: la eficiencia de las bombas de calor aumenta a medida que la temperatura de funcionamiento de los sistemas de climatización de los edificios disminuye. Los edificios modernos que tienen sistemas de calefacción de temperatura baja (llamados sistemas radiantes) son ideales para aprovechar el calor del agua que se desecha..

Consumo habitual: la constancia en el consumo de agua (mantener el uso de calefacción doméstica durante todo el año y sin disminuir su uso los fines de semana) asegura que las bombas de calor funcionen de manera constante y aumente su eficiencia económica.

Refrigeración: el uso de las aguas residuales para la refrigeración es una opción viable en el campo de la refrigeración. La bomba de calor cuenta con un ciclo de operación reversible que le permite funcionar tanto como un dispositivo de enfriamiento como de calefacción al disipar calor en la red de saneamiento. En España, donde el sistema operativo regularmente incluye tanto calefacción como refrigeración, este método de operación contribuye significativamente a mejorar la eficiencia del sistema.

b) Estado de las tuberías de la red de alcantarillado

La rentabilidad de aprovechar las instalaciones de intercambio de calor con aguas residuales no solo depende de las características de los edificios conectados, sino también de las condiciones de la fuente de calor, como las tuberías de la red.

A continuación se presentan los requisitos necesarios para las canalizaciones donde se llevará a cabo el intercambio:

Caudal: es necesario tener un flujo mínimo de 15 litros por segundo (que es el promedio en la temporada seca) para poder aprovechar el calor de las aguas residuales, debido a factores técnicos y económicos.

Temperatura de las aguas residuales: la temperatura de las aguas residuales es considerada adecuada cuando supera los 10 ºC. En términos generales, a lo largo del año se puede observar un rango de temperaturas que va desde los 10 ºC en las áreas más frías, hasta los 25 ºC en las regiones más calurosas. En la ciudad de Madrid, las temperaturas varían entre los 13 ºC y los 22 ºC.

El tamaño y la sección: el intercambiador de calor requiere una tubería de aguas residuales con un diámetro mínimo de 80 cm para su instalación, considerando el tamaño y la sección de la misma. No obstante, no existen restricciones en relación a la geometría y estructura de la sección, pudiendo ser circular, rectangular, ovalada o en forma de ojiva.

Perfil longitudinal: resulta más sencillo instalar un intercambiador en una tubería de agua residual que no tenga curvas en su perfil longitudinal. Sería óptimo contar con segmentos rectos de al menos 20 m, o incluso 100 m para instalaciones de mayor envergadura.

Acceso: tener un acceso cómodo a la tubería disminuye los gastos relacionados con la instalación y cuidado del intercambiador de calor.

Conexión con la caldera o el sistema de climatización: la conexión entre la caldera o el sistema de climatización y el intercambiador de calor ubicado en el sistema de saneamiento, así como la bomba de calor instalada en la sala de climatización, puede tener un efecto significativo en el costo total. Utilizar una vía preexistente o transitar por un terreno no desarrollado disminuye el costo de inversión.

Edad del conducto: a medida que un conducto envejece y necesita ser sustituido o renovado, se aconseja encarecidamente instalar un intercambiador de calor de aguas residuales. En esta situación, definitivamente es más beneficioso llevar a cabo la instalación de un intercambiador de calor.

c) Autorización

El acuerdo con el gestor de la red de alcantarillado es esencial en todos los casos para aprovechar el calor de un colector o una instalación de tratamiento. Efectivamente, la utilización de calor recuperado implica enfriar el agua residual utilizando agua, lo cual podría impactar en el proceso de tratamiento del agua. Antes de otorgar la autorización de construcción, es crucial tener en cuenta este aspecto. Además, no es necesario que la operación, el mantenimiento y la limpieza de la tubería utilizada sufran consecuencias negativas. Es fundamental considerar con anticipación la planificación de este tipo de instalación, de manera que se pueda tener el tiempo necesario para comunicarse con el proveedor.

d) Los datos relativos a la red de aguas residuales

¿De qué manera puede el promotor obtener información sobre las características del sistema de alcantarillado? El responsable de la red, que usualmente son los

Ayuntamientos y las compañías relacionadas con la ciudad, es con quien hay que comunicarse. En la mayoría de los casos, la responsabilidad de las aguas residuales recae en los organismos encargados de infraestructuras y obras públicas. El promotor también tiene la opción de obtener información de los administradores de las plantas de tratamiento. Sin embargo, es importante mencionar que tanto en Madrid como en España no se han previsto medidas para atender las solicitudes de los promotores en este tema, por lo que es fundamental crear una metodología de trabajo y gestión para poder hacerlo.

4.3.1.7. La reducción del impacto

La utilización de energía proveniente de aguas residuales se presenta como una opción atractiva tanto para los promotores y empresas que buscan la innovación, como para los municipios que buscan adoptar enfoques sostenibles en su desarrollo. En realidad, esta tecnología utiliza una fuente de energía inagotable, promueve la protección del entorno y presenta una eficiencia energética superior en comparación con el uso de gas, petróleo o aire acondicionado tradicional para acondicionar el ambiente. También existe una considerable reducción de las emisiones de gases tóxicos.

a) Mejora de la eficacia y rendimiento

Las bombas de calor que aprovechan el calor de las aguas residuales son altamente efectivas. El uso de energía primaria en comparación con la generación de energía práctica, como la instalación de agua caliente, es mucho menor en los sistemas de calefacción y refrigeración convencionales. Por poner un ejemplo, una bomba de calor que utiliza agua residual como fuente de energía consume un 40 % menos de energía primaria que un quemador de gas (Figura 4-31).

Además, la utilización de la energía de las aguas residuales presenta ventajas comparativas en relación a otros sistemas de bomba de calor, como el uso de aguas subterráneas o la geotermia. La explicación es simple: a lo largo de todo el año, las aguas residuales mantienen una temperatura favorable. Un sistema de recuperación de calor de aguas residuales puede alcanzar un alto coeficiente de rendimiento Anual (COP) siempre y cuando sea diseñado adecuadamente, superando el valor de 4. El coeficiente de actuación (COP) es la medida que evalúa la eficiencia de una bomba de calor. calorías adicionales se deben a otras fuentes de energía. Las aguas residuales aportan un calor adicional.

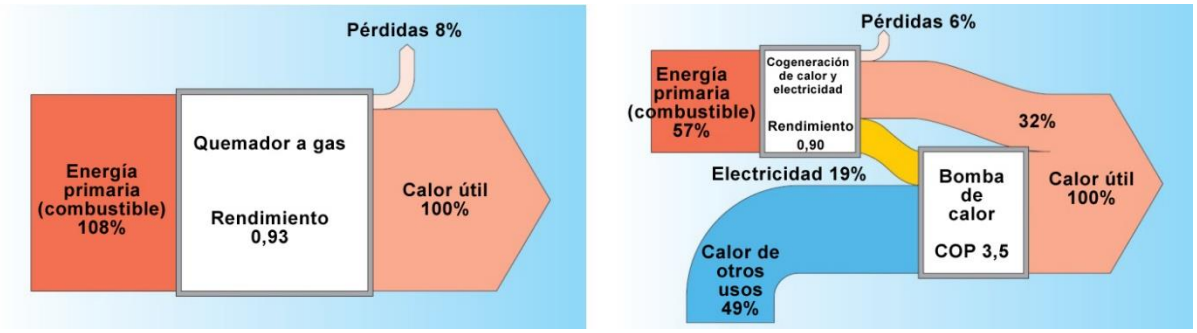


Figura 4-31. Comparación de la eficiencia energética.
Para producir la misma cantidad de calor (energía útil), una instalación de aguas residuales de recuperación de calor, con bomba el calor y producción combinada de calor y electricidad consume dos veces menos energía fósil que un sistema convencional.
Fuente: Enercret

b) Limpieza

Las instalaciones de reciclaje de calor de aguas residuales ofrecen la posibilidad de ahorrar energía y disminuir la huella ecológica. Disminuyen no solo la emisión de gases de efecto invernadero y óxido de nitrógeno, sino también el gasto total de combustibles fósiles. La combinación de una bomba de calor de ciclo reversible y un sistema de calefacción a gas permite reducir las emisiones de CO2 en casi 5 veces en comparación con una caldera de gasoil, al consumir potencias punta y utilizar la carga eléctrica generada en España. Si se utiliza gas natural para generar calor y electricidad que alimentan la bomba de calor, se puede reducir las emisiones en un 60% (Tabla 4.2). El balance ecológico de una bomba de calor para aprovechar el calor de las aguas residuales ha sido evaluado por el Departamento de Edificación del Cantón de Zúrich. Según el modelo Ecoindicator'99, se ha encontrado que esta evaluación integral arroja una puntuación 2.5 veces superior a la de una caldera de gas. Recuperar el calor de las aguas residuales ayuda a proteger el clima y a preservar la calidad del aire en nuestro entorno.

Calefacción gasóleo	100%
Calefacción gas	63%
Combinación de la bomba de calor CCF (1)	41%
Bomba de calor de ciclo reversible (2)	22%

Tabla 4.2. Comparación de las emisiones de CO_2 de los diferentes sistemas de energía.
Fuente: Enercret.

(1) La eficiencia de la cogeneración o el costo fijo de comercialización (CCF): el 35 % de la electricidad, el 55 % del calor, se distribuye la producción de calor de la siguiente manera: el 50 % por medio de una bomba de calor, el 30% por medio del CCF y el 20 % a través de una caldera de gas para satisfacer la demanda en momentos de alta demanda.

(2) El coeficiente anual de eficiencia de la bomba de calor es de 3,5. La distribución de la producción de calor se divide principalmente entre una bomba de calor, la cual representa aproximadamente el 80 % de la distribución total, y una caldera de gas que se utiliza para atender los momentos de mayor demanda, representando alrededor del 20 % restante. Criterios para evaluar la electricidad: combinación de los generadores suizos.

c) Producción limpia de calor por intercambio con el agua potable

Al igual que sucede con las aguas residuales, el agua potable tiene la capacidad de suministrar energía a las bombas de calor, lo que conlleva al calentamiento o refrigeración de los edificios. En realidad, la temperatura del agua apta para consumo durante cualquier época del año oscila entre 10 °C y 20 °C. La temperatura actual es ideal para poner en funcionamiento una bomba de calor. No obstante, en España todavía hay una gran cantidad de recursos potenciales de baja calidad que no han sido investigados en esta fuente de energía renovable.

4.3.2. Rentabilidad. Contemplar todos los costes

La utilización de energía proveniente de las aguas residuales para la climatización está ganando terreno en términos de competitividad, especialmente si se consideran todos los aspectos relacionados con los gastos económicos. Los beneficios de esta técnica van más allá de los aspectos ecológicos, ya que también ofrecen ventajas económicas debido a las condiciones favorables que brinda para la obtención de capital, así como los impulsos fiscales y financieros. Esta tecnología ayuda a disminuir los gastos adicionales relacionados con la generación de energía, lo cual resulta beneficioso para la economía en su totalidad.



Figura 4-32. Las instalaciones de recuperación de calor de las aguas residuales están formadas por componentes cuya vida útil puede llegar a los 50 años, como por ejemplo un intercambiador de calor.
Fuente: Enercret.

a) Ventajas competitivas

Las ventajas competitivas son aquellos atributos o características que distinguen a una empresa de sus competidores y le permiten obtener una posición destacada en el mercado. Estas ventajas pueden ser de diferentes tipos, como por ejemplo, innovación tecnológica, calidad de productos o servicios, costos más bajos, lealtad del cliente, entre otros. En resumen, son las fortalezas que hacen que una empresa sea exitosa y se destaque frente a sus competidores.

Las comparaciones entre los costos de los equipos de recuperación de calor de las aguas residuales y los sistemas tradicionales indican que, a pesar de una mayor inversión inicial y depreciación, se obtiene una compensación significativa en términos de costos operativos más bajos.

En ocasiones, los resultados son aún mejores si se consideran todos los beneficios económicos al evaluar los costos. Además de considerar el costo de capital y los gastos operativos reales, también se toman en consideración los siguientes factores:

- La depreciación de los intercambiadores de calor y las tuberías puede llegar a los 50 años de vida útil.
- El aumento de los costos de energía: a medida que los precios de la energía continúan en aumento, los propietarios pueden evitar los gastos adicionales de combustibles y energía, así como los impuestos ecológicos, aprovechando fuentes de energía renovables como la recuperación de calor de aguas residuales.
- El cumplimiento de las normativas: cumplir con las reglamentaciones de construcción y las calificaciones energéticas y medioambientales deseadas se logra mediante la utilización de bombas de calor y sistemas de recuperación de energía residuales eficientes.
- Las tasas preferenciales en los bancos: en Europa central, y es probable que pronto también en España, numerosos bancos ofrecen condiciones hipotecarias favorables para los inmuebles que utilizan fuentes de energía renovable.
- Los incentivos gubernamentales: las administraciones nacionales, regionales y locales otorgan ayudas económicas para impulsar la adopción de energías renovables.
- El ahorro energético y la protección del medio ambiente: la combinación de producción de calor y frío en las instalaciones de recuperación de energía del

agua residual permite ahorrar costes. Existe un gran potencial para ahorrar en la inversión y en los gastos de funcionamiento en comparación con los sistemas tradicionales. En términos de eficiencia energética y cuidado del clima, las instalaciones de recuperación de energía de las aguas residuales representan una valiosa contribución para numerosos municipios y empresas.

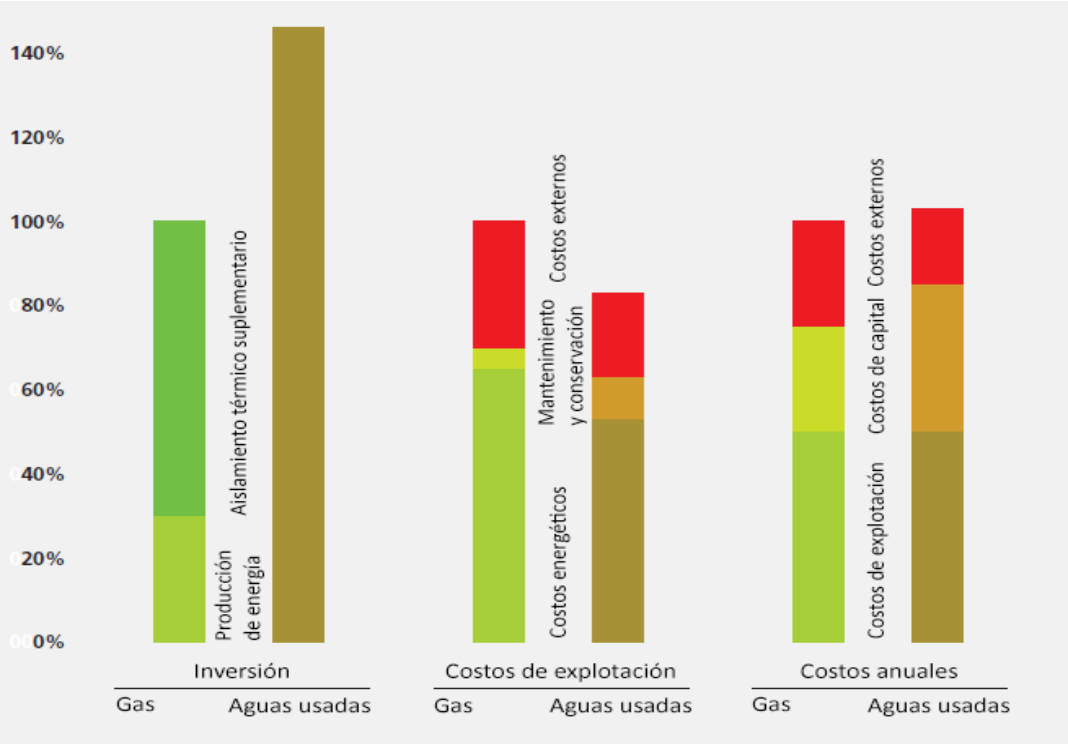


Figura 4-33. Comparación de costes en instalaciones de intercambio de aguas residuales y de calefacción de gas.
Fuente: Eneres

En la Figura 4-33 se presenta el resultado comúnmente obtenido al comparar los gastos totales de una instalación de recuperación de calor de aguas residuales y una de calefacción de gas. En comparación con la calefacción a gas, la bomba de calor requiere una inversión inicial más alta, sin embargo, los gastos operativos son considerablemente más bajos. En 2005, los dos sistemas tenían costos anuales iguales debido al precio de la energía. Se realiza una comparación que toma en cuenta los gastos adicionales (resaltados en rojo) y el grado de cumplimiento de las normas de aislamiento térmico en Suiza). En el cantón de Zúrich, se imponen regulaciones energéticas más rigurosas para los edificios que dependen exclusivamente de combustibles fósiles para su calefacción, en comparación con los edificios que utilizan fuentes renovables de energía. Es necesario anticipar gastos adicionales en el aislamiento térmico (de un color verde oscuro). No se toma en cuenta en la comparación que se espera que los precios de las instalaciones de

recuperación de calor de las aguas residuales disminuyan a medida que esta técnica se difunda más. Tampoco se considera el aumento en los precios de los productos derivados del petróleo, que ha sido muy importante progresión entre 2005 y 2023.

b) Impacto ambiental. Incluir los costes externos

En la actualidad, los precios de la energía no reflejan de forma precisa los gastos externos relacionados con los peligros y perjuicios al entorno natural. Para solucionar este problema, es fundamental considerar los gastos externos al tomar decisiones de inversión.

Según la norma suiza SIA 480, titulada "Cálculo de rendimiento de las inversiones en la construcción" [56], es necesario considerar los gastos externos en los proyectos tanto del sector privado como del sector público. Es indispensable hacer un análisis global de la rentabilidad siguiendo criterios uniformes para determinar la opción más eficiente en términos de costo. La rentabilidad de la climatización a través de aguas residuales se incrementa significativamente al reducir a la mitad los costos adicionales generados por los combustibles fósiles.

4.3.3. Gestión municipal. Los ayuntamientos motores de la innovación

El aprovechamiento de la energía térmica de las aguas residuales puede tener un impacto positivo en la evaluación de los avances en políticas municipales, energéticas y medioambientales. Los municipios tienen la oportunidad de apoyar la difusión de esta técnica innovadora, por ejemplo, al identificar de manera sistemática lugares apropiados, financiar experimentos y proyectos, y adoptando la instalación de bombas de calor con recuperación de energía de las aguas residuales en sus propios edificios como escuelas, oficinas o piscinas. La infraestructura presente en los edificios públicos no solamente sirve de modelo a seguir para los desarrolladores privados, sino que también contribuye positivamente a la reputación de la ciudad.

En términos generales, los municipios que cuentan con una población superior a 3.000 personas presentan una gran oportunidad en cuanto al aprovechamiento del calor proveniente de las aguas residuales.

En la Figura 4-34 se puede observar una parte del plan energético de Uster. En color violeta se señalan las áreas principales donde se busca recuperar el calor de las aguas residuales. Estas áreas están ubicadas a ambos lados del colector principal y cerca de la planta de tratamiento de aguas residuales. La zona donde se encuentra el suministro de gas natural se encuentra marcada en color rojo.

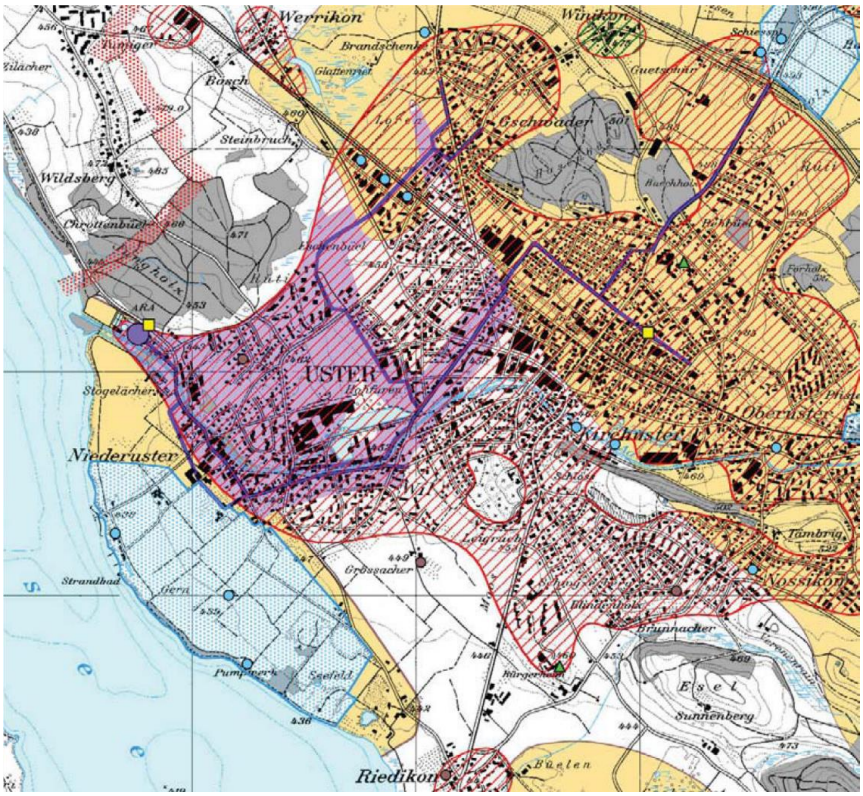


Figura 4-34. Plan energético de la ciudad de Uster.
Fuente: Basler + Hofmann

Medidas a tomar para hacer viable la implementación de infraestructuras de intercambio con recursos de bajo grado en sistemas de alcantarillado y agua subterránea:

- Comenzar o respaldar el análisis de factibilidad. · Iniciar o respaldar la evaluación de viabilidad.
- Impulsar o apoyar los estudios para determinar la viabilidad.
- Iniciar o respaldar los análisis para determinar la factibilidad.
- Considerar la viabilidad de aprovechar la energía generada por las aguas residuales durante la edificación o remodelación de los edificios gubernamentales locales.

- Incorporar en los planes energéticos municipales la utilización del calor proveniente de las aguas residuales.
- Incluir los hallazgos en el plan global de tratamiento de aguas residuales.
- Fomentar la contratación mediante Servicios Energéticos.
- Mejorar las instalaciones de calefacción existentes al incorporar bombas de calor que aprovechen la energía de las aguas residuales.
- Comunicar a los promotores que están solicitando permisos para llevar a cabo obras constructivas.
- Financiar proyectos de demostración, así como la promoción de los logros obtenidos.
- Mejorar las instalaciones de calefacción existentes incorporando bombas de calor que aprovechen la energía de las aguas residuales.
- Comunicar a los promotores que hacen requerimientos para obtener permisos de construcción.
- Financiar iniciativas piloto y promover la divulgación de los hallazgos.
- Completar las instalaciones de calefacción actuales con bombas de calor con uso de la energía de las aguas residuales.
- Informar a los promotores que solicitan licencias de obras.
- Subvencionar instalaciones piloto, y la difusión de los resultados.

a) Identificación de las implantaciones

Debido a los plazos de tiempo cada vez más reducidos que se solicitan en los proyectos de construcción, muchos intentos de aprovechar la energía del agua residual no se materializan debido a la falta de tiempo para llevar a cabo los estudios requeridos. Para solucionar esta situación, varios ayuntamientos deciden llevar a cabo la detección de lugares con capacidad de generar energía útil. Se contratan a compañías especializadas para llevar a cabo una evaluación exhaustiva y sistemática de lugares adecuados, con el objetivo de identificar su potencial. En los pueblos con una población inferior a 10.000 habitantes, por lo común, basta con conversar con los especialistas presentes en el lugar para identificar de manera rápida los lugares de interés; en las ciudades con redes más amplias, se hace necesario elaborar un mapa de la energía. La mayoría de los

municipios cuentan con una gran cantidad de datos necesarios, por lo que este trabajo suele tener un costo reducido. Los lugares posibles son definidos por su proximidad a los conductos principales de aguas residuales y, al mismo tiempo, a los usuarios mayores de energía.

b) Decisión basada en un análisis preliminar

Encontrar un lugar adecuado y escribir un mapa de la energía no es suficiente para determinar si una instalación es factible o rentable. Es necesario realizar más investigaciones: un grupo de expertos realizó un análisis exhaustivo. Este análisis se puede resumir de la siguiente manera:

- Datos básicos (ubicación, sistema de canalización, estructura del edificio, densidad de construcción).
- Medición de la energía que se ofrece y se solicita.
- Estudio de la utilización de la tubería y/o la instalación de tratamiento de aguas residuales.
- Evaluación si el proyecto es factible desde un punto de vista técnico y valorar sus posibilidades, se debe llevar a cabo una evaluación.
- Diseño en su totalidad de la captura y generación de energía.
- Cálculo de la inversión necesaria y los gastos implicados en la producción de energía.
- Breve análisis sobre la rentabilidad evaluada.
- Sugerencias acerca de los pasos a tomar.

c) Planificación energética

La planificación energética es una actividad clave para asegurar el suministro de energía de manera eficiente y sostenible. Se trata de desarrollar estrategias y políticas que promuevan el uso adecuado de los recursos energéticos disponibles, teniendo en cuenta las necesidades actuales y futuras de la sociedad. Esta tarea requiere de un análisis detallado de la demanda energética, así como de la evaluación de las fuentes de energía existentes y emergentes. El objetivo principal es garantizar un suministro estable y seguro, reduciendo al mismo tiempo los impactos ambientales y promoviendo el uso de energías renovables. Esta planificación debe llevarse a cabo a largo plazo, considerando los avances

tecnológicos y las políticas gubernamentales, con el fin de lograr una transición energética exitosa hacia un sistema más sostenible.

Dado que el calor obtenido de las aguas residuales es una forma de energía local, es recomendable establecer una colaboración con otras fuentes de energías sostenibles.

La temperatura del suelo y las fuentes de agua subterránea, entre otros recursos naturales, junto con la infraestructura energética como la calefacción urbana y el suministro de gas natural. La planificación energética asegura que la coordinación entre ellos sea efectiva.

d) Lanzamiento de Proyectos

Los municipios activos no se conforman con crear un entorno propicio para aprovechar el calor de las aguas residuales, sino que también se involucran de manera activa en iniciativas de respaldo tanto para edificios municipales como privados. Después de realizar el mapeo de la energía en las ciudades de Köniz, Lucerna, Schaffhausen, Uster, Winterthur y Zug, se realizaron, en colaboración con los desarrolladores privados, análisis, resúmenes y estudios de viabilidad para sitios, proyectos y áreas residenciales nuevas.



Figura 4-35. Binningen: escuelas, la administración y piscina comunitaria Se calientan las aguas residuales.
Fuente: EnergieSchweiz

Este método es ventajoso porque las unidades de recuperación de calor residual tienen una vida más larga que los sistemas eléctricos convencionales, especialmente cuando se instalan con calefacción urbana. Los promotores privados

no tienen tiempo para aprender estos enfoques técnicos en el marco de un proyecto de construcción. La acción temprana por parte de los gobiernos municipales aumenta la probabilidad de implementación, beneficiando así el aire limpio y las vidas de los ciudadanos.

4.3.4. La promoción. Las diferentes etapas en la concepción y realización de una instalación

El proceso es más complicado que en el caso del gasóleo o la calefacción. Se necesita una colaboración estrecha entre el responsable del proyecto, el gobierno local y el encargado de la planta de tratamiento de aguas residuales o del sistema de alcantarillado. El promotor tiene la opción de hacer la instalación personalmente o confiar dicha tarea a una empresa especializada en el diseño, financiamiento, construcción y operación de la instalación. De todas formas, es necesario avanzar en fases, contando con la asistencia de una compañía experta con habilidades en la organización. Antes de tomar la decisión de llevar a cabo el proyecto, es aconsejable realizar un análisis detallado de viabilidad.



Figura 4-36. La clave del éxito es una buena coordinación entre todas las partes interesadas en el proyecto: el promotor, el municipio, el contratista, el explotador de la red de saneamiento y los técnicos del proyecto.
La renovación de un colector cerca de un edificio es una oportunidad inmediata para implantar una instalación de intercambio de energía con las aguas residuales.
Fuente: EnergieSchweiz

a) Estudio de viabilidad

Existen múltiples etapas a recorrer desde la concepción de una idea hasta la puesta en marcha de una instalación que funcione correctamente. En numerosas

ocasiones, el proceso se inicia ya sea con un análisis realizado por la administración local, que señale las ubicaciones adecuadas o a través de un estudio previo que permita una evaluación inicial. Sin embargo, únicamente mediante un análisis de factibilidad se puede tomar decisiones concretas acerca de las posibilidades de triunfo de un proyecto. Este estudio abarca una fase inicial de comunicación con el operador de la red, una evaluación de la implementación de soluciones técnicas, una comparación exhaustiva con los sistemas tradicionales y un análisis detallado de la rentabilidad. Se sugiere encomendar la investigación a una compañía de ingeniería con conocimiento en el área. El proyecto será orientado por los hallazgos obtenidos como resultado. Se sugiere que, previamente a analizar el proyecto en sí, se elabore un plan de financiamiento y de operación.

b) Un procedimiento en siete fases

- Análisis preliminar y estudio de viabilidad.
- Toma de la decisión por parte del promotor del inicio del proyecto.
- Plan de financiación, licitación y selección del contratista.
- Contrato con el operador de la red de alcantarillado, autorización para trabajar con las aguas residuales.
- Ejecución del Proyecto.
- Construcción de la instalación y puesta en marcha.
- Operación y explotación.

c) La obtención de permisos. Acuerdo del operador de la red de alcantarillado.

A partir del momento en el que son descargadas en el sistema de alcantarillado, las aguas residuales pasan a ser responsabilidad del ente público encargado de su eliminación. Esta herramienta está disponible de forma gratuita para cualquier persona que quiera aprovecharla para generar energía. Sin embargo, es necesario contar con el consentimiento del operador de la red de aguas residuales para poder operar una instalación de recuperación de energía de las aguas residuales. La autorización se otorgará bajo la condición de que la evacuación y purificación del agua no sean obstruidas y se cumplan las regulaciones comunitarias correspondientes.

d) Las recomendaciones de las organizaciones profesionales

La extracción de energía térmica del agua residual no presenta dificultades siempre que se satisfagan dos condiciones.:

- En primer lugar, es importante asegurarse de que la temperatura del agua que llega a la planta de tratamiento no se reduzca más de 0,5 °C.
- En segundo lugar, la planta de tratamiento requiere que la temperatura mínima del agua suministrada sea de 10 °C.

Si no se cumplen estas condiciones, los expertos evaluarán en qué medida se puede permitir la recuperación de calor de las aguas residuales sin perjudicar el proceso de tratamiento.

e) La legislación sobre protección del agua

En España aún no se han establecido leyes que regulen el uso de las aguas residuales. No obstante, es aconsejable llevar cada proyecto asignado por las autoridades municipales e, en caso necesario, regionales, encargadas de salvaguardar el medio ambiente y los recursos hídricos. En un principio, estos organismos otorgarán su consentimiento siempre y cuando el proyecto no perjudique ni tenga efectos negativos en la eliminación y tratamiento de las aguas residuales.

f) El uso de aguas residuales para el enfriamiento

Si se emplean aguas residuales tratadas en el proceso de refrigeración, la temperatura resultante no debe elevarse más de 1,5°C. La temperatura del flujo de agua no aumentará más de 25 ºC en el proceso de descarga. En la práctica, es poco común llegar a estos dos límites.

g) Contrato de uso de aguas residuales

- El contrato suele ser la forma en que se maneja la relación entre el promotor y el gestor de la red de alcantarillado y las plantas de tratamiento, y en ocasiones esta relación se encuentra registrada como una servidumbre en el Registro de la Propiedad. El acuerdo debe contener las siguientes cláusulas:
- El contrato tiene como objetivo principal el derecho de aprovechamiento de la energía.
- El dominio, las conexiones entre ellas, el ingreso.

- El deber de información mutua implica la responsabilidad de ambas partes de intercambiar información relevante.
- La posibilidad de tener derecho de acceso a las aguas residuales.
- La definición de las potencias térmicas ya sea para refrigerar o calentar.
- El establecimiento de los límites de valores para el tratamiento de las aguas.
- Los requisitos para la incorporación de los elementos de intercambio al colector.
- Las competencias y los métodos relacionados con la administración, supervisión, conservación e higiene.
- Medidas de seguridad y protección en relación con la puesta en marcha y el mantenimiento.
- La obligación por los perjuicios ocasionados durante la ejecución y el mantenimiento.
- El desmantelamiento o la renovación de la instalación según su condición.

h) Elección del momento adecuado para hacer la instalación

La oportunidad idónea para implementar un sistema de recuperación de energía de las aguas residuales es cuando se pueden aprovechar las ventajas en conjunto con otros proyectos:

- La fabricación o expansión de infraestructuras.
- La mejora en el sistema de climatización
- La renovación de un colector cercano al edificio.
- Las disposiciones implementadas según las leyes relacionadas con las emisiones y el impacto ambiental.

4.3.5. Caso 1. Intercambio con un colector presurizado de aguas residuales en la Universidad de Aveiro. Portugal.



Figura 4-37. Ejemplo de Red inteligente 3. Red de Aguas Residuales. Fuente: Propia.

El Complejo Interdisciplinario de Ciencias Físicas aplicada a la Nanotecnología y la Oceanografía de la Universidad de Aveiro, o su nombre en portugués Complexo Interdisciplinar de Ciências Físicas, Aplicadas à Nanotecnologia e à Oceanografia (CICFANO) implementó una innovadora combinación de tecnologías y técnicas de baja exergía para maximizar el aprovechamiento de energía térmica de bajo grado y la eficiencia energética.

Superficie bruta de construcción (incluido el suelo técnico)	4.514 m²
Volumen bruto de construcción (excluyendo suelo técnico)	17.600 m³
Superficie de losa (excluido el suelo técnico)	4.336 m²
Superficie bruta del suelo técnico	950 m²
Área de despliegue	1.600 m²
Área útil climatizada	3.560 m²
Altura (sin suelo técnico)	11,6 m

Tabla 4.3. Datos del proyecto [57].

Con el uso de las cimentaciones del edificio como cimentaciones termoactivas para aprovechar el intercambio geotérmico y de sistemas inerciales de losas termoactivas para climatizar el edificio con una poderosa componente radiante de temperatura moderada. Así mismo se ejecutó un intercambiador de energía térmica para aprovechar la energía térmica de las aguas residuales en el conducto

presurizado de la red de saneamiento de la Ciudad de Aveiro, que atraviesa el Campus camino de la planta de tratamiento de aguas residuales y está ubicado a 100 m del nuevo edificio (Figura 4-38 y Tabla 4.3) [57].

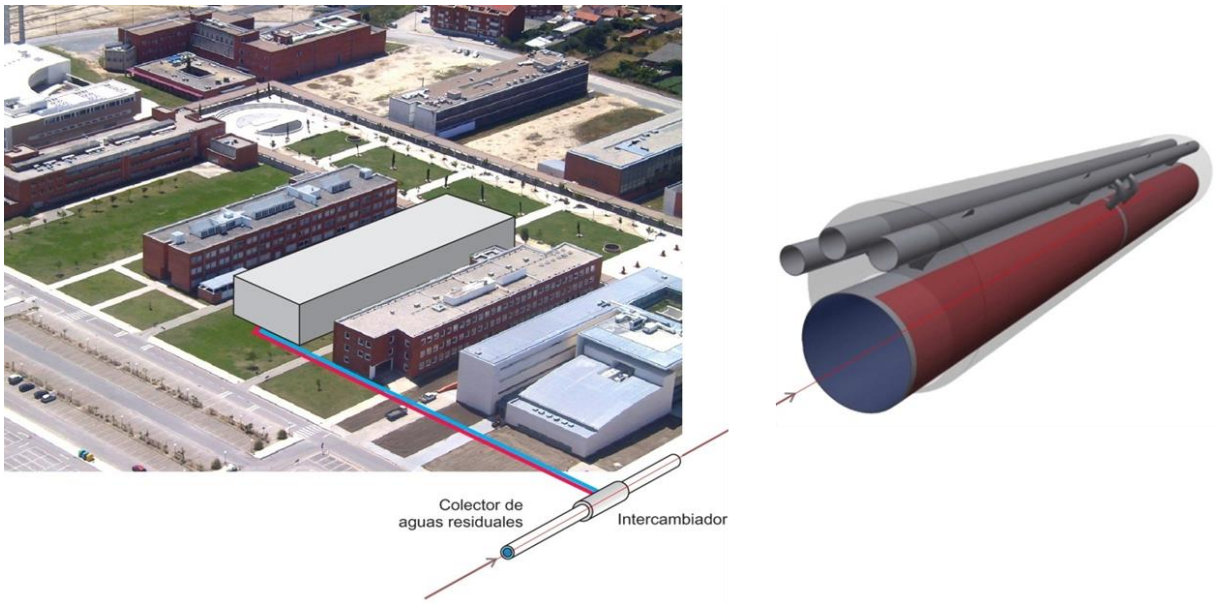


Figura 4-38. Ubicación del intercambiador de aguas residuales [57].

a) Climatización con losas Termoactivas

También denominadas en inglés Thermally Activated Building Structures (TABS) las soluciones para utilizar como acumuladores de calor las losas de hormigón del edificio y utilizarlas como dispositivo radiante para calefactar y refrigerar el edificio [57]. Esta decisión redunda en la baja exergía del edificio y la coherencia y equilibrio entre los sistemas de intercambio y producción de energía de bajo grado y su utilización final.

La solución geotérmica y biotérmica el intercambio con las aguas residuales.

El sistema de producción se nutre de una combinación de energía intercambiada con el terreno a través de un intercambiador de pilotes termoactivados y la intercambiada con la red de agua residual,. Se estimó que el consumo de del sistema de climatización era aproximadamente 134 kWh de energía para calefacción y 152 kWh para refrigeración. Se instalaron 55 pilotes térmoactivos con una longitud de 10 m y un diámetro de 600 mm, y otros con un diámetro de 400 mm y un diámetro de 300 mm una profundidad de 10 m (Figura 4-39). Estos pilotes se conectaron en serie para proporcionar una potencia calorífica instalada de 100,0 kWh y una capacidad de refrigeración de 90,0 kWh [57].

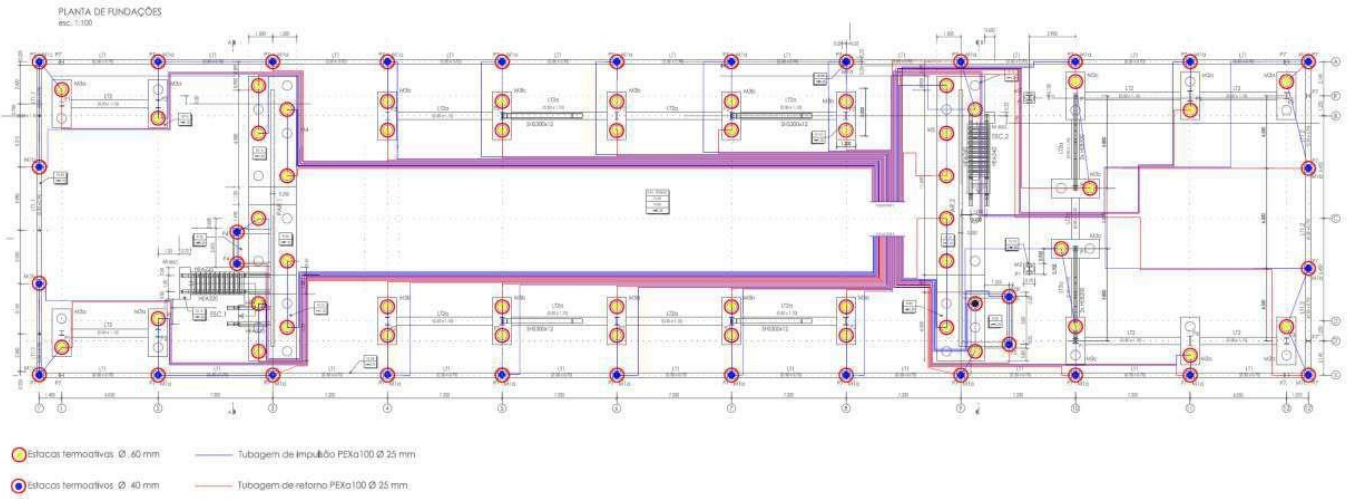


Figura 4-39. Esquema de la red de pilotes termoactivos [57].

El intercambiador de acero inoxidable que instaló en la red de agua residual presurizada, tiene un tamaño de 350 mm de diámetro y está ubicado en un bypass que deriva el agua residual, construido al efecto. Tiene una capacidad de flujo de 84 l/s de agua residual con una temperatura promedio que oscila entre 21ºC y 25ºC.

La longitud total del intercambiador con las aguas residuales es de 32 m y tiene una potencia en régimen de calefacción de 74,3 kWh y una potencia de refrigeración de 121,9 kWh (Figura 4-40).



Figura 4-40. Instalación del intercambiador de calor de 32m en emisario bypass, junto al edificio de la Rectoría de la UA y conexión al edificio CICFANO en 2 tuberías de PE Ø90mm PN10 [57].



Figura 4-41. Sala técnica con colectores, depósitos y bombas geotérmicas [57].

b) Sistema de control

El sistema de control es indispensable para garantizar y mantener el óptimo rendimiento de los sistemas. Resuelve en nuestro caso la implementación de todas las estrategias de hibridación entre los distintos recursos de intercambio y almacenamiento de energía de bajo grado:

- Pilotes termoactivos geotérmicos con capacidad de almacenamiento térmico en el terreno
- Intercambio térmico con las aguas residuales, un recurso instantáneo de energía de bajo grado, sin capacidad de almacenamiento propia.
- Losas termoactivas, TABS, dentro del edificio. Sistema de climatización radiante con capacidad inercial de almacenamiento térmico.

El sistema de control realiza una monitorización permanente y en interacción hombre-máquina gestiona la reconfiguración operativa del edificio para verificar en cada momento los escenarios de máxima eficiencia.



Figura 4-42. Capturas de pantalla del programa para la gestión automática de todo el edificio desde un ordenador personal [57].

Evaluación financiera del sistema HVAC de CICFANO

Además de la evaluación derivada de monitorear el edificio, se llevó a cabo un análisis estático para contrastar la solución convencional de climatización propuesta en el proyecto, con un sistema de climatización que utiliza una enfriadora de aire-agua y una caldera de gas, junto con un sistema geotérmico que trabaja en conjunto con el sistema biotérmico.

Según los resultados obtenidos se observó una disminución del 55% en el consumo de energía eléctrica durante la temporada de calefacción y en 90% en el periodo de refrigeración, operando ambos sistemas de referencia durante el mismo período de tiempo, y sin consideraciones adicionales sobre la calidad y salubridad de los mecanismos de interacción térmica con los usuarios. (Tabla 4.4. Evaluación financiera de CICFANO [57].) [57].

Valores por m² de área climatizada	Energía	
	Solución TABS	Solución HAVC +Gas
Inversión	146,86 €	156,98 €
Mantenimiento anual	0,67 €	1,81 €
Costo anual de la energía consumida	0,90 €	3,14 €
Periodo de retorno estimado	6 años y o meses	

Tabla 4.4. Evaluación financiera de CICFANO [57].

Monitorización del edificio

Durante un año en el que el edificio estuvo sin ocupantes y sin generar ingresos, se realizaron diversas campañas de monitorización, para tener una base de datos de referencia que posteriormente se ha verificado en escenarios normales de uso..

Así, se logró desarrollar una base de datos que se mantuvo en gran medida aislada de influencias externas y escenarios de ocupación impredecibles.

Se llevaron a cabo diversas acciones para seguir la evolución del edificio, que incluyeron las siguientes etapas:

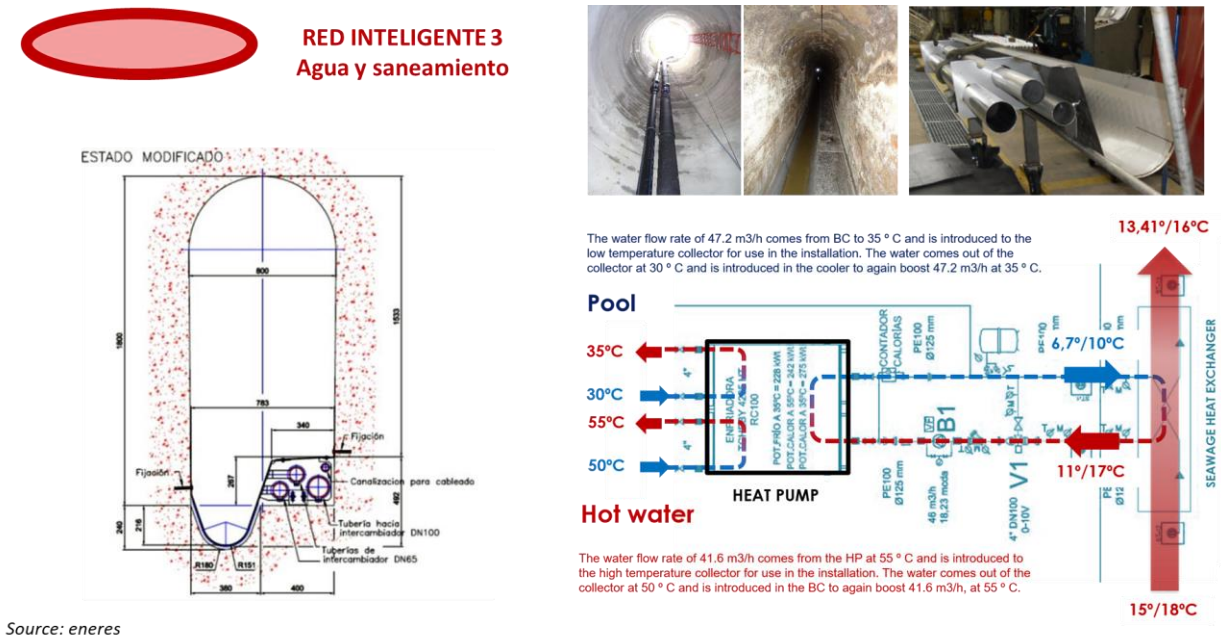
- Realización de pruebas para verificar la impermeabilidad y examinar la capacidad de flujo del sistema de ventilación en las rejillas ubicadas en la sala.
- Supervisión de los espacios internos para medir la temperatura promedio y la humedad relativa.
- Evaluación de la temperatura de las superficies de las paredes mediante el uso de termografía.

De acuerdo a los registros de monitoreo realizados, se puede concluir que el edificio tiene algunas limitaciones constructivas respecto a su aislamiento térmico, lo cual provoca una dependencia superior a lo deseable en el uso de sistemas de climatización.

En lo que respecta a las temperaturas en el interior de un edificio sin personas y sin sistemas de climatización en funcionamiento, se generan períodos prolongados de calor excesivo en verano (evaluado en un 20,37 % según la metodología EN 16798 [58]) y períodos prolongados con temperaturas por debajo de los 20 °C durante el invierno (44,55 % según la norma EN 16798 [58]).

Estos datos, tomados en condiciones que hasta la fecha se consideraban normales en Aveiro, apuntan hacia la necesidad de mejorar la eficiencia pasiva de los edificios, reforzar su carácter de baja exergía, lo que, más allá de los buenos resultados que el edifico presenta, abatir su demanda y optimizar su rendimiento.

4.3.6. Caso 2. Intercambio con la red de aguas residuales para el Polideportivo Municipal de Moratalaz. Madrid



Source: eneres

Figura 4-43. Ejemplo de Red inteligente 3. Aguas residuales y sanitarias. Fuente: Propia.

El siguiente presenta la oportunidad que supone la identificación de potencial de recuperación de recursos de bajo grado mediante sistemas de intercambio con aguas residuales, que se integran con otros sistemas de generación ya existentes y de alto grado para incrementar muy significativamente la eficiencia del sistema hibridado al aprovechar de manera eficiente los recursos energéticos recuperados.

a) Identificación del potencial de eficiencia energética

Centro Deportivo Municipal (CDM) de Moratalaz es una edificación de uso terciario, constante e intenso. Fue construido en el año 1990, posee una superficie construida de 7.350 m², es operado por 136 empleados y ofrece atención a 580.000 usuarios anuales, durante un horario de funcionamiento de 12 a 14 horas diarias, todos los días del año [59].

El complejo de edificios del CDM ofrece un gran potencial de eficiencia adicional al aprovechar recursos energéticos cruzados. Una intervención en todos los sistemas con capacidad para reducir el consumo energético puede resolver la demanda del complejo, manteniendo un consumo bajo y ofreciendo un servicio de alta calidad:

- Optimizar la envolvente desde el punto de vista bioclimático.
- Elegir sistemas de climatización que se adapten a los recursos disponibles en el entorno.
- Hacer uso de fuentes de energía renovables, especialmente la energía solar térmica, en la generación de calor.
- Suministrar energía recuperada a sistemas de generación de calor nuevos y ya instalados.

	Electricidad	**Gas**	**Agua**
Consumo anual CDM	661.658 kWh. año	1.359.206 kWt./año	121.946 m^3/año
Emisiones anuales CDM	218.347 kg CO/año	277.278 kg CO/año	
Consumo Anual Piscina Cubierta		960.703 kWt./año	
Emisiones anuales Piscina Cubierta		195.980 kg CO/año	

Tabla 4.5. Consumos anuales y emisiones del CDM [59].

Las mejoras en el proyecto de eficiencia del CDM de Moratalaz se están llevando a cabo en fases de actuación independientes. Por esta razón, es de gran importancia prever su futura integración con el resto de sistemas técnicos complejos y la ampliación de su cobertura más allá de los límites actuales, los cuales ya justifican su implementación (Figura 4-44). En nuestro caso la actuación se centra en la instalación del intercambiador que permite aprovechar la energía de las aguas residuales y su conexión con los sistemas térmicos del edificio con intermediación de una bomba de calor geotérmica, bajo un nuevo sistema de monitorización y control para proporcionar al edificio calor aplicable al atemperamiento de las piscinas, los sistemas de calefacción y los sistemas de agua caliente sanitaria.

Quedan pendientes, para futuras mejoras integrales de las instalaciones, las posibilidades de aprovechar el sistema para aportar recursos de refrigeración, incluso simultáneos, a la deshumectación de las piscinas o el refrescamiento del aire de renovación en los recintos cerrados de actividad física o administrativa.



Figura 4-44. Instalaciones de la piscina cubierta e instalaciones del CDM [59].

b) Identificación de la presencia de recursos energéticos disponibles

En el entorno del CDM de Moratalaz, se identificó un recurso importante en el colector municipal de aguas residuales que recoge y conduce a más de 8 metros de profundidad el agua que se vierte desde las zonas residenciales de los Altos de Moratalaz, asegurando un flujo mínimo de 50 l/s de agua residual a una temperatura promedio de 15 ºC (Figura 4-45).

El colector se encuentra alineado con el CDM, bajo la avenida adyacente, y el tercer aspecto a considerar es que es factible establecer una conexión directa entre el sistema de intercambio integrado de la red y la sala técnica del edificio que alberga la piscina cubierta. De esta forma, es posible ubicar de manera muy sencilla la nueva bomba de calor y los intercambiadores que se conectan desde ella con el intercambiador exterior y con los sistemas internos del edificio.

Se llevó a cabo una inspección y evaluación de dicho colector, donde se pudo comprobar que el flujo y la temperatura del agua residual era estables y tenía potencial de ser aprovechado. Posteriormente, se redactó un proyecto de ejecución para el Ayuntamiento de Madrid. Dicho proyecto incluyó:

1. Calcular con precisión los parámetros de rendimiento.

2. Desarrollar la ingeniería y el diseño del intercambiador de acero integrado en la galería del colector.
3. Desarrollar la ingeniería del proceso de ejecución de las obras y de los elementos auxiliares necesarios para la conexión entre el colector y el polideportivo.
4. Diseñar los pozos de acceso necesarios para el personal de manteniendo y para introducir las secciones del intercambiador que se integran en la galería.
5. Desarrollar la ingeniería y el diseño de los equipos e instalaciones que permiten la transformación y aplicación del calor recuperado a la producción de ACS y a la climatización de la piscina.
6. Desarrollar la ingeniería y el diseño de los sistemas de medición y control



Figura 4-45. Detalles técnicos del colector de aguas residuales [59].

c) Principios técnicos y tecnología disponible para el intercambio de energía con aguas residuales.

Los principios técnicos son muy elementales. Más del 15 % de la energía que introducimos en nuestros hogares, se desperdicia al dejarlos incorporados a las aguas residuales, que fluyen por el campo geotérmico del subsuelo a temperaturas entre 15 ºC y 20 ºC. Se pueden instalar colectores de aguas residuales nuevos o adaptar los colectores existentes para captar la energía de esas aguas residuales desperdiciadas. Estos colectores intercambian el calor o frío mediante Bombas de Calor (HP) se puede suministrar agua a temperaturas moderadas a los edificios para que hagan uso de ellas en sus sistemas de climatización. Las tecnologías para poder realizar

esto, existen y tienen décadas de desarrollo que hace que sean sistemas muy fiables (Figura 4-46 y Figura 4-47).

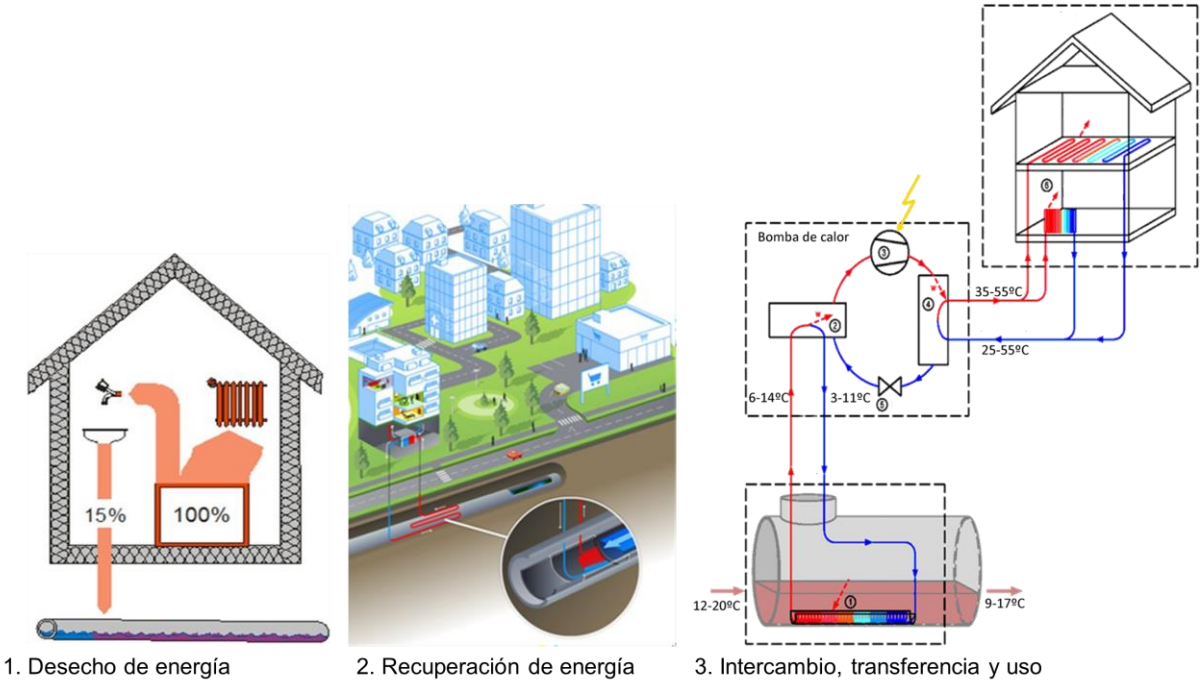


Figura 4-46. Esquema general de los componentes para la recuperación del calor de las aguas residuales [59].



Figura 4-47. Distintos tipos de intercambiador térmico la recuperación del calor de las aguas residuales [59].

El intercambiador de acero diseñado específicamente para el CDM de Moratalaz, tiene 144 m de longitud, está compuesto de 48 secciones que miden 3 m de largo. A través de un pozo de conexión, se introdujeron uno por uno y se anclaron a los muros del colector. Las secciones están constituidas por un canal de intercambio que está construido con una cámara de acero de doble piel de acero inflado a alta presión y conductos de ida y retorno que forman un circuito cerrado con la geometría de un sistema tinkelman (Figura 4-48).

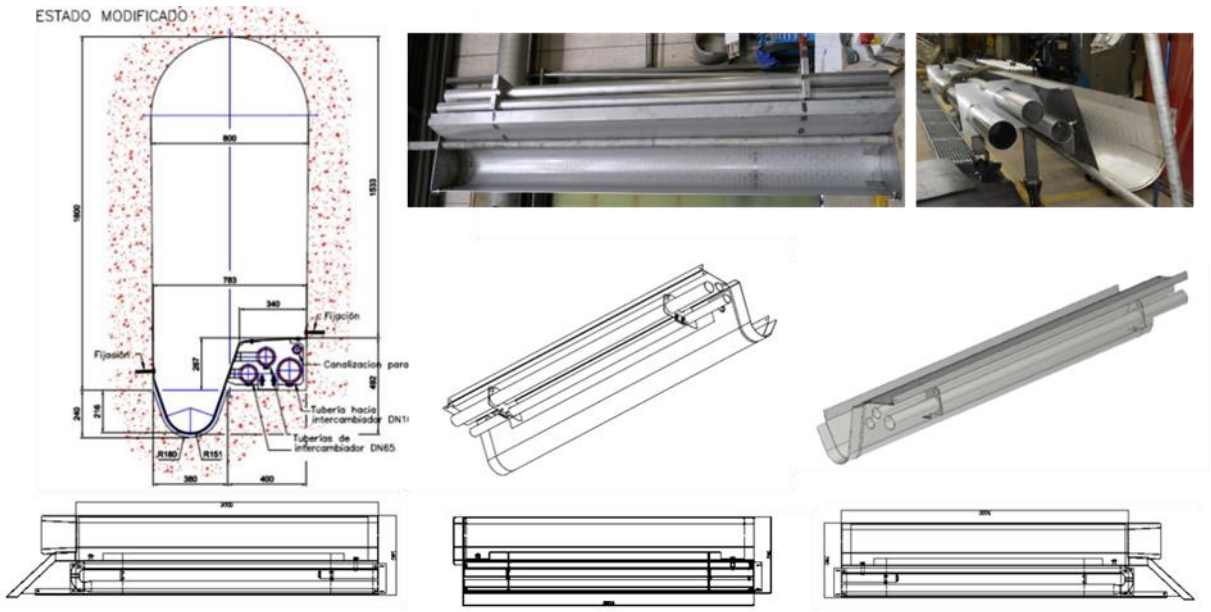


Figura 4-48. Esquema de las secciones del intercambiador [59].

El intercambiador logra una potencia total de intercambio de 235,7,1 kW, con un salto térmico de 4,38 ºC y un caudal de 46 m³/h.

Durante los primeros meses de seguimiento del funcionamiento del sistema de intercambio los resultados arrojados fueron muy positivos y, en comparación con las simulaciones del proyecto, con un mayor rendimiento.

d) Aplicación del calor recuperado

El caudal de agua de 45,64 m3/h ≈ 46 m³/h es impulsado por la bomba de circulación de salida de la HP a 6,7 ºC y se introduce en el intercambiador de aguas residuales para su calentamiento.

El agua residual discurre por el intercambiador con temperatura media de 15 ºC con un caudal medio de 50 L/s = 180 m³/h.

Después de atravesar toda la superficie de intercambio e intercambiar calor con el caudal de 45,64 m³/h ≈ 46 m³/h del enfriador.

La temperatura de las aguas residuales se reducirá ligeramente a 13,86 ºC, manteniendo el mismo caudal de 180 m³/h.

El caudal de 46m³/h de 6,7 ºC tras ser calentado por el intercambiador de aguas residuales alcanzará una temperatura de 11 ºC. Y finalmente, el caudal de 46m³/h de 11 ºC será introducido a la bomba de calor (HP) (Figura 4-49).

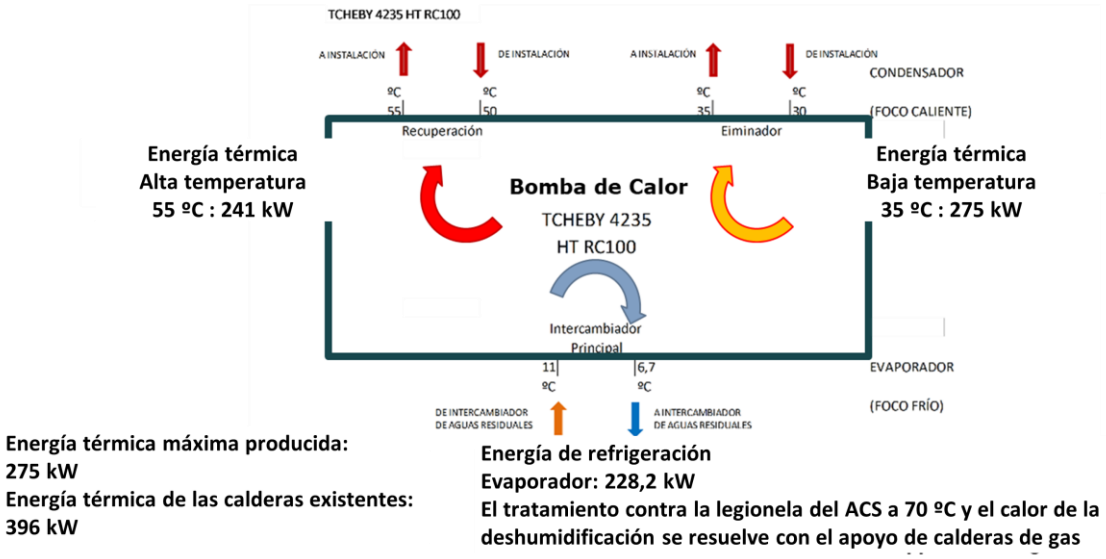


Figura 4-49. Uso del calor reciclado para calentar la piscina y producir agua caliente sanitaria. El tratamiento contra la legionela del ACS (70 ºC) y la generación de calor para la deshumidificación se resolverán utilizando dos calderas de gas [59].

El intercambiador integrado en el colector trabaja contra una HP que, en su foco frío genera un caudal de agua de 45,64 m³/h a 6,7 ºC, porque produce una potencia frigorífica de 228 kWt. Esta energía se disipa; a través del intercambiador de aguas residuales, y la temperatura de ese flujo de agua se eleva 4,3 ºC y se obtiene una temperatura final de 11 ºC. Este caudal de agua de 45,64 m³/h calentada a 11ºC se introduce de nuevo en el enfriador [59].

La HP en su disipador de calor produce un caudal de agua de 47,25 m³/h a 35 ºC, porque produce una potencia calorífica de 274,75 kWt. La energía térmica generada se suministra a la instalación, por lo que la temperatura del agua disminuye en 5 ºC y la temperatura que vuelve a entrar en el enfriador para calentar es de 30 ºC [59].

La HP en su recuperador de calor produce un caudal de agua de 41,45 m³/h a 55 ºC, porque produce una potencia calorífica de 241,00 kWt. Esta potencia se aplica también a la instalación, por lo que la temperatura del agua disminuye en 5 ºC y la temperatura que vuelve a entrar en la enfriadora para ser calentada a 50 ºC (Figura 4-50) [59].

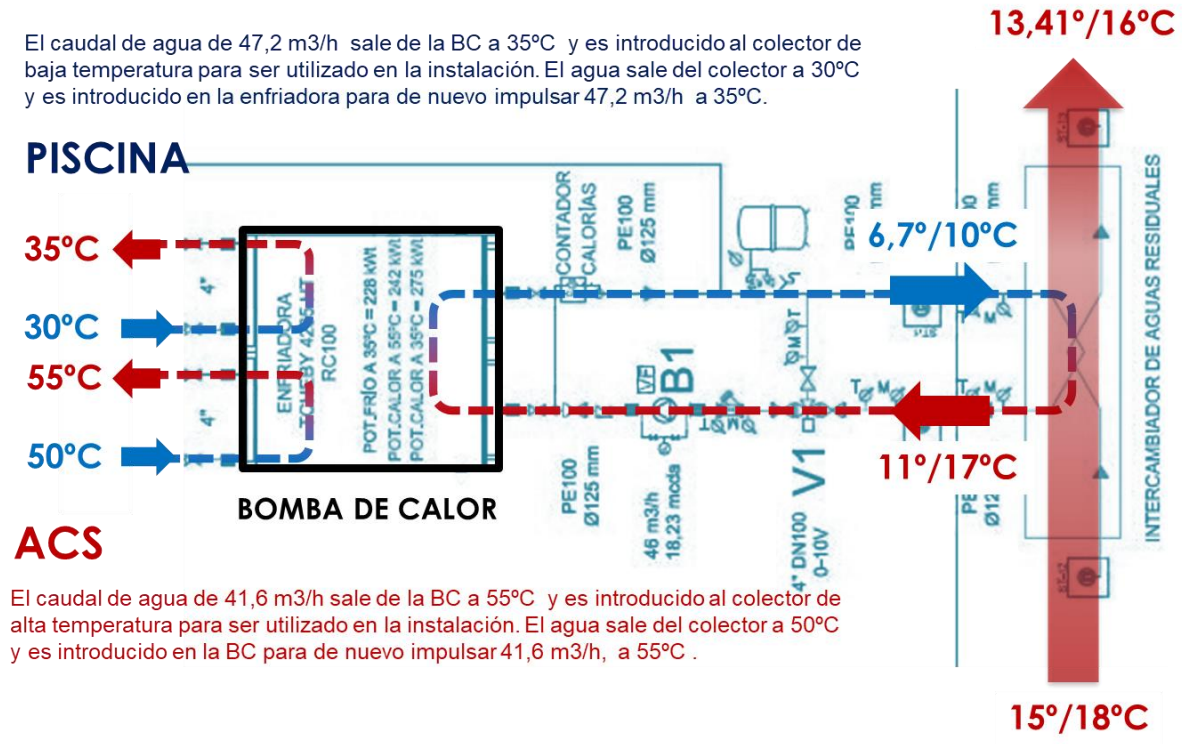


Figura 4-50. Aplicación del calor recuperado a la calefacción de la piscina y a la producción de agua caliente [59].

e) Ejecución de los trabajos del intercambiador y conexión al CDM

El proceso de ejecución tuvo 2 fases (Figura 4-51):

- La obra civil:
  - Realización de pozo de acceso.
  - Ejecución de obras de desvío de agua.
  - Comunicación entre pozo y sala técnica.
  - Comunicación entre la sala técnica y la sala de instalaciones del CDM.
- La Instalación y equipos técnicos:
  - Ejecución de la galería colectora de alcantarillado público.
  - Ejecución de la zanja de conexión a la sala técnica.
  - Ejecución de la sala técnica del Polideportivo Municipal.

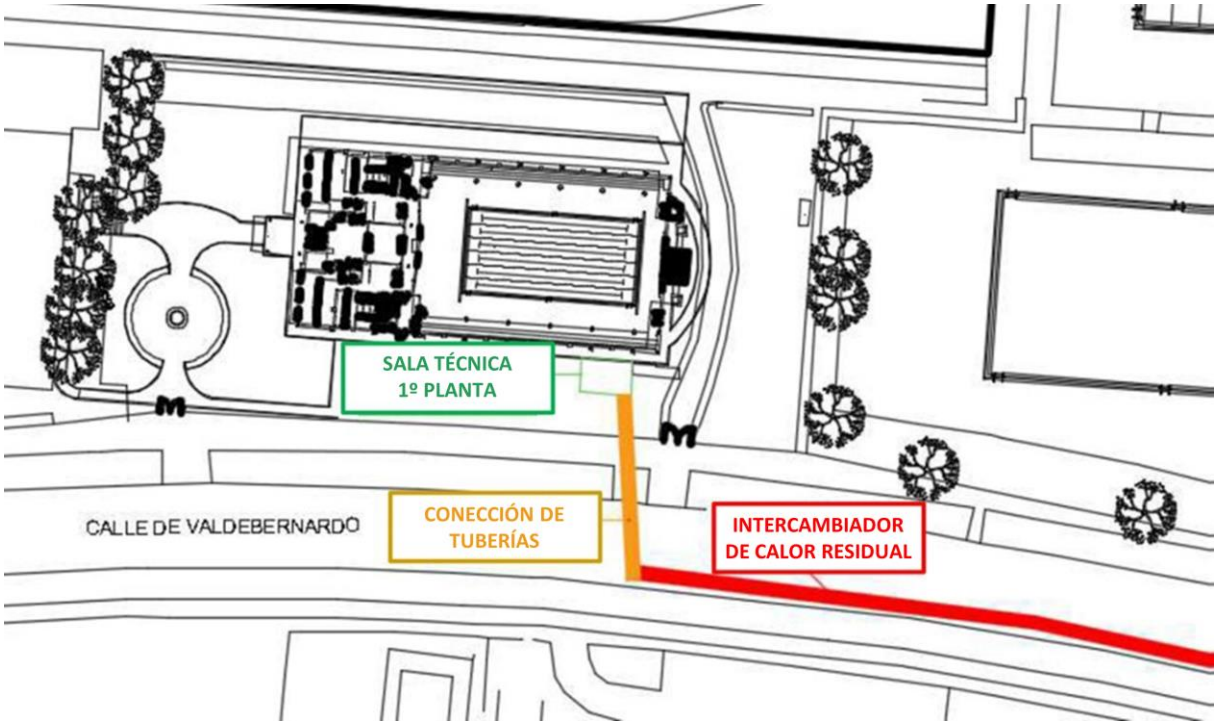


Figura 4-51. Fases y lugares de ejecución de la obra civil y puesta en marcha de los equipos, necesarios para la instalación del intercambiador en el colector y la conexión a la sala técnica de la piscina [59].

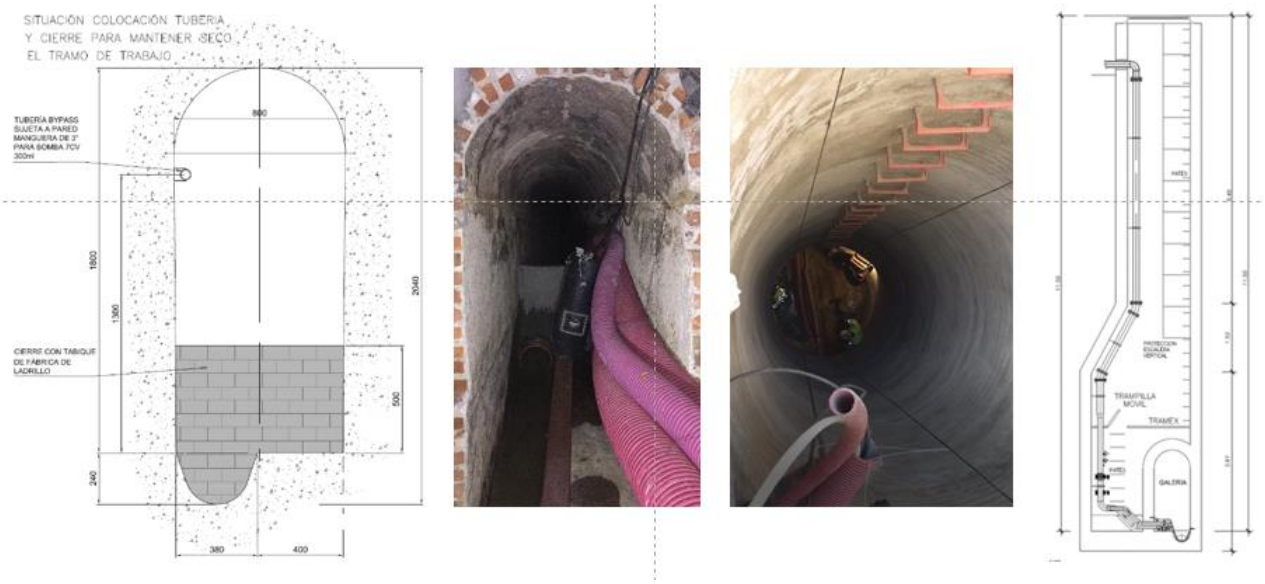
La primera etapa, la de los trabajos de preparación, se inició con la construcción de un pozo que sirviera como punto de entrada para el personal y los equipos. Además de ejecutar las áreas para almacenar los materiales y las secciones del intercambiador de calor. El intercambiador se encuentra flanqueado por dos "presas" temporales en los extremos de la sección en donde se iba n a instalar el intercambiador y la instalación de bombeo, que permitió los trabajos "en seco" sin interrumpir la operación del colector.

El siguiente paso fue verificar que la zona horizontal en donde se iba a instalar el intercambiador a lo largo de la galería (unos 160 m) estaba totalmente seca para permitir el ensamblaje de las secciones del intercambiador la parte plana Para lograr esto, se realizó el desvío de las aguas residuales durante los 36 días que duraron los trabajos de ejecución

Los siguientes fueron los componentes de la instalación (Figura 4-52):

- Bombas de achique para aguas residuales de 7 HP.
- Manguera de 3" para bomba 7 CV, 300 ml.
- Generador de 20 kvass, con manguera y puesta a tierra.

- Ejecución y posterior retirada de las presas provisionales de ladrillo, de 0,5 m.



de altura.

Figura 4-52. Izquierda, plano de sección y fotografía de la presa de contención y de la instalación de bombeo que permite la instalación, en zona de trabajo seca, del intercambiador y de la derivación de bombeo de aguas residuales. A la derecha, fotografía y sección del pozo de acceso.

Una vez finalizadas las obras, se inició a la excavación de la conexión en la calle y dentro del recinto del polideportivo.

Cada tramo fue suspendido e insertado verticalmente en el pozo desde el vehículo de transporte. Luego, se colocó en su posición final a lo largo de la galería al girar en el área donde se une con la galería del Coleccionista (Figura 4-53).



Figura 4-53. Esquema y fotografías del delicado proceso de introducción de las 48 secciones de 3 m del intercambiador, apiladas en el pozo, pivotando hacia la galería del colector y colocadas a lo largo de ella [59].

La sala técnica del polideportivo se conectó con el foco frío de la HP a través del pozo de acceso.

Se estableció una conexión mediante dos tuberías que suben por el pozo desde el colector de aguas residuales, ubicado a una profundidad de 11,5 m, hasta la superficie.

Las tuberías que conectan la parte superior del pozo con la sala técnica de la HP se instalaron en una zanja que atraviesa directamente la pared de la sala. Luego, se conectan directamente a los conductos que se enlazan con la HP contigua (Figura 4-54 y Figura 4-55).

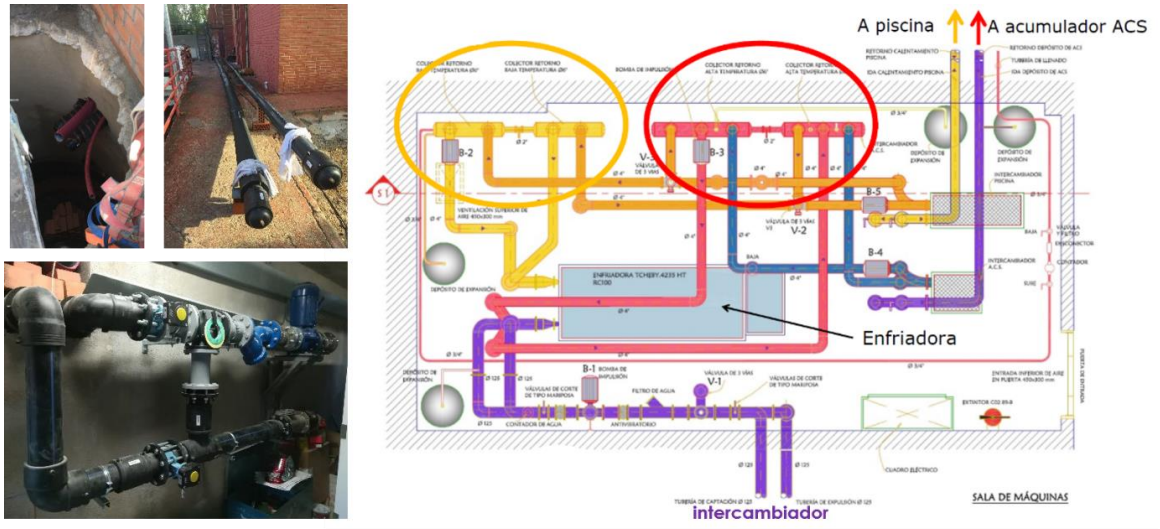


Figura 4-54. Esquema e imágenes de la instalación de conexión en el lado del edificio. [59].



Figura 4-55. Instalación de conexión en el lado del colector y el intercambiador. [59].

f) Sistema de control

El sistema de control permite la monitorización y operación del sistema y su gestión integral. Está basado en PLC industrial, programado en lenguaje de bloques de función y equipado con comunicación por BUS (Industrial Ethernet Profibus) y servidor Web de Comunicaciones y enlace. Dispone de 2 módulos de control diferenciados, comunicados entre sí por medio de un Bus de conexión (Industrial Profibus Ethernet) fabricado en cable de 4 pares trenzado en helicoide CAT6.

El sistema de captación de información, monitorización y control está concebido para poder implementar a lo largo del tiempo, en hibridación con los sistemas existentes, todas las posibles estrategias de aprovechamiento del intercambiador térmico con las aguas residuales para el calentamiento y también para la refrigeración aplicada a la climatización de espacios, el atemperamiento de aire y la deshumectación.

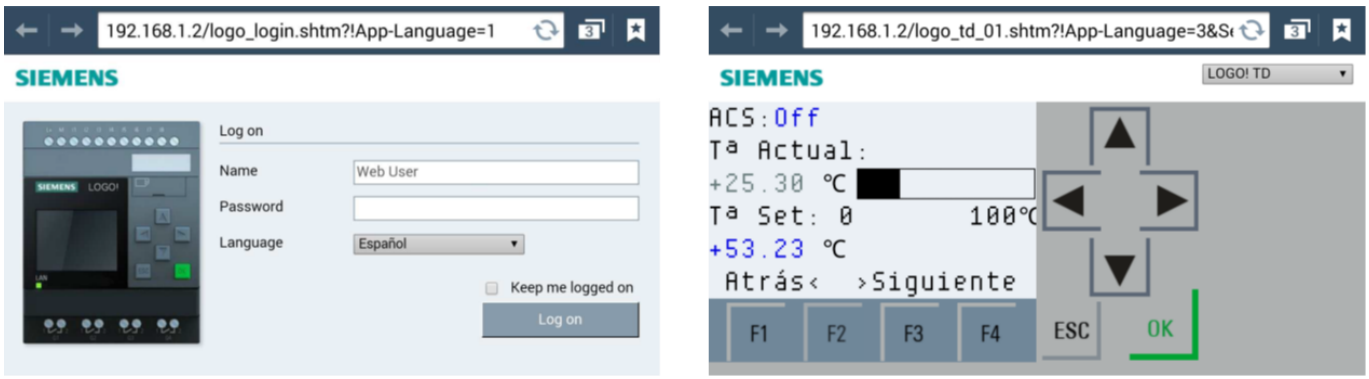


Figura 4-56. Interface de usuario del sistema de control que permite la gestión integrada del sistema [59].

g) Balance de la reducción de emisiones

El sistema tiene un alto índice de eficiencia gracias a la óptima combinación de temperaturas tanto en la fuente de origen como en la producción. Es de suma importancia disminuir el consumo de gas y las emisiones al trabajar con fuentes de energía renovables y sostenibles.

Como la Tabla 4.5 ilustra, el coeficiente de rendimiento del sistema es alto y procede de fuentes continuas y renovables La reducción del consumo de gas es muy importante y también la reducción de emisiones:

COP del sistema	4,11
kg CO_2/kWh producidos con electricidad	0,357

	ACS	**Toneladas de CO2 producidos con electricidad anualmente**
Demanda E térmico [kWt h/año]	507.251,45	44,05
Demanda E eléctrica [kWt h/año]	123.167,36	
Demanda E restante [kWt h/año]	338.167,64	
E térmica producida por las calderas para cubrir la demanda [kWt h/año] (considerando rto caldera)	384.281,41	78,39
TOTAL TONELADAS DE CO2 PRODUCIDAS CON BOMBA DE CALOR E INTERCAMBIADOR AGUS RESIDUALES + APOYO DE CALDES GASOIL		122,44

TOTAL TONELADAS DE CO_2 PRODUCIDAS ANTES DE IMPLANTACIÓN DE NUEVO SISTEMA	**195,98**	**100 %**
TOTAL TONELADAS DE CO_2 PRODUCIDAS TRAS IMPLANTACIÓN DE NUEVO SISTEMA	**122,44**	**62,48 %**
TOTAL TONELADAS DE CO_2 EVITADAS TRAS IMPLANTACIÓN DE NUEVO SISTEMA	**73,54**	**32,52 %**

Tabla 4.6. Balance de reducción de emisiones del sistema integrado [59].

Balance de reducción del consumo de energía

El nuevo sistema híbrido ofrece un ahorro económico significativo de aproximadamente el 40% en comparación con el sistema que estaba en funcionamiento antes de la rehabilitación. Además, la instalación puede fácilmente proveer de servicios a otras instalaciones que requieran tanto calor como refrigeración, gracias a la naturaleza reversible del sistema de intercambio de aguas residuales [59].

COSTE ENERGÉTICO ANUAL ANTES DE LA IMPLANTACIÓN	53.703,32 €
COSTE ENERGÉTICO ANUAL TRAS LA IMPLANTACIÓN	32.615,50 €
AHORRO EN COSTE ENERGÉTICO ANUAL TRAS LA IMPLANTACIÓN	21.087,82 €
% DE AHORRO EN COSTE DE CLIMATIZACIÓN	39,27 %

Tabla 4.7. El resultado económico del ahorro generado por la valorización de energía residual y la combinación de diferentes sistemas [59].

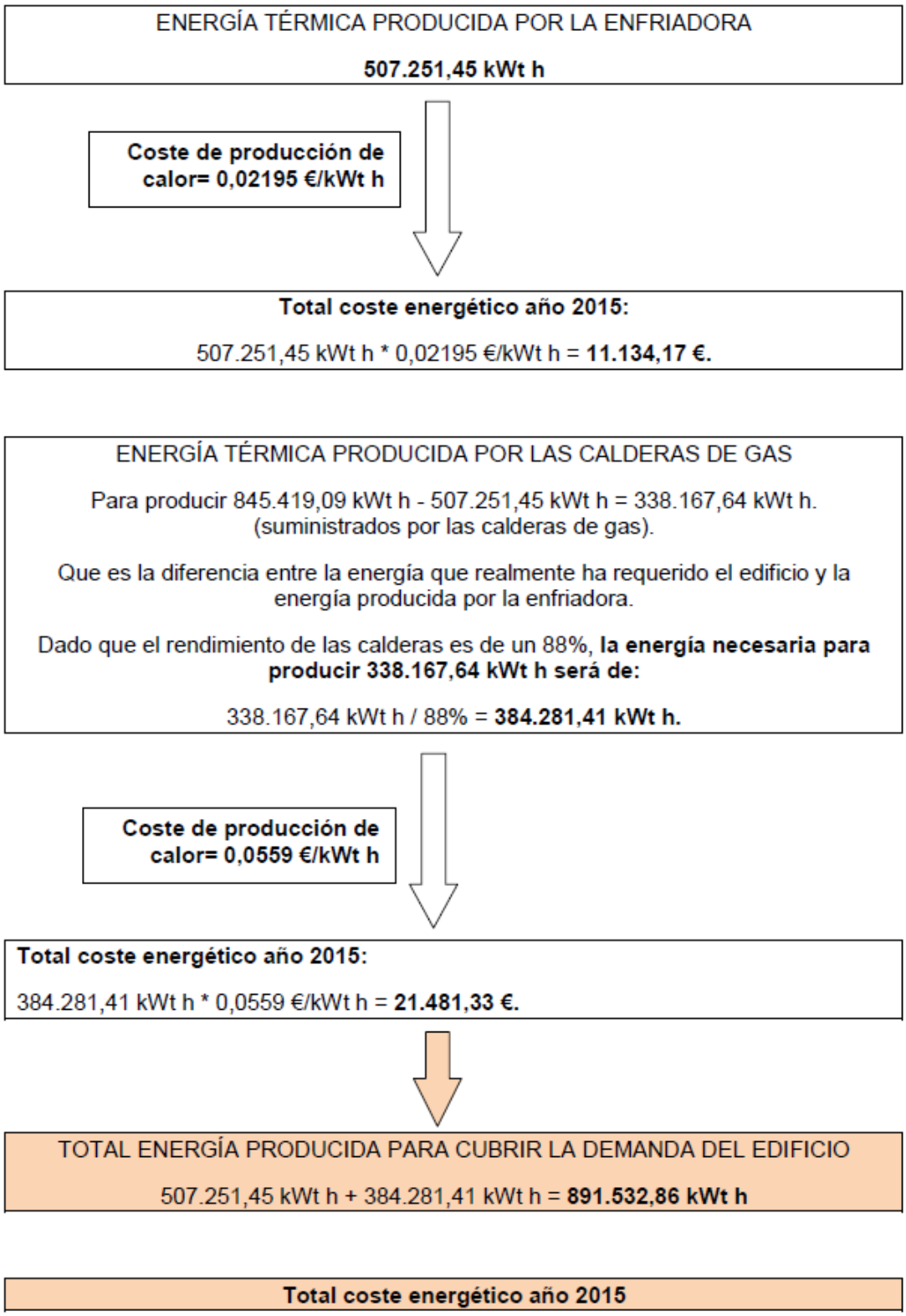


Figura 4-57. El resultado económico del ahorro generado por la valorización de energía residual y la combinación de diferentes sistemas [59].

4.3.7. Caso 3. Intercambio con la red de agua potable en el polideportivo de Ansoain. Navarra.

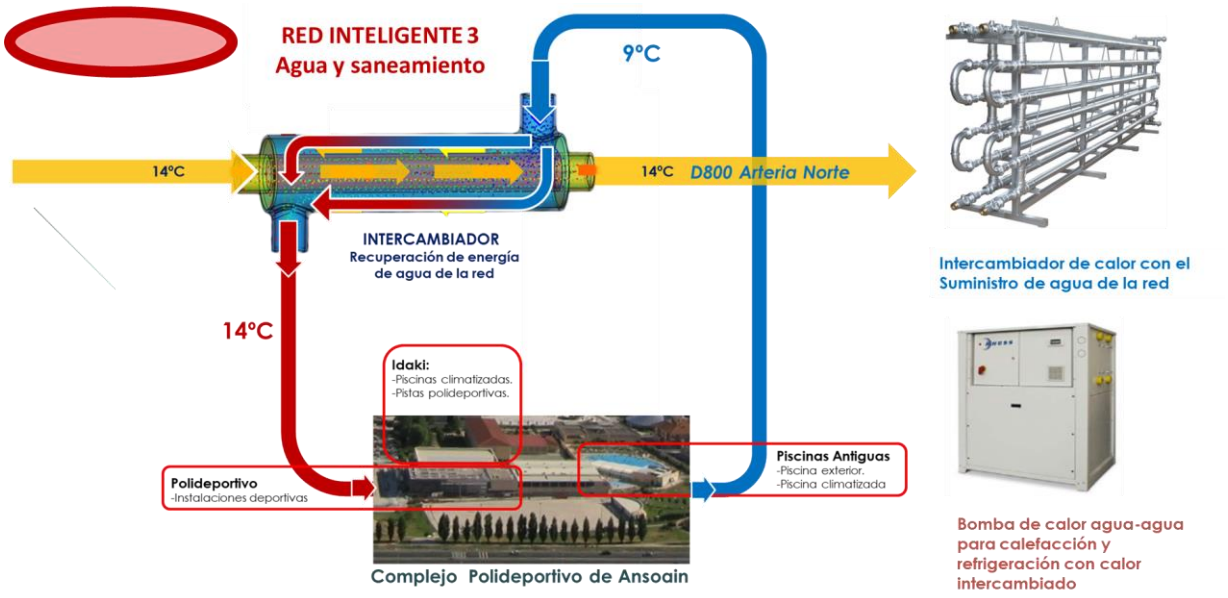


Figura 4-58. Ejemplo de Red inteligente 3. Aguas residuales y sanitarias. Fuente: Propia.

Para el Ayuntamiento de Ansoáin se realiza un proyecto para el ahorro y la eficiencia energética de sus instalaciones deportivas que aprovechará la energía de la red de abastecimiento de agua para su uso en la climatización, producción de agua caliente sanitaria y calentamiento del agua de las piscinas.

La iniciativa generará una importante disminución de la demanda térmica e hídrica de los complejos deportivos y sustituirá el consumo de combustibles fósiles por la recuperación de calor de la red general de agua, hoy desperdiciado.

El objetivo del proyecto es la obtención del calor contenido en el agua de la red de abastecimiento para su uso en el polideportivo y mejorar los sistemas de climatización del Polideportivo para poder utilizar esta energía de forma más eficiente.

Se recupera un recurso que normalmente no es aprovechado y que puede ser aplicado a la calefacción y refrigeración de multitud de edificios de Pamplona y de la mayoría de las poblaciones de Navarra, con un ahorro muy significativo.

Para conseguir el objetivo de recuperar la energía de la red de agua, sin tocar ni alterar el preciado líquido, se instalará un intercambiador que transferirá el calor del agua de la red municipal a un circuito de agua del Polideportivo, dotado de una

bomba de calor que inyecta la energía en los sistemas de climatización de las piscinas.



Figura 4-59. Ejemplo de Red inteligente 3. Aguas residuales y sanitarias. Fuente: Propia.

Complementariamente, para reducir el consumo, se instalarán dispositivos reguladores y reductores de caudal en todos puntos consumidores de agua.

También se aprovechará el calor de la red de agua para calentar el aire exterior antes de introducirlo en los sistemas de ventilación y climatización, por último se recuperará el calor del agua de las piscinas que, por exigencia normativa, es renovada periódicamente y se aumentará la capacidad de acumulación de agua caliente.

INSTALACIÓN PILOTO DE INTERCAMBIO TÉRMICO PARA VENTA DE ENERGÍA		
DURANTE EL PERIODO DE CONTRATO	11.685,18	€/año

ESTRATEGIAS DE AHORRO Y EFICIENCIA ENERGÉTICA		
Durante el periodo de contrato	3.826,51	€/año
Tras el periodo de contrato	25.510,13	€/año

Tabla 4.8. Costos de las estrategias implementadas. Fuente: Propia

La puesta en marcha de este proyecto no implica inversión municipal, según se recoge en el acuerdo.

Se ha elegido la localidad de Ansoáin por su implicación en proyectos medioambientales, por el importante compromiso de la corporación municipal y los ciudadanos con la sostenibilidad y, técnicamente, porque en las proximidades de las instalaciones deportivas donde se pondrá en práctica esta iniciativa discurre una conducción de abastecimiento con un caudal importante (la artería norte), uno requisitos para el éxito del proyecto.

A su vez, el Centro Nacional de Energías Renovables (CENER) supervisará los resultados. El acuerdo se enmarca en un convenio firmado por SCPSA (empresa gestora de la Mancomunidad) para impulsar proyectos piloto de intercambio y uso de energía de las redes de agua y alcantarillado.

El Ayuntamiento acometerá la reforma del sistema de climatización del Polideportivo y el coste de la operación será sufragado en régimen de servicios energéticos.

Según los primeros cálculos, durante los diez años que dure el contrato, el Ayuntamiento de Ansoáin ahorrará 15.511.- euros al año.

A partir del décimo año, el ahorro para las arcas municipales será de 103.416.- euros al año.

4.4. Intercambio de energía con la infraestructura enterrada de la red de metro y sistemas de transporte colectivo

En el siglo XXI, se observa un claro impulso hacia el derecho a la movilidad a través de las políticas de transporte público. La dedicación de recursos para mejorar y expandir las redes y medios de transporte en beneficio de la comunidad es evidente y contundente. Las estrategias para revitalizar y actualizar los entornos urbanos se enfocan en promover la diversidad de formas de transporte, fomentar la movilidad sostenible y adaptarse a las condiciones ambientales para lograr un uso eficiente de los recursos subterráneos de la ciudad y reducir la influencia negativa de los vehículos en la superficie [50].

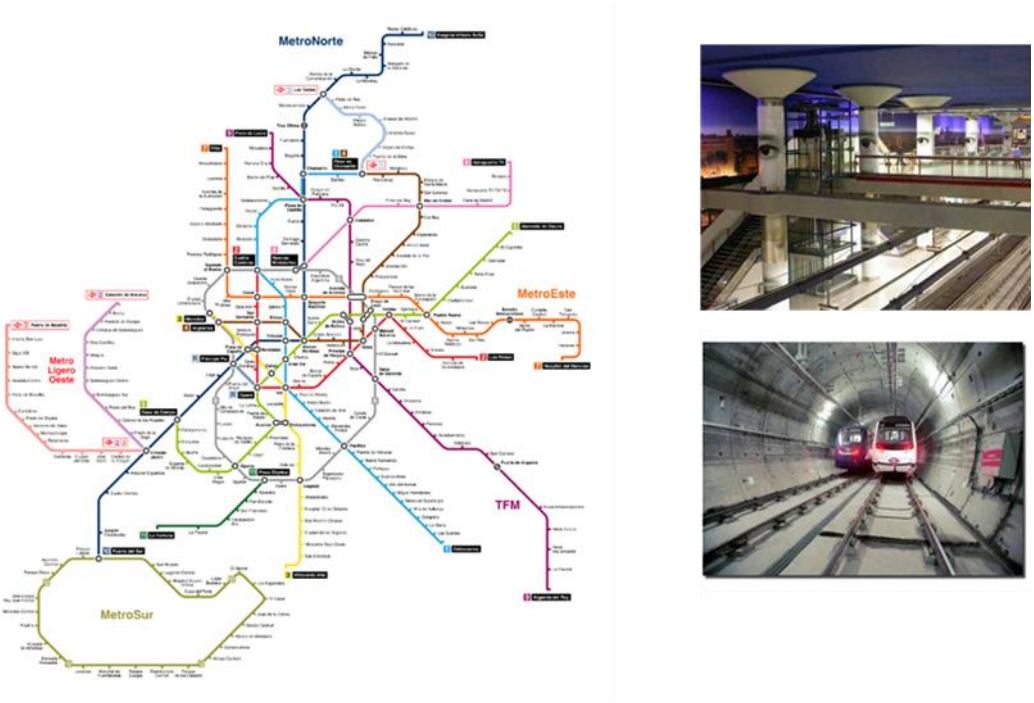


Figura 4-60. La estructura subterránea del Metro de Madrid. 2023. 295 km de túneles, 302 estaciones. Un gigantesco intercambiador geotérmico. Fuente: Metro de Madrid.

Desde que, hace poco más de cien años, se empezó a circular por el subsuelo, en nuestra ciudad y las de su área metropolitana se ha construido una red subterránea de ferrocarril metropolitano de casi 300 km de longitud, de los que un tercio se han ejecutado en los últimos quince años y más de trescientas estaciones. El potencial energético de cada kilómetro de red subterránea y de cada estación subterránea es significativo tanto para cubrir la demanda de la propia infraestructura como para proporcionar energía a los edificios y a las infraestructuras urbanas cercanas.

Nº de estaciones	302
Nº de intercambiadores	26
Nº de líneas	13 + Ramal
Nº de vestíbulos	358
Escaleras mecánicas, pasillos rodantes y rampas	1.712
Ascensores y plataforma elevadoras	558
Kilómetros de red	294
Demanda de viajeros	442 millones

Años	Km	Estaciones	Intercambiadores	Demanda
1990	82	120	2	408 millones
1995	121	164	9	397 millones
2006	227	237	10	657 millones
2008	284	294	26	685 millones
2009	284	294	26	649 millones
2018	294	302	26	677 millones
2021	294	302	26	442 millones

Tabla 4.9. Datos sobre la infraestructura del Metro de Madrid y sobre su crecimiento exponencial a lo largo del periodo 1980 / 2021. Elaborado a partir de datos de Metro de Madrid [60], [61].

Cuando se examinan desde la perspectiva energética, las redes de infraestructura subterránea, como el metro, resultan particularmente fascinantes. En estos lugares se mezclan elementos que solo se encuentran juntos en este tipo de infraestructuras. Desde el punto de vista de la ejecución, estas características se presentan:

- Han sido desarrolladas de manera continua desde finales del siglo XIX en la mayoría de los países, incluyendo España a principios del siglo XX. Estas redes se expanden en el subsuelo de las zonas urbanas más consolidadas y densamente pobladas, siguiendo un patrón reticular de crecimiento.
- Su extensa ramificación y alcance espacial abarcan todas las áreas urbanas.
- Existen numerosos lugares de transición y posibles enlaces entre la red subterránea y el entorno externo.
- Combinan sistemas de transporte en los que se integran conexiones lineales, como túneles, con nodos que actúan como estaciones e intercambiadores. Algunos de estos nodos presentan un gran tamaño, ya que forman parte no sólo

de la red de metro, sino también de un nivel superior de redes de intercambio de conexiones intermodales.

- Están constantemente ocupadas por personas en movimiento y llevando a cabo labores en su interior. Con los requisitos particulares para el acondicionamiento del entorno, tanto en términos de temperatura y humedad como de calidad del aire, iluminación, niveles de ruido y ergonomía, entre otros.
- Se llevan a cabo actividades que complementan el movimiento de individuos, actividades comerciales, administrativas y de servicios.
- Se caracterizan porque el recurso que fluye son las personas que son transportadas por trenes, y éstos demandan una gran cantidad de energía para poder operar.

En términos energéticos, las redes de transporte subterráneo presentan características específicas:

- Se requiere una ingente cantidad de energía para alimentar el correcto funcionamiento de los trenes dentro de la red.
- Grandes cantidades de energía se diseminan en la red subterránea y, más precisamente, en las estaciones, en forma de calor generado por los motores y frenos de los trenes.
- Gran cantidad de calor producido por individuos y dispositivos se libera en la atmósfera de las estaciones.
- Una parte del calor se extrae utilizando métodos de ventilación para renovar el aire, mientras que los dispositivos de refrigeración se encargan de mitigar el efecto del calor restante en las personas y en el entorno al extraer el calor del aire. Los dos sistemas requieren una considerable cantidad de energía que se suma a la que consumen los trenes.

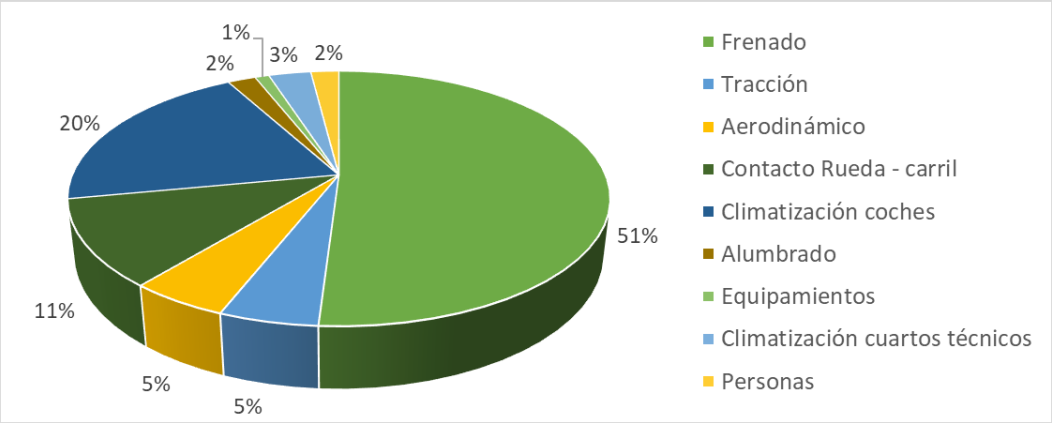


Figura 4-61. Distribución porcentual de las cargas térmicas en la red de metro de Madrid. Fuente: Metro de Madrid.

- El calor se transfiere a través de los túneles y, posteriormente, se transfiere al terreno a medida que este se carga de energía y se recalienta.
- Dentro de los túneles, el aire se desplaza rápidamente debido a la fuerza ejercida por los trenes.
- Las personas se desplazan de un lado a otro de la red, transitando por espacios peatonales amplios que se encuentran en su interior.
- El sistema de metro funciona como un sistema energético que absorbe y libera grandes cantidades de energía de forma simultánea.

Sin embargo, el contexto urbano, climático, hidrogeológico y de uso en el que se encuentra la infraestructura del metro, que incluye estaciones, túneles, sistemas de ventilación, drenaje, estructuras auxiliares y medios de transformación de energía, influye en su capacidad de ser utilizado como sistema de intercambio de energía. Las condiciones de contorno de un sistema con múltiples opciones son variadas y diversas:

- La infraestructura de metro se asemeja a una red de generación de energía descentralizada y, debido a su estructura en forma de red, está muy cerca de ser una amplia red de posibles consumidores. Esto no solo la hace viable, sino también rentable.
- Las estructuras que están en contacto con el terreno en los túneles y las estaciones poseen un potencial significativo de intercambio geotérmico. La energía geotérmica posibilita la opción de extraer o insertar calor en el suelo con el fin de calentar o enfriar, o realizar ciclos estacionales de inserción y extracción para realizar ambas funciones de manera alternativa.

- La energía intercambiada puede ser aprovechada para satisfacer las demandas de enfriamiento y/o calefacción de las instalaciones y áreas habitables, así como proporcionar energía de baja potencia para regular la temperatura y condiciones de los edificios, infraestructuras y espacios cercanos.



Figura 4-62. Potencial Energético y Geotérmico del Metro de Madrid. Dirección General de Infraestructuras de Transporte Colectivo.
Fuente: Comunidad de Madrid.

- El sistema de metro interfiere con las rutas naturales del sistema hidrogeológico y con los canales de drenaje y filtrado natural del agua, a menos que esté claramente ubicado por debajo del nivel del agua subterránea o el nivel de las mareas. Esto conduce a la retención de grandes volúmenes de agua subterránea, la cual es calentada por el suelo y se mantiene a una temperatura similar a la temperatura promedio anual exterior, a una profundidad moderada de aproximadamente 10 m.

  Por ejemplo, el sistema de Metro de Bilbao destaca por su excelente infraestructura subterránea, que comprende un total de 17,5 kilómetros de túneles. Además, cuenta con un avanzado sistema de drenaje compuesto por 44 pozos y 88 bombas, con una impresionante capacidad de mover 3.380 l/s. Las pequeñas perforaciones en las paredes de los túneles permiten que el agua fluya a través de canales ubicados entre el concreto y el material aislante. Los conductos se unen en un conducto principal que se encuentra debajo de la plataforma de las vías. El trazado del Metro se desplaza múltiples veces sobre la ría del Nervión, y una de las paradas, conocida como Ansio, se encuentra ubicada bajo la trayectoria de las mareas. Al igual que sucede en Madrid y en

Bilbao, en ciudades como Barcelona, Valencia o Sevilla, se desperdicia gran cantidad de agua al no aprovechar su energía a través del drenaje, recolección y bombeo.

- El agua drenada suma en el Metros de Madrid 4,4 hm^3 al año (Tabla 4.10) [62].

N° pozo	Distrito o barrio	Desagüe	Caudal (m^3/h)
1	V. Vallecas - Congosto	Colector	55,50
2	Congosto saco	Colector	10,00
9	Marqués de Vadillo - Pirámides	Rio	16,75
9	Marqués de Vadillo - Pirámides (2)	Rio	24,40
10	Laguna - Lucero	Colector	26,45
11	Legazpi - Usera	Colector	100,00
13	R. Argentina - N. Ministerios	Colector	13,45
14	Universitaria - cocheras (Vía 1)	Colector	22,50
15	P. Ángel - Pio (Pozo 2)	Colector	27,50
18	I. Filipinas - Guzmán El Bueno	Colector	3,50
19	Antonio Machado Anden II	Colector	28,40
21	Aeropuerto - C. Naciones (Pozo 2)	Colector	10,50
22	Aeropuerto - Barajas (Pozo 1)	Colector	10,00
24	Valdebernardo - Pavones M-40	Colector	12,00
25	Estrella (Andén 1)	Colector	12,23
26	A. América (Andén II)	Colector	38,00
28	P. Pío - Lago (Pozo 2 V-2)	Colector	24,50
29	P. Pío - Lago (Pozo 2 V-1)	Colector	1.54
31	Begoña - Chamartín	Colector	13,62
32	Línea 10 (Casa de Campo-Colonia jardín) Batán	Colector	55,00
Ahorro estimado anual: 4,4 hm^3			

Tabla 4.10. Plan de aprovechamiento de aguas freáticas del Metro de Madrid [62].

A finales de diciembre de 2020 se inició la implantación de un sistema de refrigeración aprovechando el gran caudal de agua de escorrentía (20.000 litros a la hora) que se recoge en el pozo de bombeo ubicado en la estación de metro Avenida de América (Línea 9), andén 2. En esta sala se ubicará un ventilador de 20.000 m^3/h, un intercambiador de calor, filtro y silenciador disipativo (Figura 4-63 y Figura 4-64). El objetivo es inyectar aire refrescado en las zonas de viajeros de la estación.



Figura 4-63. Esquema conceptual de un sistema de refrigeración de estaciones mediante el aprovechamiento del agua de escorrentía en una estación del Metro de Madrid [63].

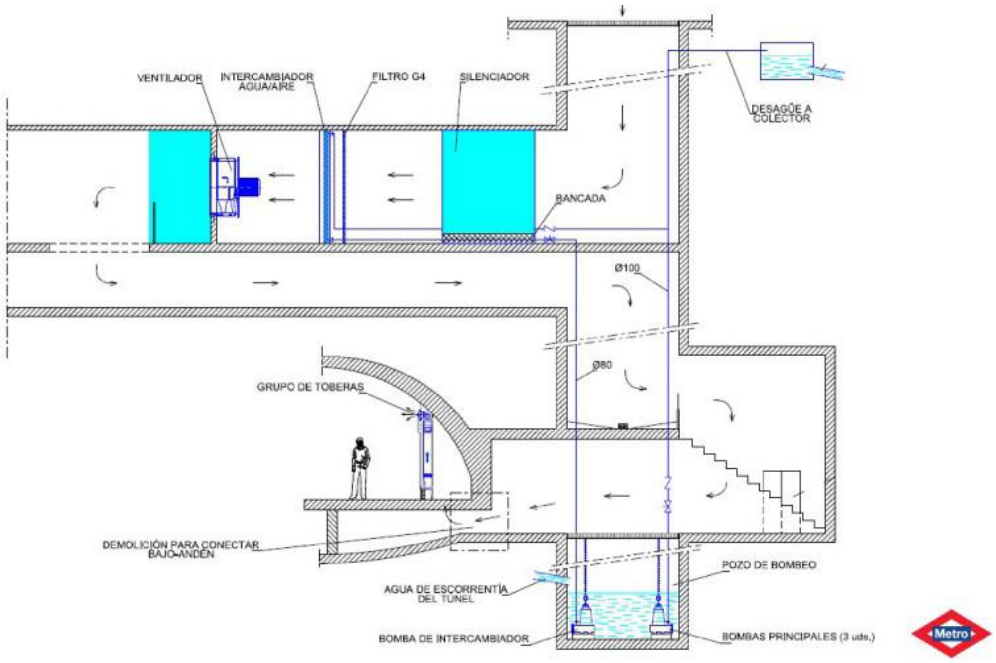


Figura 4-64. Sección esquemática de la solución aportada por Metro de Madrid para el sistema de refrigeración de estaciones mediante el aprovechamiento del agua de escorrentía en la estación de avenida América [64].

La iniciativa es indudablemente interesante e ilustra sobre el importante potencial que el intercambio térmico con el agua de drenaje, que se realiza en

zonas muy próximas a los espacios a climatizar, tiene para ser aplicado a mejorar las condiciones térmicas de los pasajeros en zonas muy afectadas por la disipación de calor de los trenes, motores y sistemas de frenado.

Sin embargo hay que señalar que planteamientos fundamentados en transferir calor entre un fluido con alta densidad térmica como es el agua drenada y un fluido con muy baja densidad térmica como es el aire que se impulsa en las zonas públicas van degradando el valor de los recursos de bajo grado con transformaciones de bajo rendimiento y procedimientos de transferencia consumidores de recursos energéticos y espaciales.

Este rendimiento es aún menor si tenemos en consideración que los sistemas de ventilación de las zonas de andenes de las estaciones, en las que la necesidad de equilibrado térmico es mayor, están concebidos para controlar el régimen de presiones que crean los trenes en su movimiento en los túneles y en las estaciones, a través de pozos de admisión y equilibrado de aire y la inyección hacia los trenes a través del espacio bajo los andenes. Se trata de un sistema muy dinámico y poderoso que no permite la deposición en zonas públicas amplias del aire enfriado.

Sin embargo la extracción y absorción de calor por interacción directa con los usuarios mediante la termoactivación de las losas de los andenes es una técnica que no interfiere con los sistemas de aire existentes, que se integraría sin ocupar prácticamente espacio y que aprovecharía prácticamente todo el potencial térmico del intercambio agua-agua con el agua de drenaje.

No tenemos antecedentes de la utilización en el Metro de Madrid de sistemas radiantes para la refrigeración de las estaciones. El recurso radiante permitiría obtener temperaturas operativas optimas con temperaturas del aire mayores, es el sistema ideal para el contexto descrito (Figura 4-65).

La recuperación y reutilización del agua drenada por el Metro de Madrid forma parte de la Política Municipal de Gestión del Agua y, como hemos visto, objeto de estudio y experimentación por parte de Metro de Madrid. Hasta la fecha no que se ha podido identificar ninguna política orientada al aprovechamiento generalizado del potencial energético de este recurso aplicado al entorno próximo.

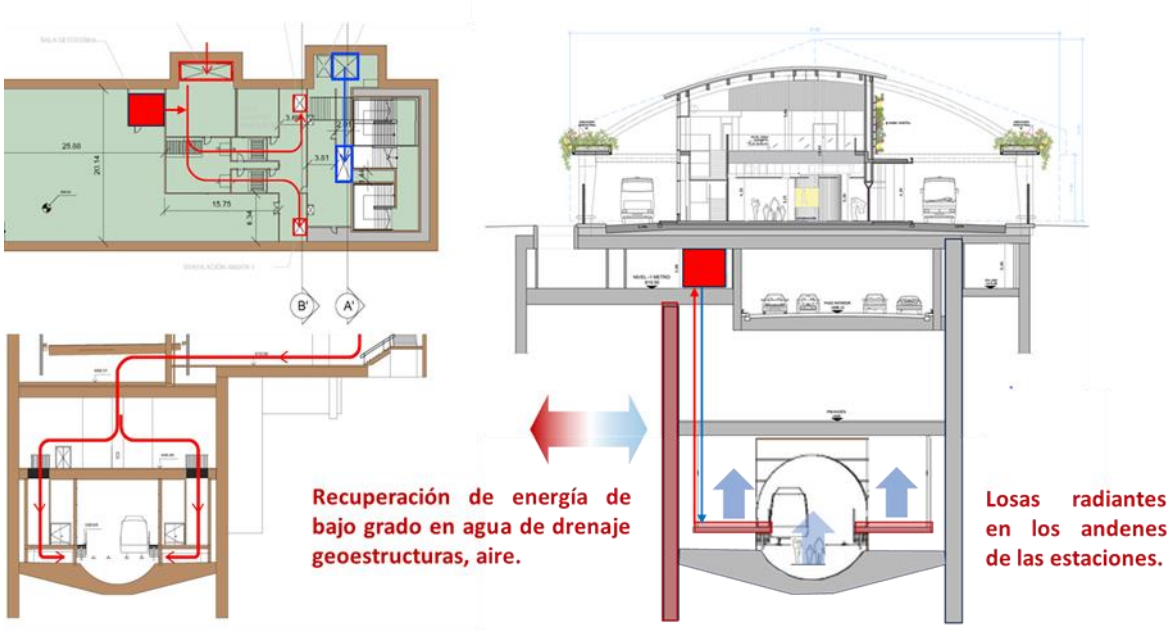


Figura 4-65. Sección esquemática de la solución de integración de sistemas de losa radiante en los andenes de las estaciones de Metro. [64].

En el sistema del metro, se produce un gran flujo de aire, y existe un intercambio significativo entre el interior y el exterior de la red subterránea que está directamente relacionado con el equilibrado de presiones y también con la expulsión del calor interno. Las tasas de renovación necesarias para mantener la calidad del aire interior solo representarían una pequeña parte de la gran cantidad de aire que los sistemas de extracción eliminan. Aunque el efecto pistón creado por los trenes se utiliza con frecuencia para expulsar aire caliente y traer aire fresco, se requiere una cantidad considerable de electricidad para los ventiladores utilizados y se consume una gran cantidad de energía al desechar este calor al exterior. Una tarea que se lleva a cabo tanto en invierno como en verano, sin aprovechar la energía del aire que es expulsado. Por esta razón, miles de millones de m^3 de aire caliente se desperdician y se invierten mucho dinero en eliminar un recurso que se trata como un residuo.

El sistema de ventilación del Metro de Madrid es un sistema conceptualmente simple, de inmersión forzada de aire en las estaciones de la red de Metro, extracción del aire usado por túneles por túneles adyacentes y uso de pozos compensatorios para mantener la presión del sistema. La red integral está compuesta por 640 pozos de ventilación forzada, 544 ventosas de compensación, 913 motoventiladores en servicio y 20 MW de potencia instalada. Con un consumo energético anual entre 20 y 30 GW. Así mismo. Desde 2017 está en

funcionamiento un sistema Gestor Inteligente de Ventilación (GIV) permite conocer en tiempo real cómo se mueve el aire de la red de Metro y ha permitido el 25 % de ahorro en consumo energético para ventilación, así como a redistribuir las cargas térmicas disponibles para su aprovechamiento energético (Figura 4-66) [65].



Figura 4-66. Esquema del sistema de ventilación del Metro de Madrid [65].

Modo de ventilación	Caudal
Ventilación forzada	Inmisión: 30.000 – 90.000 m³/h Extracción: 100.000 – 360.000 m³/h
Ventilación inducida Efecto pistón	7.000 – 25.000 000 m³/h Intervalo entre trenes
Ventilación natural	5.000 – 30.000000 m³/h Salto térmico interior/exterior

Tabla 4.11. Tipos de ventilación y sus caudales en Metro de Madrid [65].

La ventilación de los túneles es la mueve mayor caudal. Sin embargo también se tienen en cuenta la ventilación natural (el gradiente de densidades o efecto chimenea) o la ventilación inducida por el efecto pistón generado por el movimiento de los trenes (Tabla 4.11).

- A este respecto, el del aprovechamiento energético, y al de evitar que las enormes cantidades de calor generadas en los andenes de las estaciones en los procesos de frenado, arranque, y fricción de los trenes; nada mejor que confinar las zonas donde se producen este calor, que casi en un 60 % corresponden a las

propias estaciones. La extracción directa del aire a la altura de los motores, frenos y ruedas de los trenes, y el confinamiento con puertas de andén de los trenes en la estación no sólo evitan el calentamiento del aire en la estación sino que también permiten conducir la energía producida, a más alta temperatura, a dispositivos de intercambio para extraer la energía y darle aplicaciones útiles.



Figura 4-67. Extracción directa del calor que se genera en la parte inferior de los trenes. Fuente: Metro de Madrid.

- La separación de las zonas de trenes y pasajeros mediante puertas de andén, como se indica en la Figura 4-67, permite segregar las zonas con requerimientos ambientales, estaciones, de las que no los tienen, túneles, a la vez que se controla en origen la extracción del calor. Es una estrategia muy efectiva que apunta a replantear el concepto energético de la red existente.
- El flujo de aire en los túneles y estaciones es generado por el movimiento de los trenes. El movimiento que se produce en espacios estrechos causa diversos efectos debido a la presión excesiva o insuficiente que genera el movimiento de los trenes. En la extracción e impulsión de aire en los sistemas de ventilación del metro, se utilizan con frecuencia estos fenómenos, como el pistón y el Venturi. Las fluctuaciones en la velocidad y la dirección del movimiento generan cambios significativos en los índices de transferencia de calor entre el aire y el suelo. La energía cinética del aire en movimiento es una fuente que puede ser aprovechada.
- Los usuarios del sistema de metro realizan un gran número de desplazamientos, aportan energía a la red, influyen en los aspectos ambientales de la infraestructura subterránea y representan una gran masa en movimiento, conectados a diferentes dispositivos de transporte, elevación y control.

4.4.1. Caso 1. Intercambio mediante geoestructuras energéticas integradas en la estación de Metro de Conde de Casal.

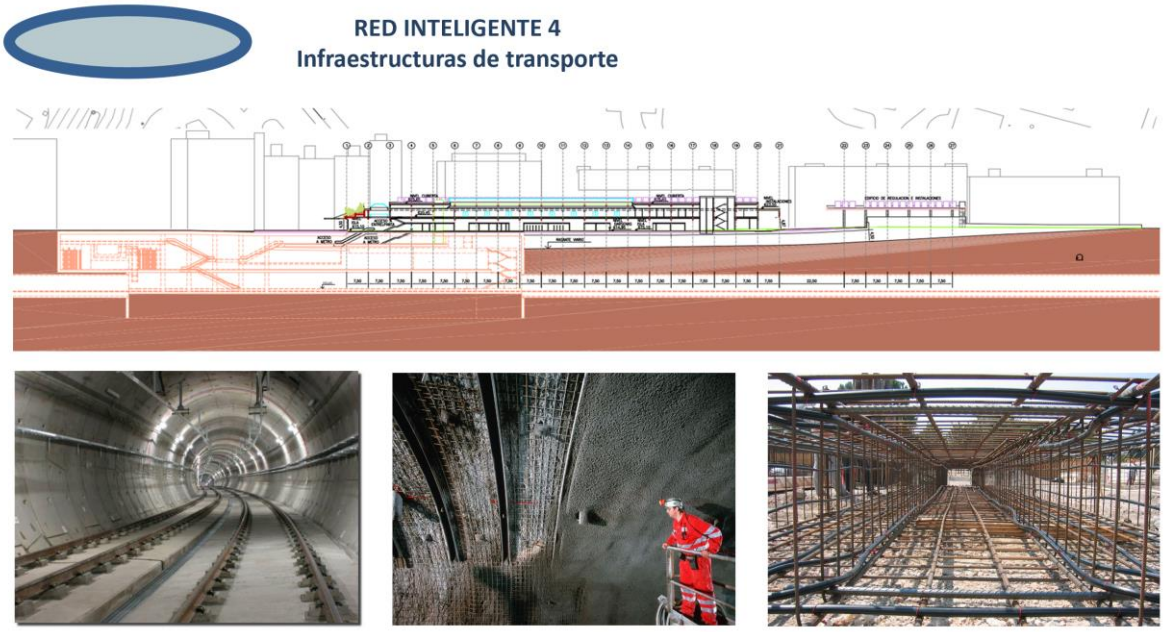


Figura 4-68. Red subterránea de infraestructuras de transporte.

En el Proyecto para la construcción de la nueva Línea 11 del Metro de Madrid, el organismo impulsor de la construcción de la infraestructura, la Dirección General de Infraestructuras de Transporte Colectivo de la Comunidad de Madrid, DGITC, identifico un punto con especial potencial para la el intercambio y el uso de recursos energéticos de bajo grado.

En la plaza de Conde de Casal se resuelve un punto de intercambio entre la red de Metro, estación de Conde de Casal, y la red de transporte colectivo en superficie, Intercambiador de Transporte de Conde de Casal. Ambas infraestructuras se construyen en la misma vertical, superpuestas (Figura 4-68), y por ello la DGITC, planteó que la activación térmica de las pantallas estructurales del Metro tenía que permitir el intercambio de energía térmica con el terreno y el suministro de recursos térmicos para la climatización de la estación de autobuses.

A lo largo de los años 2022 y 2023 se realizó el estudio preliminar para la integración de geoestructuras en el sistema de orden superior constituido por ambas infraestructuras de transporte, Estación de la Línea 11 de Metro e Intercambiador de Transportes de Conde Casal (Figura 4-69) [66]. La

consideración de que ambas infraestructuras forman parte de un solo supersistema integrado es fundamental para abordar la actuación con garantías de eficiencia.

Los componentes del supersistema de transportes de Conde de Casal son:

- Componente 1: Intercambiador de autobuses.
- Componente 2: Estación de Metro.
- Componente 3: Geoestructuras.
- Componente 4: Sistema de Gestión Integrada

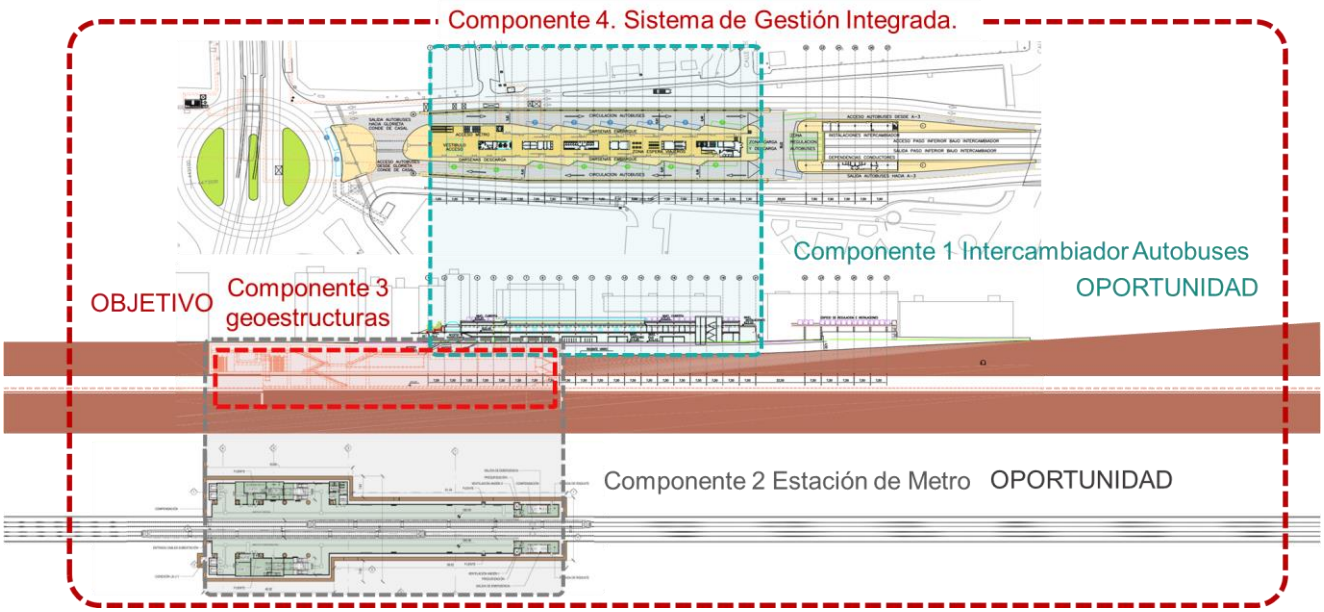


Figura 4-69. Componentes del sistema de integración de geoestructuras [66].

El objetivo de partida del proyecto era el desarrollo para la ejecución de los sistemas termoactivos integrados en la estructura enterrada de la nueva Estación de Conde de casal de la Línea 11, con los siguientes alcances:

- Intercambiador, red de enlace, conexión.
- Ingeniería de integración, operación y monitoreo.
- Proyectos de seguimiento y control para la eficiencia de los sistemas y para la evaluación del comportamiento termoestructural de los sistemas termoactivos.

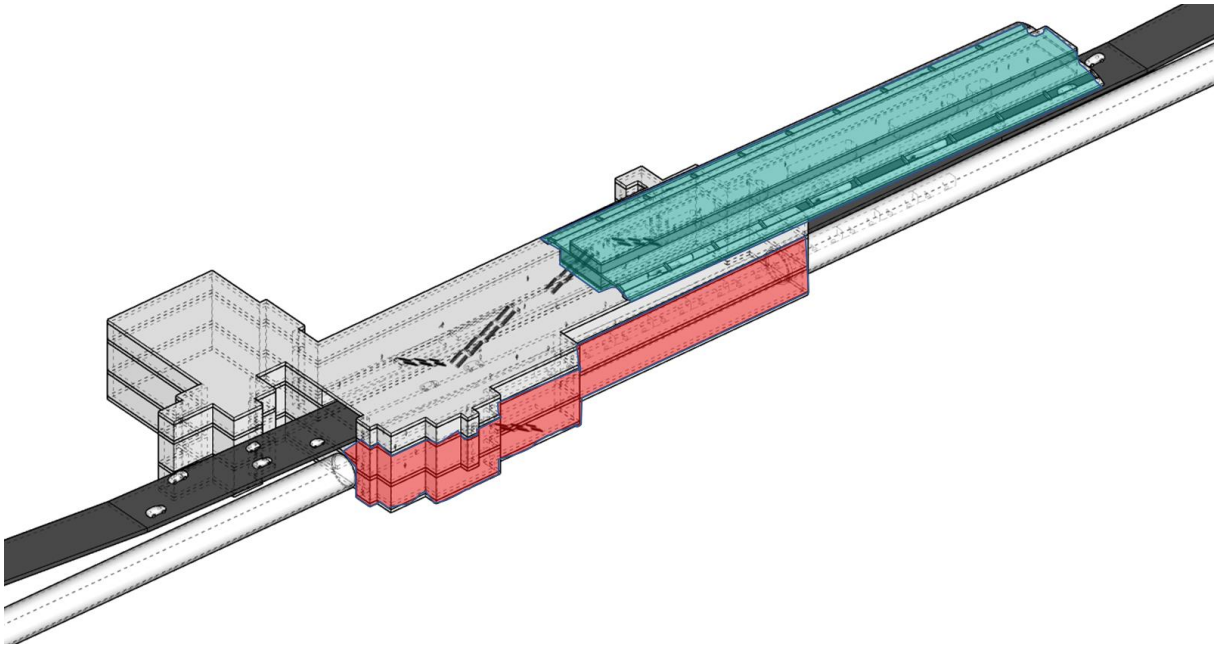


Figura 4-70. Esquema sistemas de intercambio geotérmico integrados en las estructuras enterradas de la nueva estación de Conde Casal.
Fuente: Instituto Europeo de Innovación - Eneres.

En una primera fase se han caracterizado todos los aspectos determinantes para la evaluación técnica y económica del sistema propuesto. En primer lugar las actuaciones para la termoactivación, recogida y enlace de la instalación en la estación de Metro:

a) Termoactivación y conexión del sistema geotérmico

- Estimación del rendimiento. Geotecnia, geotermia, hidrogeología. Sondeos en la estación de Conde de Casal.
    - Estudio de los parámetros que determinan el rendimiento del intercambio térmico. Composición, estructura, porosidad, nivel freático.
    - Estimación de rendimiento del sistema de muros pantalla Termoactivados.
- Estación de Metro de Conde de Casal. Termoactivación.
    - Estudio de los muros pantalla termoactivables (Figura 4-71). Niveles.
    - Diseño de los intercambiadores. Geometría, posición, conexión.
    - Red de enlace hasta el cuarto de geotermia
    - Cuarto de geotermia.

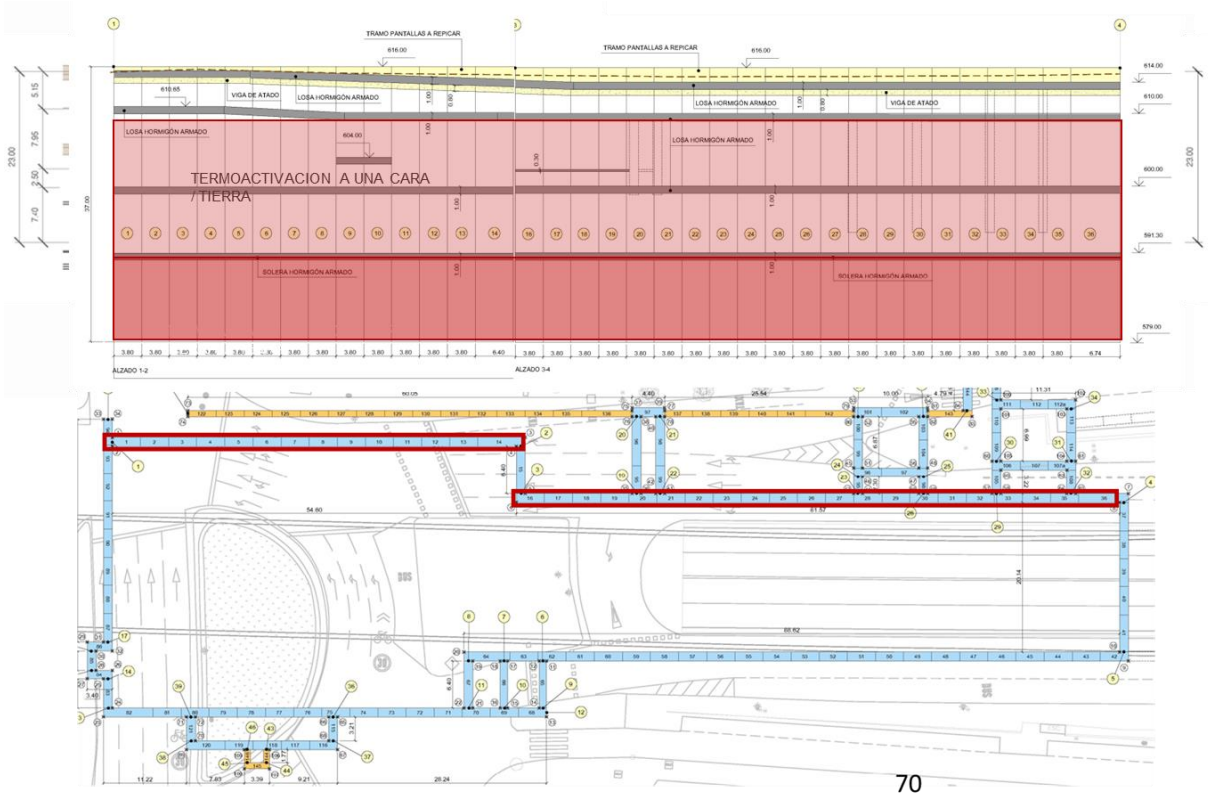


Figura 4-71. Muros pantalla sección termoactivada .Fuente: Instituto Europeo de Innovación - Eneres.

- Enlace con el intercambiador de transporte de Conde de Casal.
    - Enlace del sistema de Geoestructuras termoactivas desde el cuarto de geotermia del Prevestíbulo de Metro a la Sala Técnica del nivel -1 del Intercambiador.
    - Enlace con la sala técnica en la cubierta del edificio.

b) Termoactivación de los muros pantalla de la estación.

Ejecución de los muros de pantalla (Figura 4-72).



Figura 4-72. Imágenes de ejecución de muros pantalla de sección termoactivada. Fuente: Instituto Europeo de Innovación - Eneres.

c) Red de conexión de los sistemas de intercambio y conexión con la sala de geotermia en la estación de Metro.

Red de conductos en zonas altas de la pantalla. Red de conductos sobre el nivel de la losa del andén. Colectores de paso y colector terminal en la sala de geotermia (Figura 4-73).



Figura 4-73. Red de conductos en zonas altas de la pantalla, red de conductos sobre el nivel de la losa del andén, colectores de paso y colector terminal en la sala de geotermia. Fuente: Instituto Europeo de Innovación - Eneres.

d) Conexión con las salas técnicas del intercambiador de transportes

Enlace y conexión del sistema de Geoestructuras termoactivas desde el Cuarto de Geotermia del Prevestíbulo de Metro a la Sala Técnica del nivel -1 y la zona técnica en la cubierta del Intercambiador de transporte (Figura 4-74).

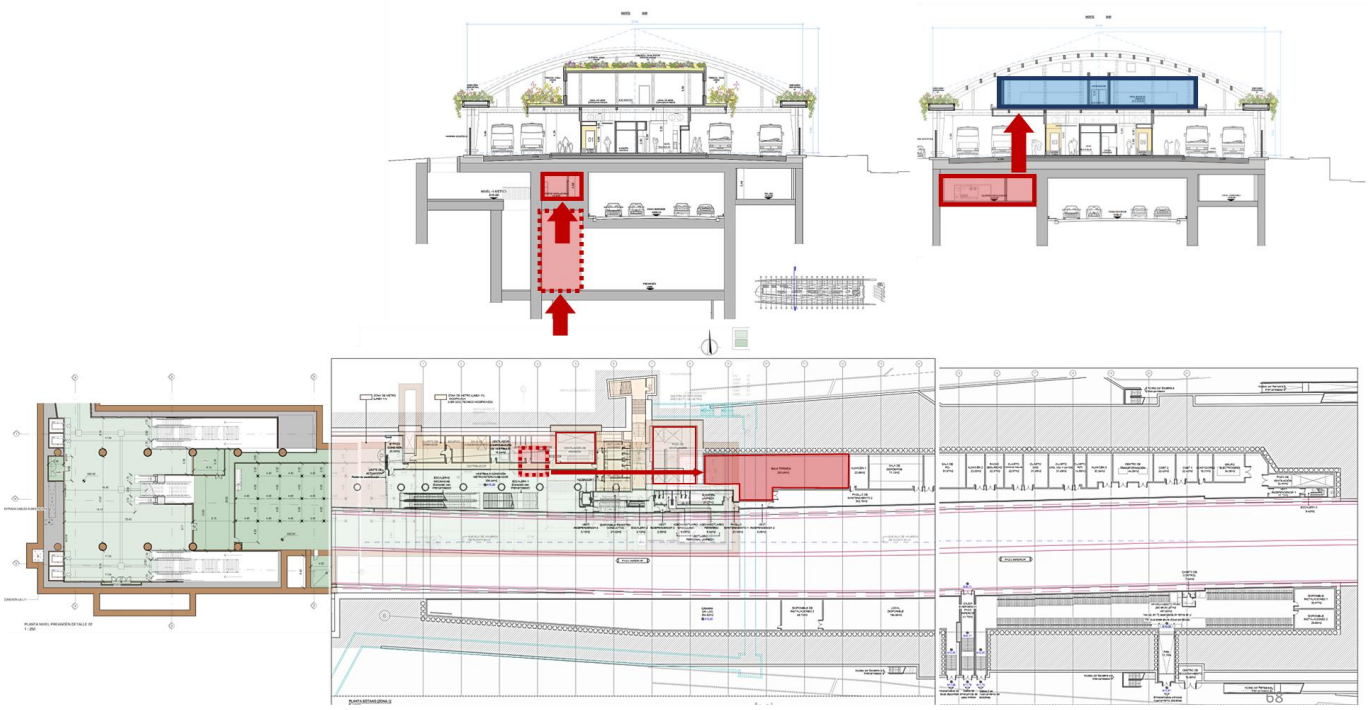


Figura 4-74. Esquemas de conexión con las salas técnicas del intercambiador de transportes. Fuente: Instituto Europeo de Innovación - Eneres.

Tras el estudio de las actuaciones de intercambio a través de las geoestructuras energéticas de la estación de Metro, se aborda el diseño de la integración del Intercambiador de Transporte. Las oportunidades de multiplicación de la eficiencia están vinculadas a la capacidad de los agentes de este proyecto, en particular de su promotor la DGITC de integrar adecuadamente a todos los agentes participantes, Metro de Madrid y Consorcio de Transportes de Madrid, CRTM, tutelar los procesos de desarrollo del trabajo, e implementar los procedimientos de integración en la gestión de los sistemas y la definición de las estrategias operativas.

La integración de agentes, procesos, sistemas y estrategias operativas, es una acción compleja que sólo puede ser tutelada por un agente con objetivos de orden superior al de los agentes integrados. En sí misma es una acción que se inicia en la fase de información de los proyectos y se proyecta a la tutela de la operación en el ciclo de vida, (Figura 4-75):

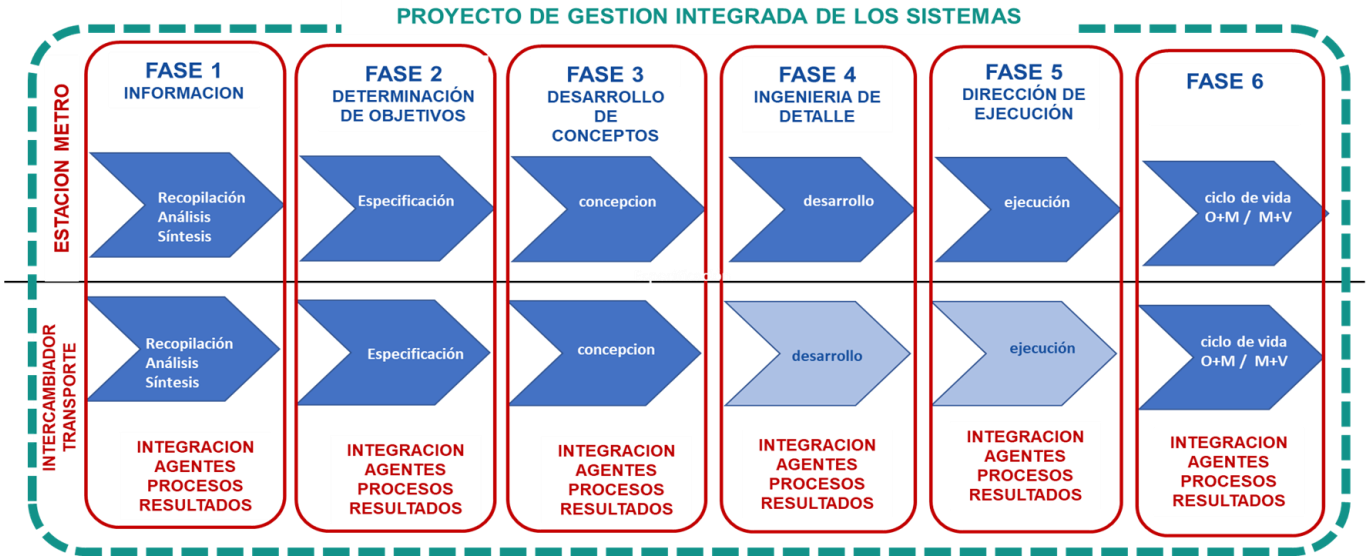


Figura 4-75. Esquema de la gestión integrada de los proyectos [66].

Rendimiento y eficiencia a través de estrategias de integración.

Los resultados, costes, rendimientos, eficiencia del sistema integrado están directamente vinculados al perfeccionamiento de la integración. El objetivo de integración que la DGITC ha establecido para este proyecto es el más alto.

Hacemos una relación sintética de las expectativas de resultados asociados a cada nivel de integración.

- **Integración alta**. Escenario integrado entre las dos instalaciones. Hibridación de sistemas, control y seguimiento integral.
  - Coste construcción. Equilibrado.
  - Coste operación. - 50% / - 60 %. Equilibrado.
  - Rendimiento SPF. 3 / 3,5.
  - Eficiencia. Confort/impacto. Óptima.

- **Integración media.** Escenario no integrado entre las dos instalaciones control y seguimiento integral.
    - Coste construcción. Equilibrado.
    - Coste operación. – 30% / -50 %. Equilibrado.
    - Rendimiento SPF. 3.

      Eficiencia. Confort/impacto. Bueno.
- **Integración baja**. Escenario de proyecto.
    - Coste construcción. Equilibrado.
    - Coste operación. – 10%. Inestable.
    - Rendimiento SPF. 2,5.
    - Eficiencia. Confort/impacto. Bajo.

e) Mejoras en los sistemas de clima y aire del intercambiador de transporte. Estrategias.

Un aspecto fundamental para el equilibrio y la eficiencia general del sistema es la adecuación de los sistemas de climatización y refrigeración del intercambiador de transportes al recurso de bajo grado que va a ser transferido desde los sistemas de intercambio integrados en las estructuras de la estación de Metro de Conde de Casal.

El proyecto de ejecución del Intercambiador de transportes tiene que ser modificado para incluir aspectos fundamentales para el equilibrio en sistemas de baja exergía, de concepción sistémica que incluya la instalación de Metro y especialmente concebidos para el régimen de temperaturas moderadas que emana del uso de energía térmica de bajo grado:

- Estrategias de regulación y equilibrio.
    - Capacidad de autoregulación y equilibrio dinámico.
        - Hibridación de sistemas geotérmicos y aerotérmicos.
    - Capacidad inercial del sistema.
        - Gestión geotérmica

- Sistemas termoactivos radiantes de clima en la losa de planta baja.
- Hibridación de sistemas de aire y sistemas radiantes.

- Capacidad Híbrida y flexible de producción.
  - Hibridación geotermia aerotermia.

- Sistemas integrados de control y gestión. Estrategias de eficiencia.
  - Estrategias de integración.
  - Estrategias de información y medida, mantenimiento, operación y monitorización.

Un esquema de principio básico (Figura 4-76) plantea una hibridación entre varios sistemas de temperatura moderada, geoestructuras, aerotermia inducida con aire residual atemperado, aerotermia directa, sistemas termoactivos de climatización, TABS, sistemas de almacenamiento inercial en varias escalas y atemperamiento del aire de renovación. Esta parte de la instalación cubre la práctica totalidad de la demanda energética del Intercambiador de transportes y, adicionalmente, prevemos dispositivos de apoyo para cubrir las puntas eventuales de demanda que puedan funcionar con temperaturas más extremas.

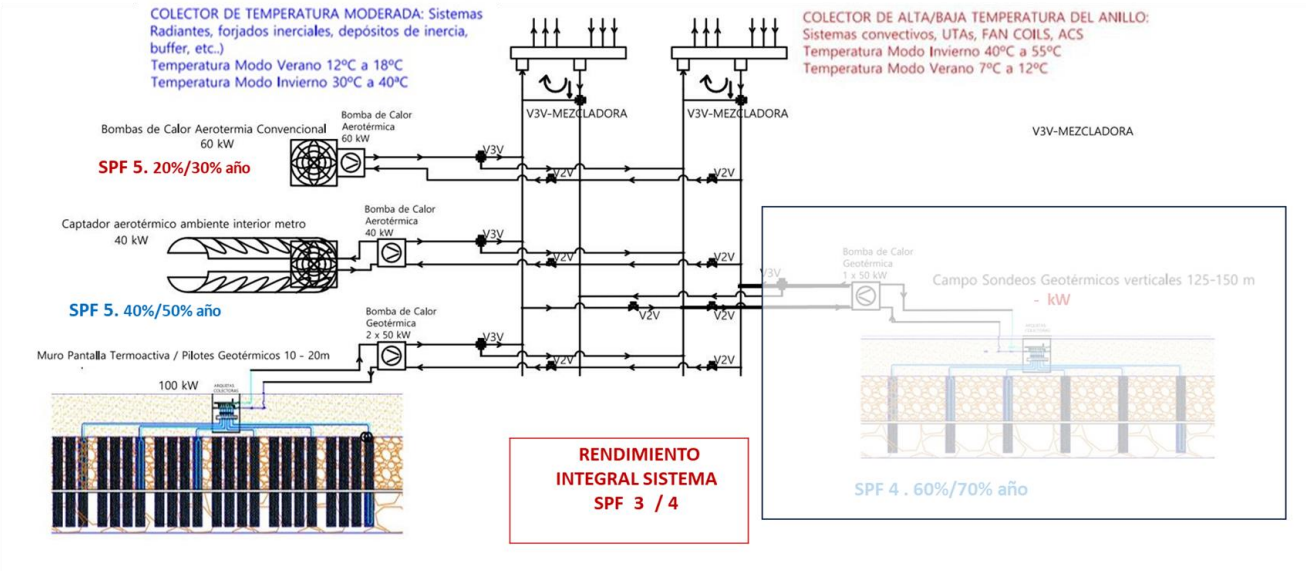


Figura 4-76. Esquema de mejoras en los sistemas de clima y aire del intercambiador de transporte. Fuente: Instituto Europeo de Innovación - Eneres.

4.5. Intercambio de energía con la infraestructura de túneles



Figura 4-77. Redes Inteligentes 5. Recursos de la infraestructura de movilidad enterrada. Fuente: Propia.

4.5.1. La energía geotérmica en túneles

Los túneles son probablemente la geoestructura energética menos investigada en nuestro país, no así en los de nuestro entorno próximo, pero en determinados contextos urbanos suponen un potencial recurso fundamental en el aporte de recursos de bajo grado a través del intercambio geotérmico, el intercambio con aguas de drenaje o intercambio térmico con el aire.

4.5.2. El aprovechamiento geotérmico en los túneles

El aprovechamiento de la SGE obtenida de las estructuras de los túneles resulta de la integración entre la ingeniería de transporte y la explotación de fuentes renovables, generando notorios beneficios energéticos.

Dado que, en términos generales, solo se requiere implementar un pequeño conjunto de acciones para esta aplicación, es posible lograr importantes sinergias y beneficios económicos y comerciales significativos.

El gestor del túnel puede aprovechar las técnicas de extracción e intercambio de energía geotérmica para generar más valor añadido. Además, podrá obtener beneficios económicos al utilizar este recurso energético asequible y eficiente, al mismo tiempo que reduce su consumo de energías primarias y disminuye las emisiones de carbono.

La energía utilizada en DHC proviene del intercambio de calor con el terreno, con el agua drenada de los túneles y con el aire que fluye a través de ellos. Esta energía puede ser aprovechada de diversas formas en situaciones específicas.:

- Proporcionar calor y refrigeración a inmuebles, ya sean de nuestra propiedad o de otros.
- Evitar que se forme hielo en áreas expuestas como puentes, plataformas y escaleras mediante medidas preventivas.
- Refrigerar dispositivos técnicos, centros de datos, equipos electrónicos, maquinaria, conductos para cables, entre otros.
- Calefactar puntos específicos y otras instalaciones importantes cuyo funcionamiento se puede afectar debido a las bajas temperaturas.

En la década de los 80' se empezó a utilizar las cimentaciones profundas para el intercambio geotérmico, en Centroeuropa principalmente para extraer calor del terreno, mediante la colocación de conductos intercambiadores de calor en los elementos de hormigón que se encuentran en estrecho contacto con el terreno, primero en las losas de cimentación, más tarde en pilotes hincados prefabricados y finalmente en pilotes perforados y ejecutados "in situ" y en muros pantalla, con excelentes resultados en la aplicación del intercambio geotérmico con bomba de calor tanto a la calefacción como a la refrigeración de edificios [67].

El principio básico "para el uso de la energía geotérmica es la estabilidad térmica del terreno en reposo a una profundidad de aproximadamente 10 a 15 m. En la mayoría de las zonas climáticas europeas, esta temperatura varía entre 10 y 15 °C, y permanece prácticamente constante hasta una profundidad de aproximadamente 50 m. La mayoría de los túneles urbanos discurren a profundidades a partir de este rango [67].

Las bombas de calor o máquinas de refrigeración están conectadas en una posición intermedia entre el intercambiador embebido en los elementos de hormigón (circuito primario) y el sistema de calefacción y refrigeración del edificio (circuito secundario) y ajustan la temperatura al nivel que requieren los sistemas de climatización.

Como ya se ha comentado, una instalación geotérmica tiene una eficiencia variable (rendimiento estacional) de entre 3,5 y 5, lo que significa que, aproximadamente, 1/4 de energía eléctrica y 3/4 de energía geotérmica generan 4/4 de energía térmica aplicable directamente a la climatización [67].

Se plantean dos posibles regímenes de utilización de la energía geotérmica intercambiada a través de cimentaciones termoactivas [67]:

- Un régimen en el que se realiza exclusivamente de extracción o inyección de energía desde el terreno o en el terreno.
- Un régimen de intercambio estacional en el que se da la alternancia de inyección y extracción de energía para la refrigeración o la calefacción.

En el modelo de extracción exclusiva de energía geotérmica el flujo de energía tiene lugar solamente en una dirección, por ejemplo, la extracción de calor para la calefacción en invierno. En este caso el mantenimiento del equilibrio a lo largo de años de explotación requiere de la implementación de estrategias de hibridación con otros usuarios con demanda complementaria o con otros sistemas, que permitan aprovechar recursos bioclimáticos para disipar o captar calor desde o hacia el terreno y mantenerlo siempre en condiciones térmicas óptimas para la cobertura de la demanda.

En el modelo de operación estacional se utiliza la inercia termodinámica del terreno para almacenar energía térmica en el suelo para su uso posterior con un flujo energético inverso.

En consecuencia la operación estacional de los sistemas de intercambio geotérmico puede desarrollar una situación de equilibrio en el intercambio energético con terreno durante un periodo completo de calefacción/refrigeración, a lo largo de un año, y por extensión a lo largo del Ciclo de Vida del sistema. Este intercambio nunca es perfecto y además reviste un carácter variable en función de las condiciones variables de las cargas de uso y del clima, luego las estrategias de hibridación con otros sistemas subterráneos, aguas residuales o aéreos, aerotermia, permiten en casos de alta exigencia cubrir la demanda con mucha eficiencia.

Un sistema de refrigeración geotérmico extrae calor del edificio a través de un sistema de refrigeración basado en el uso de agua, o híbrido agua/aire, que puede ser integrado en los techos, las paredes y los suelos de los edificios. El dispositivo de refrigeración actúa como una bomba de calor reversible y la energía absorbida se almacena en el terreno. Los sistemas de climatización diseñados para trabajar con temperaturas de servicio moderadas pueden trabajar en la modalidad de “free cooling” o “free heating”, es decir la recirculación del agua del circuito primario y el secundario sin aporte de energía primaria a través de la bomba de calor, con el

único consumo de las bombas de recirculación. Es una técnica que al día de hoy ha sido ampliamente aplicada y testada en cientos de instalaciones en edificios y que hoy se puede considerar completamente madura.

Los túneles como cualquier estructura geotécnica se pueden activar térmicamente integrando tuberías de polietileno en los elementos de hormigón. El calor del terreno se transfiere a los edificios o viceversa a través de bombas de calor [68].

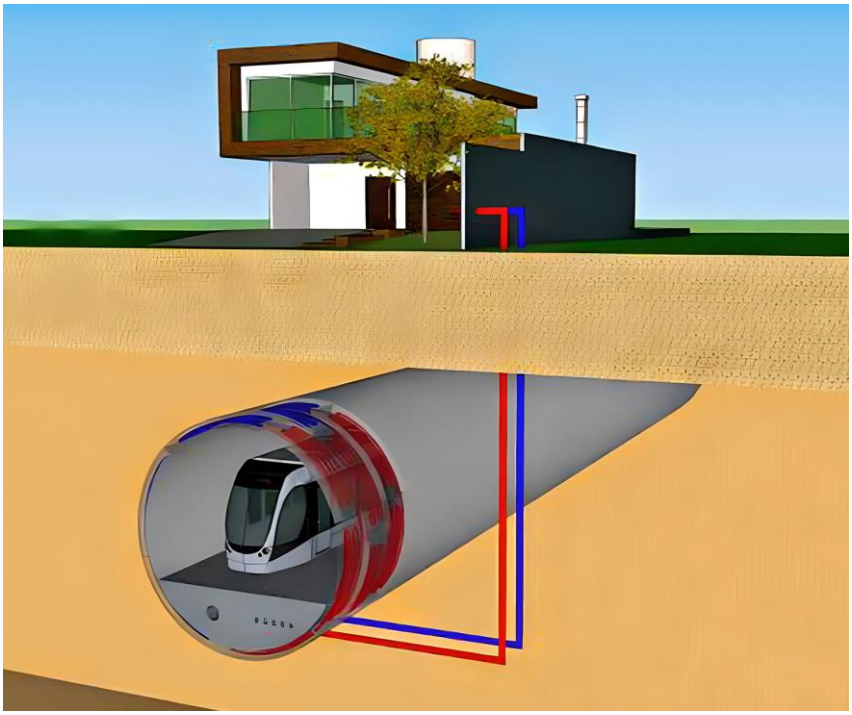


Figura 4-78. Esquema conceptual de la activación térmica del revestimiento segmentado del túnel y su conexión a un sistema de bomba de calor en el edificio superior [68].

Recientemente ha aumentado mucho el interés en desarrollar tecnologías para termoactivar el revestimiento de túneles ya que su superficie de contacto con el suelo es mucho mayor en comparación con los pilotes y losas de base. El calor intercambiado por el revestimiento con el terreno puede aplicarse a diversos usos: desde calentar y enfriar estaciones de metro, subestaciones y edificios cerca del túnel, o calentar su propio revestimiento; hasta deshielo de tableros de puentes, rieles y rutas; incrementando la seguridad y durabilidad de las instalaciones [69].

Hace ya 25 años que los ingenieros han estudiado la aplicación de estas técnicas en los túneles urbanos donde se pueden activar cantidades de terreno considerablemente mayores que las que se utilizan en el intercambio geotérmico

con las cimentaciones de los edificios. Además los túneles con una fuerte carga de uso pueden inducir temperaturas significativamente mayores al terreno circundante y logra una mejora muy significativa del rendimiento del sistema geotérmico. En cualquier caso incluso los túneles que discurren a baja profundidad, como por ejemplo los túneles del metro, permiten un aprovechamiento muy rentable por encontrarse en un contexto urbano con multitud de posibles aplicaciones.

Las diferentes condiciones y características locales de los túneles los clasifican por sus condiciones térmicas en túneles "fríos" y "calientes". En los túneles fríos, la temperatura del aire suele ser (alrededor de 15 °C) durante todo el año y con una frecuencia moderada de paso de trenes, por lo que la temperatura en el túnel no aumenta significativamente. Este tipo de túnel suele tener un gran diámetro interior, entre unos 10 a 12 m. Las temperaturas en el túnel sólo tienen un efecto limitado sobre la temperatura del terreno colindante. Los túneles de carretera también pueden considerarse en esta categoría. Por otro lado, los túneles calientes suelen tener temperaturas internas elevadas. Los túneles urbanos (metros) con un diámetro interior normal de 7 m aproximadamente, pueden tener temperaturas alrededor de los 30 °C en verano. Si hay un gran número de estaciones en la red, y una frecuencia rápida de trenes se puede provocar un aporte adicional de calor al frenar y al arrancar. Esto aumenta la temperatura del aire en el túnel, que a su vez incrementa la temperatura del terreno. Los túneles alpinos profundos podrían calentarse gracias al aporte térmico del propio terreno, que en esas profundidades puede alcanzar temperaturas de entre 30 °C y 50 °C [68].

Los túneles con una sobrecarga elevada pueden tener una temperatura significativamente más alta que la del terreno adyacente, lo que puede permitir un mejor rendimiento del sistema geotérmico. No obstante, los túneles poco profundos (como los túneles de metro) también pueden utilizarse de forma rentable para la extracción de calor geotérmico gracias a la diversidad de posibilidades que su carácter urbano le otorga. La instalación de dispositivos de intercambio geotérmico en la estructura de hormigón de un túnel es diferente para túneles a cielo abierto y los túneles excavados. Para túneles a cielo abierto se pueden utilizar los métodos desarrollados para cimentaciones profundas, (instalando los tubos absorbentes en pilotes perforados, en muros pantalla y dentro o debajo de las losas de hormigón). Sin embargo, el uso de túneles excavados como elementos intercambiadores de calor sigue siendo un reto para la ingeniería. En la parte interior del túnel se

pueden instalar sistemas tradicionales aplican en la termoactivación de cimentaciones profundas, losas, pilotes y pantallas. Sin embargo, para el revestimiento del túnel ha sido necesario desarrollar tecnologías totalmente nuevas [70]. Recientemente se han desarrollado técnicas para integrar los dispositivos en la obra de los túneles como el forrado de los túneles una vez ya construidos con sistemas de intercambio basados en geotextiles o paneles de intercambiadores flexibles.

A partir de la investigación realizada por el Politecnico di Torino desde 2013, se desarrolló una patente para un segmento de túnel de energía prefabricado, denominado ENERTUN (Energy Tunnel Segmental Lining) (número de patente italiana: 102016000020821, número de patente europea: 16834047.9). Esta tecnología consiste en un revestimiento segmentado prefabricado para la construcción de túneles mediante tuneladoras. En fábrica, un circuito de tuberías es instalado en cada segmento antes del vertido del hormigón. El intercambio de calor con el terreno se realiza a través de un fluido que circula por la red de tuberías. Cada segmento se conecta al segmento adyacente mediante conexiones hidráulicas, formando un revestimiento en forma de anillo. Las tuberías se posicionan para que su dirección principal sea la del eje del túnel. El primer prototipo se instaló en la Línea 1, del Metro de Turín. Con el segmento energético de Enertun se pueden reducir las pérdidas de carga de un 20 % a un 30 % en cada anillo y aumentando su eficiencia energética hasta un 10 %. Así mismo, este mismo segmento puede utilizarse para enfriar el entorno del túnel [68], [69].

Adicionalmente, los túneles perforados con tuneladora poseen amplias galerías de servicio y mantenimiento, bajo la losa de rodadura de los vehículos, y este espacio ventilado y atemperado constituye un poderoso sistema de atemperamiento del aire por intercambio térmico tierra-aire con múltiples aplicaciones a la edificación.

La activación térmica de revestimientos de túneles supone una gran oportunidad para extraer calor del terreno con grandes ventajas económicas y medioambientales, ya que la integración del intercambiador en la estructura geotécnica del túnel supone una importante reducción de costes de ejecución respecto a una instalación geotécnica tradicional. La mejor aplicación del uso de túneles como intercambiadores de calor con el terreno es únicamente en las ciudades. El calor extraído de los túneles se puede utilizar para calentar los edificios vecinos y la planta de generación se puede integrar en sistemas de calefacción urbana. Es necesaria una planificación urbana cuidadosa para optimizar la interferencia entre diferentes sistemas y la integración con las redes

de distribución. Las ciudades que sean capaces de afrontar y resolver este desafío podrán beneficiarse de una mejor calidad de vida [69].

4.5.3. El aprovechamiento térmico del agua drenada por los túneles

Como se ha comentado al referirse a los túneles urbanos de la red enterrada del metro, los túneles y las galerías que atraviesan los macizos rocosos, zonas próximas a cursos de agua subterránea, o que drenan agua procedente de los sistemas urbanos, en el subsuelo de nuestras ciudades, canalizan un importante volumen de agua subterránea atemperada. Estas aguas son evacuadas hasta las instalaciones de recogida y bombeo en puntos específicos de las galerías en contacto con el exterior o en la entrada de las galerías y, a continuación, en la mayoría de los casos, son vertidas en los sistemas generales de evacuación o en cursos de agua.

Dependiendo de la naturaleza hidrogeológica, del espesor y del volumen del terreno que envuelve el túnel, la temperatura agua interceptada puede estar en torno a los 15 ºC a 18 ºC, o más. Asociadas a elevados caudales, este potencial de recursos geotérmicos es un recurso muy interesante para cubrir las necesidades de calor, o para permitir disipar el calor residual de los potenciales consumidores que se encuentran cerca de las salidas de los túneles y de las zonas de captación y vertido del agua de drenaje de los mismos.

La temperatura en un túnel es influenciada por diferentes factores, como el grosor de la capa de tierra, la topografía y las características térmicas de los distintos estratos que atraviesa. Debido a esto, el agua que ingresa a los túneles y galerías se encuentra más cálida en el centro y más cercana a las temperaturas exteriores en los extremos.

Es necesario considerar el uso de la energía geotérmica desde el inicio de la construcción o la renovación del túnel, ya que si se implementan medidas constructivas como conducciones alternativas a través de drenajes separados o conductos aislados, se puede la eficiencia energética de las aguas subterráneas.

La eficiencia energética de las aguas subterráneas se puede mejorar mediante medidas constructivas, como pude ser conducirlas a través de un drenaje separado o a través de un conducto aislado reservado a tal fin. Por eso las condiciones de utilización de la energía geotérmica se deben tener en cuenta desde el inicio de la construcción o la renovación de un túnel.

El agua subterránea drenada por túneles muy profundos, donde las temperaturas del terreno pueden ser de hasta 30 ºC, se puede utilizar para calentar los edificios cercanos o agrícolas instalaciones y servicios. Las temperaturas registradas y el caudal de agua que llega a los accesos de algunos de estos túneles han sido durante muchos años un incentivo para utilizar esta energía geotérmica como valioso recurso para la calefacción, a nivel local.

4.5.4. Caso 1. Recuperación y uso de energía de la galería de servicio del túnel del Bypass de Calle 30. Madrid

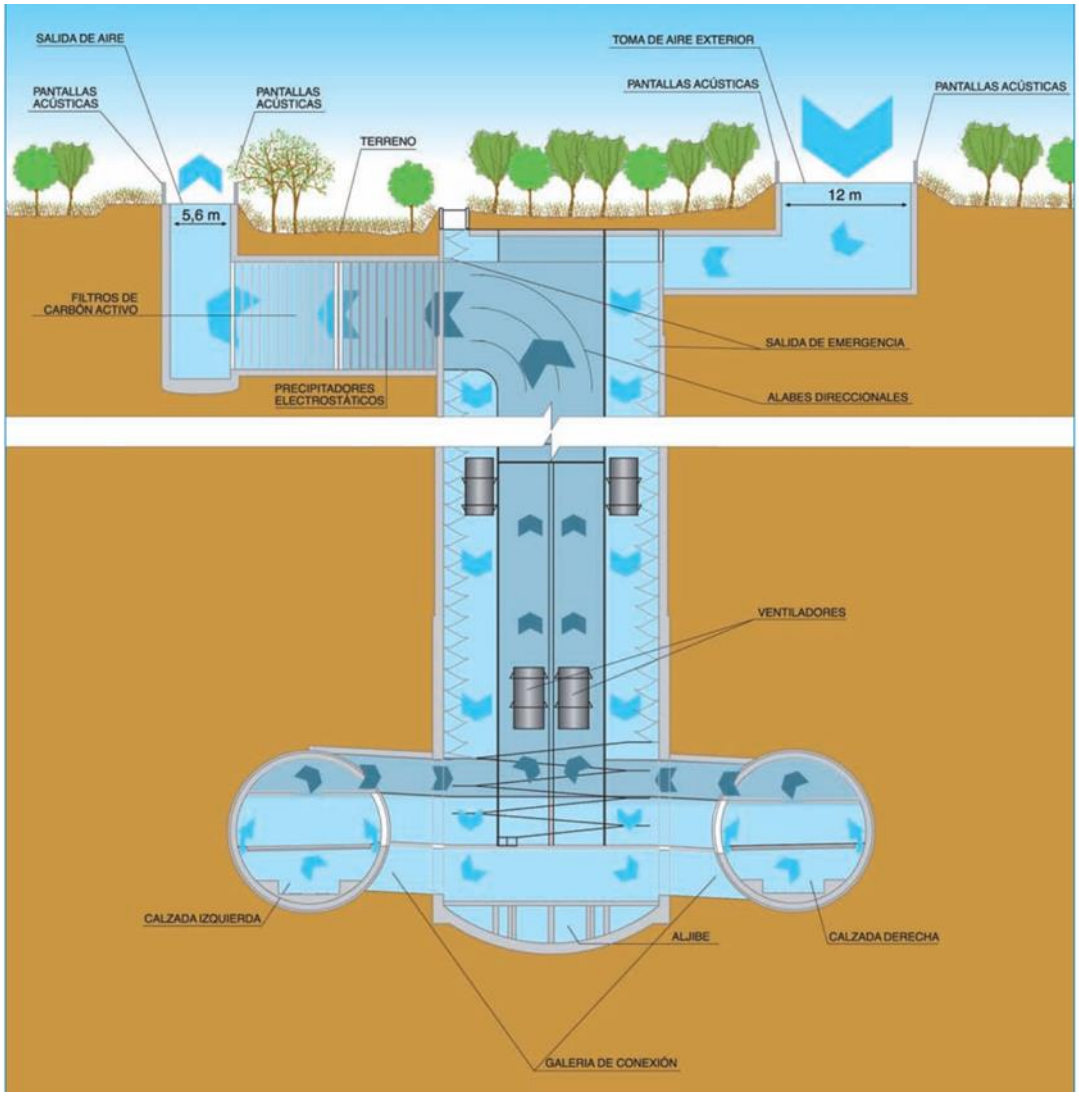


Figura 4-79. Esquema en sección de los túneles del bypass sur de Calle 30. Fuente: Madrid Calle 30.

Los túneles bypass de la red de Calle 30 (C30) en Madrid representan un enorme intercambiador de energía con un gran potencial geotérmico.

En este sistema subterráneo, existe la oportunidad de recuperar una cantidad significativa de energía generada por:

- El calor generado por los motores y los frenos de los vehículos que atraviesan los túneles se transmite en grandes cantidades a la red subterránea.
- En los túneles y en las instalaciones, se utilizan sistemas de ventilación para extraer una parte del calor y renovar el aire. Estos sistemas son esenciales para el funcionamiento adecuado del sistema, ya que también se encargan de la iluminación, el control y la gestión. En la mayoría de los casos, los dispositivos de refrigeración reducen de forma considerable el impacto del calor remanente en las personas, los equipos y el ambiente. Estos dispositivos son capaces de extraer el calor del aire presente en los espacios y salas técnicas.
- Tanto la ventilación como la refrigeración requieren una cantidad considerable de energía.
- Parte del calor se reparte a través de los túneles y se acaba transfiriendo al suelo a medida que éstos se calientan y acumulan energía.
- Los vehículos desplazan el aire, el cual se desplaza a alta velocidad en el interior de los túneles.
- Los túneles son un sistema de energía que tiene la capacidad de absorber grandes cantidades de energía al mismo tiempo que libera una gran cantidad de energía remanente.
- Los túneles se interponen a los cursos naturales del sistema hidrogeológico y las rutas de drenaje y filtración natural del agua, lo cual resulta en la captura de grandes volúmenes de agua de infiltración. Una considerable porción de esta agua se encuentra a una temperatura moderada debido al suelo. Grandes cantidades de agua son drenadas, recolectadas y bombeadas sin que se haga uso de su energía.

La infraestructura subterránea de los túneles de C30, que incluye sistemas de ventilación, drenaje, estructuras auxiliares y equipos de transformación de energía, se encuentra en un entorno urbano, climático, hidrogeológico y de uso que determina su capacidad para funcionar como un sistema de intercambio de energía (Figura 4-79).

La condición de "contorno" de sistema se prestan para muchas posibilidades:

- La red C30 es una red de generación de energía distribuida que tiene el potencial de ser comparada con una nube extensa de posibles consumidores. Su estructura en red facilita la recuperación de energía, convirtiéndola en una opción muy rentable.
- El uso de túneles presenta una gran oportunidad para el intercambio de energía. Esta energía puede ser aprovechada tanto para satisfacer las necesidades de calefacción y refrigeración de los propios túneles y espacios habitables, como para proporcionar una fuente de energía de bajo grado para la climatización y acondicionamiento de edificios e infraestructuras cercanas.



Figura 4-80. Localización de los proyectos piloto realizados en los túneles del Bypass de C30 [71]

En el año Madrid Calle30, empresa gestora de la infraestructura de túneles de Calle30, acometió la primera etapa de un plan para aprovechar recursos energéticos de bajo grado procedentes de la infraestructura enterrada.

La primera etapa (Figura 4-80). Se han llevado a cabo pruebas piloto en la infraestructura de la C30 y se definieron las primeras actuaciones a realizar:

a) La evaluación del potencial energético de las estructuras e instalaciones subterráneas presentes en el sistema C30

- La evaluación de la capacidad de combinar sistemas termoactivos y geotérmicos en proyectos de construcción o renovación de edificios y espacios en el ámbito de C30, utilizando intercambiadores instalados en las estructuras de los túneles.
- El estudio de la posibilidad de generación de energía a partir del intercambio con las redes de los sistemas de drenaje.

- El estudio de la posibilidad de generar energía a partir del intercambio con el aire liberado de los túneles.
- La valoración del aprovechamiento del potencial de generación de energía utilizando la termoactivación de secciones de túneles o estructuras subterráneas, convirtiéndolas en intercambiadores geotérmicos.
- La identificación de los ámbitos de Utilización:
    - Refrigeración de los equipos e instalaciones del sistema técnico de C30 mediante el uso de sistemas de intercambio térmico y geotérmico que aprovechan el agua de drenaje y el aire de los túneles para su enfriamiento.
    - La utilización de la geotermia y la energía proveniente del aire y el agua drenada de los túneles para calentar los edificios públicos y privados ubicados en el área cercana a la trayectoria de la carretera C30.

b) Actuación piloto

El proyecto piloto realizado (los resultados del primer ciclo de monitorización arrojaron unos porcentajes de ahorro entre el 65 % y el 80 %) implementó medidas de ahorro de energía que consistieron en la implantación de un sistema de refrigeración mediante aire captado en la galería de servicio de los túneles, en paralelo y como alternativa al sistema de refrigeración por compresión actualmente instalado en dos salas técnicas en cada Centro de Transformación, CT (Figura 4-82, Figura 4-83) [71].

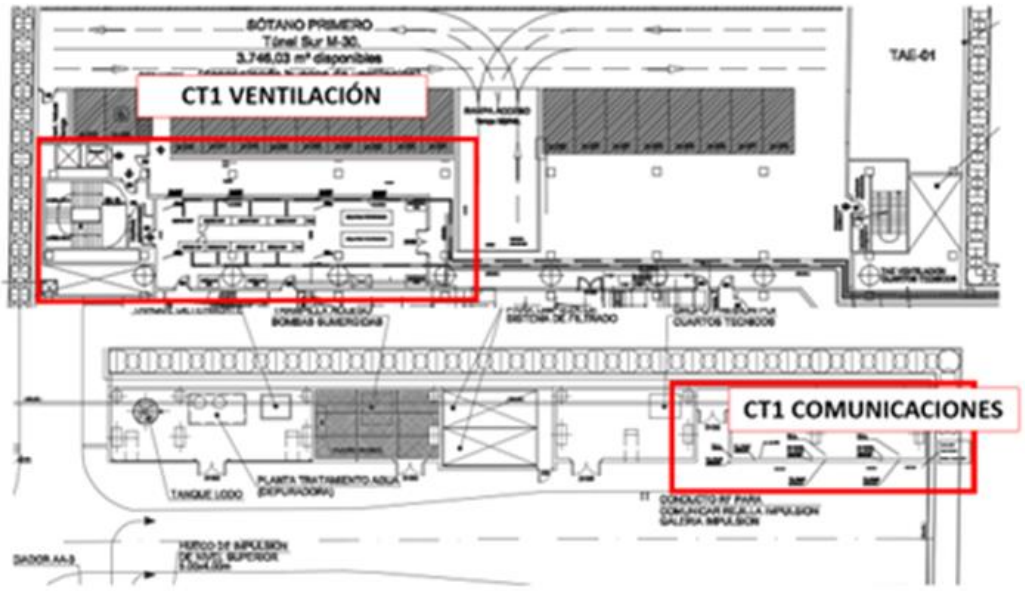


Figura 4-81. Ubicación 1 de los CT de la prueba piloto [71].



Figura 4-82. Ubicación 2 de los CT de la prueba piloto [71].

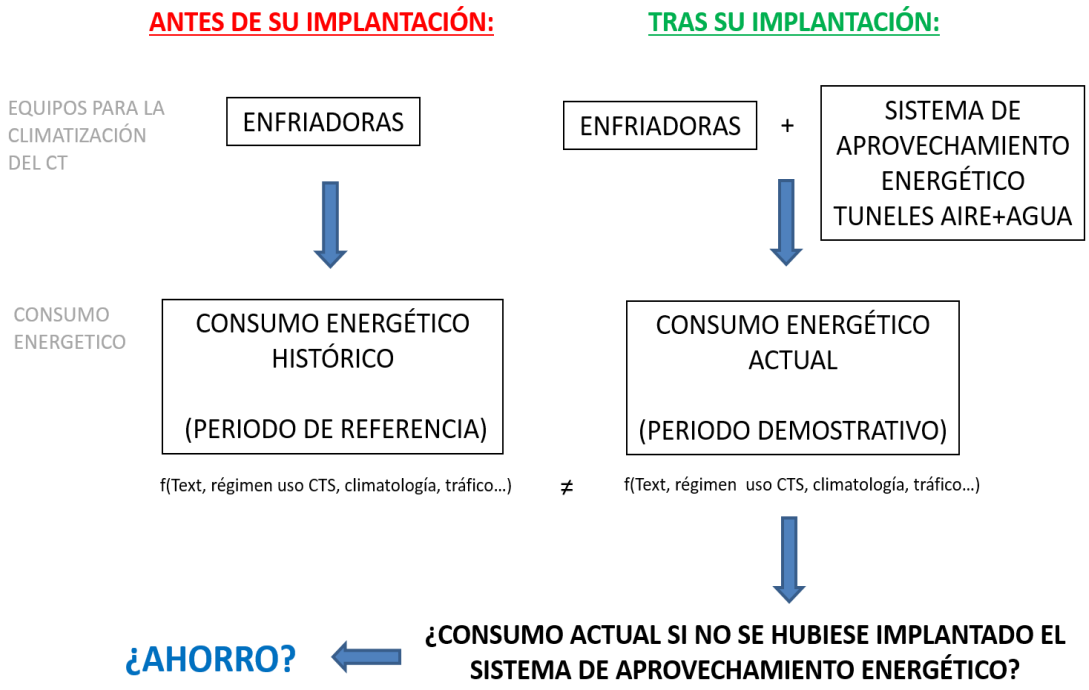


Figura 4-83. Esquema conceptual de las acciones a implementar en el proyecto piloto para C30 [71].

Este sistema alternativo introduce aire de la galería de emergencia que habitualmente está a menor temperatura, 19 ºC monitorizados, que la consigna de refrigeración de las salas técnicas, pudiendo refrigerar en condiciones normales de uso dichas estancias mediante la introducción de un caudal suficiente de aire, sin

necesidad de que entren en funcionamiento los sistemas de generación de frío por compresión.

POTENCIA Y ENERGÍA OBTENIDA DEL TRÁFICO DE COCHES

Tramos			Av. Portugal	Tramo Río I	Tramo Río II	Tramo Río III	Tramo Río IV	ByPass Sur	Embajadores	Nudo Valencia
v [km/h]	= velocidad en el túnel	=	70,00	70,00	70,00	70,00	70,00	70,00	70,00	70,00
L [m]	= longitud del túnel	=	1.306,00					4.200,00		
t [h]	= t permanencia en el túnel	=	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,06	0,00	0,00
P [kW/coche]	= potencia disipada/coche	=	50,00	50,00	50,00	50,00	50,00	50,00	50,00	50,00
N [coches/día]	= nº coches	=	108.500,00					80.000,00		
Ecoches [kW h/día]			101.215,00	0,00	0,00	0,00	0,00	240.000,00	0,00	0,00
Horas uso [24h/día]	= 24									
Pcoches [kW]			4.217,29					10.000,00		

POTENCIA OBTENIDA A TRAVÉS DE LOS CERRAMIENTOS DEL MURO

Tramos		Av. Portugal	Tramo Río I	Tramo Río II	Tramo Río III	Tramo Río IV	ByPass Sur	Embajadores	Nudo Valencia
H [m]	= Altura zona circulación	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00
R [W/m2]	= Ratio de potencia muro	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00
A [m2]	= Area de intercambio	13.060,00	0,00	0,00	0,00	0,00	42.000,00	0,00	0,00
Potencia [kW]		261,20	0,00	0,00	0,00	0,00	840,00	0,00	0,00

Figura 4-84. Recursos disponibles en el sistema de C30. Fuente: Eneres

La potencia máxima de enfriamiento en la refrigeración alternativa propuesta depende de la variación de temperatura entre la sala técnica que necesita refrigerarse y la galería, así como del flujo de aire máximo que se puede dirigir. En caso de que no sea adecuada para lograr la temperatura deseada en el local técnico.

Para asegurar el funcionamiento adecuado de los dispositivos eléctricos, en situaciones extremas se activa el sistema de refrigeración mediante compresión convencional, que por otro lado es el ya existente y no se elimina.

Los ventiladores utilizados en los túneles para admitir y expulsar aire exterior tienen una alta potencia nominal, llegando hasta los 630 kW. Con el objetivo de evitar que los ventiladores funcionen a plena capacidad, se han instalado variadores de frecuencia que regularmente los hacen operar al 30 %, a menos que se presente una situación de emergencia. Esta capacidad de funcionamiento variable ha resultado en un significativo ahorro de energía. Estos dispositivos requieren refrigeración para su buen funcionamiento.

El desempeño de estos inversores de frecuencia es notablemente alto. Sin embargo, aunque las pérdidas de energía en términos porcentuales sean bajas, debido a la alta potencia, la cantidad total de energía perdida y liberada en la sala también será elevada. También, es importante que la sala mantenga una temperatura estable para evitar el deterioro de los variadores de frecuencia. Por lo tanto, es necesario eliminar el calor generado en la sala a través de un sistema de

climatización que se encargue de proporcionar la potencia frigorífica requerida para mantener las condiciones de temperatura adecuadas.

También se llevan a cabo acciones en los Cuartos Técnicos (CT) que se dedican a las comunicaciones dentro del túnel.

Al igual que sucede con las salas para variadores de frecuencia, esos espacios tienen una temperatura de consigna que no debe ser excedida.

El aumento de la temperatura dentro de estos espacios se debe al uso de los dispositivos electrónicos y de comunicación que se encuentran en su interior. Además, la temperatura en el entorno también juega un papel fundamental en este aspecto. Se recomienda tomar registro de las condiciones climáticas exteriores, ya que los sistemas de refrigeración podrían verse comprometidos o las necesidades internas podrían ser afectadas por aumentos en la temperatura del ambiente.

c) Sistema de control

También en este caso se ha diseñado e implementado un sistema de control que integra las fuentes energéticas y sus posibilidades con los consumidores potenciales y sus necesidades bajo estrategias de eficiencia.

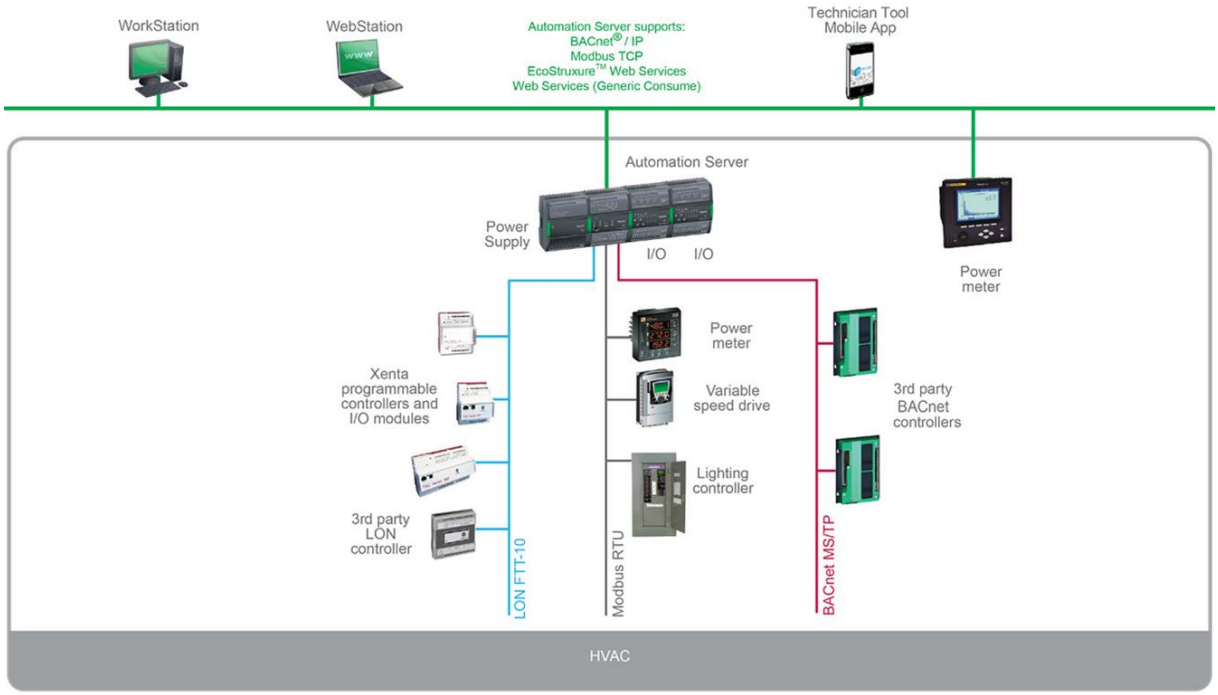


Figura 4-85. Esquema del sistema de control [71].

d) Plan de media y verificación de ahorros. PMVA

El proyecto Piloto realizado en C30 ha contado con un PMVA diseñado al efecto, ya que uno de los objetivos fundamentales del proyecto era evaluar con precisión los resultados finales.

Las características que definen un Plan de Medida y Verificación, son precisión, generalización, coherencia, relevancia y transparencia, todo ello bajo el denominador común de realizar el desarrollo desde un punto de vista conservador.

Las ventajas principales de adecuar un Plan de Medida y Verificación siguiendo el Protocolo Internacional de Medida y Verificación del Ahorro Energético o su término en inglés International Performance Measurement and Verification Protocol (IPMVP), tienen que ver con las características anteriores, pero pueden resumirse en una que es la estandarización del proceso de verificación de ahorros obtenidos al implantar una medida de ahorro de energía, pudiendo referirse al plan las partes implicadas e interesadas en la verificación de ahorros para resolver cualquier punto discordante en lo relativo a la determinación de los mismos.

Para ello C30 ha recogido los datos y ha suministrado, en tres períodos de tiempo, el régimen de funcionamiento de los 16 ventiladores, 8 por cada uno de los CT.

Los tres períodos de tiempo abarcan desde el 22 de agosto de 2013 hasta el 12 de febrero de 2014, y recogen las revoluciones por minuto de cada ventilador cuando entran en funcionamiento.

Por último, se llevó a cabo un registro de la temperatura exterior y se examinó cómo el consumo eléctrico varía en relación con los aumentos en la temperatura exterior. En los Cuartos de Comunicaciones se llevó a cabo una evaluación del uso de energía de los aparatos eléctricos para examinar la variación de los datos y su progreso a lo largo del periodo. Con el objetivo de obtener datos precisos, se registró el uso de electricidad de los centros de procesamiento de datos (CPD) desde el 22 de octubre de 2013 hasta el 29 de noviembre de 2013.

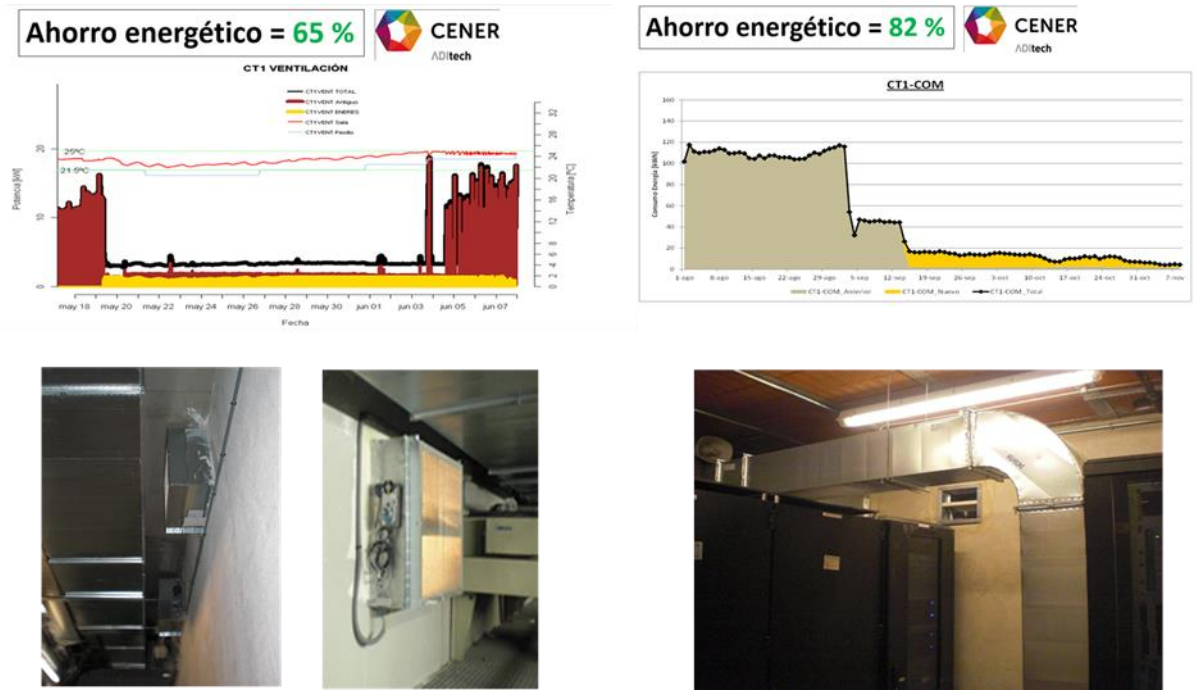


Figura 4-86. Resultados CT1 [71].

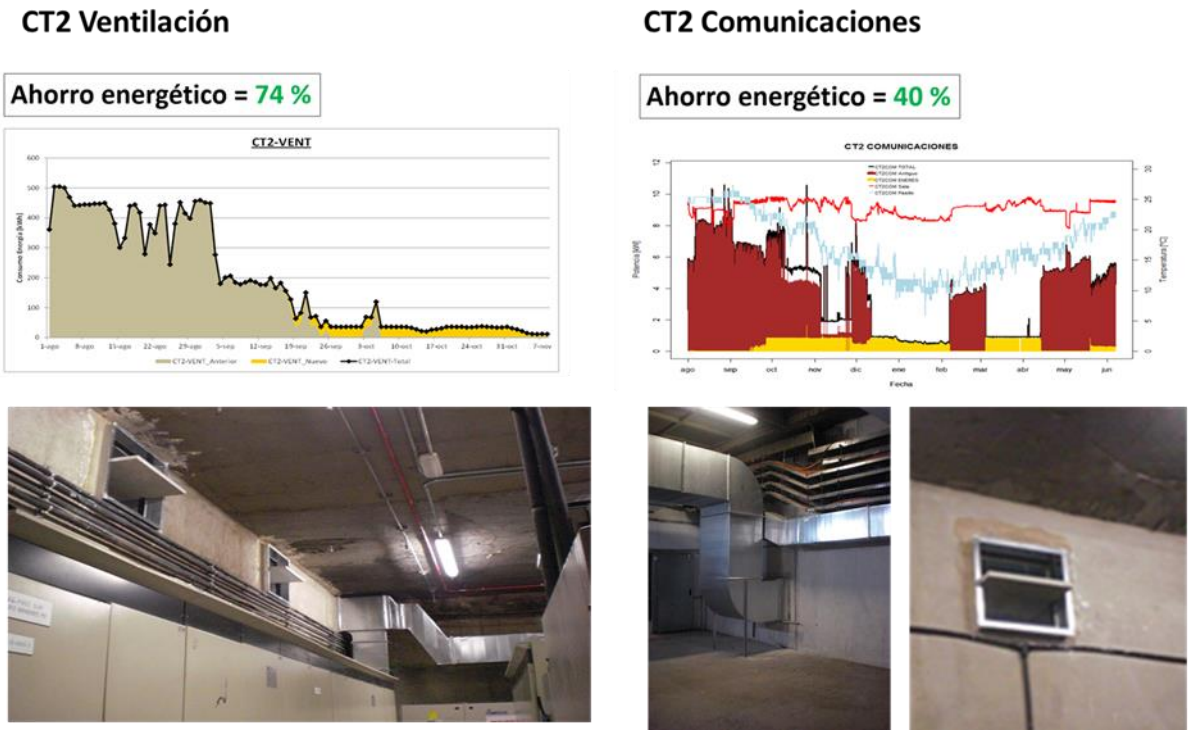


Figura 4-87. Resultados CT2 [71].

La realización de este proyecto piloto ha permitido:

- Verificar las opciones de utilizar los recursos geotérmicos del túnel del bypass mediante transporte aéreo.

- Aplicar y comprobar la eficacia de la estrategia de evaluación y certificación de ahorros
- Obtener una experiencia práctica en diseño, desarrollo, implementación y supervisión que ya se está utilizando en proyectos similares, pero en diferentes escalas, utilizando distintos medios y recursos energéticos obtenidos de las galerías subterráneas.

Los resultados obtenidos fueron certificados por el Centro Nacional de Energía Renovables, CENER.

Tras el éxito del proyecto piloto, las siguientes escalas de actuación incluían los edificios de la propia infraestructura de C30, Figura 4-88, los edificios del Ayuntamiento de Madrid en el ámbito de Madrid Río, Matadero de Madrid, Junta de Arganzuela, Mercado de Legazpi. Etc.. y finalmente actuaciones de suministro a edificios privados.

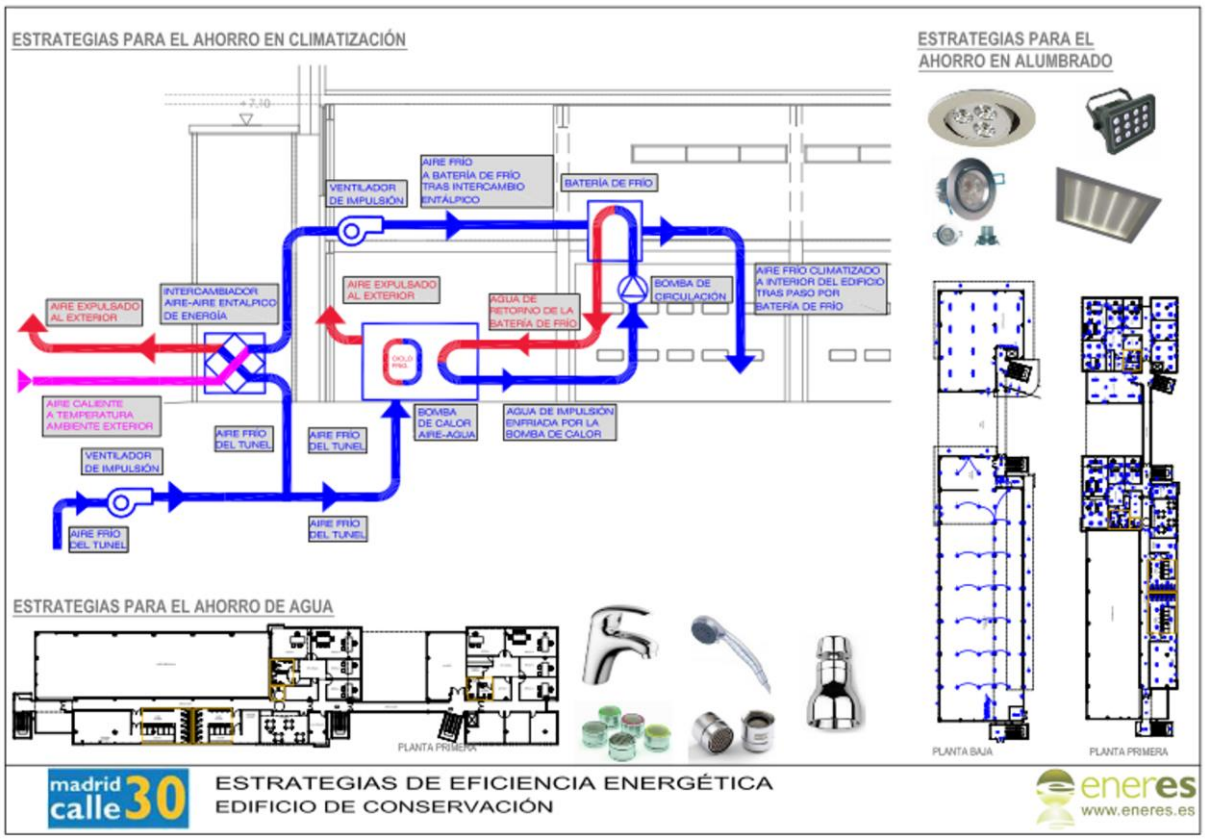


Figura 4-88. Estudio preliminar de eficiencia en el Centro de Control C30 en Méndez Álvaro mediante el intercambio con el aire de los túneles de C30. Fuente: Eneres.

4.6. Condiciones de la edificación para el aprovechamiento de las energías de bajo grado en un contexto de baja exergía

4.6.1. Consideración de la arquitectura como medio de transformación y cualificación de la energía

El ahorro y la recuperación de energía, agua y recursos desperdiciados se fundamentan en el equilibrio de los sistemas energéticos e hídricos a través de los edificios, como medio de transformación, que se logra con la integración de todos los recursos, materiales, técnicos y operativos en estrategias de interacción dinámica y equilibrada con el medio.

La Arquitectura como medio de transformación y cualificación de la energía debe tener en cuenta los siguientes principios fundamentales:

- Reducir al mínimo la demanda energética de los edificios.
- Resolver con el mínimo consumo la cobertura energética de los edificios.
- Implementar una gestión operativa y el mantenimiento preventivo en los edificios para cumplir con los objetivos de eficiencia.

Esto se puede lograr mediante el uso de tres herramientas fundamentales:

- El enfoque sistémico,
- La utilización de la exergía como directriz de diseño,
- El Análisis del Ciclo de Vida (LCA) del edificio.

4.6.1.1. Enfoque sistémico

El enfoque sistémico abarca todo el ámbito de complejidad de la edificación y futura actuación integral. Este enfoque se utiliza principalmente para estudiar sistemas artificiales, donde la participación humana juega un papel fundamental. De acuerdo con los fundamentos del enfoque sistémico, es necesario examinar la construcción como un todo, como un sistema en el que todos sus elementos interactúan entre sí. Para tomar una decisión sobre el control de este sistema, es fundamental definir su objetivo, los objetivos de sus subsistemas y las diferentes opciones disponibles para alcanzar dichos objetivos. Estas opciones deben ser evaluadas con respecto a criterios de eficiencia para seleccionar el método de control más apropiado para la situación en cuestión.

Una importante etapa del análisis sistémico es la construcción de un modelo integrado del edificio que se investiga y para el que se proponen transformaciones, un modelo en el que se tengan en cuenta todas las variables esenciales del sistema.

En virtud del elevado el número de componentes y variables se integran en el modelo y que someten a simulaciones iterativas, elementos, subsistemas, bloques, conexiones de los sistemas socio-económicos, "hombre-máquina" y otros, para realizar el análisis sistémico se utilizan herramientas informáticas de modelización y simulación, instrumentos de integración de datos de elaboración propia y metodología de trabajo concurrente para la valoración crítica de resultados que permite aproximar y resolver las intervenciones propuestas para la mejora de la eficiencia. Herramientas aplicadas tanto para construir los modelos integrados de los sistemas como para simular a partir de los modelos los escenarios y estrategias de funcionamiento de los sistemas e interpretar los resultados obtenidos.

4.6.1.2. Utilización del concepto de exergía como directriz de diseño

En el enfoque sistémico, se emplea la exergía como herramienta para mejorar la estrategia de consumo de energía en el edificio, buscando maximizar la parte beneficiosa de la energía y teniendo en cuenta que el edificio y su entorno se comportan como sistemas integrados que transfieren energía en diversas dimensiones (Figura 4-89).

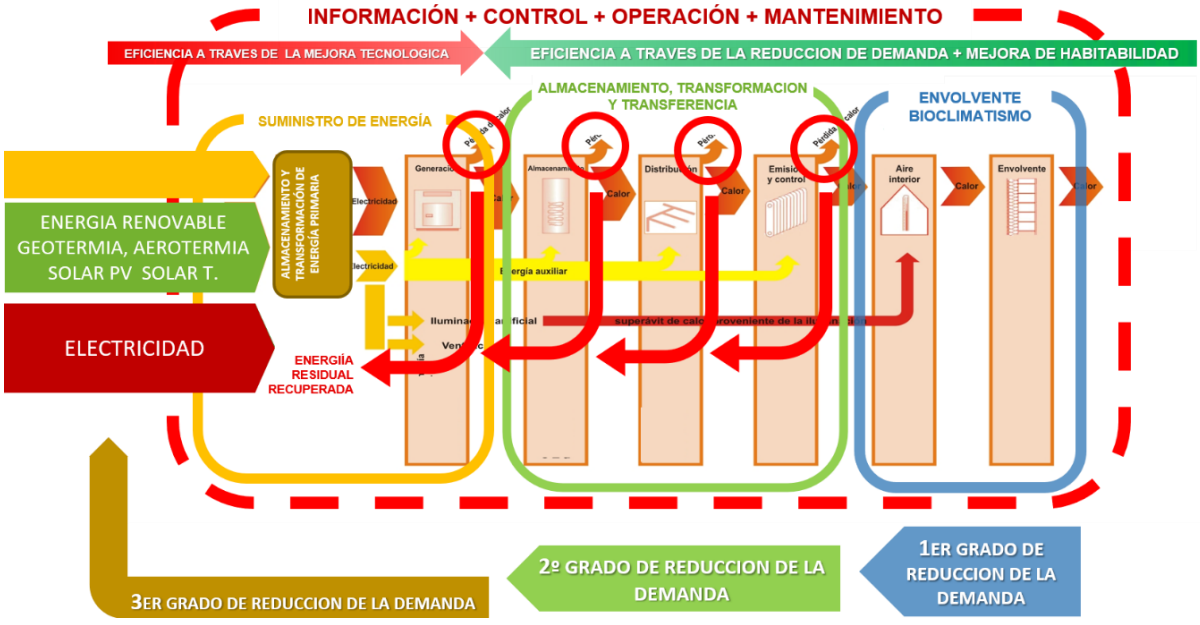


Figura 4-89. Esquema concepto de Exergía.
Fuente: Instituto Europeo de Innovación - Eneres.

Un análisis de exergía proporciona la oportunidad de realizar evaluaciones más precisas y comprender de manera más completa los movimientos de energía, además de ofrecer un mayor potencial para la conservación de energía, en comparación con el enfoque tradicional que se basa únicamente en la cantidad de energía y energía primaria.

A través de este análisis, es posible distinguir la calidad de diferentes formas de energía, basándose en su capacidad para producir trabajo efectivo. De esta forma, se pueden identificar dos categorías de energía.

- Energía de alto grado.
- En energía de bajo grado.

Al incluir la influencia del entorno en el concepto de exergía utilizado en relación a la construcción, se visualiza al edificio como un sistema termodinámico que tiene la capacidad de tomar, almacenar e intercambiar exergía con su entorno. Tomando en consideración todos los flujos de energía relacionados a la construcción. Tomando en cuenta las variaciones que suceden en dicho sistema, se puede identificar las principales formas de intercambio que permiten aprovechar de forma inmediata las condiciones de temperatura y humedad del entorno.

Aprovechando el cambio estacional de temperatura, se utiliza la inercia del terreno como un sistema para almacenar energía.

- Utilizar la energía acumulada en el edificio debido a los cambios de temperatura diarios.
- Utilizar la radiación solar indirecta para calentar el agua y el aire.
- Utilizar la ventilación natural y nocturna para climatizar, aprovechando el intercambio de aire mediante la recuperación de calor.
- Utilizar la energía geotérmica del suelo para regular la temperatura.
- El calor se transfiere desde el interior del edificio hacia el exterior a través de la conducción y la radiación.

Usualmente, se mantiene una temperatura de confort que varía entre los 19 y 26 grados Celsius en la mayoría de los edificios. La cantidad de energía necesaria para llegar a este estado varía dependiendo de la temperatura del entorno.

Es crucial ajustar el tipo o la calidad de la energía que se desea utilizar de acuerdo a las necesidades particulares. Se aconseja utilizar fuentes de energía renovables y cercanas, que estén fácilmente disponibles en el entorno, y mantener las fuentes

de energía de alta calidad únicamente para una pequeña fracción de los procesos de transformación que las requieran.

Existen diversas estrategias que contribuyen a abordar la precariedad energética mediante la incorporación de energía térmica de bajo grado:

- Reducir las temperaturas ambientales utilizando métodos que no requieran energía activa.
- Instalar sistemas de climatización de exergía reducida.
- Emplear fuentes de energía renovable que estén accesibles en las proximidades.
- Reducir el uso de recursos derivados de combustibles fósiles y limitar el consumo de energía eléctrica a dispositivos altamente eficientes.

La aplicación del enfoque exergético es muy importante cuando se evalúan y diseñan sistemas de climatización. Proporciona información adicional sobre las pérdidas y la disipación de energía utilizable, tales como su localización, cuantificación y origen, a lo largo de todo el proceso de suministro y conversión de energía.

Esto evidencia la considerable cantidad de energía útil que se desperdicia, especialmente en los procesos de alta generación de calor utilizando métodos tradicionales, algo que no es fácilmente perceptible desde un punto de vista energético convencional.

Los sistemas de baja exergía se caracterizan por mantener la temperatura de suministro lo más próxima a la temperatura de confort que sea posible. De esta manera, se disminuye el consumo de exergía al reducir al mínimo la disparidad de temperaturas de operación entre los sistemas.

Entre las alternativas de sistemas de baja exergía que se están sugiriendo se encuentran:

- Utilización de sistemas de agua o aire para realizar intercambio geotérmico con el terreno.
- Paneles solares, tanto térmicos como fotovoltaicos, e incluso aquellos que combinan ambas tecnologías, son utilizados para aprovechar la energía solar.
- Aprovechando el calor residual que se genera en los procesos de transformación térmica o al utilizar agua caliente.

- Los radiadores situados en paredes, techos y suelos son sistemas de emisión con superficies de intercambio amplias y que operan a una temperatura moderada.
- La inercia térmica es aprovechada por los pilotes, las losas y los muros al activarse térmicamente.
- Se aprovecha el cambio de temperatura diario para liberar calor durante la noche mediante el uso de depósitos de inercia que almacenan calor.
- Se pueden emplear materiales con capacidad de cambio de fase para obtener beneficios del calor que almacenan en su interior.

La utilización de sistemas de climatización de baja exergía proporciona las siguientes ventajas:

Utilizan una cantidad mínima de energía, la cual puede ser obtenida de fuentes renovables ubicadas en las cercanías, así como de los residuos de fuentes de calor.

- Sacan partido de las mínimas fluctuaciones térmicas, demostrando una eficacia energética superior. Adicionalmente, las calderas y bombas proporcionan un desempeño eficiente al operar a temperaturas próximas a las condiciones ambientales, lo cual minimiza la pérdida de calor. Además, se resalta una mayor eficiencia en la transferencia de calor en las superficies que emiten radiación.
- Se reduce el consumo de energía.
- Se registran reducciones en el gasto energético.
- Hay una disminución en el consumo de energía.
- Proporcionan mayor comodidad al mantener temperaturas en las superficies similares a las del cuerpo humano, distribuir de manera más homogénea las diferencias de temperatura y mejorar la calidad del aire en movimiento.
- Son flexibles en términos de obtener energía de diversas fuentes de manera versátil.

4.6.1.3. Análisis del Ciclo de Vida del edificio

En los últimos años ha habido un creciente interés por abordar de manera sistemática el estudio de los efectos medioambientales derivados de los procesos y productos.

En los ámbitos de la energía y la construcción, los procedimientos no solo producen desperdicios, sino que también utilizan recursos naturales, necesitan

infraestructuras de transporte, emplean materiales químicos, agua y energía, y generan productos que deben ser trasladados, utilizados y, en ocasiones, reutilizados antes de ser eliminados por completo.

En todas estas instancias se producen diferentes consecuencias ambientales, las cuales deben ser consideradas al evaluar el impacto de un proceso en el entorno. El Análisis del Ciclo de Vida o su término en inglés Life Cycle Assessment (LCA) se encarga de examinar todos los impactos ambientales que surgen durante la existencia del sistema construido.

- Desde los recursos primarios (desde su "cuna").
- Hasta el uso o consumo del producto y posterior desecho (hasta su "tumba").

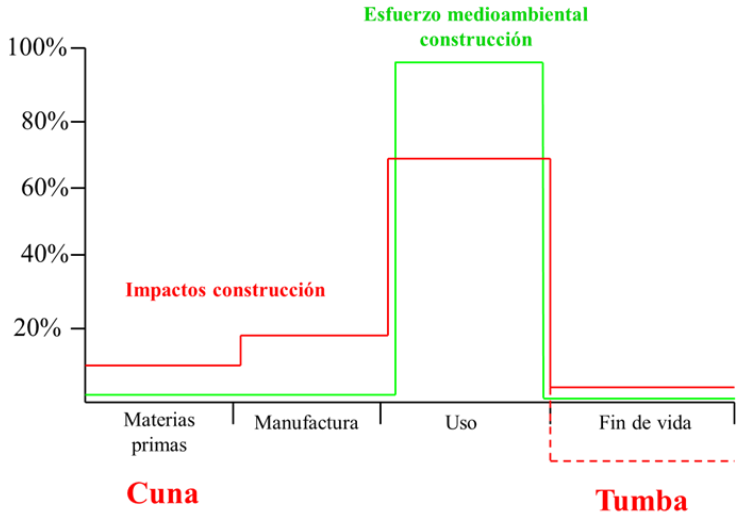


Figura 4-90. Ciclo de Vida.
Fuente: Marcel Gomez Consultoría Ambiental.

De esta manera, es posible detectar los efectos en distintas áreas del medio ambiente que superan las fronteras del proceso de construcción. Los impactos inducidos de la construcción pueden, en numerosas ocasiones, ser más importantes que los causados directamente por el proceso de construcción de los edificios.

El AVC se creó por primera vez en el siglo pasado como respuesta a la crisis energética. Al principio, solo se realizaron evaluaciones básicas de la cantidad de materia y energía utilizadas durante el proceso de generación y consumo de energía, con el objetivo de encontrar posibilidades de reducir el consumo a lo largo de toda la cadena de producción y consumo. Debido a la estrecha conexión entre el uso de energía, el uso de recursos y la generación de residuos, no fue complicado a

avanzar hacia la implementación del Análisis de Ciclo de Vida (LCA) como se le reconoce hoy en día.

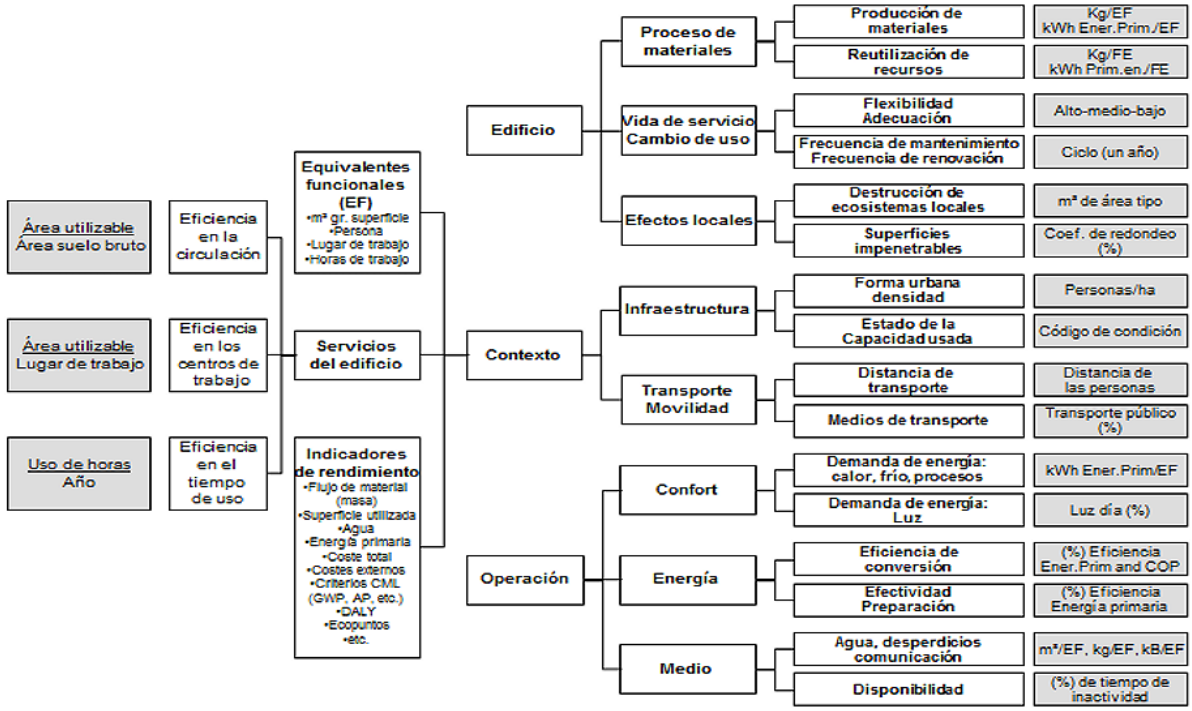


Figura 4-91. Evaluación del Ciclo de Vida de los edificios.
Prof. Dr. Niklaus Kohlet. Karlsruhe Instituto of Technology (KIT)

El LCA se presenta como una herramienta para la gestión ambiental y el establecimiento de procesos con menor impacto ambiental. Se ha incluido en el avance de los sistemas de etiquetado ecológico, en la creación de directrices para la elaboración de productos con beneficios ambientales y en las normas ISO.

Además del LCA, se pueden encontrar una variedad de instrumentos adicionales que facilitan la evaluación de las cargas ambientales. Estos instrumentos tienen diferentes niveles de detalle y se enfocan en diferentes aspectos del sistema analizado. A continuación, se describen algunas de estas.

La evaluación de impacto ambiental que es una herramienta necesaria para la toma de decisiones en la cual se identifican, se cuantifican y se valoran los efectos ambientales que se relacionan con un proyecto.

La evaluación de tecnologías que es una herramienta que permite diseñar procesos más respetuosos con el medio ambiente. Su objetivo es comparar diferentes opciones tecnológicas teniendo en cuenta sus atributos en aspectos ambientales, técnicos, económicos y sociales, entre otros.

Evaluación de riesgos que examina los posibles percances teniendo en cuenta la probabilidad de que ocurran y las repercusiones que tendrían en las personas, las instalaciones y el entorno. Esta herramienta posibilita la identificación y evaluación de acciones preventivas y de control.

El análisis de intensidad recursos que examina la cantidad de materiales y energía empleados en un sistema de producción relacionado con un producto o servicio durante todo su ciclo de vida. Esta labor se enfoca en el conjunto completo de materia y energía, sin detallar su naturaleza o composición específica.

La evaluación del desempeño ambiental que es una herramienta interna que suministra al sistema de gestión datos ambientales imparciales y comprobables acerca del desempeño de una entidad. Es necesario elegir indicadores ambientales idóneos para describir la relación con el entorno. En las directrices ISO 14031 de Gestión Ambiental se trata el tema de la evaluación del desempeño ambiental [72].

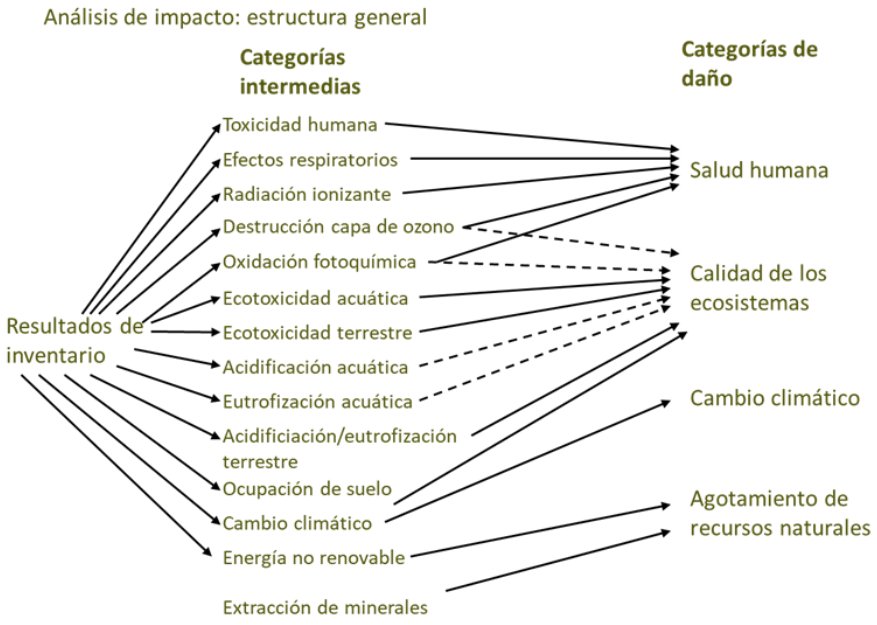


Figura 4-92. Análisis del impacto. Inventario y categorías de daño. Fuente: Marcel Gómez Consultoría Ambiental.

El LCA es una poderosa herramienta de modelización y preevaluación de impactos que debe ser considerada en la toma de decisiones en los procesos de concepción, diseño, construcción y uso de los sistemas edificados. La incorporación de recursos energéticos de bajo grado plantea requerimientos específicos en todas las fases del Ciclo de Vida que pueden ser ponderados y valorados con ayuda de las herramientas de LCA.

Los niveles de aplicación de la LCA comprenden todas las escalas de la edificación:

- Urbanismo e Infraestructura: p. ej., barrio, mancomunidad, planificación territorial.
- Edificio: Impacto ambiental actual debido normalmente en un 70 % - 80 % a la etapa de uso y en un 20 % - 30 % a la fabricación de materiales, componentes y subsistemas.
- Materiales y componentes: p. ej. aislante, materiales estructurales. Cobra una gran importancia la equivalencia de funciones para su comparación (p. ej. igualdad de conductividad térmica para comparación de aislantes o para evaluar el rendimiento de distintos sistemas de transformación de la energía).
- Declaración Ambiental de Producto.

Se trata por tanto de una herramienta de modelización y simulación de rendimientos e impactos con consideraciones ambientales completas, ineludible en un proceso de recuperación y uso de recursos con objetivos de eficiencia.

4.6.2. Cualificación del entorno

La incorporación de la variable del entorno, el alcance en el sistema global, en el concepto de exergía cuando se aplica a la construcción, conduce a ver el edificio como un sistema termodinámico capaz de absorber, retener e intercambiar exergía con todas las dimensiones de su entorno, teniendo en cuenta todos los flujos de energía en los que los edificios están involucrados, como el aire, el cielo y el suelo.

Tomando en cuenta los cambios que ocurren en el edificio como parte de un sistema conectado con el entorno, es posible reconocer las formas fundamentales de transferencia y retención de energía, con la finalidad de obtener un beneficio directo de las condiciones de temperatura y humedad del entorno.

Con el fin de aprovechar de manera óptima la energía, es necesario adaptar el tipo o la calidad de la energía que se planea utilizar a la demanda específica. Esto implica utilizar fuentes de energía cercanas y renovables, de bajo grado y costo, que estén fácilmente disponibles en el entorno. Solo se debería recurrir a fuentes de energía de alta grado y costo en un porcentaje reducido de los procesos de transformación que requieran este tipo de energía.

A efectos del estudio de las potenciales estrategias de interacción con el entorno y su implementación es necesario estudiar el entorno a tres escalas:

- El entorno lejano o el contexto climático regional. Determina aspectos generales sobre aprovechamiento bioclimático y reducción de la demanda.
- El entorno medio, mesoclimático, relativo a las condiciones, naturales y antrópicas, del ámbito urbano en el que se ubica el edificio.
- El entorno microclimático, vinculado a las acondiciones especiales generadas por el edificio en virtud de su implantación y de la interacción con de ámbitos espaciales, interiores y exteriores, que genera.

4.6.2.1. Entorno regional. Clima

Es el análisis a escala regional del ámbito geográfico, cuenca hidrológica, tipo de clima (con estaciones o sin estaciones), temperatura media anual, mes más cálido, mes más frío, temperatura alta promedio, temperatura baja promedio. Variación de temperatura más alta y más baja, en promedio.

Los rasgos más interesantes del clima para ser aprovechados a través de estrategias bioclimáticas para aprovechamiento de recursos de baja exergía podrían ser por ejemplo:

- El salto térmico estacional. Pueden darse diferencias de temperatura importante entre el invierno y el verano con breves periodos intermedios en primavera y otoño, que se pueden vincular a la estrategia de aprovechamiento de la inercia del terreno como interacumulador estacional de energía térmica (Tabla 4.12).
- Salto térmico diario. Diferencia significativa de temperatura entre el día y la noche que se puede vincular a la estrategia de aprovechamiento de la inercia de las partes masivas del edificio y de los sistemas técnicos asociados a dispositivos de almacenamiento de calor, como interacumulador de amplitud día / noche; y también se puede vincular a estrategias de eficiencia y salubridad en la renovación del aire nocturno con recuperación de calor, o con estrategias de free cooling a través del sistema de control de calidad del aire y ventilación.
- Índice de soleamiento y radiación solar directa y difusa que se puede vincular a estrategias de control solar para el aporte pasivo de calor al edificio, la iluminación natural y el calentamiento de agua y aire.
- El análisis de este contexto es el primer y más importante a considerar para la eficiencia es la reducción de la demanda y la mejora de la salubridad del espacio,

que se explota a través de la identificación e incorporación de las fuerzas y recursos naturales que existen en el entorno del edificio y haciendo uso de sus potencialidades para crear las condiciones operativas óptimas en todo su ámbito de influencia.

- El estudio de las condiciones bioclimáticas del lugar orienta hacia estrategias locales de aumento del confort y la salubridad y reducción de la demanda.

Mes	T	TM	Tm	R	H	DR	DN	DT	DF	DH	DD	I
Enero	6.1	9.7	2.6	37	71	6	1	0	5	6	8	148
Febrero	7.9	12	3.7	35	65	6	1	0	4	3	6	157
Marzo	10.7	15.7	5.6	26	54	5	0	1	2	1	7	214
Abril	12.3	17.5	7.2	47	55	7	0	1	1	0	5	231
Mayo	16.1	21.4	10.7	52	54	8	0	3	0	0	4	272
Junio	21.0	26.9	15.1	25	46	4	0	3	0	0	8	310
Julio	24,3	31.2	18.4	15	39	2	0	3	0	0	16	359
Agosto	24.4	30.7	18.2	10	41	2	0	2	0	0	14	335
Septiembre	20.5	26.0	15.0	28	50	3	0	2	0	0	9	261
Octubre	14.6	19.0	10.2	49	64	6	0	1	1	0	6	198
Noviembre	9.7	13.4	6.0	56	70	6	0	0	5	1	7	157
Diciembre	7.0	10.1	3.8	56	74	7	1	0	6	4	7	124
Año	14.6	19.4	9.7	436	57	63	4	16	24	16	97	2769
Valores climatológicos normales de Madrid							Periodo: 1971-2000					
Latitud: 40ª 24’ 43” N – Longitud: 3º 40’ 41”							Altitud: 667 m					

Leyenda:
T: Temperatura media mensual/anual (°C)
TM: Media mensual/anual de las temperaturas máximas diarias (°C)
Tm: Media mensual/anual de las temperaturas mínimas diarias (°C)
R: Precipitación mensual/anual media (mm)
H: Humedad relativa media (%)
DR: Número medio mensual/anual de días de precipitación superior o igual a 1 mm
DN: Número medio mensual/anual de días de nieve
DT: Número medio mensual/anual de días de tormenta
DF: Número medio mensual/anual de días de niebla
DH: Número medio mensual/anual de días de helada
DD: Número medio mensual/anual de días despejados
I: Número medio mensual/anual de horas de sol

Tabla 4.12. Estudio de las épocas de lluvia y meses más secos y nivel de precipitaciones de Madrid.
Fuente: AEMET.

El Diagrama de Givoni es una herramienta ampliamente utilizada [73] para analizar cómo se integran los factores del aire, la humedad y la temperatura y así evaluar el confort y la sensación térmica de las personas que utilizan un edificio (Figura 4-93).

Se toman en cuenta los valores que determinan las condiciones de comodidad, temperatura y humedad promedio de cada mes. Estos valores se utilizan para obtener 12 líneas que muestran el rango de fluctuación entre los niveles máximos y mínimos medios de cada periodo mensual. En el gráfico se muestra una línea para cada uno de los doce meses del año, en la cual se reflejan los promedios de temperatura y humedad relativa máximos y mínimos.

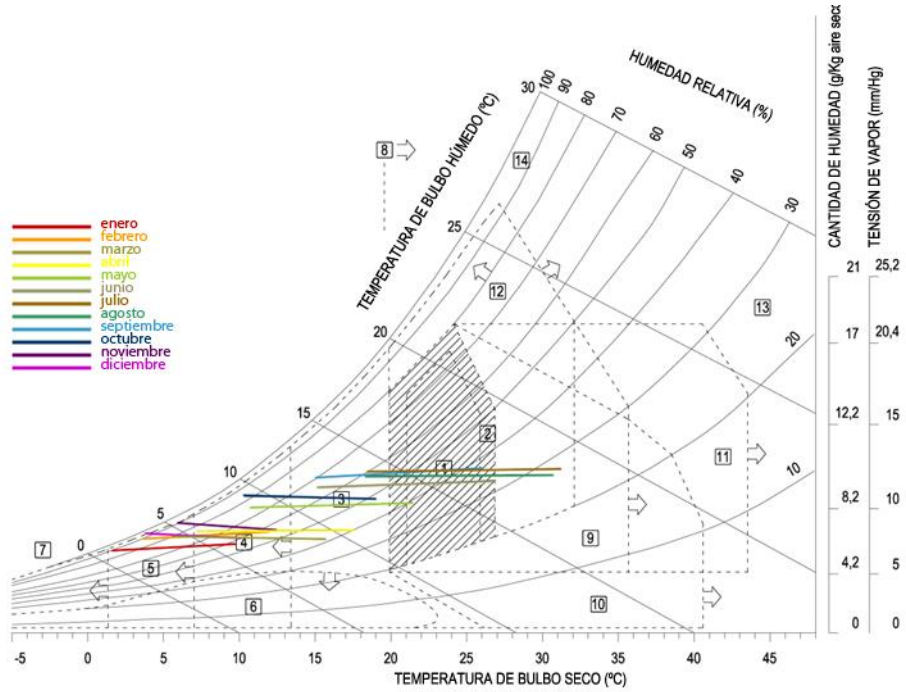


Figura 4-93. Diagrama de Givoni para la ciudad de Alcalá de Henares [74].

El diagrama está dividido en varias zonas, cada una con un número (Figura 4-93). Estas zonas corresponden a áreas en las que se dan unos condicionantes climáticos similares, que pueden ser agrupados dentro de una misma categoría. Para cada categoría se identifica una solución vinculada a una estrategia de actuación bioclimática.

Ámbitos, categorías y estrategias:

1. Zona de confort optima.

2. Zona de confort ampliada, admisible.

3. Calefacción por ganancias internas.

4. Calefacción solar pasiva.

5. Calefacción solar activa.

6. Humidificación.

7. Calefacción convencional.

8. Control y protección solar.

9. Refrigeración inercial / masa térmica.

10. Enfriamiento por evaporación.

11. Refrigeración inercial con ventilación nocturna.

12. Refrigeración por ventilación natural y mecánica.

13. Aire acondicionado.

14. Deshumidificación convencional.

Este diagrama es una herramienta que muestra un panorama general del clima de un lugar, y un primer acercamiento a los recursos que se deberían aprovechar en un edificio en la dimensión bioclimática, lo que puede generar importantes posibilidades de reducción de la demanda actual y al aumento de la calidad ambiental de los espacios de actividades y trabajo, asociadas a la mejora de la interacción entre el edificio y el medio a través de su envolvente y de los sistemas técnicos esenciales para la calidad ambiental, renovación de aire e iluminación.

4.6.2.2. Entorno urbano. Mesoclima

El estudio urbano, analiza el emplazamiento del edificio en la ciudad teniendo en cuenta:

- Factores topográficos y morfológicos de su microcuenca hídrica que determinan el movimiento del aire, transversal, según las vertientes.
- Existencia de los flujos hidrológicos subterráneos.
- Existencia de infraestructuras de saneamiento que recogen los efluentes de los edificios.
- Existencia de infraestructuras subterráneas de transporte.
- Caracterización del subsuelo.
- Estudio de isla de calor y condición térmica inducida por el calentamiento de las estructuras urbanas.
- Existencia en su entorno de espacios libres, plazas, calles amplias y jardines, que son un colchón medioambiental respecto al tejido más denso de la ciudad.

- Existencia de instrucciones solares por edificaciones existentes.
- Estudio de orientación del edificio.
- Estudio de soleamiento del edificio.

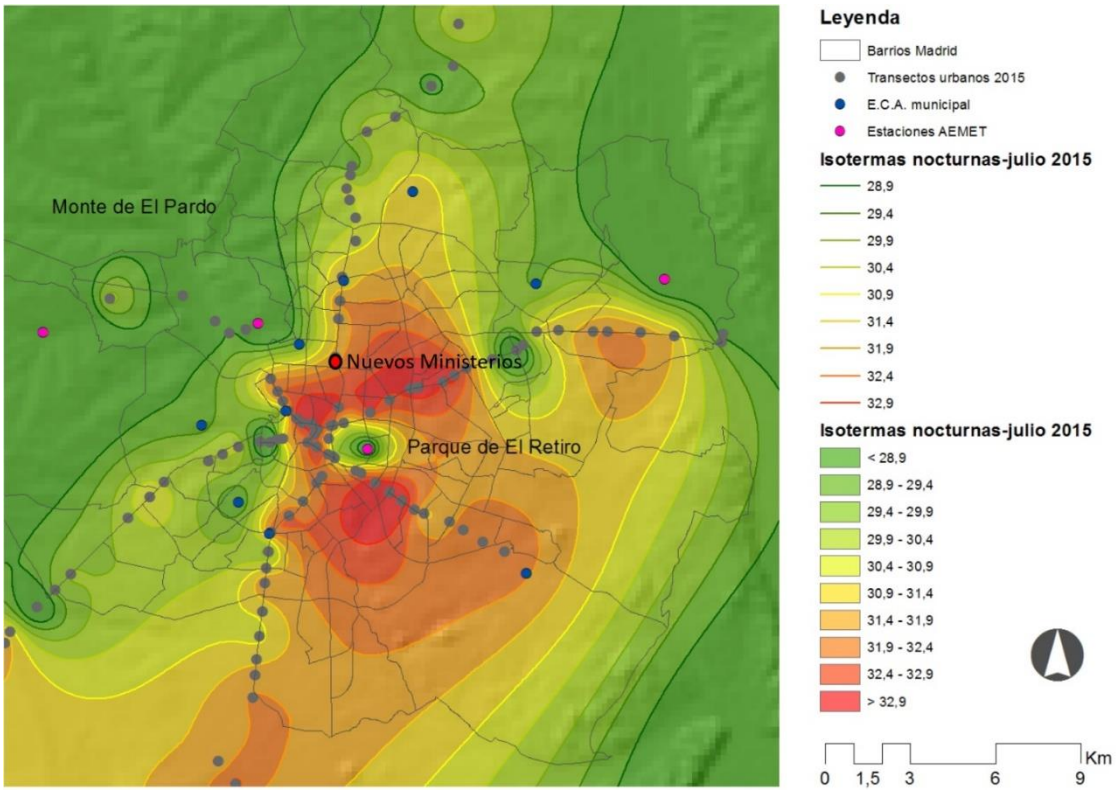


Figura 4-94. Ejemplo de Diagrama del efecto Isla de calor en Madrid [75].

4.6.2.3. Entorno próximo. Microclima

En el entorno próximo se analiza:

- Las vistas de las zonas contiguas al edificio.
- La extensión del solar del edificio.
- El porcentaje de áreas libres.
- El porcentaje de áreas verdes y ajardinadas y la caracterización de la vegetación que la componen.
- La permeabilidad del edificio.
- La existencia de patios interiores.
- La permeabilidad de las superficies pavimentadas y ajardinadas.
- El sombreado y el control de la reflexión de la radiación mediante vegetación.

- La existencia de fuentes y/o láminas de agua.
- La existencia de zonas de aparcamiento exteriores y/o subterráneas.
- La existencia o no de puntos de recarga para los vehículos eléctricos.

4.6.3. Activación de la inercia de los edificios

Las estructuras termoactivas se enfocan en incorporar estrategias energéticas de bajo grado y temperatura moderada en los sistemas de los edificios. Estas estructuras ofrecen diversas oportunidades innovadoras para mejorar la eficiencia en la transformación de energía, el almacenamiento y la gestión del flujo de calor, y garantizar el confort térmico de los usuarios [76].

En todos los sistemas de la biosfera, los edificios eficientes se comportan de manera lógica y aprovechan los recursos disponibles de forma variable. Recolectan y utilizan los datos sobre cómo interactúan con su entorno para ajustar y mejorar sus procesos de autorregulación y reequilibrio en busca de eficiencia. Además, convierten estos datos en información que alimenta tanto su componente táctica, subconsciente, relacionada con el cambio programado, como su componente estratégica, consciente, relacionada con la adaptación a los escenarios de eficiencia.

En este escenario, el edificio eficiente representa una herramienta para administrar de manera constante el desequilibrio y reequilibrio en un entorno fluido. Se progresa hacia la eficiencia mediante el control de la capacidad de respuesta y el comportamiento cambiable de sistemas complejos cuya eficiencia se alcanza gracias a la interacción cibernética entre el usuario y el edificio automatizado.

En realidad, la habilidad para comprender el contexto de la Arquitectura radica en la combinación de las habilidades para separar y para poner en contacto con diferentes elementos como el agua, la energía, la radiación, la luz, el sonido, el aire, etc. También se incluye la información en esta capacidad adaptable: la capacidad de intercambio. En cualquier entorno vivo expuesto a condiciones cambiantes, el intercambio es una parte fundamental.

Los edificios eficientes son capaces de adaptarse y ajustarse a diferentes intercambios, además de contar con una arquitectura que se adapte a su entorno. Estos edificios son capaces de responder de manera adecuada a los cambios en los flujos de recursos que utilizan, lo que les permite maximizar su rendimiento y

reducir su impacto negativo en el medio ambiente, la salud humana y la destrucción de recursos naturales [76].

En el ámbito de la Arquitectura, los flujos se generan a partir de todas las facetas del entorno y sus elementos. Estos flujos experimentan cambios en función de la escala y el tiempo, y su identificación y descripción son esenciales para tomar decisiones acertadas sobre cómo configurar los edificios de manera eficiente en términos materiales y físicos. Además, comprender su variabilidad es esencial para diseñar edificaciones eficientes capaces de adaptarse a diferentes condiciones.

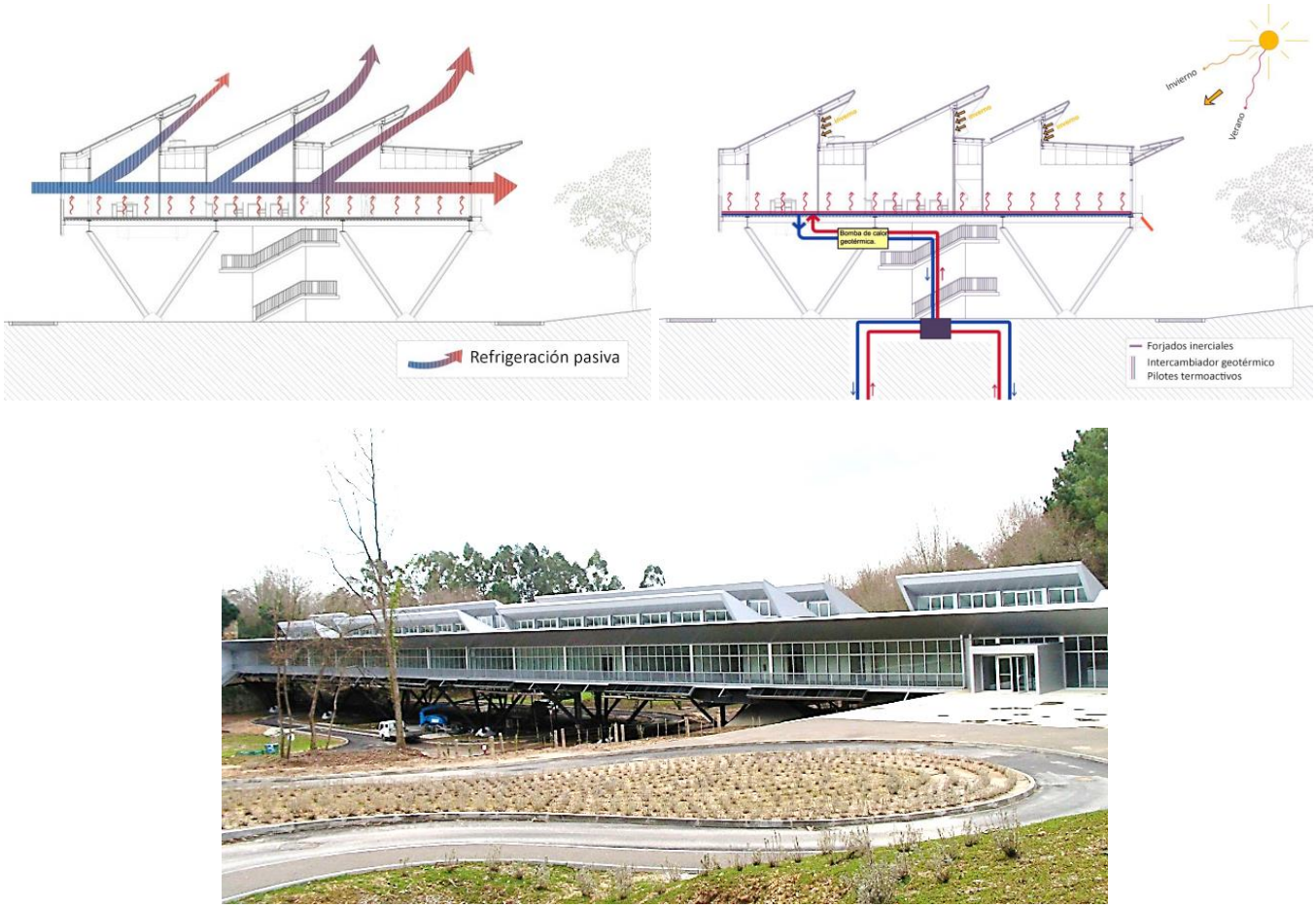


Figura 4-95. Esquemas de refrigeración pasiva o "free-cooling" y de geotermia del Centro Empresarial en Oliveira de Azemeis. Portugal. Arquitecto: Joaquim Morais. Concepto energético ENERES. Fuente: Eneres.

En la implementación de sistemas termoactivos, el enfoque se centra en lograr un edificio que tenga un impacto mínimo en el medio ambiente y un consumo bajo, valorando la eficiencia, el bajo coste y un alto rendimiento. Cuando se implementa una estructura con una demanda mínima y se integra el intercambio geotérmico junto con los sistemas de climatización activados por el calor, estos colaboran en aumentar la eficiencia general y prevista a largo plazo.

Este es el contexto en el que se utilizan las estructuras de los edificios para mejorar su eficiencia: en primer lugar, aquellas que están en contacto con el entorno habitado, como las losas, forjados, muros y vigas, tienen la capacidad de intercambiar energía, absorbiendo el calor del aire y de sus ocupantes para refrigerar o liberando calor al aire y a los usuarios para calefacción. En segundo lugar, las estructuras que se encuentran en contacto con el terreno, como las losas, muros y pilotes, actúan como intercambiadores de calor geotérmico, permitiendo la extracción y almacenamiento de energía.

Los edificios pueden lograr un alto nivel de confort interior sin requerir inversiones costosas en equipamiento. Esto se puede lograr al combinar de manera adecuada medidas y estrategias que incluyen: un excelente aislamiento y regulación solar, la capacidad de almacenar calor en el edificio, una envolvente estanca y bien ventilada, además de un sistema de renovación de aire que promueva la salud y permita recuperar energía. Es factible implementar el empleo de sistemas de enfriamiento pasivo durante el verano, en lugar de recurrir al enfriamiento activo, siempre y cuando se realice una planificación cuidadosa de los edificios, considerando tanto el diseño estructural como las necesidades de los ocupantes y el equipamiento técnico. Además, es importante establecer un sistema de gestión energética que integre todos estos elementos en armonía.

4.6.3.1. Fundamentos para la termoactivación de las estructuras de los edificios

El objetivo es construir edificios que utilicen alternativas sustentables y eficientes que se caractericen por reducir la demanda de energía y contar con instalaciones reducidas y de bajo costo en calefacción, refrigeración, ventilación, iluminación y mantenimiento. Edificaciones que garanticen el bienestar térmico, sanitario y visual en un entorno variable. La refrigeración y la calefacción de los edificios se puede solucionar utilizando los recursos térmicos que son almacenados e intercambiados con el terreno, el agua subterránea y el aire exterior. Esto resulta sumamente relevante tanto desde el punto de vista energético como económico.

La captura y canalización de energía mediante el agua y el aire va más allá de factores fisiológicos y operativos, debido a la eficiencia termodinámica que poseen. Debido a que el agua es mucho más densa que el aire, los sistemas hidrónicos ocupan mucho menos espacio en comparación con los sistemas térmicos de aire. Debido a la alta densidad del agua, se requiere menos energía para bombear agua en un sistema hidrónico en comparación con la energía consumida por los

ventiladores que mueven la misma cantidad de aire en sistemas de aire forzado. Además de liberar espacio, se aumenta la adaptabilidad y se reducen las dificultades relacionadas con la coordinación y el uso del espacio por parte de los sistemas y las redes de instalaciones. En numerosas situaciones, estos ahorros de espacio conducen a un incremento en el área aprovechable de los edificios, reduciendo el volumen al incorporar los sistemas de climatización dentro de las losas, y reduciendo la cantidad de materiales utilizados y las cargas estructurales.

Las estructuras y superficies termoactivas se presentan como una opción viable en la arquitectura actual, dado que permiten abordar los problemas relacionados con la mala calidad del aire en interiores y el síndrome de los edificios enfermos, que son comunes en construcciones equipadas con sistemas de aire acondicionado mal diseñados y dimensionados.

Los sistemas termoactivos representan una alternativa a los sistemas de aire acondicionado tradicionales, los cuales suelen ser costosos y consumen una gran parte del presupuesto destinado a la construcción o rehabilitación de un edificio. En el caso de algunas tipologías de edificaciones, los sistemas termoactivos permiten redirigir los recursos económicos, el tiempo, la coordinación y el trabajo hacia una perspectiva más eficiente y activa en términos de climatización del edificio. En lugar de depender únicamente de la climatización artificial del aire acondicionado, estos sistemas aprovechan los recursos disponibles en el entorno en el que se encuentra el edificio para lograr una activación térmica propia. Esto implica que el edificio adquiere un papel activo tanto en su relación con el entorno como con los usuarios, brindando una experiencia más sostenible y eficiente.

Las estructuras termoactivas, también denominadas en inglés Thermally Activated Building Structures (TABS), y las cimentaciones termoactivas, están conectadas e incorporan tanto la construcción como la envolvente de los edificios. Mediante los intercambiadores términos se trasfiere calor a la climatización. Son elementos indispensables en las infraestructuras de transmisión de energía. Estos son elementos esenciales para la eficiencia en la gestión, ya que poseen la capacidad de almacenar calor de forma inercial y transferirlo en periodos cortos, diarios o estacionales. Las estructuras termoactivas son una opción de generación de calor y frío que aprovecha los recursos técnicos de las bombas de calor para absorber y liberar calor de manera cíclica y reversible. Este proceso se basa en el intercambio de energía térmica con el entorno y permite disminuir de forma considerable el consumo de energía primaria, tanto eléctrica como de gas [76].

La integración en los edificios es lo que hace que sea útil en todos estos aspectos. El principal elemento que permite su eficiencia es que logran optimizarse al aprovechar las propiedades térmicas de elementos inerciales preexistentes, los cuales, al estar diseñados con propósitos estructurales, también cumplen una función vital en términos termodinámicos. Con el objetivo de lograr esto, se implementan sistemas de circuitos cerrados en los elementos estructurales que hacen contacto con el terreno. Estos circuitos no afectan térmica o mecánicamente la capacidad estructural de los muros, pantallas o pilotes. En estos circuitos circula un fluido que transfiere o absorbe calor del terreno, el cual puede ser más frío o más caliente respectivamente. Luego, este calor absorbido y transportado se lleva a un intercambiador, donde se transfiere al agua que fluye por otros circuitos. Estos circuitos se encuentran integrados en las estructuras que están en contacto con los espacios habitados, como forjados, losas, muros o vigas. En estas estructuras, el calor se transfiere a un medio y a los usuarios que están a una temperatura más fría, o bien, se absorbe calor de un medio y de los usuarios que están a una temperatura más alta [76].

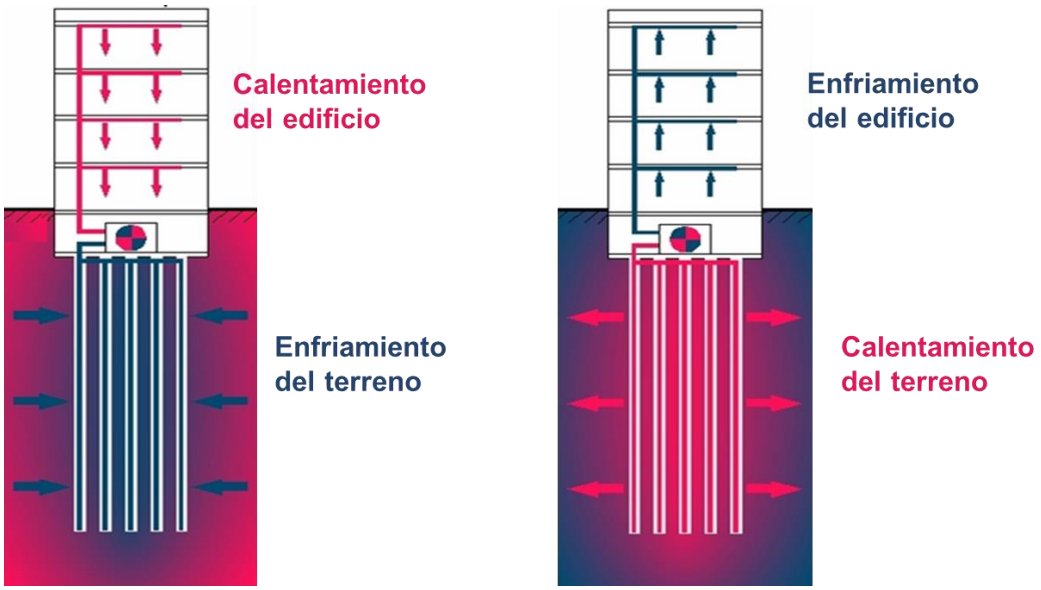


Figura 4-96. Principio básico de intercambio entre el medio interior del edificio y el terreno a través de estructuras termoactivas.
Fuente: Eneres - Enercret.

La interacción entre los sistemas geotérmicos termoactivos y los sistemas de climatización se produce dentro del edificio, lo cual implica un proceso de generación y uso eficiente de energía térmica a lo largo de toda la estructura. En este caso, gran parte de la obtención y utilización del recurso energético se lleva a cabo directamente en el edificio. Una técnica comúnmente empleada para transferir calor entre un edificio y el terreno, o viceversa, consiste en intercambiar

calor estacionalmente. Este proceso implica la circulación de agua a través de circuitos diseñados para transportar el calor de un lugar a otro (Figura 4-96). El objetivo principal de los sistemas termoactivos es lograr un equilibrio en el intercambio de energía, minimizando las pérdidas en su transferencia y asegurando que la energía se mueva eficientemente entre el ambiente exterior y el interior, con un consumo mínimo de energía primaria.

La energía intercambiada en este proceso se caracteriza por su baja presión, baja velocidad, baja intensidad y temperatura moderada. Esto posibilita la incorporación en el sistema de energía proveniente de diversas fuentes renovables presentes en la naturaleza, así como de residuos energéticos generados por actividades humanas, que comparten estas características moderadas. Los recursos derivados de la captura de calor en el agua residual, los gases y el aire, los provenientes de los sistemas urbanos que liberan calor, los que provienen de fuentes renovables solares y los obtenidos mediante el intercambio de aire nocturno con el exterior se acumulan en el suelo y se transfieren estacionalmente a las personas que ocupan y utilizan los edificios a través de sus estructuras, principalmente a través de los elementos horizontales que están en contacto con los ocupantes en todas las áreas habitables.

El intercambio entre el suelo y el edificio sigue un equilibrio estacional que se adapta cuidadosamente a la demanda de energía en cada momento. Esto se logra mediante el uso de un recurso de ajuste que regula el flujo de calor entre ambos componentes. La bomba de calor geotérmica (GSHP) es un aparato simple que facilita el intercambio de temperatura del agua en el interior del edificio, ajustando las necesidades diarias, estacionales y anuales. Esta bomba transporta el calor hacia o desde el edificio a través de dos circuitos de agua.

La bomba de calor funciona eficientemente al operar dentro de rangos de temperatura similares entre el terreno y las estructuras del edificio [76]. Esto significa que los ajustes de la bomba son moderados, lo cual conduce a un rendimiento óptimo y un consumo de energía reducido durante el intercambio de calor.

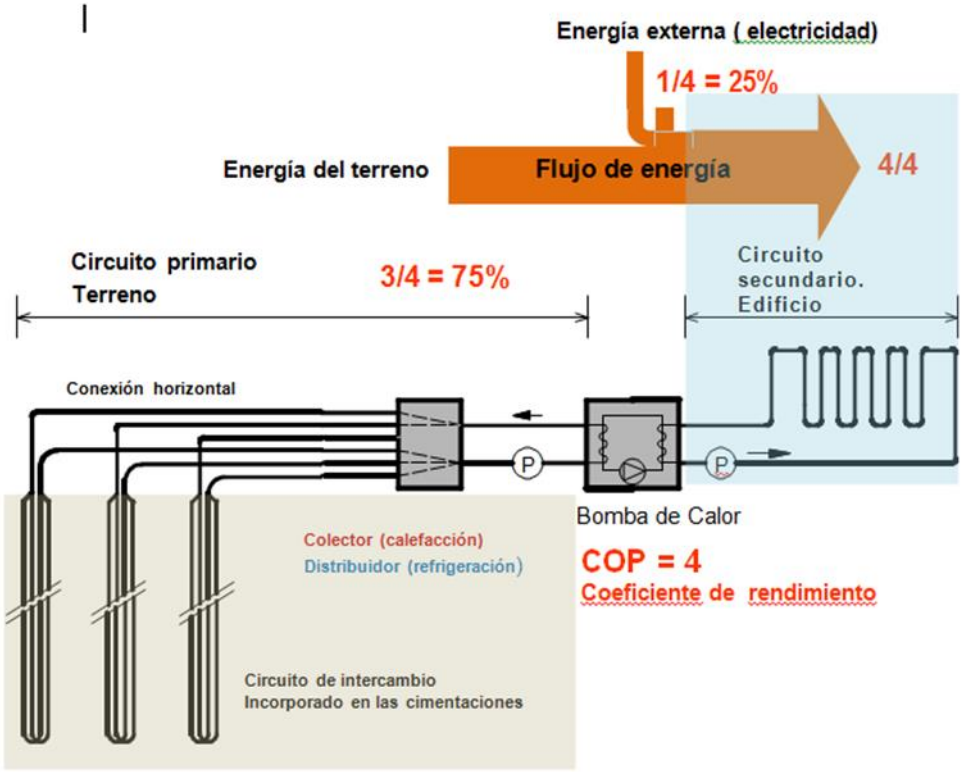


Figura 4-97. Esquema de un sistema geotérmico de intercambio con cimentaciones termoactivas y estructuras termoactivas [77].

En la Figura 4-97 el esquema de un sistema geotérmico que utiliza cimentaciones termoactivas y estructuras termoactivas, una bomba de calor geotérmica (GSHP) para regular las temperaturas, y un flujo de energía térmica extraído en un 75 % del terreno y en un 25 % proveniente de la electricidad utilizada por la bomba de calor. Coeficiente de rendimiento del sistema, COP = 4 [77].

El factor decisivo es lograr el equilibrio en el comportamiento de los dos medios durante todo el ciclo climático, y durante su uso a lo largo del tiempo. Esto implica considerar los ciclos de extracción de energía del edificio y la carga del terreno, así como el almacenamiento y descarga de energía en el terreno para luego inyectarla en el edificio.

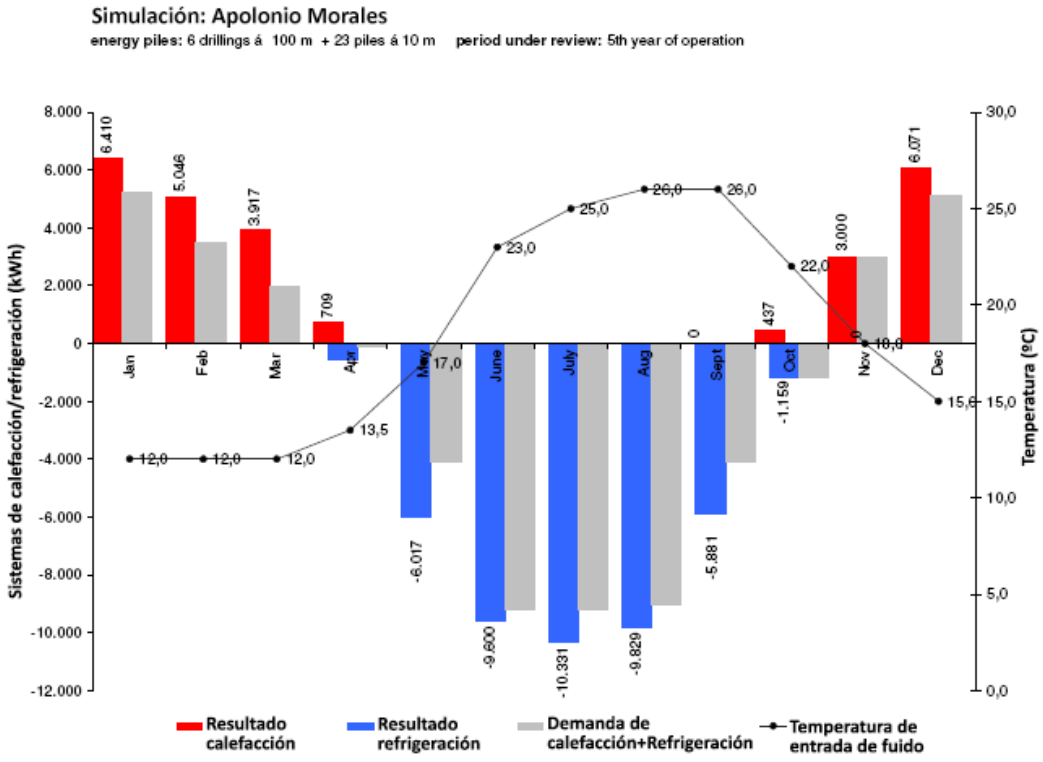


Figura 4-98. Demanda anual de calefacción y refrigeración. Fuente: Eneres.

La Figura 4-98 explica La imagen muestra cómo se satisface la necesidad de energía para calentar y enfriar a lo largo del año, y representa el intercambio fluctuante de energía entre el edificio y el suelo. En este caso, el uso de recursos renovables como el almacenamiento en el terreno y el aprovechamiento de un flujo constante de agua subterránea, permiten cubrir la diferencia entre las necesidades de calefacción y refrigeración. Estos recursos potencian la capacidad de enfriamiento o calentamiento.

Fase de Carga: Las estructuras del edificio suelen incorporar losas que almacenan energía para proporcionar calefacción o refrigeración. Esto se logra mediante el uso de intercambiadores de calor integrados que circulan agua caliente o fría a través de estos elementos constructivos. Cuando el agua fluye a través de los tubos, transfiere la capacidad de enfriar o calentar a la losa, dependiendo de la temperatura del agua. Se puede controlar activamente este proceso al modificar la temperatura del agua, el flujo de agua y la duración del intercambio. El desafío radica en lograr acumular la cantidad necesaria de energía en las losas para poder satisfacer la demanda del día siguiente, gracias a la inercia del sistema. En realidad, dado que la demanda prevista para el día siguiente puede variar, es

necesario gestionar las reservas de energía en las losas para evitar desequilibrios de temperatura y posibles problemas de exceso de calor o frío en las habitaciones.

Almacenamiento: Las losas termoactivas cumplen la función de compensar el desfase en el tiempo entre la energía disponible y la energía requerida, al igual que otros sistemas de almacenamiento térmico. El calor excesivo durante el día, ya sea del sol o generado por las personas y equipos dentro del edificio, se convierte rápidamente en energía almacenada en las estructuras del edificio, lo cual provoca un aumento en la temperatura interna del edificio. Al realizar esta acción, también se produce un aumento en la temperatura de la habitación, aunque esta es controlada por la masa inercial presente. A modo de ejemplo, si una losa de hormigón de 14 cm experimenta un incremento o disminución de temperatura de 2 ºC, se estará almacenando una cantidad de calor o frío equivalente a 190 Wh/m². Igualmente, se podrá aprovechar una capacidad de intercambio de 25 W/m², la cual estará disponible durante un lapso de 8 horas [76].

Fase de descarga: la climatización termoactiva se lleva a cabo gracias a dos efectos simultáneos. El 60 % del calor almacenado en el concreto se transfiere por radiación en el espacio, mientras que el 40 % restante se transfiere por convección. La interacción radiante entre las losas y los usuarios permite una descarga pasiva y, en parte, activa gracias a la importante inercia del sistema.[76]

4.6.3.1.1 Almacenamiento de calor en el terreno. Intercambio y almacenamiento de calor y enfriamiento geotérmicos mediante cimentaciones termoactivas

El terreno posee la capacidad de almacenar energía de manera natural en volúmenes específicos y confinados, convirtiéndose en un valioso recurso para la administración de diversas formas de energía en el entorno. Este factor se convierte en uno de los principales medios de disminuir la demanda energética en los edificios eficientes.

El subsuelo es un recurso de almacenamiento disponible para todos, sin importar su ubicación. Idealmente adaptado a los diversos recursos energéticos de moderada intensidad que deben ser recuperados y consumidos localmente, de forma distribuida, ya que no son adecuados para el transporte o la centralización. Es posible aprovechar de manera accesible la conversión de estos recursos térmicos en los edificios para ser utilizados como una fuente de enfriamiento o calentamiento. La utilización de recursos de almacenamiento inerciales presentes en la naturaleza, el diseño y la estructura de los edificios, posibilita la aplicación de

estrategias eficientes que combinan el conocimiento tradicional con los avances en materiales, técnicas y tecnologías disponibles.

El almacenamiento de frio y calor a temperaturas bajas tiene un rendimiento excelente. Durante un periodo entre estaciones, la probabilidad de lograr que el terreno alcance temperaturas de entre 5 ºC y 30 ºC es de aproximadamente el 70 % al 90 %. Si se alacena calor a temperaturas más altas, la eficiencia del almacenamiento disminuye a medida que la temperatura aumenta. Esto se debe a que la capacidad de movimiento de las moléculas en un entorno natural promedio sólo permite equilibrar el almacenamiento de energía en rangos medios. Es un aspecto inherente a la naturaleza buscar un perfecto equilibrio y eficiencia en niveles adecuados de potencia, presión, velocidad, caudal y temperatura. Esto hace reflexionar sobre la importancia de diseñar sistemas energéticos en los edificios que sigan estos principios de manera óptima.

Según se muestra en la Figura 4-99, el proceso de transferencia de calor entre el terreno y las cimentaciones termoactivas se basa principalmente en la conducción, aunque las propiedades del suelo pueden influir en la eficiencia de esta transferencia. La transferencia de calor a través de la convección y la radiación es mínima en el interior del terreno.

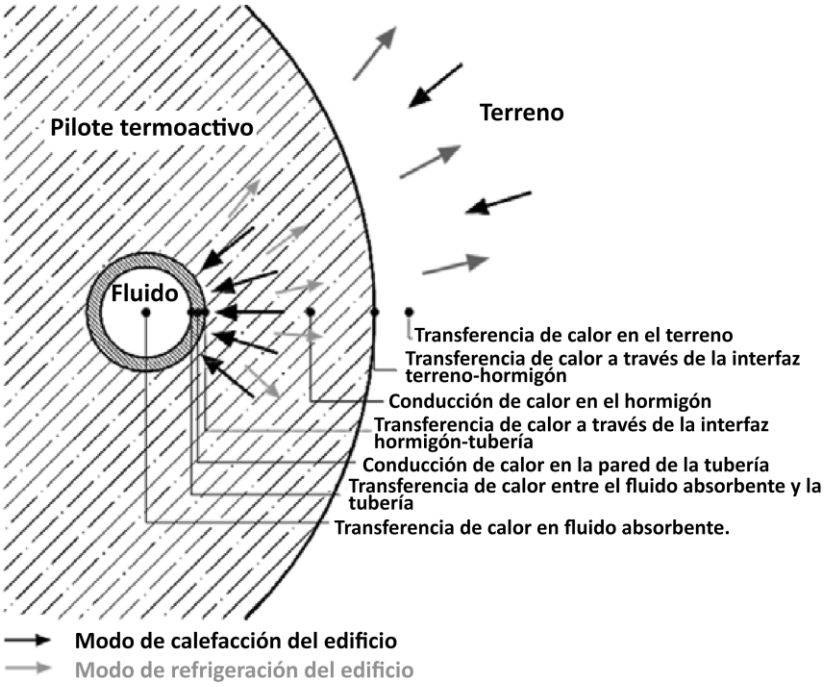


Figura 4-99. El mecanismo de transferencia de calor entre el terreno y las cimentaciones termoactivas [78].

Con las cimentaciones termoactivas, las temperaturas de almacenamiento tienen los siguientes rangos:

- Baja temperatura 5 ºC - 30 ºC
- Media temperatura 30 ºC - 50 ºC

La gestión del calor residual de los edificios y el uso de energías renovables en calefacción y refrigeración, requieren de la implementación de sistemas de Almacenamiento de Energía Térmica, o su término en ingles Thermal Energy Storage (TES). Las energías de calor provenientes de la naturaleza y de los residuos antrópicos producen grandes cantidades de energía térmica alrededor de los edificios, la cual puede ser incorporada como recursos primarios en el sistema. Para lograr esto es suficiente contar con equipos que posibiliten el aprovechamiento, almacenamiento y reutilización de la energía térmica de media y baja temperatura que a menudo se desaprovecha.

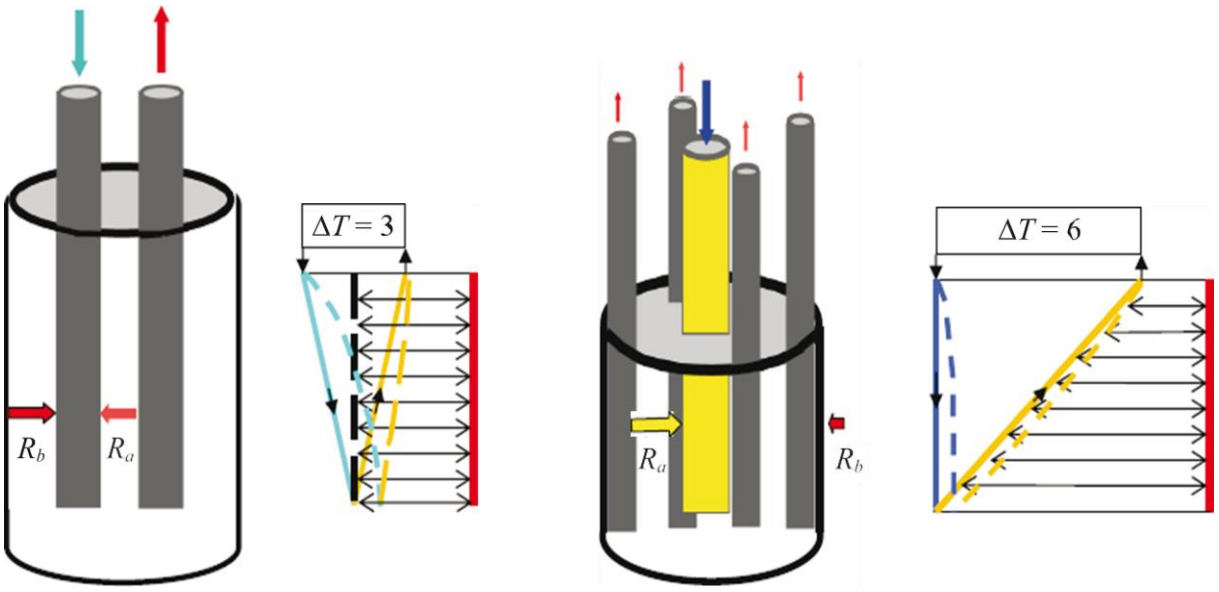


Figura 4-100. Esquemas de distintas opciones de colectores geotérmicos [79].

Una manera altamente eficiente para prevenir la discrepancia estacional entre la demanda y el suministro de energía es mediante el uso de cimentaciones termoactivas para el almacenamiento subterráneo de calor. Existen numerosos sistemas en Europa que operan en aplicaciones de baja temperatura, oscilando entre 5 ºC y 25 ºC, con el objetivo de almacenar calor o enfriar el suelo para utilizarlo como sistema de refrigeración en verano.

Se puede aprovechar el subsuelo como reserva temporal de calor o, al contrario, usarlo como sumidero de calor mediante su enfriamiento. El terreno cuenta con una gran capacidad para retener el calor y para aislarlo, lo que permite almacenar

grandes cantidades de calor y frío durante un largo periodo de tiempo, como por ejemplo, durante toda una temporada entre estaciones.

El almacenamiento subterráneo de energía ofrece diversas oportunidades para ahorrar energía y utilizar recursos renovables. Por ejemplo, se puede almacenar el calor generado por la energía solar en verano para utilizarlo durante el invierno como calefacción. También es posible aprovechar la diferencia de temperatura entre el aire exterior en invierno y verano para enfriar el terreno. Otro ejemplo es el proceso de enfriamiento del aire durante la noche, que puede ser utilizado como un salto térmico.

Las cimentaciones termoactivas permiten almacenar frío y calor de forma estacional. La transferencia de calor puede ocurrir a través del terreno o de algún acuífero cercano a la superficie. Sin embargo, la presencia de corrientes de agua o de accidentes geológicos puede convertir el sistema de intercambio en un dispositivo que disipa energía, lo cual puede resultar atractivo en determinadas situaciones..

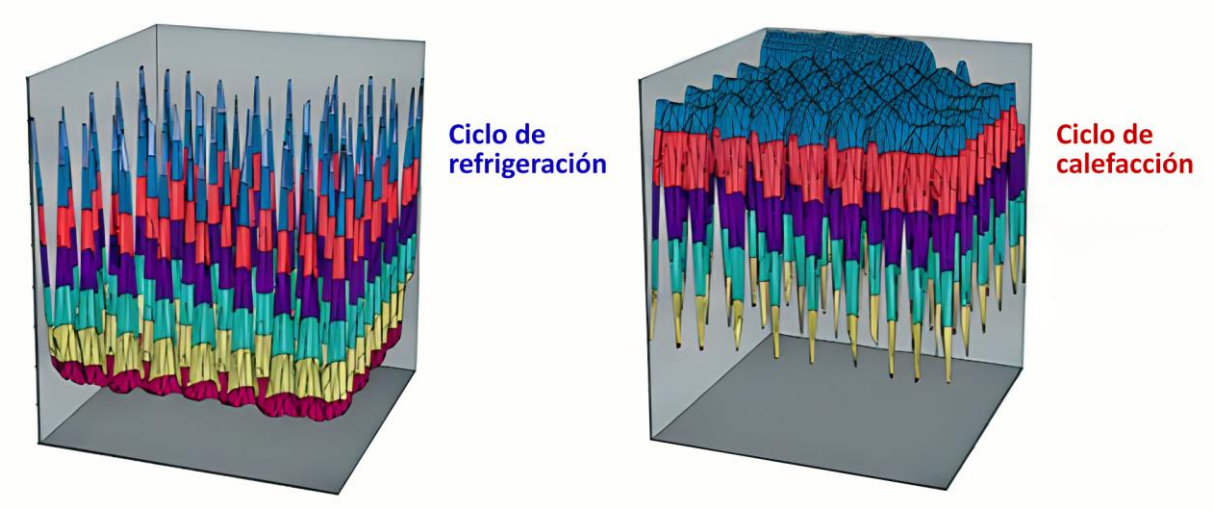


Figura 4-101. Temperaturas generadas por pilotes termoactivos. Fuente: Eneres - Enercret.

En la Figura 4-101 se muestra una representación en tres dimensiones de las temperaturas del suelo generadas por un conjunto de pilotes termoactivos al interactuar térmicamente con un edificio. El suelo, actuando como un intercambiador de calor limitado, es capaz de resistir cambios de temperatura de hasta 30 ºC con un rendimiento sobresaliente.

El terreno reacciona a la transferencia de calor realizada por los intercambiadores como un acumulador inercial real, donde el calor se mantiene en un espacio limitado que, en la mayoría de los casos, no se extiende más allá de 6 metros desde el centro del intercambiador. El edificio intercambia calor con el medio ambiente, lo cual genera ciclos de carga y descarga del terreno que se ajustan a la necesidad de calor y frío en diferentes estaciones para mantener el ambiente a temperatura adecuada.

4.6.3.1.1.1 Cimentaciones termoactivas

Es posible aprovechar la energía del subsuelo mediante elementos de cimentación, pero esto está condicionado por las características y tamaño de los cimientos. Además, estos requisitos están supeditados a las características del terreno y las necesidades arquitectónicas de la construcción en proceso. Cuando se emplean pilotes que se construyen en el lugar o muros subterráneos como base, se están creando las condiciones ideales para aprovechar eficientemente la energía geotérmica en la construcción. Estos elementos suelen sumergirse a profundidades que permiten activar una gran área de suelo para el intercambio de energía. Existen diferentes opciones disponibles para zanjas de cimentación, soleras, colectores, etc.

En los cimientos, se suelen insertar tubos de materiales sintéticos, generalmente se utilizan circuitos herméticos y sellados hechos de tubos de polietileno. El líquido de absorción fluye por estos conductos en un ciclo cerrado para llevar energía a la central térmica del edificio. Según las circunstancias, este fluido puede presentarse como agua con incorporaciones de compuestos que evitan la congelación. Ya sea en el lugar de construcción o en los talleres del fabricante, el sistema de tuberías se incorpora en las jaulas de las armaduras [76].

Posteriormente, el especialista en estructuras coloca las armaduras equipadas con tuberías en la ubicación designada y procede a llenarlas con hormigón.

Después, los sistemas de tuberías de las bases termoactivas se unen al distribuidor a través de conductos horizontales de conexión. La mayoría de estos conductos son instalados debajo de la solera y en las paredes exteriores del edificio que están en contacto con el terreno [76].



Figura 4-102. Red de colectores horizontales.
Fuente: Eneres - Enercret.

La Figura 4-102 ilustra cómo los circuitos de las cimentaciones termoactivas se conectan con el colector general de la instalación mediante una red de tubos colectores horizontales..

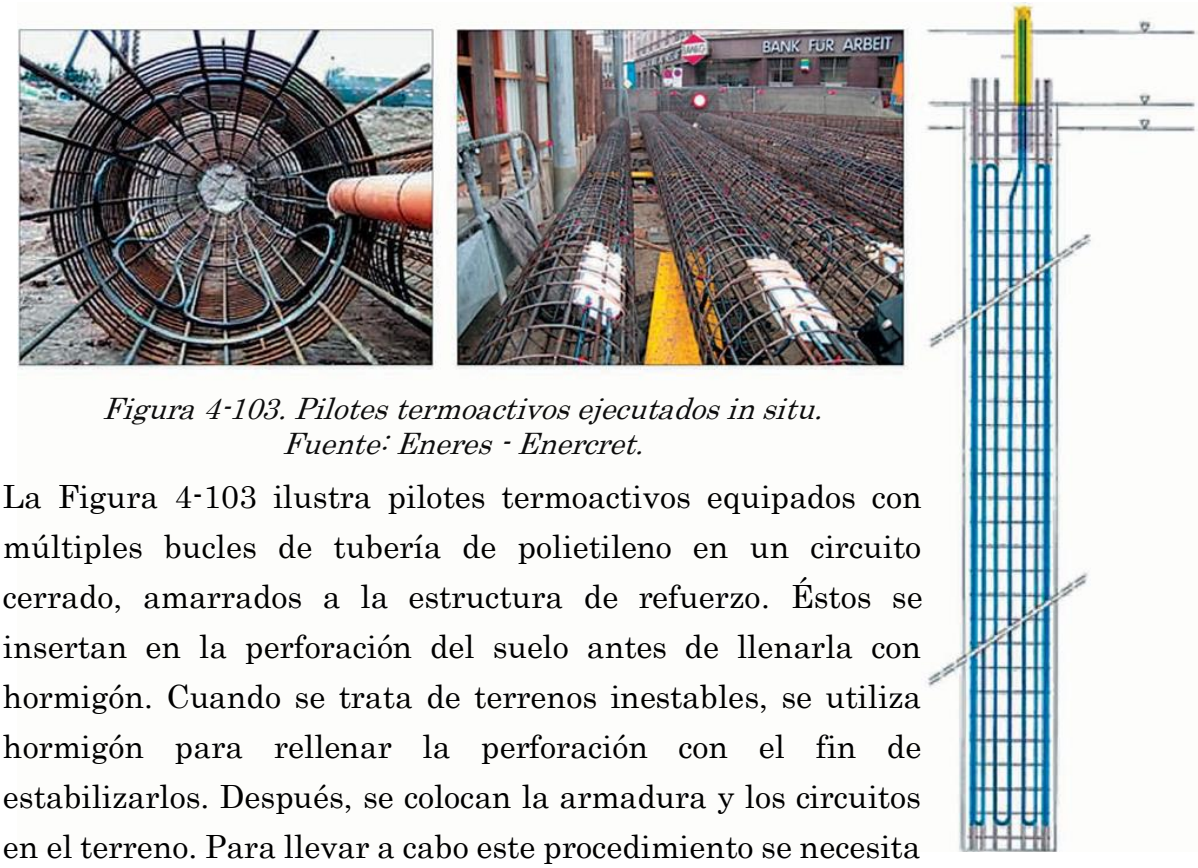


Figura 4-103. Pilotes termoactivos ejecutados in situ.
Fuente: Eneres - Enercret.

La Figura 4-103 ilustra pilotes termoactivos equipados con múltiples bucles de tubería de polietileno en un circuito cerrado, amarrados a la estructura de refuerzo. Éstos se insertan en la perforación del suelo antes de llenarla con hormigón. Cuando se trata de terrenos inestables, se utiliza hormigón para rellenar la perforación con el fin de estabilizarlos. Después, se colocan la armadura y los circuitos en el terreno. Para llevar a cabo este procedimiento se necesita una ejecución meticulosa y también es fundamental colocar los tubos correctamente, con los radios de giro y las fijaciones apropiadas. La elección del tubo adecuado, dentro de la amplia gama de opciones disponibles en la industria, también se basa

En la mayoría de los casos, estos trabajos se llevan a cabo de manera secuencial, debido a que es imprescindible que las paredes de la planta baja estén preparadas antes de proceder con la instalación de los conductos de unión. Se recomienda que el área para el distribuidor general esté situada por encima del nivel del nivel freático y, si es factible, cerca de la sala técnica. El distribuidor se compone de un colector de flujo y reflujo, al que se conectan los sistemas de tuberías.

Durante la ejecución, se requiere aplicar una presión constante de 7-8 bar a los circuitos de tuberías para asegurar su estanqueidad de manera continua. Es necesario llevar a cabo una evaluación de las presiones y documentarlo en un protocolo, tanto antes como después de aplicar el hormigón.



Figura 4-104. Pantalla y solera termoactivas.
Fuente: Eneres - Enercret.

En la Figura 4-104 se representa el funcionamiento de una pantalla y una losa termoactivas durante las labores de expansión del metro en Viena [80]. Austria es un país ubicado en el corazón de Europa. La cantidad de rendimiento de estos elementos está determinada por el área de contacto que tienen con el suelo. En resumen, los pilotes tienen una capacidad similar a la de un muro pantalla de dos caras, un muro de una cara o una pantalla de pilotes. Sin embargo, la capacidad de intercambio es menor en una pantalla de pilotes y aún menor en una solera o losa que solo tiene una cara en contacto con el terreno.

En numerosas ocasiones, se emplean pilotes intercambiadores de energía preindustrializados, sobre todo en el caso de pilotes de fricción y/o para construcciones de menor tamaño. Es bastante habitual en Europa la prefabricación de pilotes de hormigón termoactivos para mejorar la capacidad portante del terreno mediante la instalación de pilotes prefabricados. La utilización de este tipo de pilotes se realiza comúnmente debido a sus beneficios en términos de costo y eficiencia en la construcción. Es posible incorporar el sistema de absorción en los

pilotes mediante el uso de tubos adecuados de PEX durante la fabricación de los elementos prefabricados.

Una vez que se han ejecutado los pilotes, solamente es necesario eliminar el suplemento de poliespán para conectar el pilote a la línea de interconexión. El tamaño de estos pilotes transmisores de energía varía entre 30/30 cm y 40/40 cm en su sección transversal, y pueden llegar a tener una longitud de hasta 14 m.



Figura 4-105. Fabricación de pilotes termoactivos.
Fuente Nagelebau- Eneres - Enercret.

En la Figura 4-105 se muestra el proceso de producción de pilotes termoactivos en la fábrica de NAGELEBAU/ENERCRET. esa empresa es la responsable de desarrollar de esta técnica innovadora que se centra en fortalecer, mejorar y aprovechar la energía en terrenos inestables e inundables, como los que se encuentran en la región de Voralberg, donde se sitúa en Rothis. Austria.

Los pilotes prefabricados tienen la capacidad de alcanzar longitudes de hasta 28 m gracias a un innovador método de unión que permite un montaje rápido y eficiente, perfecto para las labores de construcción.

4.6.3.1.1.2 Calefacción, refrigeración / freecooling

Gracias a los avances tecnológicos, esta tecnología que inicialmente se utilizaba únicamente para calentar edificios mediante una GSHP, ahora también puede emplearse en la refrigeración.

El calor del subsuelo puede ser capturado y transferido al circuito principal mediante el uso de una GSHP, utilizando los elementos de cimentación para este proceso. La temperatura aumenta a un punto más alto, ideal para calentar el ambiente. En el caso de los fundamentos de hormigón, la temperatura media usualmente es de 13 ºC, sin embargo, mediante el uso de una bomba térmica se pueden generar temperaturas promedio de entre 25 y 35 ºC [81]. Estas

temperaturas son adecuadas para utilizar calefacción por medio de radiadores de techo o por elementos de construcción.

La GSHP opera de manera opuesta a la de un frigorífico, ya que recolecta calor en el evaporador y lo transfiere al condensador a una temperatura más elevada. La absorción y acumulación de calor es el objetivo primordial.

Se prevé un aumento progresivo en el uso del aire acondicionado en el futuro debido al incremento del uso dispositivos eléctricos en las oficinas, la presencia de grandes áreas de vidrio en las fachadas y la mejora en el aislamiento térmico de los edificios. Con el aumento, se vuelve aún más relevante el acoplamiento de la masa del edificio con el terreno.

Cuando la refrigeración proveniente del subsuelo no sea suficiente, es posible incorporar al sistema una máquina frigorífica o una bomba térmica reversible.

Si se utiliza el mismo sistema de energía para la calefacción y el aire acondicionado del edificio, se pueden reducir significativamente los costos de inversión y operación, ya que la refrigeración proveniente de origen terrestre apenas genera gastos. La refrigeración del suelo por medio de la calefacción con GSHP aumenta la capacidad de generación de energía.

Los sistemas de regulación de temperatura por núcleo de hormigón permiten ahorrar en gastos de inversión, y brindan al usuario una sensación de confort gracias a su capacidad para absorber radiación. A diferencia de los sistemas tradicionales de climatización, no generan corrientes de aire molestas. Debido a que pueden retener calor, estas instalaciones proporcionan temperaturas constantes, incluso cuando se aumenta la demanda por un período corto de tiempo. Otro beneficio adicional es la flexibilidad que estos sistemas le brindan tanto al arquitecto como al usuario en el diseño de los espacios.

4.6.3.1.2 Climatización termoactiva. Refrigeración y calefacción mediante estructuras termoactivas

Los forjados inerciales o termoactivos son una solución perfecta para la climatización de edificios que cuentan con estructuras inerciales. Estos sistemas se conectan a la geotermia para lograr un resultado óptimo. Se les conoce también como concrete core systems, sistemas de enfriamiento y calefacción que hacen uso de la estructura de hormigón.

Los intercambiadores de calor tubulares se incorporan de manera directa en la estructura de concreto. Son tubos multicapa de polietileno (PE) y aluminio, los cuales son empleados como intercambiadores. Los tubos tienen un tamaño de entre 15 mm y 20 mm de diámetro, y se sitúan a distancias que varían de 10 a 30 cm. Se

instalan en el interior de las losas, a una altura que se sitúa en el medio, aproximadamente a la misma altura que la zona neutra de la losa estructural.

Debido a que la mayor parte del intercambio térmico ocurre a través del techo (aproximadamente 2/3) y no por el suelo (que sería un 1/3), los tubos pueden ser desplazados cerca de las superficies del techo, las cuales son más eficientes para transferir el calor.

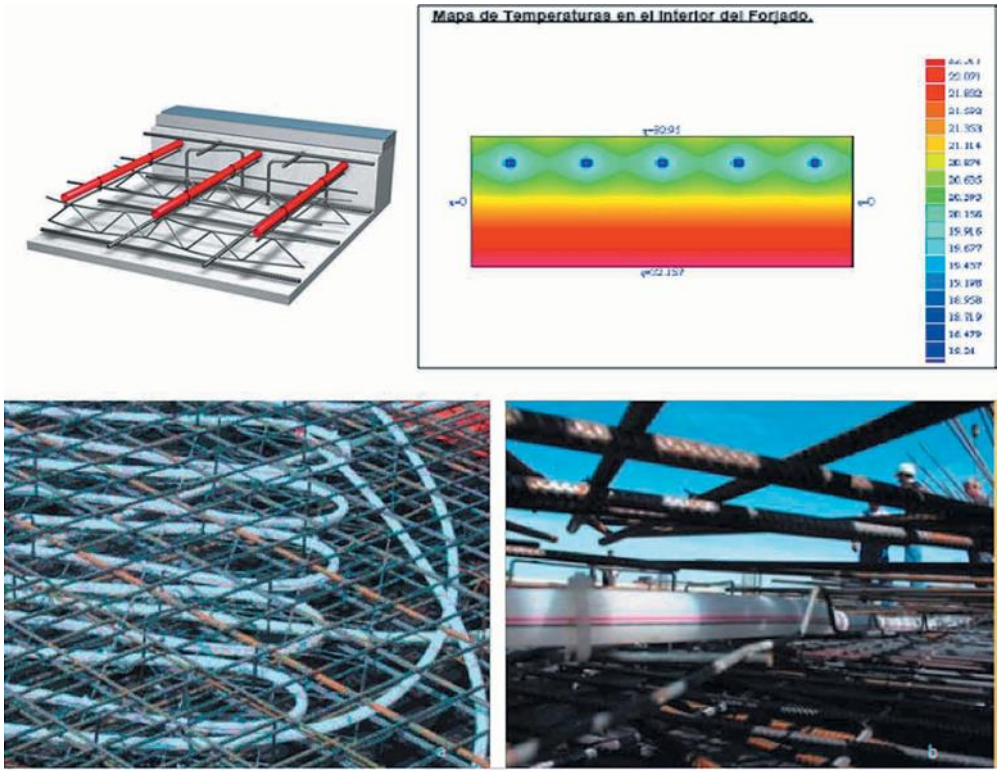


Figura 4-106. Instalación de los conductos de PE integrados dentro de una losa termoactiva en ejecución.
Fuente: Rehau - Eneres.

Dependiendo de la ubicación de los intercambiadores y su disposición dentro de las losas, se pueden llevar a cabo distintas formas de intercambio térmico, en distintos momentos. Es importante que se utilicen materiales y soluciones adecuadas para los acabados y revestimientos de los techos y suelos, de manera que no afecten la transferencia de calor.

A diferencia de los sistemas de climatización por suelo radiante, los sistemas termoactivos incorporan la instalación de los circuitos de intercambio tubulares durante la construcción de la estructura, incluyendo el armado, encofrado y vertido del hormigón. Para evitar problemas en la estructura, es necesario planificar meticulosamente e incorporar medidas de diseño que eviten daños, especialmente en áreas con alta tensión cerca de columnas y patios.

Antes de ser incorporados en las losas y forjados, se realiza una inspección visual y se someten los tubos a presión para detectar posibles fugas. Es importante colocar los tubos de manera cuidadosa para prevenir posibles daños que podrían dar lugar a futuras reparaciones. Se pueden prevenir los retrasos en la ejecución implementando medidas adecuadas de control de calidad y contando con proveedores especializados en estos sistemas.



Figura 4-107. Instalación de intercambiadores y colectores de una losa termoactiva. Fuente: Uponor - Eneres

En la Figura 4-107 se puede observar cómo se instalan los intercambiadores y colectores en una losa termoactiva. La imagen muestra los extremos de los circuitos presurizados, los cuales están cerrados con llave y equipados con manómetros y el proceso de vertido de hormigón en una losa termoactiva.

En el caso de los forjados termoactivos, se instala una tubería de polietileno reticulado entre las armaduras de las losas de hormigón armado. Esta tubería se suministra pre montada sobre unas mallas metálicas que se integran entre las armaduras estructurales, de acuerdo a lo especificado en el diseño. El agua fluye a través de estas conexiones, funcionando como un medio para transferir calor y llevar energía al interior de la estructura. Esta tecnología utiliza el potencial de retención de calor del hormigón, lo que lo convierte en una opción óptima para mitigar amortiguar las cargas de calor y frío.

Los sistemas de calefacción de baja-temperatura, como los sistemas de calefacción de pared, suelo o techos, son perfectos para aprovechar la energía geotérmica. Estos sistemas tienen la capacidad de ser utilizados tanto para resolver la calefacción como la refrigeración. Durante el verano, el agua utilizada para transferir calor en el sistema de tuberías se enfría. En cambio, durante el invierno, se calienta. Durante la primavera y el otoño, el agua puede ser calentada o enfriada

según sea necesario para mantener la temperatura adecuada de la masa de hormigón de la estructura, de acuerdo a la estación, al día y al uso.



Figura 4-108. Circuitos de intercambio premontados sobre un entramado de acero. Fuente: Uponor - Rehau.

La Figura 4-108 muestra la instalación de los circuitos de intercambio que son preensamblados en un enrejado de acero que se encuentra incrustado en la losa termoactiva. Es relevante destacar que mediante el diseño de los intercambiadores se logra adaptar el flujo de energía en las losas de acuerdo a los requerimientos de equilibrio térmico de diferentes áreas del edificio.

Es viable implementar losas termoactivas tanto en proyectos de construcción nuevos como en proyectos de rehabilitación, ya que se puede mejorar la inercia de los forjados existentes para alcanzar la masa adecuada que permita el equilibrio termodinámico del sistema. A estas losas o forjados existentes se les incorporan circuitos de intercambio y sistemas de colectores y se hormigonan con morteros conductores quedando totalmente incorporados en la estructura original.

En la Figura 4-109 se muestra cómo se realiza la activación térmica de un suelo en un edificio de oficinas donde toda la estructura horizontal se ha utilizado como sistema de climatización en combinación con estructuras geotérmicas también termoactivas.

En situaciones de rehabilitación, donde la disponibilidad de espacio, altura y volumen son fundamentales, contar con la opción de incorporar sistemas integrados en una masa de solo 5 o 7 cm que brinden un gran confort en toda la superficie a un costo ajustado y con una eficiencia significativa, representa una alternativa atractiva.



Figura 4-109. Proceso de termoactivación de un forjado.
Fuente: Eneres.

En los sistemas de climatización por aire el flujo convectivo, el movimiento del aire alrededor de las personas y los equipos puede dificultar la transferencia de aire y calor de forma impredecible e ineficiente. Esto puede ocurrir incluso en los espacios más pequeños con aire acondicionado. Las superficies termoactivas posibilitan alcanzar un medio térmico más balanceado.

Existe una distinción conceptual de relevantes entre los dos modelos de climatización. Uno es un sistema de climatización basado en aire, cuyo propósito es regular la temperatura del aire contenido dentro de un espacio, con el fin de afectar las temperaturas de las superficies y permitir la transferencia de calor con el cuerpo a través de la circulación del aire. El otro modelo, en un sistema hidrónico termoactivo cuyo objetivo consiste en transferir energía entre las superficies que limitan el área mediante la circulación de agua. Las superficies termoactivas no tienen la función de enfriar el espacio, sino de evitar que se caliente. Si un edificio no experimenta altas temperaturas, no requerirá de un sistema de refrigeración. Lo que significa un cambio de paradigma en las teorías de climatización aún vigentes.

Los sistemas termoactivos son más eficientes cuando se instalan en el techo y en el suelo. En la configuración de refrigeración o absorción de energía, se absorben las ganancias de calor del espacio por parte de las superficies termoactivas. Estas

ganancias incorporan los aportes provenientes del cuerpo humano, equipos, iluminación, obtención de energía solar, ganancias a través de la envolvente y el sistema de ventilación del edificio. Durante este proceso, el aire cálido se eleva y se genera convección. Además, los objetos cálidos como las personas y los ordenadores emiten calor radiante que se transfiere a los materiales activos electromagnéticamente debido a que tienen debido a si temperatura inferior. El calor capturado por el agua del sistema hidrónico es finalmente absorbido por las superficies termoactivas, lo cual permite su extracción tanto del espacio como del edificio. En todas las situaciones, cuando la temperatura del elemento termoactivo es más baja que la del aire, la del cuerpo humano y la de los equipos, absorberá el calor y extraerá el aire del espacio. Es fundamental comprender que la transferencia de calor siempre se produce desde los objetos que poseen una mayor cantidad de energía térmica hacia aquellos que tienen menor energía [76].

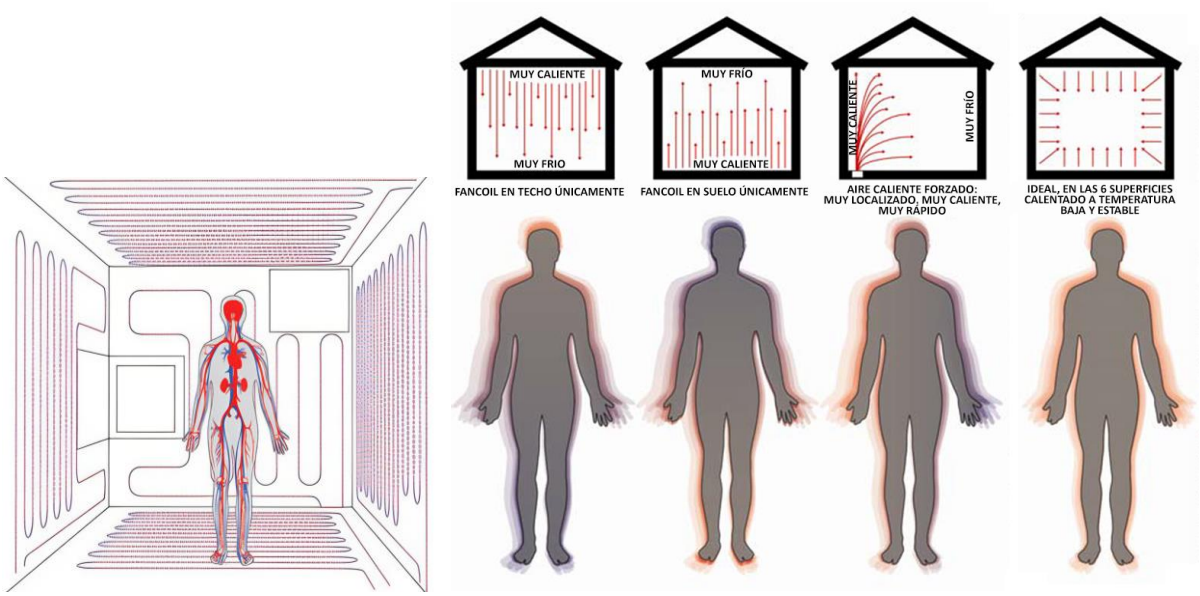


Figura 4-110. El edificio está concebido para la interacción con el individuo [82].

La Figura 4-110 muestra que la rehabilitación se centra en aprovechar la oportunidad de diseñar y construir el medio térmico que el cuerpo humano percibe de forma activa, en lugar de considerar a la persona como pasiva. De esta manera, se busca enfocarse en la eficiencia energética en la climatización. Rompiendo con el paradigma de que el individuo debe estar supeditado al edificio, se genera un cambio: el edificio se diseña para fomentar la interacción con el individuo.

Para abordar plenamente la cuestión del confort humano, es necesario incorporar en los cálculos térmicos las superficies que definen el espacio. Durante la mayor parte del siglo XX, las temperaturas de la superficie no fueron consideradas en los

cálculos de temperatura usando el método del bulbo seco y bulbo húmedo, como se puede observar en el diagrama psicrométrico de Carrier. En la actualidad, se emplea la Temperatura Operativa, que consiste en un promedio de diversas temperaturas radiantes tanto del aire como del entorno, para evaluar el desempeño y la comodidad térmica [76].

Los efectos de las superficies termoactivas van más allá del simple confort térmico y tienen un impacto significativo en otras áreas más allá de lo fisiológico. Una característica distintiva de los sistemas termoactivos es su habilidad para llevar a cabo la calefacción a temperaturas bajas y la refrigeración a temperaturas altas. En los sistemas que se fundamentan en la transferencia radiante, se busca regular la temperatura en la superficie.

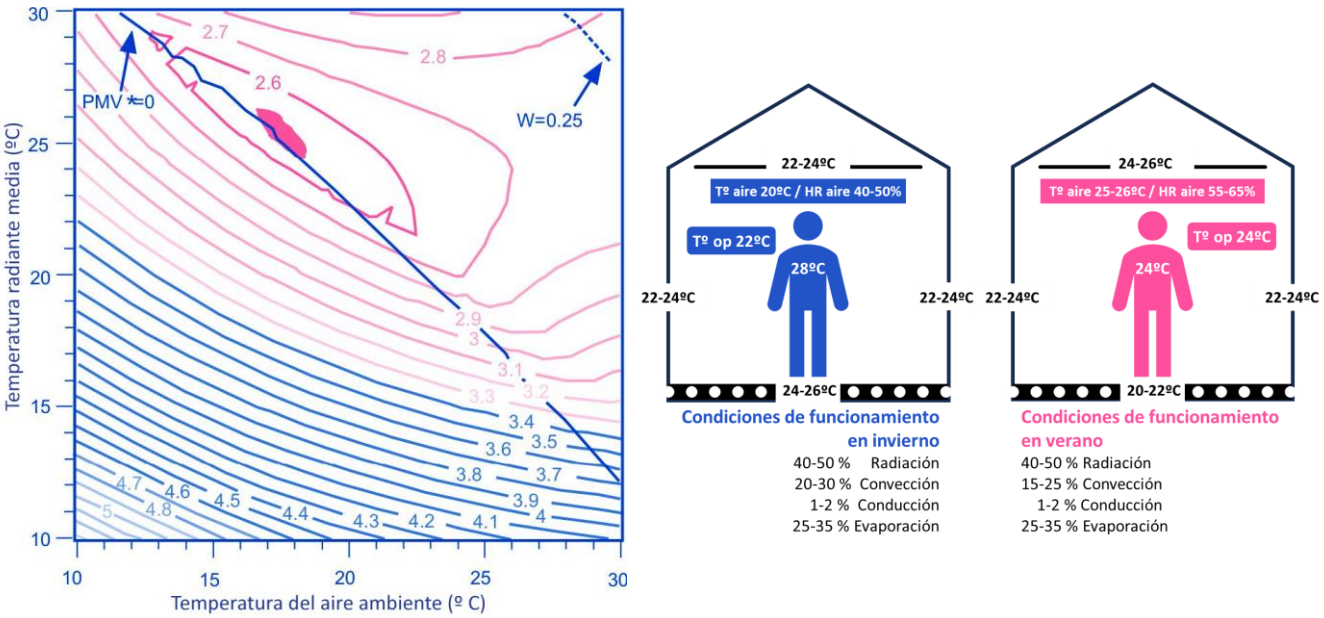


Figura 4-111. Relación entre el consumo energético del cuerpo humano (W/m²), temperatura del aire, y temperatura radiante media de los paramentos. Fuente: Lowex - Eneres.

La Figura 4-111, muestra cómo el consumo de energía del cuerpo humano (W/m²) está relacionado con la temperatura del aire y la temperatura radiante promedio de las superficies. Existe una combinación ideal de temperatura del aire y temperatura radiante promedio que produce un consumo mínimo de energía y un nivel óptimo de confort.

4.6.3.1.2.1 Control de temperatura y ventilación

Al igual que cualquier otro sistema de climatización, los dispositivos termoactivos forman parte de sistemas que se encargan de garantizar el confort higrotérmico en el edificio. Los sistemas termoactivos no tienen ninguna influencia en el

mantenimiento de la calidad del aire en el interior ni en el control de la humedad. La desagregación del sistema de aire y la climatización del edificio es una de las decisiones fundamentales para utilizar estos sistemas.

Es importante destacar que en el organismo humano, la regulación de la temperatura está separada del sistema de ventilación. La razón por la cual el cuerpo evolucionó de esta manera se debe a que el agua tiene una densidad energética 832 veces mayor que el aire [83]. La densidad energética es la cantidad de energía que puede ser almacenada en un determinado peso. Debido a la mayor densidad del agua, es posible aprovechar una mayor cantidad de energía al canalizarla en comparación con el aire (Figura 4-112).

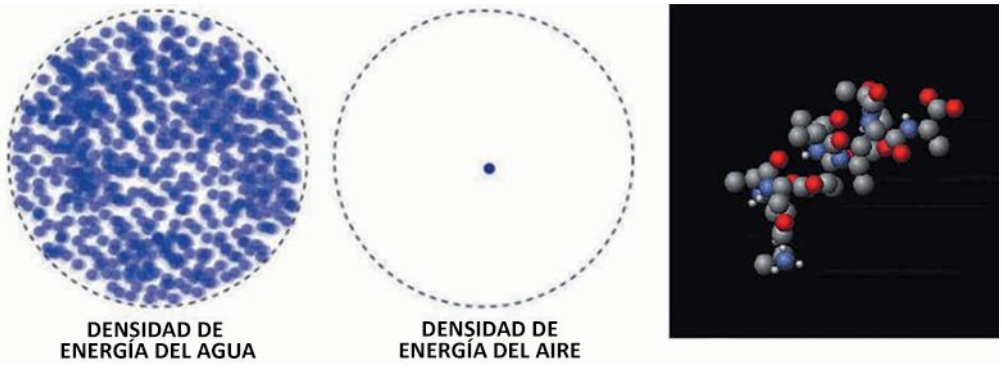


Figura 4-112. Mecanismos de intercambio térmico del cuerpo humano. Fuente: Modificado por el autor [82].

En la rehabilitación, la mayoría de los sistemas de climatización utilizan principalmente la convección como mecanismo de intercambio térmico con el aire, a pesar de ser el menos efectivo y el más ineficiente. Esto implica el contacto con el aire, tanto estático como en movimiento a una velocidad moderada.

El control de la humedad de un espacio otra clave esencial para el confort del ambiente interior. En los sistemas de aire acondicionado térmico se debe tener en cuenta la humedad. Eliminar la carga de calor proveniente de la humedad y la necesidad de aire fresco significa que la carga de aire fresco se reduce significativamente, lo que resulta en menos electrodomésticos, conductos, puertas, rejillas, etc. En muchos casos, reducciones significativas en la calidad del aire, incluidos los controles de humedad y ventilación, pueden liberar espacio y reducir los costos de instalación y mantenimiento, muchos de los cuales corresponden a sistemas térmicamente activos [76].

También se renueva el aire por razones de salubridad que varían según las necesidades asociadas al uso y ocupación del edificio. Para garantizar que se

consuma la mínima energía en el aire, el aire renovado se puede pretratar, calentar o enfriar mediante un intercambiador tierra-aire. La toma de aire y la expulsión tienen incorporado un recuperador de calor para reducir las pérdidas de energía en la ventilación, y sin tener que añadir sistemas adicionales para calentar o enfriar el aire en invierno o verano.

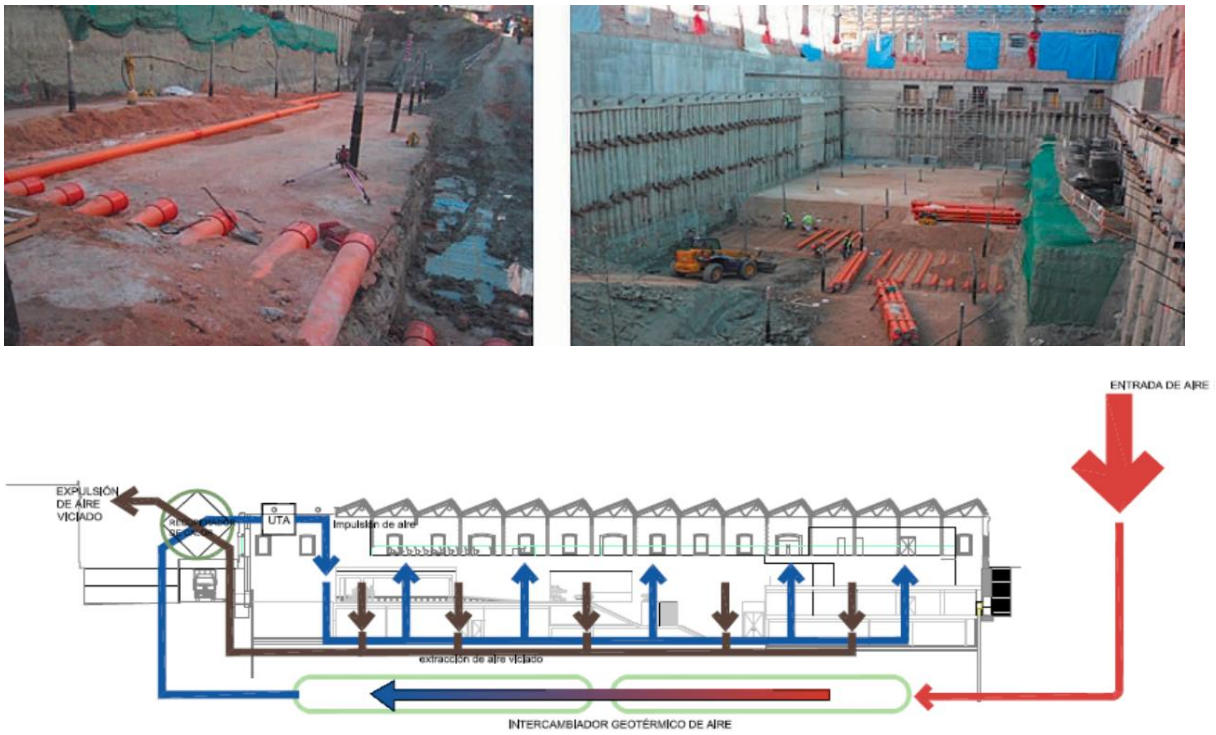


Figura 4-113. Instalación de pretratamiento geotérmico de aire.
Fuente: Eneres.

La Figura 4-113 ilustra el sistema de pretratamiento geotérmico de aire para 24.000 m³/hora, instalado en la rehabilitación del cuartel de Daoiz y Velarde en Madrid para el nuevo teatro infantil. En la fotografía se puede ver el sistema de intercambio geotérmico que se acoplará a losas termoactivas.

4.6.3.1.3 Bomba de calor

La Bomba de Calor Geotérmica (GSHP) es básicamente transfiere calor entre el terreno y una edificación (o un proceso). Esto permite que el compresor (eléctrico o de gas) requiera menos energía primaria, ya que en muchas ocasiones, el terreno tiene una temperatura más adecuada que el aire. Existen numerosas ventajas asociadas a las GSHP, ya que combinan el ahorro y la eficiencia energética (con un ahorro del 40 % al 60 % de la energía primaria utilizada en sistemas de climatización, en comparación con otros sistemas). Además, se considera una fuente de energía renovable y presenta beneficios en cuanto a su integración

arquitectónica, facilidad de mantenimiento y bajo nivel de ruido. Además, estos sistemas se fundamentan en tecnologías ampliamente conocidas, lo cual permite su implementación en gran medida a través de componentes ya existentes en el mercado. Al final, se destaca que la BCG tiene la habilidad de colaborar con otras fuentes de energía renovables en vez de reemplazarlas y puede contribuir a su desarrollo. Un ejemplo de esto es su capacidad de trabajar en sinergia con paneles solares térmicos.

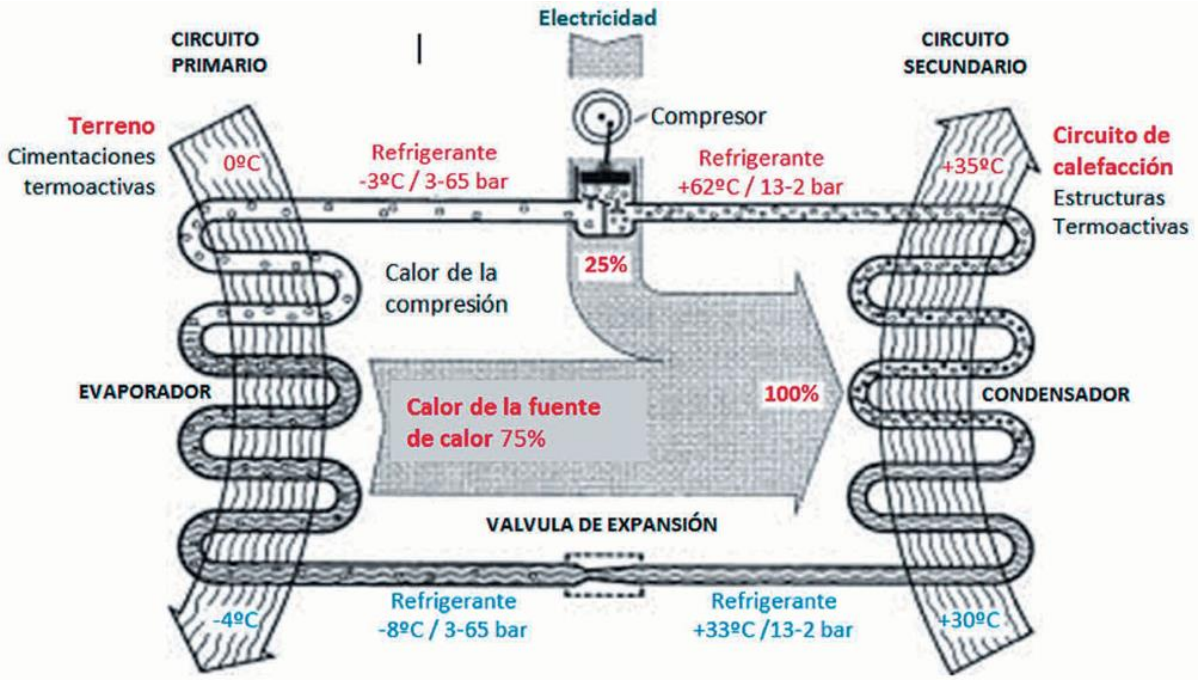


Figura 4-114. Esquema de una bomba de calor. Fuente: Modificado por el autor [77].

La Figura 4-114 muestra el esquema de una bomba de calor con los niveles de presión y temperatura correspondientes a un refrigerante R290, por ejemplo. La transferencia de calor ocurre desde el sistema primario hacia el refrigerante en el evaporador, y desde el refrigerante hacia el sistema secundario en el condensador.

Las GSHP son dispositivos de funcionamiento simple y de fácil mantenimiento. Además, son compactas y no requieren de grandes conductos o sistemas de ventilación debido a su capacidad para intercambiar energía a través de dos circuitos de agua. Sin embargo, es crucial que puedan que se comuniquen con los sistemas de control del edificio para recopilar constantemente información sobre su rendimiento, dado que desempeñan un papel fundamental en el proceso de intercambio donde la mejora operativa produce una mayor eficiencia.



Figura 4-115. Bombas de calor agua-agua.
Fuente: Eneres.

Implementar sistemas termoactivos en general permite aprovechar de manera eficiente áreas sustanciales dentro de los edificios. Gracias a la integración se consigue prácticamente la desaparición de los sistemas de transferencia de energía. Además, permite la reducción de los conductos y los sistemas de renovación y, facilita la implantación de bombas de calor agua-agua (Figura 4-115).

4.6.3.1.4 Operación y control de la refrigeración y la calefacción mediante estructuras termoactivas.

En los edificios equipados con sistemas de climatización termoactiva, la velocidad de cambio y respuesta de las temperaturas individuales en cada espacio es más lenta en comparación con un sistema activo. Las variaciones de temperatura en diferentes áreas son afectadas por diversos factores, como las ganancias de calor provenientes del sol, las fuentes de calor internas, la influencia de las personas que las utilizan, y la entrada de aire fresco a través de la ventilación. Es necesario administrar la carga de la calefacción y refrigeración de manera anticipada para implementar estrategias efectivas.

Se genera un efecto de autorregulación interesante debido a la leve disparidad de temperatura entre las superficies y la temperatura ambiente. Por lo general, la temperatura de las losas termoactivas varía dentro de un rango estrecho de 21 ºC a 25 ºC. En caso de que la temperatura en la habitación sea superior a la temperatura de la losa termoactiva, la losa funcionará como un sistema de enfriamiento a través de su superficie. Por ejemplo, si la temperatura de la losa es mayor a 20 ºC y la habitación no ha sido ocupada aún, cuando la temperatura de la habitación sea de 18 ºC en las mañanas frescas, la habitación se calentará de forma inmediata. Si durante el transcurso del día la temperatura aumenta a 21 ºC

debido a factores externos e internos, se procederá a refrigerar la habitación. La transferencia de calor entre la habitación y la losa termoactiva se regula y controla de manera automática. Esto ocurre de la misma manera cuando hay personas presentes, lo que provoca una respuesta instantánea de interacción, autorregulación y restablecimiento del equilibrio [76].

4.6.3.1.4.1 Estrategias de control y operación

El control del sistema termoactivo a corto plazo, que se lleva a cabo durante el día, es principalmente a través de la autorregulación reactiva mencionada anteriormente. En relación a la refrigeración o calefacción, se plantea la opción de utilizar los siguientes métodos y estrategias de funcionamiento:

Operación día-noche: si la losa termoactiva se carga de energía durante la noche con el propósito de calentar o enfriar, es necesario que cuente con una capacidad de almacenamiento adecuada para satisfacer la demanda diurna. Lograr una recarga precisa puede resultar complicado, ya que se requiere añadir un exceso de energía o ser capaz de soportar cambios de temperatura en la habitación. En términos estrictos, no existe un sistema de control basado en la temperatura de la habitación en este escenario. En cambio, se lleva a cabo una administración del almacenamiento de energía que varía en términos de precisión. La gestión mejora progresivamente a medida que se incluyen los datos de carga actualizada, la predicción del clima para el siguiente día y una estimación de las cargas internas. Estos elementos se añaden a la estrategia de control para lograr una mejora continua. En esta situación, la demanda del espacio menos favorable de cada nivel es lo que determina el nivel de recarga del sistema termoactivo.

Operación continúa: La carga de las losas termoactivas también puede ser constante durante el transcurso del día, y controlada mediante los cambios de temperatura del agua en los diversos sistemas de transferencia de energía a las diferentes zonas del edificio.

Control: las losas pueden recibir calor, ser enfriadas o desactivadas, dependiendo de las condiciones climáticas, la temperatura ambiente y la diferencia de temperatura del agua que circula por ellas. Además, se incluye la predicción del clima. Los parámetros de control de la temperatura de la habitación son: la temperatura de suministro, el caudal y los tiempos de funcionamiento de la bomba de impulsión. Todos ellos se utilizan para realizar ajustes en la temperatura.

El confort interior se ve influenciado por las condiciones de radiación presentes en el espacio. La expresión "asimetría de radiación" se utiliza para describir el contraste térmico máximo que ocurre entre dos caras opuestas dentro de una habitación. La incomodidad térmica puede ser causada por el desequilibrio de temperatura en las superficies cercanas, lo que provoca que las personas sientan calor o frío de manera desigual. En consecuencia, si el calentamiento ocurre exclusivamente mediante la losa, la temperatura de la superficie no deberá superar los 27 ºC aproximadamente. Para lograr la refrigeración adecuada, es importante que no haya un exceso de 14 K en la diferencia de temperatura entre la losa fría y las demás superficies dentro del área. Esta recomendación se basa en la norma ISO 7730 [84]. Estos estándares se satisfacen en construcciones eficientes energéticamente que cuentan con tecnología para regular la temperatura del hormigón. Cuando se utilizan disipadores de calor naturales junto con el sistema de suministro, las temperaturas se mantendrán en un rango de 18 ºC a 29 ºC. Esto asegura que la temperatura de la superficie de la losa esté muy cerca de la temperatura ambiente.

Mediante el uso del control de la temperatura de la losa termoactiva, es posible mantener las temperaturas ambientales deseadas para el confort interior en la mayoría de las ocasiones. Esto se logra al reducir de manera significativa las cargas térmicas solares e internas, lo cual es esencial en un edificio eficiente.

Dado que la ventilación junto con el sistema termoactivo solo cumple una función de higiene y no de temperatura, es posible reducir el volumen de aire necesario al mínimo para garantizar la adecuada renovación higiénica del aire. La sensación de confort también se incrementa gracias a la disminución del ruido y a la baja velocidad en el flujo de aire, que se obtiene al reducir el volumen de aire.

4.6.4. Caso 1. Rehabilitación integral de un palacete protegido para oficinas de la administración en Madrid

Se trata de un antiguo palacete construido a principios del siglo XX, el cual fue sometido a una restauración completa. Con la rehabilitación de este edificio, reconocido por su valor histórico y protegido por las autoridades, se aprovecharon los recursos disponibles de su entorno para generar su propia energía y así satisfacer las necesidades de confort de sus usuarios.

La rehabilitación se enfocó en abordar todos los aspectos relacionados con la eficiencia y sostenibilidad que son de interés actualmente. La visión integral del

proyecto buscó satisfacer las demandas de confort de los usuarios, y al mismo tiempo respetar el medio ambiente y aprobar los recursos disponibles en dicho entorno. A través de una evaluación holística del problema, la energía geotérmica se presentó como una alternativa sostenible para mantener la viabilidad del edificio a lo largo de su vida útil. Debido a que los requerimientos de su instalación tenían un impacto mínimo, esta opción resultó altamente idónea para un edificio con protección urbanística.



Figura 4-116. Oficinas de la Administración del Estado en un palacete protegido en el Barrio de Chamberí de Madrid.
Fuente: Eneres - Fernández Molina Obras y Servicios.

En la Figura 4-116 se muestran las imágenes del antes y después de la renovación de la fachada del edificio, donde se implementaron sistemas pasivos de tratamiento de aire, geotermia y estructuras termoactivas para garantizar una climatización eficiente. Todo esto ha sido realizado en un contexto de rehabilitación de alto nivel de exigencia. (Arquitecto: Ignacio Mendaro. Concepción energética: Eneres).

La intervención concibió al edificio como un sistema que se relaciona con las personas y el entorno. Este sistema bioclimático se encarga de pretratar el aire, aprovechar la energía del medio ambiente y residual, utilizar una estructura horizontal termoactivada y capturar la energía geotérmica. Todo esto con el objetivo de proporcionar la climatización necesaria en términos de calefacción y refrigeración para el edificio.

En primer lugar, se trató el aspecto de reducir la demanda, mediante la mejora de las características aislantes de la envolvente y el control de la radiación solar y la iluminación natural. Al mismo tiempo que se realiza un tratamiento meticuloso de las superficies exteriores, se aprovechan las condiciones de soleamiento en la

cubierta para precalentar el aire que se utilizará en invierno; y las condiciones de enfriamiento que se producen en los sótanos en contacto con el terreno para pre enfriar el aire que se utiliza en verano. En ambos casos, este aire templado se dirige a las unidades de tratamiento de aire y luego se introduce en el edificio para renovar el aire.

La siguiente medida fue establecer los requerimientos de energía para el sistema de climatización. Se propuso aprovechar la energía geotérmica como una alternativa de generación. Se ejecutaron 14 intercambiadores de calor verticales que alcanzan una profundidad de 150 m, junto con 45 pilotes que se emplean como intercambiadores geotérmicos en la pantalla discontinua de contención y cimentación [85]. Además, los forjados también se emplean en tareas relacionadas con la climatización. Estas son placas de hormigón visto con función de acumulación, transmisión y absorción de energía térmica. La generación de energía comienza en los intercambiadores geotérmicos y se combina con un sistema inercial, que utiliza losas como acumuladores y superficies radiantes para la climatización. Las tecnologías de captación geotérmica y las técnicas termoactivas, como los pilotes y las losas, utilizan eficientemente los recursos naturales y estructurales disponibles en el entorno y en el edificio para su máximo aprovechamiento.

El conjunto completo de intercambiadores tiene capacidad suficiente para cubrir completamente la demanda de energía para calefacción del edificio, así como el 70% de la demanda de energía para refrigeración [85]. Se encontró una solución para garantizar la cobertura completa en refrigeración al utilizar un sistema de inducción estacional del terreno. Utilizando energía térmica de bajo grado y temperaturas moderadas, se realizó la gestión del recurso geotérmico.

La Figura 4-117 representa el diagrama del sistema de transferencia de energía entre el edificio y el suelo mediante cimentaciones y estructuras termoactivas, lo cual permitió alcanzar la totalidad de la calefacción y refrigeración necesaria para el edificio. El aparcamiento del edificio cuenta con un intercambiador geotérmico en su estructura, que utiliza un mecanismo de inducción para enfriar el terreno en primavera con el aire exterior. (Arquitecto: Ignacio Mendaro. Concepción energética: Eneres).

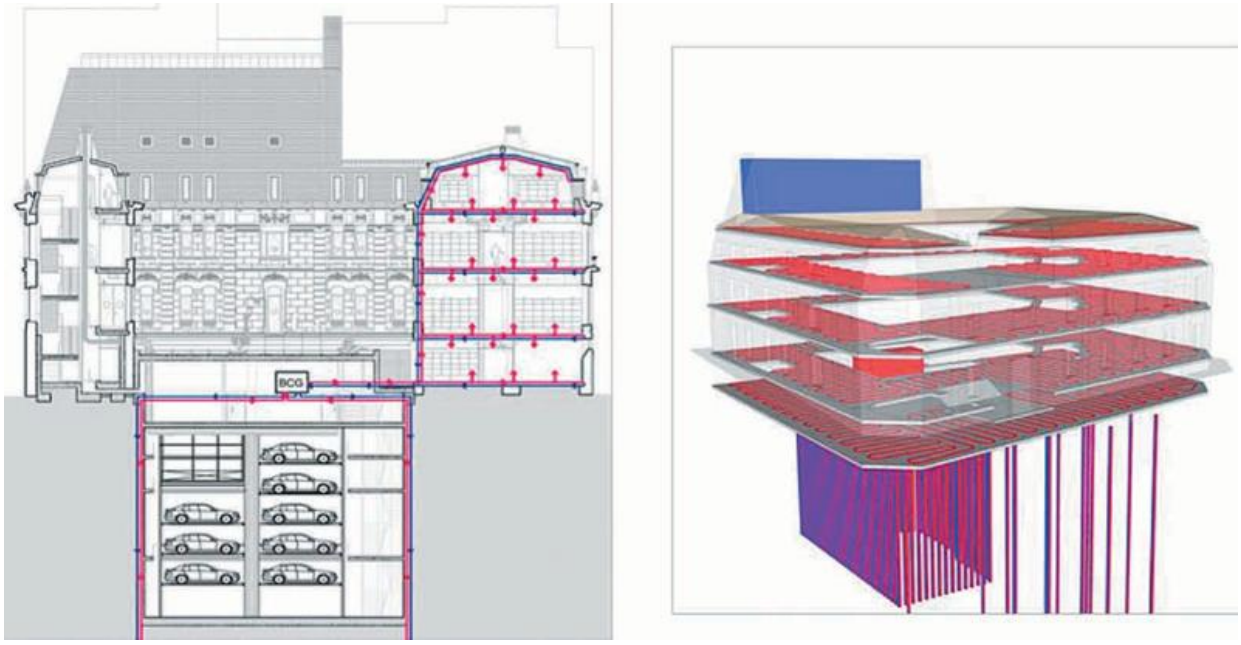


Figura 4-117. Esquema del sistema de intercambio de energía entre el edificio y el terreno a través de cimentaciones y estructuras termoactivas.
Fuente: Eneres - Fernández Molina Obras y Servicios.

4.6.5. Caso 2. Rehabilitación del Cuartel De Daoíz y Velarde, como teatro infantil y centro cultural (Ayuntamiento de Madrid)

En esta ocasión se realizó la rehabilitación de un edificio de estilo industrial del siglo XIX, ubicado en una región de la ciudad de Madrid que cuenta con un legado arquitectónico compuesto por estructuras industriales y de servicios. Durante la rehabilitación, se opta por preservar la apariencia externa de ladrillos y la estructura de cerchas metálicas, y se incorporan forjados termoactivos, que son losas de hormigón empleadas para regular la temperatura del edificio. La inercia es utilizada tanto en la calefacción como en la refrigeración para acumular energía. La energía geotérmica se emplea como fuente renovable para la calefacción y refrigeración del edificio, además de utilizarse para el tratamiento térmico del aire de la ventilación durante el verano y el invierno.

La Figura 4-118 representa el diagrama del sistema que utiliza energía geotérmica para el pretratamiento y la recuperación del aire renovado. La renovación del aire en este edificio destinado a teatro infantil es el aspecto que más energía consume y el que ofrece la mayor oportunidad de ahorro. (Arquitecto: Rafael de La Hoz. Concepción energética: Eneres).

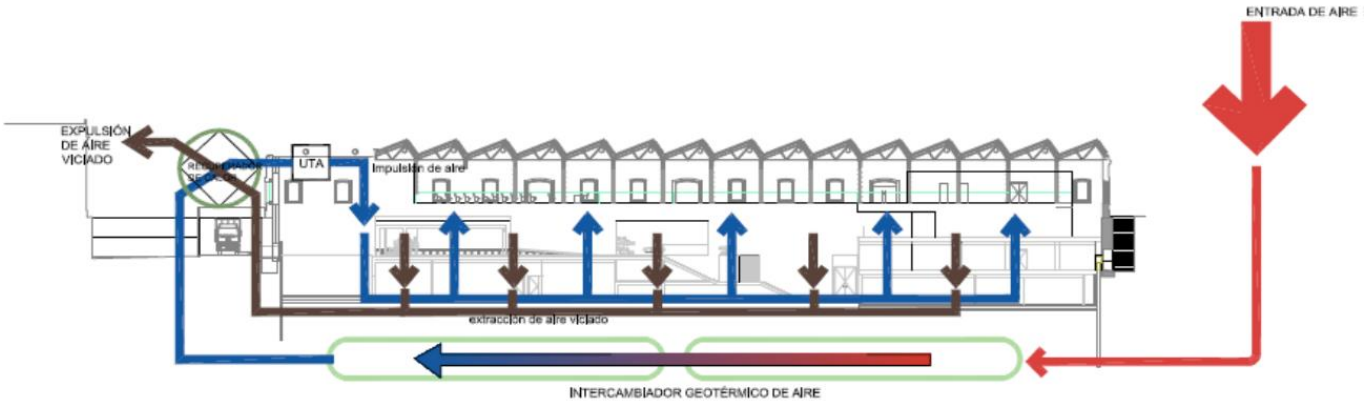


Figura 4-118. Esquema del funcionamiento del sistema de renovación de aire con pretratamiento geotérmico y recuperación de energía.
Fuente: Eneres - Fernández Molina Obras y Servicios.

Con el fin de preparar el aire primario antes de que entre en los espacios que necesitan ventilación, se instala un sistema de intercambiador geotérmico tierra-aire con una capacidad de 24,000 m³/h. Con sistema que pre trata el aire de renovación y aprovecha la energía del aire expulsado, se puede disminuir en un 30 % la demanda energética en comparación con la demanda original sin realizar ningún tipo de tratamiento previo.

Con el objetivo de satisfacer toda la demanda energética del edificio en términos de climatización, se ejecutaron 33 intercambiadores verticales geotérmicos, con 157 m de profundidad y con GSHP de una capacidad de 174 kW para calefacción y 127 kW para refrigeración. Este sistema trabaja en conjunto con el dispositivo inercial de climatización radiante a baja temperatura conocido como los forjados termoactivados. El sistema está vinculado a los forjados termoactivados que son utilizados para regular la temperatura de manera eficiente. Se logra reducir el consumo de energía en un 40% en comparación con un sistema tradicional que incluye una caldera y una enfriadora. Al combinar estas dos soluciones, se logra reducir el consumo de energía en la climatización del edificio en un 70%. Además, se estima que los costos de mantenimiento de la instalación se reducirán en aproximadamente un 60% a lo largo de la vida útil del edificio..

Estos sistemas aseguran que los niveles de consumo de energía del edificio sean significativamente menores en comparación con los sistemas convencionales que normalmente se utilizan para climatizar. Se resuelven las necesidades de climatización y calidad del aire al implementar un intercambiador geotérmico, lo que proporciona al edificio un nuevo propósito en el que los niños podrán disfrutar de altos niveles de confort y bienestar. Logrando además la máxima eficiencia energética en el proceso.

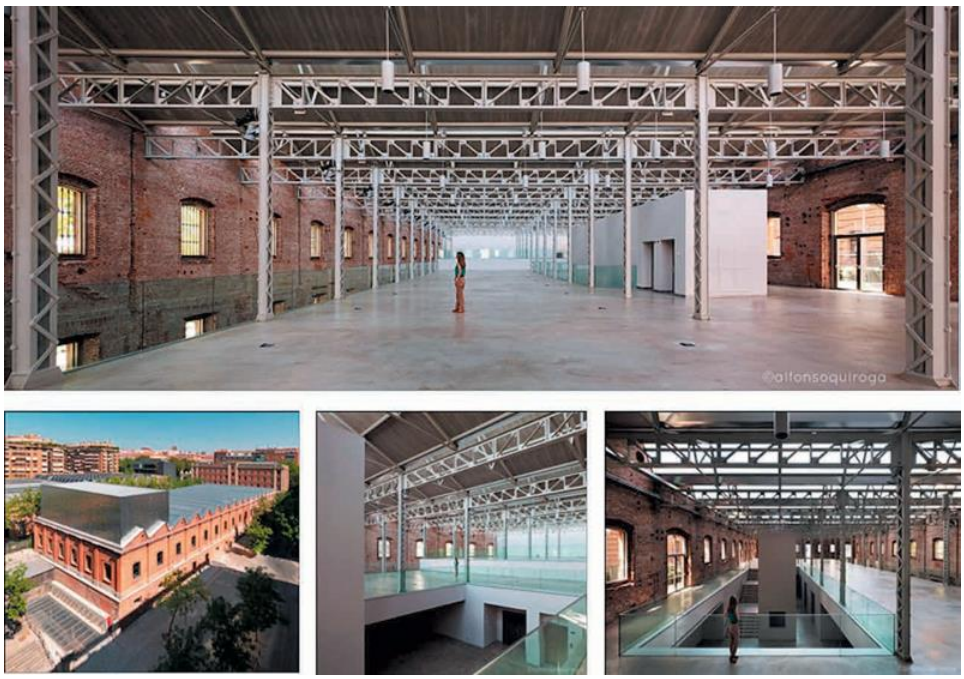


Figura 4-119. Fotos de la Rehabilitación del Cuartel de Daoiz y Velarde para Teatro Infantil.
Fuente: Eneres - Fernández Molina Obras y Servicios.

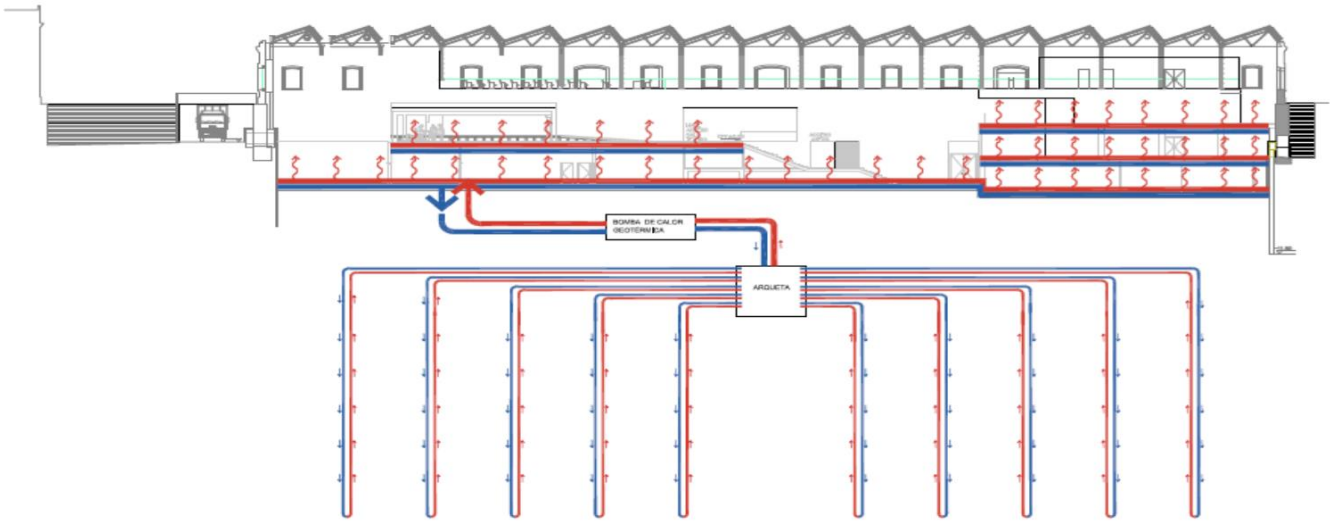


Figura 4-120. Esquema de funcionamiento de las losas termoactivas e intercambiadores geotérmicos.
Fuente: Eneres - Fernández Molina Obras y Servicios.

La Figura 4-119 muestra fotos del proyecto definitivo y la Figura 4-120 representa el esquema de principio de las losas termoactivas y los intercambiadores geotérmicos. Estos elementos conforman un sistema integrado de climatización que se basa en la radiación inercial para el edificio. En lo que se refiere a una ventilación eficiente, el sistema geotérmico es altamente efectivo, incluso en un

edificio con una envolvente térmicamente poco eficaz (Arquitecto: Rafael de La Hoz. Concepción energética Eneres).

4.6.6. Caso 3. Facultad universitaria, CICFANO, en el campus de la universidad de Aveiro, Portugal

La Universidad ha ejecutado su Campus junto a la ría de Aveiro, empleando pilotes para la cimentación de los edificios, estos se hunden en un suelo arcilloso fluido. Se han agregado sistemas termoactivos a dos facultades universitarias, sin modificar su arquitectura original. Las cimentaciones se han transformado a pilotes termoactivos, mientras que las losas de concreto han sido datadas con circuitos para la calefacción y la refrigeración. El colector de aguas residuales pasa a 70 metros del edificio (más adelante Figura 4-121).

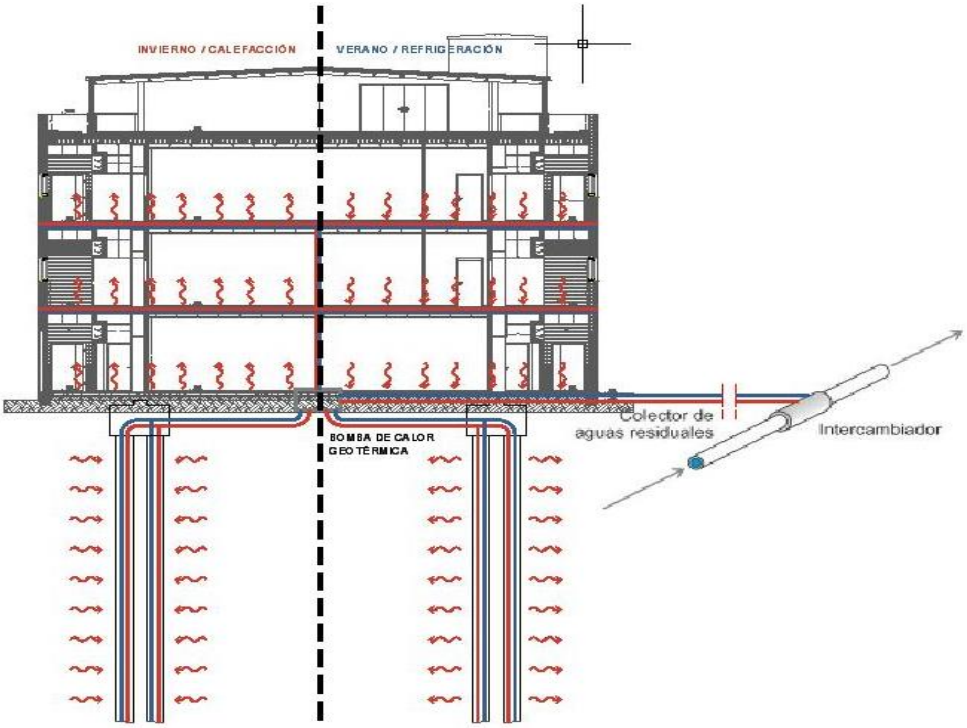


Figura 4-121. Esquema energético edificio CICFANO.
Fuente: Eneres.

El edificio se encuentra conectado a un colector por el cual se bombean 42 litros de agua residual cada segundo. Se ha desarrollado un Bypass/intercambiador de energía que tiene la capacidad de extraer hasta 100 kW de calor o ceder hasta 160 kW de frío con el propósito de climatizar el edificio. La bomba de calor reversible y las losas termoactivas del edificio permiten mantener una climatización constante. Además, el calor y el frío se pueden almacenar en el terreno, mediante las cimentaciones de pilotes termoactivos que se encuentran debajo del edificio. Todos estos elementos han sido incorporados en el

diseño estructural y arquitectónico preexistente, sin generar cambios en los cálculos ni en la geometría, y aprovechando la gran capacidad para el intercambio, almacenamiento y control de energía que no sería utilizada de otra forma. La incorporación de estos elementos en un edificio bien acondicionado, con buen aislamiento, iluminación y ventilación, ha resultado en una mejora significativa en la calidad y confort de los usuarios, así como una reducción del consumo que supera el 70% del edificio previo a su rehabilitación. (Figura 4-122 y Figura 4-122).



Figura 4-122. Fotos de la ejecución del proyecto CICFANO. Fuente: Eneres

4.6.7. Caso 4. Rehabilitación integral de edificio de oficinas en la calle Apolonio Morales en Madrid.

Este ejemplo representa un enfoque de intervención integral en la rehabilitación de un edificio de oficinas con una superficie de 800 m², ubicado en una exclusiva zona residencial y de oficinas en Madrid. El edificio fue construido en 1989 y

presentaba una obsolescencia total de sus sistemas de climatización. Además, su relación con el medio ambiente era muy deficiente, ya que no se diseñó para el bioclimatismo local ni para controlar la demanda de manera pasiva. No contaba con un aislamiento adecuado, tenía problemas de estanqueidad y no recuperaba energía en sus sistemas de ventilación (Figura 4-123) [53].



Figura 4-123. Fotos del edificio previas a su rehabilitación. 2007.
Fuente: Instituto Europeo de Innovación.

Durante el proceso de rehabilitación, se procedió a eliminar todos los sistemas de instalaciones, divisiones interiores, fachadas y cerramientos, mientras se mantuvo casi en su totalidad la estructura y la cubierta del edificio, que presentaba un gran potencial termoactivo, especialmente en los forjados.

En primer lugar, se planteó una reestructuración del edificio que incluyó nuevas soluciones para la fachada y la cubierta. Estas soluciones tenían como objetivo fortalecer el aislamiento y la estanqueidad, solucionando así los problemas de puentes térmicos. Además, se instalan dispositivos mecanizados, lamas y huecos practicables que permitieron implementar estrategias pasivas de bajo costo, como el aprovechamiento de la energía solar y la iluminación natural, así como la ventilación directa durante la noche para enfriar el edificio [53]. Todo esto se lleva a cabo con un enfoque de minimización de costos y maximización de la eficiencia, bajo la supervisión de un sistema de control.



Figura 4-124. Imágenes del edificio rehabilitado. 2007.
Fuente: Instituto Europeo de Innovación

Se estableció como punto de partida que los diferentes dispositivos se activarán de manera integrada o escalonada, dependiendo de la optimización del consumo de energía. Con el fin de lograr una exitosa implementación de esta estrategia, se realizó un análisis exhaustivo de los diferentes escenarios de operación. Como resultado de este estudio, se diseñó consecuentemente el campo de datos y señales, así como el sistema de gestión y control encargado de interpretar y tomar medidas.

Por su ubicación, el edificio carece de una adecuada exposición al sol durante el invierno debido a la altura de los edificios cercanos. Sin embargo, es capaz de aprovechar la radiación solar en toda su cubierta y mediante el uso de paneles termodinámicos generando una gran cantidad de aire caliente. Este aire caliente se incorpora al edificio a través de las unidades de tratamiento de aire, proporcionando un volumen importante de calor.

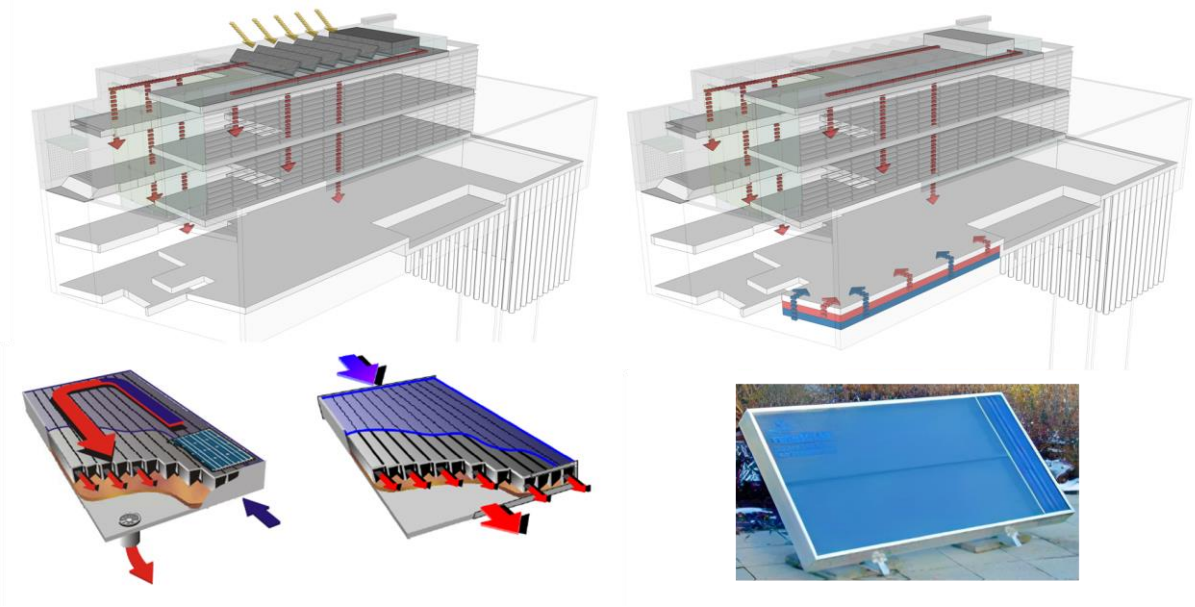


Figura 4-125. Integración de sistemas de captación solar pasiva para calentamiento de aire. Fuente: Instituto Europeo de Innovación.

	Calefacción		Refrigeración		Temperatura
	Demanda [kWh]	Resultado [kWh]	Demanda [kWh]	Resultado [kWh]	[ºC]
Enero	5.226	6.410			12,0
Febrero	3.485	5.046			12,0
Marzo	1.984	3.917			12,0
Abril		709	-130	-562	13,5
Mayo			-4.112	-6.017	17,0
Junio			-9.208	-9.600	23,0
Julio			-9.231	-10.331	25,0
Agosto			-9.066	-9.829	26,0
Septiembre			-4.066	-5.881	26,0
Octubre		437	-1.168	-1.159	22,0
Noviembre	2.985	3.000			18,0
Diciembre	5.122	6.071			15,0
Total	18.802	25.590	-36.981	-43.379	

Tabla 4.13. Cálculo la distribución mensual de energía demandada de calefacción y refregeración del edificio.
Fuente: Instituto Europeo de Innovación.

La solución para evitar las pérdidas de calor durante la noche a través de la radiación se encuentra en la implementación de sistemas de lamas que, a su vez, actúan como una barrera protectora contra la radiación. Todos los espacios cuentan

con vidrios de baja emisividad, juntas herméticas entre los marcos y la estructura del edificio, y sistemas móviles para prevenir la pérdida de calor durante la noche.

En la cubierta del edificio se colocaron captadores en cubierta que canalizan e introducen luz natural a las áreas interiores de cada nivel, lo cual disminuye la necesidad y el gasto de utilizar sistemas de iluminación artificial.

Se determinó la distribución mensual de la cantidad de energía que el edificio necesitaría, tomando en consideración su uso y ocupación, de su régimen de funcionamiento y de las cargas previstas. En el cálculo y simulación del funcionamiento del terreno como acumulador de energía, se tomó en cuenta la distribución de la demanda mensual como información inicial.

Se decidió construir un estacionamiento mecánico debajo del patio trasero del edificio altamente eficiente en términos de compactación del espacio y consumo de energía. Comparado con un aparcamiento convencional, se redujo el volumen de obra en un 33 % y el consumo de energía en un 80%, con una repercusión por coche de 10 m².

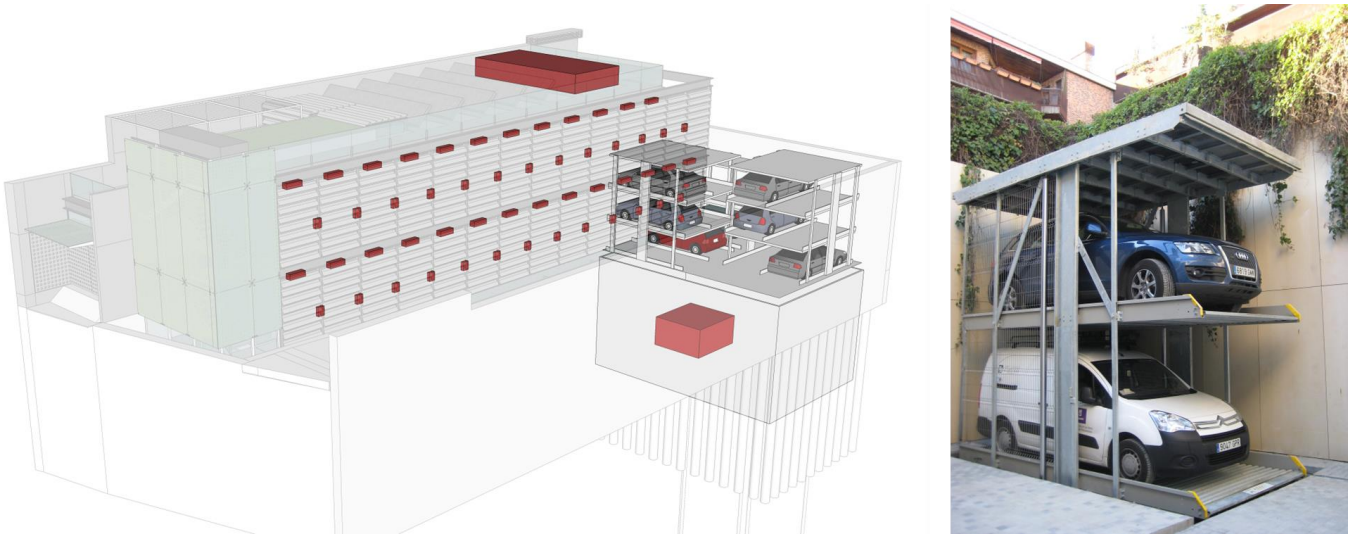


Figura 4-126. Sistema de aparcamiento mecánico IPS Parklift con estructura resuelta con pilotes termoactivos.
Fuente: Instituto Europeo de Innovación.

La correcta integración de los dispositivos de inercia, los sistemas de GSHP y las unidades de tratamiento del aire del edificio se vuelve esencial; es gestionada por un sistema de control específicamente diseñado y capaz de interactuar en todos los escenarios definidos en el proyecto y se estructura en los siguientes componentes:

- Campo de sensores de las condiciones externas al edificio: temperatura, soleamiento, luminosidad, presión barométrica, humedad, viento.
- Campo de sensores de las condiciones internas del edificio: presencia, temperatura, humedad, luz natural, luz artificial, calidad del aire, temperatura superficial de los elementos radiantes, pérdida por radiación.
- Sistema de gestión en estructura abierta, en el que se integran los subsistemas individuales del edificio, entre ellos el de climatización.
- Software de gestión específicamente adecuado a la gestión de hardware y los dispositivos del edificio para resolver los distintos escenarios de comportamiento climático.
- Dispositivos actuadores sobre los equipos de renovación y tratamiento de aire, bombas de calor geotérmicas, intercambiador geotérmico, circuitos de forjados termoactivos, elementos de apertura de fachadas, sistemas móviles de protección solar y regulación de iluminación y sistemas móviles de protección a perdidas por radiación.
- Dispositivos de toma de datos, medición e interpretación de consumos.

El conjunto, perfectamente integrado, de sistemas, constituye una instalación muy innovadora en su concepción y extraordinariamente eficiente en su consumo, el su mantenimiento y en la calidad térmica que consigue con su concepción radiante.

4.6.7.1. Sistema envolvente

Para conseguir que el edificio se comportase de una manera eficiente no era suficiente con implantar en él sistemas de climatización como los descritos anteriormente, que implican un bajo consumo de energía, sino que además y antes de todo eso, se tenía que conseguir que demandase la menor cantidad de energía posible mediante el diseño de elementos pasivos capaces de captar la energía cuando fuese necesaria y disiparla cuando el edificio no la necesitase.

Por ello, se consideró fundamental mejorar el estado de los cerramientos exteriores del edificio con objeto de:

- Incrementar el nivel general de aislamiento tanto térmico como acústico.
- Reducir la demanda energética en todas las épocas del año.

De la comparativa de las potencias punta demandadas por el Edificio antes y después de las reformas planteadas, se obtienen los siguientes resultados:

Potencia total calorífica punta (Estado original):	74,42 kW
Potencia total calorífica punta (Nueva instalación):	52,40 kW
Disminución porcentual de la potencia calorífica punta:	**29,59%**
Potencia total frigorífica punta (Estado original):	112,8 kW
Potencia total frigorífica punta (Nueva instalación):	41,6 kW
Disminución porcentual de la potencia frigorífica punta:	**63,31%**

Esta reducción tan significativa en la demanda de frío del edificio, se debe fundamentalmente a los sistemas de protección de fachadas diseñados, tanto exteriores (lamas motorizadas) como interiores (estores antirradiación), así como al cambio del acristalamiento existente por otro de mejores características térmicas:

- Se sustituye el acristalamiento existente por un vidrio de baja emisividad y alta protección térmica y acústica.
- La caja de la escalera principal del edificio, acristalada y orientada a Sur, se protege con una piel adicional de vidrio templado serigrafiado (protección solar) de 10 mm.
- Se instala un sistema de lamas extruidas de aluminio, motorizadas, cuyo movimiento está regulado por el sistema centralizado de control del edificio.

  Las lamas controlan en todo momento la incidencia solar sobre el vidrio de las fachadas sur y este del edificio, optimizando la captación de energía por insolación a lo largo de cada ciclo estacional y en todo el intervalo diario.

  Por otro lado contribuyen a optimizar los niveles de luz natural ya que no sólo controlan la incidencia directa del sol sino también permiten controlar la reflexión de la radiación difractada de la atmósfera terrestre.
- Instalación de estores motorizados antirradiación. Estos estores evitan la pérdida durante el período nocturno, de la energía aportada al edificio durante el día. Como ya se ha comentado, están gobernados desde el sistema de control centralizado del edificio.



Figura 4-127. Sistemas de control y filtrados solar en la envolvente sur y este..
Fuente: Instituto Europeo de Innovación.

4.6.7.2. Eficiencia en el sistema de renovación de aire

Se ha realizado la instalación de un campo de colectores Grammer ubicados en la cubierta del edificio, para precalentamiento del aire exterior.

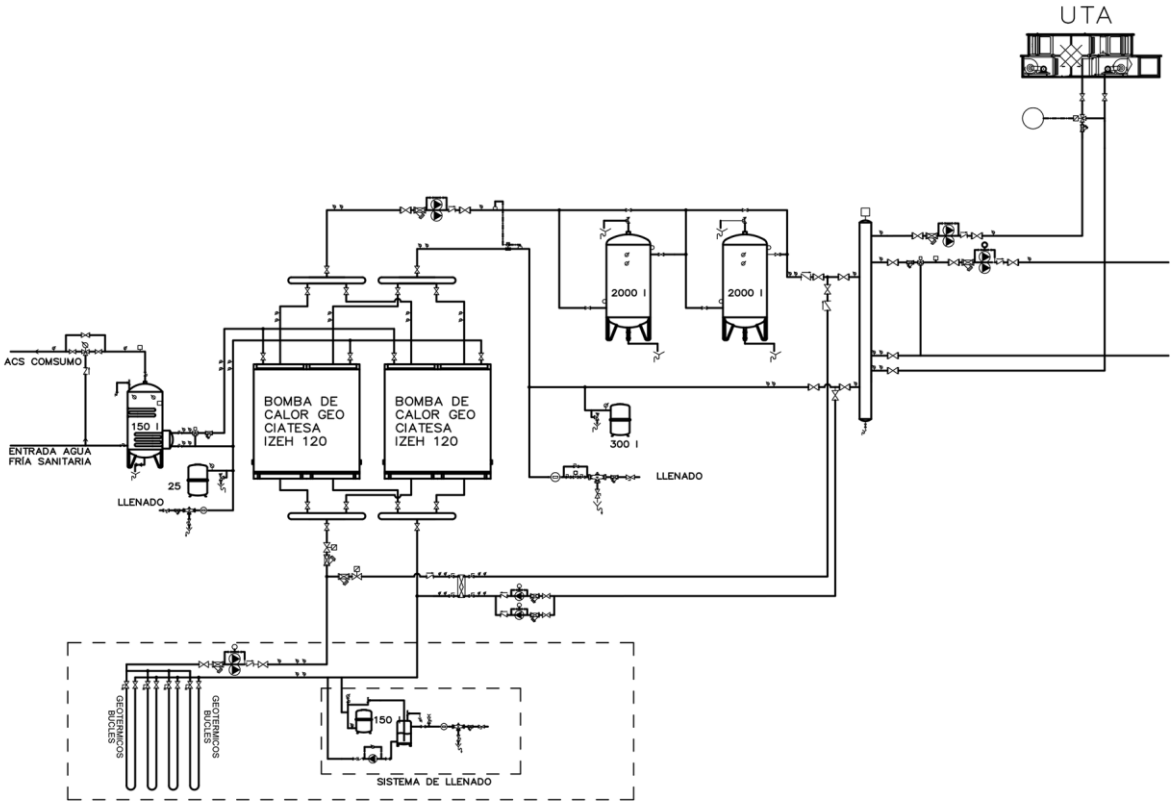


Figura 4-128. Esquema de principio de la componente geotérmica de la instalación, con doble salida a los forjados termoactivos y a las baterías de la UTA.
Fuente: Eneres.

A través de un ventilador, se impulsa el aire exterior por un filtro hacia el interior de los colectores solares. Los colectores calientan el aire, que puede ser distribuido según las necesidades del edificio. En este caso, es conducido a Unidad de Tratamiento del Aire (UTA) que se describe a continuación (Figura 4-128).

De acuerdo con el esquema de principio de la instalación, se ha tomado en cuenta un sistema que permite la renovación de aire mediante una unidad climatizadora colocada en la cubierta del edificio. Las siguientes son las funciones principales de la unidad de tratamiento del aire:

- Retornar el aire viciado del edificio.
- Impulsar el aire de renovación al edificio.
- Enfriar en modo adiabático aire de retorno del edificio previo a su expulsión.
- Intercambiar el calor del aire de expulsión con el aire de renovación.
- Filtrar.
- Tratar térmicamente (enfriamiento y calentamiento).
- Humidificar para mantener las condiciones de humedad relativa de los locales dentro de los límites de normativa.

En épocas invernales, esta UTA recibe el aire previamente tratado en el campo de colectores de aire, lo que supone un aporte calorífico del orden del 52 % de las necesidades de calefacción del edificio.

4.6.7.3. Sistema de producción térmica mediante intercambio geotérmico

Se diseñó un sistema de producción térmica que utiliza bombas de calor con intercambio de geotérmico (GSHP). Son dos bombas de calor de 25 kW cada una, las cuales se encuentran situadas en la sala técnica del semisótano, cerca de la entrada al aparcamiento.

Estas GSHP permiten intercambiar calor con el terreno (geotérmico) como foco caliente-frío, aprovechando la estabilidad térmica durante todo el año y a una profundidad específica.

Los COP de las GSHP puede fluctuar dependiendo de diferentes variables en cada momento de uso, alcanzando valores de 4 a 6 e incluso superiores. Esto significa que su eficiencia es significativamente más alta que la de los sistemas tradicionales

de calefacción o refrigeración. Esto implica que se obtienen de 4 a 6 unidades de energía en forma de calor o frío por cada unidad de energía que usa el sistema.

Específicamente, cuando el sistema se encuentra en proceso de calentamiento, es necesario suministrar entre una cuarta parte y una sexta parte de la energía térmica que se genera (eficiencia del 400 % al 600 %). Es importante resaltar que la eficacia de una bomba de calor geotérmica (GSHP) no cambia según el clima o la temporada, y alcanza su máximo rendimiento al utilizar sistemas de baja temperatura y alta exergía para la climatización. En contraste, en un sistema convencional, el rendimiento disminuye durante los días más calurosos del verano y los más fríos del invierno, cuando su uso es más necesario.

Como elementos de intercambio con el terreno se han implantado:

- 6 perforaciones geotérmicas de 100m c/u ⇒ 600 ml
  - 600 x 50,8 w/ ml = **30,48 kW**
- 23 pilotes termoactivos, con una superficie total de intercambio con el terreno de 540 m² (muro enterrado de contención de parking)
  - 540 m2 x 38,46 w/ m² = **20,77 kW**
  - En total, se obtienen **51,25 kW** tanto en refrigeración como en calefacción.

4.6.7.4. Recuperación de energía del agua de drenaje

En el año 2021 se instaló en el edificio, que cuenta con un sistema de forjados termoactivos, un sistema intercambiador de calor para aprovechar la energía contenida en las aguas de drenaje del aparcamiento subterráneo construido en el año 2009, agua que procede de la infiltración desde el terreno.

El sistema de intercambio con el agua de drenaje se hibridó con el intercambiador geotérmico integrado en las pantallas de los muros del sistema de aparcamiento, bajo el patio exterior.

Las aguas de drenaje se canalizan desde el pozo de drenaje hasta un aljibe situado en la sala técnica del edificio. El aljibe fue dotado de un circuito de intercambio integrado en las paredes del depósito y conectado al colector al que confluyen los circuitos del intercambiador geotérmico.

Circuito de intercambio para la recuperación de la energía de las aguas de drenaje hibridado con el sistema geotérmico del edificio.

La energía intercambiada se incorpora así a la GSHP que la aplica a la climatización radiante del edificio.

Sistema hibrido de intercambio geotérmico y con el agua de drenaje del aparcamiento que, tras el intercambio de energía, es reutilizada en los servicios sanitarios del edificio.



Figura 4-129. Circuito de intercambio de calor instalado en la cisterna del edificio de oficinas Apolonio Morales 29 [53].

Este proyecto forma parte de un trabajo de investigación cuyo objetivo principal fue estimar el potencial térmico de las aguas residuales para cubrir su demanda térmica de calefacción y refrigeración durante todo el año. El objetivo secundario fue determinar el impacto que tienen las aguas subterráneas y pluviales en la eficiencia térmica de un intercambiador de calor de aguas residuales de alcantarillado para garantizar un adecuado confort térmico en el interior del edificio. Durante el desarrollo de la investigación se exploraron los siguientes temas[86]:

- El tipo de energía térmica que se puede aprovechar a partir de las aguas residuales, para calefacción o para refrigeración, y en qué época del año esta energía es más efectiva.
- El impacto de las aguas residuales (subterráneas y pluviales) en el caudal y la temperatura del sistema de alcantarillado y, en consecuencia, cómo se ve afectada la eficiencia de las Bombas de Calor, o su término en inglés Heat Pumps (HPs). La eficiencia de las HPs se mide dividendo Coeficiente de Rendimiento o su término en inglés Coefficient of Performance (COP) por el Ratio de Eficiencia Energética o su término en inglés Energy Efficiency Ratio (EER), (COP/EER); y

puede ser afectada en función de la temperatura de la fuente, la demanda del edificio y la ubicación del intercambiador de calor.

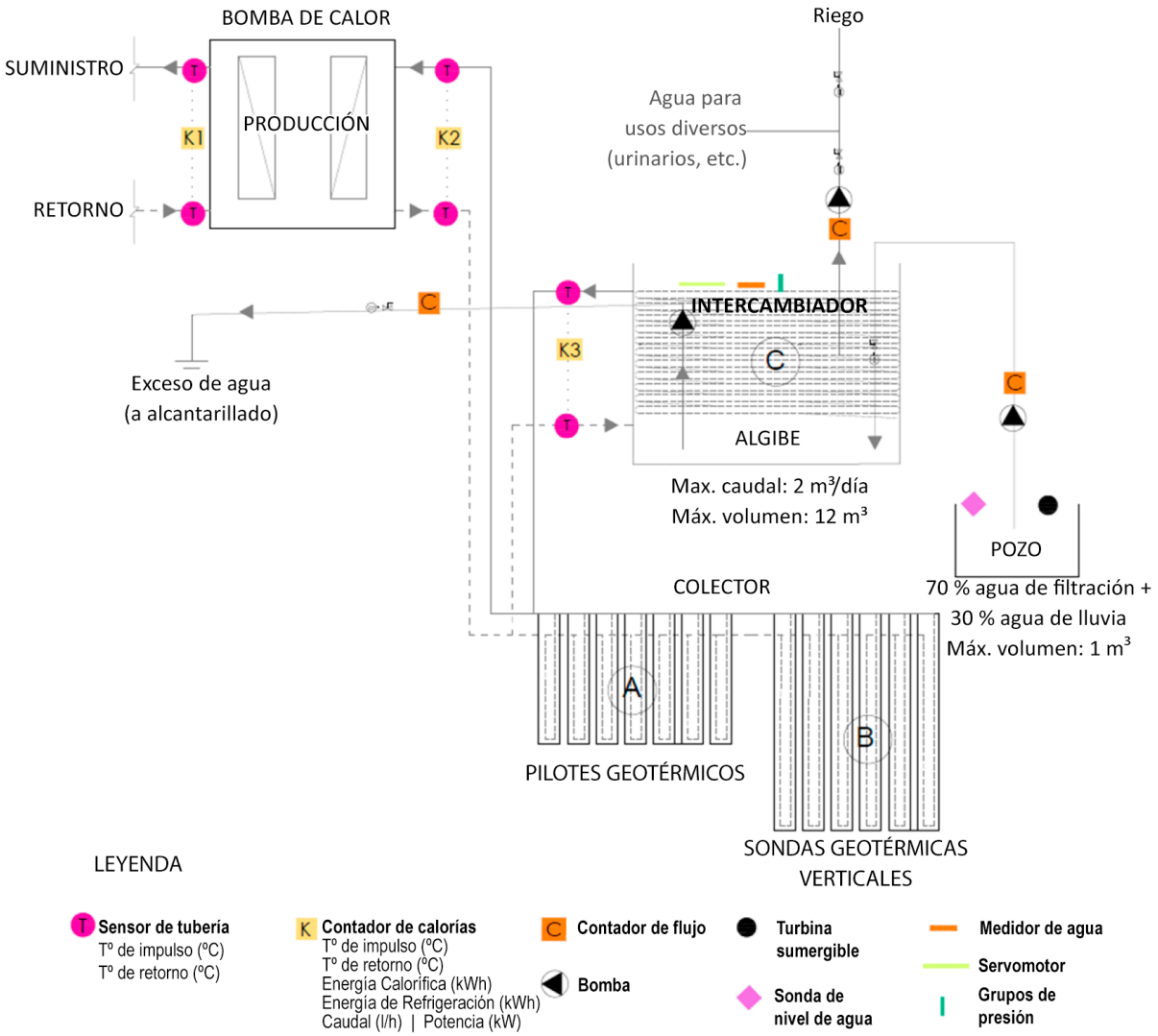


Figura 4-130. Diagrama del sistema HVAC (lado de la fuente) y los tres tipos de intercambiadores de calor (A), (B), (C). (b) Sistema de monitorización en el sistema de alcantarillado y el hipotético intercambiador de calor (D) [86].

Esta investigación demostró que las aguas residuales procedentes de sistemas de alcantarillado con un caudal superior a 5 l/s pueden proporcionar suficiente energía térmica para satisfacer la demanda energética del edificio de oficinas que tiene una demanda energética de 45 kW (60 W/m²). El caudal disponible en las aguas de drenaje es el parámetro que afecta directamente al cálculo de la potencia disponible, suponiendo que el salto térmico es constante (2 °C) [86].

La red de alcantarillado a la que se conecta el edificio, garantiza caudales suficientes y un abastecimiento continuo durante todo el año. Esta experiencia demostró la mayor rentabilidad de un intercambiador integrado en la red de

saneamiento y adecuadamente dimensionado, ya que garantiza la cobertura de la demanda energética del edificio con la máxima eficiencia (COP/EER). A su vez, la eficiencia efectiva (COP/EER) del sistema viene determinada por las características de los intercambiadores de calor y la temperatura de la fuente [86].

La temperatura constante y favorable de 15 °C a 25 °C registrada para las aguas residuales del alcantarillado urbano a lo largo del año se debe al aporte continuo de calor del agua caliente sanitaria. La utilización de agua caliente sanitaria, es beneficiosa para los escenarios de calefacción y podría dar lugar a mejoras de eficiencia de más del 22 %, en comparación con un sistema geotérmico. En cambio, no es favorable para los escenarios de refrigeración: la reducción de la eficiencia al sustituir un sistema geotérmico por un sistema que intercambia energía con aguas residuales podría ser de hasta un 5 % [86].

La contribución energética de las aguas pluviales es más favorable en los escenarios de refrigeración que en los de calefacción, mejorando la eficiencia del sistema en más de un 14 % en comparación con un sistema geotérmico. Este resultado puede explicarse por el hecho de que el volumen de agua vertida en el sistema de alcantarillado después de una precipitación puede reducir la temperatura de las aguas residuales de una manera muy impactante.

Las aguas residuales del edificio se utilizan en el sistema de climatización y aire del edificio, de dos maneras:

- Para transferir temperatura mediante dos bombas de calor, o su término en inglés Heat Pump (HP) de 22 kW cada una al fluido que alimenta las estructura termoactivas TABS [86].
- Para preenfriar el aire exterior que entra en el edificio para la ventilación en verano a través de un intercambiador agua-aire.

Además, se instalaron sensores y se recogió la información de un sistema de monitorización de la temperatura y el caudal de las aguas residuales del sistema de alcantarillado cercano al edificio objeto de estudio y se extrajeron conclusiones sobre el uso potencial de estas aguas residuales, incluida la aportación de energía térmica procedente del vertido de agua caliente residual en edificios del entorno urbano.



Figura 4-131. Imágenes del aparcamiento mecánico del edificio de oficinas de Apolonio Morales 29, Madrid. Fuente: Instituto Europeos de Innovación.

4.6.7.5. Climatización por termoactivación estructural. TABS

El sistema principal de tratamiento ambiental del edificio consiste en el uso de losas termoactivas, TABS, tiene la capacidad de calentar y refrigerar el edificio. También funciona como un sistema inercial para estabilizar la temperatura basal durante las noches y reduce los picos de calor demandados por el edificio al día siguiente.

El sistema de tratamiento ambiental secundario se encarga de tratar el aire de ventilación en la unidad climatizadora que se encuentra en la parte superior del edificio, el cual proporciona la potencia adicional que el sistema primario no puede proveer. Con este propósito se introduce aire mediante una red de conductos y elementos terminales (por ejemplo, difusores y rejillas) ubicados estratégicamente en el edificio para lograr una distribución más efectiva en áreas con alta demanda de energía.

a) Sistema de superficie radiante. Inercia del edificio

El aprovechamiento de la inercia térmica del concreto es la base del sistema de forjado inercial, el cual es alimentado por medio de GSHP que están conectadas a los intercambiadores y a los pilotes termoactivos.

Se utiliza la masa actual de la estructura del edificio para instalar el sistema, y se colocan tuberías de polietileno de alta densidad separadas a una distancia de 20 cm. Después de completar toda la red, se aplica el plastón para darle el acabado final al pavimento.

Este sistema permite mantener la masa del forjado a una temperatura constante que será controlada por el sistema de control central del edificio.

El forjado inercial se comportará de diferente manera según en la época estacional:

- Durante el verano, las GSHP operarán durante la noche para refrigerar los forjados del edificio, lo que garantizará una temperatura más baja al día siguiente. Esto ayudará a reducir los máximos de consumo de energía cuando se inicie la actividad habitual en el edificio.
- Durante las noches de invierno, las bombas de calor geotérmicas trabajarán para conservar el calor en los suelos y evitar que se produzcan picos de arranque de temperatura al día siguiente.



Figura 4-132. Activación de las losas termoactivas. Montaje de la red de los circuitos de intercambio en el forjado y ejecución del plastón posterior.
Fuente: Eneres.

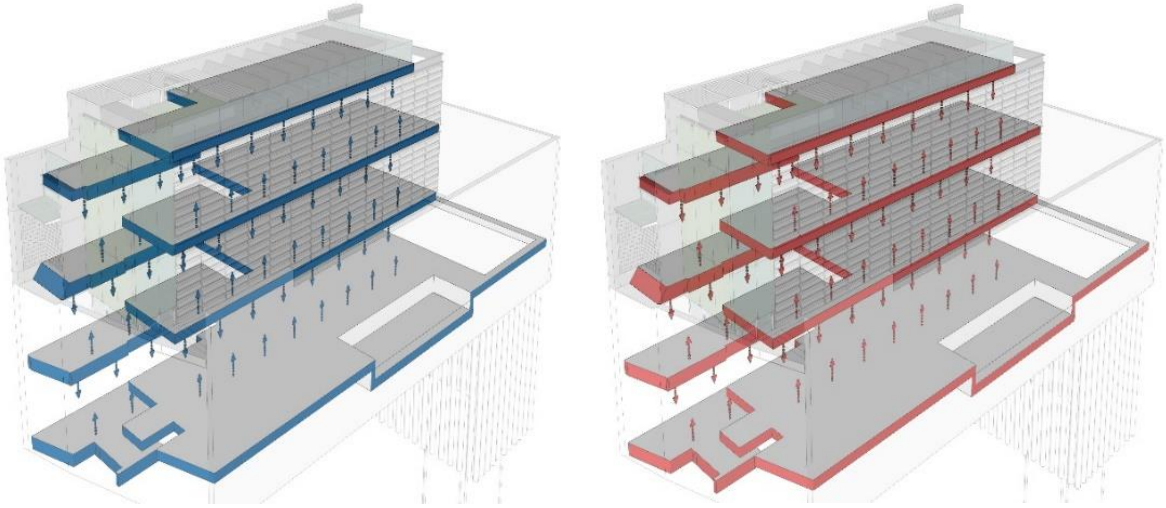


Figura 4-133. Climatización principal mediante la masa del forjado inercial (refrigeración y calefacción).
Fuente: Eneres.

4.6.7.6. Estrategias de integración y gestión, regulación y control

El control de la climatización del edificio es capaz de gobernar una serie de sistemas térmicos, en función de la información recibida a través de un conjunto de sensores distribuidos por el edificio, y del procesamiento de la información que sea capaz de evaluar.

Los sensores repartidos estratégicamente por el edificio son capaces de controlar los siguientes parámetros:

- Temperatura exterior.
- Temperatura superficial.
- Sensores de Temperatura y Humedad relativa (T/HR) en ambiente.
- Temperatura de los colectores de aire.
- Temperatura de las losas.
- Temperatura del fondo del garaje.
- Temperaturas en diferentes partes de las instalaciones.
- Humedad interior.
- Humedad exterior.
- Punto de rocío interior.
- Presión atmosférica.

- Velocidad del viento.
- Grado de iluminación interior.
- Posición de las lamas en fachada.
- Radiación solar.
- Detección de presencia.



Figura 4-134. Dispositivos de control y regulación instalados. Fuente: Eneres.

Los sensores no se duplican. Es decir, los detectores de presencia son únicos para climatización, iluminación, control de accesos, circuito cerrado de televisión (CCTV), etc. Lo mismo ocurre con el resto de los sensores con doble funcionalidad.

Por tanto, el sistema de control de la climatización es capaz de analizar en tiempo real los parámetros de temperatura interior y exterior, la temperatura de los forjados, las temperaturas de impulsión y retorno de los forjados, la humedad interior y exterior, la velocidad del viento, la luminosidad exterior e interior y la presencia de personas.

En función de la información recibida y de las estadísticas acumuladas, el sistema será capaz de elegir siete escenarios diferentes (Figura 4-135):

- Escenario 1: invierno día soleado.
- Escenario 2: invierno día nublado.
- Escenario 3: invierno noche ante día soleado.
- Escenario 4: invierno noche ante día nublado.
- Escenario 5: verano día.

- Escenario 6: verano noche.
- Escenario 7: día y noche de primavera y otoño.

El control de la climatización es automático en función de los escenarios anteriormente descritos. El control puede ser pasado a manual si la propiedad así lo decide.

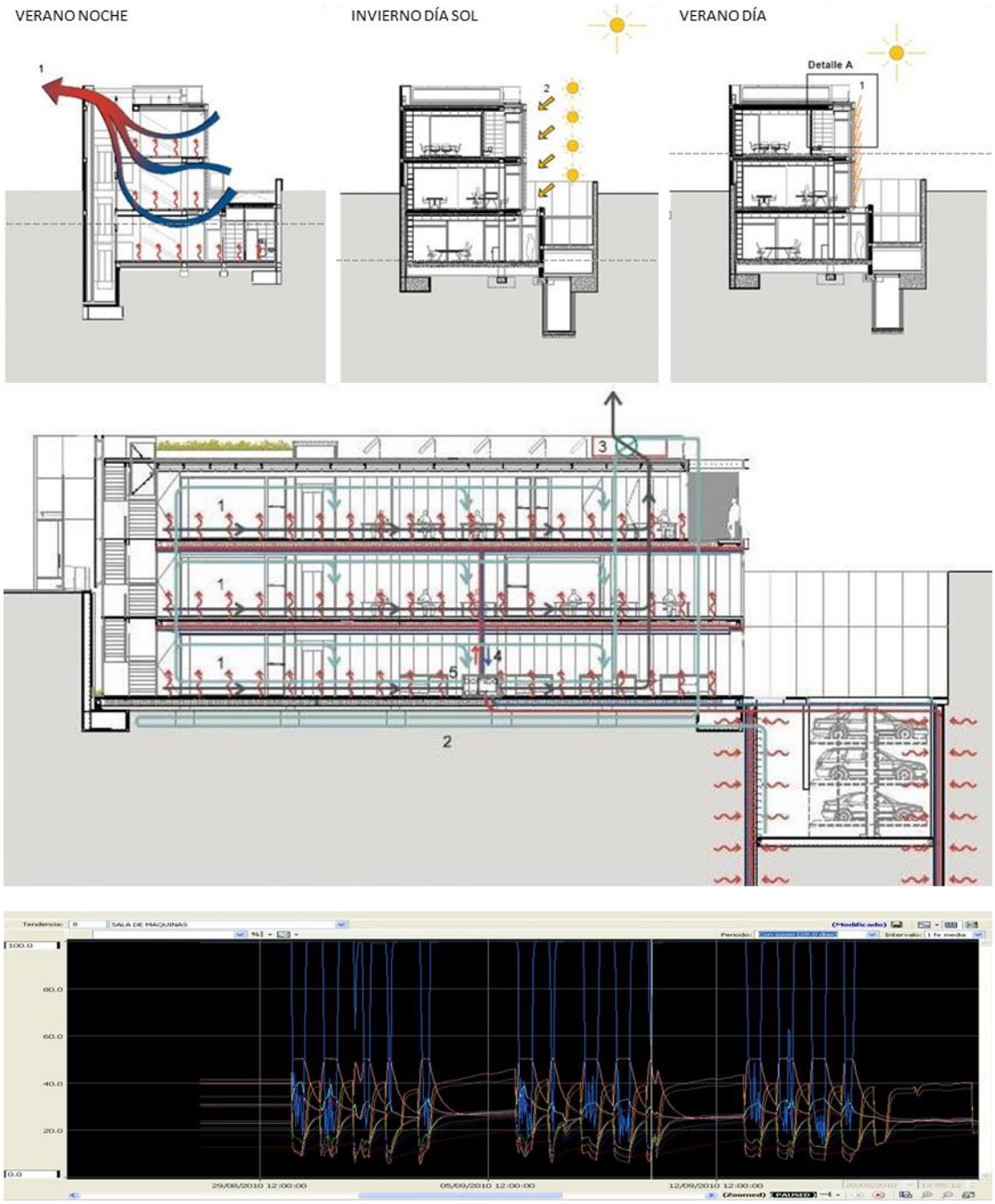


Figura 4-135. Informe de funcionamiento.
Fuente: Eneres.

Además, es capaz de generar informes de funcionamiento y consumo así como integrarse con el resto de las instalaciones. El sistema es capaz de incorporar un gráfico sistema de gestión mediante pantallas de supervisión con los puntos de interacción del sistema para el puesto de control.

Por otro lado en el edificio está definida una estrategia muy clara de entrada en acción escalonada de los diversos dispositivos que interactúan en el control e Escalabilidad de la solución

Al respecto de la capacidad de responder a un potencial aumento de la demanda de prestaciones mediante un incremento de la capacidad de la instalación, se tiene que considerar que en nuestro caso particular se dan dos circunstancias determinantes:

- Se trata de un edificio que resulta de un proceso de rehabilitación, y las nuevas instalaciones se ajustan como un guante a los espacios y las capacidades disponibles en el mismo. No obstante la concepción es flexible y hay reservas de espacio para eventuales equipos complementarios.
- Se trata de una instalación de intercambio geotérmico y climatización inercial con estructuras termoactivas. Una instalación cuyo diseño se perfecciona en el equilibrio de la demanda que procede de una actividad y un régimen de uso concretos y de la capacidad inercial de intercambio del terreno. Los dispositivos que resuelven el flujo termodinámico son los intercambiadores, las bombas de calor y los forjados inerciales, calculados también en equilibrio.
- Sólo se concibe un aumento de la demanda en el edificio por un cambio de uso a otro con cargas significativamente mayores.

En cualquier caso el esquema de la instalación facilitaría la escalabilidad horizontal, modular, del sistema, aprovechando que ya todos los sistemas pasivos y activos de captación, intercambio y generación son modulares y redundantes.

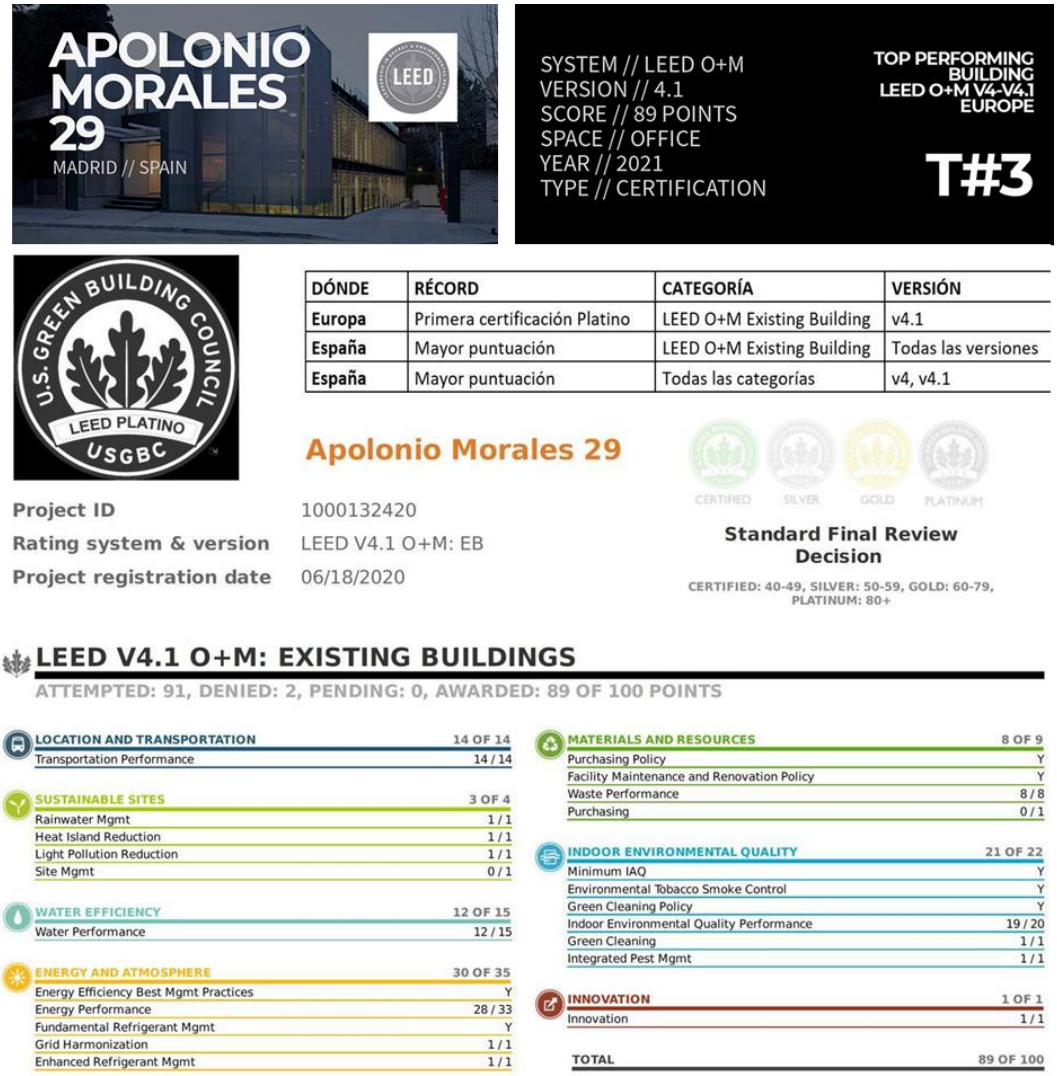


Figura 4-136. LEED v4.1 O + M Existing Building Platinum de Apolonio Morales 29, Madrid.
Fuente: Eneres.

En 2021, la sede de ENERES, sita en Calle Apolonio Morales 29, en Madrid ha obtenido la certificación "LEED v4.1 O + M Existing Building Platinum" con la máxima puntuación en España en este tipo de certificaciones y la primera certificación en Europa en esta categoría.

Con esta acreditación, el edificio Apolonio Morales 29 bate los récords de:

- Primer certificado LEED v4.1 O + M Existing Building Platinum obtenido en Europa.
- Máxima puntuación conseguida dentro de la categoría LEED O + M, en todas las versiones, en España.

- Máxima puntuación conseguida en todas las categorías LEED (Obra Nueva, Operación y Mantenimiento, Vivienda, etc.), en las versiones 4 y 4.1, en España.

Lo relevante de esta certificación es que, 12 años después de la rehabilitación integral del edificio, valora especialmente su comportamiento eficiente, mucho más allá de la tecnología utilizada, y esta premisa está directamente vinculada a la concepción sistémica orientada a la baja exergía y al rendimiento y prestación de servicios a lo largo de un ciclo de vida dinámico.

La energía consumida en Apolonio Morales es, en un alto porcentaje, energía térmica de bajo grado. El edificio ha sido rehabilitado reutilizando su propio espacio, geometría, estructura y construcción para intercambiar con el medio, transformar, acumular, gestionar, emitir y absorber energía de bajo grado, capturada en el agua de drenaje e intercambiada con el terreno a través de estructuras enterradas e intercambiadores geotérmicos.

4.7. Medios de transferencia. Redes de 5ª generación

4.7.1. Introducción al concepto general del sistema energético compartido

Como se ha planteado en los primeros capítulos de esta tesis, desde la perspectiva de la integración de recursos térmicos de bajo grado para su utilización en los sistemas de calefacción y refrigeración, es necesario:

- Identificar y vincular la demanda a las fuentes de energía disponibles, renovables y locales.
- Armonizar esta vinculación a través de técnica y tecnología adecuada al óptimo aprovechamiento de recursos energéticos de bajo grado y temperatura moderada.
- La clave de este desafío la ofrecen las Redes de Distrito de Calefacción y Refrigeración de 5ª Generación, en inglés 5th Generation District Heating and Cooling Networks (5GDHC) [87].
- La integración de fuentes, prosumidores y redes bajo un sistema gestión y control multidimensional que responde a estrategias de eficiencia.

Las redes 5GDHC son aquellas en las que el fluido de intercambio de calor es agua o a temperatura ambiente (cercana a la del medio a través del cual se transporta, entre <10 ºC y 20 ºC, típicamente, y, como se ha visto en el punto anterior integran el ámbito particular de multitud de prosumidores, consumidores y productores de manera alternativa. Los prosumidores instalan bombas de calor de tamaño pequeño a mediano en su punto de conexión con la red de baja temperatura, para intercambiar energía y ajustar la temperatura de los recursos energéticos de bajo grado a los que acceden a través de la red al rango de optimo rendimiento de los sistemas de calefacción y refrigeración de sus edificios. Lo hacen cediendo o absorbiendo, intercambiando desde la red de distrito con su propio medio, la energía térmica de bajo grado que hacen útil a través de sistemas calefacción, refrigeración y ACS de baja exergía [87].

Las Redes Urbanas de Calefacción y Refrigeración de distrito, o en inglés District Heating and Cooling (DHC) han sido reconocidas, no sólo como una solución eficiente y sostenible para la reducción tanto del consumo de energía primaria como de las emisiones locales en la cobertura de la demanda de calefacción y refrigeración de los edificios, sino también como la estructura distribuida y social que permite el acceso a los recursos de energía renovables a todos tipo de agentes y ciudadanos en todas las escalas sociales y medios económicos. Los sistemas de redes de distrito de baja temperatura están mucho más extendidos en los países del norte de Europa que en los países meridionales ya que el rigor climático de los primeros ha incentivado políticas de estructuración de redes colectivas de calefacción para optimizar el rendimiento y la eficiencia del uso de los recursos que, sólo ahora se empiezan a plantear en el sur de Europa [88].

Las 5GDHC soportan modelos de Sistemas de Energía Compartida o su término en inglés Shared Energy Systems (SES), son soluciones energéticas que permiten intercambios de flujos de energía entre edificios, fuentes de energía de origen renovable o infraestructuras generadoras de energía. La simbiosis industrial es un ejemplo típico de SES, donde las energías excedentes de un proceso son recuperadas y utilizadas por otra industria [89] y la simbiosis urbana, en la que la energía excedente de son recuperadas y, transferidas y utilizadas en otros edificios con usos alternos o complementarios.

Un ejemplo sencillo es un edificio con células solares conectadas a una red y suministrando sus excedentes de energía eléctrica a otros edificios conectados. A nivel comunitario, podría ser una red térmica que permita la recuperación del exceso de calor a baja temperatura (20-40 ºC) de los procesos térmicos de los

sistemas de climatización, refrigeración y tratamiento del aire de los edificios o de paneles solares o intercambiadores de calor en las redes de infraestructuras urbanas, conectados a una red de gestión conjunta.

La evolución de la solución comunitaria basada en SES es conectar a través de la red edificios con diferentes demandas de energía, lo que permite que los edificios complementen las necesidades de los demás, en lugar de satisfacer estas demandas localmente consumiendo energía procedente de fuentes de energía primaria [89].

Mediante el uso de bombas de calor locales y maquinaria de refrigeración, la demanda de temperatura de cada edificio se satisface localmente y la temperatura en el sistema de distribución puede fluctuar libremente y, a menudo, está cerca de la temperatura del terreno. En un escenario ideal se produciría una tendencia al equilibrio de potencia térmica total entre las demandas de refrigeración y calefacción. Pero este es también un factor bioclimático que se gestiona a través de los recursos de almacenamiento térmico propios y conectados a la red de distrito.

Para compensar los desequilibrios también se pueden conectar al sistema recursos de TES. Esto permite que el sistema ahorre y almacene la energía térmica emitida y no consumida a lo largo del tiempo y la utilice cuando se produzca demanda. El almacenamiento agrega un potencial importante de mejora de la eficiencia a través de la gestión. Al vincular las demandas térmicas opuestas y utilizar equipos locales de calefacción y refrigeración, se reduce la necesidad de recursos de energía primaria. Estas soluciones de SES son específicas de las 5GDHC [89].

La 5GDHC, que también se considera una red calefacción urbana ultrabaja, es una solución novedosa basada en el intercambio de energía térmica entre edificios de diferentes necesidades utilizando redes de temperatura ultrabaja [90], rangos térmicos próximos a los de la temperatura de muchos recursos naturales y antrópicos, de segundo y tercer ciclo, de bajo grado y abundantes tanto en nuestro entorno natural como en los sistemas antrópicos que nos rodean en el entorno urbano.

La ilustra la evolución experimentada por las redes de distrito, indicando los hitos que, desde las primitivas redes de vapor de 1ª generación, han ido distinguiendo las distintas generaciones de redes de distrito. La categorización de los sistemas Red de Calefacción, o su término en inglés District Heating (DH) introducida por Henrik Lund y sus coautores [91], está hoy ampliamente aceptada. Clasifica los sistemas DH en cuatro generaciones diferentes caracterizadas por un conjunto de

saltos tecnológicos y conceptuales disruptivos en orden cronológico, desde su concepción en el siglo XIX hasta la actualidad (2GDHC, 3GDHC, 4GDHC y 5GDHC). La evolución, a lo largo del último siglo, de los sistemas de redes de distrito entre la primera y la cuarta generación, se ha caracterizado por tres factores [87]:

- El progresivo descenso de la temperatura de los recursos energéticos compartidos. Disminución progresiva de la temperatura de suministro del fluido portador de calor (vapor/agua) en la red.
- La progresiva incorporación de fuentes de producción térmica, cada vez más diversificadas, incluyendo finalmente energía residual de procesos industriales. Transición progresiva de los combustibles fósiles a las fuentes de energía renovables como energía primaria consumida por la red.
- Aumento progresivo de la eficiencia de las redes, debido a una disminución de las pérdidas térmicas, tanto en la generación como en la distribución de la energía térmica.

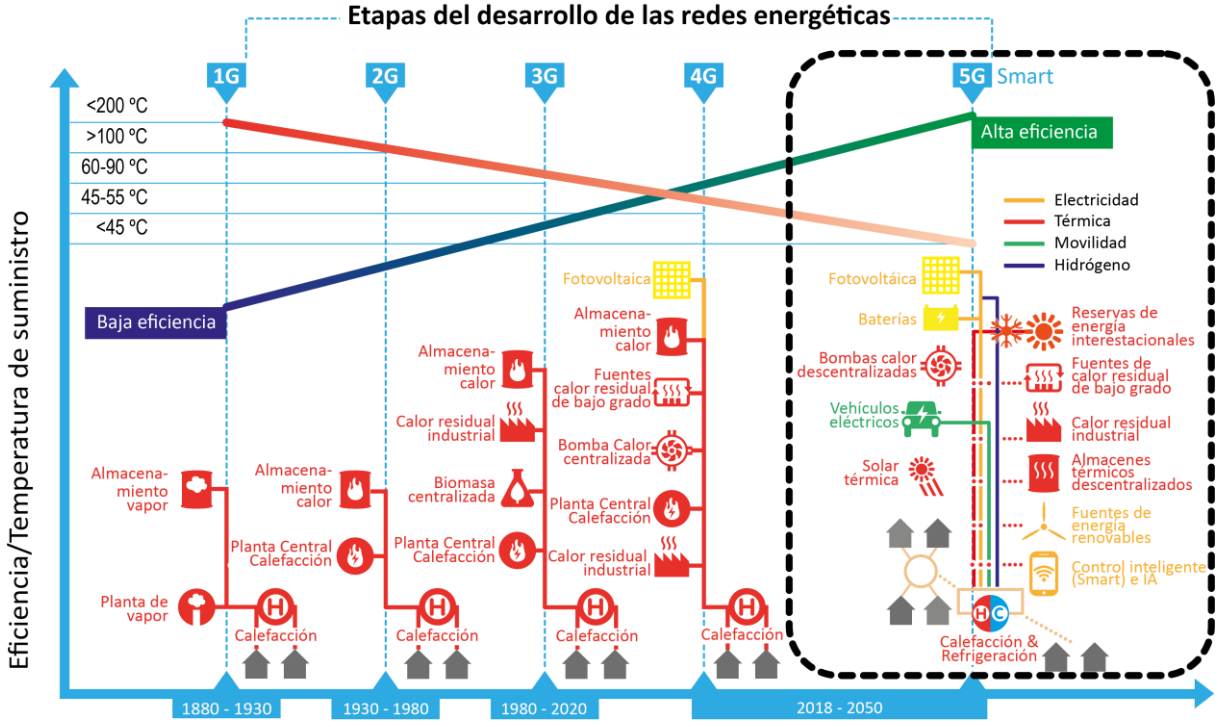


Figura 4-137. Esquema del desarrollo de las redes energéticas a lo largo de la historia. Adaptado por el autor de [92].

Hasta su cuarta generación las redes de distrito han sido utilizadas para dar servicios de aporte de calor y calefacción. Sólo a partir de la 5ª generación, las 5GDHC, sustentan servicios simultáneos o alternativos de calefacción y refrigeración, lo que hace posible multiplicar las potenciales fuentes de recursos energéticos de origen renovable, la incorporación de energía de bajo grado de fuentes descentralizadas, edificios, residuos energéticos industriales, energía recuperada de infraestructuras, recursos descentralizados de almacenamiento, recursos procedentes del bioclimatismo local y recursos de información, control y gestión de varias escalas, individual, colectiva, de la red y urbanas.

Las 5GDHC hacen posible la figura el prosumidor, un agente que puede ser alternativamente o simultáneamente productor o proveedor de energía que se inyecta a la red de baja temperatura o consumidor de la misma. La incorporación de escenarios de intercambio de recursos abundantes de bajo grado abre por primera vez el espectro de estrategias de aprovechamiento circular de recursos renovables y residuales que se ponen al alcance de ciudadanos de todas las escalas y medios económicos.

Las 5GDH integran recursos de almacenamiento de calor distribuido, fluctúan entre la oferta y la demanda de calor y frío y utilizan bombas de calor para aumentar la temperatura a las condiciones deseadas. Es una solución de baja temperatura, bidireccional y descentralizada. Los consumidores son los usuarios finales de calor y frío, en su mayoría edificios residenciales, y los prosumidores son los usuarios de calor que pueden recuperar el calor y transferirlo a redes de calefacción o desde redes de refrigeración, por ejemplo, centros de datos y centros comerciales. Cada participante en el sistema necesita una bomba de calor individual que esté conectada a la red general [90].

La 5GDHC a pequeña escala, con una arquitectura descentralizada, de redes cortas, puede ser muy beneficiosa para comunidades urbanas que estén abiertas y organizadas para la cooperación, la interacción simbiótica, y la descentralización, lo que posibilita una mayor independencia del mercado energético tradicional, centralizado, especulativo y a gran escala. Un cambio en este sentido de la infraestructura y del concepto tecnológico de la DH, que en nuestro país aún tiene una componente predominante individual a colectiva a escala de comunidad de propietarios, evidenciaría que los modelos de negocio existentes no son los más beneficiosos para la mayoría de las partes interesadas, ciudadanos y colectivos consumidores y potencialmente prosumidores. Estos cambios requieren un marco

de concertación e inversiones que excederán significativamente las posibilidades financieras de la comunidad [90]. A continuación en la *Tabla 4.14* se realiza un análisis DAFO de las 5GDHC [88]:

Fortalezas	Debilidades
• Recuperación el exceso de calor a baja temperatura e incluyen Fuentes de Energía Renovables, o su término en inglés Renewable Energy Sources (RES) de baja entalpía. • Bidireccionalidad: proporciona al mismo tiempo servicios de calefacción y refrigeración durante todo el año. • Modularidad, flexibilidad y resiliencia ante un cambio de condiciones de contorno (construcción nivel de eficiencia, cargas). • Pérdidas térmicas insignificantes debido a la baja diferencia de temperatura entre las tuberías y el suelo. • Las tuberías pueden integrar el aislamiento térmico. • Las tuberías pueden estar hechas de materiales poliméricos. • El suelo y la red se pueden utilizar como almacenamiento térmico.	• Las subestaciones requieren de mayor inversión que las de generaciones anteriores de DH (Gastos de Capital - CAPEX). • Es necesario instalar un tanque de ACS individual. • Bajo ΔT entre las tuberías de suministro y retorno conduce mayores diámetros de tuberías y capacidad térmica de almacenamiento. • Altos costos de bombeo por unidad de energía debido al pequeño ΔT operativo y mayor viscosidad del fluido. • Costos de electricidad (y consumos de energía primaria relacionados) para HP.
Oportunidades	**Amenazas**
• La conversión de una red de alta temperatura existente en 5GDHC es posible, en teoría. • Sinergia con el almacenamiento estacional (menores pérdidas, aunque también menor ΔT). • El objetivo de descarbonización puede ser alcanzado por las empresas de servicios públicos o los municipios mediante el desarrollo de este tipo de infraestructura. • Un nuevo concepto de energía a nivel de distrito permite alcanzar un alto objetivo de ahorro de energía primaria mediante distintos grados de rehabilitación de los edificios. • Mayor interacción con el sector eléctrico (posible uso de HPs para el lado gestión de la demanda).	• El diseño y el dimensionado adoptado deben ser revisados en los sistemas tradicionales de DH. • El COP de la bomba de calor (HP), puede ser demasiado bajo, dependiendo del tipo de calefacción del edificio y temperatura de suministro de la red. • Mayores costos y menor rendimiento para futuros HP debido a la eliminación gradual del gas. • Falta de espacio en caso tener que depender de un almacenamiento estacional. • La instalación es invasiva tanto para las tuberías como para las subestaciones de usuario. • Las decisiones de conexión las toma un único usuario o grupo de usuarios.

Tabla 4.14. Análisis DAFO aplicado a la tecnología 5GDHC [88].

A pesar de que las redes 5GDHC se encuentran en la etapa inicial de desarrollo, su implantación comenzó a principios de la pasada década y varias decenas de estos sistemas están en funcionamiento en Europa, y están siendo monitorizados como proyectos piloto. Muchos de estos sistemas funcionan de manera diferente a la tecnología DHC tradicional. Por ejemplo, suministran agua a bombas de calor agua-agua descentralizadas, o su término en inglés Water Source Heat Pump (WSHP) a una temperatura en el rango entre 0 °C y 30 °C. Esto tiene muchas ventajas con respecto a los sistemas DH tradicionales y, además, las 5GDHC permiten la explotación de fuentes de calor autóctonas muy diversas. La temperatura de distribución, estable y cercana a la del terreno (con un perfil geotérmico casi "neutro" desde el punto de vista de las pérdidas térmicas), la capacidad de trabajar en modo calefacción o refrigeración independientemente de la temperatura de la red, los flujos de energía bidireccionales y descentralizados son algunos de los valores añadidos clave de 5GDHC con respecto a 4GDH [88] y las redes anteriores.

La tecnología 5GDHC pertenece intrínsecamente al concepto de redes térmicas inteligentes debido a que esta tecnología explota las subestaciones híbridas y mejora el acoplamiento sectorial entre las redes eléctricas y térmicas en un sistema de energía inteligente [88].

4.7.2. Clasificación de las redes 5GDHC

Buffa et al. [88] han propuesto una denominación para este tipo de redes basado en término generacional propuesto por Hendrick Lund y ya globalmente aceptado para la calefacción urbana y aportan aspectos complementarios a la definición concreta de aspectos fundamentales de un sistema 5GDHC. Una red de 5GDHC es una red de suministro de energía térmica que utiliza agua como medio portador y subestaciones híbridas con bombas de calor agua- agua (WSHP)[88].

Funciona a temperaturas cercanas a las del terreno, la baja temperatura del medio portador ofrece la oportunidad de explotar directamente el exceso de calor industrial y urbano, incluyendo la energía de bajo grado procedente de las infraestructuras urbanas subterráneas, y el uso de fuentes de calor renovables con bajo contenido de exergía térmica. Esto permite cubrir simultáneamente y con los mismos conductos tanto las demandas de calefacción como las de refrigeración de diferentes edificios.

A través de subestaciones híbridas, la tecnología 5GDHC mejora el acoplamiento de las redes térmicas, eléctricas y de gas en un sistema de energía inteligente y descentralizado [89]:

- Sistemas de circuito abierto donde el medio, normalmente un fluido de soporte, agua o aire, de la fuente térmica se extrae por medio de bombas hidráulicas y luego se descarga retornando lo al medio de origen, después de realizar un intercambio térmico para la explotación del contenido energético. Pueden suministrar directamente a las bombas de calor (sistemas directos de bucle abierto) o indirectamente con la instalación de un intercambiador de calor en el medio (sistemas indirectos de bucle abierto). En los sistemas de intercambiador vertical se extrae agua y se inyecta en el mismo pozo.
- Sistemas de circuito cerrado donde el medio portador intercambia energía térmica con la fuente en un circuito cerrado. El mismo circuito generalmente suministra también a la bomba de calor. Por lo general, se aplica en sistemas geotérmicos con intercambiadores de calor geotérmicos verticales u horizontales.

Complementariamente, "una clasificación de redes térmicas ha sido realizado por Sulzer y Hangartner de acuerdo a [88]:

a) El número de tuberías a diferentes niveles de temperatura en:

- Sistemas de un solo tubo: bucle abierto directo típico de los sistemas que explotan aguas superficiales o subterráneas en las que, después de suministrar energía térmica a bombas de calor e intercambiadores térmicos el medio se retorna al ambiente.
- Sistemas de dos tubos: bucle de agua al que se conectan bombas de calor e intercambiadores térmicos, donde la temperatura de la tubería de suministro es superior a la de retorno si la demanda de calefacción domina el sistema o viceversa si la demanda de refrigeración domina el sistema.
- Sistemas de tres tubos: se instala una tubería de alimentación adicional que funciona a una temperatura adecuada para el calentamiento directo o la refrigeración directa por medio de un intercambiador térmico; el caudal de retorno se realiza en las tuberías de alta o baja temperatura del bucle HPs y CHs.

- Sistemas de cuatro tubos se instalan dos bucles de suministro separados para trabajar a una temperatura adecuada para el calentamiento directo y el enfriamiento directo, respectivamente, y permitir la cascada de energía.

b) La combinación de la dirección del flujo de energía y la dirección del flujo medio en:

- Flujo de energía unidireccional: flujo medio direccional típico de los sistemas tradicionales de redes de distrito de calefacción o refrigeración, DH/DC, con una estación de suministro donde cualquier usuario puede operar en modo de calefacción o de refrigeración.
- Flujo de energía unidireccional: flujo medio no direccional típico del sistema tradicional de DH/DC con múltiples estaciones de suministro donde la dirección del flujo puede cambiar en algunas ramas de la red.
- Flujo de energía bidireccional: flujo medio direccional típico de redes 5GDHC con estación de bombeo centralizada donde algunos usuarios pueden estar en modo calefacción y otros en modo refrigeración.
- Flujo de energía bidireccional: flujo medio no direccional típico de redes 5GDHC con estaciones de bombeo descentralizadas (una para subestación) donde simultáneamente algunos usuarios pueden estar en modo calefacción y otros en modo refrigeración. Se pueden considerar múltiples tipos de configuraciones hidráulicas para este caso.

4.7.3. Comunidades locales de energía térmica

Popularmente conocidas como "Comunidades Locales de Energía" o su término en inglés Local Energy Communities (LEC), o simplemente "Comunidades Energéticas", "Comunidades Ciudadanas de Energía" Comunidades Ciudadans de Energía o si término en inglés Citizen Energy Communities (CECs), fue el término utilizado por la Unión Europea en la primera directiva (UE 2019/944 [93]) que abordaba la regulación de la producción de electricidad por parte de grupos de ciudadanos cooperando a escala local.

Antes, la Directiva de Energías Renovables 2018/2001[94] incluía un artículo específico sobre "Comunidades de Energías Renovables" o su término en ingles Renewable Energy Communities (REC), como organizaciones ciudadanas múltiples con un propósito común de autoproducción de energía renovable. Ambas directivas tienen por objeto proteger y promover la participación de pequeños

grupos de productores agregados, generalmente asociaciones sin ánimo de lucro, en el mercado de la energía.

Los CEC se refieren a la generación de electricidad, no necesariamente a partir de fuentes renovables, mientras que los REC se refieren a la generación de energía renovable, no necesariamente a la electricidad.

La filosofía subyacente de las comunidades energéticas aborda los tres componentes de la Triada Energética (Seguridad-Equidad-Sostenibilidad) y, a pesar de su naturaleza local, tienen un gran potencial para ser implementados en toda Europa. En cuanto a los sistemas de calefacción y refrigeración, según el informe de la Comisión Europea sobre el apoyo a las políticas de descarbonización de la calefacción y la refrigeración, "el desarrollo de una conciencia colectiva, el intercambio de experiencias y la demanda de proveedores de soluciones, de planificadores y de operadores de sistemas" [87].

La Figura 4-139 es la conceptualización de un sistema 5GDHC. La red está equilibrada a lo largo del año. Los flujos de retorno cálidos del suministro de refrigeración y los flujos de retorno fríos del suministro de calefacción que cubren la mayor parte de la demanda posible. Además, cualquier demanda de calor o frío residual se abastece mediante fuentes renovables [95].



Figura 4-138. Esquema de las redes comunitarias como mercados populares asequibles. Fuente: Propia.

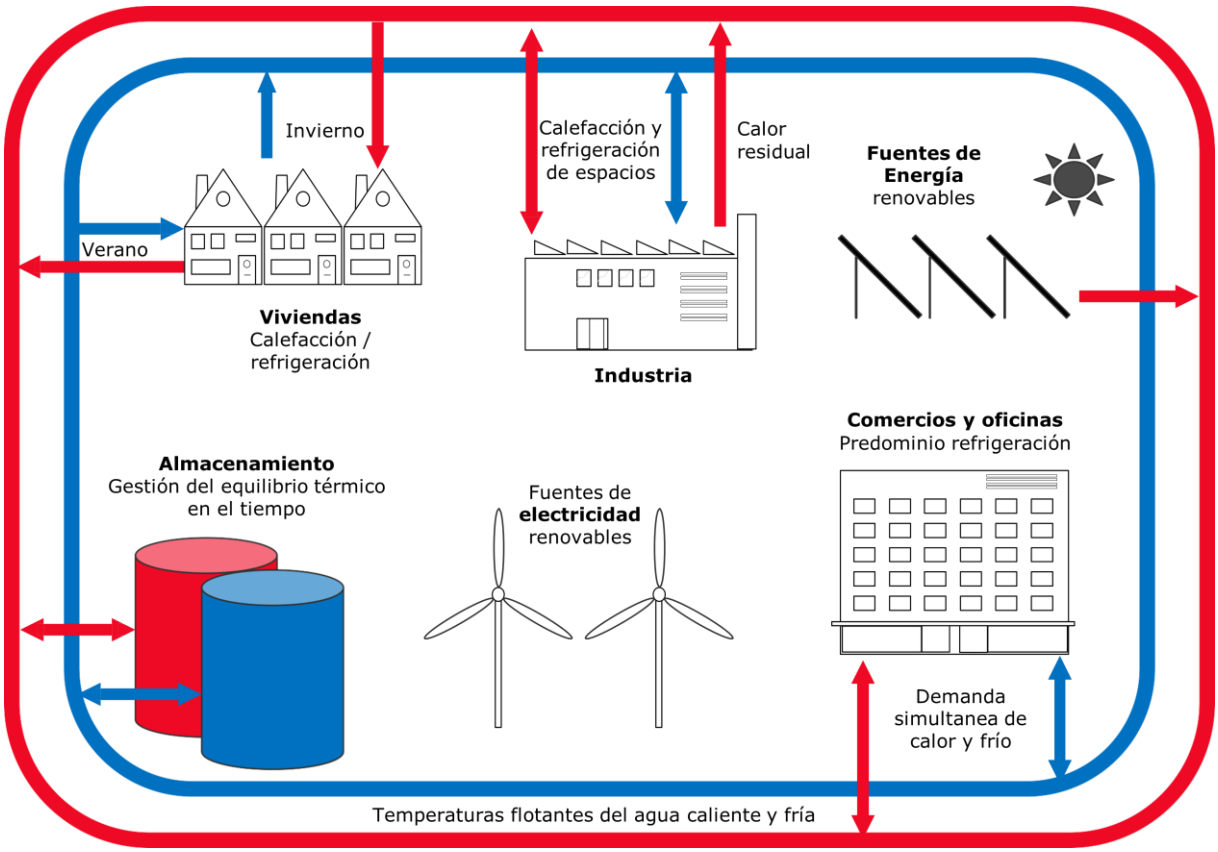


Figura 4-139. Representación circular de una red comunitaria 5GDHC [95].

Las comunidades energéticas representan, desde una perspectiva social, una plataforma única para estimular la autoproducción de energía renovable entre grupos de población que muestran perfiles diversos en cuanto a educación, ingresos y conciencia sobre temas de sostenibilidad, pero que enfrentan desafíos comunes (Figura 4-138).

Las 5GDHC se caracterizan por altos costos de inversión en comparación con alternativas de menores prestaciones y eficiencia y, aunque los ahorros en los costos operativos generalmente pueden compensar la diferencia a largo plazo, un escenario inicial con recursos financieros limitados combinados con una baja preocupación por la transición energética y el cambio climático puede llegar a ser una barrera importante para su implantación.

Según la encuesta de 53 5GDHC en Alemania, realizada por Wirtz et al, en 2022 [96], los datos obtenidos muestran que cada vez se están desarrollando más proyectos de redes de este tipo.

Conceptualmente, los proyectos son diferentes:

- Algunas redes funcionan a temperaturas inferiores a 0 °C.
- Otras utilizan diferentes modos de temperatura en verano e invierno, lo que da lugar a redes híbridas 4GDH/5GDHC.
- Se puede identificar una banda de temperatura típica de -5 a 20 °C, aunque existen redes 5GDHC con temperaturas más altas, a menudo impulsadas por fuentes de calor de alta temperatura (Figura 4-140).
- Aproximadamente 4 de cada 5 redes utilizan tuberías de plástico sin aislamiento.
- El 60 % de las redes tienen una longitud total inferior a 2 km y la red más grande tiene una longitud de 12,5 km. Sin embargo, en el futuro, se esperan redes 5GDHC aún más extensas.
- Un 25 % de las redes están implantados en tejidos urbanos existentes y el resto sirven a desarrollos de nueva construcción. Es probable que la proporción de actuaciones en la ciudad consolidada aumente, ya que las redes 5GDHC tienen un alto potencial para contribuir también a la descarbonización de los distritos existentes mediante el aprovechamiento de abundantes recursos térmicos presentes y desaprovechados en la edificación y las redes de infraestructura urbana.

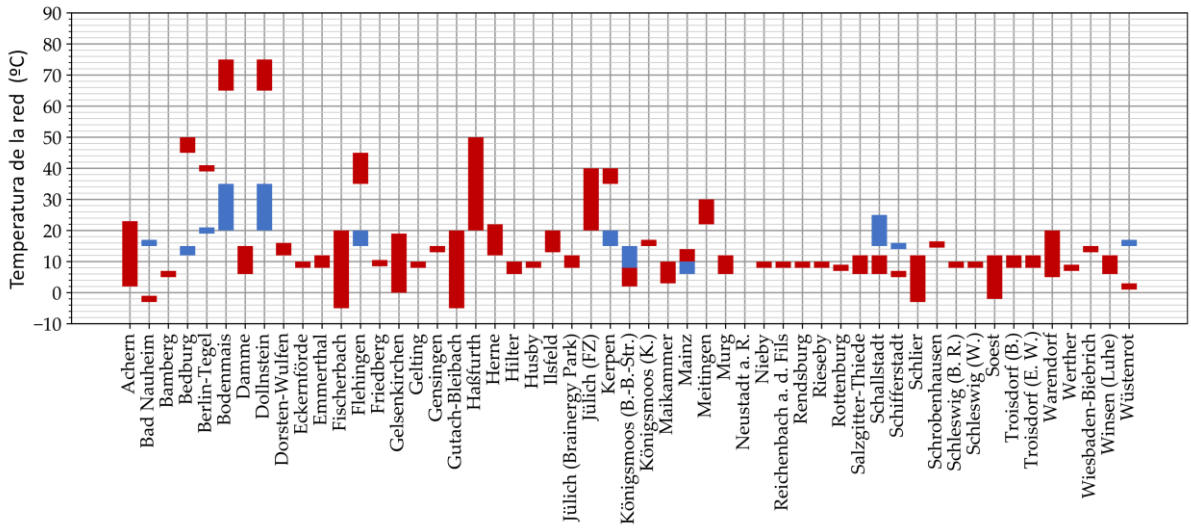


Figura 4-140. Temperaturas de funcionamiento. Los intervalos azules indican el modo de funcionamiento de verano. Los valores de temperatura promedio se visualizan con un intervalo de 2 K [96].

Las fuentes de calor de las redes 5GDHC pueden ser muy diversas (*Figura 4-141*). En las redes estudiadas en Alemania, se identifican 15 fuentes de calor diferentes. La fuente de calor más frecuente son los colectores geotérmicos (43%) y las sondas geotérmicas (32%). Dado que los colectores solares térmicos proporcionan temperaturas por encima de la temperatura de la red de los sistemas 5GDHC, rara vez se instalan (en el estudio, la energía solar térmica solo se utiliza en 3 redes híbridas).

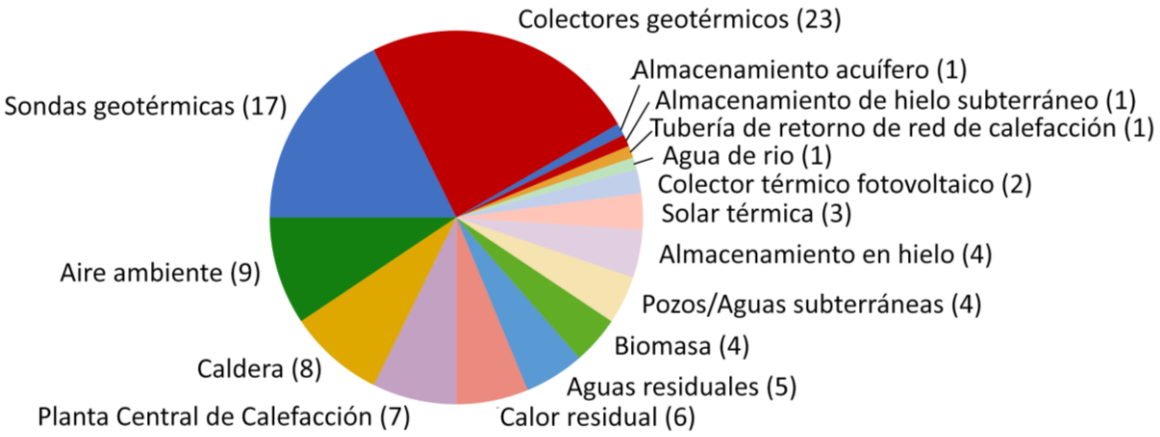


Figura 4-141. Fuentes de calor para redes 5GDHC [96].

El 74 % de las redes 5GDHC también suministran frío, lo que demuestra que las redes 5GDHC son un enfoque prometedor para descarbonizar también el suministro de refrigeración en las zonas urbanas.

Algunos resultados de la encuesta son específicos de la normativa alemana:

- El factor de energía primaria de los sistemas 5GDHC suele estar entre 0,4 y 0,5, y en 27 redes los propietarios de edificios están obligados a conectarse a la red.
- Debido a la normativa sobre subvenciones, las bombas de calor agua-agua descentralizadas son propiedad del operador de la red en la mayoría de los casos (29 distritos).
- Los modelos de precios son diversos, y van desde una tarifa de conexión única hasta un complejo sistema de precios sobre un coste de referencia.
- Los modelos de precios para el suministro de frío tienden a ser menos complejos, ya sea con un precio base y de energía o sin tarifa alguna [96].

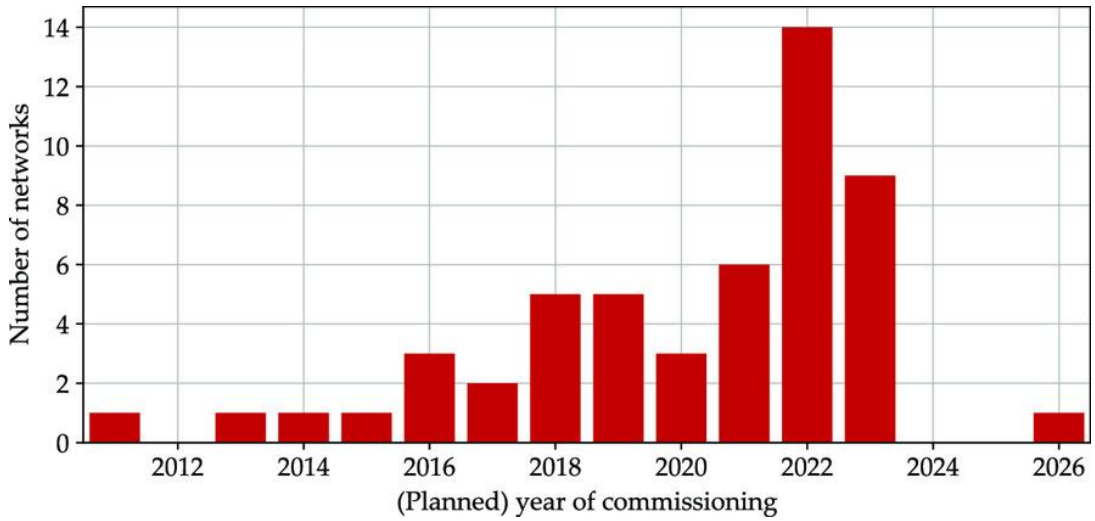


Figura 4-142. Resumen del año (previsto) de puesta en servicio de los distritos estudiados. La red de 1981 no está representada [96].

Es indiscutible el incremento de proyectos de este tipo que se ha dado en los últimos años (*Figura 4-142*), esta tecnología tiene que demostrar, en general la viabilidad y rentabilidad de los distritos. Todas las redes 5GDHC que se han considerado sólo son soluciones locales para distritos pequeños y medianos. Es necesario demostrar que las redes 5GDHC también podrían ser factibles y adecuadas para distritos de grandes ciudades con miles de edificios [96].

4.7.4. Modelos de negocio

En la mayoría de los países de Europa, las redes de calor son públicas. Sólo un tercio de los países tienen relaciones mixtas entre lo público y lo privado en Partenariado Público-Privado (PPP) y en cooperativas [97].

La red urbana de calefacción y refrigeración de quinta generación (5GDHC) o calefacción urbana ultrabaja es una solución novedosa basada en el intercambio de energía térmica entre edificios de diferentes necesidades utilizando redes de muy baja temperatura.

Los recursos de almacenamiento de calor distribuido fluctúan entre la oferta y la demanda de calor y frío y utilizan bombas de calor para aumentar la temperatura a las condiciones deseadas.

Los consumidores, proveedores y prosumidores interactúan entre sí a través de sistemas de baja temperatura, bidireccional y descentralizada. Los consumidores son los usuarios finales de calor y frío, en su mayoría edificios residenciales, y los prosumidores son los usuarios de calor que pueden recuperar el calor y transferirlo a redes de calefacción, por ejemplo, centros de datos y centros comerciales. Cada

participante en el sistema necesita una bomba de calor individual que esté conectada a la red general [90].

Como se ha comentado, la 5GDHC a pequeña escala es beneficiosa para las comunidades que están abiertas a la cooperación y apuntan a una mayor independencia del mercado energético a gran escala.

Se han planteado tres modelos de negocio diferentes del mercado local para 5GDHC a nivel comunitario [90]:

- Acuerdo de compra de energía térmica: el operador de la red de distrito financia y es titular de la red 5GDHC y luego presta servicios de suministro de energía para calefacción y refrigeración a los usuarios finales a precios acordados.
- Proveedor local de energía térmica: las empresas inmobiliarias invierten en la red 5GDHC, comprando calor y frío de diversas fuentes.
- Comunidad local de energía térmica: la comunidad local posee y opera la red 5GDHC, siendo múltiples participantes los que comparten la propiedad [90].

4.7.5. Análisis de riesgos y beneficios

La mayoría de las oportunidades del sistema 5GDHC están relacionadas con su carácter distribuido con niveles más altos de independencia respecto al suministro exterior. Los costes asociados a la implantación inicial son el aspecto más sensible en contextos de baja densidad, como es el caso de las zonas rurales y de las ciudades pequeñas [90].

La implementación del sistema afecta a los actores del mercado de la energía de manera diferente. Desde la perspectiva empresarial, las oportunidades para uno pueden presentar amenazas para el otro.

En general, las principales fortalezas del 5GDHC son la capacidad de utilizar el calor residual, proporcionando refrigeración y calefacción simultáneamente, y disminuyendo significativamente el consumo de energía primaria y las pérdidas de energía.

La reducción del consumo de energía a través de la recuperación de calor y mayores niveles de eficiencia energética, da como resultado un menor consumo de recursos primarios, beneficios para la salud, los ecosistemas, el cambio climático y el consumo de recursos materiales y energéticos [90].

4.7.5.1. Estructura de valor de la red y actores clave en el juego

La diferencia clave entre los modelos tradicionales de explotación y los de las 5GDHC es que, en estas últimas, el titular de la red 5GDHC es quien gestiona y regula su funcionamiento, y opera el sistema de refrigeración y calefacción con el que se produce todo el calor necesario o garantiza el enfriamiento hasta el nivel necesario, aportando la energía necesaria desde fuentes renovables o residuales recuperadas, después de la utilización de los recursos de energía aportados por los prosumidores.

Los equipos técnicos y tecnológicos pueden pertenecer al gestor de la red 5GDHC o algún otro agente externo que tenga un acuerdo con él. En la estructura de valor de la red, esas dos funciones, gestión y explotación tecnológica, se superponen [90].

En el caso de la calefacción individual o calefacción de distrito convencional, según modelos tradicionales, los prosumidores no serían parte de la cadena, sólo existen los consumidores habituales. En el caso de 5GDH, los prosumidores los agentes claves de la red de valor, aportando a la red su excedente de calor.

En un sistema tradicional, el principal proceso competitivo se produce entre el agente productor de energía y el prosumidor que la aporta, como complemento, a menor coste; en el caso de 5GDHC, el prosumidor no es sólo un complemento a la producción, sino un componente vital de todo el proceso de negocio, ya que no sólo se convertiría en un obligado comprador (cliente habitual) si no se implementa la 5GDHC, sino que sin el prosumidor la red no podría existir. Por lo tanto, en una red de baja temperatura el objetivo principal de todos los agentes interesados e involucrados es reducir los costos generales del suministro de calor y frío.

A partir de los análisis de redes de valor, se ha identificado que los siguientes participantes podrían incluirse como partes interesadas o actores en los futuros modelos de negocio del sistema 5GDHC [90]:

- **Consumidores**: los clientes del sector de calefacción y refrigeración conectados a la red 5GDHC. La estrategia de los consumidores para reducir los costos totales de calefacción y refrigeración es reducir su demanda a través de medidas de eficiencia energética en los edificios, edificios eficientes de baja exergía, o buscar la tarifa de calor más baja posible del sistema.
- **Prosumidores**: tanto clientes del sector de calefacción y refrigeración como titulares de posibles fuentes de calor residual. La estrategia de los Prosumidores

para la reducción de costos puede ser recuperar el calor y entregarlo al sistema 5GDHC o reutilizarlo dentro de sus propios edificios.

- **Productores de energía**: productores externos de energía que generan el calor y el frío necesarios para que la red 5GDHC cubra la parte de la demanda que no puede ser cubierta por fuentes de calor residual. Para reducir los costos totales, los productores de energía pueden elegir la fuente de energía con un precio más bajo, aumentar la eficiencia de generación de energía o tratar de aumentar la cantidad total de energía generada para reducir los costos específicos de cada unidad de energía.
- **Operador del sistema**: asociado con el operador del sistema ya existente o el nuevo operador a cargo de la red de calefacción y refrigeración, y es responsable de alinear la demanda y el suministro de energía. Para reducir los costes totales, el operador del sistema tiene como objetivo maximizar el uso de fuentes de energía con los costes asociados más bajos y los menores impactos.

4.7.5.2. Escenarios

Se han identificado tres posibles modelos de negocio diferentes como adecuados para la implementación del sistema 5GDHC, sin embargo, cada uno de ellos está asociado con ciertos beneficios y riesgos [90].

4.7.5.2.1 Escenario 1. Acuerdo de compra de energía térmica

En este escenario el operador financia y posee la red 5GDHC y luego vende servicios de calefacción y refrigeración a los usuarios finales a precios acordados.

La responsabilidad del propietario es mantener toda la infraestructura y garantizar que las necesidades de todos estén cubiertas.

Puede o no poseer las tecnologías de producción, pero es responsabilidad del operador que los clientes obtengan el suministro del calor necesario.

El operador es el punto central para todos los acuerdos financieros. Es pagado por los clientes y en parte prosumidores por el servicio ofrecido. Obtiene todas las inversiones y subvenciones relacionadas con el proyecto. Aun así, también debe asumir todos los riesgos. Así mismo, podrían formularse dos subhipótesis [90]:

- Además de los participantes mencionados anteriormente, un operador puede actuar como propietario de la red. El operador, en este caso, se ocupa principalmente del lado comercial del proceso y no está directamente

relacionado con la producción de energía. Las bombas de calor pueden ser propiedad y mantenidas por el operador, incluidos los costos de mantenimiento en la tarifa, o propiedad de los usuarios que están conectados a la red, lo que hace que la operación a nivel individual sea responsabilidad del cliente. El propietario tiene el mayor potencial de negocio y el mayor riesgo financiero aquí. El propietario es un "jugador" externo y podría poner sus intereses comerciales en primer lugar. Lo más probable es que esta no sea la opción más barata para el consumidor, pero es la más sencilla si el operador tiene la experiencia necesaria en el mantenimiento del sistema de alimentación.

- El gestor de red determinará los costes de entrada e instalación de la subestación para el usuario y fijará el límite de suministro y los costes totales, incluida una tarifa de conexión única y una tarifa anual básica calculada en proporción al caudal volumétrico de referencia de la subestación.
- Alternativamente, podría ser un productor de energía que invierte en la nueva tecnología y la ofrece directamente a los clientes. En ese caso, el número de participantes se reduce. Dado que el operador tiene principalmente un valor de gestión empresarial que no se analiza específicamente aquí y se ocupa principalmente de la redistribución de la energía producida por el productor y el prosumidor, en la relación inicial observada de productor-prosumidor-consumidor en la mayoría de los casos, el operador y el productor podrían asumirse como la misma unidad en los procesos.

4.7.5.2.2 Escenario 2. Proveedor local de energía térmica

En este escenario, las compañías inmobiliarias invierten y operan la red 5GDHC, adquiriendo la energía de varias fuentes. Este caso de negocio sería más adecuado para un sistema 5GDHC a pequeña escala donde el desarrollo de una red de energía representa una parte menor de las inversiones. No hay operador externo: los prosumidores, como una comunidad de propietarios de centros comerciales, regulan la red de energía y valor.

Además del sistema 5GDHC, los prosumidores podrían poseer la producción de la energía adicional, como las calderas de calefacción y los equipos de refrigeración. Alternativamente, el propietario podría ser la empresa propietaria del sistema de producción; En ese caso, los prosumidores les están vendiendo el exceso de energía [90].

Dado que el propietario tiene los mayores riesgos financieros, que su empresa forme parte de la red y se beneficie financiera y energéticamente podría ser otra motivación para impulsar el cambio.

Las empresas inmobiliarias de un área en particular invertirán en esa área, haciendo que la situación sea más estable y menos afectada por los cambios en los procesos económicos. Excluir actores adicionales podría hacer disminuir los precios para el cliente [90].

4.7.5.2.3 Escenario 3. Comunidad local de energía térmica

Este escenario supone implementar la iniciativa social y la comunidad energética local. Aquí, el consumidor es el que más está protegido, pero también existen riesgos para la gestión, ya que las instituciones autoorganizadas con muchos miembros pueden ser potencialmente insostenibles [90].

Como institución de base autoorganizada, las comunidades energéticas son preferibles desde el punto de vista del fortalecimiento de la cooperación en la sociedad. Además, este beneficio podría obtener una tasa de aprobación más alta para proyectos o fondos gubernamentales que podrían cubrir parte de los gastos. Sin embargo, en el caso de los préstamos, los bancos preferirían tratar con organizaciones existentes desde hace mucho tiempo que puedan demostrar su viabilidad [90].

4.7.5.2.4 ¿Qué opción elegir?

La elección del escenario resultante depende en gran medida del agente que inicie el proceso, ya que tendrá la primera opción para decidir qué modelo de negocio 5GDHC será el más adecuado. El proceso de evaluación puede ser iniciado por el operador externo: el propietario del negocio. El inversor también podría iniciar el cambio, pero las responsabilidades administrativas recaerán en cualquier caso en uno de los principales actores de la gestión. Si el inversor mantiene la posición de gestión, se implementa el Escenario 1 y el inversor se convierte en un operador independiente [90].

Si los consumidores y los prosumidores tienen capacidad de cooperar en comunidad, el principal problema que se les presenta como prosumidores y consumidores, es la capacidad administrativa. Para resolverlo pueden ofrecer un papel de responsabilidad a otro agente competente, como un productor o un operador externo (Escenario 1). Los prosumidores pueden convertirse en

propietarios de sus propias redes (Escenario 2) para ciertos proyectos a pequeña escala [90].

La inversión inicial en un sistema 5GDHC es importante. Los menores costos de mantenimiento y energía generan beneficios económicos a medio y a largo plazo.

En la etapa de implementación es necesario pasar por los procedimientos administrativos, las evaluaciones de riesgos, la compra de equipos, la concepción de los trabajos de construcción vinculados a la red y a la adaptación de los edificios y el cambio del combustible, lo que significa cambiar también la cadena de suministro.

En la siguiente etapa, la infraestructura es construida por el actor que se convertirá en propietario, en el escenario elegido. Y, a partir de este momento, el proyecto se debe integrar en red pública de servicios para calefacción y refrigeración, y todos los agentes externos de la cadena de valor creada están vinculados [90].

4.7.5.2.5 La escala de valor y evaluación de los beneficios en cada escenario

Los costos totales más bajos para la cobertura de calor y frío de edificios residenciales y comerciales se alcanzan en el Escenario 2, cuando el prosumidor inicia el desarrollo del sistema y administra el suministro de calor y frío a los edificios residenciales.

En este escenario, los prosumidores pueden reducir los costos generales de calefacción y refrigeración del edificio en comparación con otros escenarios. Sin embargo, la implementación y operación del sistema requieren costos adicionales.

El Escenario 3 representa el escenario del modelo de negocio de la comunidad energética. En este caso, se ha supuesto que la comunidad energética se desarrollará involucrando tanto a los prosumidores como a los consumidores en el desarrollo general del sistema 5GDHC y no habrá un operador de sistema externo. Los costos de administración del sistema ahora están cubiertos por los consumidores, lo que resulta en mayores costos totales de calefacción y refrigeración en comparación con otros modelos de negocios.

La mayor participación en los ingresos se alcanza en el modelo de negocio del acuerdo de compra de energía térmica cuando el operador del sistema también es el productor de calor para cubrir la escasez de demanda de calor y frío.

En el caso del Escenario 3, los costes de inversión y las demás responsabilidades adicionales recaen en la comunidad energética sobre la base de la cooperación entre el consumidor y el prosumidor [90].

4.7.6. Casos prácticos

Francia ha sido un ejemplo a seguir en el marco del apoyo a las redes de calor. En 2015 el gobierno francés se puso como objetivo quintuplicar las redes de calor con respecto a 2010 y que para 2030 dichas redes tuvieran el 65% de aporte energías renovables y de recuperación [98]. En este país se han implementado variadas medidas Gubernamentales, incluidas reducciones fiscales para proyectos que usen más de un 59% de energías renovables.

A través de la creación del Fondo Calor "Fonds Chaleur", en Francia se han invertido más de 11 mil millones de euros en redes de calor con energías renovables, mediante la integración de las administraciones locales para el desarrollo [97].

4.7.6.1. Caso Paris Sacley

Este proyecto es un desarrollo urbanístico a 20 km de París, en donde se está desarrollando un gran campus universitario y clúster científico. El proyecto se inició en 2015 y se irá desarrollando por fases. Para la gestión de este proyecto se creó un organismo específico, la Establecimiento Público de Urbanismo de París Sacley o su término en francés Etablissement Public d'Amenagement Paris Saclay (EPAPS) [97].

El proyecto integra tres mini distritos con tres miniredes interconectadas entre sí. Tiene una producción geotérmica centralizadas (30 ºC a 700 m de profundidad) que se distribuye en un anillo o "bucle" a las distintas subestaciones de intercambio térmico en donde se encuentran las bombas de calor. Son sistemas flexibles que se adaptan según las condiciones climáticas estacionales, y a la dinámica de la demanda (Figura 4-143 y Figura 4-145) [97].

A medida que el proyecto se desarrolla, como el recurso geotérmico es limitado, se van integrando otras energías de recuperación. Como la recuperación de energía de un súper calculador o un acelerador de partículas.

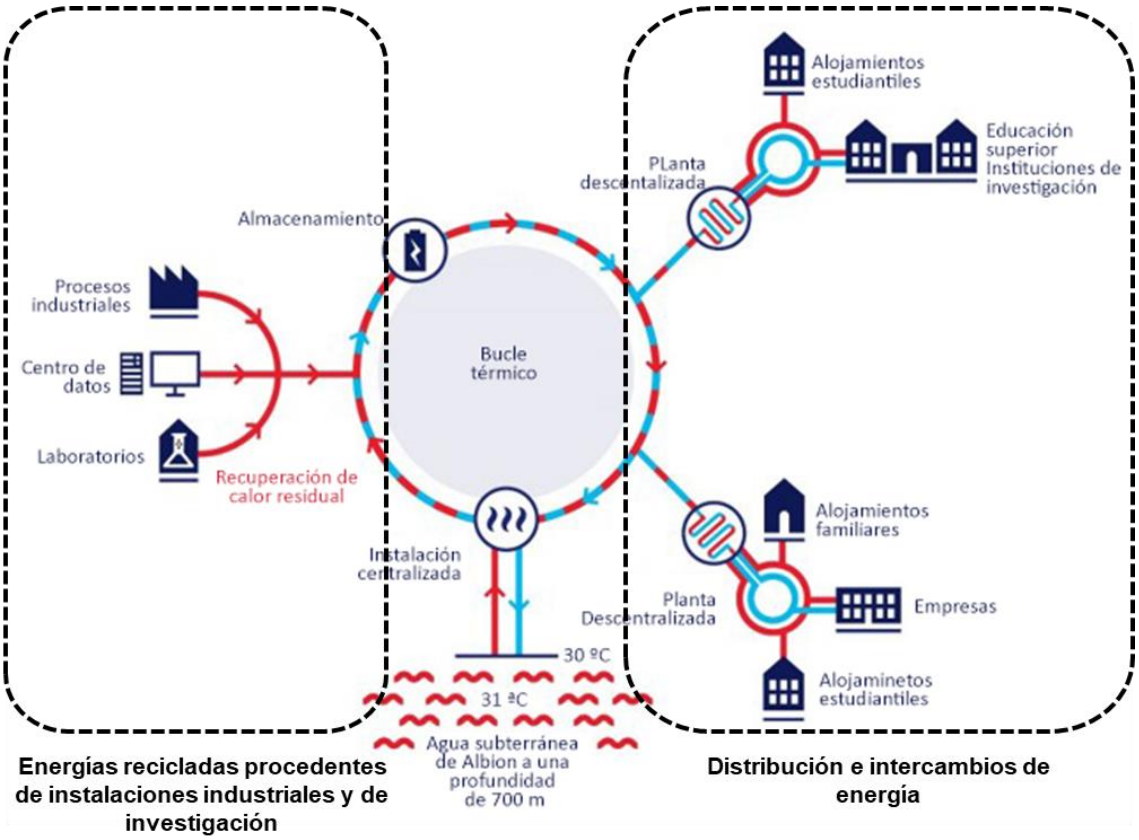


Figura 4-143. Sistema DHC Paris Saclay: reciclaje, intercambio y distribución de energía. Modificado por el autor de [99].

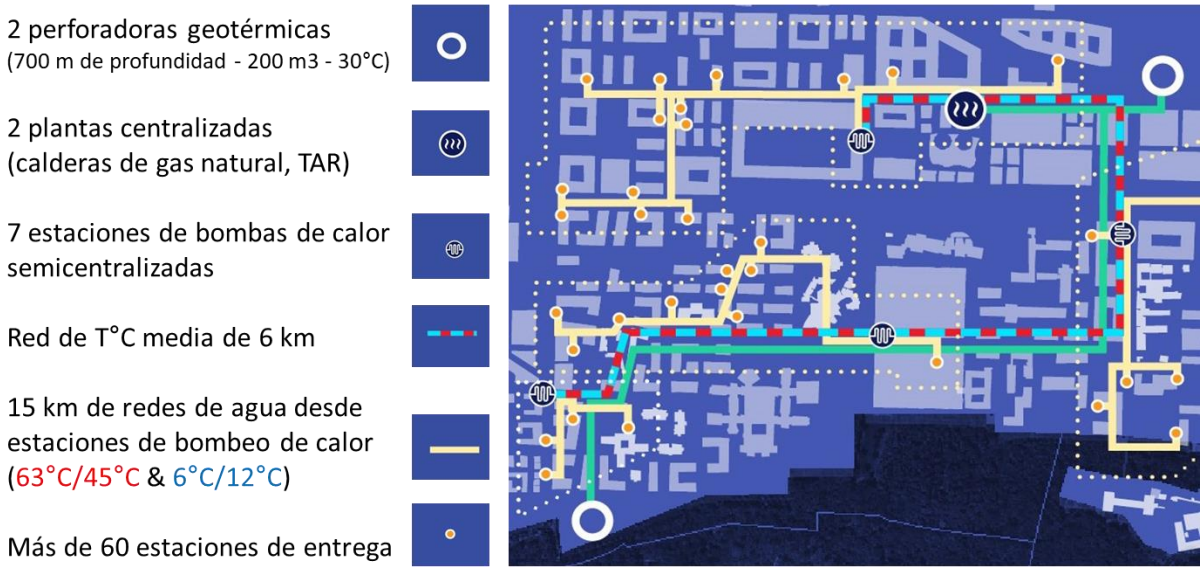


Figura 4-144. Redes propuestas en el complejo París-Saclay [99].

La red de media temperatura (bucle) va desde la instalación centralizada para abastecer a las subestaciones semicentralizadas en donde se ubican las bombas de calor. Esta red tiene como objetivo la valorización de energías de muy baja temperatura. La red tiene diferentes modos de control que influyen en el uso de

RES, dependiendo de si la demanda de calor anula la demanda de enfriamiento (modo invierno o medio tiempo) o lo contrario (modo verano), como se puede ver en la Figura 4-144 [99].

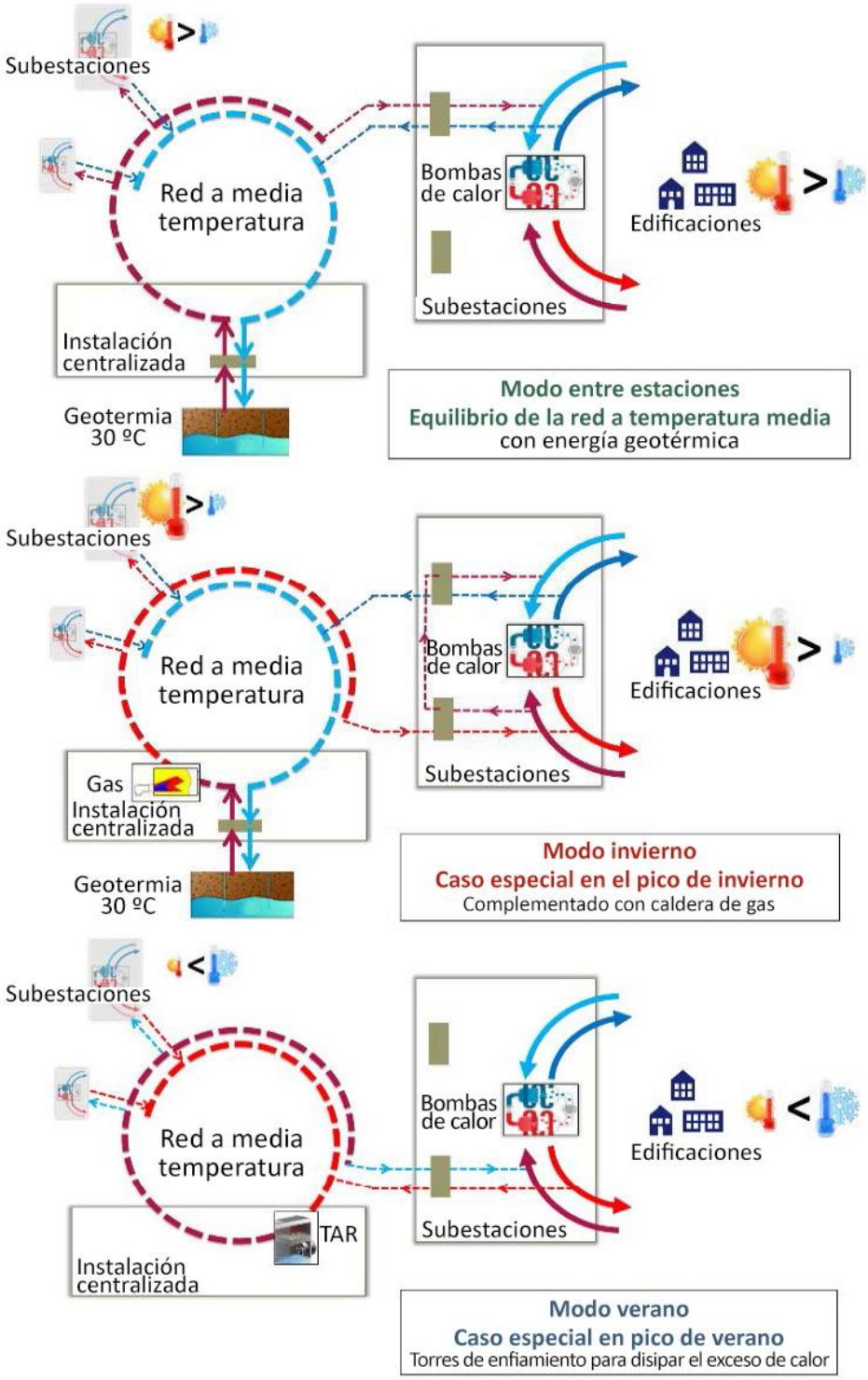


Figura 4-145. Modos de operación en las redes propuestas en el complejo París-Saclay [97]

La Tabla 4.15 resume las principales características del compleja París-Saclay [97]:

Cuota de mercado de DH	100 %
Cuota de RES	60 %
Emisiones de CO_2 (calefacción)	50 kg/MWh
Capacidad instalada	DH: 37 MW DC: 10 MW
Producción de energía	DH: 74 GWh/año DC: 25 GWh/año
Km de red de tuberías	25,4 km (DH y DC)
Temperatura de abastecimiento y de retorno	DH: 63/45 ºC DC: 6/12 ºC

Tabla 4.15. Principales características complejo París-Saclay [97].

En el modelo de negocio desarrollado, el riesgo se distribuye entre el propietario de la red (EPAPS) en régimen de Partenariado Público Privado (PPP) y el operador, en régimen de Diseño, Construcción y Operación o su término en inglés Design, Build and Operate (DBO). El agente público realiza la inversión y establece los contratos con los clientes finales, de esta forma el riesgo de facturación no se le transmite al operador [97].

El desarrollo de las redes de distrito y en particular el reciente impulso de las redes de distrito de muy baja temperatura en Francia acompaña al proceso de transformación de áreas degradadas y espacios de infraestructuras obsoletas en eco barrios con dimensiones equilibradas, sociales, económicas y ambientales. Más de 600 de estas actuaciones, etiquetadas por la Administración Francesa, están en curso actualmente. La mayoría de ellas integran redes de distrito y estas integran a su vez recursos renovables y residuales de baja y muy baja temperatura.

4.7.6.2. Casos en Europa

En el informe "Overview of Markets and Regulatory Frameworks under the Revised Renewable Energy Directive" [100], realizado por la Comisión Europea en 2021 se analizaron 10 casos ejemplares, sus modelos de negocio y sus ventajas.

El análisis de estos casos, aunque cada uno con sus particularidades, permitió definir 8 pilares para una descarbonización exitosa a través de sistemas DHC eficientes.

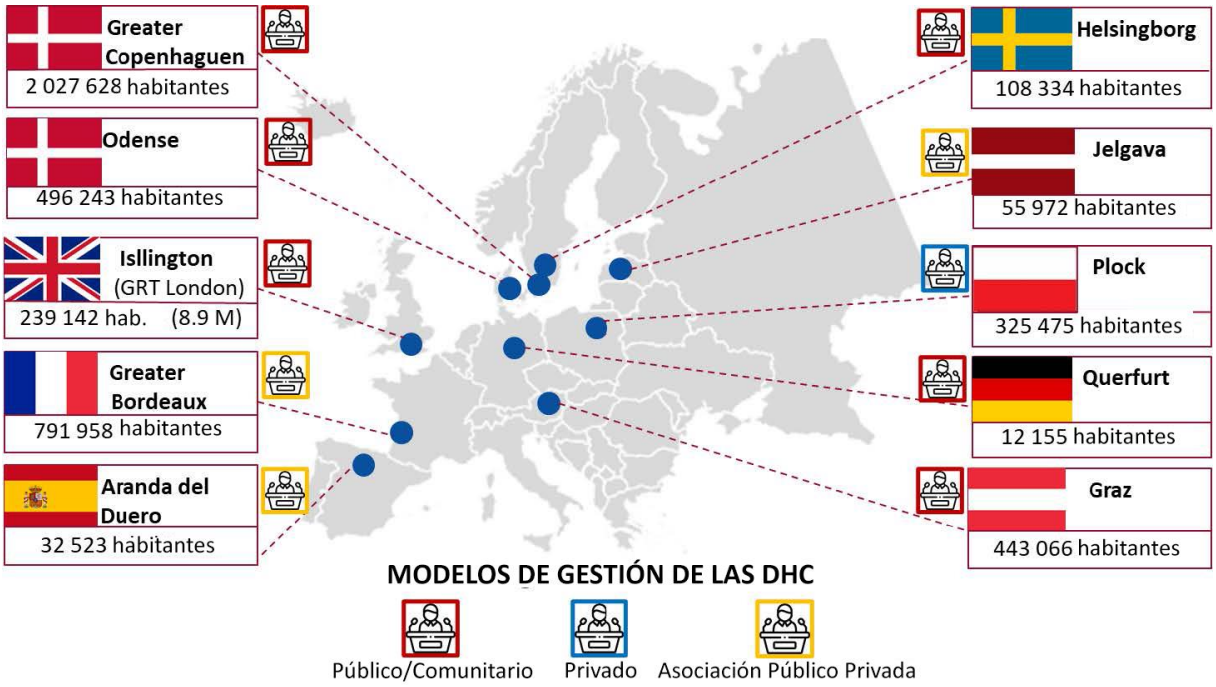


Figura 4-146. Mapa de casos de estudio analizados y sus modelos de gobernanza [100].

De estos 8 pilares, la mitad aparece como crítica para el éxito de la descarbonización de todas las redes estudiadas. Esto sugiere que el apoyo del municipio, un modelo de negocio adecuado y robusto, las opciones técnicas estratégicas (a largo plazo) para el suministro de DHC y la implementación de enfoques colaborativos e innovadores son factores de éxito esenciales para cualquier proyecto de DHC sostenible, abordado principalmente a nivel local y regional [100]:

- Los municipios desempeñaron un papel clave en todos los casos analizados, ya que poseyeron y operaron directamente las redes de DHC y, por lo tanto, dirigieron completamente sus desarrollos, o influyeron en ellos a través de políticas urbanas y planes de apoyo, conectando sus edificios públicos, valorando las sinergias entre la infraestructura urbana y con las comunidades vecinas y, en general, apoyando la DHC sostenible como una herramienta poderosa para alcanzar sus objetivos climáticos locales.
- Los operadores de DHC en las redes estudiadas lograron integrar en sus modelos de negocio las inversiones y acciones necesarias para mejorar progresivamente la eficiencia de las redes y descarbonizar su producción,

asegurando un reparto adecuado de los riesgos y la viabilidad económica (por ejemplo, a través de tarifas de incentivos y que reflejen los costes), apoyando en última instancia la competitividad de DHC frente a soluciones alternativas de H&C.

- Las opciones técnicas adecuadas constituyen el núcleo de estas iniciativas (combinación energética complementaria y diversificada, maximización del uso de las fuentes de energía locales, aumento de la flexibilidad...).
- La tendencia hacia la descentralización de la producción y una mayor conciencia climática entre todo tipo de actores locales (empresas, organizaciones, ciudadanos...) dio lugar a enfoques innovadores y colaborativos exitosos para una descarbonización profunda de la salud y la seguridad.
- Entre los de mayor impacto, se pueden destacar los marcos normativos y normativos nacionales. De hecho, estos suelen tener una influencia muy fuerte en la descarbonización de los mercados de salud y seguridad, como lo demuestran algunos de los países de la UE con mejores resultados en materia de descarbonización de salud y seguridad (Suecia, Letonia, Dinamarca), que también son países con altas cuotas de mercado de DHC. Si bien algunas ciudades lograron desarrollar sistemas DHC sostenibles a pesar de un marco nacional de bajo apoyo, todas están de acuerdo en el posible efecto de aceleración de la descarbonización de la salud y la seguridad al abordar este problema político.
- El nexo entre DHC y la construcción también es un facilitador técnico clave para la descarbonización a través de DHC. La integración de los emisores de calor de baja temperatura y la planificación integral del calor dieron lugar a una alta eficiencia sistémica en algunas de las redes analizadas.
- Por último, los diferentes modelos de gobernanza para los operadores de DHC (públicos, privados, APP) han demostrado ser eficaces y eficientes en todos los estudios de caso y, cuando existían, las medidas de empoderamiento de los consumidores también condujeron a una mayor eficiencia energética a nivel de edificio y sistema.

Como conclusión, para que los modelos de negocio tengan éxito, las soluciones 5GDHC deben agregar tanto valor que motive la inversión para la construcción de una red y el equipo central.

Una parte integral de la tecnología 5GDHC es su sistema de control de alto nivel. Se necesita un sistema de control de alta especialización para la aplicación flexible y robusta de la simbiosis energética y el intercambio energético entre diferentes edificios.

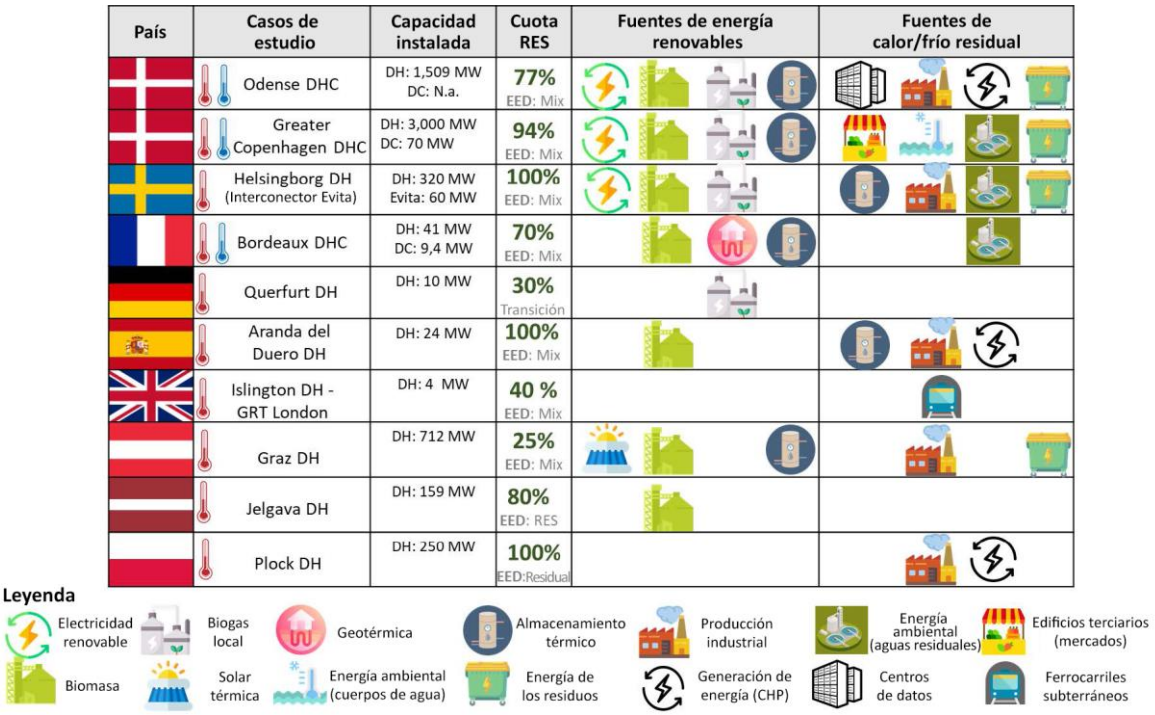


Figura 4-147. Cuadro sinóptico de casos de estudio y sus fuentes de energía [100].

Sin embargo, todavía se carece de información específica y experiencias operativas sobre la aplicación de controles de alto nivel que sirvan de apoyo a la adopción de decisiones.

Un obstáculo real en la implementación de soluciones 5GDHC son los desafíos que presentan la legislación y la práctica social.

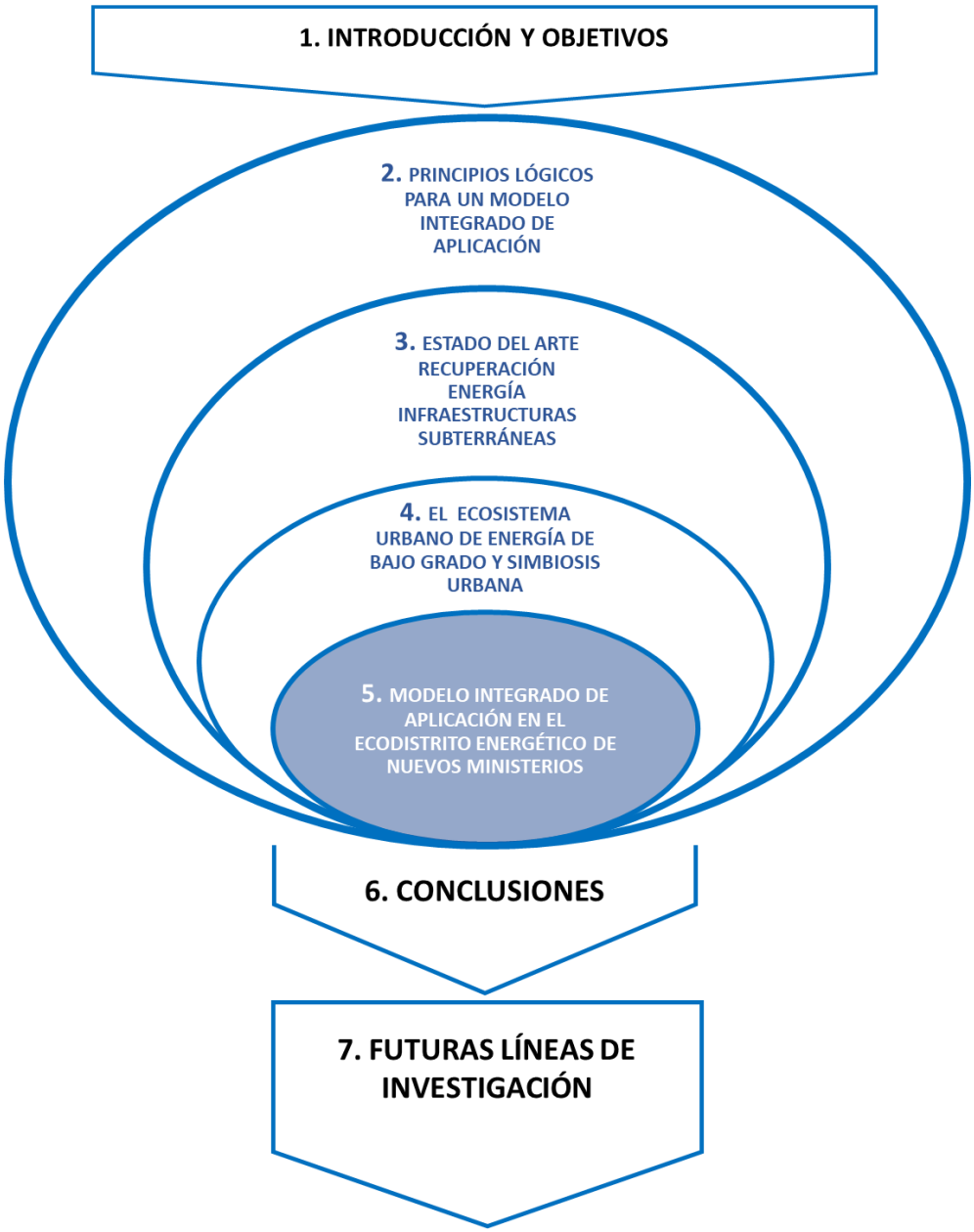
En muchos países, el mercado de la energía es un monopolio gestionado por empresas estatales, y el comercio o el intercambio de energía entre entidades privadas es ilegal [89].

Por esta razón, es indispensable el apoyo político de las distintas administraciones (con regulaciones e incentivos) y la adquisición de un papel cativo de las administraciones locales.

El incorporar el sistema de red de calor como parte integral de un desarrollo urbanístico y dirigido por una agencia urbanística exclusiva, permite la adecuada

gestión de los proyectos. La clave está en la modulación (tanto del sistema, como de la arquitectura e incluso la parte legal) que permita la adaptación del sistema a las variaciones contextuales que se vayan presentando [97].

5. Modelo integrado de aplicación en el ecodistrito energético de Nuevos Ministerios



5.1. Presentación

En el desarrollo de esta tesis doctoral se ha realizado el ejercicio analítico de presentar varios casos de proyectos ejecutados por el doctorando a lo largo de los últimos 20 años y que, dentro de la lógica secuencial de la exposición. Estos casos ejecutados han ido aportando modelos de actuación referidos, en la secuencia de capítulos, a aspectos parciales cuya integración sistémica es necesaria para que el modelo de recuperación y uso de la energía residual procedente de las redes urbanas de infraestructuras subterráneas sea válido.

Así, a partir de la presentación de los principios lógicos y ecológicos fundamentales y de la definición de la estructura del ecosistema urbano de bajo grado se han abordado la caracterización de sus componentes:

- Las geoestructuras energéticas en las redes urbanas de infraestructura. Los aspectos relativos a la técnica y tecnología de recuperación de energía en las distintas infraestructuras subterráneas,
- Los sistemas constructivos de baja exergía. Características y capacidades que debe tener el medio construido, en interacción con las personas, para que la edificación pueda incorporar, utilizar y obtener el máximo rendimiento de los recursos energéticos de bajo grado de distintas procedencias.
- Las redes que soportan los flujos de intercambio de información y recursos entre ambos agentes de intercambio, y los recursos de gestión y operación que hacen viables estrategias evolutivas de eficiencia.

La dialéctica de la construcción de esta tesis nos lleva en una dinámica espiral a partir de aspectos estructurantes de naturaleza sistémica, pasar a un proceso analítico de estudio y caracterización individual de sus componentes y retornar al proceso sistémico de integración y caracterización de las dinámicas de interacción entre los mismos y sus factores de impacto.

En esta dinámica cada componente es esencial, pero si hay una fase particularmente conclusiva porque que introduce integralmente todos los factores de complejidad que se han ido abordando en la tesis, es la de la concreción del ámbito de aplicación del modelo integrado de aplicación.

5.1.1. Antecedentes

El Complejo de Nuevos Ministerios, CNNMM, es un conjunto emblemático concebido en los años 30 como hito en la expansión hacia el norte de la ciudad sobre el eje de la Castellana y como un emblema de modernidad en la renovación de la Administración del Estado.

Se trata de un conjunto de especial valor y protección patrimonial y constituye un ejemplo claro de la concepción arquitectónica puesta al servicio de los objetivos funcionales que definían en la España de los años 30 una nueva situación política, mediante su configuración urbanística y desde su propia solución arquitectónica.

A escala urbana CNNMM se proyectó para ser un elemento clave de articulación en la prolongación del eje norte sur en el paseo de la Castellana, también un punto de inflexión en el trazado del segundo Paseo de Ronda de Madrid, que rodea todo el ensanche del XIX-XX, y también es el conjunto que resuelve la transición transversal entre el paseo de la Castellana y el tejido denso del último ensanche del barrio de Chamberí. El conjunto se proyecta con una lógica espacial y arquitectónica destinada a resolver una relación abierta, interactiva, con cada uno de estos ámbitos urbanos y lo hace generando amplios espacios públicos en su periferia exterior y en el interior del complejo. Este planteamiento está vinculado a una excelente orientación y exposición al medio que, asociada a las dinámicas de intercambio con los espacios libres, constituye en el complejo de CNNMM una enorme oportunidad para la eficiencia de primer escalón sustentada en el aprovechamiento bioclimático y la reducción de la demanda.

El conjunto fue proyectado por Secundino Zuazo con los criterios espaciales, constructivos y estructurales más avanzados de su época. Condicionado desde su origen por tener que integrar varios Ministerios, Direcciones, Departamentos y Áreas de la Administración del Estado, la arquitectura del edificio se plantea desde la independencia de la estructura y los paramentos, la flexibilidad espacial, la iluminación natural y la ventilación en todas las zonas de trabajo. La arquitectura potencia la relación entre los amplios espacios interiores y varias categorías de espacios exteriores: patinillos, patios, galerías y jardines.

Los accesos monumentales a cada Ministerio están asociados a espacios singulares, auditorios, salones, salas, y ámbitos representativos. Los núcleos verticales de escaleras y ascensores articulan el transito vertical y horizontal, ubicados en los ángulos de cada planta en torno a un patio, asociados a núcleos de servicio.

Las zonas de trabajo, que ocupan un 60% de la superficie del edificio y son los grandes espacios transformables y adaptables del mismo, están en una situación privilegiada, en la zona central de cada crujía, con doble orientación y un magnífico potencial de iluminación y ventilación. La estructura proyectada por Eduardo Torroja, es ligera, lineal y modular. No condiciona, ni está vinculada en su función a la distribución interior. La falta de programas individuales para el desarrollo espacial de los diversos edificios ministeriales llevó a Zuazo a crear una estructura de distribución espacial que pudiera ser aplicada de manera generalizada para facilitar el correcto desarrollo de diversas funciones en el futuro.. La flexibilidad de los espacios de trabajo late, por tanto, en el planteamiento original del edificio.

A lo largo de sus 90 años de uso del complejo de NNMM, cada uno de los organismos que han ocupado distintas zonas del conjunto, ha ido transformando y adecuando los espacios de trabajo a sus programas particulares y según las distribuciones específicas que han ido planteándose para los distintos departamentos ministeriales. Lo mismo ha ido sucediendo con la transformación de los sistemas técnicos en cada Ministerio, de este modo el suministro de combustibles, la generación de frío y calor, la distribución de energía y fluidos, la ventilación, la iluminación, la climatización de los espacios, la gestión y el control de los sistemas, el aislamiento térmico y el control de la radiación y la luz en la envolvente, el control de la calidad del aire interior, han ido resolviéndose en cada caso con soluciones particulares, que han acompañado a criterios individuales y distintos para la realización de obras e instalaciones en los espacios interiores, patios interiores y cubiertas de cada Ministerio.

Este proceso no se ha realizado según directrices de orden general sobre la transformación espacial y su vinculación a la actualización de los sistemas generales que determinan la eficiencia del edificio: envolvente, aire, luz, climatización, distribución de energía, almacenamiento de energía, generación, control; y por ello la perdida de eficiencia y la generación de desorden han sido constantes a lo largo del tiempo. Este es el escenario de una importante oportunidad para la eficiencia del complejo de NNMM en conjunto para fundamentar la de cada Ministerio en particular.

El Complejo de los Nuevos Ministerios, CNNMM, fue concebido como un hito muy relevante en la modernización de la Administración del Estado y en el crecimiento urbano de la ciudad de Madrid. Tal como se testimonia en la Figura 5-1, para el Estado, la obra, además de afianzar la capitalidad política de Madrid, suponía la organización moderna de sus servicios, un nuevo concepto del edificio público y,

además, por el agrupamiento, el establecer aquellos servicios comunes que permitían un funcionamiento más eficaz y económico.



Madrid, 2 de enero de 1933 — LUZ — Pág. 5

TAREA DE LA REPUBLICA PARA 1933 EN MADRID

Nuevos edificios para Agricultura, Gobernación, Obras Públicas y Dirección General de Seguridad

Con la instauración de la República comenzó para Madrid una era venturosa; ya no es una quimera la trasformación de la capital, ni su conversión en una ciudad moderna. Lo atestiguan la concesión de la subvención por capitalidad y la creación de los Comités de enlace ferroviario y de accesos y extrarradio, cuya constitución va encaminada única y exclusivamente a dotar dada de la preparación de los proyectos de edificación de ministerios, es la obra de orientación sobre la ciudad; complementa el acuerdo de las Cortes de concesión de una subvención por capitalidad y también, naturalmente, la gestión que viene realizando en pro de Madrid el actual Ayuntamiento.

Esta obra, encomendada al Comité de accesos y extrarradio, tiene, inicialmente la zona contendrá, además del nuevo hipódromo, terrenos para deportes, cuya instalación es allí prevista.

La grave congestión del tráfico actualmente sentida quedará resuelta derivando el tráfico de retorno, primeramente, desde la bifurcación de Aravaca, por la antigua vía de Castilla, que se pone en servicio abriendo el trozo comprendido dentro de

VISTA DE CONJUNTO DE LOS PROYECTADOS EDIFICIOS OFICIALES Y DE LAS GRANDES PLAZAS DEL PUEBLO Y DE LA REPUBLICA; EN PRIMER TERMINO, A LA DERECHA, EL PASEO DE LA CASTELLANA, PROLONGADO (Fotos Archivo LUZ.)

Una idea del nuevo Madrid.–Partiendo de una nueva idea de España

Don Angel Ossorio encontró en el libro de D. Manuel Azaña "Plumas y palabras", y denunció alarmado, la siguiente frase: "... el alma de déspota constructor que yo llevo conmigo". Al Sr. Ossorio le alarmaba lo de déspota, pero lo de constructor no llegó a ponderarlo bien. La frase viene en un ensayo sobre Madrid, y lo que Azaña pensaba construir era un Madrid distinto del que hemos encontrado los hombres de nuestra generación. No ha hecho falta llegar al ejercicio del despotismo —ilustrado—para organizar aquel viejo sueño del Ateneo. La República, guiada por mano firme, renovará el viejo Madrid. He aquí cómo hablaba en aquella época de estudio el actual presidente del Consejo de ministros:

Mi existencia callejera ha trascurrido entre la aparición de las primeras fachadas "modernistas" en la calle Mayor y la terminación de la Casa de Correos, con la apertura de la Gran Vía a manera de episodio; infortunada época de perverso gusto, que conoce los albores del modernismo y concluye, por hoy, con el triunfo del "estilo español del siglo XVII". Corresponde a la época que en lo grotesco teatral empieza a aparecer la cupletista francesa en los tablados de Actualidades y del Alhambra, y acaba en la entronización de la Maja castiza de Goya, artículo exportable, en el que ya no somos tributarios del extranjero. Esa "reintegración del gusto nacional en lo decorativo" corresponde, por otro lado, a un movimiento de ideas que va desde la desolada abjuración de lo español hace

Al atravesar por esas calles, el paseante se aflige. Tantos pináculos, columnillas y voladizos, tantas líneas rotas, tantos insultos a las leyes de la proporción, tamaña arbitrariedad, tal violencia, mantienen el ánimo en susto perpetuo y nos hacen saludar con alegría cualquier caserón trivial de la calle del Sacramento, que al menos no pretende torturar nuestro gusto sometiéndolo a un canon indemostrable. Madrid, en vías de trasformarse, es la capital del abandono, de la improvisación, de la incongruencia; el pasante sería feliz si viese los comienzos de una era de moderación, en que el sentido crítico, por recobrar su imperio, refrenase los ímpetus del genio frustrado y la audacia de los falsificadores, a caza de ricos nuevos.

Madrid está sin hacer porque lo hemos pensado poco. Madrid crece en libertad, como zarza al borde de un camino. Si pensásemos más en él, Madrid sería una proyección de nuestro espíritu; a fuerza de explicarnos Madrid unos y otros, acabaríamos por crearlo. Lo contrario sucede hoy; cuantos aceptan el Madrid carreteril y polvoriento que la espontaneidad desenfrenada va formando y pretenden extraer de la pobreza triste de lo pintoresco madrileño un valor duradero, se encierran, con abnegación poco envidiable, en una perspectiva no más amplia que el horizonte de la calle de Tudescos y llevan a su espíritu, por todo fermento, un puñado de broza municipal. El apetito de una mente activa es sobreponerse al medio que la rodea, y trasformarlo, adaptándolo a su norma. Mi ambición, es claro, no llega a tanto: la indolencia me retiene, y el alma de déspota constructor que llevo dentro, dormita. Pero si yo pudiese derribar Madrid (sin exceptuar la fachada del Hospicio, ¡qué diablo!), y, cediendo al insinuante Tentador, me comprometiese a reedificarlo en tres días, no iba a formarlo a imagen y semejanza de un concejal. Sin ofensa de nadie, el alma de un concejal es el último arquetipo a que uno quisiera acudir. La mente crea, por decirlo así, la realidad, y el concejal es un *ser* increado que se inserta en ella sin que nadie le llame, y, por añadidura, la administra.

Figura 5-1. Objetivos Históricos de la Construcción del Complejo de Nuevos Ministerios. Fuente: Biblioteca Nacional

En 2023 el CNNMM, es un conjunto de edificios ministeriales de la Administración General del Estado, AGE, que constituye una entidad urbanística única de 12 hectáreas de extensión de las que aproximadamente 4 hectáreas son la huella construida de 250.000 m2 de espacios de trabajo y 8 hectáreas son espacios libres (Figura 5-2).

A lo largo de los últimos 75 años el complejo ha estado dividido en distintas unidades de gestión que correspondían a los órganos de la administración que lo ocupaban. Hoy son 3 las unidades de gestión, que son el Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, MITECO, el Ministerio de Transportes y Movilidad Sostenible, MITMA, y el Ministerio de Trabajo y Economía Social, MITES. Cada uno de ellos es una unidad de gestión independiente y esta división afecta tanto a la operativa de cada uno como a la ejecución de obras e instalaciones para la adecuación por transformación de los edificios como a la gestión de los recursos, incluyendo los energéticos. El resultado es un repertorio de soluciones arquitectónicas, espaciales y técnicas desconectadas, la gestión individual y fragmentada de la operación y el mantenimiento en cada Ministerio y la restricción de la gestión de los ámbitos comunes de los tres ministerios a la de los espacios de

aparcamiento que cubren el 75 % de la superficie libre, las redes de saneamiento y los accesos.

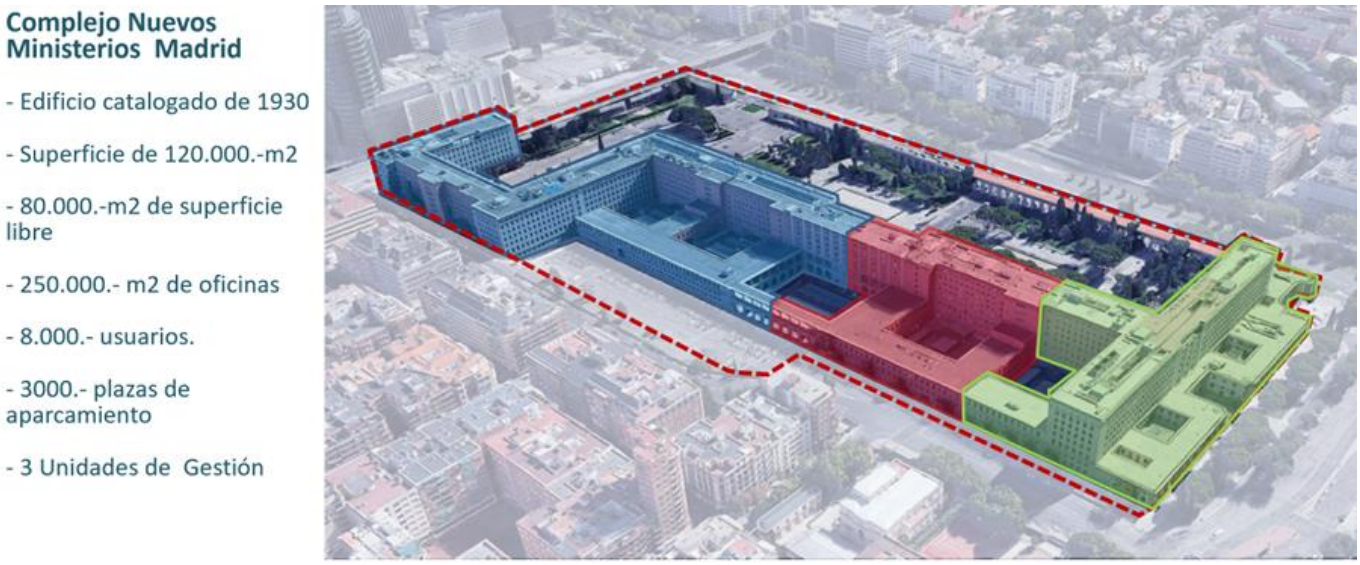


Figura 5-2. Componentes de complejo de Nuevos Ministerios.
Fuente: Instituto Europeo de Innovación

En el año 2021 el impulso del Plan de Recuperación Transición y Resiliencia, estrategia española para canalizar los fondos NEXT destinados por Europa a reparar los daños provocados por la crisis del COVID-19, hace que se plantee una intervención sobre el CNNMM que retoma el impulso renovador que instrumentalizó la concepción del complejo en los años 30', y lo proyecta hacia los objetivos de desarrollo sostenible, y los múltiples beneficios, sociales, ambientales y económicos que aporta la eficiencia.

El trabajo de estudio realizado en el CNNMM en paralelo a la investigación de esta tesis doctoral integra todos los componentes identificados, analizados y expuestos en los capítulos anteriores. Las múltiples dimensiones abordadas de la auditoría de las componentes individuales y colectivas del complejo (Figura 5-2) y las propuestas de actuación a todas las escalas integradas bajo la estructura lógica de una red de energía de bajo grado dotada de los recursos de operación y gestión. Todo ello permite presentar este caso como un modelo de ecosistema urbano de energía de bajo grado y vinculaciones simbióticas.

En el año 2021 el trabajo de Nuevos Ministerios se abordó sobre dos escalas de actuación:

- La Auditoría Energética de los Ministerios que, como entidades independientes, se integran dentro del CNNMM y, a partir de ella, la elaboración de directrices para la mejora de la Eficiencia, el aumento de las prestaciones y la calidad

ambiental y la reducción de los consumos y los impactos de las partes del edificio que gestiona cada Ministerio, considerando la proyección de las propuestas preliminares de actuación al Ciclo de Vida del edificio a través de su capacidad de operación, mantenimiento y transformación eficientes.

- El estudio de las oportunidades de mejora de la eficiencia y transferencia energética a escala de distrito en todo el CNNMM, 12 ha, y la propuesta de integración de las soluciones y estrategias arquitectónicas para la implantación de un ECO-DISTRITO energético, a través de actuaciones transversales a todo el Complejo.

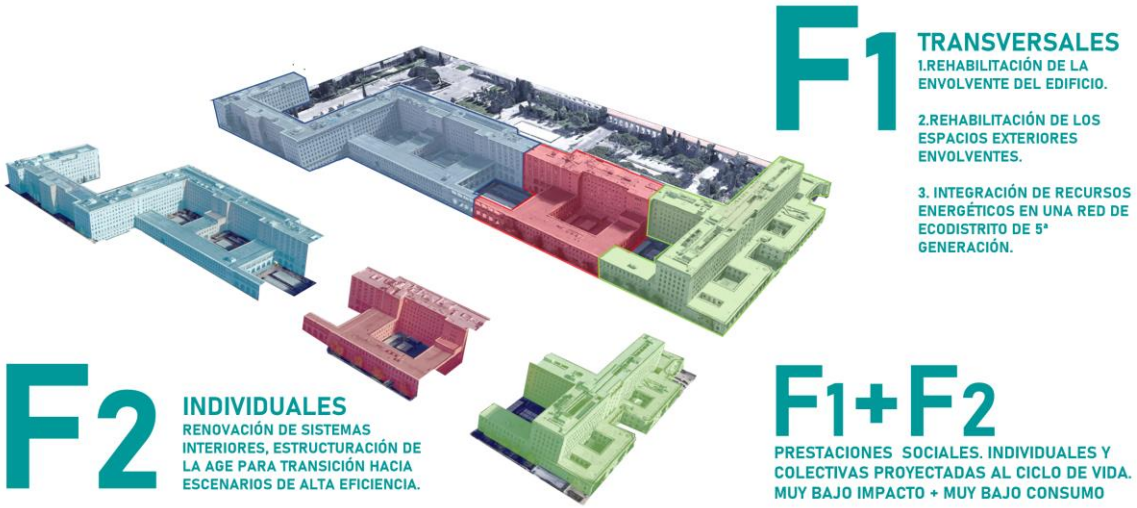


Figura 5-3. Actuaciones individuales y transversales para el ecodistrito de Nuevos Ministerios. Fuente: Instituto Europeo de Innovación.

Es un poderoso y complejo instrumento para la prestación de los servicios de la administración General del Estado, que ha experimentado, desde hace 70 años numerosas transformaciones parciales y la implementación y reforma de sistemas y recursos, humanos y técnicos, para poder mantener un grado aceptable de eficiencia operativa. No obstante, los responsables del complejo son plenamente conscientes de la necesidad de abordar el estudio de transformaciones y mejoras más profundas, que, en primera instancia, se sustentan en la ineludible necesidad de realizar transformaciones en el edificio para la eficiencia energética, ambiental y operativa.

5.1.2. Objeto

Planteamos que este trabajo sobre el CNNMM sea el modelo integrado de aplicación para el aprovechamiento de la energía de bajo grado de las

infraestructuras subterráneas porque en él se abordan por un lado, la Auditoría y Propuestas para la Eficiencia individual en las sedes de los tres ministerios integrados en el complejo, trabajo orientado a la rehabilitación según los criterios expuestos en esta tesis y que resuelve la transformación de los sistemas energéticos de cada edificio para hacerlo apto al uso de energía de bajo grado. Por otro lado se aborda el estudio de la viabilidad de la implantación de un Eco-Distrito Energético, vinculando todos los recursos renovables: geotermia y aerotermia y fotovoltaica; y recursos residuales recuperados de infraestructuras subterráneas de saneamiento y geoestructuras energéticas integradas en los aparcamientos subterráneos, con los tres edificios en su papel de prosumidores, sobre una red de distrito de 5ª generación (5GDHC).

- La auditoría, está enfocada a realizar las acciones de estudio de cada edificio como sistema complejo que permitan caracterizar su comportamiento, prestaciones, consumos e impactos y evaluar y plantear directrices preliminares en todos los ámbitos de influencia para actuaciones para de mejora de la calidad ambiental y la salubridad de los ámbitos de actividad y trabajo, la eficiencia integral de los sistemas energéticos e hídrico y las estrategias para una operación y mantenimiento eficientes.
- El estudio de la viabilidad para la implantación de un Eco-Distrito Energético, valora todas las oportunidades de mejora de la eficiencia y de la transferencia energética a escala general de todos los ámbitos del CNNMM y la propuesta de integración de las soluciones y estrategias arquitectónicas para su implantación, a través de actuaciones transversales a todo el Complejo.

El objetivo general se encuadra en las componentes del PRTR que se refieren a la mejora de la eficiencia energética en los edificios de la AGE, la incorporación de energía de fuentes renovables y la transformación de la movilidad según modelos sostenibles.

El trabajo desarrolló a nivel preliminar, pero de manera concluyente el estudio de todos los aspectos que van a ser evaluados para determinar la elegibilidad de las actuaciones en el marco de financiación del PRTR y el nivel de impacto positivo que suponen en el edificio.

Estudio se realizó utilizando herramientas de modelización y simulación tanto de la realidad reconstruida y modelizada del edificio en su estado actual como de las propuestas de actuación y mejora, consideradas individualmente y también como

un sistema integrado y dotado de capacidad de gestión respuesta, autorregulación y evolución.

Las directrices de actuación que emanan de este trabajo sustentan dos aspectos importantes:

- Que las directrices de intervención en el edificio para la eficiencia energética preparen las sedes ministeriales para la implementación de otras componentes de mejora técnica, humana y metodológica en sus recursos de trabajo.
- Que los principios directores que emanan de esta propuesta permitan desarrollar propuestas para la gestión integrada del complejo de Nuevos Ministerios a través de acuerdos entre los ministerios que ocupan el edificio y que podrían constituir una Comunidad Virtual de Gestión de aspectos importantes contemplados en el PRTR como son la movilidad sostenible, la eficiencia y la reducción del impacto, la producción renovable a escala de distrito y la integración de recursos digitales de gestión. Siempre considerando el equilibrio entre el ámbito independiente de decisión y gestión de cada Ministerio y el potencial de eficiencia de la gestión colegiada de recursos comunes.

5.1.3. Alcance

En el proceso de auditoría se ha construido un modelo dinámico del edificio, integrando toda la información recogida, y se ha realizado un proceso de estudio sustentado en sucesivas simulaciones de su comportamiento que ha permitido evaluar y generar escenarios equilibrados de su comportamiento, grado de salubridad, confort, consumo energético su impacto.

En el proceso del estudio de la viabilidad de la implantación de un Eco-Distrito Energético se identifican y resuelven las oportunidades de mejora asociadas a la interacción entre los tres ministerios y se definen las estrategias para la eficiencia a una escala superior mediante actuaciones transversales que aportaran un grado complementario de eficiencia a cada una de las actuaciones individuales derivadas de cada una de las auditorias y propuestas de mejora.

El alcance del estudio y las propuestas que vamos a exponer comprende, en primer lugar, un resumen sintético de los resultados de la auditoría y el estudio del estado actual de las sedes de los tres ministerios, y en segundo lugar, se presentan los aspectos más relevantes para el análisis y el diseño de las medidas sobre la envolvente, las instalaciones, la captación de fuentes de energía renovables, y la

remodelación de espacios y usos, desarrollándose también los aspectos más destacados a tener en cuenta durante la ejecución y el control operativo del mismo.

El alcance del trabajo de Auditoría comprende todas las acciones necesarias para:

1. La caracterización a nivel preliminar pero completa, del edificio: su dimensión física, espacial y constructiva y las dinámicas de flujos e intercambios que, integrados, determinan el balance entre las prestaciones que ofrece a sus usuarios, calidad y salubridad del ambiente interior, y el impacto que genera sobre el medio en términos de afección a la salud humana, consumo de recursos, energía agua y materiales, y contribución al cambio climático.

Las acciones realizadas para la caracterización del edificio son:

- Recogida de información histórica sobre el origen y construcción del edificio: publicaciones, videos, fotografías, planos históricos y consulta a expertos.
- Estudio de los antecedentes sobre el emplazamiento y su entorno.
- Concepción y evolución del proyecto arquitectónico del complejo de Nuevos Ministerios. Componentes estructurales, constructivas, operativas, funcionales y espaciales.
- Determinantes para la intervención vinculadas al edificio proyectado por el Arquitecto Secundino Zuazo y por el Ingeniero Eduardo Torroja.
- Estudio del proceso de construcción del edificio.
- Estudio de las condiciones urbanísticas para la intervención en el edificio. Protección urbanística y elementos protegidos. Instrumentos urbanísticos para la intervención.
- Recogida y sistematización de la información proporcionada por el cliente.
- Planos de distribución del estado actual.
- Planos parciales de instalaciones.
- Información sobre el régimen de uso del edificio, la carga de uso, el flujo de personas, las estructuras de trabajo. Complementada con la información sobre la estructura organizativa y la estructura de personal recogida en el portal de transparencia del ministerio.
- Facturas correspondientes al consumo de recursos primarios, energía eléctrica, gasóleo, agua.

- Información general la información sobre los sistemas del edificio y el régimen de operación y mantenimiento.
- Apoyo en el proceso de toma de datos.
- Recogida de información y datos en el edificio.
- Implantación. Se han estudiado las condiciones y dotaciones del entorno urbano del edificio, las de los espacios adyacentes dentro del CNNMM y las de los espacios interiores de la parte del edificio que ocupa. Se ha evaluado el potencial del terreno y las infraestructuras urbanas en el área de influencia del edificio.
- Envolvente. Se ha realizado una toma de datos sobre la envolvente cerramientos y huecos de fachadas exteriores y fachadas a patios y patinillos interiores, cubiertas y forjados exteriores. Mediante fotografías, levantamientos, ensayos y estudios termográficos, ensayos y estudios de estanqueidad e infiltración, se ha reconstruido a nivel preliminar la realidad construida del edificio para evaluar las capacidades de la envolvente del edificio en su estado actual:
    - Aislamiento.
    - Inercia
    - Intercambio de aire
    - Control de la radiación solar
    - Control de la iluminación natural
    - Control del ruido
    - Espacio envolvente exterior
    - Espacio envolvente interior
- Espacio interior y estructura. En este edificio, proyectado en 1930, el sistema estructural y su trama tridimensional, determinan la estructura geométrica sobre la que se construyen (con independencia) los cerramientos exteriores y el sistema interior original de compartimentación, distribución y circulaciones horizontales y verticales. Tanto las fachadas como los muros interiores que integran el entramado estructural están formados por doble hoja de fábrica y cámaras que alojan la estructura vertical, metálica e independiente de los cerramientos. Estas cámaras de aire están cerradas a la altura de cada forjado por las vigas metálicas que soportan los forjados sobre los ejes del entramado de los pilares. Las vigas perpendiculares a fachada completan el entramado de estructura horizontal, que descuelga aproximadamente 40 cm bajo los forjados

y quedan embebidas en algunos casos en la tabiquería que subdivide las crujías exteriores y en otros casos quedan aparentes descolgando sobre los espacios interiores. En cualquier caso, el descuelgue de las vigas metálicas de la estructura horizontal, compartimenta el espacio y condiciona el trazado de las redes de distribución de los sistemas técnicos, particularmente en las áreas destinadas a zonas de trabajo.

- Integración de sistemas técnicos, distribución y estructura. La implementación de sistemas técnicos, generación centralizada, distribución y emisión, con los sistemas estructurales y de distribución del espacio interior se ha realizado, a lo largo de los últimos 60 años, de manera muy desigual en las envolventes, distribuciones, techos y suelos del edificio. Se han estudiado los patios, las cámaras, los falsos techos, los forjados, y las salas y cuartos técnicos, centralizados y distribuidos.
- Sistemas técnicos. Se han estudiado y documentado los componentes y el grado de eficiencia de los sistemas fundamentales que transforman, transportan y distribuyen dentro del edificio, energía eléctrica, energía térmica, luz aire y agua. Se trata de las redes de distribución eléctrica y de los sistemas de iluminación, climatización, renovación y tratamiento del aire.

Se ha realizado un análisis completo de cada sistema identificando y caracterizando sus componentes, su estado y su rendimiento:

- Los emisores e intercambiadores de calor originales.
- Los sistemas independientes e individuales de calo/frío, agregados a lo largo del tiempo para cubrir necesidades individuales.
- Las redes de distribución de energía, aire y fluidos.
- Los equipos de producción de calor y frío,
- Los equipos que extraen impulsan filtran y atemperan aire.
- Los sistemas de control y gestión que permiten el funcionamiento variable y eficiente de los sistemas en los distintos escenarios de uso, en distintas zonas del edificio y en condiciones climatológicas variables.

2. La modelización del edificio en su estado actual: como sistema energético integrado y simulación y obtención de parámetros de confort, consumo e impacto.

Toda la información resultante de la toma de datos y los estudios y evaluaciones de partida del edificio en el estado actual se ha utilizado para construir un modelo

sistémico e integrado sobre la aplicación EnergyPlus, que nos ha permitido simular el comportamiento del edificio en su estado actual en todos los aspectos fundamentales:

- Interacción bioclimática con el entorno:
  - Efectos del clima, mesoclima y microclima.
  - Intercambio de aire.
  - Iluminación natural.
  - Radiación solar.
  - Flujo térmico.
- Condiciones del espacio interior:
  - Térmicas.
  - Higrotérmicas.
  - Iluminación natural y artificial.
  - Calidad del aire.
  - Confort y salubridad en el espacio interior.
- Demanda energética.
- Estructura y discriminación de la demanda energética.
- Funcionamiento y rendimiento de los sistemas energéticos del edificio.
- Cobertura de la demanda.
- Consumos, cuantificación y caracterización de los perfiles de consumo y coherencia con los datos y facturas de los distintos consumos primarios.
- Datos de consumo energético diferenciados para los distintos ámbitos de uso (kWh/m² año).
- Datos de consumo promediados (kWh/m² año).
- Impacto sobre el cambio climático. Emisiones de CO_2.

A partir del modelo creado en DesignBuilder y mediante el motor de simulación EnergyPlus, un proceso iterativo de simulación del comportamiento del edificio permite a un equipo multidisciplinar evaluar, como paso previo a la elaboración de directrices para la mejora:

a) El rendimiento de los sistemas energéticos actuales y la interacción entre los tres ministerios

Se ha estudiado el estado de los componentes de cada uno de los sistemas de las instalaciones térmicas del edificio: equipos de generación, redes de distribución, emisores, medición y control, para caracterizarlos dentro del modelo integrado, con sus parámetros de rendimiento real, y en el proceso de simulación.

Se han estudiado las dinámicas de funcionamiento de los sistemas de las distintas zonas en las que se ha estructurado el edificio para su estudio:

- Zonas de acceso y circulación. Accesos y vestíbulos, pasillos, escaleras y núcleos verticales, distribuidores.
- Zonas especiales:
    - Auditorio y Sala de Proyecciones.
    - Salas de reuniones.
    - Salón de Actos.
    - Vestíbulo principal monumental.
    - Archivos.
    - Centro de Proceso de Datos.
    - Salas de Máquinas.
- Zonas de trabajo y zonas de servicios asociadas a las zonas de trabajo y circulación.
- Espacios abiertos y patios interiores vinculados.

También han sido objeto de estudio preliminar, el ámbito de escala superior y conjunta en el que se encuentra el potencial de interacción e intercambio entre los edificios y ocupantes del CNNMM y la identificación de las áreas de mejora vinculadas al potencial de interactuación y gestión coordinada entre los tres Ministerios.

Extender el Alcance del trabajo a esta escala nos permite proponer una transformación que no comprometa una futura actuación integral y conjunta sobre la totalidad del CNNMM, una reserva de eficiencia para el conjunto, pendiente de explotar y que afecta a áreas relevantes como la mejora de la envolvente y los espacios libres, las mejoras en movilidad, el aprovechamiento conjunto del potencial de incorporación de energía de fuentes renovables, la generación de

distrito y la gestión bajo formatos de comunidad energética. En todos los casos preservando el equilibrio entre los sistemas individuales de cada Ministerio y su ámbito de gestión y decisión y los sistemas colectivos.

La auditoría ha tenido un alcance integral y sistémico sobre las componentes principales del Complejo su resultado pone en evidencia:

- Las carencias que se dan en el Complejo de NNMM al respecto de condiciones básicas de salubridad y confort en relación a la calidad del aire interior la iluminación y las condiciones térmicas.
- La falta de calidad en la envolvente, relativa al control solar, el aislamiento, las infiltraciones no controladas de aire.
- Las carencias y el bajo rendimiento de los sistemas técnicos, generación, redes y emisores, de climatización.
- La generación abundante de residuos energéticos no recuperados.
- La carencia de sistemas de control integrado que permitan implementar estrategias de gestión para la eficiencia.
- El alto impacto que genera la utilización de recursos primarios en el edificio.
- La multiplicación de sistemas individuales de apoyo al margen de un planteamiento general de control integrado.
- El potencial no aprovechado de incorporación de recursos energéticos de bajo grado abundantes en el medio, bioclimáticos, recuperados y procedentes de fuentes renovables.

Emergen en el proceso de auditoría importantes oportunidades de mejora en todas las áreas reseñadas, y atendiendo a aspectos muy relevantes también para la mejora y transformación de los espacios de trabajo se plantean directrices y propuestas de actuación que, preservando todos los valores patrimoniales del edificio y recuperando el potencial de flexibilidad que forma parte de su concepción original, plantean la rehabilitación de los espacios de trabajo y potencian el rendimiento de los recursos humanos y técnicos en los que se sustenta la actividad de los tres ministerios.

Como resultado de la modelización y simulación de las directrices de actuación, se verifica la posibilidad de tener en el edificio niveles óptimos de salubridad, calidad ambiental y confort, y se prevén reducciones de demanda, consumo, y emisiones e impacto por encima del 60 %.

Directrices y propuestas de mejora

La identificación de directrices para el aumento de la eficiencia energética y la propuesta de actuaciones de mejora forman parte de un proceso iterativo que arranca con las primeras conclusiones de la toma de datos y se alimenta con el avance en la definición del modelo completo del edificio y las simulaciones progresivas de su comportamiento que sirvan como enlace para las propuestas.

A nivel de cada edificio:

- Priorizando las intervenciones sobre la envolvente, en la que se resuelven las oportunidades fundamentales, en términos cuantitativos y cualitativos, para la reducción de la demanda y la calidad, higrotérmica, del aire, de la luz y la ergonomía del espacio interior del edificio.
- Los sistemas de intercambio de calor, absorción para la refrigeración y transmisión para la calefacción, con especial atención a la calidad de la interacción termodinámica con los usuarios y a la moderación del régimen de intensidad térmica de los sistemas y la amplitud térmica de los fluidos caloportadores, incidiendo en sistemas con energía de bajo grado temperaturas moderadas, velocidad moderada y presión moderada.
- Este criterio aproxima técnicamente el edificio al aprovechamiento del potencial bioclimático y la integración de recursos renovables de muy bajo costo, a la lógica natural del intercambio térmico con los usuarios, al equilibrio y optimo rendimiento de los sistemas de generación térmica y a la flexibilidad y amplitud operativa que sustenta la capacidad de respuesta eficiente de todo el sistema en condiciones de cambio.
- Las redes de distribución de energía. El sistema de distribución constituye un sistema clave para la eficiencia, su trazado, naturaleza constructiva y rendimiento, depende de su correcta integración en la estructura física del edificio, de la intensidad térmica, velocidad y presión de los fluidos caloportadores y de la estructura de puntos de control y regulación del flujo. La reestructuración de las redes de distribución es un área fundamental para la mejora de la eficiencia de los sistemas, y su implementación física implica una reintegración con los sistemas de patios, zonas de servicio, áreas técnicas descentralizadas, espacios reservados a redes en zonas de trabajo y con la envolvente del edificio.
- Los sistemas de almacenamiento de energía, centralizados y distribuidos, que permiten la implementación de estrategias, diferidas en el tiempo, de gestión

para la incorporación al sistema de energías de fuentes bioclimáticas, aprovechamiento de la amplitud térmica diaria y estacional, recuperación de calor de infraestructuras caloportadoras, incorporación energía recuperada en los sistemas del edificio y energías procedente de fuentes renovables.

- Los sistemas que transforman los recursos energéticos primarios en recursos térmicos, los que recuperan energía residual y los que generan movimiento de fluidos. Tecnologías de generación para la refrigeración, la calefacción y el calentamiento de agua sanitaria. La componente tecnológica se caracteriza, cuantitativamente –potencia, capacidad, intensidad– y cualitativamente –naturaleza energética, régimen operativo– a partir del resultado de obtenido, aguas arriba, en las actuaciones sobre la envolvente, el aire, la luz, los sistemas de climatización, las redes de distribución y el almacenamiento, y está muy vinculada, aguas abajo, con el combinado energético que alimenta el edificio, que integra fuentes primarias de energía, energía recuperada en los sistemas térmicos, energía procedente de fuentes renovables y residuales en el entorno y también con el sistema integrado de control y gestión.
- El sistema integrado de control y gestión del edificio sustenta sobre tecnología de información y telecomunicaciones, las estrategias de configuración variable, integra fuentes variables y comportamiento variable que permiten al edificio ajustarse a escenarios variables de clima, ocupación y uso, para resolver en todas las situaciones previsibles a través de estrategias programadas y en las imprevisibles a través de estrategias reactivas, la máxima eficiencia del edificio y el mínimo impacto sobre el medio y el ecosistema, sobre la salud humana y sobre el clima. Las propuestas que se ha realizado han sido simuladas según escenarios variables que afectan a la eficiencia térmica, lumínica, y de calidad del aire. Las estrategias de gestión y control forman parte de las propuestas de este trabajo y los parámetros que las definen forman parte de los modelos cuya simulación ha permitido cualificar y cuantificar la mejora de la eficiencia.

Complementariamente se ha estudiado la aptitud del edificio a las transformaciones que plantean el teletrabajo, la digitalización, el puesto de trabajo inteligente y las nuevas componentes del empleo público con el requerimiento de su flexibilidad ante futuras estrategias y configuraciones. La simulación se ha realizado sobre estos ámbitos arquitectónicos mejorados.

Los resultados de la simulación arrojan, en primera instancia, valores para los parámetros de mejora para cada actuación aislada y también se han integrado los

resultados del estudio de las distintas áreas, actuaciones y sistemas, en un único modelo integral del comportamiento del edificio.

A escala de distrito, actuaciones transversales de integración bajo el esquema de ecodistrito energético de 5ª generación:

- Rehabilitación de la Envolvente a escala común de los Ministerios.
- La rehabilitación de los espacios exteriores para la mejora microclimática y de la biodiversidad a través de la vegetación.
- Implementación de medidas para la movilidad sostenible vinculada a la rehabilitación de los espacios exteriores.
- Integración de una red común de los recursos procedentes de fuentes Energías renovables y residuales recuperadas, Red de Eco-Distrito de 5ª generación. Almacenamiento y gestión de energía de baja intensidad y temperatura moderada.
- Gestión integrada multiescala, implementación de un sistema de información y control y metodología de gestión integral.

Actuaciones para la Eficiencia Energética en el Complejo de NNMM. Un enfoque integral con beneficios múltiples

Las directrices de mejora plateadas a raíz de esta Auditoría Energética suponen una reducción significativa del impacto del edificio y del impacto de sus actividades, en las categorías fundamentales en las que se resumen y encuadran todos los indicadores y factores de impacto en el Ciclo de Vida, LCA:

- La Calidad de los Ecosistemas. En el caso de NNMM, el ecosistema antrópico urbano de NNMM.
- La Salud Humana. Incluyendo factores de ergonomía y confort determinantes del rendimiento intelectual de los usuarios y trabajadores del Complejo.
- El Cambio Climático. Las emisiones de gases de efecto invernadero, de otros gases contaminantes, de partículas, etc.
- El Consumo de Recursos. Energía y materiales.
- Factores dinámicos de prolongación del Ciclo de Vida. Como son la flexibilidad del Complejo, de los edificios y de sus sistemas para actualizarse, reconfigurarse y facilitar escenarios de reutilización.

Las directrices de actuación para la mejora de la Eficiencia Energética, que son el resultado de este trabajo, se formulan para garantizar en primera instancia que en el Complejo de NNMM se aseguren las prestaciones a las escalas humanas individual y social, con un enfoque orientado a la excelencia y superando las determinaciones de las normas y reglamentos vigentes y, en segunda instancia, logar los niveles mejores de eficiencia más allá del marco del cumplimiento normativo y siguiendo las directrices sistémicas y los objetivos de excelencia a los que apuntan las directrices de los Planes NEXT y PRTR. En este sentido, las Auditorías se realizan simulando el comportamiento de los edificios en su estado físico y técnico actual, pero considerando los mínimos normativos al respecto de las condiciones, térmicas, de calidad de aire y de calidad de la luz. Las Directrices de actuación extienden los objetivos al ámbito completo de oportunidad que identificamos como ámbito de influencia del Complejo de NNMM.

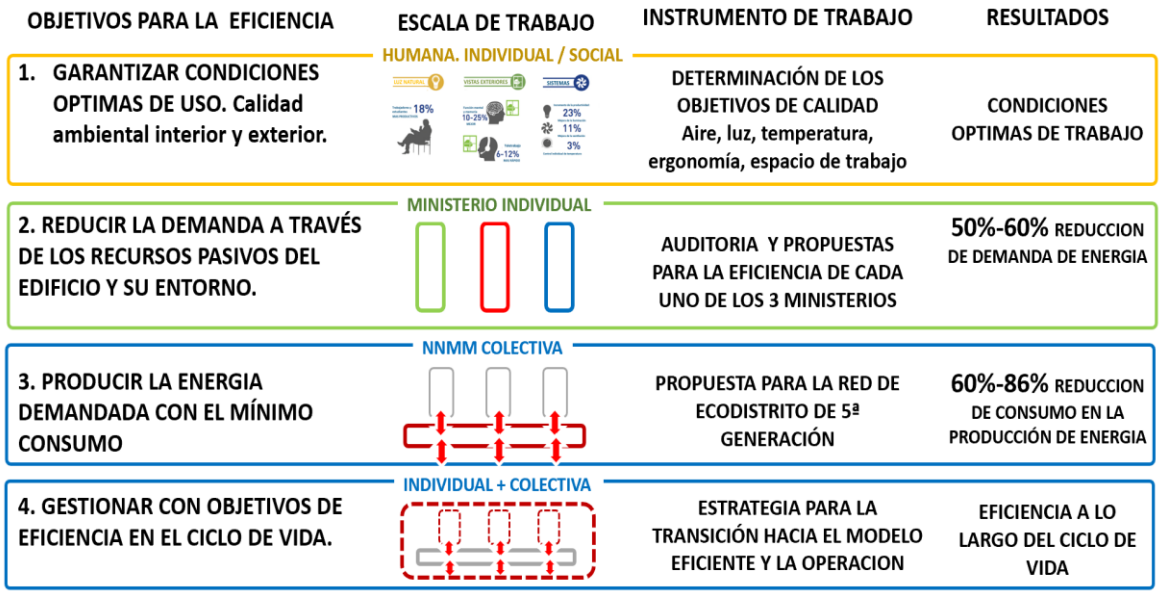


Figura 5-4. Objetivos para la eficiencia, escala de trabajo, instrumento de trabajo y resultados, en la actuación en el CNNMM
Fuente: Instituto Europeo de Innovación.

Para la mejora de la eficiencia en los edificios de la AGE y, en nuestro caso de NNMM, estas directrices, extraídas del PRTR, se formulan en términos de reducción de impacto, eficiencia energética, mejora del confort, mejora de la salud y del rendimiento de los usuarios del edificio, según modelos mejorados y recualificados para nuevas fórmulas de trabajo y teletrabajo y adecuados a los nuevos puestos de trabajo digitales, a lo largo del Ciclo de Vida del edificio. Es decir, se plantea una visión integral y transversal que se proyecta en términos de mejora más allá de la reducción del consumo de recursos primarios y la reducción

de emisiones, a todos los aspectos vinculados al consumo de recursos, impacto sobre el medio y mejora de prestaciones y capacidad de servicio.

La Figura 5-4 resume las distintas dimensiones en las que se resuelven los objetivos del trabajo, las escalas a las que se actúa en cada una, los instrumentos utilizados y los resultados obtenidos. Es la plasmación, sobre el ámbito de actuación, de los objetivos Macro y Micro de actuación, cuyo impacto monetizado, según los criterios establecidos por la Unión Europea [101] supera ampliamente el del coste correspondiente a la energía primaria no consumida:

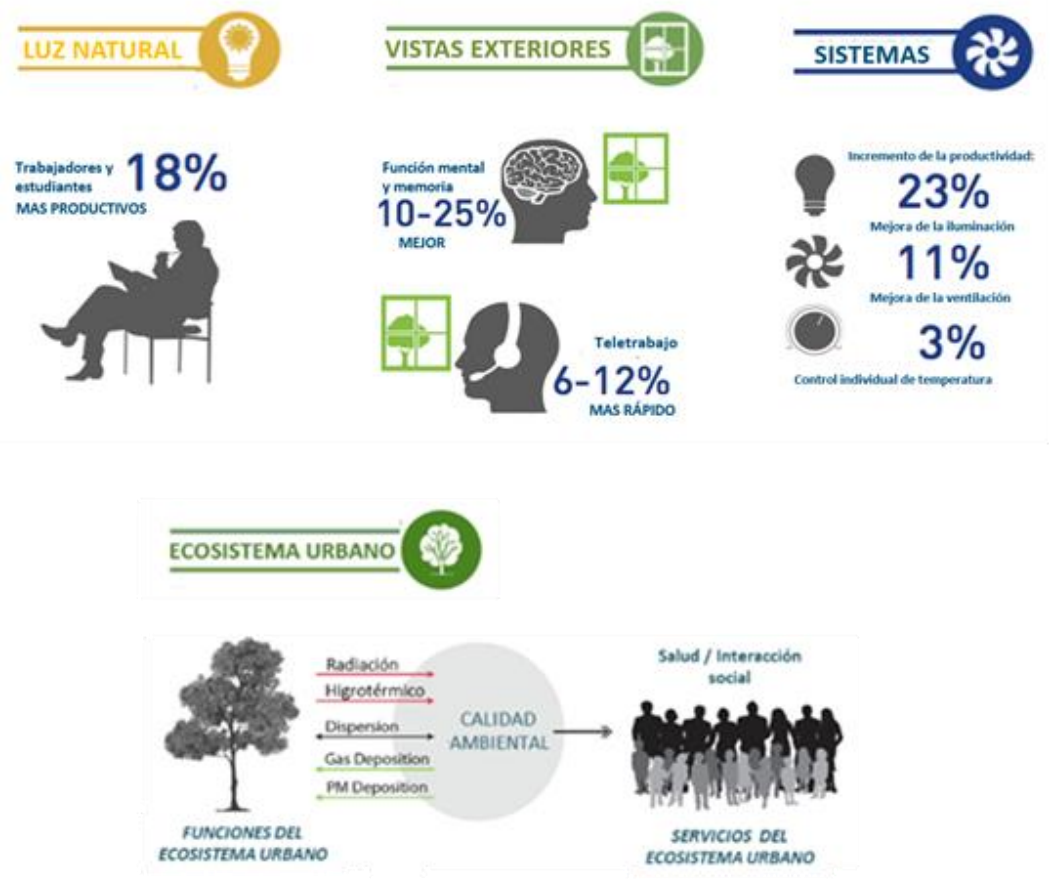


Figura 5-5. Factores de salubridad y bienestar en la actuación del CNNMM. Fuente: Instituto Europeo de Innovación.

- Se parte, en primer lugar, del objetivo de garantizar las condiciones óptimas de uso, calidad ambiental interior y exterior en el CNNMM. Se ha dado prioridad a resolver en los mejores términos posibles, los factores vinculados a la salud humana mejorando la calidad ambiental interior (calidad del aire, calidad lumínica, confort visual, confort termo-higrotérmico, ergonomía, etc.), tal como se ilustra en la Figura 5-5, y como consecuencia generando las condiciones de trabajo que potencien la atención y la concentración de los trabajadores, el

rendimiento intelectual, la reducción de las bajas por enfermedad y el absentismo laboral, la mejora de la creatividad, el incremento de la productividad, la reducción del riesgo sanitario, etc.

- En el mismo sentido la intervención en los espacios exteriores del Complejo, casi 8 hectáreas de las 12 ha totales de implantación, aporta mejoras muy relevantes al favorecer la biodiversidad y proporcionar numerosos servicios ecosistémicos, relacionados con la calidad de vida, la salud y el bienestar de los usuarios, incluyendo la regulación térmica y la disminución del efecto de isla de calor, la purificación del aire, o la disminución del impacto acústico, Figura 5-6. El aumento de los espacios públicos de reunión e interacción social a costa de los espacios dedicados a aparcamiento en NNMM, supone una apuesta por modelos de movilidad eléctrica descarbonizada, y la posibilidad de redescubrir la biodiversidad a través de la renaturalización, exactamente en la línea que señala la Orden TED/1018/2021 [102] para la concesión de subvenciones para fomentar actuaciones dirigidas a la renaturalización y resiliencia de ciudades españolas, en el marco del Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia.



Figura 5-6. Rehabilitación del espacio exterior para servicios ecosistémicos en el CNNMM.
Fuente: Instituto Europeo de Innovación.

- Así mismo, la propuesta de compactación de aparcamiento mediante el uso de un sistema de aparcamiento compacto mecánico es un aporte a la movilidad sostenible de la ciudad que permite la rehabilitación del espacio público y exterior para zonas verdes, reduce la huella de aparcamiento, facilita la transformación del espacio y la integración de recursos para una movilidad multimodal, eléctrica, sostenible y de bajo costo; facilita un sistema de recarga eléctrica estable, distribuido y eficiente y permite la integración de otros sistemas de energías renovables como la generación fotovoltaica, Figura 5-7.

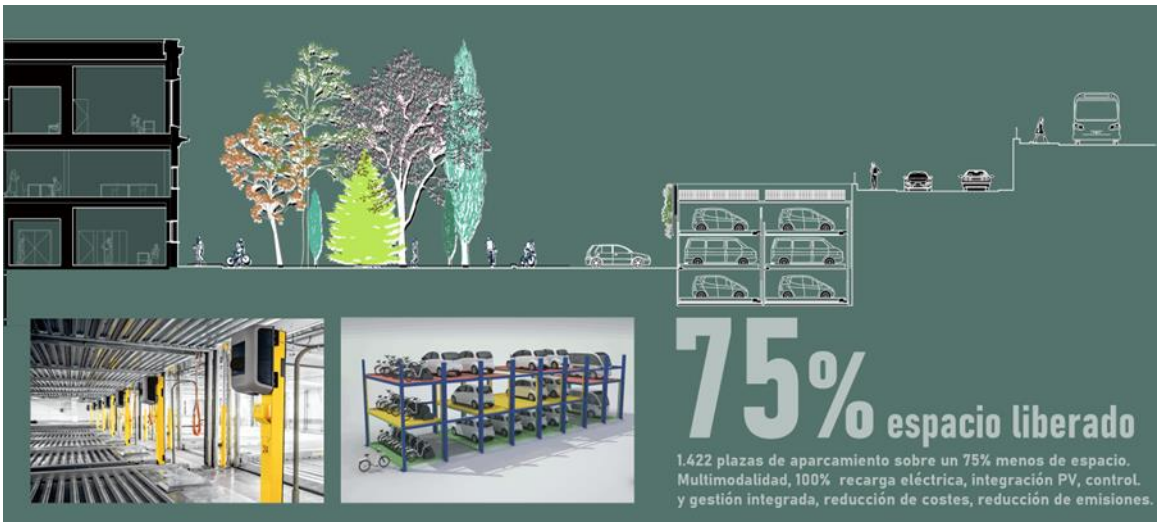


Figura 5-7. Compactación del espacio de aparcamiento y liberación de espacio libre en el CNNMM. Fuente: Instituto europeo de Innovación.

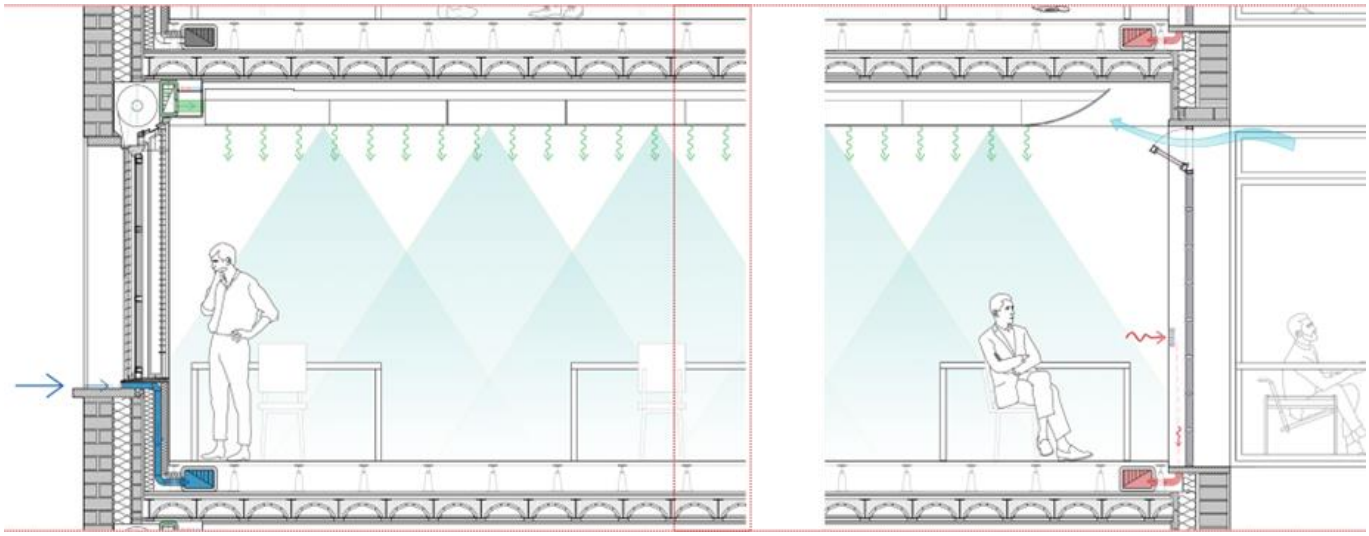


Figura 5-8. Rehabilitación integral de la envolvente, implementación de sistemas de calidad del aire, climatización de temperatura moderada e iluminación. Fuente: Instituto Europeo de Innovación.

En relación a la envolvente del edificio, además de las actuaciones de mejora del control de la radiación y de la luz natural, control de la ventilación, aislamiento y estanqueidad, hay una propuesta para la recuperación integral de los patios y patinillos interiores de los edificios del Complejo, sobre los que se plantean mejoras vinculadas a la desconexión progresiva de los sistemas de climatización de los sistemas exteriores actuales, torres de refrigeración, condensadoras, Unidades de Tratamiento del Aire (UTA) etc., y su reconexión a la red de distrito de 5ª generación (5GDHC red de frio y calor a temperatura moderada que integra los edificios, los recursos de almacenamiento y las fuentes de energía renovable) Figura 5-8. Esta actuación tiene un impacto positivo en términos de consumo y

reducción de las emisiones con impacto sobre el clima, haciendo uso de energía residuales limpias, minimizando el consumo de combustibles fósiles, disminuyendo las pérdidas de refrigerante y disminuyendo ruido y vibraciones en los espacios de trabajo y en los espacios de la envolvente exterior.

Adicionalmente este proceso incluye la progresiva eliminación de equipos y sistemas técnicos de las cubiertas y los patios, para conectar las redes y sistemas interiores con la red 5GDHC, permitiendo el tratamiento vegetal de azoteas, cubiertas, fachadas y espacios exteriores conectados con áreas de trabajo y actividad humana y liberados de la carga de los aparcamientos, equipos y maquinaria. Al hacerlo se mejora el comportamiento higrotérmico de las cubiertas, se reduce su calentamiento y minimizamos la reflexión de radiación desde las cubiertas bajas a las fachadas de los edificios altos.

Las directrices para la mejora de la eficiencia suponen reducciones muy importantes del consumo de recursos primarios (superiores al 60 % de reducción), limitando la potencia eléctrica a contratar (en los sistemas de frío) y el consumo eléctrico en general; y así mismo supone la reducción de consumos de agua para riego y la reconducción del agua de escorrentía y de drenaje a la recarga natural de los acuíferos.

También se plantean mejoras operativas y de seguridad, reduciendo el coste de mantenimiento de los equipos, eliminando la necesidad de adquirir y mantener equipos de producción propios, controlando los consumos, recuperando espacio hoy infrautilizado, adecuando al edificio para que se mantenga a lo largo del Ciclo de Vida en niveles de "última generación", con valor añadido, sin perder sus valores originales ni su protección patrimonial, y garantizando la seguridad y la continuidad de la operación en condiciones óptimas.

5.1.4. Simulación energética de la propuesta y evaluación de las mejoras y de las estrategias sugeridas.

Aplicando las estrategias de mejoras mencionadas con anterioridad al modelo base del edificio y realizando iteraciones de simulaciones para la comprobación y afinamiento de resultados, se puede estimar los ahorros generados en la demanda de energía térmica y la influencia en la reducción de los consumos finales energéticos.

Se presentan los resultados de las simulaciones de la siguiente forma:

- Reducción de la demanda. En primer lugar se analizan los resultados de aplicar estrategias de reducción de la demanda de energía de climatización (aislamiento, cambio de ventanas y perfiles, tratamiento de puentes térmicos, control solar en ventanas y lucernarios, regeneración de espacios verdes y terrazas ajardinadas).
- Eficiencia en la producción de energía. En segundo lugar, sobre los resultados obtenidos en la reducción de la demanda por aplicar las medidas de mejora en la envolvente del edificio, se aplican las mejoras en los sistemas de climatización, distribución, almacenamiento y generación de energía térmica (bombas de calor, tubería aislada correctamente, equipos finales eficientes tipo fancoils y vigas activas eficientes). Estas medidas se enfocan ya a l uso de recursos energéticos de bajo grado y apuntan hacia la posibilidad de su captación y distribución aplicando un modelo integrado de gestión soportado en una red de ecodistrito de 5ª generación.

De esta forma se presentan los resultados de tratar la envolvente y su efecto en la reducción de consumos (sin cambiar elementos de generación, distribución, emisión y combustible), y después los valores obtenidos una vez mejorados los sistemas y la envolvente.

5.1.4.1. Cálculo de la demanda de energía térmica

e) Aplicando directrices en la envolvente del edificio y zonas de influencia (espacios verdes) para reducir la demanda

La rehabilitación integral de la envolvente, en un escenario de distribución y criterios de climatización como los actuales, supone una reducción de la demanda de calefacción del **42 %**.

La rehabilitación integral de la envolvente y la implementación de estrategias de ventilación y free-cooling, en un escenario de distribución y criterios de climatización como los actuales, supone una reducción de la demanda de refrigeración del **48 %**.

El tratamiento integral de cubiertas y espacios exteriores, que supone un incremento de las superficies verdes y plantación de vegetación que influye directamente sobre el edificio puede generar una reducción adicional de la demanda de refrigeración de un **6 %**.

Si se considera que el cambio de distribución a espacios de trabajo abiertos supone incorporar y climatizar los espacios de circulación sobre una superficie climatizada que aumenta, se genera un incremento de la superficie climatizada y el consiguiente incremento de la demanda. Ello se debe al aumento del espacio útil de trabajo, al aumento del número de puestos de trabajo, que llevan aparejado un incremento de las exigencias de renovación de aire e iluminación.

Aún en estas condiciones de aumento muy significativo de prestaciones, la mejora generada por la rehabilitación de la envolvente sigue arrojando una importante reducción de la demanda.

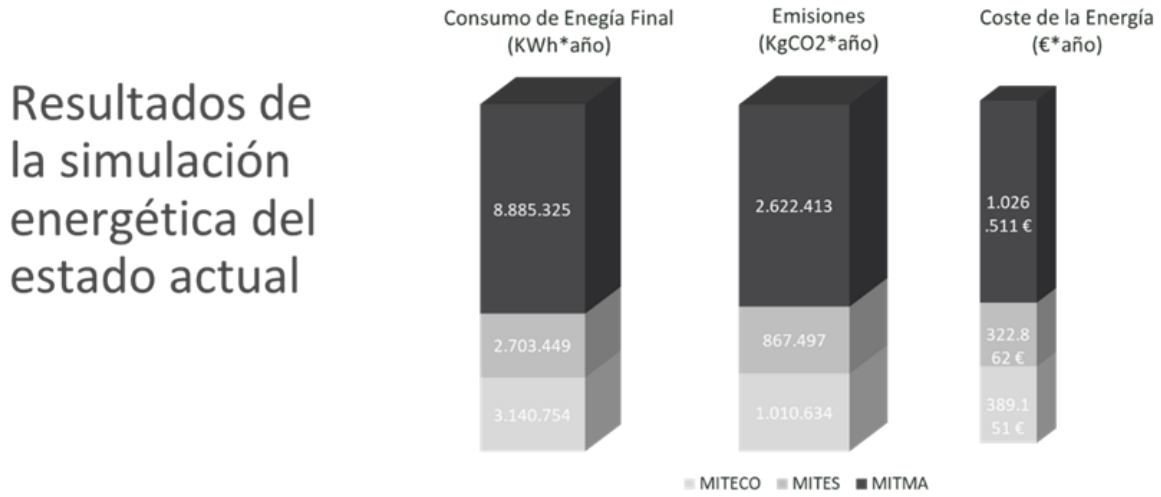


Figura 5-9. Resultados de la simulación energética del estado actual. Fuente: Instituto Europeo de Innovación.

		Consumo de energía final	Emisiones	Coste de la energía				
	Sup. Útil (m_2)	kWh *año	$kgCO_2$ *año	€/año	kWh/m_2 *año	$kgCO_2/m^2$ *año	€/m_2 * año	Letra CEE
MITECO	42.487,58	3.140.754	1.010.634	389.151 €	74	24	9,16	D
MITES	22.734,00	2.703.449	867.497	322.862 €	119	38	14,20	F
MITMA	83.801,00	8.885.325	2.622.413	1.026.511 €	106	31	12,25	E
TOTAL COMPLEJO	**149.022,58**	**14.729.528**	**4.500.544**	**1.738.524 €**	**99**	**30**	**11,67**	**E**

Tabla 5.1. Resultados de la simulación energética del estado actual. Fuente: Instituto Europeo de Innovación.

Aplicando directrices en los sistemas de producción, transformación, distribución y emisión de energía térmica (cambio de equipos y sistemas)

Analizando el cambio en la producción, transformación, distribución y emisión de la energía térmica se analizan los posibles ahorros, partiendo como base la

demanda energética una vez aplicadas las directrices de mejora en la envolvente térmica.

Se plantea así, el uso de recuperadores de calor, que pueden aportar más de un **9 %** de la demanda de energía térmica de calefacción y el **2 %** de la demanda de refrigeración. Los recuperadores de calor considerados son de tipo entálpico con al menos un **75 %** de eficiencia en la recuperación.

5.1.4.2. Cálculos de consumos de energía final

FASE	DESCRIPCIÓN	kWh *año	Ahorro	$kgCO_2$ *año	Ahorro	€/año	Ahorro	kWh/m^2 *año	$kgCO_2/m^2$ *año	$€/m^2$ *año	Letra CEE
0	ESTADO ACTUAL	14.729.528	--	4.500.544	--	1.738.524 €	--	99	30	11,67	E
1	ACTUACIONES PARA LA REDUCCIÓN DE LA DEMANDA + ESPACIOS EXTERIORES	7.784.434	47%	2.439.024	46%	990.165 €	43 %	52	16	6,64	C
2	RED DE DISTRITO DE 5ª GENERACIÓN + INTERVENCIÓN PARCIAL EN LOS SISTEMAS DE CLIMA VENTILACIÓN Y ACS (EJECUCIÓN AL 30 %)	4.183.022	72%	1.384.580	69%	711.114 €	59 %	28	9	4,77	B
3	INTERVENCIÓN PARCIAL EN LOS SISTEMAS DE CLIMA VENTILACIÓN Y ACS (EJECUCIÓN AL 60 %)	3.655.366	75%	1.209.926	73%	621.412 €	64 %	25	8	4,17	B
4	INTERVENCIÓN PARCIAL EN LOS SISTEMAS DE CLIMA VENTILACIÓN Y ACS (EJECUCIÓN AL 100%)	2.951.824	80%	977.054	78%	501.810 €	71 %	20	7	3,37	A
5	INSTALACIÓN FOTOVOLTAICA ADICIONAL HASTA LOGRAR LA NEUTRALIDAD CLIMÁTICA	0	100%	0	100%	0 €	100 %	0	0	0	A

Tabla 5.2. Resultados estimados de la implementación por fases de las medidas de mejora. Fuente: Instituto Europeo de Innovación.

a) Aplicando directrices en la envolvente del edificio y zonas de influencia (espacios verdes) para reducir la demanda

La rehabilitación integral de la envolvente, las estrategias de ventilación, free-cooling nocturno, y tratamiento de los espacios exteriores, en un escenario de distribución y criterios de climatización como los actuales, suponen un ahorro en consumos de climatización del **45%.**

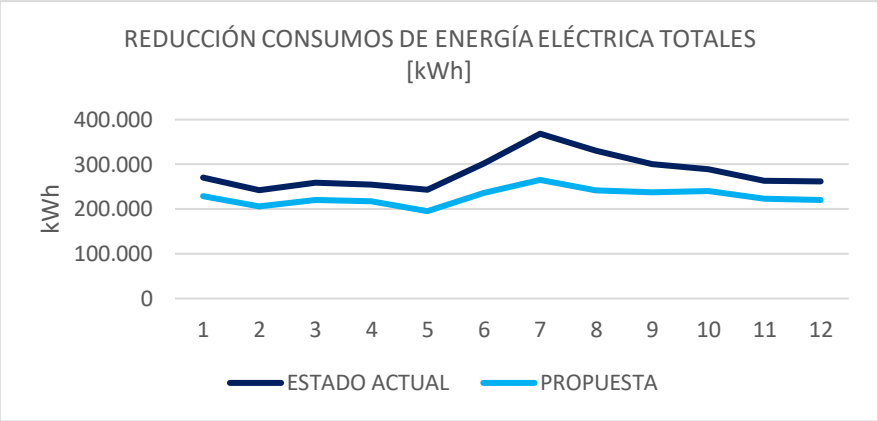


Figura 5-10. Ahorro en consumos de energía eléctrica totales (kWh) generados por la rehabilitación integral de la envolvente del edificio y de zonas de influencia (espacios verdes) para reducir la demanda. Fuente: Instituto Europeo de Innovación.

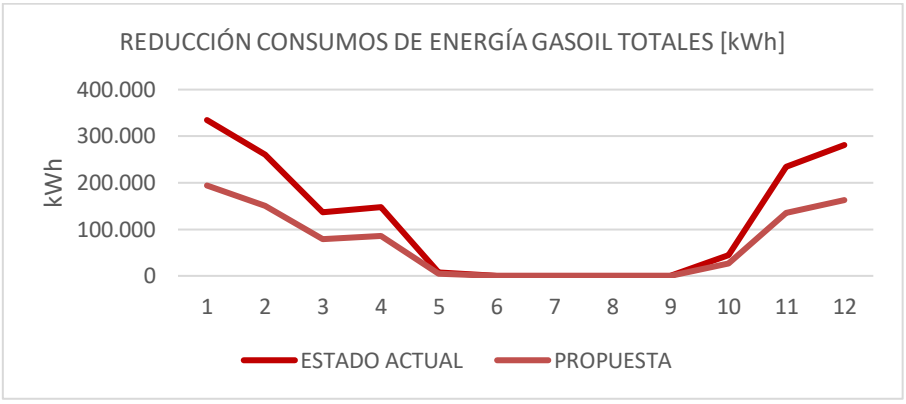


Figura 5-11. Ahorro en consumos de energía de gasoil (kWh) generados por la rehabilitación integral de la envolvente del edificio y de zonas de influencia (espacios verdes) para reducir la demanda. Fuente: Instituto Europeo de Innovación.

Reduciendo la demanda de energía térmica, los consumos eléctricos totales del edificio se reducen en un **19 %**. Este **19 %** de reducción se da por disminuir el consumo eléctrico debido a la reducción en la demanda de refrigeración y el cambio de iluminación por luminarias LED en el edificio (cuyos consumos pueden llegar a reducirse del **27%** respecto al estado actual). El correcto tratamiento de la envolvente del edificio permite mantener la temperatura de consigna de los locales por más tiempo debido a que las pérdidas energéticas disminuyen. Esto a su vez, evita los arranques bruscos de los compresores de las enfriadoras para vencer la inercia térmica acumulada en las zonas de oficinas.

Reduciendo la demanda de energía térmica de calefacción, los consumos energéticos de gasoil del edificio también se reducen de forma proporcional en un **42 %**. La rehabilitación integral de la envolvente del edificio permite mantener la temperatura de consigna de los locales por más tiempo debido a que las pérdidas

energéticas disminuyen. Esto a su vez, evita los picos de arranque de las calderas para vencer la inercia térmica acumulada en las zonas de oficinas.

b) Aplicando directrices en los sistemas de producción, transformación, distribución y emisión de energía térmica (cambio de equipos transición a energía de bajo grado)

Aplicando las actuaciones de envolvente, y sobre este resultado aplicando los cambios en la producción, transformación, distribución y emisión de energía, se genera un ahorro del **83 %** respecto a los consumos de climatización del estado actual.

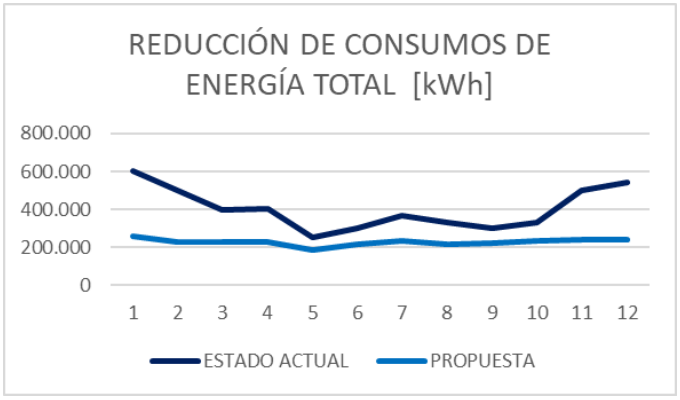


Figura 5-12. Reducción general en consumos de energía generada por la aplicación integrada de las actuaciones de la envolvente, ventilación, free-cooling, tratamiento de espacios exteriores, iluminación, sistemas de producción, transformación, distribución y emisión de energía térmica (cambio de equipos).
Fuente: Instituto Europeo de Innovación.

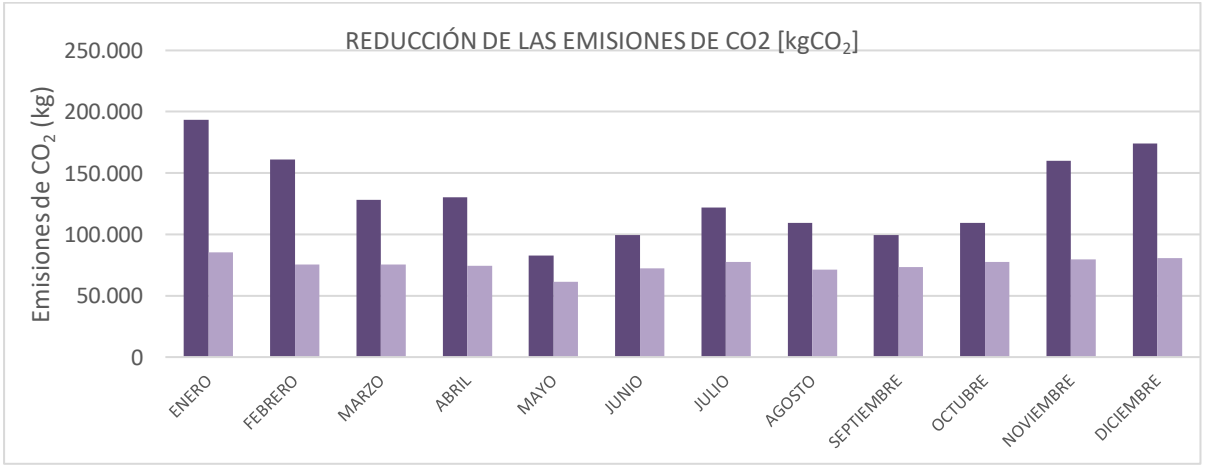


Figura 5-13. Reducción de las emisiones de CO2 generada por la aplicación integrada de las actuaciones de la envolvente, ventilación, free-cooling, tratamiento de espacios exteriores, iluminación, sistemas de producción, transformación, distribución y emisión de energía térmica (cambio de equipos).
Fuente: Instituto Europeo de Innovación.

La aplicación integrada de todas las soluciones descritas genera una reducción del consumo eléctrico del 19 %. Hay que tomar en cuenta que se elimina por completo el uso de gasoil, por lo que el ahorro total del edificio, en términos de consumos [kWh] y emisiones de CO_2, sobre los consumos totales actualmente facturados, es de al menos un **44 %**.

A este ahorro se le sumaría un ahorro adicional generado por las estrategias transversales de la red de distrito y mejoras en el control, que se describen en este documento.

5.1.4.3. Análisis del confort termo-higrométrico

Del análisis del confort se desprende que las actuaciones y las estrategias propuestas permiten una mejora del confort termo-higrotérmico de los usuarios en el edificio a lo largo de todo el año, con un ahorro de energía del **83 %** respecto a lo que se consume actualmente en energía de climatización.

Se demuestra como la estrategia de mantener las temperaturas constantes a lo largo de toda la semana, principalmente en las zonas de oficinas, asociados a sistemas de acumulación y balanceo que aprovechan las temperaturas más favorables del día, garantiza condiciones de confort adecuadas con rendimientos óptimos de los equipos. Además, esta estrategia permite una reducción de los picos de arranque de los equipos de calefacción y refrigeración que podrían producirse a primera hora de la mañana, al tener que calefactar o refrigerar mucho volumen de aire después de muchas horas de paro de la instalación. Por lo tanto, dicha estrategia, además de garantizar condiciones óptimas para el confort de los usuarios, también genera un ahorro importante en términos de picos potencia.

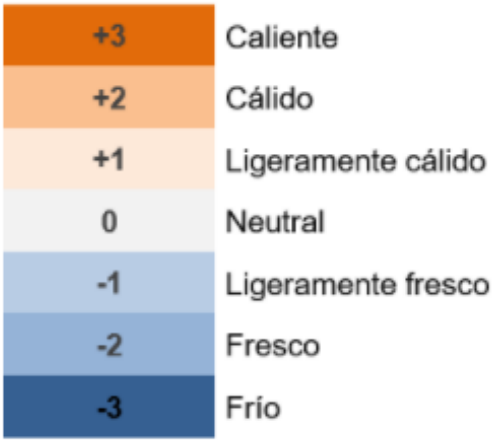


Figura 5-14. Escala numérica de sensación térmica usada por Fanger (PMV). Fuente: Instituto Europeo de Innovación.

El índice de Voto Medio Previsto (PMV, *Predicted Mean Vote*) nos muestra la opinión promedio que algunas personas tienen sobre su nivel de comodidad en un entorno específico. Se emplea una escala de sensación térmica de siete puntos como la Figura 5-14.

El índice PPD de Usuarios Insatisfechos (Predicted Percentage of Dissatisfied) refiere al índice de PMV y muestra el porcentaje de individuos que no están satisfechos con la temperatura en comparación con un valor específico de PMV.

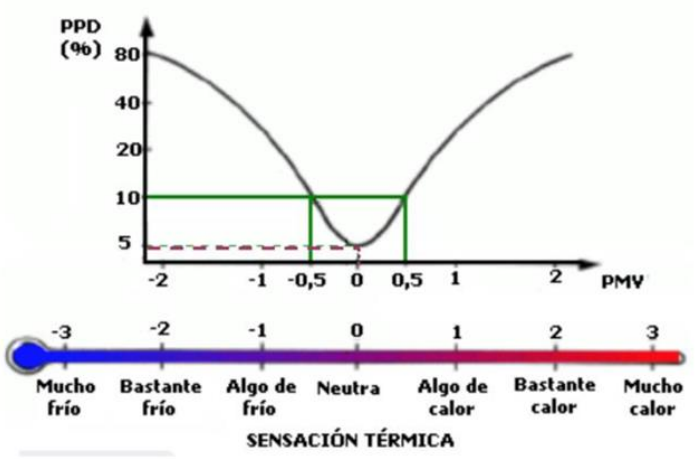


Figura 5-15. Porcentaje previsto de insatisfechos (PPD) en relación con el Voto Medio Previsto (PMV) [103].

El gráfico de la temperatura operativa del edificio, muestra que las condiciones de temperatura dentro del edificio son más estables a lo largo del año. Esto se debe a que se mantiene un equilibrio y balanceo térmico constante en la producción, acumulación y emisión de energía, evitando la acumulación de inercias térmicas, que demandan más energía para ser contrarrestadas y causan disconfort en los usuarios del edificio.

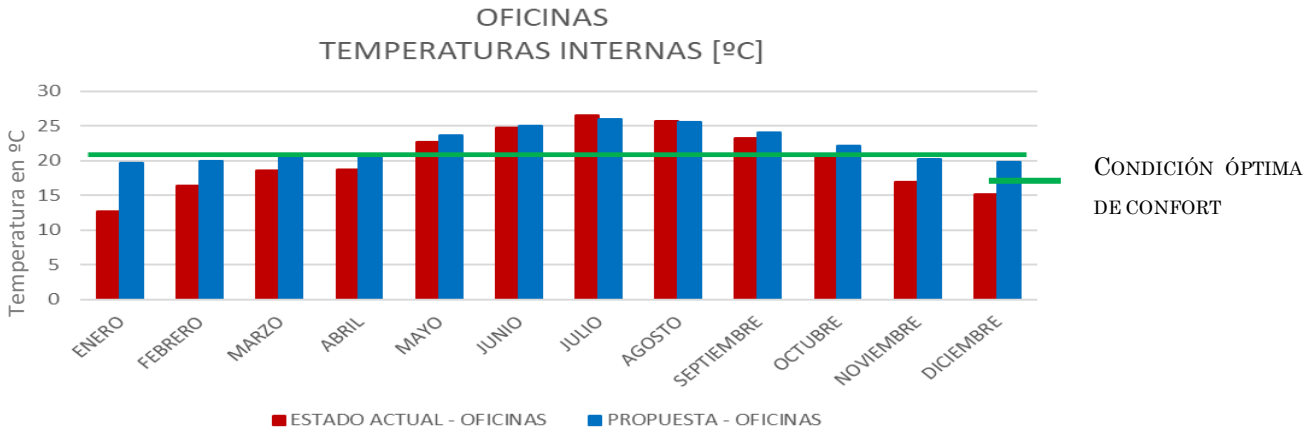


Figura 5-16. Resultados del análisis de confort realizada con el método de Fanger. Temperatura interna de las oficinas. Fuente: Instituto Europeo de Innovación.

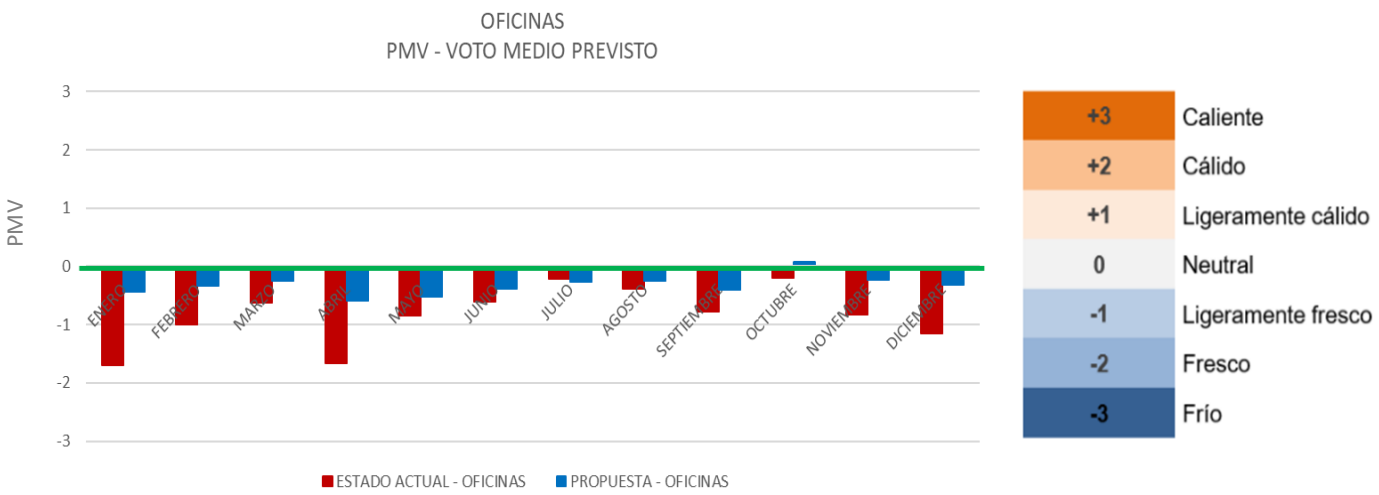


Figura 5-17. Resultados del análisis de confort realizada con el método de Fanger. Voto Medio Previsto (PMV). Fuente: Instituto Europeo de Innovación.

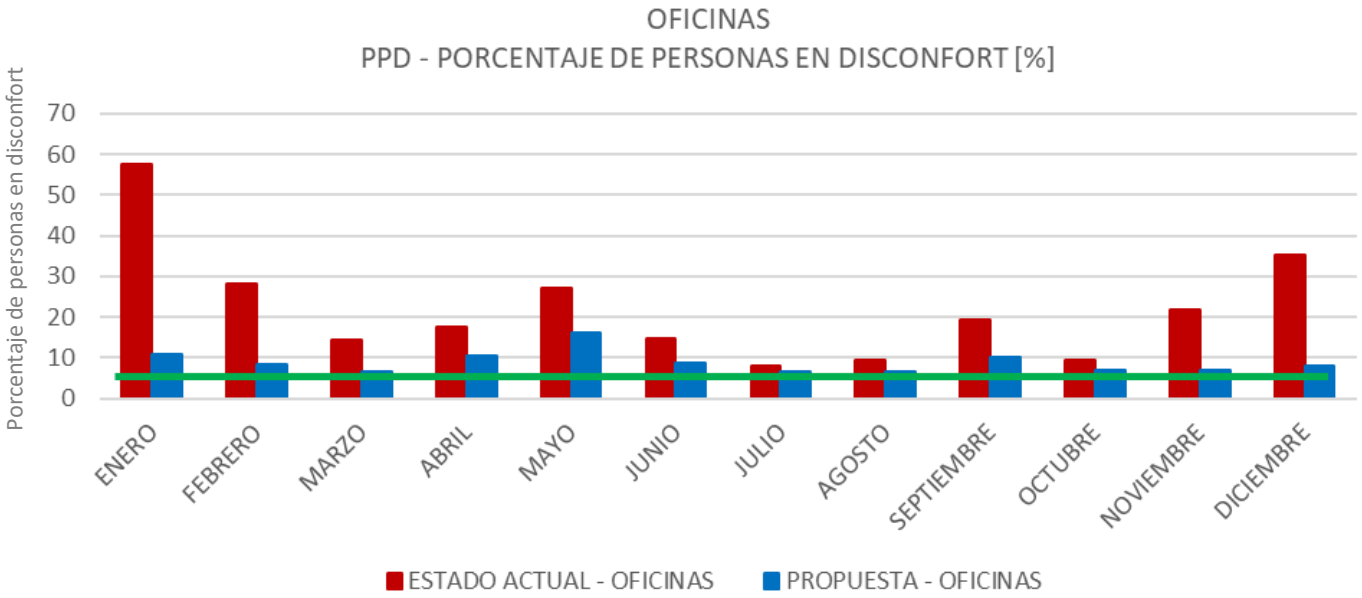


Figura 5-18 Resultados del análisis de confort realizada con el método de Fanger. Porcentaje de Personas en Disconfort (PPD). Fuente: Instituto Europeo de Innovación.

5.2. Estudio de la viabilidad de implantación de un eco-distrito en el complejo de los NNMM de Madrid. Actuaciones transversales

5.2.1. Escala individual y escala colectiva

La escala individual de cada uno de los Ministerios, escala de gestión, escala de transformación del espacio y escala de impacto y consumo de recursos es objeto en la primera fase de actuación de auditoría y propuestas de mejora. Los tres edificios, con superficies dispares, órganos de gestión particulares y criterios individuales en la operación, comparten una serie de disfunciones importantes que dieron pie a las propuestas en todas las escalas de intervención ya enumeradas:

- En el estado actual de los tres ministerios no se cumplen las condiciones básicas de calidad ambiental: temperatura, calidad del aire, iluminación natural, ruido, ergonomía, vistas.
- La envolvente no es competente en la gestión de la relación con el entorno: control de la radiación y la luz solar, aislamiento, control de la estanqueidad al aire, control del ruido.
- No se cumplen las condiciones medioambientales exigibles en los espacios exteriores: biodiversidad, gestión térmica, evapotranspiración, gestión del agua, calidad ambiental del espacio público.
- Los sistemas técnicos de climatización, distribución y emisión, no están preparados para el ahorro y la eficiencia, la recuperación de energía y la regulación integrada. Consumen abundantes recursos
- Los sistemas de producción recurren a energías fósiles de alto grado.
- No se incorporan recursos energéticos recuperados o renovables de bajo grado.
- Hay un muy bajo nivel de control, información y gestión.

A escala individual, tras las intervenciones orientadas a la reducción de la demanda, la calidad del aire y la calidad de la luz, se abordaron las propuestas de mejora sobre los sistemas de emisión y absorción de energía para la climatización, calefacción y refrigeración, redes de transferencia de energía y sistemas terminales de climatización.

En las áreas generales de trabajo, regidas por horarios y calendarios estándar en los tres Ministerios, la producción de agua fría y de agua caliente se realiza a

temperaturas extremas mediante calderas alimentadas por combustibles fósiles de alto grado y enfriadoras eléctricas. Las redes de distribución a dos tubos solo permiten escenarios completos de frío o calor sin transferencia directa de recursos entre zonas con distinta demanda y son origen muchas perdidas de energía. Los elementos terminales, fancoils, tienen baja eficiencia y escasa capacidad de regulación. No ha renovación controlada del aire.

Las zonas especiales, auditorios, salas de reuniones, cafetería, centros de datos, etc.. disponen de equipos propios de climatización con aporte fijo de aire y escasa eficiencia. Las zonas de trabajo que se utilizan más allá o fuera de los horarios estándar están dotadas, de manera espontánea de equipos de climatización partidos. Se trata en todos estos casos de equipos eléctricos (Figura 5-19).

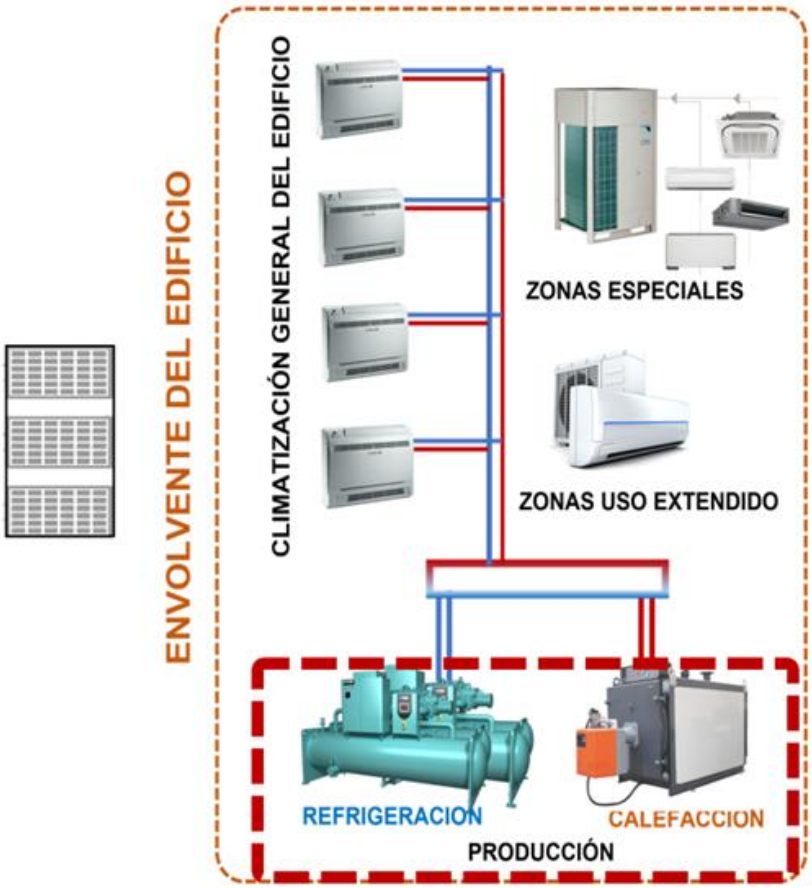


Figura 5-19. Esquema gráfico del estado actual los 3 Ministerios a escala individual. Fuente: Instituto Europeo de Innovación.

Aun teniendo estructuras y estrategias similares, cada uno de los 3 Ministerios es una unidad de gestión, prestaciones y consumo independiente que ha actuado a lo largo de décadas de manera independiente y puntual en la transformación de sus componentes y sistemas y de elementos comunes.

No se aprovecha el potencial de eficiencia de una actuación integrada, coordinada y gestionada en comunidad (Figura 5-20).

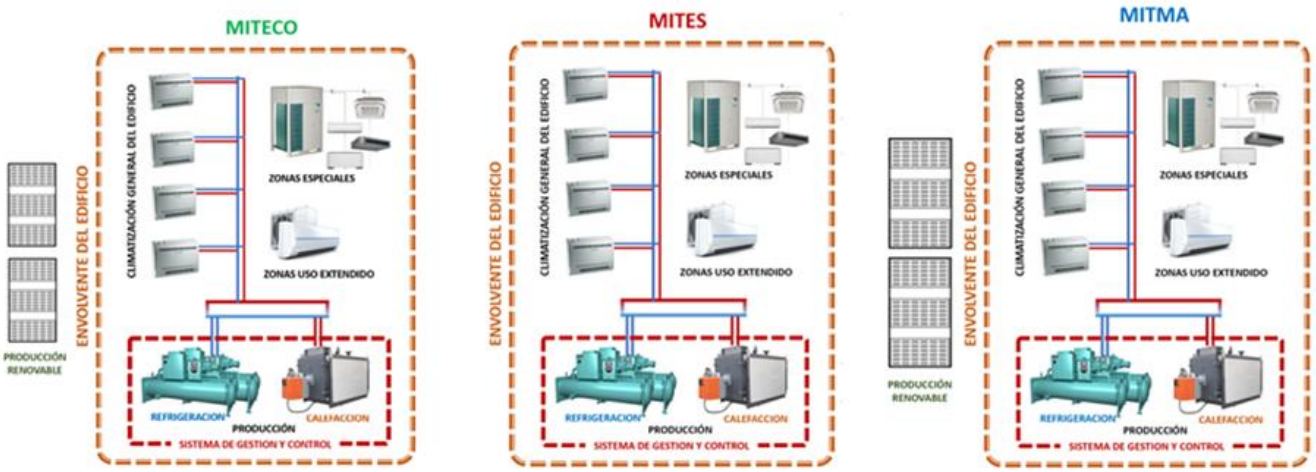


Figura 5-20. Esquema gráfico de estado actual de los 3 Ministerios a escala individual. Fuente: Instituto Europeo de Innovación

El desarrollo de las propuestas de mejora a escala individual plantea para los tres Ministerios las actuaciones previas para la reducción de la demanda: rehabilitación como jardín del espacio libre exterior, la rehabilitación de la envolvente y la incorporación en la envolvente de sistemas de control de la renovación de aire y de la luz natural. La integración de estas acciones supone una reducción de la demanda entre un 50 % y un 60 %.

En este contexto podemos plantear la renovación de los sistemas productores, redes de distribución y sistemas terminales de climatización y la incorporación de sistemas aptos para trabajar a temperaturas moderadas a partir de energía de bajo grado. Las enfriadoras y calderas desaparecen y se proponen bombas de calor agua-agua que condensan sobre sistemas de aerotermia, geotermia y aguas residuales para trabajar hacia el interior del edificio con redes de cuatro tubos y sistemas terminales de viga activa para calefacción y refrigeración a temperatura moderada con aporte de aire fresco. El ahorro asociado a este planteamiento por mejora del rendimiento en la producción lo estimamos en un 50 % del consumo de energía primaria (Figura 5-21).

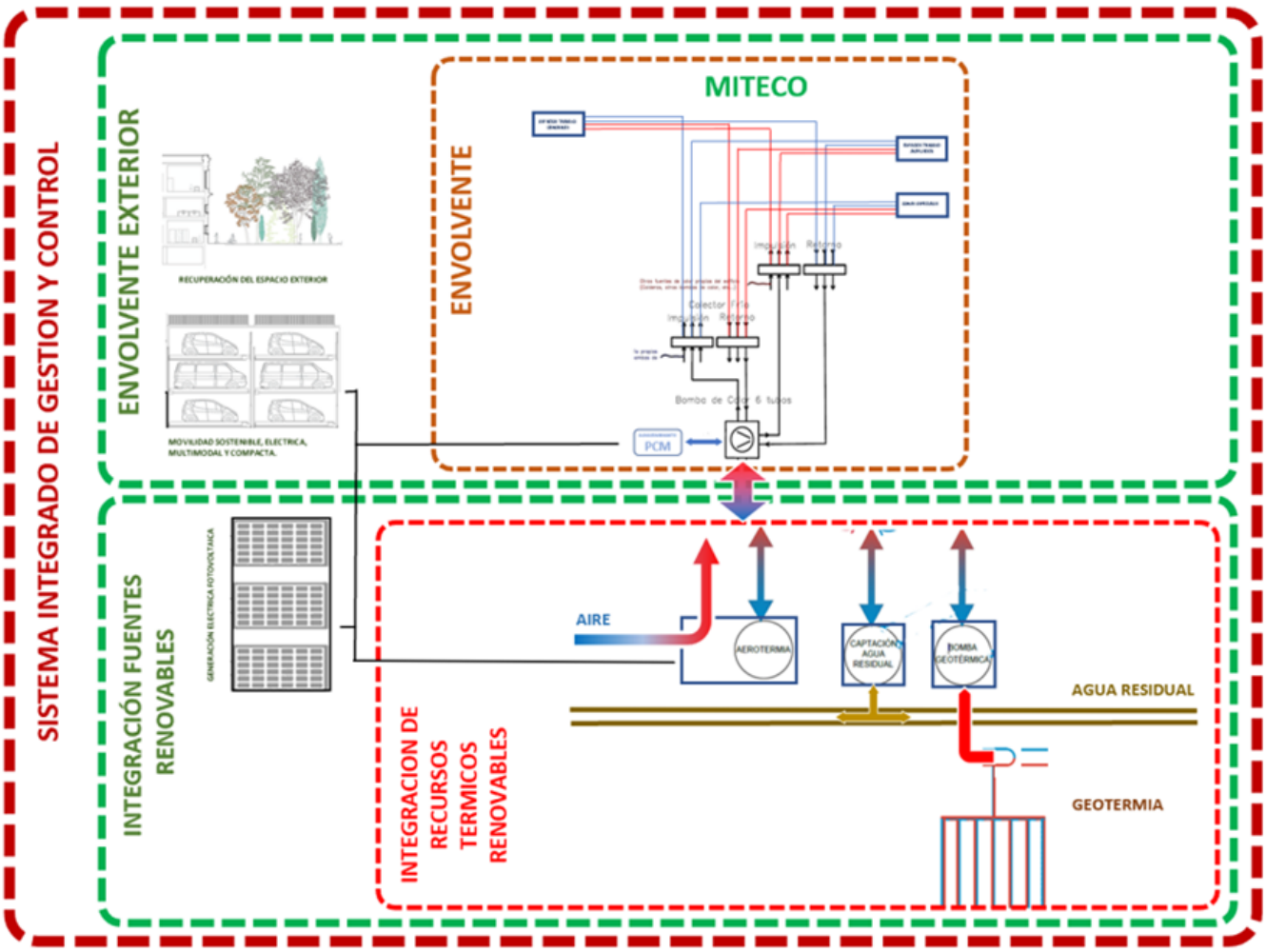


Figura 5-21. Esquema gráfico la propuesta para la rehabilitación de cada uno de los 3 Ministerios a escala individual. Fuente: Instituto Europeo de Innovación

La agregación de modelos individuales de eficiencia eleva los niveles de calidad ambiental en todos los ámbitos, reduce la demanda y abate el consumo de recursos primarios, pero no aprovecha el enorme potencial de transferencia de recursos entre los edificios de los tres Ministerios y la implementación de estrategias de gestión simbiótica asociadas a la utilización de sistemas de temperatura moderada y energía de bajo grado, la integración de todos los recursos renovables del entorno y la gestión de las energías recuperadas a través de sistemas escalonados de transferencia y almacenamiento (Figura 5-22).

Aun teniendo estructuras y estrategias similares, cada uno de los 3 Ministerios es una unidad de gestión, prestaciones y consumo independiente que ha actuado a lo largo de décadas de manera independiente y puntual en la transformación de sus componentes y sistemas y de elementos comunes.

Manteniendo aisladas sus estructuras no se aprovecha el potencial de eficiencia de una actuación integrada, coordinada y gestionada en comunidad.



Figura 5-22. Esquema cada uno de modelos individuales por separado y sus ahorros. Fuente: Instituto Europeo de Innovación.

En este punto los tres Ministerios, que aplicarán en su rehabilitación planes individuales de transición hacia un objetivo común con criterios comunes de baja exergía, están preparados para la incorporación de recursos térmicos de bajo rango. Individualmente ya se alcanzan mejoras, ahorros y reducción de impactos muy significativos pero hay aun un margen importante de eficiencia y valor agregado en la escala colectiva.

5.2.2. Escala colectiva del complejo de los NNMM. La importancia de la integración

La agregación de modelos individuales de eficiencia eleva los niveles de calidad ambiental en todos los ámbitos, reduce la demanda y abate el consumo de recursos primarios, pero no aprovecha el enorme potencial de transferencia de recursos entre los tres ministerios y la implementación de estrategias de gestión asociadas a la utilización de sistemas de temperatura moderada, la integración de todos los recursos renovables del entorno y la gestión de las energías recuperadas a través de sistemas escalonados de transferencia y almacenamiento.

Por eso se propone un modelo que preserva la independencia de cada Ministerio en la Gestión y que integra los recursos comunes en un ámbito de gestión concertada en el que confluyen MITECO, MITES y MITMA.

El estudio y Auditoría de los dos Ministerios ha permitido identificar y resolver las oportunidades de mejora asociadas a la interacción entre las distintas partes del Complejo de NNMM ellos y definir muy interesantes estrategias para la eficiencia de escala superior, que se materializan en un plan integrado de acciones transversales que tiene dos grandes componentes:

1. Acciones para la reducción de la demanda de climatización.
2. Acciones para multiplicar la eficiencia y reducir el consumo necesario para cubrir la demanda resultante tras la reducción.

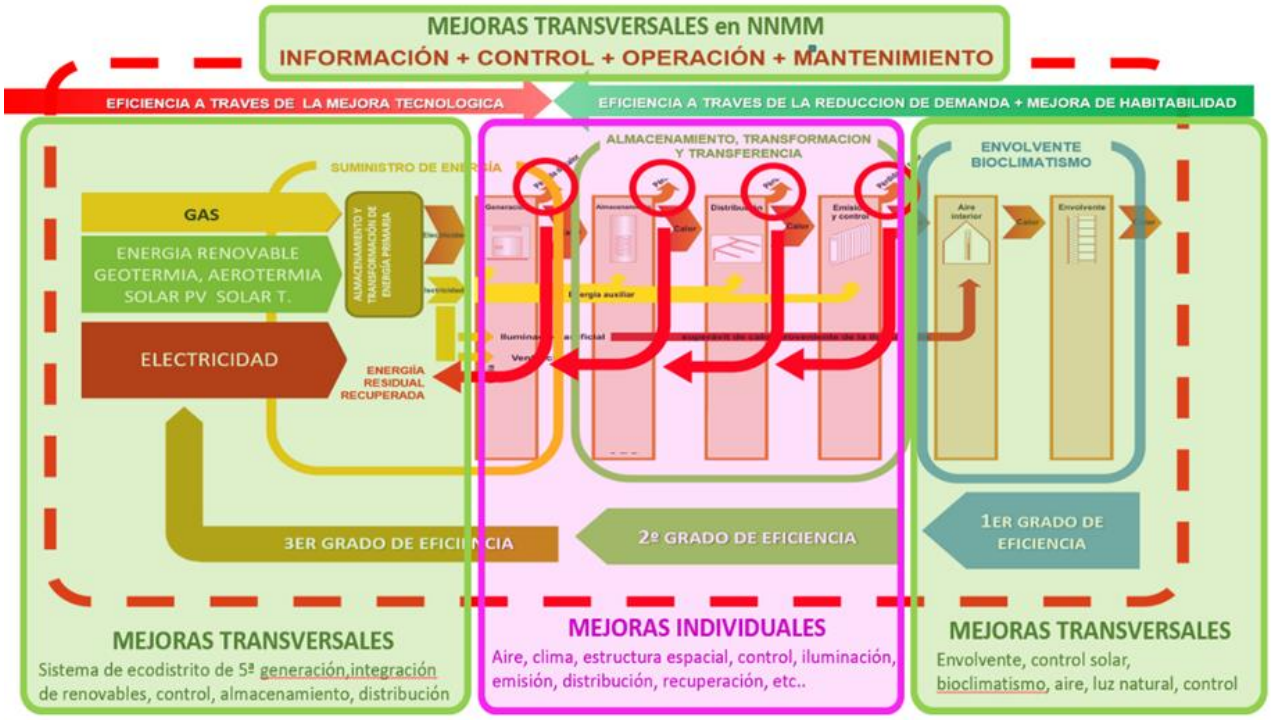


Figura 5-23. Esquema concepto de Exergía aplicado a las actuaciones transversales. Fuente: Instituto Europeo de Innovación.

El trabajo de Auditoría y Propuestas para cada uno de los dos ministerios, incluye, para cada uno de los Ministerios y en su conjunto para el CNNMM, el **estudio del proceso de transición** desde los modelos individuales actuales hacia un modelo en el que cada Ministerio puede ir aprovechando, desde el momento de su puesta en marcha y de manera progresiva y escalada, los nuevos recursos transversales comunes y transite hacia un escenario de integración, en el que se compatibilice la libertad individual de cada Ministerio en la gestión de sus espacios y sus recursos y la gestión concertada entre ellos en un ámbito de la reducción de la demanda energética, la calidad ambiental del espacio de trabajo, la integración de recursos renovables y la eficiencia en la generación y la gestión energética.

Se trata de actuaciones transversales a ejecutar en una Fase 1 que aportan un grado complementario de eficiencia, en origen, a las actuaciones individuales propuestas en la Auditoría para el MITES y el MITMA, tanto en la reducción de la demanda como en el aporte de recursos energéticos de fuentes renovables.

5.2.3. Actuaciones para la reducción de la demanda energética y las emisiones, previa a la producción y actuaciones para la reducción del consumo y emisiones correspondientes a la generación eficiente de la energía que cubre la demanda resultante

El potencial de ahorro asociado a actuaciones de reducción de demanda energética en el CNNMM es muy importante, los estudios realizados en la fase de Auditoría y Propuestas arrojan un porcentaje del 58 % de reducción de la demanda por acción combinada de la rehabilitación integral de la envolvente del edificio y de la rehabilitación de los espacios exteriores que en este conjunto y planteados como tal desde la concepción de los edificios, constituyen un poderoso medio de interacción bioclimática y abatimiento de la demanda.

Estas actuaciones, previas a las que se proponen para la generación eficiente de la demanda energética restante constituyen el primer bloque de la propuesta de Actuaciones Transversales.

El segundo bloque lo forman la creación de una red de distrito a temperatura moderada que integra, bajo criterios y denominación de una red de distrito de 5ª generación:

- Los recursos energéticos procedentes de los dos ministerios.
- Las fuentes renovables de energía térmica disponibles en el entorno de los NNMM: geotermia, aerotermia e intercambio con agua residuales.
- Los sistemas internos de intercambio y recuperación de energía, previa a la producción.
- Los sistemas de almacenamiento de energía, en material de cambio de fase, en agua y en el terreno, a varias escalas y con distinta intensidad y estrategias de uso.
- Un sistema de información, gestión y control que integra bajo estrategias de eficiencia, el acoplamiento del sistema de distrito y los sistemas de gestión de los tres Ministerios.

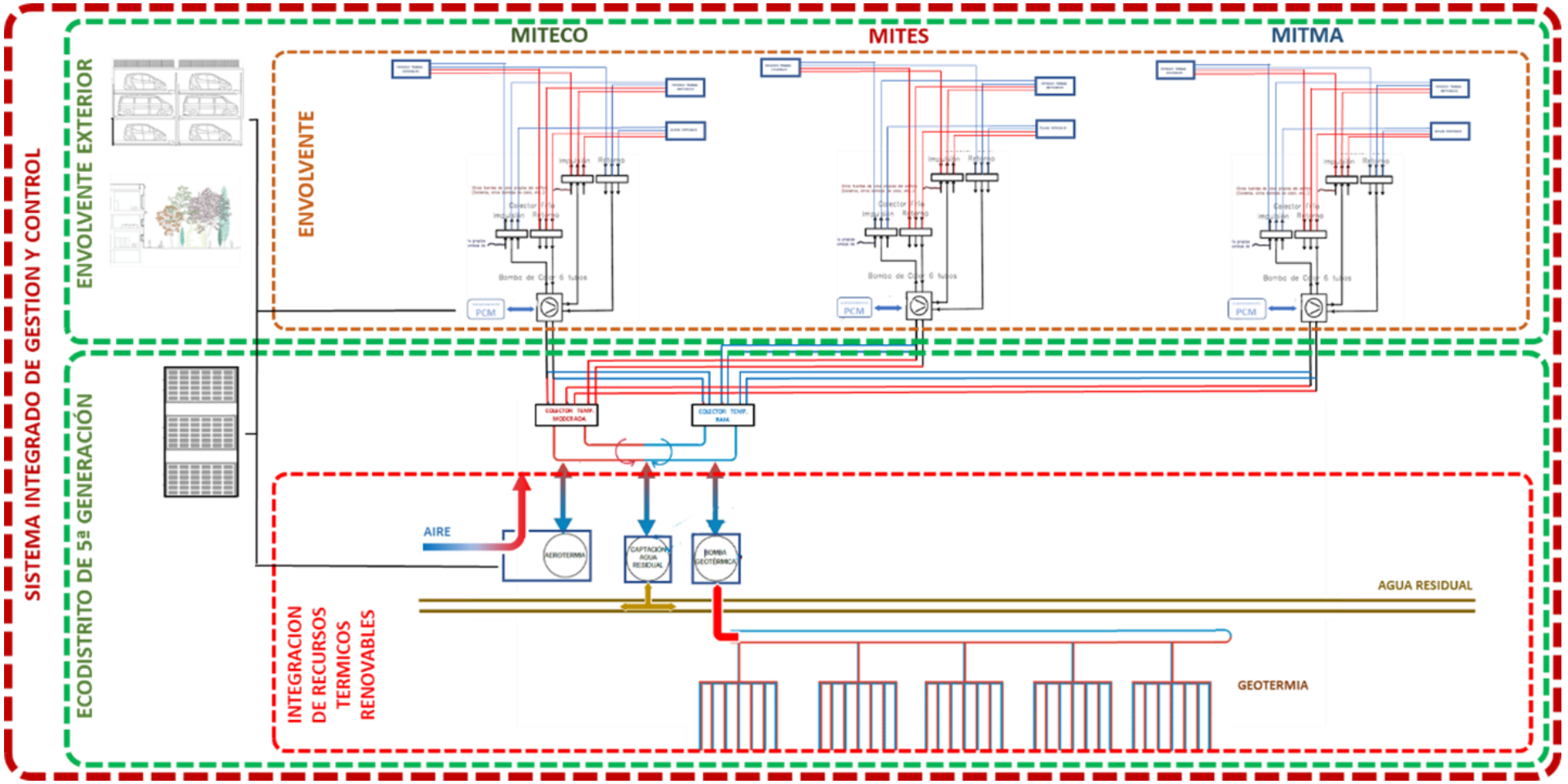


Figura 5-24. Esquema de la integración de las actuaciones transversales.
Fuente: Instituto Europeo de Innovación.

Tras la reducción de la demanda al 42 % de la auditada en estado actual, la aplicación en cascada de los recursos y estrategias que se integran en la eco red de distrito de 5ª generación supone un potencial de eficiencia en la generación de energía térmica que puede llegar a reducir en un 86 % el consumo de energía primaria respecto a la demandada por los sistemas de generación actuales en los dos ministerios (Tabla 5.3).

La evolución de cada Ministerio en el marco de sus actuaciones individuales, Fase 2 de Actuación, en la transición hacia el modelo de eficiencia que se propone en cada uno de los estudios de Auditoría y Propuestas para la Eficiencia realizados para, MITES y MITMA, determinará el grado alcanzado en cada caso y en conjunto en el tránsito progresivo hacia los objetivos de mínimo consumo, máxima eficiencia y mínimo impacto.

		kWh Demanda Actual / año	**kWh Demanda Propuesta / año**	**kWh Demanda Ahorro / año**	**% kWh Demanda Ahorro**	**kWh Consumo Ahorro / año**	**Emisiones kg CO2 Ahorro / año**
	1 ACTUACIONES PARA LA REDUCCIÓN DE LA DEMANDA. **Reducción de la energía demandada por actuaciones previas a la producción.**						
1.1	ENVOLVENTE	11.279.789,00	5.108.964,92	6.107.824,08	55%	6.097.586,49	1.743.217,47
1.2	ESPACIOS EXTERIORES	5.988.490,00	5.193.910,96	794.580,00	13% s/ demanda refrigeración actual 7% s/ demanda total actual	445.868,85	147.582,59
	TOTAL REDUCCIÓN INTEGRADA DE DEMANDA			6.561.444,00	58%		

		kWh Demanda Actual / año	**kWh Demanda Propuesta / año**	**kWh Demanda Ahorro / año**	**% kWh Demanda Ahorro**	**kWh Consumo Ahorro / año**	**Emisiones kg CO2 Ahorro / año**
	2 ACTUACIONES PARA LA COBERTURA EFICIENTE DE LA DEMANDA. **Reducción del consumo de energía primaria para la cobertura de la energía térmica demandada por el edificio.**						
2.1	RED DE DISTRITO + CONTROL	5.108.964,92	4.425.778,04	611.176,79	86%	3.814.601,25	1.123.579,36

Tabla 5.3. Resumen de las reducciones de demanda energética y de emisiones correspondientes a la energía no demandada y a la reducción del consumo. Fuente: Instituto Europeo de Innovación.

5.2.3.1. Actuaciones para la reducción de la demanda energética y las emisiones, previa a la producción

5.2.3.1.1 Rehabilitación de la envolvente construida

Se trata de la primera acción integrada a acometer, para asegurar la optimización de las condiciones ambientales del espacio de trabajo y reducir drásticamente la demanda energética. En términos generales es una actuación integral de rehabilitación de los sistemas de aislamiento conductivo y radiactivo, tratamiento de puentes térmicos, mejora de la estanqueidad al aire, mejora del aislamiento acústico en cubiertas y fachadas. Acabado vegetal en las cubiertas. Sustitución de cerramiento acristalado de huecos y ventanas, integración de dispositivos exteriores de control solar e interiores de gestión de la luz natural y la visibilidad. Integración de la toma de aire de renovación a través de las fachadas. Aislamiento de los elementos estructurales en contacto con espacios exteriores sin calefactar.
Incluye las siguientes componentes:

- Mejora del aislamiento conducción y radiación, en muros y ventanas, mediante el insuflado de lana de roca en las cámaras de fachada con densidades entre 48 y 70 kg/m^3, para mejorar el aislamiento a conducción térmica, la estanqueidad y el aislamiento acústico. Tratamiento de puentes térmicos en la fachada mediante, el sellado de juntas con la carpintería, el insuflado de cámaras en muros de cerramiento, cámaras de forjado y tratamiento de cajas de persiana.
- Eliminación y atenuación de puentes térmicos en petos y forjados, mediante insuflado de lana de roca en las cámaras de forjado, cámaras ventiladas de cubierta y petos de cubierta y terrazas, con densidades entre 48 y 70 kg/m3, para mejorar el aislamiento a conducción térmica, la estanqueidad y el aislamiento acústico.
- Sustitución de ventanas. Sustitución de las ventanas existentes incluyendo la integración de sistemas de control solar exterior en los espacios existentes de las antiguas persianas y la dotación de dispositivos de control de iluminación natural y potenciación de la visibilidad interior. Integración en las ventanas de la toma de aire para la ventilación interior por sectores.

- Mejora de la estanqueidad. Mediante el Insuflado de lana de roca en las cámaras de fachada con densidades entre 48 y 70 kg/m3, y celda cerrada para asegurar la estanqueidad.
- Control exterior de la radiación solar, mediante sistemas de estor motorizado y tejidos calibrados oscuros, integrados en el cerco exterior de las ventanas de las orientaciones, sur, oeste y este, según la geometría origina y aprovechando railes y cajas de persiana de los sistemas de oscurecimiento preexistentes.
- Gestión de la luz natural y de las vistas. Mediante la integración de sistemas interiores de control por reflexión de la luz natural que aseguren las vistas exteriores y la modulación de la luz directa exterior.
- Gestión de la calidad del aire. Integración en los cercos de las nuevas ventanas de juntas estancas.
- Mejora del Aislamiento acústico.
- Afecta a los siguientes elementos: cubierta, fachadas, patios interiores, patinillos interiores, estructura en contacto con el exterior térmico con el exterior.

La envolvente construida es un poderoso elemento común del CNNMM, determinante en factores de salubridad del espacio y demanda energética. El CNNMM, recordamos que se concibió en los años 30' del pasado siglo XX, resuelve su envolvente, fachadas, patios, patios menores, cubiertas, espacios porticados, etc. con un repertorio de soluciones concebidas para la salubridad, el control solar, las vistas cruzadas, la ventilación, el sombreamiento, la interacción interior -exterior, que hoy son un punto de partida que con el aporte de la técnica y la tecnología actual permiten niveles muy buenos de eficiencia pasiva.

La consideración de la envolvente construida, y de la envolvente exterior como marco de eficiencia, calidad ambiental y servicios ecosistémicos, es previa a la integración de recursos bajo la red de distrito de calefacción y refrigeración de quinta generación y multiplica su rendimiento.

ZONA DE ACTUACIÓN	TOTAL ENVOLVENTE COMPLEJO NNMM m²		ACTUACIONES
	SUBTOTAL	TOTAL	
Superficie total de la envolvente térmica (m²)		121.395,27 m²	**Actuación integral de rehabilitación de los sistemas de aislamiento conductivo y radiativo, tratamiento de puentes térmicos, mejora de la estanqueidad al aire, mejora del aislamiento acústico en cubiertas y fachadas. Acabado vegetal en las cubiertas. Sustitución de cerramiento acristalado de huecos y ventanas, integración de dispositivos exteriores de control solar e interiores de gestión de la luz natural y la visibilidad. Integración de la toma de aire de renovación a través de las fachadas. Aislamiento de los elementos estructurales en contacto con espacios exteriores sin calefactar**
Superficie de cerramiento opaco en fachada exterior - FACHADAS PRINCIPALES (m2)	47.627,50 m²		Insuflado de lana de roca en las cámaras de fachada con densidades entre 48 y 70 kg/m3, para mejorar el aislamiento a conducción térmica, la estanqueidad y el aislamiento acústico. Tratamiento de puentes térmicos en la fachada.
Superficie de cerramiento opaco en fachada exterior - PATIOS GRANDES INTERIOR (m2)	11.865,81 m²		Insuflado de lana de roca en las cámaras de fachada con densidades entre 48 y 70 kg/m3, para mejorar el aislamiento a conducción térmica, la estanqueidad y el aislamiento acústico. Tratamiento de puentes térmicos en la fachada.
Superficie fachadas (cerramiento opaco + huecos) - PATINILLOS	12.726,68 m²		Rehabilitación integral de las fachadas a los patinillos interiores incluyendo aislamiento, mejora de huecos y ventanas, estanqueidad, ventilación e iluminación natural.
Superficie de huecos (m2)	11.552,20 m²		Sustitución de las ventanas existentes de sistemas de control solar exterior en los espacios existentes de las antiguas persianas y dispositivos de control de iluminación natural y potenciación de la visibilidad interior. Integración en las ventanas de la toma de aire para la ventilación interior.
Superficie de cerramiento opaco en cubierta (m2)	31.843,98 m²		Insuflado de lana de roca con densidades entre 48 y 70 kg/m3 en las cámaras y en los forjados de las cubiertas. Aislamiento conductivo de las cubiertas con doble capa, 6+6, de poliestireno extruido con lámina intermedia reflectante a radiación, para mejorar el aislamiento a conducción térmica, la estanqueidad y el aislamiento acústico. Acabado con cubierta vegetal, zonas transitables y área de sistemas técnicos. Tratamiento de puentes térmicos en los encuentros de cubiertas con petos y fachadas.
Superficie de lucernarios (m2)	186,90 m²		Rehabilitación de los sistemas de lucernarios en los patios bajos de incorporando soluciones para el control solar, la gestión de la luz natural, la ventilación y el aislamiento, bajo un sistema integrado de control con los sistemas de iluminación y ventilación.
Superficie de forjado en contacto con espacios exteriores en galerías (m2)	5.592,20 m²		Aislamiento y tratamiento de los puentes térmicos de los forjados en contacto con espacios exteriores en galerías, terrazas, sótanos abiertos, etc..

Tabla 5.4. Áreas de actuación, superficies y acciones a acometer sobre la envolvente del CNNMM. Fuente: Instituto Europeo de Innovación.

		Demanda Actual (kWh)	Demanda Propuesta (kWh)	Ahorro %	Ahorro Consumos (kWh)	Factor de conversión	Emisiones Actuales (kg/año)	Emisiones CO2 Ahorradas (kg/año)
MITECO	**Calefacción**	1.013.441,00	587.796,00	42%	472.938,89	0,311	350.200,17	147.083,99
	Refrigeración	1.720.772,00	894.801,00	48%	384.172,56	0,331	264.918,85	127.161,12
	TOTALES	2.734.213,00	1.482.597,00	46%	857.111,45	-	615.119,020	274.245,11
MITES	**Calefacción**	1.081.683,00	519.207,84	52%	803.535,94	0,311	480.576,304	249.899,68
	Refrigeración	1.280.942,00	320.235,50	75%	619.810,65	0,331	273.543,098	205.157,32
	TOTALES	2.362.625,00	839.443,34	64%	1.423.346,59	-	754.119,40	455.057,00
MITMA	**Calefacción**	3.196.175,00	984.935,58	69%	3.158.913,46	0,252	1.150.623,00	796.046,19
	Refrigeración	2.986.776,00	1.801.989,00	40%	658.215,00	0,331	549.234,92	217.869,17
	TOTALES	6.182.951,00	2.786.924,58	55%	3.817.128,46	-	1.699.857,92	1.013.915,36

Tabla 5.5. Reducción de la demanda de energía de la correspondiente reducción de emisiones, obtenidas mediante las actuaciones de la envolvente en los tres Ministerios, MITECO, MITES y MITMA, del CNNMM. Fuente: Instituto Europeo de Innovación.

La recuperación como espacios verdes de 7,5 ha de espacios libres en el CNNMM está asociada a la compactación subterránea de los espacios de aparcamiento y ésta a su vez a la utilización como geoestructuras energéticas de sus muros y losas enterrados, recursos de intercambio geotérmico que se integrarán con otras fuentes de energía térmica de bajo grado y fuentes residuales y renovables en la red de 5ª generación.

		kWh Demanda Actual / año	kWh Demanda Propuesta / año	kWh Demanda Ahorro / año	% kWh Demanda Ahorro	kWh Consumo Ahorro / año	Emisiones kg CO_2 Ahorro / año
	1 ACTUACIONES PARA LA REDUCCIÓN DE LA DEMANDA. Reducción de la energía demandada por actuaciones previas a la producción.						
1.1	ENVOLVENTE	11.279.789,00	5.108.964,92	6.107.824,08	55%	6.097.586,49	1.743.217,47
1.2	ESPACIOS EXTERIORES	5.988.490,00	5.193.910,96	794.580,00	13% s/ demanda refrigeración actual 7% s/ demanda total actual	445.868,85	147.582,59
	TOTAL REDUCCIÓN INTEGRADA DE DEMANDA			6.561.444,00	58%		

Tabla 5.6. Resumen de las reducciones de demanda energética y la reducción de emisiones correspondientes a las actuaciones transversales sobre la envolvente. Fuente: Instituto Europeo de Innovación.

Las áreas de actuación, superficies y acciones a acometer en la rehabilitación de la envolvente recogen a continuación en la Tabla 5.4.

5.2.3.2. Rehabilitación del espacio envolvente exterior

La rehabilitación del espacio exterior del CNNMM es una acción geosistémica (recuperación del potencial de los recursos naturales al servicio de los edificios y la ciudad) sobre los espacios de jardines preexistentes y la regeneración de los espacios de los patios interiores y un alto porcentaje, superior al 75%, de la superficie ocupada actualmente por aparcamientos para la mejora microclimática y de la biodiversidad a través de la vegetación, la evapotranspiración, la permeabilidad, el control de la radiación y la inercia, la sombra y la ventilación.

Transcribimos aquí entrecomillados unos fragmentos de texto extraídos de la Orden TED/1018/2021 [102], de 20 de septiembre, por la que se aprueban las bases reguladoras para la concesión de subvenciones de la Fundación Biodiversidad, FSP, para fomentar actuaciones dirigidas a la renaturalización y resiliencia de ciudades españolas, en el marco del Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia, y se aprueba la convocatoria correspondiente al año 2021.

> *"Las soluciones basadas en la naturaleza son costo-efectivas y eficaces frente a estos retos. Las infraestructuras verdes en entornos urbanos, como parques y jardines ricos en biodiversidad, tramos fluviales, huertos urbanos, jardines verticales y cubiertas verdes, calles arboladas, praderas y setos, favorecen la biodiversidad y proporcionan numerosos servicios ecosistémicos, relacionados con la calidad de vida, la salud y el bienestar de sus habitantes, incluyendo la regulación térmica y la disminución del efecto de isla de calor, la purificación del aire, o la disminución del impacto acústico".*
>
> *"El medio urbano tiende a tener temperaturas más elevadas que las que se dan en su entorno, especialmente durante la noche, poseen un mayor riesgo de inundaciones debido, entre otros motivos, al elevado grado de impermeabilidad de los suelos y una peor calidad del aire por la concentración de emisiones derivadas del uso de energía en las viviendas, el transporte o las industrias."*
>
> *"Al mismo tiempo, proporcionan espacios para el ocio y la recreación y contribuyen a la permeabilización para hacer frente a lluvias*

torrenciales e inundaciones y a disminuir la desconexión con los ecosistemas naturales periurbanos".

"Asimismo, la proximidad de los servicios es aspecto clave para hacer las ciudades más habitables, de modo que los servicios básicos como el aumento de los espacios públicos de reunión e interacción social, una apuesta por modelos de movilidad descarbonizada, y la posibilidad de redescubrir la biodiversidad en las ciudades a través de la renaturalización. La transformación del modelo de movilidad y transporte se tornan imprescindibles y apoyar el impulso de modelos de ciudades no motorizadas es acuciante".

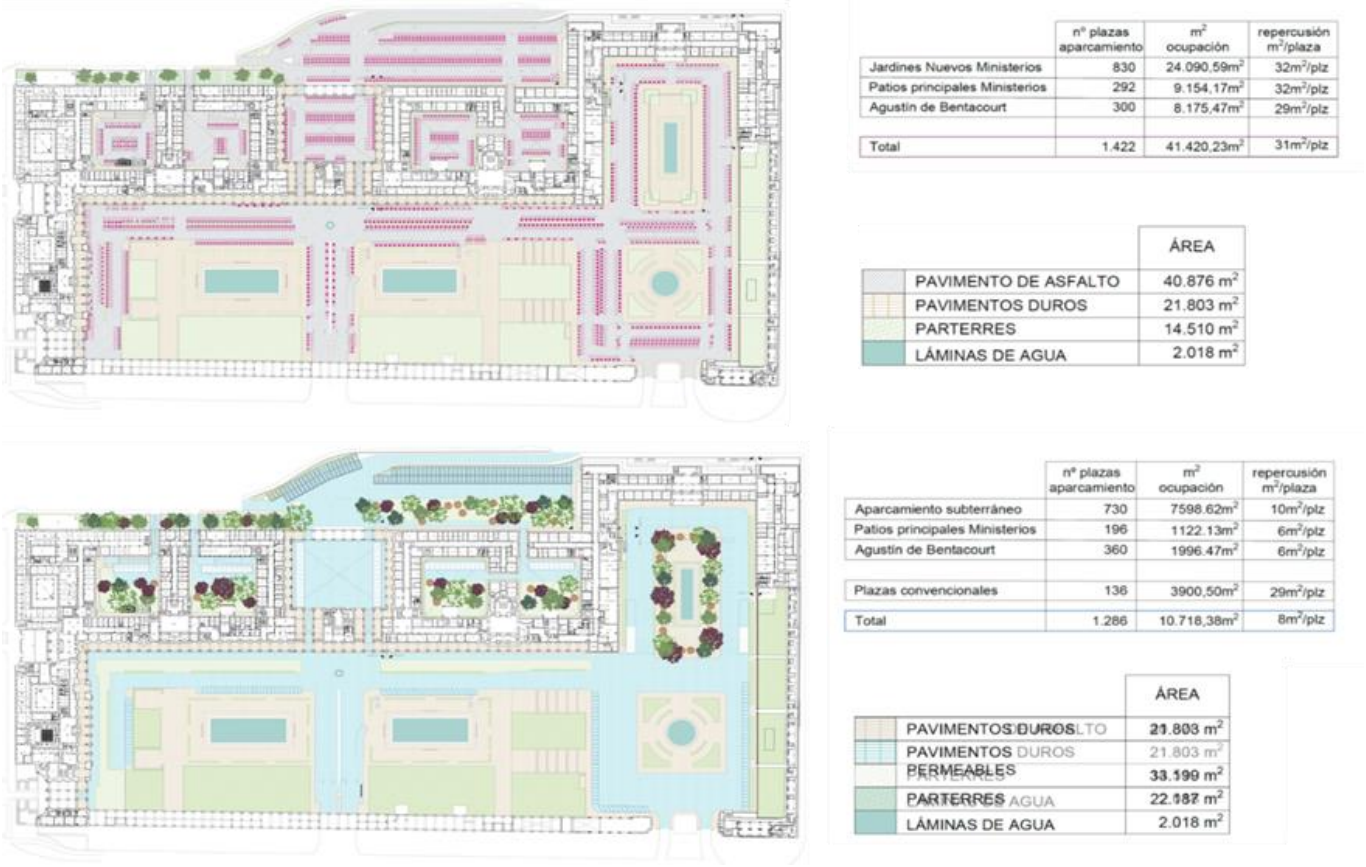
"Como se ha mencionado anteriormente, las soluciones de infraestructuras verdes en los entornos urbanos (incluyendo cuerpos de agua o infraestructura azul-verde) prestan numerosos servicios ecosistémicos, tanto de tipo cultural (ocio, salud, bienestar, aspectos sociales, etc.) como de regulación (regulación térmica, hídrica, purificación del aire, control de la erosión, etc.) y son una solución costo-efectiva a numerosos retos al tiempo ambientales, económicos y sociales, tal como subraya la Estrategia Nacional de Infraestructura Verde y de la Conectividad y Restauración Ecológicas (IVCRE)".

"La crisis sanitaria provocada por la COVID-19 ha puesto de manifiesto la necesidad de impulsar una transición verde que tenga en cuenta los límites ambientales del planeta y detener así los procesos de deterioro ecológico. Se hace imprescindible y urgente poner en marcha un plan de inversiones y reformas, con un triple objetivo: apoyar a corto plazo la recuperación tras la crisis sanitaria, impulsar a medio plazo un proceso de transformación estructural, y lograr, a largo plazo, un desarrollo más sostenible y resiliente desde el punto de vista económico-financiero, social, territorial y medioambiental".

"Los entornos urbanos concentran la mayor parte de la población en nuestro país. Es necesario mantener y mejorar los servicios ecosistémicos en las ciudades para conseguir entornos saludables con una mejor capacidad de respuesta frente a grandes desafíos, incluidos los impactos derivados del cambio climático".

5.2.3.2.1 Alcance. Planos y tablas de superficies de los espacios exteriores en estado actual y estado propuesto

Rehabilitación para la eliminación de las zonas asfaltadas, reducción de los pavimentos duros, reflectantes, inerciales e impermeables, rediseño de pavimentos y ajardinamiento de las áreas de rodadura liberadas por los aparcamientos de vehículos. (Figura 5-25 y Figura 5-26).



	nº plazas aparcamiento	m² ocupación	repercusión m²/plaza
Jardines Nuevos Ministerios	830	24.090,59m²	32m²/plz
Patios principales Ministerios	292	9.154,17m²	32m²/plz
Agustín de Bentacourt	300	8.175,47m²	29m²/plz
Total	1.422	41.420,23m²	31m²/plz

	ÁREA
PAVIMENTO DE ASFALTO	40.876 m²
PAVIMENTOS DUROS	21.803 m²
PARTERRES	14.510 m²
LÁMINAS DE AGUA	2.018 m²

	nº plazas aparcamiento	m² ocupación	repercusión m²/plaza
Aparcamiento subterráneo	730	7598.62m²	10m²/plz
Patios principales Ministerios	196	1122.13m²	6m²/plz
Agustín de Bentacourt	360	1996.47m²	6m²/plz
Plazas convencionales	136	3900,50m²	29m²/plz
Total	1.286	10.718,38m²	8m²/plz

	ÁREA
PAVIMENTOS ASFALTO	21.803 m²
PAVIMENTOS DUROS	21.803 m²
PERMEABLES	33.199 m²
PARTERRES AGUA	22.187 m²
LÁMINAS DE AGUA	2.018 m²

Figura 5-25. Plano de la propuesta de vegetación y rediseño de los espacios exteriores del CNNMM. Fuente: Instituto Europeo de Innovación.



Figura 5-26. Plano de la sección de la propuesta de vegetación y rediseño de los espacios exteriores. Fuente: Instituto Europeo de Innovación.

Tablas de reducción de la demanda y reducción de emisiones obtenidos mediante las actuaciones en los espacios libres (Tabla 5.7):

- Reducción media de la demanda de refrigeración 10-15 %
- Reducción local, en zonas específicas de los edificios, de la demanda de refrigeración 20-25%

		Demanda Actual (kWh)	Demanda Propuesta (kWh)	Ahorro %	Ahorro Consumos (kWh)	Factor conversión	Emisiones Actuales (kg/año)	Emisiones CO2 Ahorradas (kg/año)
MITECO	Refrigeración	1.720.772	1.617.525,68	6%	48.021,54	0,331	264.918.852	15.895,13
MITES	Refrigeración	1.280.942	1.127.228,96	12%	99.169,70	0,331	273.543.098	32.825,17
MITMA	Refrigeración	2.986.776	2.449.156,32	18%	298.677,60	0,331	549.234.920	98.862,29

Tabla 5.7. Reducción de la demanda y reducción de emisiones obtenida mediante las actuaciones en los espacios libres.
Fuente: Instituto Europeo de Innovación.

5.2.3.2.2 Reducción de la demanda y de las emisiones vinculadas a la recuperación y rehabilitación de los espacios libres exteriores. Metodología.

Exponemos la metodología y los parámetros considerados en el estudio preliminar del impacto de las actuaciones propuestas en relación al tratamiento de los espacios exteriores que afectan al complejo de los NNMM, en términos de desempeño energético, confort y calidad ambiental.

El programa de simulación utilizado para el análisis del desempeño energético del conjunto de edificios de NNMM, *DesigBuilder*, permite la modelación detallada de los parámetros del terreno y de sus condiciones superficiales, mediante la introducción de "dominios". El método del dominio del terreno ("Ground Domain") se basa en el cálculo de diferencias finitas y simula la transferencia de calor con las superficies horizontales y verticales de los edificios en contacto con el suelo.

Los dominios de terreno se emplean para definir las características geométricas y térmicas del terreno, permitiendo modelar la transferencia de calor entre éste y el edificio de manera más precisa que con el modelo Figura 5-27predeterminado de EnergyPlus.

DesigBuilder permite introducir dos tipos de dominio de terreno, en referencia a la interfaz edificio-suelo: "Losa" y "Basamento" (. La opción "Basamento", utilizada para zonas enterradas, como sótanos o semisótanos con muros enterrados y forjados en contacto con el terreno, permite modelar zonas subterráneas, con muros y suelos adyacentes al terreno.

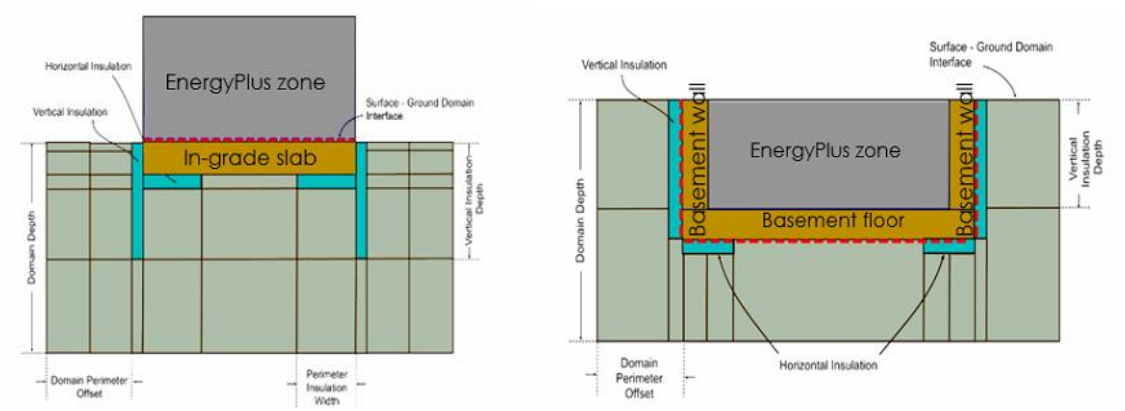


Figura 5-27. Modelación de la interacción del edificio con el terreno mediante el método de "Dominios" en DesigBuilder (modelación de "Losas" y "Basamentos").. Fuente: Instituto Europeo de Innovación.

Los dominios de terreno (Figura 5-28), permiten la introducción de varios parámetros vinculados con la geometría de las zonas en contacto con el terreno y con los procesos de evapotranspiración superficial, entre ellos:

- Relación de aspecto: relación entre la longitud y el ancho de la zona enterrada, utilizada para determinar las proporciones del dominio total.
- Equidistancia perimetral (m): distancia entre el perímetro del sótano y el perímetro del dominio.
- Valor de evapotranspiración superficial del terreno: describe los efectos de la superficie del terreno utilizados en el modelo de evapotranspiración y en el balance térmico.
- Profundidad del dominio de terreno (m): profundidad del terreno considerada en el modelo.
- Profundidad del basamento: profundidad la zona en contacto con el terreno.

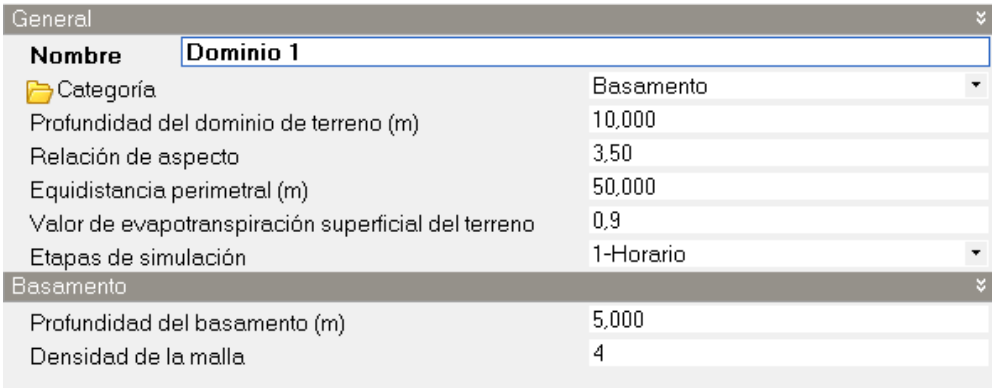


Figura 5-28. Captura de pantalla de los Parámetros considerados en DesigBuilder con el método de "Dominios".
Fuente: Instituto Europeo de Innovación.

La evapotranspiración es la cantidad de agua que pasa por el suelo en forma de vapor, por efecto combinado de la transpiración y de la evaporación. Depende de las condiciones climáticas y del factor de cultivo K_c, que a su vez depende del tipo de cultivo presente en la superficie.

La evapotranspiración no es un parámetro fácil de medir. Para determinar la evapotranspiración se necesitan dispositivos específicos y mediciones precisas de diversos parámetros físicos o del balance de agua del suelo. Debido a esta limitación, es posible prever la evapotranspiración aplicando el principio de conservación de la energía o incluso midiendo los diferentes componentes del balance hídrico del suelo.

Para evaluar la evapotranspiración máxima Et_c a través de una estimación, es necesario definir la evapotranspiración de referencia o también llamada potencial, ET_0. ET_c = **Kc** ET_0, donde:

Kc es un coeficiente adimensional que depende del **tipo de cultivo** y es el parámetro requerido por DesigBuilder.

ET_0 es un parámetro climático y puede calcularse a partir de **datos meteorológicos** (evapotranspiración de referencia).



Figura 5-29. Factores involucrados en la estimación de la evapotranspiración ETc. Fuente: Instituto Europeo de Innovación.

El coeficiente de cultivo, **Kc**, es la relación entre el cultivo **ETc** y el **ET_0** de referencia y el cultivo de referencia se caracteriza por cuatro características que se unen para crear una integración de efectos. Las siguientes son las características que se mencionan.

- **Altura de la vegetación**, que es el término de resistencia aerodinámica.
- **Albedo (reflectancia) de la superficie de cultivo-suelo**, que influye en la radiación neta de la superficie, que es la fuente primaria del intercambio de energía para el proceso de evaporación.
- **Resistencia de la superficie del cultivo**, que depende del área del follaje, del estado de las hojas y del grado de control estomático, influye en la resistencia superficial.
- **Evaporación del suelo**, especialmente del suelo expuesto.

El parámetro K_c varía en función del tipo de vegetación y del grado de desarrollo de la misma. En general, se puede afirmar que este valor puede variar de 0 a 1,5.

Para la propuesta, se ha estimado un valor de 0,9 sobre la base de los datos proporcionados por el método Penman-Monteith de la FAO [104]. Representa una integración de los efectos de cuatro características que distinguen el cultivo de referencia (altura de la vegetación, arbolado de la superficie cultivo-suelo, resistencia de la superficie del cultivo que depende del área del follaje, evaporación del suelo).

Con respecto a las características físicas del terreno, el software permite la definición de más parámetros, entre ellos:

Conductividad térmica	Calor específico	Densidad
[W/m K]	[J/kg K]	[kg/m²]

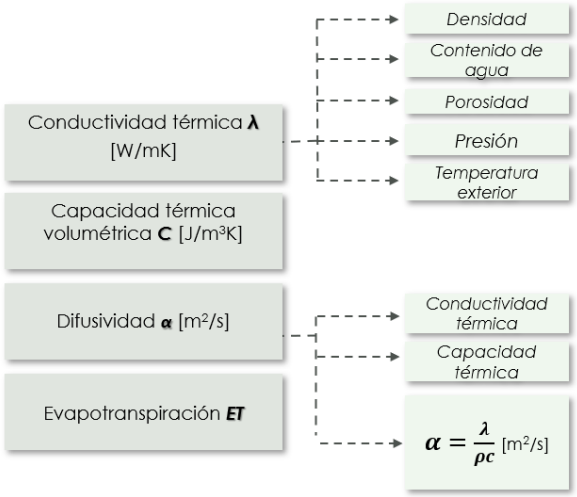


Figura 5-30. Parámetros físicos del terreno.
Fuente: Instituto Europeo de Innovación.

Por lo que se refiere a las características del suelo, se ha elegido el tipo "Arena y gravas" de la biblioteca de materiales del CTE, cuyas propiedades figuran en la Figura 5-31:

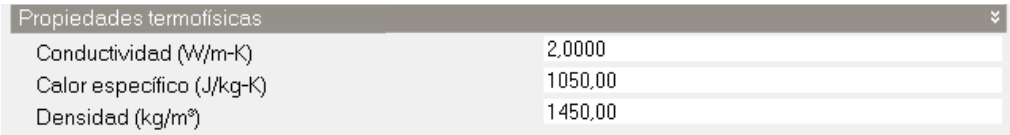


Figura 5-31. Captura de pantalla de la definición de los parámetros físicos del terreno para la localidad de Madrid en DesigBuilder.
Fuente: Instituto Europeo de Innovación.

Por último, mediante el modelo de Kusuda-Achenbach, se han definido los parámetros de temperatura del terreno. Los tres parámetros son T_m, temperatura media del suelo durante todo el año [°C], A_s, amplitud (diferencia media entre la temperatura máxima del suelo y la temperatura mínima del suelo) [°C] y t_0, desfase (día del año con la temperatura más baja de la superficie del suelo) [°C].

Parámetro	Valor
T_m	15,99
A_s	19,90
t_0	35

Tabla 5.8. Definición de los parámetros de referencia del terreno del modelo de Kusuda-Achenbach, para la localidad de Madrid.
Fuente: Instituto Europeo de Innovación.

5.2.3.2.2.1 Modelación de las superficies exteriores

Pavimentos exteriores

Se ha modelado el entorno respectando el diseño de los espacios exteriores propuesto.

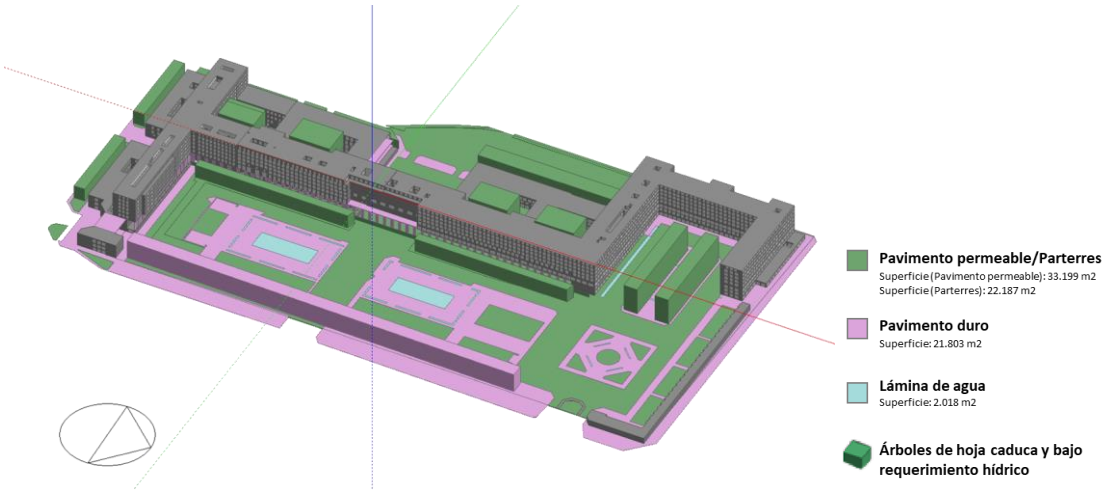


Figura 5-32. Modelación de los espacios exteriores, NNMM.
Fuente: Instituto Europeo de Innovación.

Se ha caracterizado cada superficie en términos de permeabilidad y absorbancia solar.

La superficie original de asfalto, material caracterizado por una absorbancia alta, ha sido sustituido con pavimentos permeables. Estas superficies se caracterizan por materiales de alta reflectancia. Esta estrategia es acorde con los requerimientos mínimos para el cumplimiento del crédito *Heat Island Reduction*, *Open Space* y *Quality views* del sistema de certificación LEED BD+C New Construction v4.1.

También se propone la realización de jardines polinizadores con plantas con flores nativas. Dicha estrategia es acorde con los requerimientos mínimos para el cumplimiento del crédito *Protect or Restor Habitat* del sistema de certificación LEED BD+C New Construction v4.1.

Asfalto (sustituido)



Figura 5-33. Captura de pantalla de las propiedades superficiales del asfalto en DesigBuilder.
Fuente: Instituto Europeo de Innovación.

Pavimento duro



Figura 5-34. Captura de pantalla de las propiedades superficiales estimadas para zonas de pavimento duro en DesigBuilder. Fuente: Instituto Europeo de Innovación.

Pavimento permeable/Parterre



Figura 5-35. Captura de pantalla de las propiedades superficiales estimadas para zonas de pavimento permeable y parterre en DesigBuilder.
Fuente: Instituto Europeo de Innovación.

Al introducir las características de absorbancia de los materiales superficiales, las simulaciones se realizan activando la opción "Modelar las reflexiones exteriores (incluyendo sombreado sobre el terreno)". Esta opción considerar el impacto de las reflexiones generadas por las nuevas superficies exteriores incorporadas en el modelo sobre el desempeño energético de los edificios, la calidad ambiental y el confort en los espacios interiores del edificio que se ven directamente afectadas.

5.2.3.2.2.2 Cubiertas vegetales

Las cubiertas vegetales pueden emplearse para reducir la demanda de refrigeración al proporcionar masa térmica y enfriamiento evaporativo a través de la transpiración de las plantas. *DesigBuilder* permite la introducción de una serie de parámetros que describen las características del follaje del tipo de plantas que se van e instalar.

Para la propuesta, se considera una cubierta vegetal de tipo "extensivo", que consiste en un sistema ligero, con sustrato poco profundo en el que se plantan diversas variedades de plantas tapizantes de origen autóctono, que requieren poco mantenimiento. Al igual que con una cubierta tradicional, el balance energético de un techo verde está dominado por la radiación solar. Se establece un equilibrio entre la radiación solar y el flujo de calor sensible (convección) y latente (evaporativo) del terreno y de las superficies de las plantas, combinado con la conducción de calor a través del sustrato del suelo. Este balance de energía, que se ilustra en la Figura 5-36, tiene beneficios interesantes relacionados con la eficiencia energética, la sostenibilidad y otros aspectos, entre ellos:

1) Reducen el efecto isla de calor.
2) Reducen la cantidad de agua de lluvia en el alcantarillado.
3) Depuran el agua de lluvia.
4) Generan hábitats naturales.
5) Protegen la cubierta.
6) Son sumideros de CO_2.
7) Disminuyen las variaciones de humedad en el aire.
8) Aumentan el aislamiento acústico.
9) Contribuyen a reducir el consumo de energía.

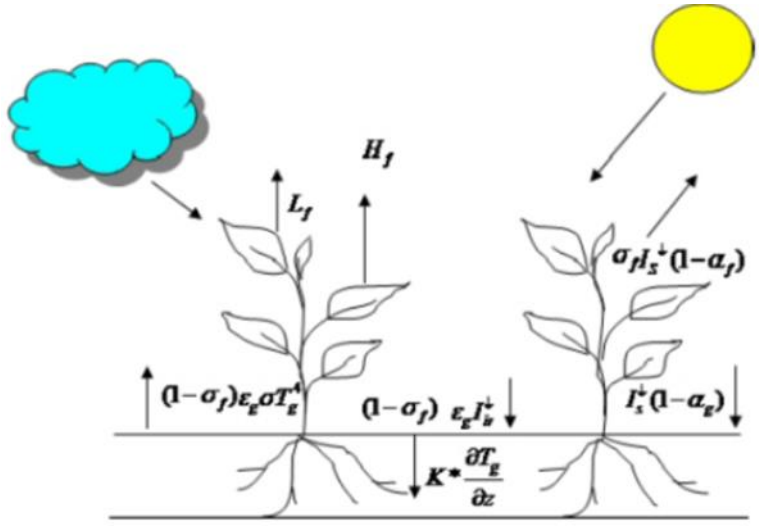


Figura 5-36. Balance energético a través de la cubierta vegetal.
Fuente: Instituto Europeo de Innovación.

Esta estrategia es acorde con los requerimientos mínimos para el cumplimiento del crédito *Heat Island Reduction* y *Open Space* del sistema de certificación LEED BD+C New Construction v4.1.

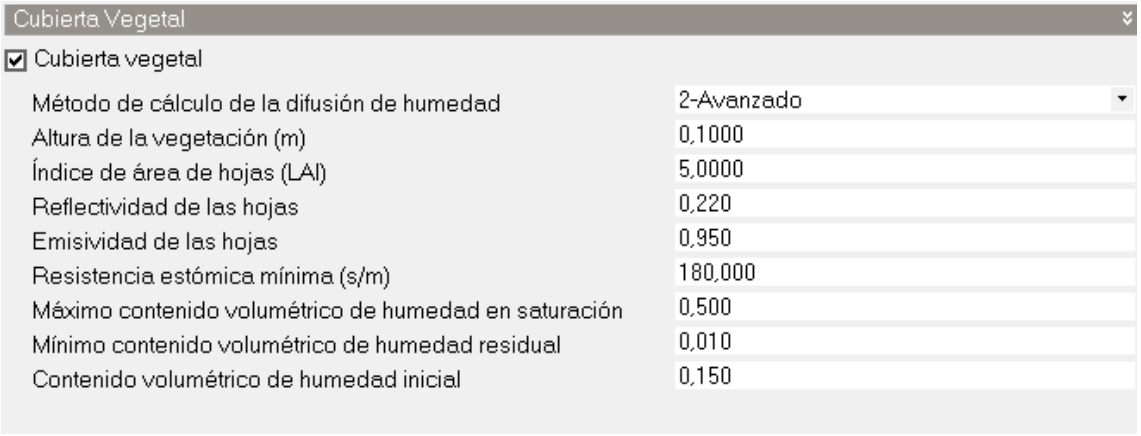


Figura 5-37. Captura de pantalla de los parámetros relacionados con la cubierta vegetal en DesigBuilder.
Fuente: Instituto Europeo de Innovación.

Se definen a continuación los parámetros considerados por el programa de simulación energética:

- El Índice de Área Foliar (LAI) es una medida que representa la extensión de las hojas en relación a la superficie del suelo (es un valor sin unidades que varía entre 0,001 y 5,0).
- La altura de las plantas (m): el promedio de su altura.
- Reflexión de las hojas: La proporción de luz solar que rebota en las superficies de las hojas individuales. La radiación proveniente del sol engloba el espectro de luz que es perceptible por el ojo humano, además de las ondas de calor infrarrojas y las ondas ultravioletas. La evidencia de este ámbito debe oscilar entre 0,1 y 0,4.
- El coeficiente de emisividad de las hojas se refiere a la relación entre la radiación térmica que las hojas emiten y la que emitiría un objeto negro perfecto a la misma temperatura. Este valor se emplea para calcular la transferencia de calor radiante de largo alcance en las superficies de las hojas (es un número que varía de 0,8 a 1,0, donde 1,0 indica condiciones de radiación térmica total).
- Resistencia mínima al transporte de humedad en el estómago (s/m): Este valor indica la capacidad de las plantas para resistir el flujo de humedad a través de ellas. Las plantas con una resistencia estomática baja experimentarán tasas de evapotranspiración más elevadas en comparación con las plantas que presentan una resistencia alta (un rango de valores que va desde 50,0 a 300,0).

- El suelo tiene la capacidad de retener una cierta cantidad de humedad, que varía según sus propiedades y la cantidad de porosidad que tiene. En condiciones de máxima saturación, el suelo alcanza su máximo nivel de humedad posible.
- Máximo nivel de humedad residual: La cantidad mínima de humedad en volumen que puede contener la capa superficial del suelo.
- Nivel de humedad inicial del suelo: La cantidad de humedad presente en la capa de suelo al comenzar la simulación.

5.2.3.2.2.3 Vegetación y sombreamiento

La colocación estratégica de los árboles de hoja caduca en orientaciones Sur y Oeste permite conseguir niveles óptimos de sombreamiento en verano, dejando que en invierno los cerramientos y los huecos en fachadas capten la máxima cantidad de radiación solar y de iluminación natural.

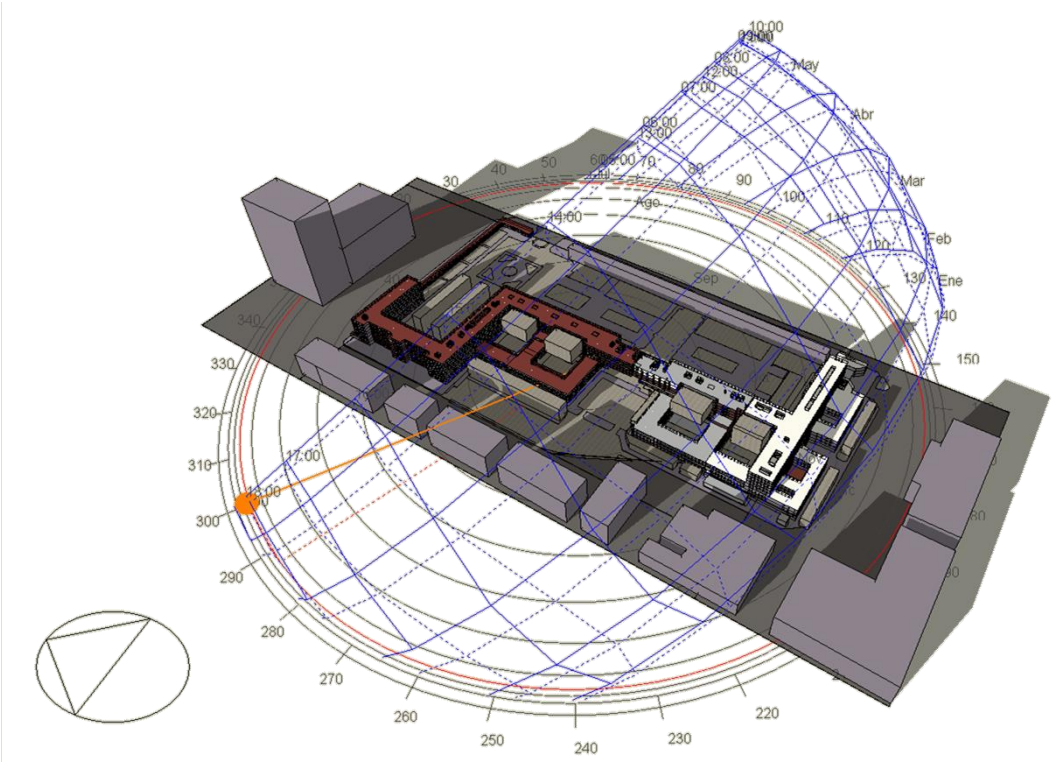


Figura 5-38. Estudio solar de la propuesta de espacios exteriores, NNMM. Fuente: Instituto Europeo de Innovación.

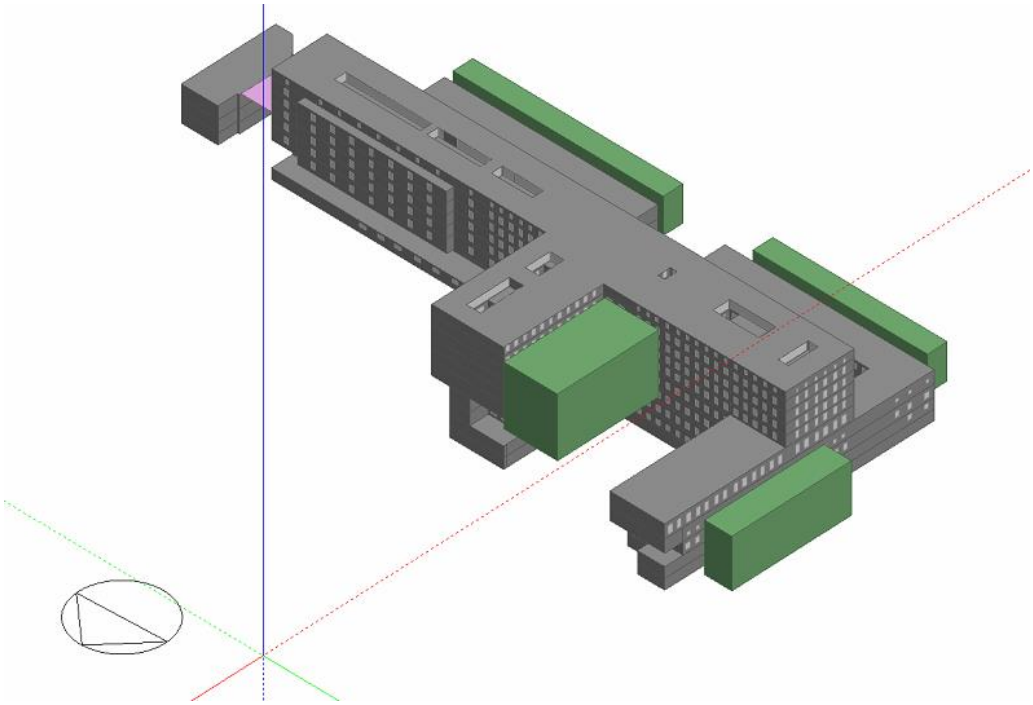


Figura 5-39. Propuesta para la plantación y ubicación de especies arbóreas. Fuente: Instituto Europeo de Innovación.

Se propone la plantación de un mínimo de 6 especies de vegetación autóctonas, incluyendo un mínimo de 2 entre las siguientes categorías de plantas: árboles, arbustos y cobertura del suelo. Esta estrategia es acorde con los requerimientos mínimos para el cumplimiento del crédito *Open Space*, *Protect or Restore Habitat* del sistema de certificación LEED BD+C New Construction v4.1.

Además, se considera la plantación de árboles que puedan lograr portes importantes, al menos equivalentes a la altura de las fachadas que se ven directamente afectadas por el sombreamiento generado por los mismos (altura fachada max. 30 m aprox.).

Dichos árboles se han modelado como bloques caracterizados por niveles de transparencia variables a lo largo del año, según ciclos estacionales (transparencia max. 100 % en invierno; transparencia min. 5 % en verano).

Los bloques se han colocado a una distancia de al menos 2-3 m de las fachadas sur y suroeste de los edificios. En efecto, como se puede observar en los resultados de la incidencia solar en fachadas, estas fachadas son las que se ven más afectadas por la radiación solar durante la época de verano.

5.2.3.2.2.4 Resultados

Reducción de la incidencia solar exterior

Se representa a continuación, con escala de colores, la incidencia solar por superficie (kWh/m²), a lo largo del mes de Julio, sobre la envolvente del edificio, antes y después de la reforma de los espacios exteriores.

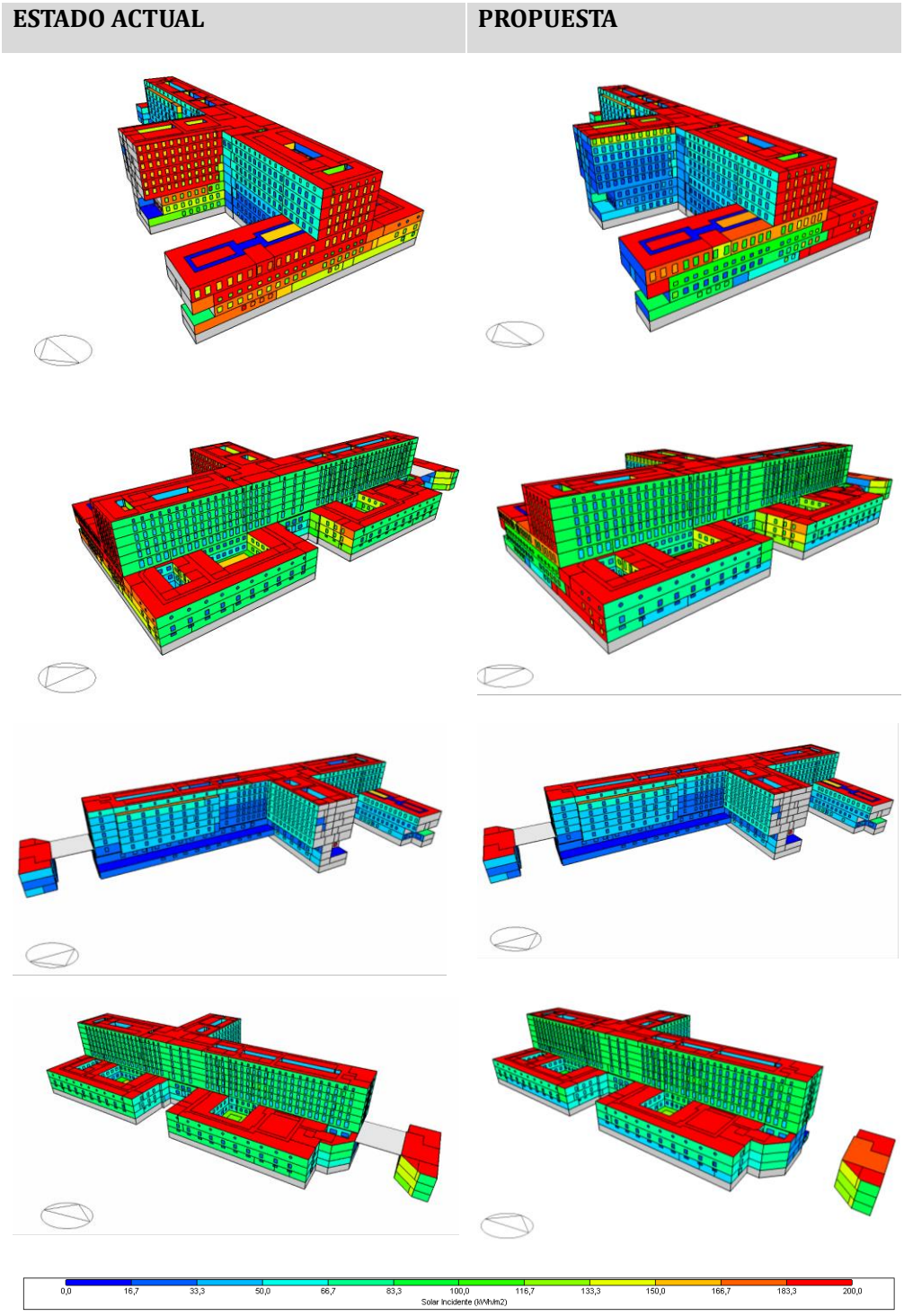


Figura 5-40. Estudio de la incidencia solar.
Fuente: Instituto Europeo de Innovación.

Reducción de la temperatura superficial exterior

Se representa a continuación, con escala de colores, el promedio mensual de temperaturas superficiales (ºC) en la envolvente del edificio del, alcanzadas en cubiertas y en cada fachada del edificio, calculado para el mes de Julio, antes y después de la reforma de los espacios exteriores.

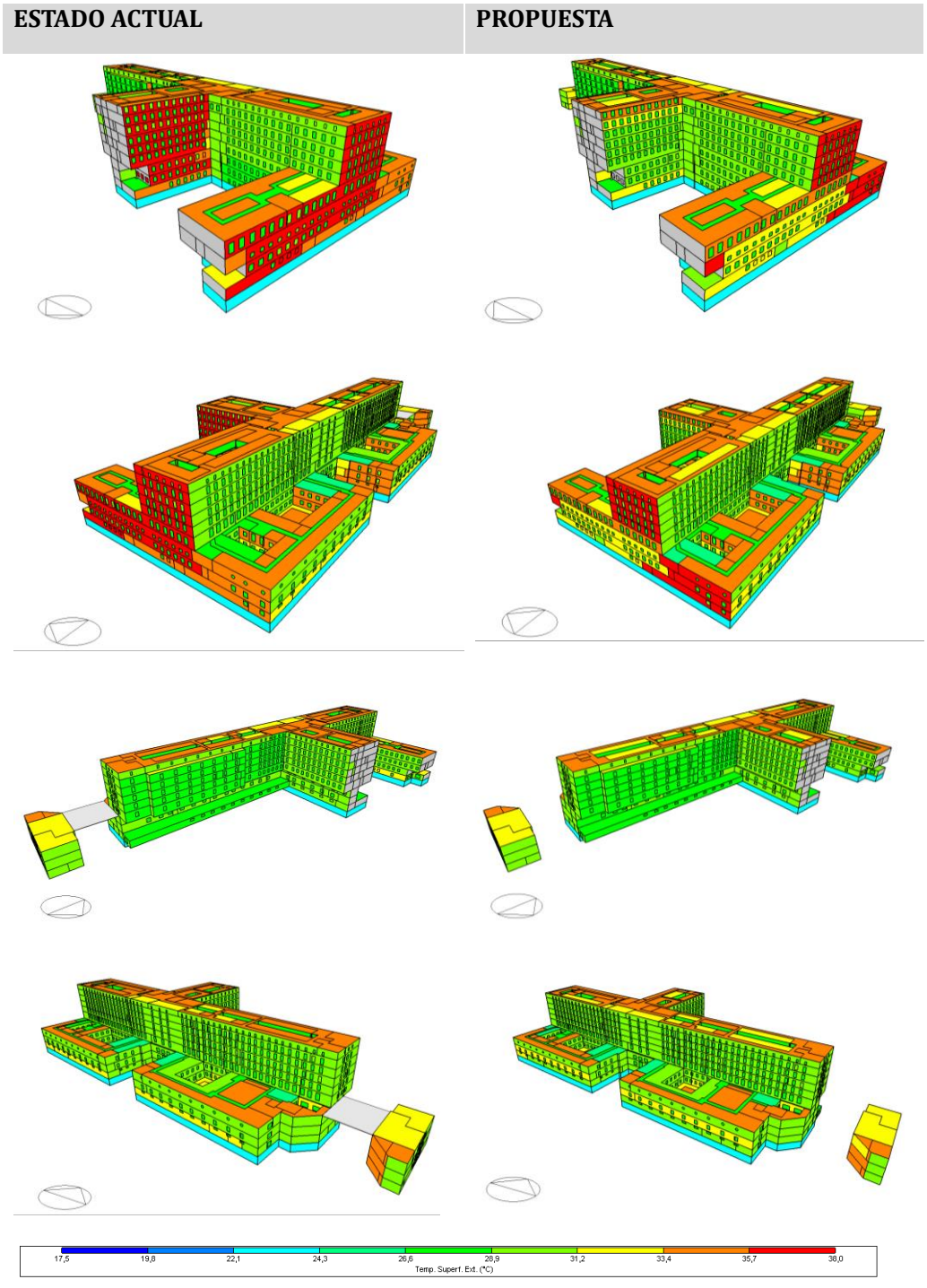


Figura 5-41. Estudio de las temperaturas superficiales exteriores, Fuente: Instituto Europeo de Innovación.

Reducción de las ganancias solares internas

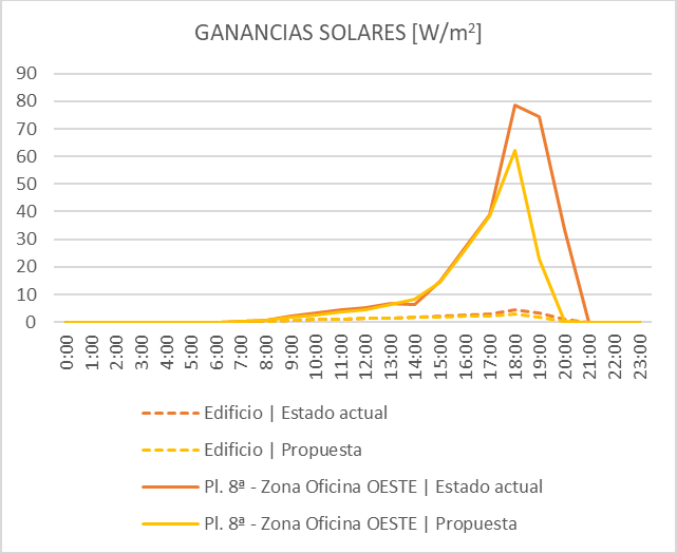


Figura 5-42. Variación de las ganancias solares [W/m₂] a lo largo de un día tipo de verano (15 de Julio de 2019) en el edificio y en una zona de oficinas con orientación oeste bajo cubierta. Fuente: Instituto Europeo de Innovación.

Se realiza el estudio a lo largo de un día tipo de verano soleado (15 de Julio de 2019). En términos generales, se observa una reducción de hasta el 60 % de las ganancias solares, alrededor de las 18:00, calculado para todo el edificio. En concreto, para una zona de oficinas con orientación oeste bajo cubierta, se observa una reducción de entre el 70 % y el 95 % en las horas de máxima ganancia solar (17:00-21:00), pasando de un pico máximo de 78 W/m² a 62 W/m² a las 18:00, cuando la fachada oeste se ve afectada por la radiación solar directa.

Reducción de la temperatura operativa interna

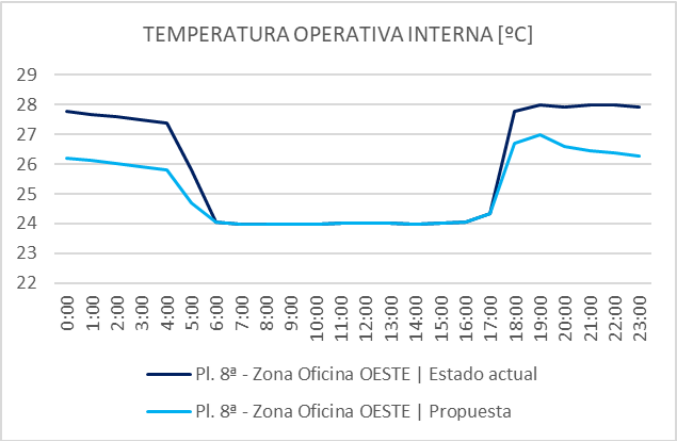


Figura 5-43. Variación de la temperatura operativa [ºC] en una zona de oficinas bajo cubierta a lo largo de un día tipo de verano (15 de Julio de 2019). Fuente: Instituto Europeo de Innovación.

Se realiza el estudio a lo largo de un día tipo de verano soleado (15 de Julio de 2019) en una zona de oficinas con orientación oeste bajo cubierta. Se observa una reducción de hasta el 6 % de la temperatura interior fuera del horario de funcionamiento del equipo de producción de frío (19:00-07:00), con una reducción de temperaturas de al menos 2 ºC durante la noche. Esto contribuye a la reducción de la carga que los equipos de frío deben contrarrestar cuando el sistema de climatización arranca a primera hora de la mañana, para alcanzar la temperatura de consigna establecida.

Reducción de la demanda de refrigeración

	TRATAMIENTO DE LOS ESPACIOS EXTERIORES	S VEGETALES	TOTAL R
	Reducción de la demanda de refrigeración	Reducción de la demanda de refrigeración	Reducción de la demanda de refrigeración
MITES	8 %	4 %	12 %
MITMA	11 %	7 %	18 %
TOTAL estimado	8 %	5 %	13 %

Tabla 5.9. Reducción de la demanda de refrigeración mediante las actuaciones en los espacios libres. Fuente: Instituto Europeo de Innovación.

- Reducción media de la demanda de refrigeración 10-15 %
- Reducción local de la demanda de refrigeración 20-25 %

		Demanda Actual (kWh)	Demanda Propuesta (kWh)	Ahorro %	Ahorro Consumos (kWh)	Factor conversión	Emisiones Actuales (kg/año)	Emisiones CO2 Ahorradas (kg/año)
	Refrigeración	1.720.772	1,617.525,68	6%	48.021,54	0.331	264.918,852	15.895,13
MITES	Refrigeración	1.280.942	1.127.228,96	12%	99.169,70	0.331	273.543,098	32.825,17
MITMA	Refrigeración	2.986.776	2.449.156,32	18%	298.677,60	0.331	549.234,920	98.862,29

Tabla 5.10. Reducción de la demanda y reducción de emisiones obtenida mediante las actuaciones en los espacios libres.
Fuente: Instituto Europeo de Innovación.

5.2.3.2.2.5 Especies vegetales recomendadas

En la Tabla 5.11 se detalla un catálogo de árboles y especies vegetales autóctonas de bajo requerimiento hídrico, recomendadas para la propuesta de ajardinamiento de los espacios exteriores del complejo de los NNMM, acordes con los criterios de la certificación de sostenibilidad LEED BD+C New Construcción v4.1.

Especies	Nombre científico	Origen	Necesidad hídrica	Tipos de suelos	Exposición al sol	Heladas	Tipo de hoja	Otras características	Altura máxima
AILANTO	Ailanthus altissima (Miller)	ALÓCTONO	MUY BAJA	Todo tipo de suelos	SI	SOPORTA	CADUCA	Especia muy invasora, rebrota con facilidad	27 m
ALMENDRO	Prunus dulcis (Miller)	AUTOCTONO	BAJA	Todo tipo de suelos, mejor calizos	SI	SOPORTA	CADUCA		3-5 m
ALMEZ	Celtis Australis L.	AUTOCTONO	BAJA	Todo tipo de suelos	SI	SOPORTA	CADUCA		20-25 m
ÁRBOL DEL AMOR	Cercis siliquastrum	ALÓCTONO	BAJA	Suelos fértiles, profundos y bien drenados	SI	SOPORTA	CADUCA	Floración espectacular	4-6 m
ACACIA DEL JAPÓN	Sophora japonica	ALÓCTONO	BAJA	Todo tipo de suelos	SI	SOPORTA	CADUCA	Carece de espinas	20 m
FRESNO	Fraxinus sp.	AUTOCTONO	MUY BAJA	Suelos frescos con elevado nivel freático	SI	SOPORTA	CADUCA	Común en Riberas	15-20 m
CIPRÈS	Cupressus sp.	ALÓCTONO	BAJA	Todo tipo de suelos	SI	SOPORTA MAL	CADUCA	Árbol cultivado desde los fenicios	25- 30 m
HIGUERA	Ficus carica	AUTOCTONO	BAJA	Todo tipo de suelos, mejor húmedos	SI	SOPORTA MAL	CADUCA		7-8 m
MENBRILLERO	Cydonia oblonga	ALÓCTONO	MUY BAJA	Suelos frescos y ligeros	SI	SOPORTA	CADUCA	Frutal muy productivo	4-6 m
MORERA PAPELERA	Broussonetia papyrifera	ALÓCTONO	BAJA	Suelos calizos y secos	SI	SOPORTA	CADUCA	Ideal para sombra en verano	10-15 m
PINOS	Pinus sp.	ALÓCTONO Y AUTOCTONO	BAJA	Suelos arenosos	SI	SOPORTA	CADUCA	Muchas especies de gran porte arborero que necesitan espacio	30 m

Tabla 5.11. Especies vegetales recomendadas para la propuesta (arboles).
Fuente: Instituto Europeo de Innovación.

Especies	Nombre científico	Origen	Necesidad hídrica	Tipos de suelos	Exposición al sol	Heladas	Tipo de hoja	Otras características	Altura máxima
AGRACEJO	Berberis sp.	AUTÓCTONO	BAJA	Todo tipo de suelos, especialmente suelos pedregosos, calizos	SI	SOPORTA	CADUCA	Produce fruto comestible para la fauna	2 m
ALIGUSTRE	Ligustrum vulgare / Ligustrum japonica	ALÓCTONO Y AUTÓCTONO	MUY BAJA	Suelos frescos preferiblemente calizos	SEMISOMBRA	SOPORTA	CADUCA	El japonés es de hoja perenne	3 m
BOLINA	Santolina chamaecyparissus	AUTÓCTONO	BAJA	Todo tipo de suelos	SI	SOPORTA	CADUCA		50 cm
CORNICABRA	Pistacia terebinthus	AUTÓCTONO	MUY BAJA	Todo tipo de suelos	SI	SOPORTA	CADUCA		4 - 6 m
CELINDA	Philadelphus coronarius	AUTÓCTONO	MUY BAJA	Todo tipo de suelos	SEMISOMBRA	SOPORTA	CADUCA	Bonita floración	3 m
EFEDRA	Efedra fragilis	AUTÓCTONO	MUY BAJA	Suelos básicos y yesoso	SI	SOPORTA	CADUCA	Para suelos muy pobres	2 m
ENDRINO	Prunus spinosa	AUTÓCTONO	MUY BAJA	Todo tipo de suelos	SI	SOPORTA	CADUCA	Con sus frutos se elabora el Pacharán	2,5 m
ESPANTALOBOS	Colutea arborescens	AUTÓCTONO	BAJA	Suelos calizos y yesosos	SI	SOPORTA	CADUCA	Frutos de gran originalidad	3 m
LANTANA	Viburnum lantana	AUTÓCTONO	BAJA	Suelos calizos y soporta silíceos	SI	SOPORTA	CADUCA	Produce fruto comestible para la fauna	2,5 m
LENTISCO	Pistacia lentiscos	AUTÓCTONO	BAJA	Suelos calizos	SI	SOPORTA	CADUCA	Produce fruto comestible para la fauna	1 - 5 m
LILO	Syringa vulgaris	ALÓCTONO	BAJA	Todo tipo de suelos	SI	SOPORTA	CADUCA	Sensible al ataque de hongos	5 m
MAJUELO	Crataegus monogyna	AUTÓCTONO	BAJA	Todo tipo de suelos	SI	SOPORTA	CADUCA	Produce fruto comestible para la fauna	4 - 6 m
MANZANO	Malus sp.	AUTÓCTONO	MUY BAJA	Todo tipo de suelos	SI	SOPORTA	CADUCA	Produce fruto comestible para la fruta	7,5 - 10 m
MUNDILLO	Viburnum opulus	AUTÓCTONO	BAJA	Suelos frescos, ricos en materia orgánica	SEMISOMBRA	SOPORTA	CADUCA	Produce fruto comestible para la fauna	4 m
OLIVILLA	Phillyrea angustifolia	AUTÓCTONO	BAJA	Todo tipo de suelos	SI	SOPORTA	CADUCA		2 m
SALADO	Atriplex halimus	AUTÓCTONO	MUY BAJA	Todo tipo de suelos	SI	SOPORTA	CADUCA		2 m

Tabla 5.12. Especies vegetales recomendadas para la propuesta (arbustos).
Fuente: Instituto Europeo de Innovación.

Especies	Nombre científico	Origen	Necesidad hídrica	Tipos de suelos	Exposición al sol	Heladas	Otras características
ACANTO	Ancanthus molis	ALÓCTONO	BAJA	Todo tipo de suelos	SEMISOMBRA	SOPORTA MAL	
CLAVELINAS	Dianthus sp.		BAJA	Todo tipo de suelos	SI	SOPORTA	Floraciones veraniegas
DON DIEGO DE NOCHE	Myrabilis jarapa	ALÓCTONO	BAJA	Todo tipo de suelos	SI	NO SOPORTA	Puede ser invasivo
DIGITAL	Digitalis sp.	AUTÓCTONO	BAJA	Suelos silíceos, arenosos y pedregosos	SI		Planta tóxica
MALVARROSA	Nerium oleander	ALÓCTONO	BAJA	Todo tipo de suelos	SI	SOPORTA	Floración veraniega
MILENRAMA	Achilea filipendulita	ALÓCTONO	BAJA	Todo tipo de suelos	SI	SOPORTA	Floración veraniega
ORÉGANO	Origanum vulgare	AUTÓCTONO	BAJA	Suelos calizos y soporta ácidos	SI		Fácil de reproducir
SIEMPREVIVA	Sedum sp.	AUTÓCTONO	MUY BAJA	Todo tipo de suelos	SI	SOPORTA	Se utiliza para cubrir azoteas

Tabla 5.13. Especies vegetales recomendadas para la propuesta (vivaces). Fuente: Instituto Europeo de Innovación.

Especies	Nombre científico	Origen	Necesidad hídrica	Tipos de suelos	Exposición al sol	Heladas	Otras características
FALSA VIÑA	Partenocissus quinquefolia	ALÓCTONO	BAJA	Todo tipo de suelos	SI	SOPORTA	Hoja caduca
GLICINA	Wisteria sinensis	ALÓCTONO	BAJA	Todo tipo de suelos	SI	SOPORTA	Agresiva con las construcciones
HIEDRA	Hedera helix	AUTÓCTONO	BAJA	Todo tipo de suelos	SEMISOMBRA	SOPORTA	Cubridora de suelos y paredes
HIPÉRICO	Hipéricum calicinum	ALÓCTONO	BAJA	Todo tipo de suelos	SEMISOMBRA	SOPORTA	Floración veraniega
JAZMÍN SILVESTRE	Jasminum fruticans	AUTÓCTONO	BAJA	Suelos silíceos	SI	SOPORTA	
MADRE SELVA	Lonicera sp.	AUTÓCTONO	BAJA	Todo tipo de suelos	SEMISOMBRA	SOPORTA	
POLÍGONO	Polygonum sp.	ALÓCTONO	BAJA	Todo tipo de suelos	SI	SOPORTA	
VINCA	Vinca sp.	ALÓCTONO	BAJA	Suelos bien drenados	SOMBRA	SOPORTA	Floración primaveral

Tabla 5.14. Especies vegetales recomendadas para la propuesta (trepadoras y tapizantes). Fuente: Instituto Europeo de Innovación.

5.2.3.2.2.6 Conclusiones sobre los beneficios asociados a la recuperación del espacio exterior y su consideración como envolvente exterior del edificio.

La reflexión de la radiación y los procesos de evapotranspiración, a través de las superficies exteriores, permiten una reducción de las cargas y la mejora de la calidad ambiental en el entorno del conjunto de los NNMM.

La vegetación reduce la denominada "isla de calor" y libera vapor de agua al aire a través de las hojas, presentando varios beneficios en términos de eficiencia energética y sostenibilidad.

A esto hay que sumarle los efectos del sombreamiento generado por los árboles de porte grande y hoja caduca sobre las fachadas.

Los resultados de las simulaciones demuestran que las fachadas oeste son las más afectadas por la incidencia solar directa. En este cerramiento, a lo largo del mes de Julio, se alcanzan valores de incidencia solares de 200 kWh/m^2, con temperaturas medias superficiales de 38 ºC.

La colocación estratégica de árboles de hoja caduca en orientaciones Sur y Oeste permiten conseguir sombras en verano, llegando a reducir la temperatura superficial de las fachadas de más de 5 ºC en verano, dejando que en invierno los cerramientos y los huecos en fachadas capten la mayoría de la radiación solar y de la iluminación natural.

Las cubiertas vegetales también contribuyen en la reducción de la temperatura superficial de las mismas, y a la reducción de las temperaturas internas de hasta 2 ºC, sobre todo durante la noche, gracias al enfriamiento evaporativo que se realiza a través de la transpiración de las plantas.

Para todo el conjunto, se ha calculado que el tratamiento de los espacios exteriores, incluyendo la plantación de árboles para generar sombreamiento, supone una reducción de hasta el **8 %** de la demanda de refrigeración anual. A este porcentaje, hay que sumarles los efectos de la transformación de la cubierta en cubierta vegetal, que supone una reducción adicional del **5 %** de la demanda de refrigeración anual para todo el conjunto de los NNMM.

Además de los beneficios vinculados con eficiencia energéticas, se reconocen beneficios relacionados con la sostenibilidad y con el bienestar humano, en términos de confort termo-higrotérmico, mental y visual, que se contemplan en

la mayoría de las certificaciones de sostenibilidad y bienestar de los edificios actualmente en vigor.

5.2.3.2.3 Rehabilitación y transformación de las zonas de aparcamiento en sistemas de movilidad sostenible, eléctrica y multimodal

5.2.3.2.3.1 Descripción

La liberación de espacio exterior con el objetivo de aumentar la infraestructura verde, la calidad ecosistémica del entorno del edificio y el comportamiento bioclimático y la reducción de demanda de energía, fundamentalmente en refrigeración, del Complejo de NNMM, a la vez que se plantea un avance definitivo en la gestión integrada de la información y la energía para la transformación de los aparcamientos de los funcionarios de NNMM en el sentido de la movilidad sostenible, eléctrica y multimodal.



Figura 5-44. Solución de aparcamiento subterráneo mecanizado.
Fuente: Instituto Europeo de Innovación.

La movilidad sostenible, está por tanto vinculada a la rehabilitación de los espacios exteriores a través del uso de tecnología semi automática de

compactación del espacio que reduce la ocupación de los vehículos en un 75 %, de 31 m² de ocupación por vehículo a 8m². Esta fórmula permite:

- Una reducción drástica del impacto espacial de los aparcamientos sin reducir su capacidad.
- La implementación de recarga eléctrica para el 100 % de las plazas, integrando varios modos de transporte eléctrico, compartido y ligero
- La implementación de un sistema de información y control
- Y la implementación de una metodología de gestión integral, compatible y colaborativa con los sistemas de gestión individuales, orientada a la eficiencia del complejo de NNMM.

5.2.3.2.3.2 Alcance

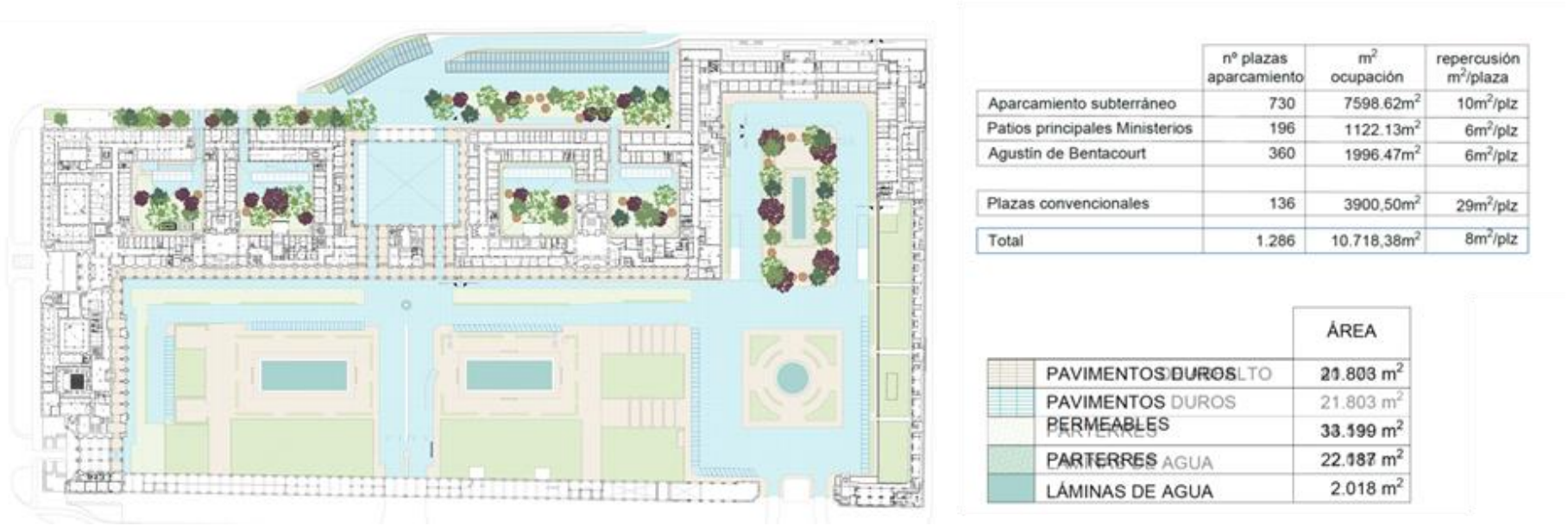
Planos y tablas de distribución, número de plazas y repercusión en superficie de los aparcamientos en su estado actual y estado propuesto. Se mantiene el número de plazas y se reduce a un 25 % la ocupación del espacio, liberando el 65 % del espacio ocupado actual del aparcamiento para espacio de uso público y ajardinado.



	nº plazas aparcamiento	m² ocupación	repercusión m²/plaza
Jardines Nuevos Ministerios	830	24.090,59m²	32m²/plz
Patios principales Ministerios	292	9.154,17m²	32m²/plz
Agustín de Bentacourt	300	8.175,47m²	29m²/plz
Total	1.422	41.420,23m²	31m²/plz

	ÁREA
PAVIMENTO DE ASFALTO	40.876 m²
PAVIMENTOS DUROS	21.803 m²
PARTERRES	14.510 m²
LÁMINAS DE AGUA	2.018 m²

Figura 5-45. Plano del estado actual de los espacios exteriores, NNMM.
Fuente: Instituto Europeo de Innovación.



	nº plazas aparcamiento	m^2 ocupación	repercusión m^2/plaza
Aparcamiento subterráneo	730	7598.62m^2	10m^2/plz
Patios principales Ministerios	196	1122.13m^2	6m^2/plz
Agustín de Bentacourt	360	1996.47m^2	6m^2/plz
Plazas convencionales	136	3900,50m^2	29m^2/plz
Total	1.286	10.718,38m^2	8m^2/plz

	ÁREA
PAVIMENTOS DUROS ASFALTO	21.803 m^2
PAVIMENTOS DUROS	21.803 m^2
PERMEABLES	33.199 m^2
PARTERRES	22.187 m^2
LÁMINAS DE AGUA	2.018 m^2

Figura 5-46. Plano de Propuesta de vegetación y rediseño de los espacios exteriores.
Fuente: Instituto Europeo de Innovación.



Figura 5-47. Plano de Propuesta de vegetación y rediseño de los espacios exteriores.
Fuente: Instituto Europeo de Innovación.

Tablas de reducción de la demanda y reducción de emisiones por actuaciones en la transformación de los espacios de aparcamiento.

	CONSUMOS Y EMISIONES POR PLAZA		CONVENCIONAL subterráneo	SEMIAUTOMÁTICO subterráneo	REDUCCION por plaza	REDUCCIÓN 1.166 plazas
ENERGIA INCORPORADA	Fabricación de material y construcción (por plaza)	Energía incorporada (kWh)	23.844,00	17.936,00	5.908,00	
		Emisiones de CO_2 (t)	7,172	4,275	2.897,00	
	Transporte de material (por plaza)	Energía incorporada (kWh)	1.344,00	601,36	742,64	
		Emisiones de CO_2 (t)	343,73	153,92	189,81	
		TOTAL ENERGÍA (kWh)			6.650,64	7.754.646,24
		TOTAL EMISIONES CO_2 (kg)			3.086,81	3.599.220,46

Tabla 5.15. Comparativa de la energía incorporada y de las emisiones de gases con efecto invernadero correspondientes a sistemas de aparcamiento convencional y semiautomático, en edificio subterráneo.
Fuente: Guía de Ahorro Energético en Garajes y Aparcamientos. [105]

	CONSUMOS Y EMISIONES POR PLAZA		CONVENCIONAL subterráneo	SEMIAUTOMÁTICO subterráneo	REDUCCION por plaza	REDUCCIÓN 1.166 plazas 210 días/año
OPERACIÓN DE APARCAMIENTOS Y VEHÍCULOS	Operación Edificios (por ciclo de entrada + salida)	Energía incorporada (Wh)	300,00	166,70	133,50	
		Emisiones de CO_2 (g)	101,10	57,02	44,08	
	Operación de vehículos (por ciclo de entrada + salida)	Energía incorporada (Wh)	65,00	32,00	33,00	
		Emisiones de CO_2 (g)	21,40	10,58	10,82	
		TOTAL ENERGÍA (Wh)	365,20	198,70	166,50	40.796,19 kWh/año
		TOTAL EMISIONES CO_2 (g)	122,50	67,60	54,90	13.442,81 kg/año

Tabla 5.16. Comparativa de la energía consumida y de las emisiones de gases con efecto invernadero correspondientes a sistemas de aparcamiento convencional y semiautomático, en la operación de un aparcamiento subterráneo y en la circulación de los vehículos dentro del aparcamiento.
Fuente: Guía de Ahorro Energético en Garajes y Aparcamientos. [105]

CONSUMOS Y EMISIONES POR PLAZA / AÑO		Vehículo TÉRMICO	Vehículo ELÉCTRICO	REDUCCIÓN por km	REDUCCIÓN 1.286 plazas 210 días/año. 10 km
Circulación de vehículos por trayecto de ida y retorno. 2x5 km.	Energía consumida (kWh/km)	0,50	0,23	0,27	734.302,11 kWh/año
	Emisiones COS_2 (g/km)	168	78	90	243.054,00 $kgCO_2$/año

Tabla 5.17. Comparativa de la energía consumida y de las emisiones de gases con efecto invernadero correspondientes al trayecto hasta y desde el punto de trabajo.
Fuente: Guía de Ahorro Energético en Garajes y Aparcamientos. [105]

5.2.4. Actuaciones para la reducción del consumo correspondiente a la generación de la energía que cubre la demanda final y reducción de emisiones correspondiente a dicha reducción del consumo

5.2.4.1. Red de ecodistrito de 5ª generación y sistema integrado de control

5.2.4.1.1 Descripción. Sistema de ecodistrito de 5ª generación y gestión integrada multiescala

En los sistemas de calefacción y enfriamiento de distrito, no es necesario que la generación de calor y frío se realice en los edificios. En su lugar, se cuenta con un sistema a nivel urbano que puede realizar total o parcialmente de esta tarea.

Estas redes comúnmente trabajan a temperaturas extremas (elevadas para calefacción, alrededor de 80-90 °C; y muy bajas para refrigeración, por debajo de 0 °C) que implican pérdidas significativas de calor o frío. Además, trabajando a estas temperaturas de generación se desaprovechan las fuentes de energía de bajo grado, las residuales y las fuentes de energías renovables.

Con el objetivo cada vez mayor de la descarbonización y el uso de energías residuales, los sistemas de calefacción y refrigeración de distrito están acercándose cada vez más a un régimen de temperaturas moderadas, en la búsqueda de menores pérdidas térmicas en la red, y la posibilidad de aprovechar más eficientemente todas las fuentes de calor residual disponibles, como es el caso en el CNNMM donde se propone bajar la temperatura de producción asegurando los niveles térmicos de seguridad de consumo (legionela) y confort.

Hemos desarrollado extensamente la descripción de las distintas dimensiones de los sistemas DHC más novedosos de 5ª generación permiten a cada consumidor no solo extraer energía de la red, sino también suministrarla desde su propio sistema refrigeración y enfriamiento de espacios. Este factor es fundamental en NNMM por el importante potencial de intercambio entre los Ministerios que constituyen el Complejo, que vamos a aprovechar incorporando sus recursos térmicos a la red de distrito, donde se incorporan también todos los recursos renovables y donde se pueden ejecutar estrategias de gran eficiencia de intercambio y almacenamiento para reducir la producción, reducir el consumo y reducir las emisiones.

Existen cuatro áreas principales en las que la instalación de un sistema DH&C brinda beneficios significativos, según las fuentes consultadas, como la "Guía Básica Redes de Distrito de Calor y Frío" del IDAE y la ADHAC - Asociación de Empresas de Redes de Calor y Frío, Districlima.

Beneficios para el medio ambiente

- En general, se emplean fuentes de energía residuales y dispositivos energéticamente eficientes, reduciendo de esta manera el uso de energía primaria proveniente de combustibles fósiles.
- La disminución de la emisión de gases de efecto invernadero se logra al utilizar una solución energéticamente más eficiente.
- Se ha logrado una significativa disminución de la emisión de refrigerante a la atmósfera en comparación con los sistemas tradicionales.
- Reducción de los niveles de sonido y movimiento en los edificios enlazados al sistema.
- El sistema asegura que las azoteas y fachadas no tengan ningún impacto visual.

Beneficios económicos

- Se propone disminuir significativamente la cantidad de potencia eléctrica requerida en sistemas de refrigeración.
- El consumidor puede ahorrar en su factura de energía.
- Disminución del gasto en mantenimiento y menor exigencia de conocimientos técnicos especializados.
- No es necesario adquirir ni renovar los equipos de producción propios.
- La previsión de la facturación energética se vuelve más sencilla.
- Se facilita la estimación de la facturación energética.
- La facturación energética puede ser prevista con mayor facilidad.
- La estimación de la facturación energética se realiza más fácilmente.
- Se mejora la capacidad de prever la facturación energética.

- Mayor capacidad para utilizar el espacio para la venta o para cualquier otro propósito.
- Edificios modernos con características excepcionales que los distinguen.

Beneficios de la seguridad

- Seguridad y continuidad del suministro están aseguradas mediante nuestra garantía.
- Nuestra garantía asegura la seguridad y continuidad del suministro.
- La seguridad y continuidad del suministro están garantizadas por nosotros.
- Con nuestra garantía, puedes estar seguro/a de que el suministro será seguro y continuo.
- Prevención de peligros para la salud.
- Especialistas se encargan de supervisar las instalaciones y subestaciones de manera continua.
- No hay presencia de gases inflamables en el interior del edificio.

Beneficios de uso

- Adaptabilidad: el servicio se encuentra disponible en todo momento, sin requerir una planificación anticipada, y puede ajustarse a las diversas necesidades del usuario de manera sencilla. Además, resulta conveniente ampliar la capacidad de potencia sin necesidad de realizar una inversión significativa en equipos propios.
- La confiabilidad del servicio ofrecido se asegura gracias a la redundancia y a la calidad de los equipos, así como a su automatización, supervisión constante y al equipo altamente capacitado encargado de ello.
- Facilidad: montajes más simples y de menor costo de mantenimiento. Una mejora en la facilidad de operación de las instalaciones se presenta debido a que el edificio no es responsable de la generación de energía. Se puede ahorrar espacio usando techos libres de objetos y salas técnicas de tamaño reducido. No se perciben vibraciones, ruidos ni elementos visuales molestos como resultado de la eliminación de los aparatos de aire acondicionado o las chimeneas.

5.2.4.1.2 Implantación de la red de distrito e 5ª generación en el CNNMM

Se trata de la implantación en la calle de Agustín de Betancourt, patio trasero del CNNMM, de un sistema de calefacción y refrigeración de distrito de 5ª generación con fuentes residuales y renovables, que incorporará e integrará bajo un marco de gestión integrada los edificios y los recursos energéticos del entorno y pondrá la energía térmica de bajo grado al alcance de los tres Ministerios para la climatización de los diferentes edificios en el complejo edificatorio de NNMM.

El sistema consistirá en un anillo de producción a baja temperatura (~20-30ºC) en combinación con bombas de calor que operará como foco de condensación de los edificios consumidores; y un anillo de producción a muy baja temperatura (~10-20 ºC) en combinación con bombas de calor que operará como foco de evaporación de los edificios consumidores.

La red de conexión con cada punto de consumo será de 4 tubos dando servicio de calor y frío de forma continuada. Cada edificio consumidor, además de disponer de un nodo de conexión a la red de distrito, dispondrá de un sistema propio de producción de calor y frío, y una red propia de 4 tubos de transporte y distribución de calor y frío por el interior del edificio.

5.2.4.1.3 Centro de generación

Ubicado en la antigua sala de calderas el centro de generación contará con una central de producción basada en fuentes renovables y residuales. Se trata de sistema de alto rendimiento y bajo coste energético para cubrir la demanda base del distrito: en otras palabras, el sistema priorizará el rendimiento frente al consumo y no pretenderá cubrir las cargas pico. Como apoyo en momentos de severidad climática o en momentos en que las cargas de calor o frío a combatir requieran disponer de potencia adicional en calor o frío, cada edificio mantendrá un sistema propio para cubrir dichas cargas pico.

Los rangos de temperatura de operación de la red son de especial importancia, pues cuanto más baja sea la temperatura de calefacción y más elevada la temperatura de refrigeración, se conseguirán mejores rendimientos en la operación de los sistemas.

El anillo de producción a temperatura moderada hará la función de foco de condensación de las bombas de calor agua-agua de los edificios consumidores en los momentos de refrigeración; este anillo habrá de mantener rangos de

temperatura moderada (~20-30 ºC) que garanticen que dichas bombas de calor produzcan frío con rendimientos estacionales EER que permitan ser considerados como energía renovable.

El anillo de producción a baja temperatura hará la función de foco de evaporación de las bombas de calor agua-agua de los edificios consumidores en los momentos de calefacción; este anillo habrá de mantener rangos de baja temperatura (~10-20 ºC) que garanticen que dichas bombas de calor produzcan calor con coeficientes de rendimiento COP que permitan ser considerados como energía renovable.

El centro de generación contará con un circuito de captación geotérmico, un circuito de captación hidrotérmico de aguas residuales, y un circuito de captación aerotérmica. La potencia total del sistema garantizara al menos 2 MW de potencia térmica máxima en momentos de máxima demanda (ya sea calor o frio). En épocas intermedias, la disposición del anillo permitirá poder intercambiar calor y frío entre ambos focos, de modo que a la potencia máxima del sistema se pueda añadir el excedente de energía residual de uno de los focos sumando una producción total superior a 2 MW. Asimismo, en momentos en que el balance térmico de los edificios sea neutro, el anillo permitirá compensar la disipación de calor y disipación de frío sin requerir el arranque de las máquinas de producción del 5GDHC.

Como se ha indicado más arriba, cada edificio consumidor, además de disponer de un nodo de conexión a la red de distrito, dispondrá de un sistema propio de producción de calor y frío, y una red propia de 4 tubos de transporte y distribución de calor y frío por el interior del edificio.

5.2.4.1.4 Fuentes renovables

La red de distrito de 5ª generación integra los recursos excedentes de los tres ministerios, que tienen una gestión energética independiente, y también las fuentes de energía de bajo grado, dotadas de capacidad de almacenamiento como las geoestructuras energéticas de los aparcamientos subterráneos o instantáneas, como el intercambio con las aguas residuales del colector que recoge las aguas del barrio de Ríos Rosas y que está ubicado bajo el patio trasero del complejo de NNMM. También la aerotermia es un recurso instantáneo de intercambio con el aire. Los tres recursos se integran en la 5GDHC donde interaccionan entre ellos y con los edificios. Para generar la energía térmica en forma de calor o frío se emplearán bombas de calor agua-

agua y aire-agua con compresor alimentado mediante energía eléctrica. La producción de calor o frío con equipos de mayor potencia permite inversiones en equipos de producción de mayor calidad y rendimiento.

Las fuentes renovables con las que contará el sistema serán: sondeos geotérmicos verticales en circuito cerrado; sistema hidrotérmico de captación de aguas residuales de la red de alcantarillado municipal; sistema de captación aerotérmico mediante bomba de calor. Otras fuentes renovables podrán ser añadidas siempre que garanticen la renovabilidad del conjunto sin el uso de combustibles fósiles.

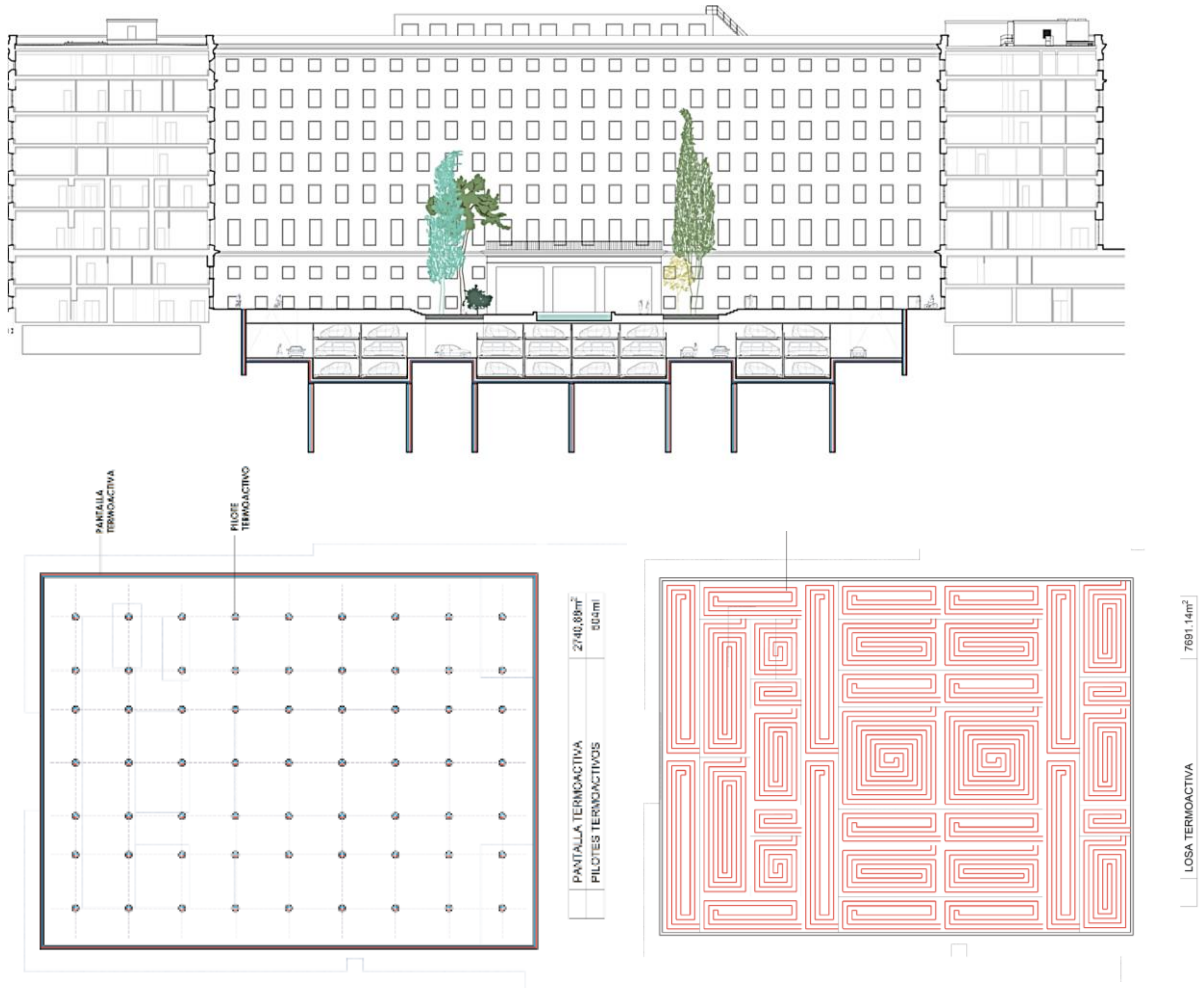


Figura 5-48. Geoestructuras energéticas en las instalaciones del aparcamiento subterráneo.
Fuente: Instituto Europeo de Innovación.

El reparto por fuentes para garantizar la potencia total del sistema de al menos 1 MW térmico es:

- **Campo de captación geotérmico:** El intercambiador geotérmico estará integrado en la estructura de muros y losas del aparcamiento subterráneo, geoestructuras energéticas (Figura 5-48). La cobertura de la potencia total demandada para el campo geotérmico y su balance térmico anual se evaluará mediante la realización de un test de respuesta térmica o TRT de acuerdo con la directriz VDI 4640 [106], contrastándolo y modelizándolo con los valores de cargas térmicas y la curva de demanda térmica de los edificios. La potencia térmica máxima de captación de este sistema de producción renovable debe estar en torno a 700 kW térmicos, y los cálculos justificativos habrán de ser validados por el promotor del proyecto.
- **Intercambiador de aguas residuales:** consistirá en la implantación de uno o varios sistemas de intercambio de calor con aguas residuales de la red de alcantarillado. El caudal y la temperatura medios de estas aguas residuales habrá de ser analizado, siendo el caudal medio esperable próximo a los 350 m^3/h y la temperatura media de 15 ºC. Tras el intercambio térmico con el sistema propuesto, el salto térmico de las aguas de alcantarillado a la salida del intercambiador o intercambiadores propuestos no debe ser superior a ± 2 ºC. La potencia térmica máxima de captación de este sistema de producción renovable debe estar en torno a 750 kW térmicos, y los cálculos justificativos habrán de ser validados por el promotor del proyecto.

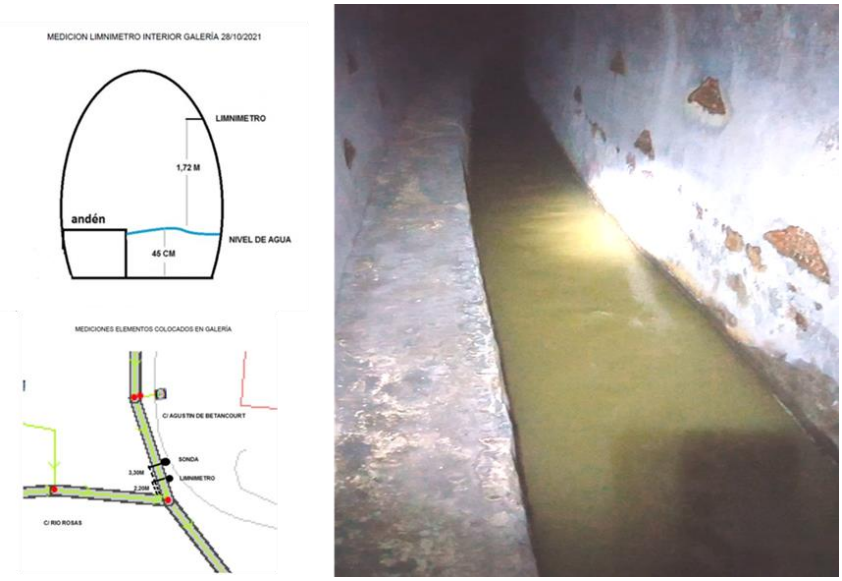


Figura 5-49. Colector de aguas residuales del Barrio de Ríos Rosas bajo el patio del CNNMM. Fuente: Instituto Europeo de Innovación.

- **Sistema aerotérmico:** consistirá en una o varias bombas de calor aire-agua a 4 tubos con compresores Scroll y potencia de calefacción total del conjunto de 600 kW para condiciones de temperatura exterior de -3 ºC. Este sistema a 4 tubos podrá producir calor y frío simultáneo para sendos colectores de calor y de frío del anillo DH&C, y en caso de excedentes, se disiparán al ambiente mediante el ventilador equipado con variadores de velocidad.

5.2.4.1.5 Red de tuberías de distribución del DH&C

La infraestructura de tuberías del DH&C posibilita el transporte de líquidos desde el punto de origen hasta su entrega a los usuarios. La base de todos los sistemas es el agua, utilizando habitualmente tuberías aisladas que suelen estar enterradas y distribuyendo a través de conductos subterráneos. La totalidad de la red estará compuesta por 4 tubos, proporcionando un servicio ininterrumpido de calor y frío. La red se estructura en varios niveles en función de la energía a transportar:

Red troncal o anillo: recircula el calor (o el frío) en un anillo comunicado entre el colector de temperatura moderada (~20-30 ºC) o colector de condensación, y el colector de baja temperatura (~10-20 ºC) o colector de evaporación. Se tratará preferentemente de tubos metálicos aislados de grandes diámetros, operando a altos caudales. Las presiones de trabajo serán preferentemente inferiores a 6 bar.

Ramales fuentes renovables: conducen el calor (o el frío) desde cada sistema de captación renovable hasta la red troncal o anillo. Se emplearán preferiblemente tuberías poliméricas aisladas con caudales medios y presiones de trabajo inferiores a 6 bar. desde los sistemas renovables.

Ramales de consumo: conducen el calor (o el frío) desde los colectores de condensación o evaporación de la red troncal hasta las subestaciones o puntos de consumo. Se tratará de tubos metálicos aislados de grandes diámetros, operando a altos caudales. Las presiones de trabajo serán preferentemente inferiores a 6 bar.



Figura 5-50. Ámbito físico de implantación de la red de distrito de 5ª generación en el CNNMM. Fuente: Instituto Europeo de Innovación.

5.2.4.1.6 Subestaciones

La energía térmica se transferirá de la red de distribución a los edificios en grupos aprobados por el operador del distrito. Estos grupos establecerán los límites de propiedad y responsabilidad entre la red y los consumidores, y registrarán la cantidad de energía utilizada.

Las subestaciones se encargarán de ajustar la presión y la temperatura de la red de distribución de acuerdo a las condiciones requeridas para el consumo del edificio, y asegurarán los cambios en la temperatura necesarios para lograr una alta eficiencia en el sistema.

Dado que se trata de una red de baja temperatura y con presiones que se pueden manejar en un entorno doméstico, se puede instalar un sistema de conexión directa en el cual no exista una distinción física entre la red principal y la del usuario.

Ahora bien, para garantizar el equilibrio de temperaturas y caudales ajustados a los colectores internos de cada edificio consumidor, se propone que en cada edificio coexista una subestación de producción con bombas de calor propias

que empleen el anillo del DH&C como foco de condensación o de evaporación. Para las potencias indicadas más arriba, se propone que cada edificio disponga de una o varias bombas de calor agua-agua a 6 tubos con compresores Scroll y potencia de calefacción del conjunto de hasta 400 kW y COP > 4. Estos equipos a 6 tubos podrán producir calor y frío simultáneo para sendos colectores de calor y de frío del edificio, y en caso de excedentes, disiparán la energía residual contra el anillo del sistema DH&C donde será aprovechada por otro de los subsistemas o disipada contra los focos de energía renovables (geotérmica, residual o aerotérmica). Considerando el conjunto de los 3 ministerios, la potencia total de los subsistemas debe superar 1 MW de potencia térmica.

En cada edificio se instalará una subestación que contará con dispositivos de regulación y control, medidores de energía y, si se requiere, intercambiadores de calor y mecanismos de almacenamiento térmico.

El sistema de agua caliente sanitaria será siempre un circuito separado de la red principal, ya que necesita cumplir con requisitos higiénicos específicos.

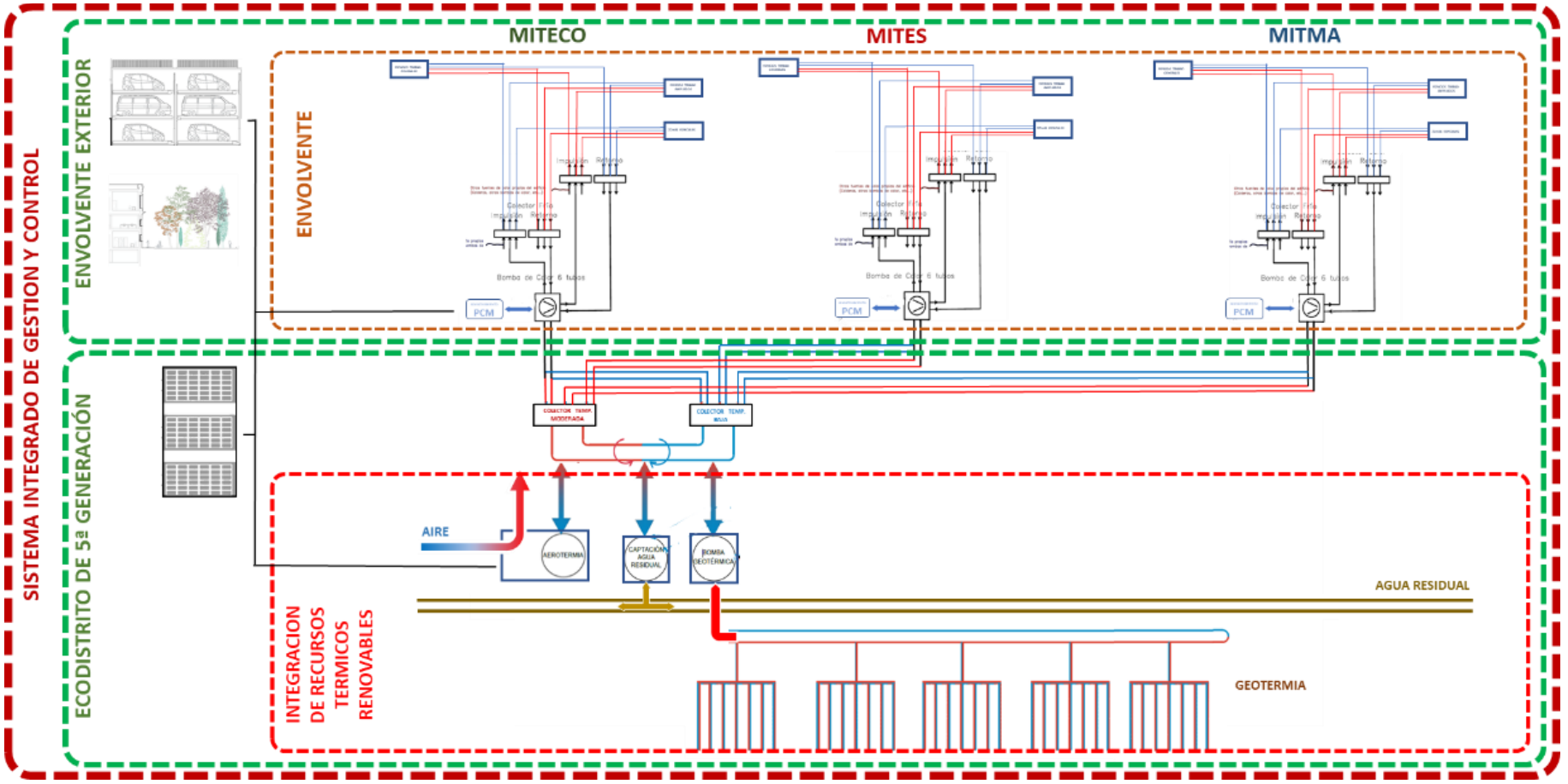


Figura 5-51. Esquema de la Red de 5ª generación.
Fuente: Instituto Europeo de Innovación...

5.2.4.1.7 Metodología e integración de sistemas para una gestión integrada y dinámica de la operación y el mantenimiento orientada a la eficiencia

Soporte metodológico para una gestión integral. Estructura física del sistema de gestión de la información, BMS y gestión de la energía EMIS.

5.2.4.1.7.1 Antecedentes. La integración de componentes y el modelo de gestión.

La verificación y la obtención de los beneficios múltiples que se derivan de la implementación de las medidas de eficiencia propuestas para los dos ministerios, MITES y MITMA, y para el Complejo de Nuevos Ministerios, NNMM, está vinculada a la integración:

- Del soporte tecnológico y constructivo que permite la rehabilitación del edificio y sus sistemas técnicos. Las soluciones constructivas y los sistemas técnicos que en los edificios de NNMM resuelven la rehabilitación de la envolvente. En las propuestas de actuación pertenecen a esta categoría: la recuperación de los espacios exteriores y la reconfiguración sostenible de los aparcamientos, la incorporación de sistemas para garantizar la calidad del aire y la luz y la renovación de los sistemas de climatización.
- Con la red de obtención de datos y los sistemas de gestión del edificio a través de la información que permiten conocer en cada momento el estado y la configuración de todos los ámbitos y sistemas que lo componen. Corresponde a los sistemas de gestión, control y operación, que, a la escala local de cada Ministerio y a la escala superior e integrada del conjunto permiten la eficiencia operativa y el mantenimiento eficiente.
- Con el conjunto de estrategias operativas y recursos lógicos, lógica natural para la eficiencia, previa a la tecnología; que vinculando la tecnología de sistemas técnicos y constructivos y la tecnología de la información, reconfiguran los edificios de manera dinámica y los reconducen en cada momento hacia un comportamiento eficiente optimizado.
- La tutela a lo largo del Ciclo de Vida, de las dinámicas de autoregulación que aseguran los objetivos de eficiencia se ejerce a través de sistemas de control, operación y mantenimiento, sustentados en la tecnología y gobernados, en el marco de una relación cibernética entre el hombre y el

edificio, por el Equipo Gestor del Sistema Integrado de mantenimiento y Control.

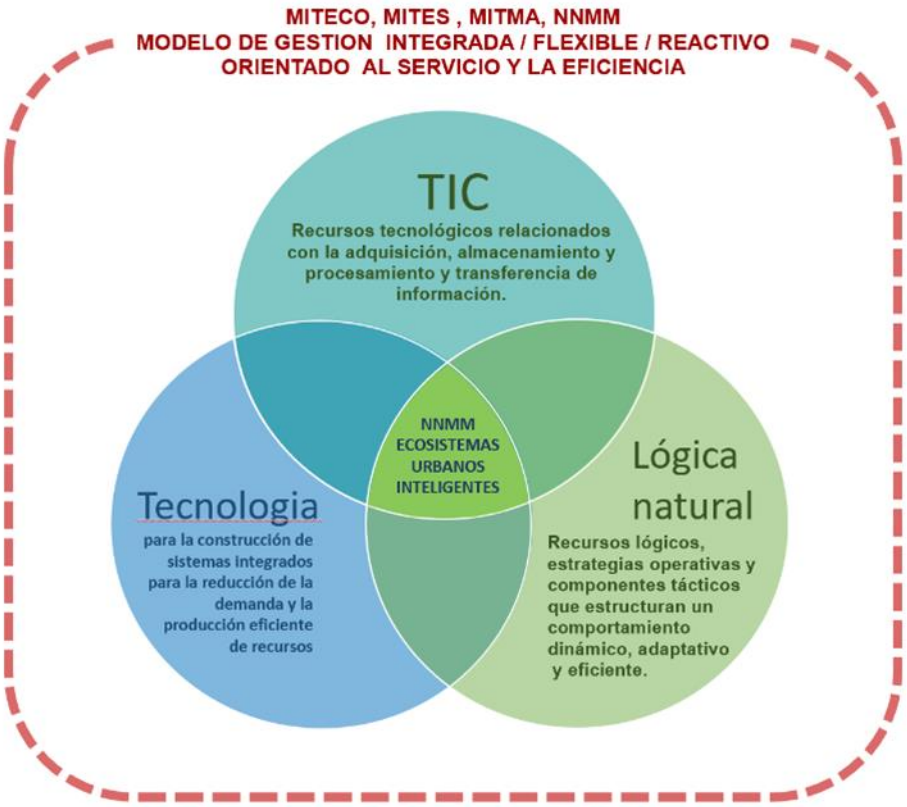


Figura 5-52. Modelo de gestión integrada, flexible, reactiva orientada al servicio y la eficiencia.
Fuente: Instituto Europeo de Innovación.

El soporte metodológico de esta gestión integrada y orientada a la eficiencia en todos los planos en los que se generan los múltiples beneficios de las actuaciones propuestas, es el de la Gestión Integrada de los Edificios y el Complejo, diseñado sobre la metodología de Facility Management, adecuada en todos sus planos a la gestión de activos de la AGE. Un modelo en plena expansión en las administraciones públicas cuya complejidad es equivalente y encaja sobre la de los recursos gestionados y la de los objetivos de la Administración. Es necesario asumir que sólo una metodología de gestión equivalente en complejidad y multidimensionalidad a los objetivos de eficiencia permitirá alcanzar los niveles de rendimiento y eficiencia que perfeccionan los beneficios que están a nuestro alcance en el Complejo de NNMM.

En este apartado se aportan las directrices fundamentales de este planteamiento que, en este caso:

- Preservan la autonomía de cada Ministerio en la gestión, a través de sistemas de control local, de sus propios sistemas y estrategias de eficiencia.
- Incorpora sistemas de control local en la gestión de la movilidad multimodal, eléctrica y compacta y el espacio exterior; y en el sistema de control local de la red de ecodistrito de 5ª generación a temperatura moderada que integra los edificios, las fuentes de energía renovables, y los recursos de almacenamiento de distinta intensidad.
- Armoniza la integración de todos los sistemas locales, que permiten estrategias locales de eficiencia, bajo el sistema integrado de operación y mantenimiento de orden superior que incorpora sus propias estrategias de eficiencia.

La gestión de la complejidad y también de las oportunidades y la aptitud a la eficiencia de este organismo que es el Complejo de NNMM, a la vez triple y unitario, ha sido la directriz de partida de todos los estudios y propuestas realizados, según las cuales dentro de criterios comunes cada uno de los ministerios trazará su plan de transición y transformación al servicio de sus propias estrategias operativas y de las directrices de servicio de la AGE. Es un planteamiento que requiere flexibilidad en las propuestas, en la metodología de gestión y en las estrategias operativas. Sobre las tres escalas se plantean directrices en este trabajo.

Esquema de los sistemas locales armonizados bajo el sistema integrado de gestión y control en el Complejo de Nuevos Ministerios

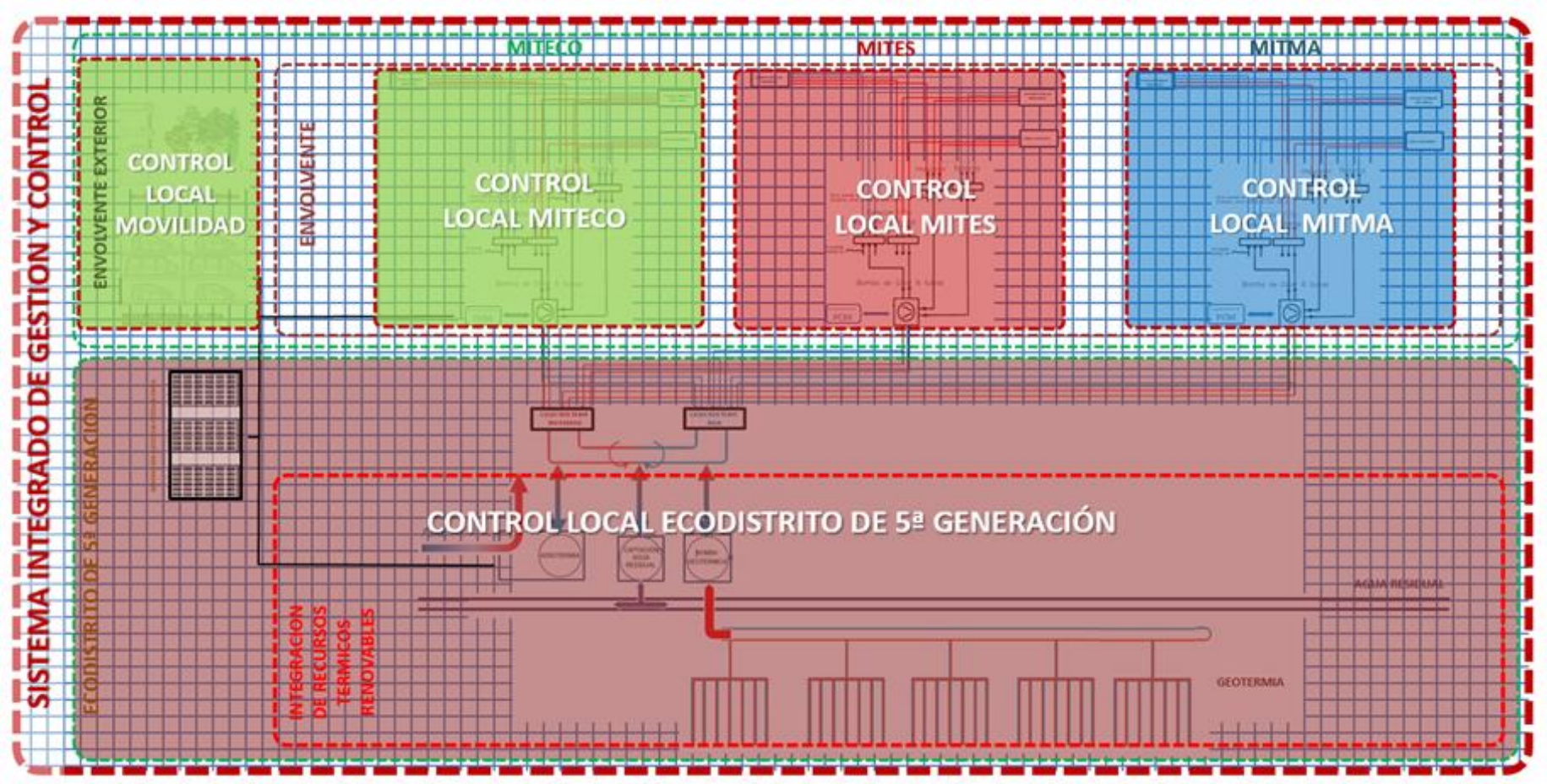


Figura 5-53. Modelo de gestión integrada de gestión y control a nivel local y en el eco distrito. Fuente: Instituto Europeo de Innovación.

Como ejemplo: esta estructura tecnológica, lógica y metodológica, integrada, permite en el complejo de NNMM implementar:

- Estrategias de recuperación e intercambio de energía térmica, previa a la producción:
    - Tanto en el interior de los edificios (escala individual de control local, a través de sistemas de temperatura moderada con red de distribución a 4 tubos con la posibilidad de transferir recursos entre zonas del mismo edificio).
    - Como en el Complejo de NNMM (escala superior de control integrado, a través del sistema de red de eco distrito de 5ª generación, 5GDHC con posibilidad de transferir calor/frío entre los tres edificios y con los sistemas de generación de energía con fuentes renovables).

- Estrategias de almacenamiento de calor/frío:
    - A escala local, con alta intensidad y capacidad de respuesta rápida en tiempos limitados. Sistemas de Cambio de Fase, PCM.
    - A escala local y escala superior con intensidad media y capacidad de respuesta rápida en tiempos medios. Almacenamiento en agua en los edificios y en la red de 5GDHC.
    - A escala superior con intensidad baja, capacidad de respuesta moderada y tiempos prolongados. Almacenamiento geotérmico en el terreno a través de la red 5GDHC.

La Figura 5-54 ilustra estas dos estrategias, sólo dos de las muchas que en un contexto de alta complejidad y oportunidad permiten abatir la demanda y reducir el consumo mediante acciones integradas de control.

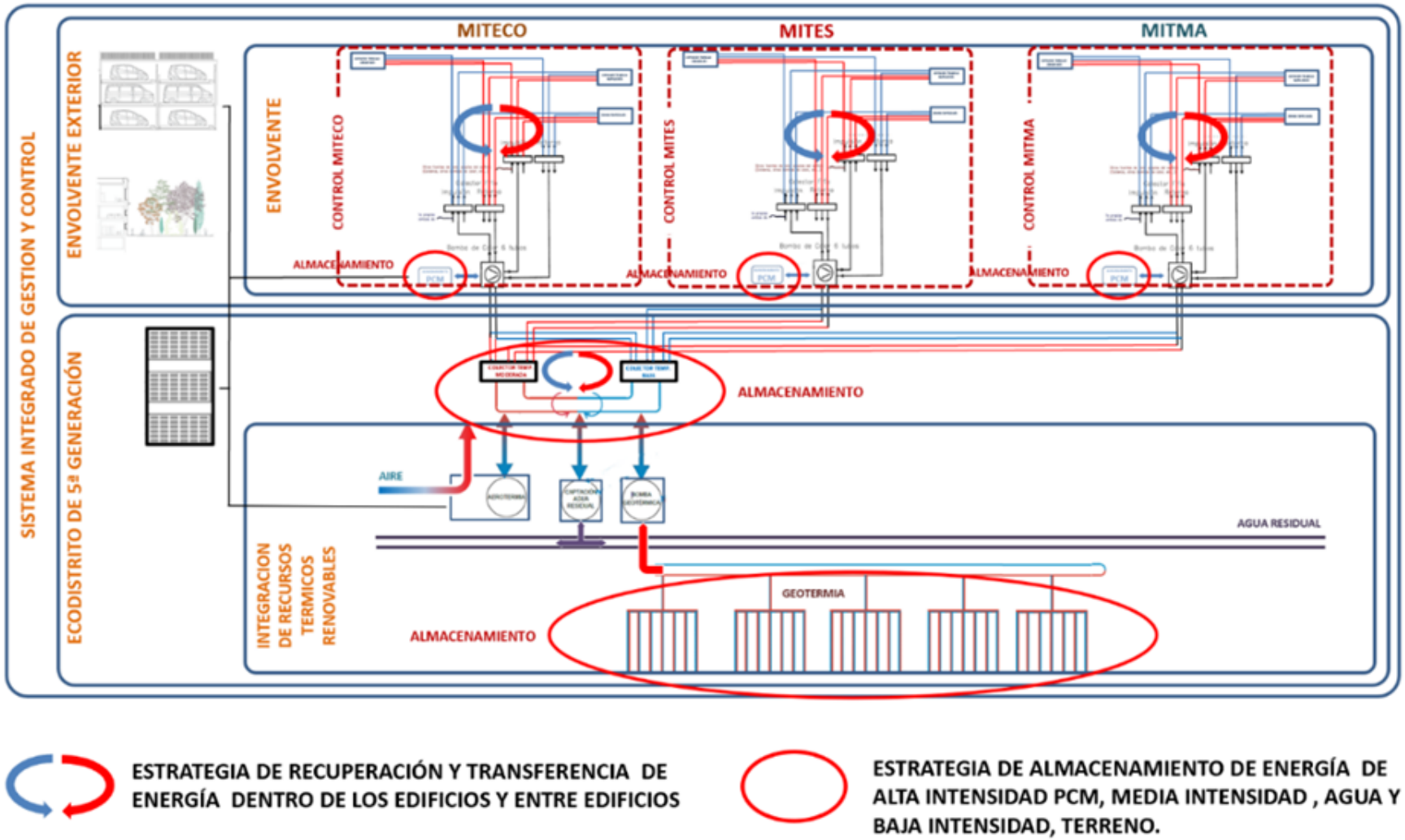


Figura 5-54. Esquema de la implementación de estrategias de recuperación y transferencia de energía almacenamiento, a escala local y a escala superior en el Complejo de los NNMM. Fuente: Instituto Europeo de Innovación.

5.2.4.1.7.2 Metodología de gestión integrada para la operación y el mantenimiento orientada a la eficiencia

Directrices para la transición a un modelo de gestión y mantenimiento para la eficiencia.

Como se ha expuesto, las posibilidades de obtener beneficios múltiples de las acciones para la eficiencia no solo se resuelven en el plano del consumo de energía primaria. Existen distintas dimensiones, componentes y escenarios en los que esos beneficios se producen, y una actuación integral, como la que se propone en NNMM, debe incluir la transición desde los modelos tradicionales de mantenimiento, actuales, hacia un modelo de gestión integrada para la operación y el mantenimiento orientada la eficiencia, integrando en la gestión de los inmuebles un espectro de servicios integrales, proyectados a lo largo de su Ciclo de Vida.

La verificación de los resultados y de los beneficios que resultan de las actuaciones para la eficiencia, tanto en procesos de nueva construcción como en procesos de rehabilitación integral, como el que se planea en el Complejo de NNMM, plantea la integración también de los objetivos, procedimientos, y verificación de resultados, en los procesos de diseño, ejecución y operación.

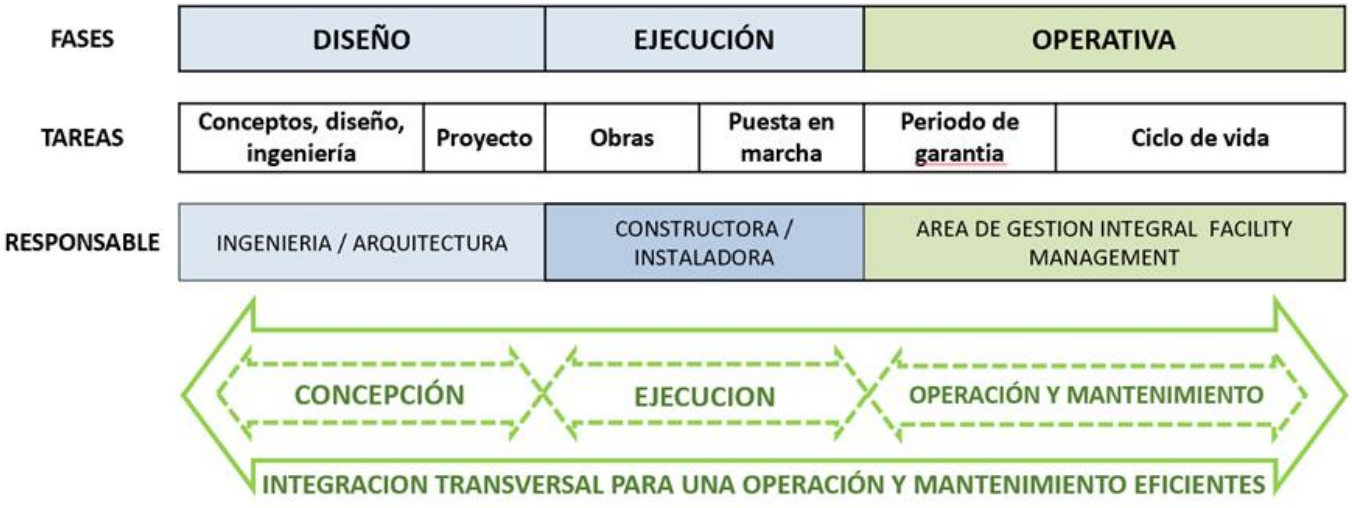


Figura 5-55. Esquema de la integración transversal para una operación y mantenimiento eficientes.
Fuente: Instituto Europeo de Innovación.

La dispersión de objetivos o la simplificación analítica, por capítulos o partidas agregados pero inconexos y no orientados a objetivos comunes, de las distintas fases de desarrollo del proyecto de rehabilitación para la eficiencia, diluye la responsabilidad sobre los resultados entre agentes no vinculados y reduce a acciones de alcance limitado los objetivos de eficiencia.

La obtención de múltiples beneficios, en los términos que se detallan en otro apartado de este documento, está vinculada a una integración sistémica, no sólo de los campos de intervención, sino también de la metodología de gestión, de los procesos, de los objetivos y de los agentes en todas las fases, concepción, ejecución, operación y mantenimiento, y para ello sustentarnos en poderosas herramientas digitales de captación, integración y uso de datos en todas las fases del Ciclo de Vida de los edificios.

5.2.4.1.7.3 Consideraciones sobre los modelos de contrato de mantenimiento vigentes en MITES y MITMA y propuesta de introducción de nuevos criterios en los contratos de mantenimiento de NNMM

Contratos individuales y contrato transversal.

Las organizaciones requieren una forma eficaz, que cumpla con las reglamentaciones y sea rentable, para garantizar la prestación adecuada de los servicios esenciales. Estos servicios podrían ser manejados y brindados internamente, sin embargo, las empresas de gran tamaño reconocen los beneficios de colaborar con un proveedor de servicios de Gestión Integrada de Sistemas o Integrated Facility Management (IFM en inglés), el cual puede proporcionar una variedad de servicios bajo un solo contrato centrado en obtener resultados y lograr una eficiencia multidimensional.

A efectos de verificar el potencial de operación eficiente de las actuaciones propuestas en el Ciclo de Vida de los edificios, se han estudiado los pliegos de los contratos de mantenimiento vigente en MITES y MITMA. Los criterios y alcances de los tres contratos no siempre son coincidentes, pero los tres son modelos similares de corte tradicional: contratos de mantenimiento integral cuya responsabilidad recae casi íntegramente en el adjudicatario, con algunos cambios en el alcance (incluyendo algunas partidas y excluyendo otras) y con variaciones en algunos criterios de aplicación (en algunas partidas incluyen los materiales, en otras no).

Se trata de contratos tradicionales de Servicios Agrupados y, mientras que un contrato tradicional de Servicios Agrupados cubre la ejecución de diferentes

tareas a nivel operativo, el enfoque actual de la Gestión Integrada, IFM, orientada a la eficiencia se plantea tanto en el enfoque táctico, operativo a corto plazo, como a la obtención de mejoras continuas a medio y largo plazo con un planteamiento estratégico. Este enfoque, completo, es particularmente necesario en el caso de la intervención que se propone en NNMM dado que se plantea que, en paralelo a una intervención transversal en FASE 1, cada uno de los 3 Ministerios aborde en una FASE 2 un proceso de transición que en cada caso está vinculado a circunstancias, necesidades y estrategias operativas particulares. La proyección en el tiempo de estas actuaciones de transición hacia la eficiencia requerirá de instrumentos de gestión flexibles y adaptativos que deben formar parte de la estructura de gestión Integrada y estar adecuadamente contractualizados.

A modo de resumen, en líneas generales los pliegos estudiados incluyen:

- Contrato de mantenimiento integral (preventivo+ correctivo+ técnico legal +conductivo + modificativo) sin materiales ni obras o mejoras (en algunas partidas sí incluyen algunos materiales, en otras incluyen alguna bolsa económica…)
- Ámbito de actuación: Se extiende a otros edificios bajo la tutela de cada Ministerio.
- Duración.
- Importe aproximado.
- Alcance (instalaciones incluidas):
    - Instalaciones eléctricas, iluminación (CT`s, SAI`s, grupos, cuadros eléctricos…)
    - Climatización, ventilación, tratamiento de agua torres.
    - Sistema gestión del edificio,
    - Fontanería, ACS, termos, saneamiento…
    - PCI,
    - Jardinería y riego.
    - Equipamiento de restauración / campanas en cocina.
    - Instalación solar térmica
    - Megafonía.

- Otros:
    - Puertas automáticas (4 preventivos al año más correctivo +24hs), barreras de acceso.
    - Limpieza de fachadas (intervención muy específica y externalizarle).
    - Albañilería, pinturas, falsos techos, cerrajería.
    - GMAO, Actualización de información, ficheros informes mensuales a medida(en este caso es SAP aunque contemplan que si se cambia, el adjudicatario asumirá los costes de la migración y de formación).

- Otros alcances incluidos pero no en todos los Ministerios, son:
    - Seguridad: CCTV, alarmas, arcos, escáneres, etc.
    - Aparatos elevadores.
    - Depósitos de combustible
    - Aljibes.
    - Gas
    - Pararrayos, antenas.
    - Sistemas audiovisuales.
    - Galerías de servicios (limpieza y mantenimiento).
    - Mobiliario, persianas, estores, cuadros.

Otras partidas que pueden resultar relevantes por su cuantía como son: limpieza, seguridad (medios humanos), sistemas (IT),PRL/CV19, etc. No están incluidas en los pliegos.

Convendría aplicar criterios de IFM tanto en la contratación de servicios como en la gestión del inmueble para tratar de conseguir mejoras como:

- Agrupación de servicios homogéneos.
- Homogeneización de criterios y alcances.
- Ampliar duración de los contratos (2+2 o 3+2) lo que permitiría más seguridad en los resultados y más eficiencia coste/resultados.

- Gestión unificada de los servicios transversales para los dos ministerios (IFM para el conjunto del Complejo de NNMM compatible con la operativa del IFM de cada Ministerio para su edificio, o para la cartera de inmuebles incluida en el servicio de Gestión Integrada).

El escenario ideal para la gestión Integrada sería establecer una consultora permanente en FM para todo el inmueble de NNMM que profesionalizase y actualizase la gestión de FM y que pudiera aportar independencia a los dos ministerios (respecto a empresas proveedoras de servicios finales) con conocimiento en distintos sectores y áreas de explotación y con la posibilidad de trabajar a medio plazo para asegurar la consecución de los objetivos los resultados.

El proveedor de IFM puede aprovechar su experiencia en la Gestión Integrada de Sistemas para agilizar la prestación del servicio y disminuir los costos operativos, gracias a sus métodos probados y economías de escala. Además, en ocasiones se puede administrar un conjunto de servicios vinculados con un equipo más reducido en comparación con la cantidad de personal necesario para proporcionar y manejar servicios mediante múltiples proveedores o una mezcla de recursos internos y proveedores subcontratados.

	CONTRATOS ACTUALES (MANTENIMIENTO INTEGRAL)	**PROPUESTA DE CONTRATOS (PREVENTIVO + CORRECTIVO (sin materiales)**
PUNTOS FUERTES	Mantenimiento integral (todo incluido) Gestión simplificada Costes estimados conocidos	Profesionalización/especialización Modernización Paquetización (partidas homogéneas) Transferencia de riesgos (proveedores)
PUNTOS DÉBILES	Mayor coste Subrogación obligada Control sobre stock de almacenes y plantilla Partidas no incluidas Corta duración Criterios desactualizados	Modelo FM: resultados a medio plazo

Tabla 5.18. Esquema comparativo de los contratos actuales de mantenimiento integral y la propuesta de contratos. Puntos fuertes y puntos débiles. Fuente: Instituto Europeo de Innovación.

También se puede mejorar el rendimiento. El contrato de IFM promueve un cambio a una gestión basada en resultados (rendimiento) en lugar de una gestión basada en aportaciones (horas y recursos). Las Oficialías Mayores, OM,

de los Ministerios disponen de un único agente de contacto, el Facility Manager, para todas las cuestiones relativas a la gestión de los sistemas y servicios, lo que facilita la coordinación eficiente y la supervisión precisa de la prestación del servicio. Ante un único responsable, la OM puede contar con una mayor capacidad de reacción y respuesta en caso de que surja algún problema.

Sólo reorientando los procesos y objetivos del mantenimiento, desde modelo tradicional que se realiza en la actualidad, hacia un modelo de Gestión Integrada, IFM se puede realizar el avance y la mejora en la operación y el Mantenimiento, O+M, que requiere el cumplimiento de todos los objetivos y la obtención de los múltiples beneficios que corresponden a las intervenciones y actuaciones propuestas para la eficiencia del complejo de NNMM, tanto a la escala transversal que se resuelve en la FASE1 de intervención, como a la escala individual y local de MITES y MITMA, que se implementará en la FASE2.

<table>
<tr><th></th><th colspan="2">ACTUACIONES</th><th colspan="2">INTERVENCIONES</th></tr>
<tr><td></td><td>CONCEPTO</td><td>OBJETIVOS</td><td>TRANSVERSALES (edificio)</td><td>INDIVIDUALES (por cada Ministerio)</td></tr>
<tr><td rowspan="2">A1</td><td rowspan="2">HOMOGENEIZACIÓN CRITERIOS Y PROCEDIMIENTOS</td><td>Economía de escala</td><td rowspan="14">FASE 1</td><td></td></tr>
<tr><td>Optimización de recursos</td><td></td></tr>
<tr><td rowspan="3">A2</td><td rowspan="3">ALCANDE DE SERVICIOS</td><td>PREV + CORRECT (sin materiales)</td><td></td></tr>
<tr><td>Paquetizar partidas homogéneas (para concursar)</td><td></td></tr>
<tr><td>Ámbito de Actuación (parque edificios)</td><td></td></tr>
<tr><td>A3</td><td>PLAZOS / DURACIÓN</td><td>3+2</td><td></td></tr>
<tr><td rowspan="3">A4</td><td rowspan="3">REMUNERACIÓN (contratos vinculados a resultados)</td><td>Acuerdos niveles de servicio (SLA)</td><td></td></tr>
<tr><td>Libros abiertos</td><td></td></tr>
<tr><td>Penalización / bonificaciones</td><td></td></tr>
<tr><td rowspan="3">A5</td><td rowspan="3">GESTOR DE FM</td><td>Profesionalización</td><td></td></tr>
<tr><td>Modernización</td><td rowspan="4">FASE 2</td></tr>
<tr><td>Mejora de resultados</td></tr>
<tr><td rowspan="2">A6</td><td rowspan="2">INFORMES (PIM)</td><td>Plataforma integrada de mantenimiento</td></tr>
<tr><td>Comunicación entre intervinientes</td></tr>
<tr><td rowspan="2">A7</td><td rowspan="2">EVOLUCIÓN MOD TRADICIONAL A MODELO DE FM</td><td>Actualización</td><td rowspan="2">FASE 2</td></tr>
<tr><td>Traslado a terceros (portfolio edificios, instrucciones)</td></tr>
</table>

Tabla 5.19. Esquema de actuaciones hacia un modelo de gestión integrada. Fuente: Instituto Europeo de Innovación.

La gestión de FM contempla las siguientes mejoras a medio plazo para evitar la depreciación del activo (contratos de 3+2 años).

1. Tratar de agrupar el alcance para los tres Ministerios.
    a. Mayor volumen de actuación/contratación
    b. Homogeneización procedimientos /estandarización
    c. Mejora de resultados: económicos, calidad y eficacia
2. Profesionalizar la gestión de FM
    a. Pasar de modelo tradicional a Modelo de IFM
    b. Contratos SLA, Acuerdos de Niveles de Servicio.
    c. Libros abiertos
    d. Gestor del contrato vs Gestor de FM
    e. Información on line: app, web.
3. Separar el contrato integral por paquetes "compatibles"
    a. Evitar el riesgo de ofertas a la baja.
    b. Simplificar el control y el seguimiento.
    c. Separar por partidas homogéneas evita "sobrecostes" importantes
4. Definir el tipo de prestación deseada (según necesidades):
    a. Preventivo y correctivo sin materiales.
    b. Técnico legal
    c. Conductivo/lectura consumos
    d. Modificativo
5. Duración. La ampliación de la vida del acuerdo implica una mejora de costes y resultados.
    a. Actual: 2 años
    b. Propuesta: reorganización de contratos para 3+2 años

La actuación integral para la eficiencia en el Complejo de NNMM aconseja también una actualización metodológica en la gestión de los sistemas, instalaciones, contratos y proveedores. Es una ocasión idónea para la Gestión Integrada, IFM, del Complejo y completar la actuación para que constituya un caso de éxito en la rehabilitación para la eficiencia de los activos de la AGE.

5.2.4.1.7.4 Gestión integrada de la operación y del mantenimiento

El gestor agente clave de la eficiencia operativa.

Tanto los Ministerios como el proveedor de servicios de Gestión Integrada necesitan establecer un acuerdo sobre alcance y el nivel de los servicios, y dichas expectativas han de ser explicadas en detalle en el Acuerdo de Nivel de Servicio (SLA en inglés).

La importancia de la comunicación se resalta cuando ambas partes se involucran activamente, trascendiendo la simple emisión de informes o correos electrónicos regulares. Es fundamental realizar encuentros en persona con regularidad y llevar a cabo debates exhaustivos para expresar las inquietudes, analizar las dificultades y adaptar las estrategias de trabajo de forma constante y flexible. La meta consiste en fomentar la colaboración y la complementariedad entre las partes involucradas, a la vez que se previenen situaciones que podrían dar lugar a dificultades en la ejecución de las tareas. Es importante que todas las personas involucradas establezcan los valores de los parámetros de referencia para medir el rendimiento de los edificios. Asimismo, deben supervisar de cerca los procesos de Operación y Mantenimiento para garantizar que se cumplan los objetivos establecidos en los acuerdos de nivel de servicio de acuerdo con el plan establecido.

El elemento más importante para el éxito de una iniciativa de Gestión Integral, IFM, será una relación de trabajo sólida entre cada Ministerio y el proveedor del servicio. Con un modelo tradicional de servicios no agrupados el enfoque suele limitarse al recorte de costes y el aumento puntual de la eficiencia. Se plantea para el Complejo de NNMM una Gestión Integral IFM, porque puede conducir a un enfoque más estratégico en la gestión de los sistemas: el proveedor pasa a formar parte de la organización, y todo el equipo sigue pensando en las tácticas operativas a corto plazo, pero también en estrategias a medio y largo plazo para la mejora continua de resultados. Esta multidimensionalidad en los campos de acción y en el tiempo es el verdadero valor de la gestión Integral IFM.

Pensando en clave de eficiencia energética, homogeneizar criterios, actuaciones y operativa en los edificios de NNMM parece imprescindible para mejorar los resultados. En las intervenciones transversales que se proponen para el Complejo y que inciden en los tres ministerios que lo ocupan, se deben incluir ya estos conceptos como primera aproximación a la Gestión Integrada del Complejo. En fases sucesivas se podría ir trasladando esa política al conjunto de contratos y partidas de los inmuebles (aunque necesitasen administrar tres

contratos de manera independiente, uno para cada ministerio, en lugar de un único contrato para todo el edificio).

Convendría aplicar criterios de FM tanto en la contratación de servicios como en la gestión del inmueble para tratar de conseguir mejoras como:

- Agrupar los alcances de los distintos ministerios para:
  - Homogeneizar criterios y procedimientos
  - Optimizar recursos
  - Aumentar volumen para la reducción de costes
- Esto debería servir para tratar de obtener un contrato único para el edificio o bien, tres contratos, armonizados para mejorar resultados.
- Definir alcance adecuado de los trabajos para las necesidades identificadas.
- Integral. Preventivo + correctivo + modificativo + conductivo + técnico legal.
- Agrupar partidas homogéneas para sacar a concurso.
- Proveedores específicos especializados por paquetes.
- Mejora de resultados (operativos y económicos).
- Redefinir los plazos de duración del contrato: 3+2.
- Redactar contratos vinculados a resultados.
- Estudiar y acordar los niveles de servicio (SLA).
- Remuneración "bonus malus".
- Libros abiertos.
- Incorporar las tareas de un gestor de FM (*), no sólo un gestor del contrato. En los pliegos actuales no se menciona al gestor energético.
- Evolucionar de un modelo de mantenimiento tradicional a un modelo de IFM.

(*) Lo ideal sería llegar a establecer una consultora permanente en FM para todo el inmueble de NNMM que profesionalizase y actualizase la gestión de FM y que pudiera aportar independencia (de empresas proveedores de servicios) con conocimiento en distintos sectores y áreas de explotación y con la posibilidad de trabajar a medio plazo para asegurar la consecución de objetivos convirtiendo este proyecto y las medidas en el implantadas en un caso de éxito de gran visibilidad.

ALCANCE DEL SERVICIO FM	**GESTION (definición, implantación, control, seguimiento)**
	PROVISIÓN (contrataciones, servicios)
	AMBOS
VENTAJAS DEL GESTOR FM	Independencia
	Conocimiento de las distintas áreas
	Visión global / sistémica orientación a la eficiencia
	Profesionalización
	Subvencionable (PRT-Next)
CONTENIDO FM	Dimensionado en función de necesidades específicas
	Delimitar áreas de intervención

Tabla 5.20. Esquema de las ventajas de un Gestor de Facility Management vs un Gestor de Contrato. Fuente: Instituto Europeo de Innovación.

5.2.4.1.7.5 Los contenidos del contrato de gestión integrada

En el Contrato de Gestión Integrada IFM el alcance de la prestación de servicios puede ser muy amplio, en función de la estrategia de cada Ministerio, se pueden englobar servicios de:

- CRE. Gestión de la Cartera de Edificios de cada Ministerio: soporte a la gestión a la compra / venta, cesión o búsqueda de inmuebles. Estudio y optimización de la rentabilidad del uso de los espacios, alquileres, gestión económica de la disponibilidad de espacio. Aspectos relativos a la gestión de la cartera de edificios, propiedad, continuidad del servicio, aspectos legales, inquilinos y beneficiarios de cesiones, etc.
- AM Gestión de Activos: Soporte al Ciclo de Vida de los edificios (inversiones e inversiones operativas, opex/capex), FM, TICs, BIM-BMS, mantenimiento, oficina técnica de apoyo, subcontratación.
- PM. Project Management: Gestión integral de proyecto y ejecución de obras e instalaciones, conservación, reformas, proyectos internos referentes a lo adjudicado o a nuevas partidas de obra (instalaciones adicionales o inmuebles anexos)
- WP. Gestión de Espacios de Trabajo: Servicios, recepción, bienestar, mobiliario, equipos, gestión de documentación (digital, soporte papel, destrucción, archivo). Soporte sobre espacios de trabajo. La remodelación de instalaciones puede que conlleve adecuaciones frecuentes de espacios y

servicios para los usuarios en las zonas de actuación o en nuevas áreas de intervención.

- ES. Energía, Eficiencia y sostenibilidad: Gestión energética, calidad ambiental y del medio ambiente, eficiencia, sostenibilidad, gestión integral de residuos, responsabilidad social de la AGE. En este campo, las propuestas sobre eficiencia energética (reformas, buenas prácticas…) serán frecuentes.
- FS. Servicios: Servicios a las personas, Prevención de Riesgos Laborales, higiene y salud en el trabajo, ergonomía, seguridad, limpieza, catering, seguridad, recepción. Partidas que ahora no se contemplan en el alcance de los pliegos de servicios de mantenimiento y son susceptibles de ir incorporándose a los trabajos objeto de contratación si el resto de servicios se va prestando conforme los requerimientos de la cada Ministerio y las circunstancias particulares lo permiten (acuerdos con terceros, normas internas, compromisos…).

	COMPONENTES		CONTENIDOS
GESTION INTEGRAL DE ACTIVOS, OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO MITECO, MITES, MITMA, NNMM FACILITY MANAGEMENT	CRE	CORPORATE REAL ESTATE GESTION EDIFICIOS AGE MITECO, MITES, MITMA	Gestión contextualizada del portafolio de edificios de cada Ministerio, propiedad, cesión, alquiler, continuidad de la actividad, cambios de estructura organizativa, ámbito legal y contractual
	AM	ASSET MANAGEMENT GESTION DE ACTIVOS	Soporte al ciclo de vida de los edificios (inversiones e inversiones operativas, opex/capex), FM, TICs, BIM-BMS, mantenimiento, oficina técnica de apoyo, subcontratación.
	ES	ENERGÍA EFICIENCIA SOSTENIBILIDAD	Gestión energética, calidad ambiental y del medio ambiente, eficiencia, sostenibilidad, gestión integral de residuos, responsabilidad social de la AGE
	FS	FACILITIES SERVICES SERVICIOS	Servicios a las personas, prevención de riesgos Laborales, higiene y salud en el trabajo, ergonomía, seguridad, limpieza.
	WP	WORKPLACE GESTION DE AREAS DE TRABAJO	Servicios, recepción, bienestar, mobiliario, equipos, gestión de documentación (digital, soporte papel, destrucción, archivo)
	PM	GESTION INTEGRADA DE PROYECTOS PROJECT MANAGEMENT	Gestión integral de proyecto y ejecución de obras e instalaciones, conservación, reformas, proyectos internos

Tabla 5.21. Esquema de la gestión integral de activos, operación y mantenimiento de MITECO, MITES y MITMA. FACILITY MANAGEMENT.
Fuente: Instituto Europeo de Innovación.

La composición de los departamentos de IFM en cada Ministerio y el Complejo de NNMM, será definido en función de su actividad y de lo que se pretenda

conseguir (con recursos propios o externalizados). Actuando como consultor, el Facility Manager puede hacer un análisis integrado y sistémico de todos los factores y, junto al cliente, generar la información necesaria para dimensionar las necesidades, la estructura y el alcance de la colaboración para la Gestión Integrada, en cada caso.

Facilities services	**Servicios a personas**
	Inmueble (limpieza, …)
	Seguridad
	PRL
Project management (cambios)	Conservación
	Reformas
	Proyectos Internos
Energía y sostenibilidad	Gestión energética
	Medio Ambiente y sostenibilidad
	Residuos
	RSC (responsabilidad social corporativa)
Workplace (espacios de trabajo)	Services
	Assets
	Hospitality
	Wellbeing
	Documentación (archivo, papel, destrucción)
Corporate services (soporte Real Estate)	Portfolio
	Property
	Continuidad de negocio
	Legal
	Inquilinos
Asset-management	Soporte ciclo de vida (opex/capex)
	FM IT
	BMS-BIM
	MANTENIMIENTO
	OFICINA TÉCNICA

Tabla 5.22. Servicios de Facility Management.
Fuente: Instituto Europeo de Innovación.

Posibles paquetes de partidas a integrar en Contratos de Gestión integral de Operación y Mantenimiento, IFM.

- **Instalaciones**
  - Climatización: Producción, distribución, emisión y absorción.
  - Iluminación: Natural y artificial.

  - Electricidad: cuadros de reparto, CT´s, grupos, SAI´s, baterías condensadores.
  - Redes de comunicación: redes, audiovisuales, comunicaciones, informática, telefonía, etc.
  - Instalación de agua: abastecimiento, tratamiento, almacenamiento, saneamiento, bombas, redes, separadores…
  - Gas.
  - Equipamiento de hostelería.
  - Pararrayos/antenas.
  - Depósitos enterrados.
  - Sistema de gestión del inmueble.
  - Redes generales, conducciones y galerías de servicios.
  - Sistemas de control, operación y mantenimiento.
  - Sistema general de movilidad y aparcamiento.
  - Recarga eléctrica de vehículos y multimodalidad.
- **Protección contraincendios**
  - Detección, extinción, extintores, grupos, bombas.
  - Sistemas de alarma, centralitas.
  - Detección CO/extracción en garajes.
  - Puertas cortafuegos, seccionales, de emergencia.
  - Hidrantes, aljibes.
  - Techos seccionales, exutorios, cortinas de humo.
- **Seguridad**
  - Vigilantes (personal).
  - CCTV (Videograbación, control accesos, anti intrusión, barreras…)
- **Limpieza**
  - Limpieza (personal).
  - DDD/tratamiento aguas/análisis vertidos.
  - CV19 (consumibles).
- **Espacios exteriores**
  - Jardinería/riego.
  - Biodiversidad.
  - Drenaje e infiltración.
  - Superficies.

  - Equipamiento.

- **Medios de elevación**
  - Ascensores, plataformas, montacargas.
  - Puertas automáticas.
- **Otras partidas (si fueran de aplicación y se requiriese)**
  - PRL/CAE.
  - Sistemas de conteo.
  - Señalética (monolitos, cartelerías interiores y exteriores)
  - Inspecciones reglamentarias.

5.2.4.1.7.6 La transición del modelo de mantenimiento actual a un modelo integrado de gestión, Facility Management

El cambio hacia un enfoque en la consecución de resultados puede ser desafiante para los líderes de un Ministerio, quienes están acostumbrados a supervisar de manera directa las operaciones y gestionar los programas de mantenimiento, además de mantener relaciones con varios contratistas.

A día de hoy, el paso hacia contratos de IFM y basados en el rendimiento sigue siendo un desafío para muchas Administraciones en España. Aunque algunas administraciones locales y regionales han logrado realizar esta transición hacia un modelo de Gestión Integrada, la mayoría sigue dependiendo de múltiples proveedores y trabaja bajo un régimen de tiempo y materiales. Además, un contrato de IFM puede brindar a los encargados del mantenimiento una mayor comprensión del costo total de la propiedad, la gestión de riesgos, el desempeño de los proveedores y la optimización de procesos. Esto les permite alinear la calidad y el costo de los servicios con los objetivos generales de la organización.

En el caso de MITECO, MITES, MITMA y el Complejo de NNMM, esto debería servir para tratar de obtener tres contratos con el mismo o similar alcance y el mismo proveedor o proveedores corresponsables para garantizar los resultados.

Algunas de las directrices de actuación para esa transición son:

- Definir el alcance adecuado de los trabajos para las necesidades de cada Ministerio.
- Enfoque hacia la Gestión Integrada.
- Agrupar partidas homogéneas para sacar a concurso.

- Proveedores específicos para distintas áreas y sistemas especiales.
- Enfoque orientado a la mejora de resultados.
- Redefinir los plazos de duración del contrato, para viabilizar resultados y abatir costes: Ej.3+2 años.
- Redactar los contratos con remuneración vinculada a resultados y "bonus malus".
- Acuerdos de niveles de servicio que incorporen los indicadores clave de rendimientos de los sistemas, KPi.
- Incorporar la figura y las tareas de un gestor de FM, como agente e interlocutor principal con los Ministerios, no sólo de gestor energético o gestor del contrato.

La Figura 5-56 explica la secuencia de acciones para la transición desde un modelo tradicional de mantenimiento a un modelo de Gestión Integrada orientado a la eficiencia:



Figura 5-56. Esquema de la transición desde el modelo tradicional de mantenimiento al modelo de gestión integral de activos, operación y mantenimiento / Facility Management.
Fuente: Instituto Europeo de Innovación.

Incorporar estos criterios a los pliegos que rijan los concursos y contratos de mantenimiento de los nuevos sistemas que resultan de las acciones propuestas contribuye a garantizar la obtención de múltiples beneficios derivados de una eficiencia integral y sería una ocasión excepcional para proyectar al Ciclo de Vida los ambiciosos y ejemplares objetivos de la actuación en el Complejo de NNMM.

5.2.4.1.7.7 Sistemas de control y gestión integrada orientados a la eficiencia

El uso de herramientas de Gestión Integrada asistidos por sistemas computarizados de información y comunicaciones es esencial para impulsar la eficiencia en un entorno construido. Las herramientas basadas en la nube permiten a los gestores de los sistemas almacenar y administrar datos en un sistema centralizado que da soporte de datos a los procesos de decisión humanos y a sus equipos y sistemas de soporte.

El uso de herramientas de digitalización como **los Sistema de Gestión de los Edificios (BMS), los Sistemas de Información y Gestión de Energía (EMIS), El funcionamiento basado en la monitorización, (MBCx),** permite a los usuarios planificar estratégicamente y administrar los recursos de la manera más rentable [107]. Los beneficios clave del software de gestión de instalaciones incluyen:

- Aumento de la eficiencia en el lugar de trabajo:

  Almacenar y acceder a datos en tiempo real permite a los administradores de los sistemas verificar cómo pueden utilizar mejor los recursos del edificio. Esto acelera el proceso de gestión de cambios y reconfiguración de los sistemas y reduce cualquier interrupción potencial de servicios en el lugar de trabajo. También les permite ser más efectivos al delegar tareas en equipos o proveedores externos.

- Reducción de costos:

  Las herramientas digitales permiten mejorar la gestión general de activos, lo que puede ayudar a reducir los gastos. Esto es más efectivo a través de una gestión precisa de la demanda y la adquisición planificada de recursos, así como una planificación de mantenimiento eficaz para prolongar los ciclos de vida de los activos. Revisar y planificar la gestión del espacio también ayuda a reducir los costos operativos, ayudando a prevenir inversiones innecesarias o redundantes.

- Mejora de los procesos estratégicos:

  Ya sean proactivas, preventivas o reactivas, las herramientas digitales admiten la implementación de múltiples estrategias de Gestión Integrada. Con estrategias de gestión proactivas que ayudan a reducir las facturas de mantenimiento hasta en un 70%, vale la pena considerar cómo el software podría mejorar el retorno general de las inversiones en sistemas eficientes.

La digitalización al servicio del Facility Manager en NNMM.

Como parte esencial de las directrices de eficiencia en NNMM, el papel del Gestor de operación y mantenimiento de los sistemas e instalaciones es fundamental. La planificación estratégica del mantenimiento y la operación se utiliza para llevar a cabo la gestión de un edificio de la manera más eficiente y rentable. Bajo este modelo el Gestor, Facility Manager (FM), es responsable de varios ámbitos de trabajo:

- Programación de mantenimiento y reparaciones de edificios.
- Manejo de asuntos legales y contractuales.
- Proporcionar equipos y suministros.
- Cumplir con las normas de salud y seguridad.
- Optimización de la gestión del espacio.
- Garantizar que las instalaciones se mantengan seguras.

Ante la evidencia de muchos casos en los que la mala salud de las personas es resultado de las malas medidas de salud y seguridad de los edificios, los Gestores de las instalaciones y los edificios también son esenciales para garantizar la seguridad, la salud, el bienestar y la ergonomía en el trabajo de sus ocupantes.

Al abandonar un enfoque estrictamente analógico y manual para la gestión de los sistemas e instalaciones y optar por una función híbrida, más digitalizada, los Gestores pueden optimizar sus tareas utilizando tres herramientas para funciones esenciales:

- Sistema de Gestión del Edificio (BMS).
- Sistemas de Información y Gestión de Energía (EMIS).
- Funcionamiento Basado en la Monitorización (MBCx).

5.2.4.1.7.8 Sistema de gestión del edificio (BMS)

Un sistema de gestión de edificios (BMS) proporciona un control automatizado de la eficiencia energética y el confort de los ocupantes desde una única interfaz digital.

BMS monitorea y controla los servicios eléctricos y mecánicos, como HVAC e iluminación. También puede incorporar servicios como seguridad, control de accesos, aparcamiento, recarga eléctrica, ascensores y sistemas de seguridad.

Dependiendo de la aplicación y configuración específicas, un BMS puede ser conocido como:

- Sistemas de automatización de edificios (BAS)
- Sistema de gestión y control de edificios (BMCS)
- Sistema de gestión energética de edificios (BEMS).

Un BMS se puede adquirir como un paquete completo o como un complemento de los sistemas existentes. Las aplicaciones BMS se basan en protocolos de comunicaciones abiertos y están habilitadas para la web, para la integración de sistemas de múltiples proveedores.

a) Beneficios de un BMS

En comparación con sistemas de control no integrados e independientes, un BMS ofrece control centralizado, flexibilidad, interactividad y retroalimentación.

Un BMS concebido y diseñado exprofeso para la integración de los sistemas locales de los dos ministerios, los sistemas locales del sistema de ecodistrito de 5ª generación, 5GDHC, y el sistema de escala superior del Complejo de NNMM, es un componente esencial de la actuación y de la garantía de su rendimiento y beneficios múltiples.

Es posible que alguno de los sistemas BMS existentes, por ejemplo en, aunque no operativos, puedan beneficiarse de una actualización o ser reemplazados.

Las razones para considerar la actualización o el reemplazo incluyen: problemas de fiabilidad, mal estado de los componentes, falta de compatibilidad web, dificultad para incorporar nuevos equipos y sensores, capacidad para realizar monitoreo y reportes.

Control y optimización integrales

BMS permite el control y la optimización de los ciclos de los equipos, con algoritmos centrados en la eficiencia energética.

A través del BMS se pueden habilitar las siguientes estrategias de ahorro de energía:

- Control preciso de las condiciones de confort.
- Tiempos precisos de puesta en marcha y ejecución.
- Ciclo económico que incluye control de ocupación de CO2.
- Eliminación de la superposición entre sistemas, como HVAC.
- Ajuste por condiciones estacionales, incluida la selección de secuencias variables de plantas.
- Control de la presión, la velocidad y la temperatura de los fluidos, aire y fluidos caloportadores.

Capacidad para mantener la calibración de los sistemas

Es común que los edificios que utilizan controles independientes se desvíen de su configuración original y optimizada. Un BMS ayuda a mantener los ajustes de los sistemas de un edificio, respondiendo a las desviaciones en tiempo real.

El BMS también puede indicar el uso excesivo de energía, como, por ejemplo, el de un equipo que se deja encendido cuando no es necesario.

Ahorro de tiempo

La automatización quita presión a los Gestores y al personal para monitorizar los datos y ajustar la configuración.

La interfaz de usuario único de BMS ahorra tiempo al reunir la información y los elementos de control más relevantes en un solo lugar. Las interfaces van desde paneles básicos hasta estaciones de trabajo gráficas completas. Un BMS puede traducir rápidamente los datos en tiempo real para facilitar una rápida toma de decisiones.

Menores costes de mantenimiento

Un BMS permite la identificación temprana de fallas en el equipo. Los edificios pueden volverse menos eficientes a medida que cambian las consignas y parámetros operativos y disminuye el rendimiento del equipo. Un BMS puede implementar diagnósticos para la mayoría de los componentes de los sistemas y detectar cuándo un componente está comenzando a fallar. Los operadores pueden ser alertados para comenzar el mantenimiento preventivo, mucho antes de que se produzca una pérdida de rendimiento, un fallo o una interrupción del servicio.

Mejora del confort de los ocupantes

Un BMS permite la monitorización en tiempo real y la optimización del confort de los ocupantes. Tiene en cuenta factores como la temperatura y la calidad del aire. También puede proporcionar notificación y rectificación de fallos antes de que disminuya la calidad y el confort ambiental.

Gestión del rendimiento y presentación de informes

Un BMS tiene capacidades de gestión del rendimiento y elaboración de informes, para cumplir con los objetivos de consumo de energía y calificación. En edificios de alto rendimiento, una buena calificación energética es crucial como parámetro de referencia sobre la calidad del espacio de trabajo.

Innovación

Redes inalámbricas asequibles.

En los últimos años la tecnología digital, equipos, controles y sensores han bajado mucho de precio, y los agentes capaces de diseñar, programar y mantener los sistemas se han multiplicado. La tecnología inalámbrica es cada vez más común, lo que hace que la instalación de BMS sea hoy fácil, asequible y, dados los resultados de su aplicación, ineludible.

Las oportunidades para implementar un BMS se han mejorado a través de la conectividad a Internet. La comunicación entre dispositivos o sistemas completos a través de una red de datos está reemplazando las tradicionales conexiones cableadas. Los desarrollos recientes en la captación y generación de energía renovable distribuida están permitiendo una nueva generación de sensores, desconectados de las redes de energía, que obtienen directamente la energía de fuentes ambientales.

Gestión de la demanda con capacidad de respuesta a la red

La naturaleza de la red está cambiando, se implementa la creciente necesidad y la oportunidad de que los consumidores adapten su carga en respuesta a las fluctuaciones de los precios y la escasez de recursos durante eventos de clima severo. Las estrategias planteadas en las actuaciones para NNMM contemplan la oportunidad de ahorros a través de la gestión de horarios y calendarios para la producción y almacenamiento de energía con alto valor y bajo coste. Se plantea instalar sistemas de generación a partir de fuentes renovables y

almacenamiento de varias escalas e intensidades, conectados a la red, en los Ministerios y en el Complejo de NNMM.

Los BMS se están integrando con sistemas de gestión de la demanda basados en software y sensibles a la red o sistemas especializados de gestión de la energía (SGA). Estas innovaciones permiten optimizar el consumo, la generación, la exportación y el almacenamiento de energía.

Capacidades predictivas

Un BMS puede reducir las puntas de demanda máxima, que constituyen una parte considerable de las facturas de energía de la AGE. Un BMS puede anticipar momentos de elevada demanda y permitir ajustes apropiados para evitar puntas por encima del umbral eficiente de demanda.

Por ejemplo, un BMS conectado a la web puede anticipar condiciones climáticas favorables o extremas y ajustar las secuencias del sistema de climatización para obtener el resultado más eficiente. Por ejemplo, si el BMS anticipa un día más caluroso de lo normal, puede preenfriar automáticamente el edificio para aprovechar la energía fuera de las horas pico.

Integración en sistemas organizativos más amplios. AGE.

La flexibilidad y la compatibilidad cruzada de los componentes de BMS permiten que múltiples aspectos de una estructura de servicios, como la de la AGE, se coordinen de manera más efectiva. Por ejemplo, un BMS puede alimentar la contabilidad y la planificación de recursos, o interactuar con sistemas completos de gestión de instalaciones.

Integración BIM, para el soporte de la información.

BIM es un soporte paramétrico en 3d que integra toda la información sobre los edificios, sus procesos y sus parámetros de gestión. La vinculación BIM – BMS es un factor clave como poderoso instrumento al servicio de una Gestión Integrada, utilizado por arquitectos, ingenieros y profesionales de la construcción para planificar, diseñar, construir y también para administrar y operar edificios en procesos colaborativos.

La integración de un BMS con un BIM permite simular y refinar el comportamiento y el rendimiento de un diseño propuesto antes de la construcción.

5.2.4.1.7.9 Sistemas de información y gestión de energía EMIS

Los Sistemas de Información y Gestión de Energía, EMIS, son una amplia familia de herramientas y servicios utilizados para gestionar el uso de energía de los edificios. Los EMIS incluyen:

b) Análisis de datos periódicos

El análisis de datos periódicos es un software utilizado para administrar y validar las facturas mensuales de servicios públicos y para el rendimiento energético. benchmarking, un proceso de medir el rendimiento de un edificio contrastándolo con su propio rendimiento pasado o con el de edificios similares. La evaluación comparativa puede implementarse dentro de la cartera de edificios de un Ministerio o compararse con una base de datos nacional de la AGE u otras (por ejemplo, utilizando ENERGY STAR Portfolio Manager). El proceso de evaluación comparativa ayuda a identificar edificios de bajo rendimiento con el objetivo de implementar mejoras de eficiencia. Las herramientas mensuales de análisis de datos utilizan datos periódicos sobre el consumo y la demanda de energía de todo el edificio. También pueden utilizarse como herramientas de evaluación comparativa, seguimiento de servicios públicos o conciliación de facturación, o como sistemas mensuales de monitoreo de energía.

c) Sistemas de información energética

Los sistemas de información energética son software, hardware de adquisición de datos y sistemas de comunicación utilizados para almacenar, analizar y mostrar los datos de los sensores y contadores de energía. Los EIS son un subconjunto de EMIS que se centran en el monitoreo periódico a nivel de contador o dispositivo de medición.

Los datos se adquieren principalmente de medidores de electricidad y gas en todo el edificio, pero también pueden incluir datos a nivel de sensores y sistemas, dependiendo de la profundidad de la monitorización local.

Datos externos, como los datos meteorológicos de series temporales, los precios de la energía y la información de respuesta de la demanda pueden integrarse en el EIS para mejorar sus capacidades analíticas. Las características básicas de EIS incluyen visualización de datos o visualización de tablas; cartera seguimiento de energía de edificios o sensores y contadores; perfiles de carga de series temporales; y análisis de carga máxima. Las EIS más avanzadas

proporcionan un mayor grado de análisis automatizado. EIS integra los sistemas de monitoreo de energía continuo, de todo el edificio, el seguimiento del rendimiento energético, las herramientas de visualización de contadores y sensores el análisis de energía, y el vínculo a los sistemas de gestión de energía en el edificio [107].

d) Herramientas de detección y diagnóstico de fallos.

Los sistemas de detección y diagnóstico de fallos son software que automatiza el proceso de detección de fallos y el rendimiento óptimo de los sistemas en los edificios y ayuda a diagnosticar sus posibles causas. FDD son un subconjunto de EMIS que se centran en la supervisión a nivel de sistema utilizando datos BAS e IoT. A diferencia de las alarmas BAS, que pueden detectar la desviación del valor del sensor asociada con un punto específico en función de las condiciones en tiempo real, los sistemas FDD permiten una lógica sofisticada que interrelaciona múltiples flujos de datos y realiza diagnósticos basados en reglas o modelos. Las herramientas FDD se aplican con mayor frecuencia como una aplicación de software separada que obtiene datos del BAS y puede proporcionar un informe de la duración y frecuencia de los fallos, así como sus impactos en el costo y / o la energía y los niveles de prioridad relativos. Por lo general, proporcionan varias causas o recomendaciones posibles para corregir cada fallo, lo que requiere un análisis de datos adicional de los datos de cada serie temporal (convenientemente vinculado al informe de fallos) o una inspección in situ [107].

FDD también puede denominarse herramientas de monitorización y análisis del sistema o sistemas de puesta en marcha continuos o basados en una monitorización continua.

e) Software automatizado de optimización de sistemas.

La optimización automatizada del sistema consiste en un software que analiza y modifica continuamente la configuración de control de BAS para

optimizar el uso de energía de los sistemas, por ejemplo de iluminación natural y artificial o de calefacción, ventilación y aire acondicionado (HVAC) mientras se mantienen el confort de los ocupantes.

Estas herramientas leen los datos del BAS y envían automáticamente puntos de consigna óptimos al BAS para ajustar los parámetros de control en función

de datos como el uso de energía contabilizado. La comunicación bidireccional con el BAS distingue las soluciones ASO de FDD.

Estas herramientas generalmente se centran en optimizar las estrategias de restablecimiento de los sistemas en función de las condiciones exteriores. Por ejemplo, una herramienta ASO puede determinar una hora de inicio óptima para una bomba de calor con un día de anticipación en función de los pronósticos meteorológicos y de carga, con el objetivo de minimizar el uso total de energía del sistema. Los ajustes de control que pueden ser alterados por las herramientas ASO incluyen temperaturas de suministro de energía térmica, temperatura y presión, y parámetros de consigna de refrigeración y calefacción.

ASO también puede denominarse como: software de optimización de control, optimización continua o sistemas de optimización automática del uso de energía.

Mediante la integración de estos cuatro sistemas, EMIS obtiene una serie de beneficios y ventajas operativos:

- Identificar oportunidades de eficiencia energética.
- Detectar fallas en el sistema o el equipo.
- Rastrear y comparar el rendimiento del edificio y el equipo.
- Rastrear y administrar los cargos por demanda.
- Validar las facturas de servicios públicos.
- Medir y verificar los ahorros específicos del proyecto.
- Proporcionar datos para aterrizar y establecer objetivos de energía.

Las tecnologías EMIS permiten reducciones de la demanda energética del 11 % al 22 % para los Sistemas de Información Energética y del 15 % al 28 % para las herramientas de Detección y Diagnóstico de Fallos.

f) EMIS en la Gestión Integrada de O+M orientada a la Eficiencia

Los EMIS son una familia, en muy rápido desarrollo y evolución, de herramientas que monitorean, analizan y controlan el uso de la energía y el rendimiento de los sistemas de los edificios.

Los datos generados a partir de las herramientas de EMIS permiten a los técnicos de los sistemas y a los Gestores de los sistemas de instalaciones y energía operar y mantener sus edificios de manera más eficiente y con un mejor

confort para los ocupantes al proporcionar visibilidad y análisis de las operaciones de iluminación, acondicionamiento y ventilación del espacio y otros usos finales.

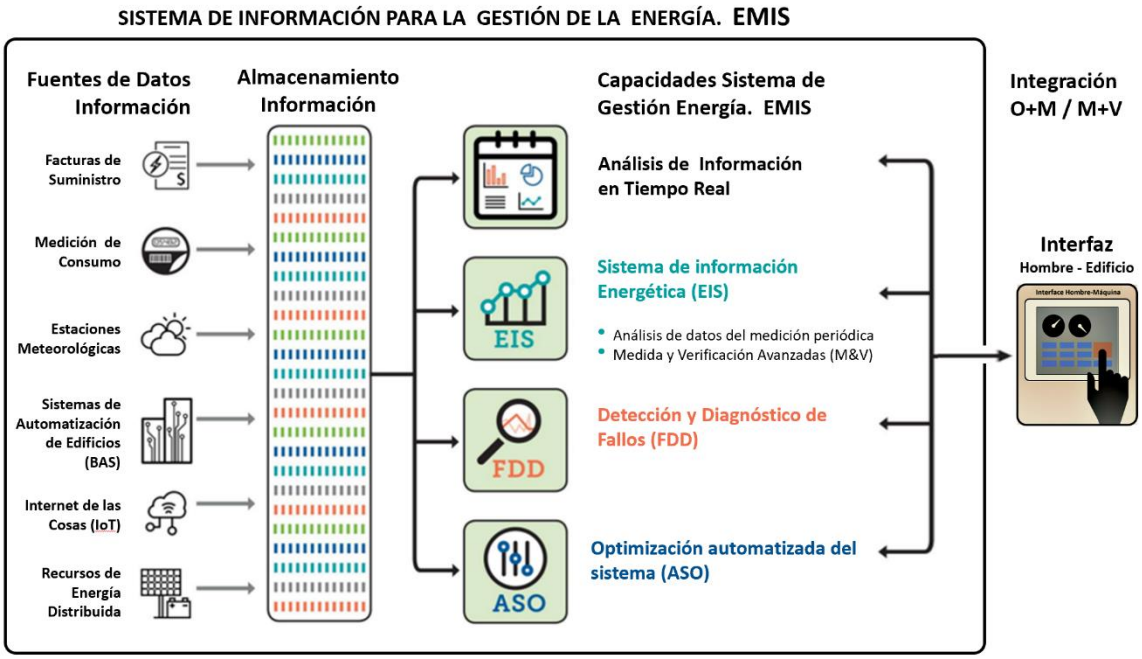


Figura 5-57. Sistema de información para la gestión de la energía. EMIS: Fuentes de datos e información, capacidades e integración en el sistema integrado de gestión. Modificado por el autor de [107], [108].

EMIS es una poderosa herramienta de Gestión Integrada de los edificios orientada a identificar y aprovechar oportunidades de mejora que no suelen ser evidentes sin un análisis complejo y digitalizado de información.

Los estores de los edificios deben hacer coincidir sus estrategias de gestión de energía con las capacidades de su sistema EMIS, configurado a medida de sus necesidades para agilizar la gestión. Una sola herramienta de software a menudo incorpora más de una de las capacidades que se muestran en el siguiente gráfico ya que algunos proveedores de EMIS integran todas las áreas en su software.

La Figura 5-57 muestra como los datos sobre los parámetros operativos proceden de muchas fuentes. Con la proliferación de nuevas tecnologías (por ejemplo, dispositivos de Internet de las cosas [IoT], recursos de energía distribuida, de fuentes renovables y recursos de almacenamiento) el volumen de datos ha aumentado exponencialmente en los últimos años.

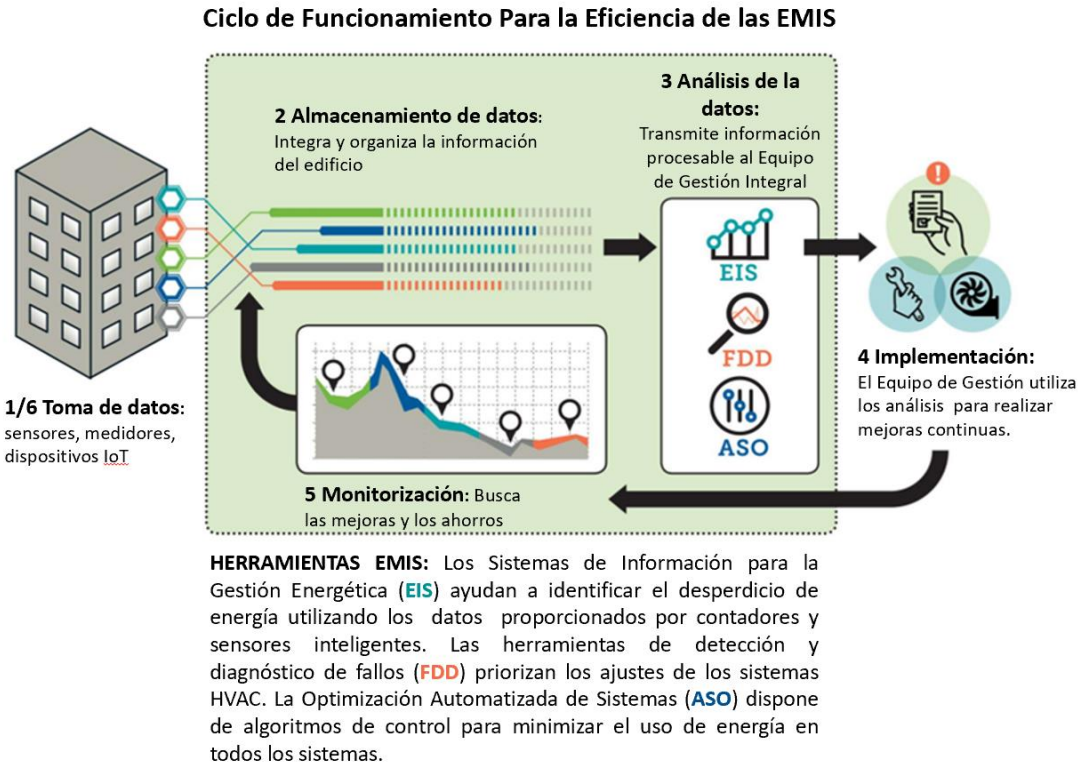


Figura 5-58. Esquema del ciclo de funcionamiento para la eficiencia de las EMIS. Modificado por el autor de [107].

EMIS ha surgido para permitir a los propietarios de edificios extraer la información precisa y procesable de la gran cantidad de datos que proporcionan los sistemas de los edificios. Por ejemplo, los sistemas modernos de automatización de edificios (BAS) monitorean cientos de puntos por edificio, y los Ministerios tienen una cartera de edificios en operación que genera muchos miles de puntos de datos a intervalos, por ejemplo, de 15 minutos.

El BAS puede proporcionar alarmas y avisos para datos que manifiesta desviaciones fuera de los rangos previstos, pero las capacidades analíticas de un sistema BAS dentro de un BMS no son capaces, a esa escala, de permitir identificar las soluciones para reconfigurar y optimizar en cada momento un sistema. EMIS proporciona la potencia analítica necesaria para ayudar a los propietarios de edificios a identificar situaciones y generar respuestas eficientes a partir de los datos. La Figura 5-58 ilustra el ciclo cerrado y continuo de mejora orientado al aumento de la eficiencia que se implementa a través de los EMIS.

g) EMIS y Sistemas de Gestión del Funcionamiento Basados en la Monitorización Continua, MBCx

Si bien los EMIS son herramientas poderosas, cualquier herramienta necesita un proceso lógico y una estrategia que la utilice para obtener el impacto y los beneficios previstos. El Funcionamiento Basado en la Monitorización (MBCx) es un proceso continuo que monitoriza y analiza grandes cantidades de datos de forma continua, y EMIS es una parte integral de la racionalización del análisis y la automatización del proceso MBCx. MBCx tiene sus raíces en el proceso de puesta en marcha de edificios existentes (EBCx). Tradicionalmente, EBCx se ha implementado a través de contratistas de mantenimiento que analizan datos a corto plazo sobre el rendimiento del edificio. El desarrollo de EMIS ha permitido utilizar datos en tiempo real para proporcionar análisis automatizados y abordar problemas a medida que se identifican. EBCx y MBCx abordan el mismo tipo de problemas operativos en los edificios (por ejemplo, reducción del exceso de calefacción o refrigeración, identificación de equipos defectuosos y optimización de los controles), y logran niveles similares de ahorro. MBCx supone una segunda escala de optimización, se puede utilizar después de EBCx para realizar un seguimiento de si el ahorro de energía ha persistido y para encontrar oportunidades adicionales. Alternativamente, se puede utilizar un proceso MBCx desde el principio, en lugar de EBCx, para encontrar y corregir problemas.

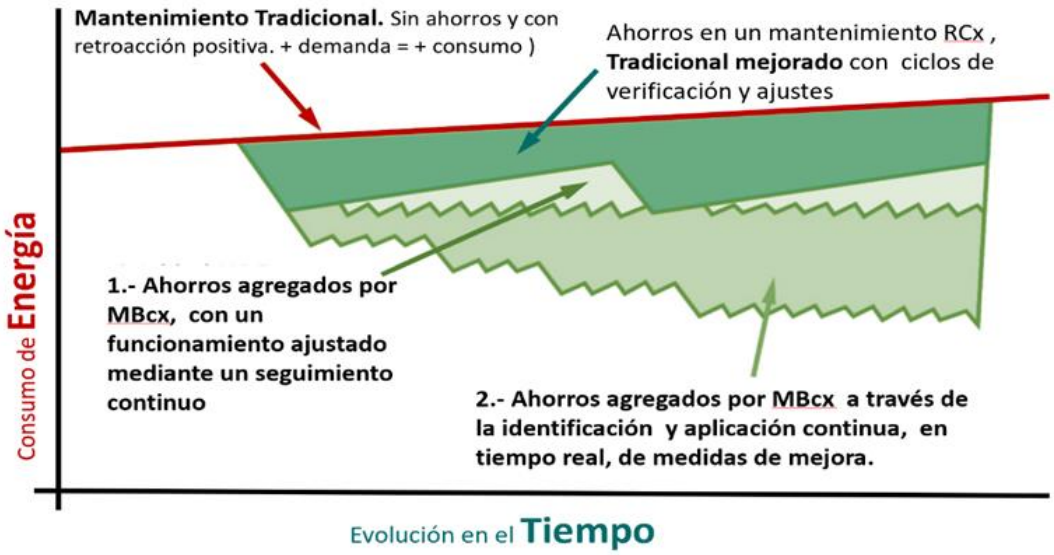


Figura 5-59. Esquema de los ahorros agregados por la incorporación de las herramientas EMIS.
Fuente: Instituto Europeo de Innovación.

Los tres elementos principales de las herramientas EMIS (almacenamiento de datos, análisis de datos y monitoreo) se incorporan al proceso MBCx. Si bien MBCx es una práctica recomendada, muchas organizaciones han implementado con éxito EMIS sin un proceso MBCx definido. El EMIS puede integrarse en las operaciones diarias del edificio como una herramienta de apoyo, lo que permite la toma de decisiones basada en datos para los equipos de las instalaciones. La Figura 5-59 muestra la posibilidad de reducir la demanda y aumentar la eficiencia de los sistemas de Información por implementación de sistemas de Gestión basados en EMIS.

5.2.4.1.8 Estrategia transversal y requisitos de los puntos de consumo

Al servicio de las estrategias de eficiencia el sistema DH&C de 5ª generación propuesto ha de permitir a cada Ministerio no solo extraer energía de la red, sino también suministrarla desde su propio sistema refrigeración y enfriamiento de espacios. Para ello, como se ha indicado más arriba, cada edificio dispondrá de una subestación con bombas de calor agua-agua a 6 tubos, un equipo de regulación y control, contadores de energía, y en caso de ser necesario intercambiadores de calor y sistemas de almacenamiento térmico.

En cuanto a la distribución, al tratarse de un complejo edificatorio con varios edificios de uso terciario, cuyas superficies y orientaciones son muy diversas, es habitual que, en momentos del año con temperaturas no extremas, el excedente térmico de un edificio pueda servir como fuente para otro. Por ello, cada punto de consumo del DH&C no sólo ha de disponer de un nodo de conexión adecuado que permita verter su excedente al sistema, sino también de forma interna ha de poder trabajar simultáneamente distribuyendo calor y frío entre sus diferentes zonas.

El éxito del sistema radicará en que cada edificio disponga de un sistema interno de distribución de calor y frío a 4 tubos, junto con una estrategia transversal que comprenda una adecuada conexión entre todos los ministerios.

Componentes y estrategias de ecosistema de distrito de 5ª generación en el complejo de NNMM

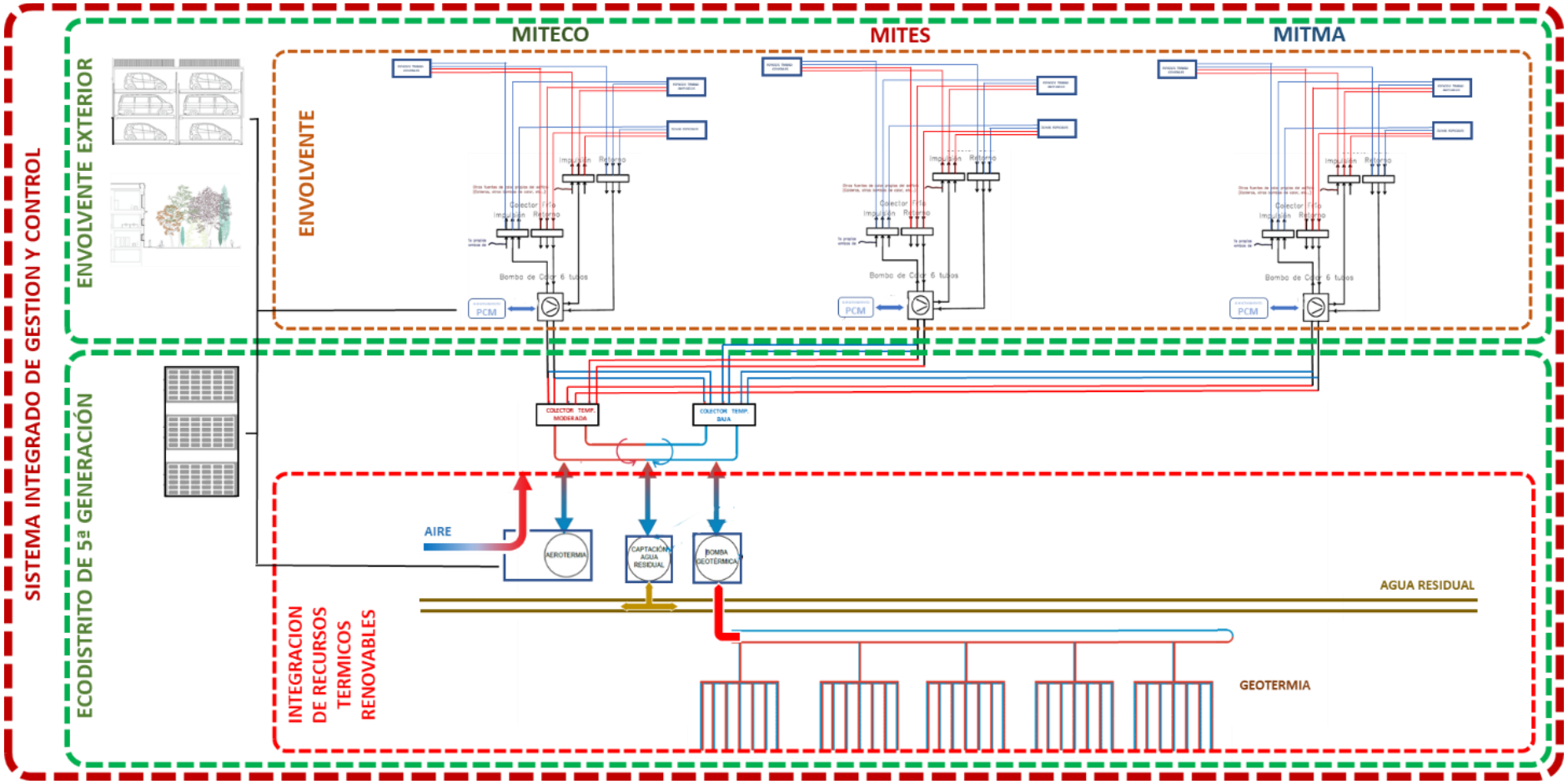


Figura 5-60. Esquema de la Red de 5ª generación propuesta en el CNNMM.
Fuente: Instituto Europeo de Innovación.

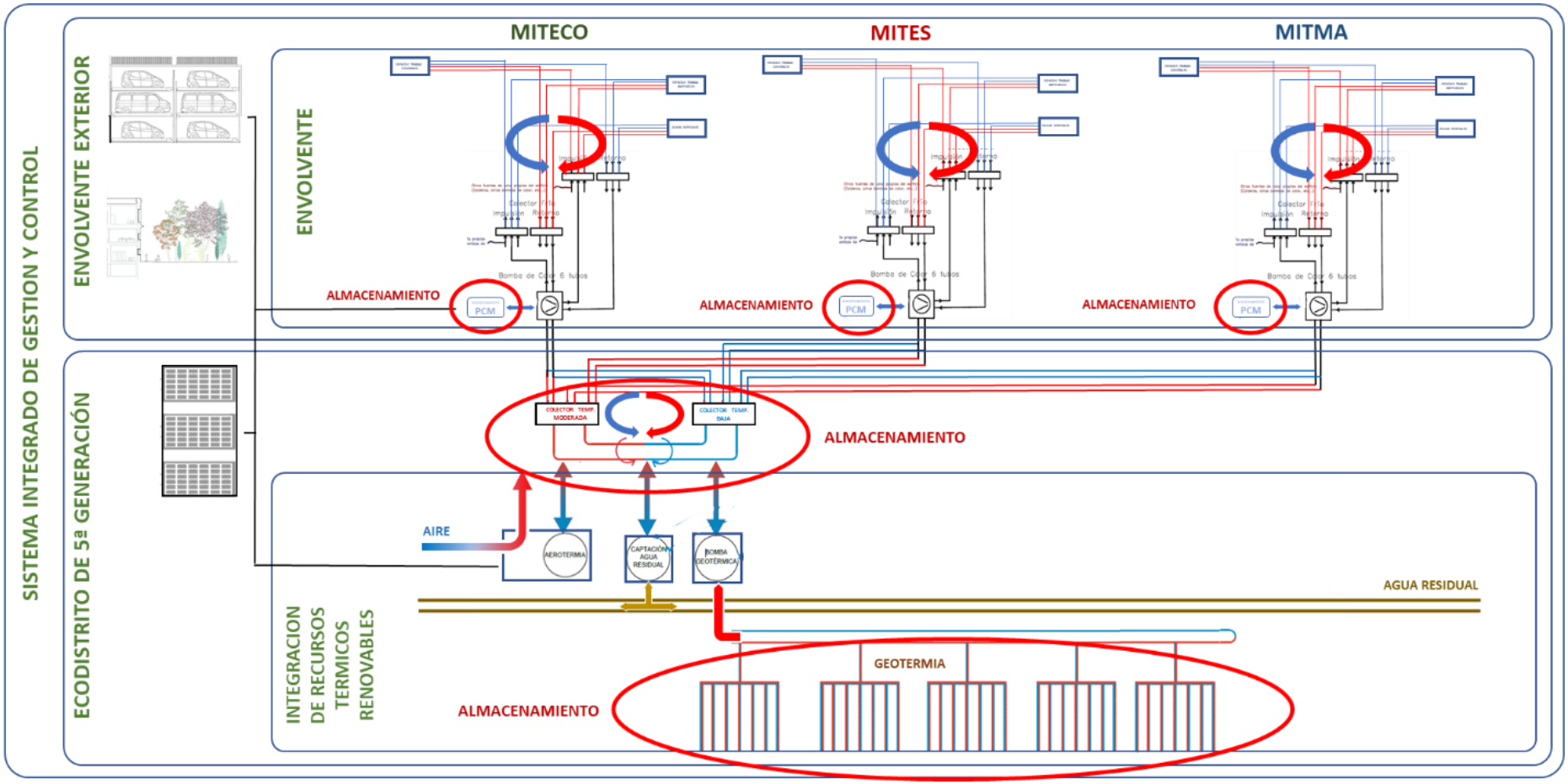


Figura 5-61. Capacidades de almacenamiento e intercambio en distintas escalas de la red de 5ª generación del CNNMM. Fuente: Instituto Europeo de Innovación.

5.2.4.1.9 Tablas de reducción de la demanda y reducción de emisiones por actuaciones en la red de eco distrito de 5ª generación bajo el sistema integrado de control

		kWh Demanda Actual / año	kWh consumo Actual / año	kWh consumo Propuesta /año	% kWh Consumo Ahorro	kWh Consumo Ahorro / año	Emisiones Kg CO2 Ahorro /año
2 ACTUACIONES PARA LA COBERTURA EFICIENTE DE LA DEMANDA. Reducción del consumo de energía primaria para la cobertura de la energía térmica demandada por el edificio.							
2	RED DE DISTRITO + CONTROL	5.108.964,92	4.425.778,04	611.176,79	86%	3.814.601,25	1.123.579,36

Figura 5-62. Reducción de la demanda y reducción de emisiones por actuaciones en la red de eco distrito de 5ª generación bajo el sistema integrado de control. Fuente: Instituto Europeo de Innovación.

	DEMANDA RESULTANTE POR MEJORAS DE LA ENVOLVENTE kWh	CONSUMO ACTUAL kWh	CONSUMO PROPUESTA kWh	AHORRO kWh	%	KG CO2	%
TOTALES SISTEMA 5ªG	5.108.964,92	4.425.778,04	611.176,79	3.814.601,25	86%	1.123.579,36	8,70%
COMPONENTES DEL SISTEMA DE 5ª G.							
Control (15% consumo evitado por recuperación y almacenamiento).	766.344,74			666.386,73			
COP actual ponderado 1,15							
Producción Directa (40% cobertura de la demanda total)	2.043.585,97			1.436.433,62			
COP 6							
Red De Distrito (45% cobertura de la demanda total).	2.299.034,21			1.711.780,91			
COP 8							

Tabla 5.23. Reducción de la demanda y reducción de emisiones por actuaciones en la red de eco distrito de 5ª generación bajo el sistema integrado de control. Fuente: Instituto Europeo de Innovación.

	DEMANDA RESULTANTE POR MEJORAS DE LA ENVOLVENTE kWh	CONSUMO ACTUAL kWh	CONSUMO PROPUESTA kWh	AHORRO kWh	%	KG CO2	%
TOTALES SISTEMA 5ºG	**5.108.964,92**	**4.425.778,04**	**611.176,79**	**3.814.601,25**	**86%**	**1.123.579,36**	**84,7 %**
COMPONENTES DEL SISTEMA DE 5ª G.							
Control (15% consumo evitado por recuperación y almacenamiento). COP actual ponderado 1,15	766.344,74			666.386,73			
Producción Directa (40% cobertura de la demanda total) COP 6	2.043.585,97			1.436.433,62			
Red de Distrito (45% cobertura de la demanda total). COP 8	2.299.034,21			1.711.780,91			

Tabla 5.24. Estimación de reducción de la demanda y reducción de emisiones mediante actuaciones en la red de ecodistritos de 5ª generación bajo el sistema integrado de gestión O+M/M+V.

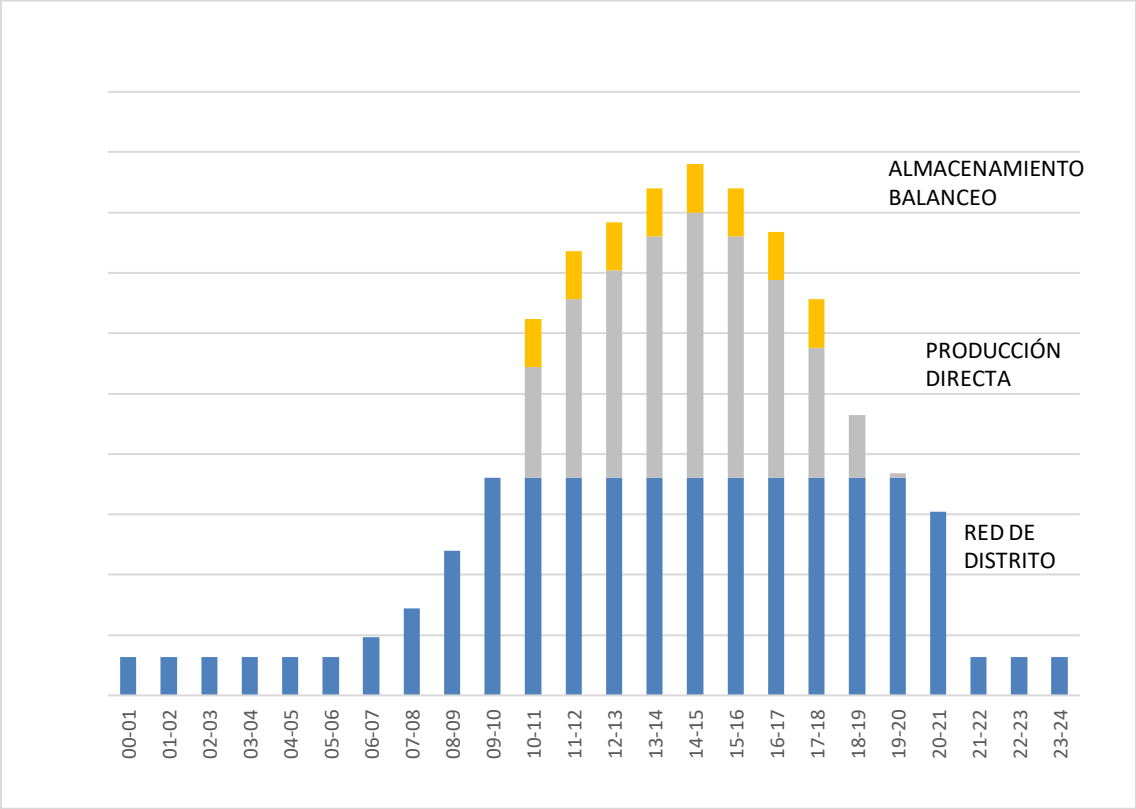


Figura 5-63. Distribución de la Cobertura de la demanda y reducción de emisiones mediante actuaciones en el ecodistrito de 5ª generación bajo el sistema integrado de gestión O+M/M+V.
Fuente: Instituto Europeo de Innovación.

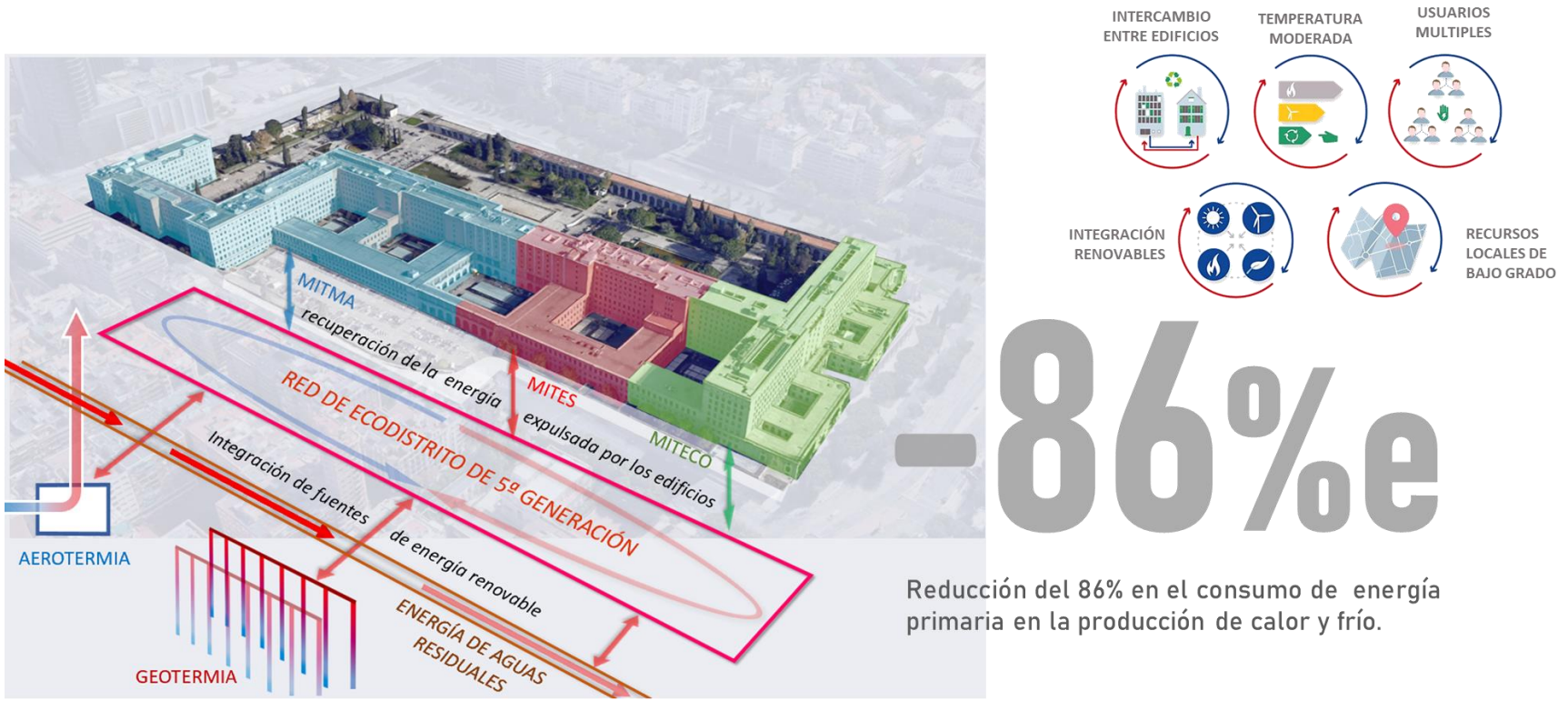


Figura 5-64. Esquema de la integración y el ahorro generado a través de la red de ecodistrito de 5ª generación en el CNNMM. Fuente: Instituto Europeo de Innovación.

5.3. Directrices para la transición desde el modelo actual al modelo propuesto

El trabajo de Auditoría y Propuestas para cada uno de los tres ministerios, incluye, para cada uno de los Ministerios y en su conjunto para el Complejo de NNMM, el estudio del proceso de transición desde los modelos individuales actuales hacia un modelo en el que cada Ministerio puede ir aprovechando, desde el momento de su puesta en marcha y de manera progresiva y escalada, los nuevos recursos transversales comunes y transite hacia un escenario de integración, en el que se compatibilice la libertad individual de cada Ministerio en la gestión de sus espacios y sus recursos y la gestión concertada entre ellos en un ámbito de la reducción de la demanda energética, la calidad ambiental del espacio de trabajo, la integración de recursos renovables y la eficiencia en la generación y la gestión energética.

En este apartado se describen las actuaciones de transición que deberán acometer cada uno de los Ministerios, en el proceso de transición de los modelos individuales actuales hacia la integración en el modelo de actuaciones transversales comunes.

La transición en el complejo de NNMM debe comenzar por las zonas del edificio que ya tienen una distribución flexible o abierta y desde allí reproducir el modelo de actuación en el resto de zonas del edificio. Se deben unificar por etapas las zonas con horarios extendidos dando como preferencia la eliminación de sistemas obsoletos y de alto impacto ambiental, su uso se regulará a través de un sistema de control.

a) Sistemas de producción

- Transición del esquema actual de gasoil más enfriadoras que solo pueden producir frio o calor con temperaturas extremas entorno a un ΔT de 60º a un sistema de bombas de calor de temperatura moderada con un ΔT de 25º entre la producción de frio y de calor.
- Eliminación de equipos de producción de las cubiertas para reducir la exposición y producción de las maquinas a altas o bajas temperaturas exteriores.

Sistemas de distribución

- Transición de un sistema a 2 tubos a un sistema a 4 tubos, cumpliendo el aislamiento mínimo estipulado en el RITE con una reducción de las perdidas energéticas.

- El circuito de frio y de calor deben ser independientes cada uno con su propio colector pudiéndose realizar balances y equilibrados térmicos entre circuitos, además de que exista un sistema de control en cada circuito de temperatura y equilibrado de caudal.
- El sistema debe ser registrable y debe permitir el intercambio térmico entre diferentes zonas del edificio que demanden diferentes temperaturas de confort.

Sistemas de emisión más absorción

- Realización de un diagnóstico de los equipos terminales de climatización actuales para su posible reutilización o adaptación a una fuente de temperatura moderada.
- Transición de un sistema de emisión a alta temperatura a uno de temperatura moderada.
- Análisis de equipos autónomos para zonas especiales y zonas de alta intensidad para su transición hacia un sistema a temperatura moderada.

Sistemas de aire

- Transición de un sistema prácticamente inexistente a un sistema integrado por zonas con control individual y funcionamiento variable.
- Se puede tomar como precedente la transformación de la planta 5ªC con una distribución en planta libre o ligera con caudales de ventilación y renovación mínimos adecuados.
- Implantación de un sistema de aire de flujo cruzado con recuperador de calor, entálpico o sensible con una eficiencia de al menos el 75%.
- Un aspecto importante de cara a la implantación de una ventilación eficiente es la liberación de equipos/redes y otros sistemas de los patios interiores del edificio.

5.4. Beneficios múltiples de la eficiencia energética correspondientes a las actuaciones propuestas en el complejo de NNMM

Los beneficios de la Eficiencia Energética (EE) van mucho más allá de la reducción de consumos, los ahorros energéticos o la reducción de emisiones de CO_2 que se puedan lograr. Los Beneficios Múltiples de la Eficiencia Energética o su término en inglés, Multiple Benefits of Energy Efficiency (MBEE), suelen ser menos tangibles y más difíciles de cuantificar que el ahorro de energía. Además, las herramientas de toma de decisiones políticas requieren que los beneficios se moneticen para permitir la comparación con los costos de los programas de eficiencia energética. El término MBEE abarca una amplia gama de impactos, incluidos los económicos, la salud y el confort físico, sociales y ambientales (tanto locales como globales), entre otros. La identificación de todos los beneficios directos e indirectos de la eficiencia energética es un campo en evolución pero importante es importante para la evolución de los proyectos [27]. La Figura 5-65 ilustra diversos beneficios de la EE:



Figura 5-65. Beneficios Múltiples de la Eficiencia energética - MBEE [26].

5.4.1. Nivel individual + nivel transversal

Sobre las actuaciones integrales, y el cómputo y simulación de los beneficios múltiples que generan las acciones propuestas para la EE.

La Agencia Internacional de la Energía - IEA, advertía en el año 2016 que: "*Los programas y políticas de eficiencia energética se diseñan, en general, basándose únicamente en los objetivos de ahorro de energía, lo que conduce a una subestimación de su impacto total*". En ese sentido el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) sostiene la misma opinión y destaca la importancia del sector de la construcción y la rehabilitación de edificios para hacer frente a las dinámicas del cambio climático, sugiriendo que las inversiones en el sector de la construcción pueden actuar como un motor para lograr muchos otros objetivos políticos y ser una palanca para los obtener además beneficios sociales e impactos económicos positivos sobre la economía general [101].

Una acción combinada interministerial, trasversal y holística permitiría incluir en el desarrollo de las políticas relacionadas con el incentivo de la eficiencia energética en la construcción, objetivos completos y complejos sobre el comportamiento integral de los edificios de alta eficiencia energética al respecto de: la salud humana, el medio ambiente, la política social, la economía, y la seguridad energética. Este enfoque múltiple de los beneficios generados por la EE conduce a una convergencia de intereses y fomenta la cooperación interdepartamental e intersectorial, que es esencial para establecer una perspectiva holística sobre el desarrollo social [109].

Incluir los MBEE en las etapas de evaluación y desarrollo de las políticas y programas específicos que incentivan su mejora en la edificación, contribuye a liberar el enorme potencial que la Eficiencia Energética (EE) tiene para mejorar la economía a escalas superiores y generar impactos sociales positivos.

Tal como se plantea la escala de este trabajo, es más fácil justificar requisitos mínimos de eficiencia energética ambiciosos si se consideran los MBEE, más allá de la reducción del consumo de combustibles, aunque ellos suponga un esfuerzo interpretativo sobre los objetivos de fondo de los planes de incentivación de la mejora de la Eficiencia en la AGE, PRTR / NEXT Generation, y la superación de los limitados instrumentos de evaluación utilizados en los planes de incentivación tecnológica desarrollados en la última década.

Según un informe de la CE realizado en el año 2006, en diferentes escenarios de aplicación, se demostró que, entre otros efectos sociales positivos, la Eficiencia Energética de los Edificios, o su término en inglés Energy Performance of Buildings (EPBD) podría mejorar el PIB de los Estados miembros hasta en un 0,6% [110].

5.4.2. Beneficios Múltiples a escala Macro

A nivel macro, se consideran los beneficios de la inversión que tienen impacto sobre la sociedad en su conjunto, por ejemplo: una disminución de las emisiones de energía y de carbono; un aumento del PIB y del empleo y una mejora de la salud pública [101].

La cuantificación y monetización de estos beneficios más amplios puede ayudar a los responsables políticos y a los inversores a comprender la importancia de los impactos asociados y, por lo tanto, aumenta el atractivo de las medidas de eficiencia energética, con el fin de movilizar inversiones para alcanzar los objetivos de la UE para 2050 [101].

Medioambiental	Reducción de la contaminación atmosférica
Medioambiental	Impactos de Gases efecto Invernadero (GEI)
Medioambiental	Ahorro de energía
Medioambiental	Gestión de recursos: circularidad/Ciclo de Vida
Económico	Precios de la energía más bajos
Económico	Innovación y Competitividad
Económico	Efectos sobre el empleo
Económico	PIB
Económico	Reducción del presupuesto público
Económico	Seguridad energética
Social	Salud y bienestar: reducción de la mortalidad
Social	Salud y bienestar: morbilidad
Social	Impactos de la pobreza energética
Social	Mejora de la productividad

Tabla 5.25. Listado de Beneficios Múltiples de la Eficiencia Energética a escala Macro (social) [101].

5.4.3. Beneficios Múltiples a escala Micro.

A nivel micro (privado o, en nuestro caso individual) los impactos representan los beneficios de una inversión en eficiencia energética vinculada al uso real y al valor del edificio, por ejemplo, el aumento del confort y la salud de los habitantes, el aumento del valor de los activos del edificio y la reducción del gasto en energía. La siguiente tabla ofrece ejemplos de impactos de perspectiva privada [101].

Calidad de construcción	Comportamiento físico de los edificios
Calidad de construcción	Facilidad de uso y control por parte del usuario
Calidad de construcción	Integración estética y arquitectónica
Calidad de construcción	Áreas de construcción útiles
Calidad de construcción	Seguridad (intrusión y accidentes)
Económico	Reducción de la exposición a las fluctuaciones de los precios de la energía
Bienestar del usuario	Confort térmico
Bienestar del usuario	Iluminación natural y contacto con el exterior
Bienestar del usuario	Calidad del aire interior
Bienestar del usuario	Ruido interno y externo
Bienestar del usuario	Orgullo, prestigio, reputación
Bienestar del usuario	Facilidad de instalación y reducción de molestias

Tabla 5.26. de Beneficios Múltiples de la Eficiencia Energética a escala micro (individuales) [101].

5.4.4. Múltiples Beneficios y Objetivos de Desarrollo Sostenible

Los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de las Naciones Unidas están en el corazón de las políticas y las inversiones, ya que ambos se preocupan por planificar e invertir para el bienestar a largo plazo de sus beneficiarios. Los ODS son de vital importancia para la salud de la economía mundial y tienen como objetivo crear un modelo viable para el futuro en el que se logre todo el crecimiento económico sin comprometer el medio ambiente ni imponer cargas injustas a la sociedad [23].La eficiencia energética se considera fundamental para alcanzar los ODS, y se considera uno de los tres objetivos clave de la Energía Sostenible para Todos (SE4all) de las Naciones Unidas, que se alcanzarán para 2030:

- Garantizar el acceso universal a los servicios energéticos modernos.

- Duplicar la tasa mundial de mejora de la eficiencia energética.
- Duplicar la proporción de energía renovable en el mix energético mundial.

Categoría	Co-beneficio	ODS
Medio ambiente	**Ahorro de energía**	**OBJETIVO 12:** Consumo y producción responsables **OBJETIVO 13**: Acción por el clima **OBJETIVO 11**: Ciudades y comunidades sostenibles
Medio ambiente	**Impactos de emisiones de GEI**	**OBJETIVO 13:** Acción climática
Medio ambiente	**Reducción de la contaminación atmosférica**	**OBJETIVO 7**: Energía asequible y limpia
Medio ambiente	**Gestión de recursos**	**OBJETIVO 12:** Consumo y producción responsables **OBJETIVO 11**: Ciudades y comunidades sostenibles
Económico	**Efectos en el trabajo**	**OBJETIVO 8:** Trabajo decente y crecimiento económico
Económico	**PIB**	**OBJETIVO 8:** Trabajo decente y crecimiento económico
Económico	**Presupuesto Público**	**OBJETIVO 8:** Trabajo decente y crecimiento económico
Económico	**Seguridad energética**	**OBJETIVO 7:** Energía asequible y limpia **OBJETIVO 11:** Ciudades y comunidades sostenibles **OBJETIVO 12:** Consumo y producción responsables
Económico	**Innovación y Competitividad**	**OBJETIVO 9:** Industria, Innovación e Infraestructura **OBJETIVO 11:** Ciudades y Comunidades Sostenibles
Social	**Salud y bienestar: reducción de la mortalidad**	**OBJETIVO 3:** Buena salud y bienestar
Social	**Salud y bienestar: morbilidad**	**OBJETIVO 3:** Buena salud y bienestar
Social	**Alivio de la pobreza**	**OBJETIVO 1:** No a la pobreza **OBJETIVO 7:** Energía asequible y limpia **OBJETIVO 10:** Reducción de la desigualdad
Social	**Productividad mejorada**	**OBJETIVO 4:** Educación de calidad **OBJETIVO 8:** Trabajo decente y crecimiento económico

Tabla 5.27. Beneficios Múltiples de la Eficiencia Energética a escala Macro y ODS asociados [101].

"Lograr cada uno de los tres objetivos lograría múltiples y sustanciales beneficios para los países, las empresas y la sociedad. La energía es la industria más grande

del mundo, y la transición a sistemas de energía sostenibles proporciona quizás una de las mayores oportunidades económicas globales del siglo 21, particularmente importante en un momento de dificultades financieras en muchas naciones" [25].

Los MBEE destacados para este estudio están directamente relacionados con muchos de los ODS de la ONU, los ODS se enumeran y vinculan con los Beneficios Múltiples, BM, como se sintetiza en la Tabla 5.27.



Figura 5-66. Objetivos de Desarrollo Sostenible. [24]

Todos los MBEE están vinculados a uno o más de los ODS y tomados en conjunto los beneficios identificados alcanzan 10 de los 17 ODS. Los 7 ODS restantes no están directamente vinculados a los BM.

5.4.5. Beneficios de la Eficiencia Energética. El cálculo de la monetización.

Existen diferentes formas de determinar el valor monetizado de los MBEE de la eficiencia energética en los edificios. Los mecanismos para hacerlo van desde metodologías de cálculo muy básicas hasta métodos de modelado y simulación complejos, ajustados a la complejidad del modelado y simulación de las distintas actuaciones propuestas en este estudio.

Para evaluar el importe monetizado relacionado con los beneficios integrales de la Eficiencia Energética, no sólo el ahorro de energía primaria y su impacto

económico, hay que tener en cuenta que hay superposiciones entre algunos de los impactos positivos generados por las acciones que hemos enumerado a escalas Macro y Micro en los puntos anteriores, por ejemplo: las actuaciones sobre la contaminación del aire, están vinculadas y se superponen a las de la salud y a las del bienestar de manera evidente, luego sus efectos y el impacto económico monetizado de los mismos se superponen también.

Categoría	Co-beneficio	¿Incluido en los cálculos de monetización de beneficios?
Medioambiental	**Clima: Reducción de la contaminación del aire**	No, se superpone con la productividad, la salud y el bienestar
Medioambiental	**Impactos de emisiones de GEI**	Sí
Medioambiental	**Ahorro de energía**	Sí
Medioambiental	**Gestión de recursos**	No, solapa con los costos de inversión en cálculo de GC y ahorro de energía
Económico	**Precios más bajos de la energía**	No, se superpone con el PIB
Económico	**Innovación y Competitividad**	No, se superpone con el PIB
Económico	**Efectos en el empleo**	No, se superpone con el PIB
Económico	**PIB**	Sí
Económico	**Reducción del presupuesto público**	No, se superpone con el PIB
Económico	**Seguridad energética**	Sí
Social	**Salud y bienestar: mortalidad**	Sí
Social	**Salud y bienestar: morbilidad**	Sí
Social	**Impactos en el alivio de la pobreza**	No, se superpone con la salud y el bienestar y el PIB
Social	**Productividad mejorada**	Sí

Tabla 5.28. Beneficios a incluir en los cálculos económicos monetizados y superposición de actuaciones en el cómputo de beneficios globales [101].

Al monetizar los impactos no energéticos de la eficiencia energética, se ha de garantizar que no haya una doble o múltiple contabilización de los beneficios y, por lo tanto, usar un enfoque conservador a la hora de integrar la monetización de beneficios múltiples. Lo que nos conduce a una consideración de la complejidad,

que no es habitual en los planteamientos actuales, pero que es la que propugna la Unión Europea desde hace más de una década.

En el caso de nuestras propuestas de actuación en el Complejo de NNMM, sobre la base de las directrices para las actuaciones de mejora propuestas para ser consideradas como parte consustancial de los beneficios de la actuación, incluimos en la Tabla 5.28 las categorías, los beneficios múltiples integrados o co-beneficios y los aspectos que deben ser incluidos, considerando las superposiciones, en el cálculo monetizado de beneficios económicos obtenidos.

5.4.6. El enfoque hacia el Ciclo de Vida y la optimización de los costos.

La metodología adecuada para calcular los requisitos de rendimiento energético óptimos de una acción integrada como la que proponemos para el Complejo de NNMM, en función de los costes y en el marco de la EPBD, se basa en el "modelo de cálculo de costes globales", normalmente denominado "Análisis de Costes del Ciclo de Vida", o en inglés Life Cycle Cost Analysis (LCCA).

Esta metodología de Análisis de Ciclo de Vida, incluyendo el análisis económico, se desarrolló en la década de 1960 con el fin de evaluar el impacto de una actividad, servicio o producto en el medio ambiente, desde la cuna hasta la tumba, teniendo en cuenta todas las categorías del impacto y los daños a la salud humana y al medio ambiente.

A mediados de los años 90, los investigadores comenzaron a definir métodos de medición más consistentes de estos impactos y en 2004 una organización conjunta del PNUMA y SETAC estableció un grupo de trabajo para integrar los criterios sociales en la evaluación del Ciclo de Vida [111].

El análisis de optimización de costos en la Directiva (UE) 2018/844 [112], relativa a los EPBD, se basa principalmente en aspectos económicos convencionales, todavía no tienen suficientemente en cuenta los beneficios sociales o económicos más amplios, incluidos [113], entre otros, en las escalas macro y micro que acabamos de exponer

Un enfoque incompleto y restrictivo puede reducir la evaluación de rentabilidad de las medidas de eficiencia energética de espectro más amplio y con mayor impacto social, lo que puede contribuir a limitar las inversiones en eficiencia energética a requisitos mínimos y marginar objetivos de eficiencia energética más elevados, tanto para los edificios nuevos como para la rehabilitación de los existentes, y

conducir a requisitos menos ambiciosos (que los óptimos) en algunos de los países más avanzados[114], como es el caso de España.

5.4.7. Actuaciones para la Eficiencia Energética en el Complejo de NNMM. Un enfoque integral con beneficios múltiples.

Las directrices de mejora plateadas a raíz de esta Auditoría Energética suponen una reducción significativa del impacto del edificio y del impacto de sus actividades, en las categorías fundamentales en las que se resumen y encuadran todos los indicadores y factores de impacto en el Ciclo de Vida (con siglas en inglés LCA):

- La Calidad de los Ecosistemas. En nuestro caso el ecosistema antrópico urbano de NNMM.
- La Salud Humana. Incluyendo factores de ergonomía y confort determinantes del rendimiento intelectual de los usuarios y trabajadores del Complejo.
- El Cambio Climático. Las emisiones de gases de efecto invernadero, de otros gases contaminantes, de partículas, etc.
- El Consumo de Recursos. Energía y materiales.
- Factores dinámicos de prolongación del Ciclo de Vida. Como son la flexibilidad del Complejo, de los edificios y de sus sistemas para actualizarse, reconfigurarse y facilitar escenarios de reutilización.
-

5.4.8. Relación de beneficios múltiples generados por las actuaciones propuestas en los dos ministerios, MITES, MITMA y en el complejo de NNMM.

5.4.8.1. Sobre la salud humana. Escala individual y escala social

Mejora de la calidad ambiental interior

- Bienestar físico, ergonomía.
- Confort visual, ergonomía.
- Salud, reducción de las bajas por enfermedad y el absentismo laboral.

- Incremento de la creatividad y desarrollo de las capacidades intelectuales.
- Mejora cualitativa y cuantitativa de la productividad.
- La mejora de las capacidades humanas, función mental, memoria, rapidez.
- Interacción biofílica equilibrada entre las personas (usuarios, trabajadores, visitantes) y los factores naturales, luz, aire, vistas, espacio exterior.
- Mejora del confort termo-higrotérmico, con una disminución mínima del 9% del PPD (Porcentaje de Personas Insatisfechas).

5.4.8.2. Sobre la calidad de los ecosistemas. Ecosistemas antrópicos

a) Espacios exteriores

- Reducción de la isla de calor.
- Mejora de la calidad del aire, limpieza, polvo, microorganismos.
- Reducción del ruido.
- Reducción del consumo de agua para riego.
- Drenaje ecológico y recarga de sistemas hidrológicos.

Aparcamiento

- Movilidad sostenible.
- Reconfiguración del sistema de aparcamientos orientada a la reducción drástica de la ocupación de espacio exterior (-75 %) y vinculada a la recuperación rehabilitación de los espacios exteriores.
- Transformación del espacio de aparcamiento en recursos para una movilidad multimodal, eléctrica, sostenible y de bajo impacto espacial.
- Integración de un 100 % de recarga eléctrica con gestión de reparto de carga para ajustar la potencia y facilitar un sistema escalable.

Integración de generación fotovoltaica.

5.4.8.3. Sobre el cambio climático

- Disminución de las emisiones de gases de invernadero y otros elementos contaminantes.

- Normalmente se emplean energías residuales y equipos de elevada eficiencia energética, reduciendo de esta forma el uso de energías primarias provenientes de fuentes fósiles.
- Al ser más eficiente energéticamente, se logra reducir la emisión de gases de efecto invernadero.
- La disminución sustancial de la fuga de refrigerante al aire se observa en comparación con los sistemas tradicionales.
- Se logra una reducción de los niveles de ruido y vibraciones en los edificios que están conectados al sistema.
- No se produce ningún cambio estético notable, ya que el sistema permite que las azoteas y fachadas se mantengan completamente libres de obstáculos visuales.

5.4.8.4. Sobre el uso de los recursos

- Disminución significativa de la cantidad de energía eléctrica necesaria para adquirir (en sistemas térmicos).
- Se produce una reducción considerable en el importe que el usuario debe abonar por el consumo de energía.
- Disminución del uso de agua en el proceso de riego.
- Disminución en el consumo de agua durante el riego.
- Reducción en la cantidad de agua utilizada para el riego. Consumo de agua en el riego se reduce.
- Uso de agua en el riego se disminuye.
- Recuperación de los niveles de agua subterránea.

5.4.8.5. Sobre el uso del espacio.

- Aumento de la eficiencia de los espacios internos.
- Una reconfiguración completa del espacio exterior para favorecer la infraestructura verde.

5.4.8.6. Sobre los recursos económicos

- Se logrará disminuir los gastos de mantenimiento y se reducirá el nivel de conocimientos técnicos necesarios para asegurar la eficiencia durante toda la vida útil.
- La capacidad para prever con facilidad los costos de energía.
- Se ofrece más amplitud para la realización de servicios, labores u otros propósitos.

Construcciones modernas con un gran valor agregado y una sustentabilidad continua.

5.4.8.7. Beneficios relacionados con la seguridad.

- Se asegura la protección y disponibilidad constante del suministro.
- Prevención de peligros para la salud.
- Es crucial realizar una supervisión constante de las instalaciones por parte de profesionales capacitados, incluyendo las subestaciones.
- No se encuentran gases inflamables en el interior del edificio.

5.4.8.8. Ventajas de uso

- El servicio ofrece flexibilidad total y está disponible en todo momento, sin necesidad de planificar de antemano. Además, se adapta fácilmente a las necesidades específicas del usuario, lo que facilita la posibilidad de aumentar la potencia sin tener que hacer una gran inversión en equipos propios.
- Fiabilidad: la confiabilidad del servicio y la aplicación de técnicas de operación y mantenimiento, así como de medición y verificación, están garantizadas por la escalabilidad, redundancia y calidad de los equipos. Esto se logra mediante la automatización y supervisión constante a cargo de profesionales altamente capacitados. Además, se implementan estrategias dinámicas orientadas a la eficiencia.
- Simplificación: instalaciones más sencillas y de menor coste para su mantenimiento. Se ha mejorado la facilidad de uso de las instalaciones individuales que dependen de la red de distrito de quinta generación, haciéndolas más simples de operar.

- Reducción de espacio, con tejados libres de obstáculos y salas técnicas de tamaño reducido.
- No habrá vibraciones, ruidos molestos ni impactos visuales desagradables debido a la eliminación de los sistemas de aire acondicionado o chimeneas en los lugares públicos y en áreas relacionadas con las actividades humanas.

La auditoría y las directrices de actuación en el Complejo de NNMM sitúan el proyecto en el escenario del mejor y más completo aprovechamiento de los Múltiples Beneficios de la Eficiencia.

Como se ha explicado, un enfoque incompleto y restrictivo puede reducir la evaluación de rentabilidad de las medidas de eficiencia energética de espectro más amplio y con mayor impacto social, lo que puede contribuir a limitar las inversiones en eficiencia energética a requisitos mínimos y marginar objetivos de eficiencia energética más elevados.

Es más fácil justificar requisitos mínimos de eficiencia energética ambiciosos si se consideran los múltiples beneficios asociados, más allá de la reducción del consumo de combustibles, aunque, en el momento de evaluar la elegibilidad y adecuación de las actuaciones, ello suponga un esfuerzo interpretativo sobre los objetivos de fondo de los planes de incentivación de la mejora de la Eficiencia en la AGE, PRTR / NEXT Generation, como el que solicitan las autoridades y agencias europeas e internacionales, IEA, EPA, COMBI, ONU.

5.4.9. Esquema de la aplicación, fases y dimensiones, del modelo integrado de aplicación para el aprovechamiento energético del aprovechamiento energético de las infraestructuras subterráneas

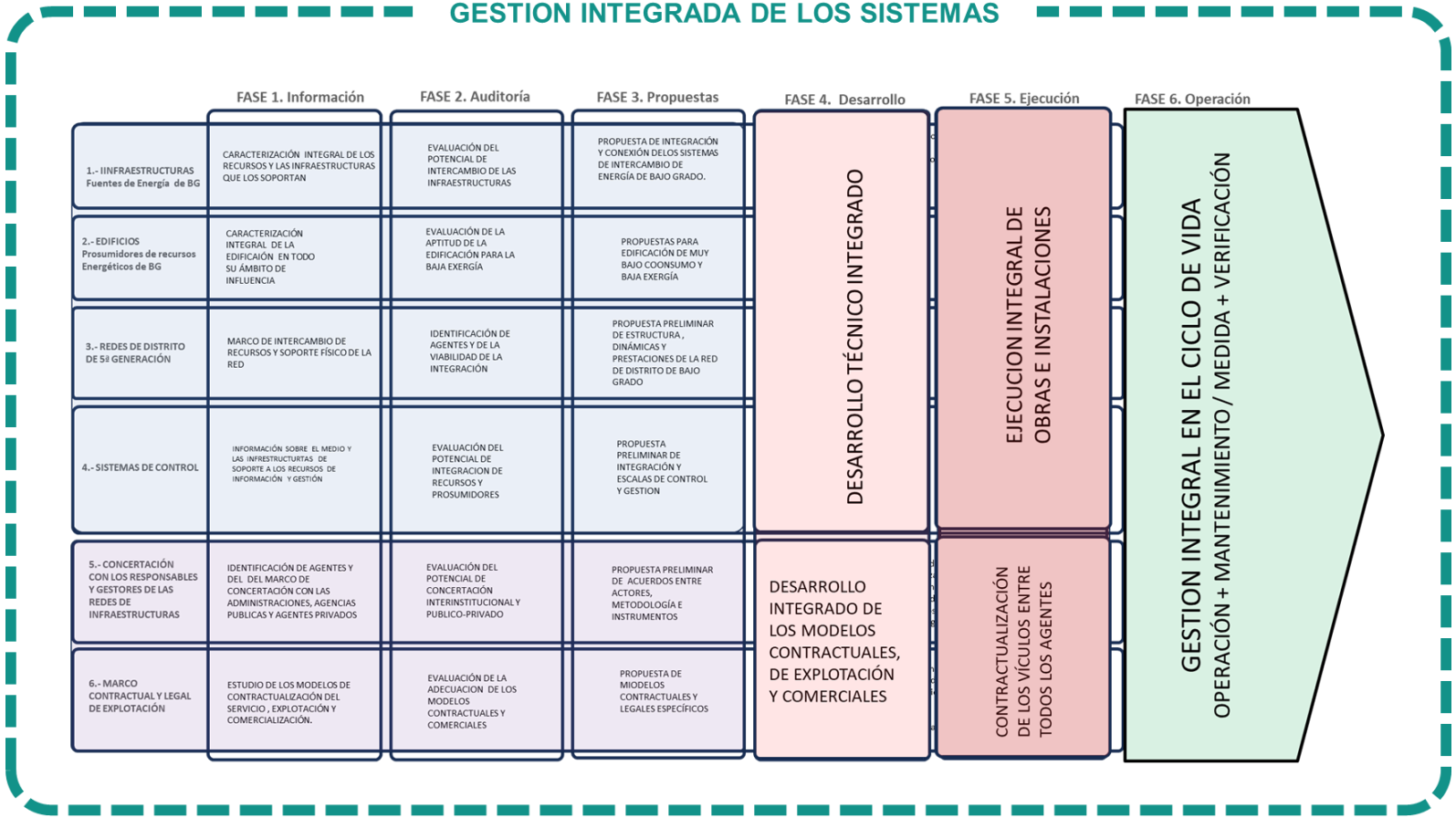
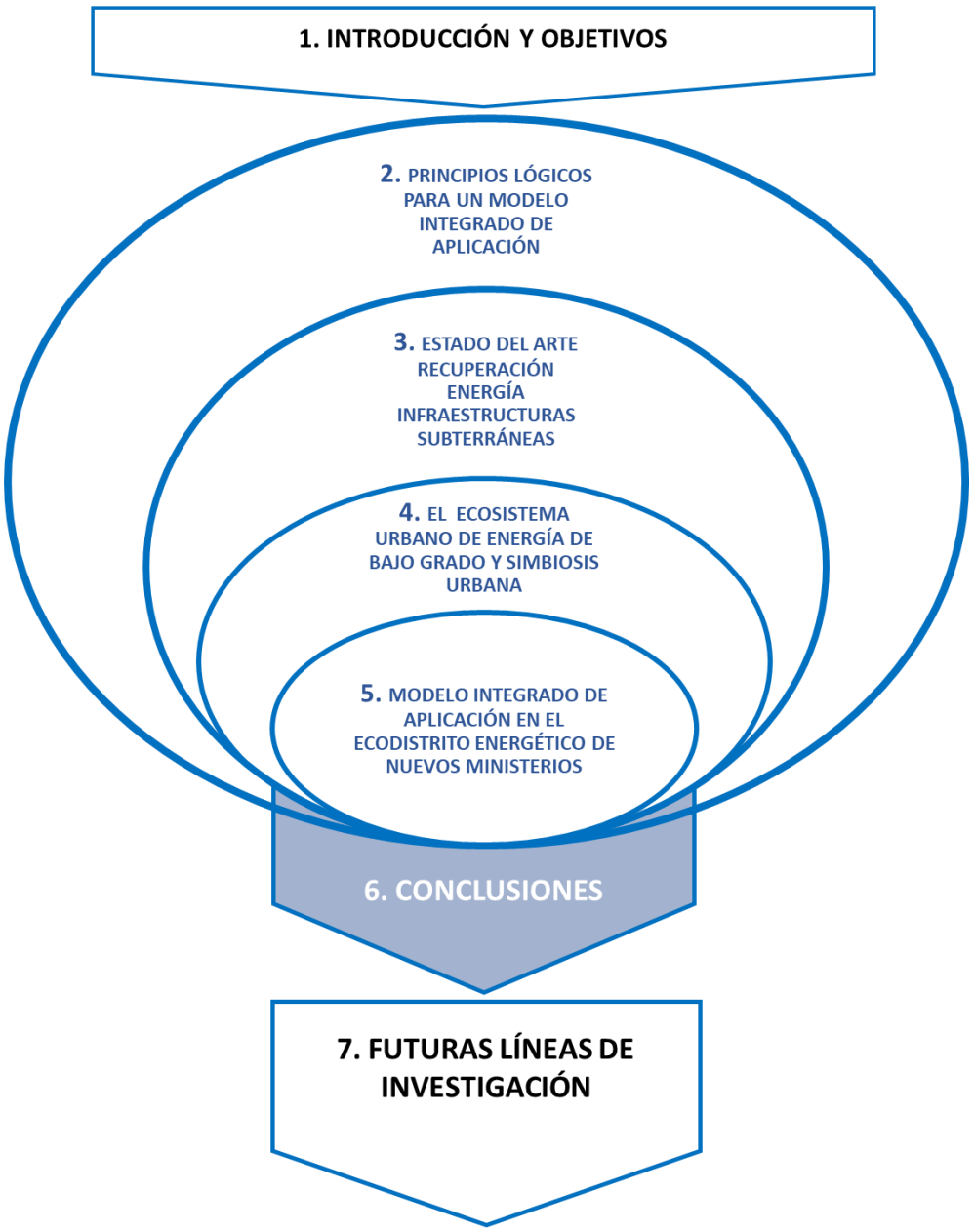


Figura 5-67. Esquema de la aplicación, fases y dimensiones, del modelo integrado de aplicación para el aprovechamiento energético del aprovechamiento energético de las infraestructuras subterráneas.

6. Conclusiones



De forma general que la disponibilidad de recursos energéticos de bajo grado es cada vez mayor en los sistemas de infraestructuras subterráneas de nuestras ciudades y que su aprovechamiento en nuestro entorno, Madrid, España, es muy escaso.

La técnica que permite realizar el intercambio y recuperación de recursos energéticos y que está relacionada por un lado, con los sistemas intercambiadores de energía embebidos en las construcciones y canalizaciones subterráneos y por otro lado con la utilización de bombas de calor agua-agua o aire-agua para gestionar su integración con los sistemas de refrigeración, calefacción y aire de los edificios, tiene ya un grado de desarrollo muy importante, lo que ha permitido su utilización en países de nuestro entorno y también, en los casos expuestos, en nuestro país.

La técnica que permite la utilización de estos recursos en la ciudad, la edificación y la industria está muy relacionada con la adecuación de los edificios al uso de recursos de calor a baja temperatura y baja intensidad. Orientar la rehabilitación para la eficiencia o la nueva edificación eficiente según principios de baja exergía, aprovechamiento térmicamente armónico de recursos del medio y reducción de la entropía en las distintas etapas de transformación de la energía en la edificación es una directriz de actuación que progresivamente se va incorporando a la praxis de los equipos profesionales y, aunque muy lentamente, en nuestro marco normativo.

Las redes de baja temperatura son un ámbito perfecto para la integración de estos recursos en la ciudad facilitando el acceso a todos los recursos renovables y residuales al mayor número de ciudadanos. Redes cortas de temperatura moderada que, como se expone en este trabajo, se están ejecutando desde hace una década en países de nuestro entorno europeo. Desafortunadamente en España se acusa un significativo y elocuente retraso en el desarrollo de estas redes de recursos abundantes y baratos mientras se sigue incentivando la ejecución de redes de distrito de calefacción de temperatura elevada.

Sin embargo, hay una madurez disciplinar, técnica y tecnológica tanto en el ámbito de la gestión de la información, como en la aplicación de las TIC a éstos, como en los sistemas de gestión y control que permiten la integración técnica de todos los componentes que hemos identificado como fundamentales en nuestro modelo integrado.

Como se expone en el Modelo integrado de aplicación sobre el complejo de Nuevos Ministerios, la metodología de gestión, operación y mantenimiento de estos sistemas se podría definir en el marco de un Facility Management integral cuyos instrumentos de actuación integran los sistemas de gestión de los edificios, gestión de las infraestructuras y gestión de las redes. Una vez más se manifiesta que la integración es un aspecto clave para materializar los escenarios de máxima eficiencia en la explotación de estos recursos.

Tal como se viene constatando a lo largo del desarrollo de este trabajo, una de las barreras que impide una aplicación generalizada y extensa de esta recuperación e intercambio de recursos es la falta de concertación institucional, con y entre las agencias y empresas públicas que gestionan los más importantes recursos de infraestructuras subterráneas.

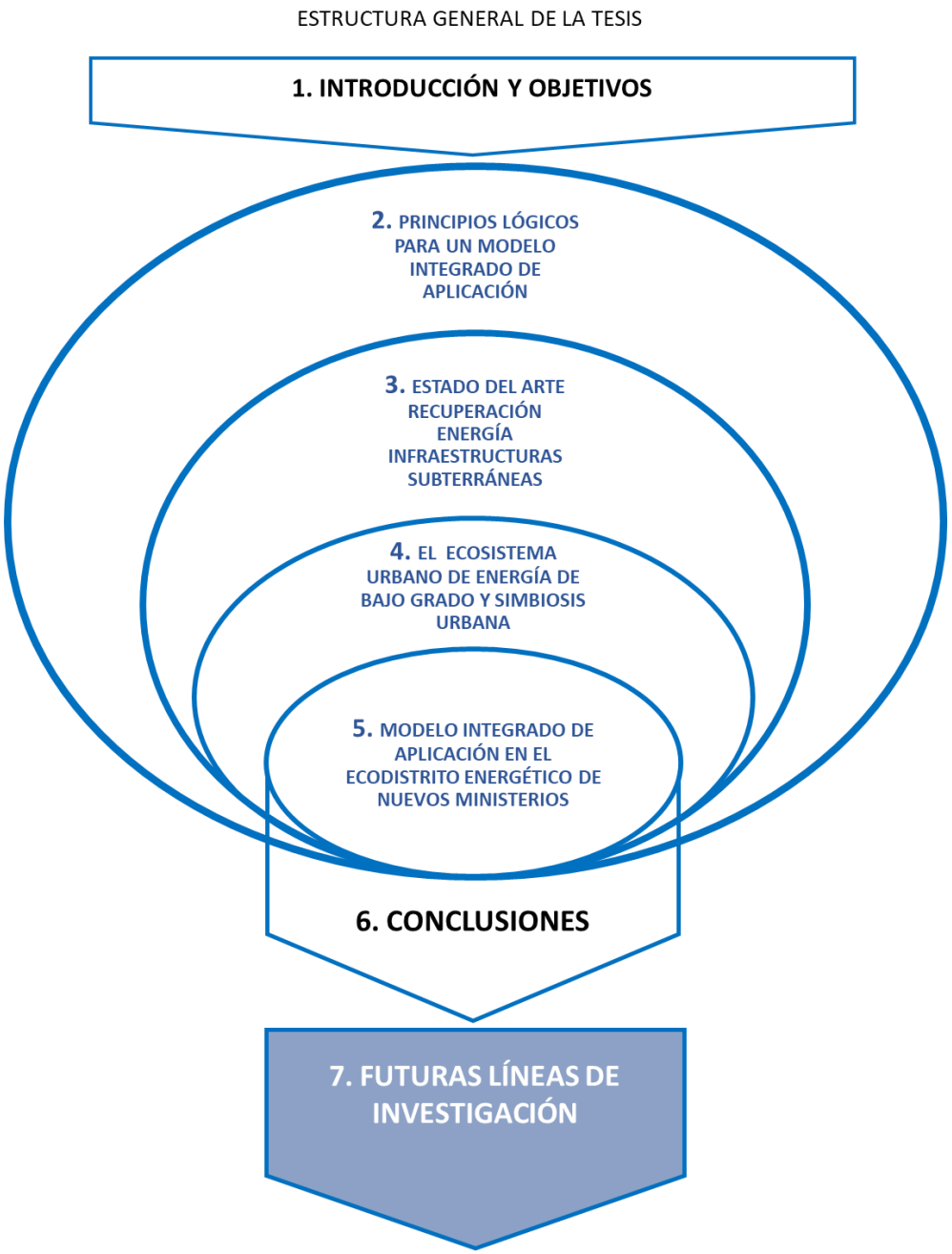
Tampoco se han consolidado directrices públicas para incentivar el desarrollo de instrumentos integrados técnicos, legales (incluyendo urbanísticos), económicos, de concertación y contractualización entre instituciones y público-privada, para la implementación de este tipo de aprovechamiento. Sin embargo, se ha comprobado que existe ya un corpus europeo de referencias de todo tipo que permitiría acceder a esta experiencia para propiciar un rápido y seguro desarrollo en nuestro país, que además cuenta en muchos casos con condiciones ambientales aún más favorables que las de países más septentrionales, de vectores tan importantes como las redes de distrito de 5ª generación, la edificación pública de baja exergía, el marco de concertación y armonización institucional, el marco de explotación energética de redes y recursos de bajo grado, de los que exponemos varios casos en este trabajo.

El estudio pormenorizado del Modelo integrado de Aplicación sobre el caso del Complejo de Nuevos Ministerios nos ha permitido verificar los poderosos efectos que estos planteamientos integrados tienen, no sólo sobre los factores básicos de consumo de energía primaria y reducción de emisiones, sino sobre todos los factores que la Comisión Europea identifica como los múltiples beneficios de la Eficiencia Energética, sociales, económicos y ambientales. Incluyendo todos los que vinculan estas actuaciones al cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible de Naciones Unidas.

Se trata de sistemas integrados, en los que cada grado de mejora en la integración supone un grado de reducción de coste e intensidad tecnológica. Son sistemas fundamentados en la capacidad natural, inercial y termodinámica del medio

natural y de los medios construidos, por tanto muy resilientes, de muy bajo impacto y largo Ciclo de Vida bajo estrategias de gestión que en todo nuestro entorno son cada vez más ricas, rentables y sostenibles.

7. Futuras líneas de investigación



Las conclusiones de este trabajo apuntan hacia los aspectos ya abiertos a la praxis y a la operación de los sistemas de intercambio energético con las infraestructuras urbanas subterráneas y sobre los que futuras líneas de investigación podrían facilitar campos de expansión en varios frentes.

Hacemos una enumeración de estas futuras líneas de investigación:

1.- Caracterización de los ámbitos de recuperación de energía en Infraestructuras urbanas subterráneas.

La colaboración con los gestores de las redes de transporte, agua, agua residual, túneles urbanos y edificación subterránea, permitiría adquirir datos e integrar información sobre la disponibilidad y naturaleza de la energía de bajo grado en cada caso. Caracterizando el potencial de explotación, y determinando los parámetros fundamentales de aprovechamiento.

2.- Estructura de las redes de infraestructura subterráneas, conectividad.

Entendiendo que cada caso tiene condiciones particulares, la investigación sobre la estructura física de las distintas redes de infraestructura urbana subterránea permitiría establecer criterios, metodología y tipología de intervención para la integración de los sistemas de intercambio térmico y la creación de nodos de conexión para la transferencia de los recursos intercambiados.

3.- Aspectos de la edificación para el perfeccionamiento del aprovechamiento de recursos energéticos de bajo grado y baja intensidad. Tipología, usos, hibridación.

Desde la constatación de que hay un instrumento metodológico de actuación para la concepción o la rehabilitación de edificios para la baja exergía y el óptimo aprovechamiento de recursos de bajo grado para climatización y tratamiento térmico del aire, apuntamos a una línea de investigación relevante vinculada a las particularidades tipológicas de la edificación, a las condiciones de obra nueva o rehabilitación, al régimen de gestión relacionado con los distintos usos públicos o privados y a la posible hibridación con otros recursos de naturaleza renovable o no renovable, existentes o de nueva ejecución.

4.- Redes de distrito para refrigeración y calefacción de baja temperatura.

Las redes de distrito de baja temperatura aparecen en los países de nuestro entorno como el principal instrumento de integración de recursos de bajo grado de todas las fuentes y de usuarios potenciales de toda naturaleza. El estudio realizado en este trabajo sobre una amplia casuística europea permite definir los parámetros de referencia que aseguran el rendimiento y la operatividad de este tipo de infraestructura: temperaturas, longitudes, geometría, prestaciones, interacciones. A partir de estas referencias, y considerando que es un campo muy poco desarrollado en España sería muy interesante desarrollar una línea de investigación que profundice sobre la naturaleza y características que este tipo de redes urbanas de distrito deben tener en nuestras ciudades para ser viables físicamente y competentes operativamente en la integración de recursos procedentes de las redes de infraestructuras subterráneas.

5.- Sistemas y estrategias para la gestión integral de sistemas de captación y uso de energía de bajo grado. Hibridación y Simbiosis urbana.

Sobre la infraestructura física de las redes de 5ª generación, en las que se pueden integrar los sistemas edificados, las infraestructuras urbanas subterráneas, y los edificios o sistemas prosumidores; se abre un campo muy amplio de estrategias dinámicas de geometría variable que incluyen la hibridación con los sistemas conectados y la implementación a través de estas redes de estrategias de simbiosis urbana para multiplicar el rendimiento en ámbitos de distrito y poner los recursos al alcance de todos los ciudadanos.

Esta línea de investigación tiene una orientación fundamentalmente metodológica y estratégica y también se sustenta sobre los soportes técnicos y tecnológicos a medida.

6.- Modelos de explotación y comercialización.

La adecuación de los modelos de explotación y comercialización vinculados a la recuperación de la energía térmica de bajo grado de las infraestructuras urbanas subterráneas a las condiciones locales y a su marco económico, financiero y comercial es el objeto de esta línea de investigación. Hay precedentes muy interesantes en nuestro entorno europeo que pueden ser adecuados o perfilados para España.

7.- Ámbito Jurídico

En nuestro ámbito normativo no hay un desarrollo específico sobre aspectos fundamentales para la explotación generalizada de estos recursos de bajo grado. Aspectos como la titularidad de la propiedad de la energía, las condiciones legales de transferencia, las garantías de rendimiento, las obligaciones del gestor de las redes y de los usuarios, etc.

Esta línea de investigación tiene que definir el marco de garantías y seguridad jurídica de todos los agentes.

8- Ámbito urbanístico

La ciudad de Madrid está abriendo el proceso crítico para la redacción de un nuevo Plan General de Ordenación Urbana. La disponibilidad local de recursos energéticos de esta naturaleza y la prioridad en su explotación debe estar contemplada e integrada con los criterios de intervención en la ciudad. Existen antecedentes en países de nuestro entorno sobre el aprovechamiento de recursos recuperados y renovables.

Esta línea de investigación incluye la de estudiar determinaciones urbanísticas sobre la gestión y aprovechamiento de recursos subterráneos incluida la abundante energía de bajo grado.

9.- Concertación institucional, interinstitucional y público privada.

Aspecto clave para la materialización de las más ambiciosas estrategias de eficiencia vinculadas al intercambio de recursos sobre redes de infraestructuras bajo espacios públicos y privados, gestionadas por agencias y propietarios públicos, concesionarios o privados; establecer un marco, unas reglas y un ámbito fluido de concertación entre ciudadanos, entre ciudadanos e instituciones y administraciones, e interinstitucional entre administraciones es un asunto fundamental para propiciar la expansión de sistemas eficientes de esta naturaleza. Esta línea de investigación es integradora de muchos de los aspectos planteados en este trabajo y en otras líneas de investigación propuestas.

Referencias

[1] A. T. C. J. Dangerman and H. J. Schellnhuber, "Energy systems transformation," *Proc Natl Acad Sci U S A*, vol. 110, no. 7, Feb. 2013, doi: 10.1073/pnas.1219791110.

[2] International Energy Agency - IEA, "World Energy Outlook 2023," Paris, Oct. 2023. [Online]. Available: https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2023?language=es

[3] X. Anglaret, "I would prefer not to aggravate global warming," *Lancet Planet Health*, vol. 2, no. 9, pp. e382–e383, Sep. 2018, doi: 10.1016/S2542-5196(18)30171-2.

[4] ICAO, "2016 Environmental Report. On Board. A Sustainable Future," 2016. Accessed: Jul. 30, 2018. [Online]. Available: https://www.icao.int/environmental-protection/pages/env2016.aspx

[5] M. Sonnberger *et al.*, "Climate concerned but anti-nuclear: Exploring (dis)approval of nuclear energy in four European countries," *Energy Res Soc Sci*, vol. 75, p. 102008, May 2021, doi: 10.1016/J.ERSS.2021.102008.

[6] C. Mitchell *et al.*, "Chapter 11: Policy, Financing and Implementation. In IPCC Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation," New York, 2012. [Online]. Available: https://www.ipcc.ch/report/renewable-energy-sources-and-climate-change-mitigation/

[7] J. Riechmann, "Entropía, recursos naturales y economía ecológica," *Daphnia*, no. 53, pp. 17–19, 2010, [Online]. Available: https://www.daphnia.es/revista/53/articulo/1028/Entropia-recursos-naturales-y-economia-ecologica

[8] R. U. Ayres, "The second law, the fourth law, recycling and limits to growth," *Ecological Economics*, vol. 29, no. 3, pp. 473–483, Jun. 1999, doi: 10.1016/S0921-8009(98)00098-6.

[9] I. Johnstone, "Issues of Sustainability." Accessed: Feb. 01, 2022. [Online]. Available: http://www.issuesofsustainability.org/web-publication.html

[10] S. O. Oyedepo and B. A. Fakeye, "Waste heat recovery technologies: Pathway to sustainable energy development," *Journal of Thermal Engineering*, vol. 7, no. 1, pp. 324-, 2021, doi: 10.18186/THERMAL.850796.

[11] M. Langan and K. O'Toole, "A new technology for cost effective low grade waste heat recovery," *Energy Procedia*, vol. 123, pp. 188–195, Sep. 2017, doi: 10.1016/J.EGYPRO.2017.07.261.

[12] C. F. Álvarez Hincapié and H. I. Velásquez Arredondo, "Exergía en sistemas biológicos: Aproximación holística para el estudio de ecosistemas y el manejo ambiental," *Producción + Limpia*, vol. 8, pp. 106–127, 2013, Accessed: Jun. 10, 2023. [Online]. Available: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1909-04552013000200011

[13] S. Rueda-Palenzuela, "El Urbanismo Ecosistémico," *Ciudad y Territorio Estudios Territoriales*, vol. 51, no. 202, pp. 723–752, Dec. 2019, Accessed: Jun. 11, 2023. [Online]. Available: https://recyt.fecyt.es/index.php/CyTET/article/view/77733/49398

[14] S. Rueda-Palenzuela, "La complejidad urbana y su relación con la morfología de los tejidos urbanos y la proximidad," *Ciudad y Territorio Estudios Territoriales*, vol. 54, no. M, pp. 227–250, Feb. 2022, doi: 10.37230/CYTET.2022.M22.10.

[15] R. T. Bradley, "Transforming a Circular Economy into a Helical Economy for Advancing Sustainable Manufacturing," *Theses and Dissertations--Mechanical Engineering*, Jan. 2019, doi: https://doi.org/10.13023/etd.2019.132.

[16] A. Ashby, A. M. Callegaro, K. Adeyeye, and M. Granados, "The Spiral Economy: A Socially Progressive Circular Economy Model?" in *Sustainable Development Goals and Sustainable Supply Chain. Greening of Industry Networks Studies*, vol. 7, N. Yakovleva, R. Frei, and S. Rama Murthy, Eds., Springer, Cham, 2019, pp. 67–94. doi: 10.1007/978-3-030-15066-2_5.

[17] R. A. Kishore and S. Priya, "A Review on Low-Grade Thermal Energy Harvesting: Materials, Methods and Devices," *Materials 2018, Vol. 11, Page 1433*, vol. 11, no. 8, p. 1433, Aug. 2018, doi: 10.3390/MA11081433.

[18] H. Jouhara, N. Khordehgah, S. Almahmoud, B. Delpech, A. Chauhan, and S. A. Tassou, "Waste heat recovery technologies and applications," *Thermal*

Science and Engineering Progress, vol. 6, pp. 268–289, Jun. 2018, doi: 10.1016/J.TSEP.2018.04.017.

[19] H. T. Odum and E. C. Odum, *Energy Basis for Man and Nature*. 1976.

[20] F. Ed. Barbir, "Chapter Two. Fuel Cell Basic Chemistry and Thermodynamics," in *PEM Fuel Cells: Theory and Practice. Second Edition.*, Academic Press, 2013, pp. 17–32. doi: 10.1016/B978-0-12-387710-9.00002-3.

[21] G. Wall, "Exergy conversion in the Japanese society," *Energy*, vol. 15, no. 5, pp. 435–444, May 1990, doi: 10.1016/0360-5442(90)90040-9.

[22] A. Picallo-Perez and J. M. Sala-Lizarraga, "Design and Operation of a Polygeneration System in Spanish Climate Buildings under an Exergetic Perspective," *Energies 2021, Vol. 14, Page 7636*, vol. 14, no. 22, p. 7636, Nov. 2021, doi: 10.3390/EN14227636.

[23] ONU, "Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development. A/RES/70/1," *Resolución aprobada por la Asamblea General. Naciones Unidadas*. 2015. [Online]. Available: https://sdgs.un.org/2030agenda

[24] ONU, "Objetivos y metas de desarrollo sostenible - Desarrollo Sostenible." [Online]. Available: https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/

[25] SEforALL, "Sustainable Energy for All. A Framework for Action," Jan. 2012. [Online]. Available: https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwiLis_bv-yCAxVXTDABHT1BBdUQFnoECBIQAQ&url=https%3A%2F%2Fwww.seforall.org%2Fsites%2Fdefault%2Ffiles%2Fl%2F2013%2F09%2FSE_for_All_-_Framework_for_Action_FINAL.pdf&usg=AOvVaw3I5lptnyCufYWA3-S9E5qY&opi=89978449

[26] International Energy Agency, *Capturing the Multiple Benefits of Energy Efficiency*. International Energy Agency, IEA, 2014. doi: 10.1787/9789264220720-EN.

[27] M. Ranade, M. Bosi, S. Mills-Knapp, and S. de la Rue du Can, "Assessing and Measuring the Performance of Energy Efficiency Projects," Washington, 2017. [Online]. Available:

https://openknowledge.worldbank.org/entities/publication/9953d8c7-9dad-55d6-a36c-064a58d11f32

[28] United Nations, "United Nations General Assembly Declares 2014-2024 Decade of Sustainable Energy for All | UN Press," United Nations Department of Public Information. News and Media Division. [Online]. Available: https://press.un.org/en/2012/ga11333.doc.htm

[29] E. Bacchetti, C. Vezzoli, and P. Landoni, "Sustainable Product-Service System (S.PSS) applied to Distributed Renewable Energy (DRE) in Low and Middle-income Contexts: A Case Studies Analysis," *Procedia CIRP*, vol. 47, pp. 442–447, Jan. 2016, doi: 10.1016/J.PROCIR.2016.03.085.

[30] C. Vezzoli *et al.*, "Energy and sustainable development," *Green Energy and Technology*, vol. 0, no. 9783319702223, pp. 3–22, 2018, doi: 10.1007/978-3-319-70223-0_1/TABLES/1.

[31] European Comission, "Developing methodologies for the integration of low-grade energy sources into high-temperature district heating networks," LIFE 3.0 - LIFE22-CET-Low2HighDH/101120865. [Online]. Available: https://webgate.ec.europa.eu/life/publicWebsite/project/LIFE22-CET-Low2HighDH-101120865/developing-methodologies-for-the-integration-of-low-grade-energy-sources-into-high-temperature-district-heating-networks

[32] Eurostat, "Quarterly greenhouse gas emissions in the EU," Eurostat. [Online]. Available: https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Quarterly_greenhouse_gas_emissions_in_the_EU&stable=1#Greenhouse_gas_emissions

[33] Eurostat, "EU economy greenhouse gas emissions: -3% in Q1 2023," Eurostat. Accessed: Sep. 09, 2023. [Online]. Available: https://ec.europa.eu/eurostat/web/products-eurostat-news/w/ddn-20230816-1

[34] T. Moss and J. Kincer, "How does energy impact economic growth? An overview of the evidence," Mar. 2023. Accessed: Jun. 09, 2023. [Online]. Available: https://energyforgrowth.org/article/how-does-energy-impact-economic-growth-an-overview-of-the-evidence/

[35] S. Kaza, L. C. Yao, P. Bhada-Tata, and F. Van Woerden, "What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050," Washington, DC: World Bank, Washington DC, Sep. 2018. doi: 10.1596/978-1-4648-1329-0.

[36] L. de Pereda, "Capitulo 3. Ecosistemas energéticos eficientes. Redes y microrredes inteligentes," in *Guía de redes inteligentes de energía y comunicación*, Dirección General de Industria, Energía y Minas y la Fundación de la Energía de la Comunidad de Madrid, 2011. [Online]. Available: https://www.fenercom.com/publicacion/guia-de-redes-inteligentes-de-energia-y-comunicacion-2011/

[37] M. Ed. Ala-Juusela, *Heating and Cooling with Focus on Increased Energy Efficiency and Improved Comfort: Guidebook to IEAAAA ECBCS Annex 37 Low Exergy Systems for Heating and Cooling of Buildings: Summary Report*. VTT Technical Research Centre of Finland, 2004. [Online]. Available: https://publications.vtt.fi/pdf/tiedotteet/2004/T2256.pdf

[38] United Nations Human Settlements Programme, "World Cities Report 2022. Envisaging the Future of Cities," Nairobi, 2022. [Online]. Available: https://unhabitat.org/wcr/

[39] United Nations Department of Economic and Social Affairs Population Division., "World Urbanization Prospects. The 2018 Revision (ST/ESA/SER.A/420)," Ney York, 2019. [Online]. Available: https://population.un.org/wup/Publications/

[40] W. Kuang *et al.*, "Global observation of urban expansion and land-cover dynamics using satellite big-data," *Sci Bull (Beijing)*, vol. 66, no. 4, pp. 297–300, Feb. 2021, doi: 10.1016/J.SCIB.2020.10.022.

[41] N. Bobylev, "Integration of Urban Physical Infrastructure into Land Use Governance," in *Integrating Land Governance into the Post-2015 Agenda. Harnessing Synergies for Implementation and Monitoring Impact*, Washington: World Bank, Mar. 2014.

[42] R. Sterling *et al.*, "Sustainability issues for underground space in urban areas," *Proc Inst Civ Eng Urban Des Plan*, vol. 165, no. 4, pp. 241–254, May 2012, doi: 10.1680/UDAP.10.00020/ASSET/IMAGES/SMALL/UDAP165-241-F10.GIF.

[43] United Nations Department of Economic and Social Affairs Population Division, "The World's Cities in 2018: Data Booklet," Dec. 2018, doi: 10.18356/C93F4DC6-EN.

[44] A. Parriaux, P. Blunier, P. Maire, G. Dekkil, and L. Tacher, *Rapport de recherche PNR 54 Projet Deep City Ressources du sous-sol et développement*

durable des espaces urbains. Lausanne: vdf Hochschulverlag AG an der ETH Zürich, 2010.

[45] D. V. L. Hunt, L. O. Makana, I. Jefferson, and C. D. F. Rogers, "Liveable cities and urban underground space," *Tunnelling and Underground Space Technology*, vol. 55, pp. 8–20, May 2016, doi: 10.1016/J.TUST.2015.11.015.

[46] H. Xie, Y. Zhang, Y. Chen, Q. Peng, Z. Liao, and J. Zhu, "A case study of development and utilization of urban underground space in Shenzhen and the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area," *Tunnelling and Underground Space Technology*, vol. 107, p. 103651, Jan. 2021, doi: 10.1016/J.TUST.2020.103651.

[47] J. A. Dominic, A. Z. Aris, W. N. A. Sulaiman, and W. Z. W. M. Tahir, "Discriminant analysis for the prediction of sand mass distribution in an urban stormwater holding pond using simulated depth average flow velocity data," *Environ Monit Assess*, vol. 188, no. 3, pp. 1–15, Mar. 2016, doi: 10.1007/S10661-016-5192-8/FIGURES/9.

[48] N. Bobylev, "Mainstreaming sustainable development into a city's Master plan: A case of Urban Underground Space use," *Land use policy*, vol. 26, no. 4, pp. 1128–1137, Oct. 2009, doi: 10.1016/J.LANDUSEPOL.2009.02.003.

[49] N. Bobylev, "Underground space as an urban indicator: Measuring use of subsurface," *Tunnelling and Underground Space Technology*, vol. 55, pp. 40–51, May 2016, doi: 10.1016/J.TUST.2015.10.024.

[50] L. de Pereda *et al.*, *Guía sobre aprovechamiento energético de las infraestructuras subterráneas*, Fenercom., no. 203. Madrid: Fenercom, 2011. [Online]. Available: https://www.fenercom.com/publicacion/guia-sobre-aprovechamiento-energetico-de-las-infraestructuras-subterraneas-2011/

[51] 2005 Millennium Ecosystem Assessment, "Ecosystems and Human Well-Being: Biodiversity Synthesis," Jun. 2005, [Online]. Available: https://www.millenniumassessment.org/documents/document.354.aspx.pdf

[52] A. F. Rotta Loria, "The silent impact of underground climate change on civil infrastructure," *Communications Engineering 2023 2:1*, vol. 2, no. 1, pp. 1–12, Jul. 2023, doi: 10.1038/s44172-023-00092-1.

[53] R. Laera, L. de Pereda, and J. Fernández, "Apolonio Morales 29, Modelo de intervención para la eficiencia energética y la sostenibilidad de los edificios = Apolonio Morales 29, an intervention model for energy efficieny iand

building sustainability," *Building & Management*, vol. 4, no. 2, pp. 4–10, Aug. 2020, doi: 10.20868/BMA.2020.2.4690.

[54] E. Fuentes, L. Arce, and J. Salom, "A review of domestic hot water consumption profiles for application in systems and buildings energy performance analysis," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 81, pp. 1530–1547, Jan. 2018, doi: 10.1016/J.RSER.2017.05.229.

[55] P. Spieser, "Récupération de la chaleur des eaux usées de la ville de Versailles au profit du chauffage d'un édifice public : études de potentiel et de faisabilité," *Sciences de l'ingénieur [physics]*, 2019, [Online]. Available: https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-02485640

[56] SIA, "SIA 480-C1:2020. Calcul de rentabilité pour les investissements dans le bâtiment – Rectificatif C1 à la norme SIA 480:2016." Société suisse des ingénieurs et des architectes, 2020. [Online]. Available: https://www.sia.ch/fr/services/sia-norm/rectificatifs/rectificatifs-sia/

[57] J. Lapa, "Acompanhamento da execução de instalações geotérmicas para climatização de edifícios," in *Workshop do Projecto GeoSustained. Geotermia superficial. Perspetivas de aplicação em contexto urbano*, GeoSustained, Dec. 2022. [Online]. Available: https://informacoeseservicos.lisboa.pt/prevencao/resiliencia-urbana/projetos/geosustained

[58] UNE, "UNE-EN 16798-1:2020 Eficiencia energética de los edificios. Ventilación de los edificios. Parte 1: Parámetros del ambiente interior a considerar para el diseño y la evaluación de la eficiencia energética de edificios incluyendo la calidad del aire interior, condiciones térmicas, iluminación y ruido. Módulo 1-6," *Asociación Española de Normalización*. 2020. [Online]. Available: https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0063261

[59] L. De Pereda, J. Fernández, H. Lanao, and M. Durango, "Use of the energy of the urban Wastewater network for the thermal conditioning of the swimming pool of the Moratalaz Sports Centre. Madrid = Aprovechamiento de la energía de la red urbana de aguas residuales para el acondicionamiento térmico de la piscina del Polideportivo de Moratalaz. Madrid," *Building & Management*, vol. 2, no. 2, pp. 66–80, Aug. 2018, doi: 10.20868/BMA.2018.2.3766.

[60] Metro de Madrid, "Informe anual 2010," 2010. [Online]. Available: https://www.metromadrid.es/es/transparencia/marco-economico/cuentas-anuales/cuentas-anuales

[61] Metro de Madrid, "Informe corporativo 2021," 2021. [Online]. Available: https://www.metromadrid.es/es/transparencia/marco-economico/cuentas-anuales/cuentas-anuales

[62] V. M. Beltrán-Sanjuan, "Gestión de los recursos hídricos en la ciudad de Madrid," in *Congreso Nacional del Medioambiente (CONAMA 8)*, Madrid, Nov. 2006.

[63] Metro de Madrid, "Plan de autoconsumo 2022," 2022. [Online]. Available: https://www.metromadrid.es/es/transparencia/proyectos-y-datos

[64] Madrid Subterra, "Metro de Avenida de América, refrigeración a partir del agua de escorrentía - Madrid Subterra." Accessed: Dec. 04, 2022. [Online]. Available: https://www.madridsubterra.es/metro-de-avenida-de-america-refrigeracion-a-partir-del-agua-de-escorrentia/

[65] R. Herrero-Paredes, "Modelización y cuantificación de la generación de calor en la Red de Metro de Madrid," in *VI Congreso Internacional Madrid Subterra. Para la Exploración Y Explotación De La Energía Del Subsuelo. "Las infraestructuras subterráneas urbanas como fuentes de energía renovable"*., Madrid, Nov. 2021. [Online]. Available: https://www.madridsubterra.es/congreso-2021/

[66] L. de Pereda, "Integración de geoestructuras energéticas en la Línea 11 del Metro de Madrid. Estación de Metro e intercambiador de transportes de Conde de Sasal ," in *Webinar. Aprovechamiento del residuo energético de las infraestructuras del subsuelo*, Madrid: Tecniberia, Oct. 2023. [Online]. Available: https://tecniberia.es/6-octubre-aprovechamiento-del-residuo-energetico-de-las-infraestructuras-del-subsuelo/

[67] D. Adam, "Tunnels as Energy Sources: Technology and Case Histories," *Tunnel. Special edition*, pp. 83–86, Sep. 2008, Accessed: Dec. 05, 2023. [Online]. Available: www.tunnel-online.de

[68] M. Barla and A. Di Donna, "Energy tunnels: concept and design aspects," *Underground Space*, vol. 3, no. 4, pp. 268–276, Dec. 2018, doi: 10.1016/J.UNDSP.2018.03.003.

[69] M. Barla and A. Insana, "Energy tunnels as an opportunity for sustainable development of urban areas," *Tunnelling and Underground Space Technology*, vol. 132, p. 104902, Feb. 2023, doi: 10.1016/J.TUST.2022.104902.

[70] D. Adam and R. Markiewicz, "Energy from earth-coupled structures, foundations, tunnels and sewers," *Geotechnique*, vol. 59, no. 3, pp. 229–236, May 2009, doi: 10.1680/GEOT.2009.59.3.229/ASSET/IMAGES/SMALL/GEOT59-229-F15.GIF.

[71] L. de Pereda, "Recuperación y uso de los recursos termodinámicos del sistema de túneles de Calle 30 en Madrid • ESMARTCITY," in *II Congreso Ciudades Inteligentes*, Madrid, Sep. 2016. [Online]. Available: https://www.esmartcity.es/comunicaciones/recuperacion-uso-recursos-termodinamicos-sistema-tuneles-calle-30-madrid

[72] International Organization for Standardization, "ISO 14031:2021 Gestión ambiental. Evaluación del desempeño ambiental. Directrices." 2021. [Online]. Available: https://www.iso.org/obp/ui/es/#iso:std:iso:14031:ed-3:v1:en

[73] S. Visitsak and J. S. Haberl, "An Analysis of Design Strategies for Climate-Controlled Residences in Selected Climates," vol. 1, pp. 1–11, Aug. 2004, Accessed: Dec. 10, 2023. [Online]. Available: https://publications.ibpsa.org/conference/paper/?id=simbuild2004_SB04T3B3

[74] D. Soria, "Diagrama de GIVONI | ecofactory." Accessed: Dec. 05, 2023. [Online]. Available: http://ecofactory.blogspot.com/2008/10/diagrama-de-givoni.html

[75] A. Martín-Pastor, A. Martín-Mariscal, and A. López-Martínez, "La isla de calor en Madrid y su influencia en el confort urbano," *Proceedings of the 3rd International Congress on Sustainable Construction and Eco-efficient Solutions: Seville, 27 to 29 March 2017, 2017, ISBN 978-84-617-8428-8, págs. 497-508*, pp. 497–508, 2017, doi: DOI: 10.5281/zenodo.1297169.

[76] L. de Pereda, "Capitulo 5. Integración de sistemas termoactivos para eficiencia. Principios y casos," in *Guía sobre estructuras termoactivas y sistemas inerciales en la climatización de edificios*, Madrid: Dirección

General de Industria, Energía y Minas y la Fundación de la Energía de la Comunidad de Madrid, 2014.

[77] H. Brandl, "Thermo-active Ground-Source Structures for Heating and Cooling," *Procedia Eng*, vol. 57, pp. 9–18, Jan. 2013, doi: 10.1016/J.PROENG.2013.04.005.

[78] Z. Mohamad, F. Fardoun, and F. Meftah, "A review on energy piles design, evaluation, and optimization," *J Clean Prod*, vol. 292, p. 125802, Apr. 2021, doi: 10.1016/J.JCLEPRO.2021.125802.

[79] J. Ljungqvist, T. Vogel, L. Nielsen, and Uponor Corporation, "REHVA Journal A new innovative Ground Heat Exchanger for heating, cooling and energy storage," *REHVA Journal*, pp. 47–49, 2013. [Online]. Available: https://www.rehva.eu/rehva-journal/chapter/a-new-innovative-ground-heat-exchanger-for-heating-cooling-and-energy-storage

[80] SEVEn Energy, "Tepelných čerpadel. Nové technologie a aplikace | Bombas de calor. Nuevas tecnologías y aplicaciones.," Praha, 2014. [Online]. Available: https://www.svn.cz/en

[81] L. Aresti, P. Christodoulides, G. P. Panayiotou, and G. Florides, "The Potential of Utilizing Buildings' Foundations as Thermal Energy Storage (TES) Units from Solar Plate Collectors," *Energies 2020, Vol. 13, Page 2695*, vol. 13, no. 11, p. 2695, May 2020, doi: 10.3390/EN13112695.

[82] K. Moe, *Thermally Active Surfaces : Physiology and Thermodynamics.* Princeton Architectural Press, 2010.

[83] Union of Concerned Scientists, "How Hydrokinetic Energy Works." Accessed: Jun. 10, 2022. [Online]. Available: https://www.ucsusa.org/resources/how-hydrokinetic-energy-works

[84] International Organization for Standardization, "ISO 7730: 2005 Ergonomía del ambiente térmico. Determinación analítica e interpretación del bienestar mediante el cálculo de los índices PMV y PPD y los criterios de bienestar térmico local." 2005. [Online]. Available: https://www.iso.org/standard/39155.html

[85] J. Fernández and L. de Pereda, "Modelo de actuación para la mejora de la eficiencia energética en la Rehabilitación Integral de un palacete protegido para oficinas de la Administración en Madrid. Geotermia y estructuras

termoactivas," *Anales de Edificación*, vol. 1, no. 2, pp. 1–9, Sep. 2015, doi: 10.20868/ADE.2015.3099.

[86] D. Gualotuña-Gualoto, I. Martínez-Pérez, R. Laera, and L. de Pereda, "The Thermal Potential of Wastewater for Heating and Cooling Buildings: A Case Study of a Low Exergy Building in Madrid," *Buildings 2023, Vol. 13, Page 2057*, vol. 13, no. 8, p. 2057, Aug. 2023, doi: 10.3390/BUILDINGS13082057.

[87] A. Casasso *et al.*, "Fifth-Generation District Heating and Cooling Networks Based on Shallow Geothermal Energy: A review and Possible Solutions for Mediterranean Europe," *Energies 2023, Vol. 16, Page 147*, vol. 16, no. 1, p. 147, Dec. 2022, doi: 10.3390/EN16010147.

[88] S. Buffa, M. Cozzini, M. D'Antoni, M. Baratieri, and R. Fedrizzi, "5th generation district heating and cooling systems: A review of existing cases in Europe," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 104, pp. 504–522, Apr. 2019, doi: 10.1016/J.RSER.2018.12.059.

[89] J. Lindhe, S. Javed, D. Johansson, and H. Bagge, "A review of the current status and development of 5GDHC and characterization of a novel shared energy system," *Sci Technol Built Environ*, vol. 28, no. 5, pp. 595–609, May 2022, doi: 10.1080/23744731.2022.2057111.

[90] I. Pakere, M. Kacare, L. Murauskaite, P. Huang, and A. VOLKOVA, "Comparison of Suitable Business Models for the 5thGeneration District Heating System Implementation through Game Theory Approach," *Environmental and Climate Technologies*, vol. 27, no. 1, pp. 1–15, Jan. 2023, doi: 10.2478/RTUECT-2023-0001.

[91] H. Lund *et al.*, "Perspectives on fourth and fifth generation district heating," *Energy*, vol. 227, p. 120520, Jul. 2021, doi: 10.1016/J.ENERGY.2021.120520.

[92] A. Revesz *et al.*, "Developing novel 5th generation district energy networks," *Energy*, vol. 201, p. 117389, Jun. 2020, doi: 10.1016/J.ENERGY.2020.117389.

[93] Unión Europea, "Directiva (UE) 2019/944 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 5 de junio de 2019 sobre normas comunes para el mercado interior de la electricidad y por la que se modifica la Directiva 2012/27/UE (versión refundida)," *Diario Oficial de la Unión Europea, L 158/125*. Jun. 14, 2019. [Online]. Available: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/?uri=CELEX%3A32019L0944

[94] Unión Europea, "Directiva (UE) 2018/2001 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 11 de diciembre de 2018, relativa al fomento del uso de energía procedente de fuentes renovables (versión refundida) (Texto pertinente a efectos del EEE.)," *Diario Oficial de la Unión Europea, L 328/82*. Dec. 21, 2018. Accessed: Nov. 28, 2023. [Online]. Available: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/?uri=celex%3A32018L2001

[95] S. Boesten, W. Ivens, S. C. Dekker, and H. Eijdems, "5th generation district heating and cooling systems as a solution for renewable urban thermal energy supply," *Advances in Geosciences*, vol. 49, pp. 129–136, Sep. 2019, doi: 10.5194/ADGEO-49-129-2019.

[96] M. Wirtz, T. Schreiber, and D. Müller, "Survey of 53 Fifth-Generation District Heating and Cooling (5GDHC) Networks in Germany," *Energy Technology*, vol. 10, no. 11, p. 2200749, Nov. 2022, doi: 10.1002/ENTE.202200749.

[97] M. Galindo, "Integración de energías renovables y residuales en redes de calor y frío," in *VII Congreso Internacional Madrid Subterra "Proyectos y realidades,"* 2022. [Online]. Available: https://www.madridsubterra.es/wp-content/uploads/ponencias2022/tilia.pdf

[98] Francia, "Plan National Intégré Énergie-Climat (PNIEC)." Mar. 2020. Accessed: Dec. 08, 2021. [Online]. Available: https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/sites/default/files/PNIEC_France_mars_2020.pdf

[99] J. Sorreau, "Paris Saclay, energy strategy and urban project," in *Conférence - Électricité, chaleur et transport : enjeux de l'intégration sectorielle - Page d'accueil*, Feb. 2017. [Online]. Available: https://energie-fr-de.eu/fr/manifestations/lecteur/conference-electricite-chaleur-transport-enjeux-de-lintegration-sectorielle.html

[100] Tilia, TU Wien, IREES, Öko-Institut, and Fraunhofer ISI, "District Heating and Cooling in the European Union. Overview of Markets and Regulatory Frameworks under the Revised Renewable Energy Directive. Main Report. Final version," Brussels, Oct. 2021. doi: 10.2833/962525.

[101] S. Shnapp, D. Paci, and P. Bertoldi, "Untapping multiple benefits: hidden values in environmental and building policies. EUR 30280 EN.," Luxembourg, 2020. doi: 10.2760/314081.

[102] España, "Orden TED/1018/2021, de 20 de septiembre, por la que se aprueban las bases reguladoras para la concesión de subvenciones de la Fundación Biodiversidad, F.S.P., para fomentar actuaciones dirigidas a la renaturalización y resiliencia de ciudades españolas, en el marco del Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia, y se aprueba la convocatoria correspondiente al año 2021.," *Boletín oficial del Estado, 28 de septiembre de 2021, Número 232*. pp. 119268–119304, 2021. [Online]. Available: https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=BOE-A-2021-15757

[103] P. Armendaiz-Pérez de Ciriza, "Evaluación del Bienestar térmico en locales de trabajos cerrados mediante los índices térmicos PMV y PPD," 2012. [Online]. Available: https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwizl4m3j4mDAxVPUKQEHTmTD9IQFnoECBMQAQ&url=https%3A%2F%2Fwww.insst.es%2Fdocuments%2F94886%2F0%2FEvaluaci%25C3%25B3n%2Bdel%2BBienestar%2Bt%25C3%25A9rmico%2Ben%2Blocales%2Bde%2Btrabajo%2Bcerrados%2Bmediante%2Blos%2B%25C3%25ADndices%2Bt%25C3%25A9rmicos%2BPMV%2By%2BPPD%2Ff21b631c-4495-4556-a53a-2c85949a209e&usg=AOvVaw2JXbqfaFxh_dZwoSyzZcKt&opi=89978449

[104] R. Allen, L. Pereira, D. Raes, and M. Smith, *Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements - FAO Irrigation and drainage paper 56*. Rome: FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1998. [Online]. Available: https://www.fao.org/3/X0490E/X0490E00.htm

[105] L. de Pereda, "Capitulo 6. Aparcamientos robotizados y semiautomáticos. Una estrategia hacia la sostenibilidad y eficiencia energética," in *Guía de Ahorro Energético en Garajes y Aparcamientos*, Madrid: Dirección General de Industria, Energía y Minas de la Comunidad de Madrid - Fundación de la Energía de la Comunidad de Madrid, 2007, pp. 187–242. [Online]. Available: https://www.fenercom.com/publicacion/guia-de-ahorro-energetico-en-garajes-y-aparcamientos-2007/

[106] VDI, "VDI 4640 Blatt 1:2010-06 Thermal use of the underground - Fundamentals, approvals, environmental aspects ," *VDI - Verein Deutscher Ingenieure*. VDI - Verein Deutscher Ingenieure, 2010.

[107] Lawrence Berkeley National Laboratory, "A Primer on Organizational Use of Energy Management and Information Systems (EMIS)," Aug. 2021. [Online]. Available: https://betterbuildingssolutioncenter.energy.gov/resources/a-primer-organizational-use-energy-management-and-information-systems-emis

[108] G. Lin, H. Kramer, V. Nibler, E. Crowe, and J. Granderson, "Building Analytics Tool Deployment at Scale: Benefits, Costs, and Deployment Practices," *Energies 2022, Vol. 15, Page 4858*, vol. 15, no. 13, p. 4858, Jul. 2022, doi: 10.3390/EN15134858.

[109] CORDIS, "Calculating and Operationalising the Multiple Benefits of Energy Efficiency Improvements in Europe | COMBI | Project | Fact sheet | H2020 | CORDIS | European Commission," CORDIS, Publications Office of the European Union. [Online]. Available: https://cordis.europa.eu/project/id/649724/es

[110] Directorate-General for Energy, "The Macroeconomic and Other Benefits of Energy Efficiency. Final Report," Aug. 2016. [Online]. Available: https://energy.ec.europa.eu/publications/macroeconomic-and-other-benefits-energy-efficiency_en

[111] S. Sala, F. Farioli, A. Zamagni, S. Sala, F. Farioli, and A. Zamagni, "Life cycle sustainability assessment in the context of sustainability science progress (part 2)," *Int J Life Cycle Assess*, vol. 18, pp. 1686–1697, 2013, doi: 10.1007/s11367-012-0509-5.

[112] Unión Europea, "Directiva (UE) 2018/844 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 30 de mayo de 2018, por la que se modifica la Directiva 2010/31/UE relativa a la eficiencia energética de los edificios y la Directiva 2012/27/UE relativa a la eficiencia energética (Texto pertinente a efectos del EEE)," *Diario Oficial de la Unión Europea, L 156/75*. Jun. 19, 2018. [Online]. Available: https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2018/844/oj

[113] A. Toleikyte *et al.*, "ZEBRA 2020 – Nearly Zero-Energy Building Strategy 2020 Strategies for a Nearly Zero-Energy Building Market Transition in the European Union," Nov. 2016. [Online]. Available: https://www.bpie.eu/publication/strategies-for-a-nearly-zero-energy-building-nzeb-market-transition-in-the-eu/

[114] J. Thema, J. Rasch, F. Suerkemper, and S. Thomas, "Multiple Impacts of Energy Efficiency in Policy-making and Evaluation. D8.2 Policy report on COMBI results," in *Calculating and Operationalising the Multiple Benefits of Energy Efficiency in Europe*, 2018. [Online]. Available: https://combi-project.eu/downloads/project-reports/