



UNIVERSIDAD
POLITÉCNICA
DE MADRID



ESCUELA TÉCNICA
SUPERIOR DE INGENIEROS
DE MINAS Y ENERGÍA

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS DE MINAS Y
ENERGÍA

Titulación: **GRADUADO EN INGENIERÍA DE LOS RECURSOS**
ENERGÉTICOS, COMBUSTIBLES Y EXPLOSIVOS

PROYECTO FIN DE GRADO

DEPARTAMENTO DE ENERGÍA Y COMBUSTIBLES

SIMULACIÓN EN DESIGNBUILDER DEL FUNCIONAMIENTO DEL
SISTEMA ENERGÉTICO DE UNA CLÍNICA ODONTOLÓGICA CON
PANELES GEOTÉRMICOS DE MUY BAJA ENTALPÍA

ÁLVARO ZAMARRO TOVES

JULIO DE 2025

**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS DE
MINAS Y ENERGÍA**

**Titulación: GRADUADO EN INGENIERÍA DE LOS RECURSOS
ENERGÉTICOS, COMBUSTIBLES Y EXPLOSIVOS**

**SIMULACIÓN EN DESIGNBUILDER DEL FUNCIONAMIENTO
DEL SISTEMA ENERGÉTICO DE UNA CLÍNICA
ODONTOLÓGICA CON PANELES GEOTÉRMICOS DE MUY
BAJA ENTALPÍA**

Realizado por

Álvaro Zamarro Toves

Dirigido por

Natalia Elizabeth Fonseca González – Departamento de Energía y Combustibles

y

**Luis de Pereda Fernández - Instituto Europeo de Innovación y Desarrollo
Tecnológico S.L.**

AGRADECIMIENTOS

Quisiera expresar mi más sincero agradecimiento a todas las personas que han contribuido de forma directa o indirecta al desarrollo de este trabajo.

En primer lugar, agradezco a mi tutora, Natalia Elizabeth Fonseca González, por su orientación constante, su disponibilidad y su paciencia a lo largo de todo el proceso. Su experiencia y compromiso han sido fundamentales para la realización de este proyecto.

A la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas y Energía de Madrid, por brindarme la formación y las herramientas necesarias para afrontar este trabajo, así como al personal docente y administrativo que ha acompañado mi trayectoria universitaria.

También quiero agradecer a Luis de Pereda Fernández por facilitar los datos, recursos y apoyo técnico esenciales para el desarrollo de la simulación.

Por último, agradezco profundamente a mi familia y amigos, cuyo apoyo constante ha sido esencial durante estos años de formación. A Carolina, por su paciencia, ánimo incondicional y por acompañarme en cada etapa de este proceso. Su presencia ha sido un pilar fundamental en la consecución de este trabajo.

Gracias a todos por formar parte de este camino.

Índice General

Índice General.....	II
ÍNDICE DE TABLAS	VI
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	VIII
RESUMEN.....	XIII
ABSTRACT	XIII
MEMORIA.....	2
1. INTRODUCCIÓN.....	2
1.1. Objetivos y Alcance.....	2
1.2. Antecedentes.....	2
1.3. Legislación y normativa de eficiencia energética en la edificación	4
1.3.1. Código técnico de la edificación (CTE):	4
1.3.2. Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios (RITE).....	5
1.3.3. Normativa de certificación energética (RD 390/2021).....	5
2. Fundamentos de la climatización y simulación energética de edificios	8
2.1. Componentes del sistemas de climatización	8
2.1.1. Bomba de calor aerotérmica	8
2.1.2. Bomba de calor geotérmica	12
2.1.3. Tanque de Inercia.....	13
2.1.4. UTA	15
2.1.5. Suelo radiante	16
2.2. Modelado energético en edificaciones	18
2.3. Herramientas de simulación energética	18
3. Descripción de la instalación y datos de entrada.....	21
3.1. Descripción general de la instalación	21
3.1.1. Plano de la clínica.....	22
3.1.2. Características estructurales	25
3.1.3. Características de iluminación.....	26
3.2. Sistemas de climatización de la instalación.....	27
3.2.1. Bomba de calor.....	28
3.2.2. Fancoils.....	28
3.2.3. Equipo de recuperación	28
3.2.4. Suelo radiante	29

3.2.5.	Tanques de inercia	29
3.2.6.	Bomba de calor geotérmica	29
3.2.7.	Ventilación nominal.....	30
3.3.	Horarios-Consigna de funcionamiento del sistema climático	31
3.3.1.	Horario consigna recuperador de calor.....	32
3.3.2.	Horario consigna tanque de inercia 300 L.....	33
3.3.3.	Horario paneles de geotermia	33
3.3.4.	Horario purga nocturna.....	34
3.3.5.	Horario ventilación mecánica.....	34
3.3.6.	Horario Suelo radiante.....	34
3.3.7.	Consignas límite de valores apertura de ventilación	35
3.3.8.	Consignas de apertura límite bypass	36
3.3.9.	Consignas ida suelo radiante	37
3.3.10.	Consignas idas bombas de calor.....	37
3.3.11.	Consignas diferenciales de arranque del fancoil	37
3.3.12.	Valores de ocupación	38
4.	Metodología para Simulación energética de la instalación	40
4.1.	Herramientas y software utilizados	40
4.1.1.	Herramienta principal	40
4.1.2.	Herramientas complementarias	41
4.2.	Descripción general de la metodología seguida	41
4.2.1.	Diseño tridimensional de la clínica en DesignBuilder	43
4.2.2.	Descripción de “Sitio”	47
4.2.3.	Descripción de “edificio 1”	53
4.2.4.	Cerramientos.....	65
4.2.5.	Aberturas	70
4.2.6.	Iluminación.....	71
4.2.7.	HVAC	72
4.3.	Descripción del sistema HVAC detallado	74
4.3.1.	Bomba de calor aerotérmica	78
4.3.2.	Bomba de calor geotérmica	82
4.3.3.	Tanque de Inercia de 300L	85
4.3.4.	Tanque de inercia de 100L.....	87

4.3.5.	UTA (Unida de Tratamiento de Aire)	89
4.3.6.	Instalación de los grupos de zonas	92
4.4.	Escenario de simulación	98
4.5.	Datos para validación – sistema en operación.....	98
4.5.1.	Temperatura exterior.....	99
4.5.2.	Humedad exterior	100
4.5.3.	Temperatura media de la clínica.....	100
4.5.4.	CO2 medio de la clínica	101
4.5.5.	Temperatura de cada una de las zonas.....	101
4.5.6.	Temperatura ida bomba de calor	104
4.5.7.	Temperatura del tanque de inercia de 300 L.....	104
4.5.8.	Temperatura del tanque de inercia de 100 L.....	105
4.5.9.	Temperatura de impulsión del Suelo Radiante	105
4.5.10.	Temperatura impulsión del recuperador de aire	106
4.6.	Herramientas estadísticas para la validación de la simulación.....	107
5.	Resultados.....	109
5.1.	Resultados de validación del modelo	109
5.1.1.	Temperatura exterior.....	110
5.1.2.	Humedad exterior	112
5.1.3.	Temperatura media de la clínica.....	113
5.1.4.	Concentración media de CO2 de la clínica	114
5.1.5.	Temperatura de cada una de las zonas.....	115
5.1.6.	Temperatura de ida de la bomba de calor	117
5.1.7.	Temperatura del tanque de inercia de 300 L.....	118
5.1.8.	Temperatura del tanque de inercia de 100	119
5.1.9.	Temperatura de impulsión del suelo radiante	121
5.1.10.	Temperatura de impulsión del recuperador de aire	122
6.	Discusiones y Conclusiones	125
6.1.	Evaluación de la simulación	125
6.2.	Limitaciones del Estudio	126
6.2.1.	Limitaciones constructivas	127
6.2.2.	Limitaciones de diseño de climatización.....	127
6.2.3.	Limitaciones del programa de recogida de datos	131

6.3.	Recomendaciones para futuras investigaciones	132
6.4.	Conclusiones.....	133
7.	Análisis Económico.....	135
7.1	Indicadores Económicos.....	135
7.1.1.	Tiempo de retorno.....	135
7.1.2.	Valor Actual Neto (VAN)	135
7.1.3.	Tasa Interna de Retorno (TIR).....	136
7.1.4.	Coste de Energía Ahorrada (CEAH)	136
7.2.	Estudio de viabilidad económica.....	137
7.2.1.	Costes Iniciales y Operativos	137
7.2.2.	Tiempo de Retorno	138
7.2.3.	VAN	139
7.2.4.	TIR.....	140
7.2.5.	CEAH	140
8.	Bibliografía.....	141
9.	ANEXO 1. Gráficas comparativas de cada una de las zonas	143

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Calificaciones de los edificios existentes en emisiones certificados por CCAA. (2023_Informedeseguimiento_11_CERTIFICACION_ENERGETICA_V5.pdf, s. f.)... 3	3
Tabla 2: Calificación energética e índices para edificios de uso residencial privado (20151123-Calificacion-eficiencia-energetica-edificios.pdf, s. f.)..... 7	7
Tabla 3: Características de muros, cerramientos y suelos. Creación propia..... 25	25
Tabla 4: Características de ventanas. Creación propia 26	26
Tabla 5: Características de transmitancia térmica. Creación propia..... 26	26
Tabla 6: Características de iluminación. Creación propia 26	26
Tabla 7: Especificaciones de la bomba de calor. Creación propia..... 28	28
Tabla 8: Especificaciones de los Fancoils. Creación propia..... 28	28
Tabla 9: Especificaciones del equipo de recuperación. Creación propia..... 29	29
Tabla 10: Especificaciones del suelo radiante. Creación propia 29	29
Tabla 11: Características de la bomba de calor geotérmica. Creación propia 30	30
Tabla 12: Caudales de la ventilación nominal. Creación propia 31	31
Tabla 13: Horario recuperador de calor. Creación propia 33	33
Tabla 14: Horario tanque de inercia de 300 L. Creación propia..... 33	33
Tabla 15: Horario paneles de geotermia. Creación propia 34	34
Tabla 16: Horario purga nocturna. Creación propia 34	34
Tabla 17: Horario ventilación. Creación propia 34	34
Tabla 18: Horario suelo radiante entre semana. Creación propia..... 35	35
Tabla 19: Horario suelo radiante fin de semana 35	35
Tabla 20: Consigna de apertura límite de la ventilación. Creación propia..... 36	36
Tabla 21: Consigna de límite de apertura en fancoils y suelo radiante. Creación propia36	36
Tabla 22: Consigna límite de temperatura de suelo radiante. Creación propia 37	37
Tabla 23: Consigna límite temperatura de bomba de calor. Creación propia..... 37	37
Tabla 24: Consigna diferencial de fancoil en la recepción y sala de espera..... 38	38
Tabla 25: Valores de ocupación y áreas de las zonas de la clínica. Creación propia..... 39	39
Tabla 26: Tipos de versiones comercializables de DesignBuilder(Comprar DesignBuilder, s. f.)..... 41	41
Tabla 27: Clasificación de zonas según su inclusión en los cálculos térmicos. Creación propia 56	56
Tabla 28: Áreas y volúmenes físicos y/o reales de la clínica. Creación propia..... 58	58
Tabla 29: Tabla de Ocupación por zonas. Creación propia 59	59
Tabla 30: Table de condiciones metabólicas en la clínica. Creación propia 62	62
Tabla 31: Valores de computadoras y consumo oficinas por zonas. Creación propia... 65	65
Tabla 32 : Tabla de acristalamiento y cerramientos de ventanas. Creación propia 71	71
Tabla 33: Valores de MAE y MAPE de Temperatura exterior. Creación propia.....111	111
Tabla 34: Valores de MAE y MAPE de Humedad exterior. Creación propia .....112	112
Tabla 35: Valores de MAE y MAPE de Temperatura de la clínica. Creación propia....114	114
Tabla 36: Valores de MAE y MAPE de concentración de CO2 de la clínica. Creación propia .....115	115

Tabla 37: Valores de MAE y MAPE de Temperatura del despacho 1, despacho 2, distribuidor y esterilización. Creación propia.....	115
Tabla 38: Valores de MAE y MAPE de Temperatura del gabinete de 1 al 4. Creación propia.....	116
Tabla 39: Valores de MAE y MAPE de Temperatura de quirófano 1 y 2, recepción, recuperación y sala de espera. Creación propia.....	116
Tabla 40: Valores de MAE y MAPE de Temperatura de ida de la bomba de calor. Creación propia.....	117
Tabla 41: Valores de MAE y MAPE de la Temperatura del tanque de 300L. Creación propia.....	119
Tabla 42: Valores de MAE y MAPE de Temperatura del tanque de 100L. Creación propia.....	120
Tabla 43: Valores de MAE y MAPE de Temperatura del suelo radiante. Creación propia.....	121
Tabla 44: Valores de MAE y MAPE de la Temperatura del recuperador de calor. Creación propia.....	123
Tabla 45: Resumen-clasificación de datos de validación. Creación propia.....	126
Tabla 46: Inversión Inicial. Creación propia.....	137
Tabla 47: Costes Anuales nuevo sistema. Creación propia.....	138
Tabla 48: Costes Anuales Sistema con caldera. Creación propia.....	138
Tabla 49: Comparación de ahorros entre sistemas. Creación propia.....	138
Tabla 50: Tiempo de retorno. Creación propia.....	138
Tabla 51: Tabla de VAN. Creación propia.....	139

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Figura 1: Fórmulas de índices de eficiencia energética C1 y C2(20151123-Calificacion-eficiencia-energetica-edificios.pdf, s. f.)	6
Figura 2: Gráfica de ciclo de Carnot para calefacción(Fonseca González, s. f.)	8
Figura 3: Esquema de bomba de calor para calefacción y refrigeración. (Martín Blas & Serrano Fernández, s. f.)	11
Figura 4: Operación de una BCG en calefacción y refrigeración(Geotermia-Vol25-2.pdf, s. f.)	13
Figura 5: Ejemplo de instalación de tanque de inercia (Manual-Instrucciones-PF.pdf, s. f.)	15
Figura 6: FUENTE 6 Esquema de una Unidad de Tratamiento de Aire (UTA)(¿Qué es una unidad de tratamiento de aire (UTA)?, 2021)	16
Figura 7: Esquema de componentes de suelo radiante(«Suelo Radiante», s. f.)	17
Figura 8: Plano aéreo del emplazamiento (Sede Electrónica del Catastro - Fondo mapa de España, s. f.)	22
Figura 9: Plano de la primera planta clínica facilitado por Luis de Pereda en el programa AUTOCAD	23
Figura 10: Plano del sótano de la clínica facilitado por Luis de Pereda mediante el programa AUTOCAD	24
Figura 11: Plano en alzado de la fachada de la clínica facilitado por Luis de Pereda mediante el programa AUTOCAD	24
Figura 12: Por cortesía de Luis de Pereda. Esquema energético de la clínica	27
Figura 13: Árbol descriptivo. Creación propia en el programa DesignBuilder	42
Figura 14: Selector de dibujo en 2D. Creación propia en el programa DesignBuilder	43
Figura 15: Desarrollo tridimensional de la clínica. Creación propia en el programa DesignBuilder	44
Figura 16: Vista renderizada de la clínica. DesignBuilder	45
Figura 17: Desarrollo tridimensional del sótano. DesignBuilder	46
Figura 18: Figura 35: Vista renderizada del sótano. DesignBuilder	46
Figura 19: Desarrollo tridimensional del barrio. Creación propia en el programa DesignBuilder	47
Figura 20: Carpetas de datos en Datos del sitio. Creación propia en el programa DesignBuilder	48
Figura 21: Carpeta de Ubicación. Creación propia en el programa DesignBuilder	48
Figura 22: Carpeta de Detalles de sitio. Creación propia en el programa DesignBuilder	49
Figura 23: Carpeta de Hora y Horario de Verano. Creación propia en el programa DesignBuilder	49
Figura 24: Capeta de Datos Climñaticos para Simulación. Creación propia en el programa DesignBuilder	50

Figura 25: Archivo climático ESP_Madrid.082210_IWEC_modificadoEPW en Excel. Creación propia en el programa Excel.....	51
Figura 26: Interfaz de programa deEPWaCSV. Creación propia	51
Figura 27: Interfaz del programa Weather statictis and conversion. Creación propia.....	52
Figura 28: Carpetas de Región Legislativa. Creación propia en el programa DesignBuilder.....	52
Figura 29: Esquema de asignación de dato. Creación propia	53
Figura 30: Carpeta de actividad. Creación propia en el programa DesignBuilder	54
Figura 31: Carpeta de plantilla de actividad. Creación propia en DesignBuilder .	55
Figura 32: Carpeta de Edificio LEED/ASHRAE 90.1. Creación propia en DesignBuilder.....	57
Figura 33: Carpeta de Áreas de suelo y Volúmenes. Creación propia en DesignBuilder.....	57
Figura 34 Carpeta de ocupación. Creación propia en DesignBuilder	58
Figura 35: Carpeta de horario de ocupación. Creación propia en DesignBuilder .	60
Figura 36: Distribución de ocupación a lo largo del día. Creación propia en DesignBuilder.....	61
Figura 37: Carpetas de Vestimenta, Ponderación de temperatura, y velocidad del aire. Creación propia en DesignBuilder	62
Figura 38: Carpeta desglosada de Control Ambiental. Creación propia en DesignBuilder.....	63
Figura 39: Carpeta de computadoras y Equipos de Oficina. Creación propia en DesignBuilder.....	64
Figura 40: Carpeta cerramientos. Creación propia en DesignBuilder.....	66
Figura 41: Muro de la clínica. Creación propia en DesingBuilder	67
Figura 42: Muro del sótano. Creación propia en DesingBuilder	68
Figura 43: Suelo de la clínica. Creación propia en DesingBuilder.....	68
Figura 44: Suelo del sótano. Creación propia en DesingBuilder	69
Figura 45: Particiones de la clínica. Creación propia en DesingBuilder.....	69
Figura 46: Pared del sótano donde se sitúan los paneles geotérmicos. Creación propia en DesingBuilder	70
Figura 47: Carpeta de fuente interna. Creación propia en DesignBuilder	70
Figura 48: Subcarpetas dentro de aperturas. Creación propia en DesignBuilder .	70
Figura 49: Carpeta de iluminación. Creación propia en DesignBuilder	72
Figura 50: Carpeta de HVAC. Creación propia en DesignBuilder	73
Figura 51: Horario de ventilación mecánica. Creación propia en Designbuilder ..	74
Figura 52: Diseño de climatización de la clínica. Creación propia en DesignBuilder	75
Figura 53: Fases de detalle en HVAC DETALLADO. Creación propia en DesignBuilder.....	77
Figura 54: Bomba de calor aerotérmica. Creación propia en DesignBuilder.....	78

Figura 55: Menús de los controles de consigna 1 y 2. Creación propia en DesignBuilder.....	79
Figura 56: Menú de programación de consigna alta de refrigeración. Creación propia en DesignBuilder	80
Figura 57: Menú de configuración de bomba de calor. Creación propia en DesignBuilder.....	80
Figura 58: Menú de planta dentro del árbol del modelo. Creación propia en DesignBuilder.....	81
Figura 59: Bomba de calor geotérmica. Creación propia en DesignBuilder	82
Figura 60: Menú del intercambiador de Calor Geotérmico	83
Figura 61: Menú de configuración de la bomba de calor geotérmica. Creación propia en DesignBuilder	84
Figura 62: Tanque de inercia de 300L. Creación propia en DesignBuilder	85
Figura 63: Menú de configuración de los tanques de inercia. Creación propia en DesignBuilder.....	86
Figura 64: Menú de configuración de horario de funcionamiento de los tanques de inercia. Creación propia en DesignBuilder	87
Figura 65 Tanque de inercia de 100L. Creación propia en DesignBuilder	87
Figura 66 Unidad de Tratamiento de Aire. Creación propia en DesignBuilder	89
Figura 67: Menú de configuración de la ventilación mecánica en la UTA. Creación propia en DesignBuilder	91
Figura 68: Menú de configuración de horario del recuperador de calor. Creación propia en DesignBuilder	91
Figura 69: Grupos de zonas. Creación propia en DesignBuilder.....	92
Figura 70: Suelo radiante. Creación propia en DesignBuilder	94
Figura 71: Menú de configuración del suelo radiante. Creación propia en DesignBuilder.....	95
Figura 72: menú de configuración de horario suelo radiante. Creación propia en DesignBuilder.....	95
Figura 73: VAV (sistema de Volumen de Aire Variable). Creación propia en DesignBuilder.....	96
Figura 74: Fancoils. Creación propia en DesignBuilder.....	97
Figura 75: Gráfica temperatura exterior-fecha. Creación propia	100
Figura 76: Gráfica humedad exterior-fecha. Creación propia.....	100
Figura 77: Gráfica temperatura media de la clínica-fecha. Creación propia.....	101
Figura 78: Gráfica CO2 medio de la clínica-fecha. Creación propia	101
Figura 79: Gráfica temperatura media de cada zona-fecha. Creación propia	102
Figura 80: Gráfica temperatura media de los despachos-fecha. Creación propia	103
Figura 81: Gráfica temperatura media de los gabinetes-fecha. Creación propia	103
Figura 82: Gráfica temperatura media de los quirófanos-fecha. Creación propia	103
Figura 83: Gráfica temperatura media de las habitáculos restantes-fecha. Creación propia.....	104

Figura 84: Gráfica temperatura ida bomba de calor-fecha. Creación propia.....	104
Figura 85: Gráfica temperatura del tanque de inercia de 300L-fecha. Creación propia.....	105
Figura 86: Gráfica temperatura del tanque de inercia de 100L-fecha. Creación propia.....	105
Figura 87: Gráfica temperatura impulsión de SR-fecha. Creación propia	106
Figura 88: Gráfica temperatura impulsión del recuperador de calor-fecha. Creación propia	107
Figura 89: Clasificación de resultados obtenidos. Creación propia.....	109
Figura 90: Comparación de Temperatura exterior Real y Simulada. Creación propia.....	111
Figura 91: Distribución porcentual de los Errores Absolutos de Temperatura exterior. Creación propia	111
Figura 92: Comparación de la Humedad exterior Real y Simulada. Creación propia.....	112
Figura 93: Distribución porcentual de los Errores Absolutos de Humedad exterior. Creación propia	112
Figura 94: Comparación de Temperatura de la clínica Real y Simulada. Creación propia.....	113
Figura 95: Distribución porcentual de los Errores Absolutos de la Temperatura de la clínica. Creación propia	113
Figura 96: Comparación concentración de CO2 de la clínica Real y Simulada. Creación propia	114
Figura 97: Distribución porcentual de los Errores Absolutos de la concentración CO2 de la clínica. Creación propia	115
Figura 98: Comparación de la Temperatura de ida de la bomba de calor Real y Simulada. Creación propia	117
Figura 99: Distribución porcentual de los Errores Absolutos de la Temperatura de ida bomba de calor. Creación propia	117
Figura 100: Comparación de la Temperatura del depósito de 300L Real y Simulada. Creación propia	118
Figura 101: Distribución porcentual de los Errores Absolutos de la temperatura del depósito de 300L. Creación propia	118
Figura 102: Comparación de la Temperatura del depósito de 100L Real y Simulada. Creación propia	119
Figura 103: Distribución porcentual de los Errores Absolutos de la temperatura del depósito de 100L. Creación propia	120
Figura 104: Comparación de la Temperatura del suelo radiante Real y Simulada. Creación propia	121
Figura 105: Distribución porcentual de los Errores Absolutos de la tempera suelo radiante. Creación propia	121
Figura 106: Comparación de la Temperatura del recuperador de calor Real y Simulada. Creación propia	122

Figura 107: Distribución porcentual de los Errores Absolutos de la Temperatura del recuperador de calor. Creación propia.....	122
Figura 108: Planteamiento Real en DesignBuilder. Creación propia en DesignBuilder.....	128
Figura 109: Planteamiento Ideal en DesignBuilder. Creación propia en DesignBuilder.....	129

RESUMEN

El presente proyecto tiene como objetivo analizar el comportamiento energético de una clínica odontológica mediante la herramienta de simulación DesignBuilder. Para ello, se ha desarrollado y validado un modelo digital del edificio a partir de la información contenida en la memoria del proyecto y de los datos registrados por el sistema de monitorización instalado en la clínica.

La metodología empleada ha consistido en la recopilación exhaustiva de datos constructivos, horarios de uso, cargas internas y parámetros de climatización, así como en la configuración detallada de los sistemas HVAC, incluyendo bomba de calor aerotérmica, bomba geotérmica, suelo radiante, UTA y fancoils. La simulación se ha centrado en el mes de marzo, donde los resultados muestran una buena correlación entre las temperaturas interiores simuladas y las reales, especialmente en las zonas de ocupación, validando parcialmente el modelo. No obstante, se han identificado limitaciones relevantes derivadas de la falta de información para la completa definición de algunos datos en el programa, lo que genera una desviación en los elementos de suministro de climatización.

ABSTRACT

The objective of this project is to analyze the energy performance of a dental clinic using the DesignBuilder simulation tool. To this end, a digital model of the building was developed and validated based on the information contained in the project report and the data recorded by the monitoring system installed in the clinic.

The methodology employed consisted of the exhaustive collection of construction details, operating schedules, internal loads, and HVAC parameters, as well as the detailed configuration of the HVAC systems, including an air-source heat pump, a ground-source heat pump, underfloor heating, an air handling unit, and fan coils. The simulation focused on the month of March, during which the results showed a good correlation between the simulated and actual indoor temperatures—especially in the occupied areas—thus partially validating the model. However, significant limitations were identified stemming from the lack of information required for the complete definition of certain data in the software, which led to deviations in the performance of the HVAC delivery components.

MEMORIA

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Objetivos y Alcance

El objetivo del proyecto es desarrollar y validar un modelo de simulación energética de una clínica odontológica situada en la ciudad de Madrid, utilizando el software DesignBuilder. La clínica incorpora un novedoso sistema geotérmico superficial de muy baja entalpía basado en placas con tubos de agua insertados en su interior instalado en la superficie de la pared del sótano.

El alcance incluye:

- ❖ Recopilación de información necesaria para realizar la simulación: Se analiza la memoria del proyecto y la página con la que monitoriza datos provenientes de la instalación real para obtener toda la información necesaria para proceder con la simulación. Tanto la memoria como la página no quedan anexados al proyecto por motivos de privacidad.
- ❖ Modelización del edificio: Mediante planos facilitados se realiza un modelo en 3D en la herramienta DesignBuilder, que, fusionando los datos de la memoria de proyecto se establece una representación digital similar al real. Se establece, facilitado por la medición de la temperatura exterior, un marco climático exacto.
- ❖ Validación del modelo de simulación y análisis: Se establece el marco de simulación temporal que mejor se adapta a la modelización en función de los datos extraídos en fases anteriores y se analiza si son datos fiables.
- ❖ Propuestas de mejora: En función de los resultados de la validación del proyecto se intenta corregir el modelo y se analiza que puntos de mejora que han de hacerse para establecer una simulación válida que pueda ser exportada a otros proyectos.

1.2. Antecedentes

En el contexto actual de transición energética y optimización de los recursos disponibles, la simulación se ha consolidado como una herramienta fundamental para predecir, reducir y optimizar el consumo energético, antes de la construcción o reforma de cualquier edificio. Esta metodología permite evaluar múltiples parámetros de gran relevancia como

las demandas energéticas, la interacción de sistemas activos y pasivos, facilitando un mapa técnico previo para poder realizar las correctas tomas de decisiones o correcciones.

Diversos estudios han aplicado y desarrollado distintas líneas de estudio a partir de herramientas como Energyplus, DesignBuilder o HULC para analizar distintos escenarios de mejora energética para hogares o locales donde se desarrolla una actividad económica, y en este último donde el cambio ha de ser más importante por el impacto que generan debido a su baja eficiencia.

El parque de edificios en España registrado hasta 2021, muestra, (véase Tabla 1), que las calificaciones F y G representan un 24,8 % del conjunto de certificados, siendo A, B, y C un total del 6,8 %, y el mayor grueso lo representa los de categoría D y E, con un 68,4 %. Dichos datos han sido emitidos por el Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico.

CCAA	A	B	C	D	E	F	G	
ANDALUCIA	2.877	10.939	47.668	142.190	488.633	66.171	90.650	849.128
ARAGÓN	685	1.392	7.288	20.135	80.577	15.555	14.917	140549
ASTURIAS ¹	479	567	3.154	9.639	37.011	11.769	17.335	79.954
BALEARES	801	2.534	6.978	15.833	65.829	20.427	43.097	155.499
CANARIAS	4.426	5.202	8.281	13.825	40.968	16.366	98.135	187.203
CATALUÑA	4.876	13.489	68.871	169.103	741.577	172.696	199.653	1.370.265
C LEON	2.935	2.367	11.094	31.986	107.721	21.168	22.445	199.716
C MANCHA	1.062	2.293	12.804	37.820	146.025	30.168	29.620	259.792
EXTREMADURA ¹	45	158	1.161	3.830	16.075	2.916	3.081	27.266
GALICIA	1.486	2.795	12.737	32.404	118.342	32.813	34.041	234.618
MURCIA	340	893	4.325	15.365	72.239	10.449	9.752	113.363
NAVARRA	354	489	4.617	13.578	36.818	7.952	6.688	70.496
PAIS VASCO	538	411	2.292	24.890	110.049	36.187	32.098	206.465
RIOJA	221	344	2.317	7.156	24.691	3.978	3.025	41.732
VALENCIA	1.768	9.558	38.517	124.255	555.955	82.434	111.713	924.200
MADRID	2.774	7.501	45.340	148.876	500.551	91.932	89.934	886.908
CANTABRIA	378	604	2.946	9.860	48.527	11.889	9.448	83.652
CEUTA	4	28	187	487	1.589	198	298	2.791
TOTALES³	26.049	61.564	280.577	821.232	3.193.177	635.068	815.930	5.833.597

Tabla 1: Calificaciones de los edificios existentes en emisiones certificados por CCAA. (2023_Informedeseguimiento_11_CERTIFICACION_ENERGETICA_V5.pdf, s. f.)

Existen distintos planes para mejorar las calificaciones energéticas del parque español, recogidos en Estrategia a Largo Plazo para la Rehabilitación Energética en el Sector de

la Edificación en España (ERESEE 2020). El documento mencionado refuerza la relevancia de la simulación energética, dado el elevado número de edificios pendientes de reforma para alcanzar una calificación superior y con ello una mejora de la eficiencia energética.

Además, el estudio de casos reales sobre edificios sanitarios, como el presentado por Pis Presmanes, P. en el año 2022 muestra que no todas las medidas de eficiencia energética tienden a ser económicamente iguales. Mejoras como el cambio de combustible de las fuentes de calefacción o sustitución de los sistemas de iluminación tienen una alta rentabilidad. Sin embargo, cambios como la sustitución de envolventes térmicos tienden a tener rendimientos más limitados. Esta observación enfatiza la necesidad de realizar simulaciones energéticas detalladas antes de cualquier intervención para establecer las prioridades más adecuadas desde la perspectiva de viabilidad económica y técnica. En tal contexto, se propone una simulación en DesignBuilder para la clínica odontológica que cuenta con un sistema geotérmico novedoso de baja entalpía y poca profundidad que la sitúa como una contribución directa hacia los objetivos nacionales de eficiencia, sostenibilidad y descarbonización.

1.3. Legislación y normativa de eficiencia energética en la edificación

La modelización energética como la construcción del edificio debe seguir los estándares normativos que marca la legislación española y la europea, por esta razón se desglosará pormenorizadamente la normativa que se ha tenido en cuenta.

1.3.1. Código técnico de la edificación (CTE):

El CTE está conformado por la normativa reguladora en diseño y construcción de las edificaciones en España. En concreto, se tomará con mayor interés el Documento Básico de Ahorro de Energía (DB-HE), actualizado por última vez en el 2022, que establece los requisitos de eficiencia energética en las nuevas construcciones o modificaciones en edificios.

- ❖ HE0: Limitación del consumo energético: La exigencia de la norma refleja la limitación del consumo energético en función de la ubicación, el uso de la construcción, y el alcance de la intervención

- ❖ HE1: Condiciones para el control de la demanda energética: La exigencia aplica a la demanda de envolventes térmicas que limiten la energía primaria necesaria para generar un bienestar térmico, que no genere una descompensación en el interior del habitáculo aclimatado, ni particiones con transferencias térmicas elevadas y reducción de riesgos que deriven en mermas térmicas.
- ❖ HE2: Condiciones de las instalaciones térmicas: Los edificios deben tener instalaciones térmicas que satisfagan debidamente las necesidades de confort térmico que se desarrolla en el Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios (RITE).
- ❖ HE3: Condiciones de las instalaciones de iluminación: Refleja la exigencia de la instalación de iluminación adecuada dependiendo de la actividad y la ocupación, así como un sistema de control que optimice el aprovechamiento de la luz natural en las zonas que reúnan las condiciones adecuadas.
- ❖ HE5: Generación mínima de energía eléctrica procedente de fuentes renovables: Exige la instalación de una potencia mínima de generación eléctrica procedente de fuentes renovables para uso propio o suministro a la red.

1.3.2. Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios (RITE)

Como bien queda nombrado en la HE2, el Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios, regula las condiciones que debe cumplir las instalaciones térmicas de nueva construcción, para garantizar gestión eficiente de los recursos. La gestión afecta a los diseños y sus dimensionados, control de instalaciones, climatización, ACS, ventilación y el mantenimiento de todas ellas.

1.3.3. Normativa de certificación energética (RD 390/2021)

El Real Decreto 390/2021 establece el procedimiento de cálculo y obtención de la certificación energética de los edificios. Aunque la presente simulación no persigue fines administrativos vinculados con la expedición del certificado energético, los datos los datos obtenidos permiten estimar de manera orientativa el nivel de calificación energética que alcanzaría el edificio modelado.

Los certificados antes mencionados se calculan en función de dos fórmulas y una tabulación como se muestran en la Figura 1 y tabla 2. En función de los valores obtenidos se da una etiqueta que representa el grado de eficiencia energética con una duración de 10 años.

$$C_1 = \frac{(R \cdot I_o / \bar{I}_r) - 1}{2(R - 1)} + 0,6$$
$$C_2 = \frac{(R' \cdot I_o / \bar{I}_s) - 1}{2(R' - 1)} + 0,5$$

Figura 1: Fórmulas de índices de eficiencia energética C1 y C2(20151123-Calificacion-eficiencia-energetica-edificios.pdf, s. f.)

I_o: Es el valor del indicador analizado (emisiones anuales de CO₂e, consumo anual de energía primaria no renovable, demanda de calefacción, etc) del edificio objeto.

I_r: Es el valor medio del indicador del parque de referencia de edificios nuevos de uso residencial privado (vivienda).

R: Es el ratio entre el valor de I_r y el valor del indicador correspondiente al percentil del 10 % del parque de referencia de edificios nuevos de uso residencial privado (vivienda).

I_s: Es el valor medio del indicador del parque de referencia de edificios existentes de uso residencial privado (vivienda).

R₀: Es el ratio entre el valor de I_s y el valor del indicador correspondiente al percentil del 10 % del parque de referencia de edificios existentes de uso residencial privado (vivienda).

Calificación		Índice	
A		C1	< 0,15
B	0,15 ≤	C1	< 0,50
C	0,50 ≤	C1	< 1,00
D	1,00 ≤	C1	< 1,75
E	1,75 ≤	C1	
F	1,75 ≤	C2	< 1,00
	1,00 ≤	C2	< 1,50
G	1,75 ≤	C1	
	1,50 ≤	C2	

Tabla 2: Calificación energética e índices para edificios de uso residencial privado (20151123-Calificacion-eficiencia-energetica-edificios.pdf, s.f.)

2. Fundamentos de la climatización y simulación energética de edificios

En este capítulo se presentan los fundamentos que sustentan la modelización energética de edificios y la simulación numérica en DesignBuilder, centrándose específicamente en las herramientas empleadas para dichos procesos.

2.1. Componentes del sistemas de climatización

A continuación, se ofrece una explicación detallada del funcionamiento de los distintos componentes que conforman el sistema de climatización a simular.

2.1.1. Bomba de calor aerotérmica

Los sistemas de bomba de calor aerotérmica están diseñados para producir calefacción en invierno y refrigeración en verano a partir de la temperatura del aire exterior por medio de un intercambio termodinámico en el que se extrae energía del aire si se requiere calefacción o se inyecta energía al aire exterior para producir refrigeración en el edificio que se quiera acondicionar.

El intercambio térmico de la bomba de calor ocurre a través de un ciclo termodinámico definido que consta de cuatro procesos. Sin embargo, en el ciclo real hay pérdidas adicionales debido a la fricción, caída de presión, subenfriamiento, sobrecalentamiento, y eficiencia del compresor no ideal. El comportamiento del sistema se presenta a continuación en la Figura 2

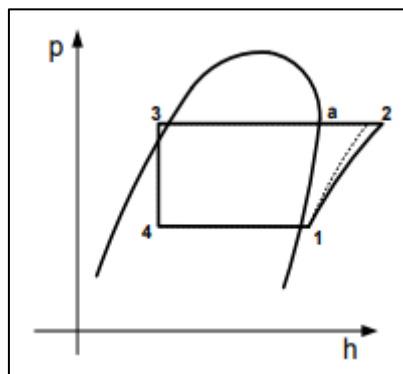


Figura 2: Gráfica de ciclo de Carnot para calefacción(Fonseca González, s. f.)

- ❖ Estado 1-2, Compresión adiabática real: El refrigerante, en estado vapor a baja presión y temperatura es comprimido por el compresor, pero debido a su rendimiento

isentrópico inferior al 100%, el trabajo necesario es mayor que el ciclo ideal (isentrópico).

- ❖ Estado 2-3, Condensación isobárica con subenfriamiento: A presión constante, el refrigerante libera calor al fluido del sistema de calefacción o parte de demanda, condensándose. En el ciclo real, se produce un subenfriamiento adicional en el condensador, lo que incrementa la cantidad de energía útil transferida al medio; esto se produce debido a que el refrigerante continúa enfriándose ligeramente tras la condensación total. Además, hay que tener en cuenta las pérdidas de presión por la línea.
- ❖ Estado 3-4, Expansión isoentálpica con irreversibilidades: El refrigerante líquido atraviesa la válvula de expansión, reduciendo su presión, Este proceso, que se aproxima a ser isoentálpico, conlleva una mezcla líquido-vapor a la salida. En la práctica, existen pérdidas por fricción y caídas de presión que generan una desviación con respecto al comportamiento ideal.
- ❖ Estado 4-1, Evaporación isobárica con sobrecalentamiento: El refrigerante absorbe calor del entorno (del aire exterior o en el caso de ser una bomba de calor geotérmica, del terreno), lo que permite su completa evaporación. En el ciclo real, el proceso continúa con un ligero sobrecalentamiento del vapor, que garantiza solo gas entre al compresor, evitando daños y mejorando la eficiencia.

Estos intercambios se producen en el interior de la máquina aerotérmica de la Figura 3 que cuenta con:

- ❖ Evaporador: intercambiador de calor en el que se produce el cambio de fase del refrigerante de estado líquido a vapor, gracias a la energía que le cede el aire. Para que esto sea posible, el refrigerante debe estar en unas condiciones de presión tales que su temperatura de evaporación sea inferior a la del medio de intercambio, para que este pueda transferirle energía y provocar su cambio de estado.
- ❖ Compresor: Motor que genera un trabajo para aspirar el refrigerante en estado vapor a una temperatura y presión mayor. Gracias a la compresión, la energía obtenida puede ser transmitida alrededor del circuito.
- ❖ Condensador: Intercambiador de calor donde el refrigerante en fase vapor cede al medio calor proveniente del cambio de fase hasta estar el refrigerante en estado líquido. La temperatura de condensación del refrigerante debe ser superior al de

entrada al intercambiador del fluido que se quiere calentar, para así producir un intercambio de temperatura o más bajo para refrigerar.

- ❖ **Válvula de expansión:** Dispositivo situado a la salida del condensador, cuya función es regular la cantidad de refrigerante líquido que debe circular entre el condensador y el evaporador, para mantener los niveles de inundación, temperatura y presión adecuados para que el ciclo termodinámico funcione en las condiciones deseadas. Este elemento genera una pérdida de carga (regulada) que separa el lado de alta presión del condensador, del lado de baja presión del evaporador. Después del sistema de expansión, el refrigerante, ya en fase mixta líquido-vapor, se introduce en el evaporador para iniciar el ciclo de nuevo.
- ❖ **Válvula de 4 vías:** En los sistemas de bomba de calor reversibles, el sistema permite que el ciclo termodinámico del refrigerante se invierta, haciendo posible el funcionamiento en modo de calefacción o refrigeración. Gracias a la válvula, el refrigerante puede redirigirse de forma inversa, lo que permite que el equipo actúe alternativamente como generador de calor o como sistema de enfriamiento.
Esta válvula cuenta con 4 conexiones principales, línea de descarga del compresor, línea de succión hacia el compresor, línea de intercambiador interior, línea de intercambiador exterior. A través de un sistema de accionamiento, el trayecto del refrigerante se invierte, revirtiendo así las funciones de los intercambiadores de calor, en calefacción el intercambiador interior actúa como condensador y el exterior como evaporador, en modo refrigeración las funciones se invierten.

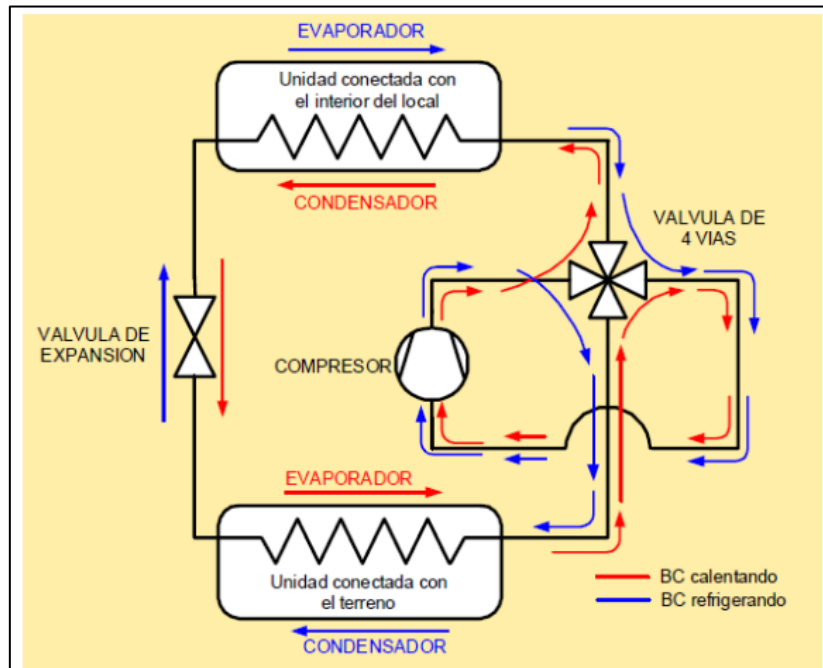


Figura 3: Esquema de bomba de calor para calefacción y refrigeración. (Martín Blas & Serrano Fernández, s. f.)

En el ámbito del análisis de sistemas de climatización térmica, como las bombas de calor, resulta crucial disponer de indicadores que permitan medir su eficiencia energética de forma precisa. Entre los más empleados destacan el Coeficiente de Rendimiento (COP) y el Índice de Eficiencia Energética (EER), herramientas clave para entender la relación entre la energía útil que aporta el sistema y la electricidad que requiere para operar.

- ❖ COP (Coefficient of Performance): Se define como la relación entre la energía térmica útil que entrega el sistema y el trabajo necesario para que funcione.

Como se muestra en la Ecuación 1

$$\text{COP} = Q_1 / W \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde:

Q_1 representa la cantidad de energía térmica suministrada al espacio climatizado, expresada en kWh o kJ.

W indica la energía eléctrica consumida por el compresor.

Este coeficiente, al ser adimensional, ofrece una medida directa del rendimiento de una bomba de calor. Así, por ejemplo, un COP de 4 implica que, por cada unidad de electricidad consumida, el sistema entrega cuatro unidades de energía térmica. En

condiciones reales, el valor del COP puede oscilar entre 2,5 y 5, dependiendo del tipo de tecnología, del diseño del equipo y de factores externos como la temperatura ambiente.

Es importante mencionar que el COP es aplicable tanto al modo calefacción como al de refrigeración, aunque para este último se suele emplear un índice específico llamado EER o índice de eficiencia energética (Energy Efficiency Ratio)

- ❖ EER (Energy Efficiency Ratio): El Índice de Eficiencia Energética se utiliza especialmente para evaluar el desempeño de sistemas en modo refrigeración. Este índice se calcula como la relación entre la capacidad de enfriamiento útil y la energía eléctrica consumida por el sistema bajo condiciones nominales:

$$EER = Q_{\text{frío}} / W \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde:

$Q_{\text{frío}}$ representa la potencia frigorífica suministrada al interior.

W corresponde a la potencia eléctrica absorbida.

El EER se aplica principalmente en condiciones de prueba estandarizadas, como una temperatura exterior de 35 °C y una interior de 27 °C. Al igual que el COP, se trata de una magnitud sin unidades.

2.1.2. Bomba de calor geotérmica

La bomba de calor geotérmica se vale del mismo principio de transmisión termodinámica de fluido a fluido en el intercambiador anteriormente expuesto, pero cambiando el medio de obtención o de admisión de energía, cambiando del aire a la inercia del calor del terreno. Es en el interior del terreno donde surge el primero de los intercambios de temperatura; se lleva un fluido de intercambio, en el caso del proyecto agua, y se produce un cambio gracias a la temperatura del suelo, después el agua se lleva al interior de la bomba de calor donde se produce el segundo de los intercambios. El mérito de que se pueda utilizar tanto en estado de calefacción como en estado de refrigeración es de la válvula reversible que se puede observar en la Figura 4, donde se muestra el funcionamiento del sistema en los dos estados de operación.

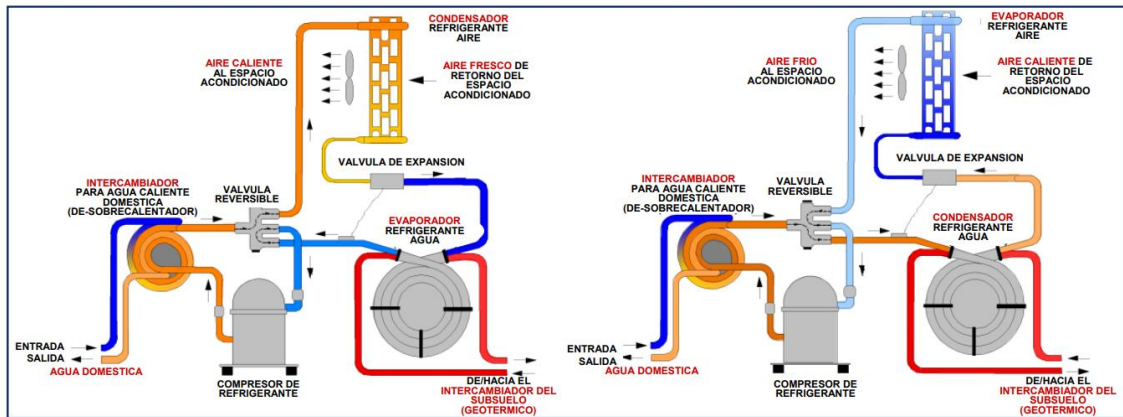


Figura 4: Operación de una BCG en calefacción y refrigeración(Geotermia-Vol25-2.pdf, s. f.)

La ventaja respecto a otros sistemas con bomba de calor es que, la adición de la geotermia permite una estabilidad mayor en el fluido de intercambio proporcionando así rendimientos mayores. Esta estabilidad proporciona un flujo térmico constante y predecible a lo largo del año, independientemente de las variaciones climáticas estacionales, lo que permite mantener coeficientes de rendimiento (COP) más elevados y estables en comparación con los sistemas que dependen del aire exterior.

Un concepto crucial a la hora de trabajar con energía geotérmica es la saturación térmica del terreno, dado que es uno de los problemas que pueden afectar el rendimiento sostenido de estos sistemas, que aparece cuando el suelo cercano al intercambiador acumula demasiado calor (cuando se refrigera) o se enfría en exceso (cuando se calefacciona), sin que haya condiciones adecuadas o tiempo suficiente para que se recupere de manera natural. Esta situación responde directamente a un desequilibrio térmico entre estaciones: si durante el invierno se extrae más energía del suelo de la que se le devuelve en verano —o al revés—, el terreno, que no actúa como una fuente o sumidero ilimitado, termina por calentarse o enfriarse gradualmente en la zona que rodea al intercambiador. Esto reduce el gradiente térmico necesario y, en consecuencia, también baja el rendimiento del sistema, disminuyendo su COP.

2.1.3. Tanque de Inercia

El funcionamiento del tanque de inercia se basa en la acumulación y liberación de energía térmica mediante la interacción de un fluido portador, en el caso que nos concierne, el

agua. Este proceso permite estabilizar la demanda, evitando fluctuaciones y mejorando la eficiencia del sistema.

Es conocido también por su uso parecido al acumulador que difiere respecto del tanque de inercia por un diseño más simple, la posibilidad de mantener únicamente agua caliente y la orientación específica para ACS (agua caliente sanitaria).

Los componentes que componen el tanque de inercia son los siguientes:

- ❖ Tanque de Almacenamiento: Diseñado para contener un volumen específico del fluido de operación
- ❖ Intercambiador de calor: Permite el intercambio térmico entre diferentes circuitos
- ❖ Aislamiento térmico: Elemento crucial para el mantenimiento del calor

Los mecanismos para los que resulta fundamental la instalación y por lo tanto imprescindible son los siguientes:

- ❖ Altas demandas energéticas: Instalaciones que requieran de altas cargas térmicas, donde la fuente de producción trabaje en estados saturados y requiera de algún elemento que apoye el suministro de carga térmica.
- ❖ Variaciones de cargas térmicas: Si existen importantes diferencias durante el día de cargas que puedan provocar múltiples paradas y arranques de distintos dispositivos lo que daña o deteriora sus elementos internos.
- ❖ Sistemas mixtos: En modelos donde se estén aplicando múltiples sistemas de climatización, ya sea aerotermia junto con suelo radiante u otros tipos de combinaciones, donde el tanque de inercia funciona como equilibrador del flujo térmico.
- ❖ Maximización de eficiencia: Instalaciones donde el objetivo es la eficiencia energética y el alargamiento de la vida útil de los elementos que lo conforman como en la Figura 5

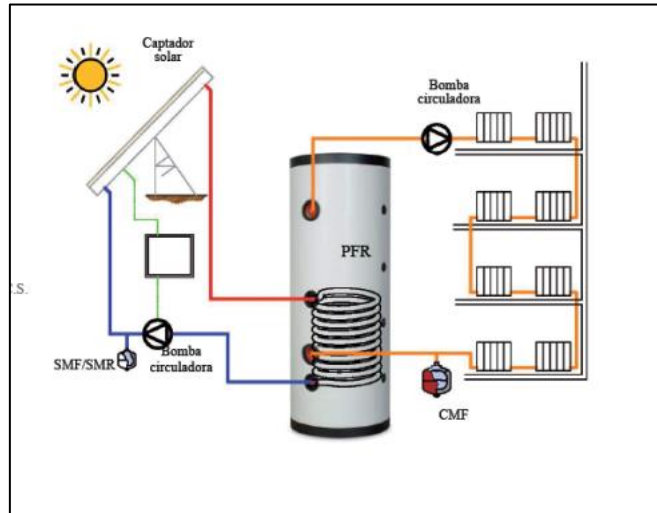


Figura 5: Ejemplo de instalación de tanque de inercia (Manual-Instrucciones-PF.pdf, s. f.)

2.1.4. UTA

La unidad de tratamiento de aire o UTA es un sistema compuesto por módulos configurables para la purificación, renovación o climatización del aire del edificio o local. Su instalación dentro del edificio se configura por conductos que alcanza cada uno de los habitáculos que se quiere aclimatar mediante aire.

Los componentes que conforman una UTA genérica son los siguientes como se puede observar en la Figura 6:

Entrada de aire: Entrada por donde se dirige el aire del exterior al interior de la unidad de tratamiento de aire.

- ❖ Filtro: Dependiendo de las condiciones de aire exterior se requerirá de un filtro de mayor o menor retención. Las condiciones que pueden afectar a la decisión son virus, bacterias, olores, contaminantes del aire como CO₂ u otros.
- ❖ Ventilador: Es el elemento de impulsión de aire desde la UTA hasta el resto de los habitáculos que se desee aclimatar.
- ❖ Intercambiadores térmicos: Dispositivo que permite el intercambio térmico entre un fluido refrigerante y el aire que accede del exterior, r. Siempre manteniendo una barrera sólida.
- ❖ Batería de refrigeración y calefacción: Baterías que incorporan una potencia térmica al fluido entrante por medio de un fluido refrigerante.
- ❖ Silenciador: Recubrimientos que reducen el impacto sonoro del sistema.

- ❖ Plenums: Espacios vacíos en el interior de la UTA que permiten una homogenización de los flujos de aire.

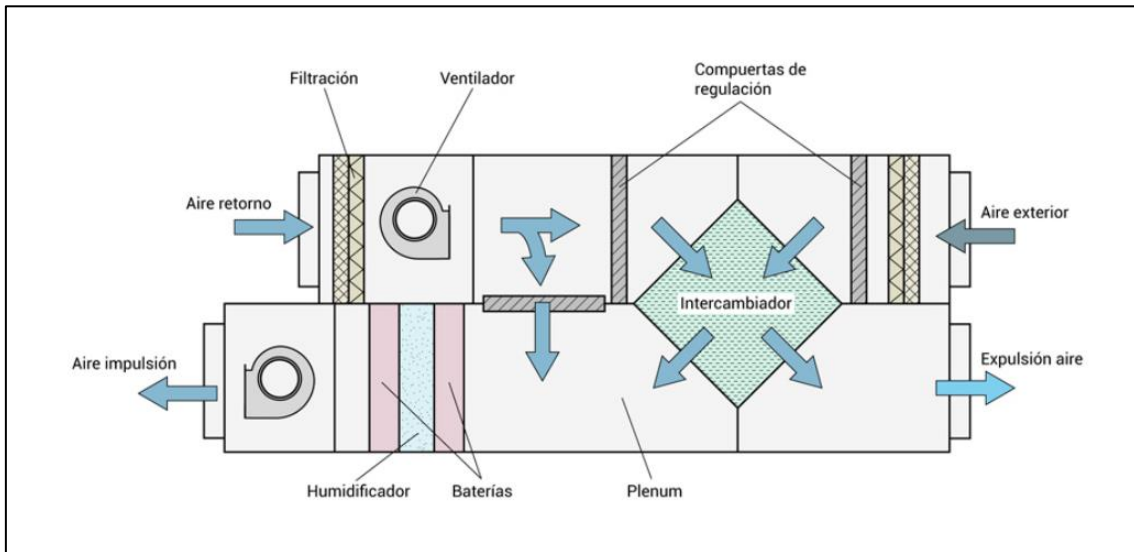


Figura 6: FUENTE 6 Esquema de una Unidad de Tratamiento de Aire (UTA)(¿Qué es una unidad de tratamiento de aire (UTA)?, 2021)

2.1.5. Suelo radiante

El suelo radiante es un elemento de climatización de baja temperatura que funciona debido a la canalización de un fluido trasmisor de temperatura mediante un sistema de tuberías que se instalan bajo el pavimento del suelo del habitáculo que se quiera aclimatar. La gran ventaja de este sistema es que su funcionamiento se sitúa en una banda de temperaturas bajas, en torno a 40 °C para calefacción y 15 °C para refrigeración en instalaciones comunes, que lo diferencia de sistemas tradicionales que trabajan con temperaturas más elevadas.

El método de transmisión térmica a través del suelo se realiza de forma uniforme debido a la distribución de los tubos por todo el pavimento, evitando así asimetrías y puntos calientes, su punto diferenciador es la elevada inercia con la que cuenta el sistema, esto quiere decir que el tiempo entre el punto de operación y el punto real de temperatura es alto, pero una vez llegado a la temperatura consigna, consigue mantener la temperatura por elevados tramos temporales fuera de funcionamiento.

Los componentes del suelo radiante como se muestra en la Figura 7 son los siguientes:

Placa de aislamiento térmico y acústico: La placa de aislamiento se coloca por debajo del forjado del habitáculo y sirve de base para la colocación de la red de tuberías. Dependiendo del diseño, es la placa la que contiene la silueta donde se instalan las tuberías o se coloca una banda perimetral donde se instalan las tuberías.

Tubería: La tubería es el elemento principal de transmisión térmica, donde se conduce el fluido de intercambio termodinámico, los materiales que normalmente conforman los tubos son elementos termoplásticos como el polibutileno. Las ventajas de realizar las tuberías con termoplásticos son su elasticidad, flexibilidad y comportamiento a largo plazo.

Banda perimetral: Lateralmente son compuestos que mejoran la unión entre el suelo radiante y la pared, además de que horizontalmente se utilizan como guías para la instalación de las tuberías.

Placa de mortero: Es la capa que cubre el suelo radiante, que posteriormente se colocará el pavimento, madera, piedra o cerámicos. El espesor mínimo de la capa, según las indicaciones de la normal UNE-EN 1264-4:2022 es de 30 mm como mínimo.

Fuente de calor: La instalación del suelo radiante va acompañado de una caldera o bomba de calor, en los últimos tiempos la combinación de suelo radiante con aerotermia o geotermia se está convirtiendo en la tendencia de climatización más extendida.

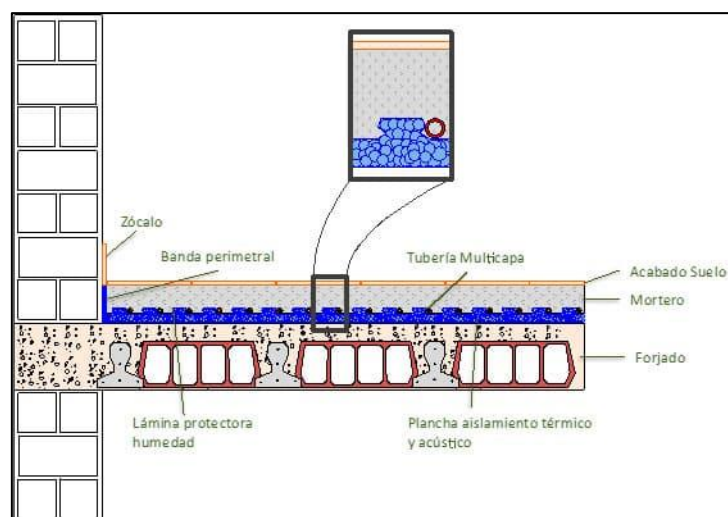


Figura 7: Esquema de componentes de suelo radiante(«Suelo Radiante», s. f.)

2.2. Modelado energético en edificaciones

La modelización de edificaciones o modelado de información en construcción (BIM), es un proceso que, mediante un software, se crea una representación de digital de características físicas y funcionamiento de un edificio, incluyendo aspectos estructurales, instalaciones MEP (mecánicas, eléctricas y de plomería). Esta representación permite gestionar el diseño de la edificación antes de su puesta en marcha y a lo largo de su ciclo de vida.

El proceso para modelizar un edificio implica:

- ❖ Creación de un modelo digital: Crear el diseño en 3D de la construcción, añadiendo muros y elementos exteriores como interiores a analizar.
- ❖ Configuración de parámetros de funcionamiento y de las instalaciones: El diseño debe ir acompañado de la estructura térmica y eléctrica a instalar (HVAC), datos de ocupación del edificio y definición de su actividad, especificación de los materiales, componentes de iluminación, valores consignados para cumplimiento de normativa, etc.
- ❖ Simulación y validación: Simular el modelo digital creado bajo distintas condiciones y validar los datos obtenidos, con el objetivo de sacar conclusiones de aspectos como la eficiencia energética, la iluminación natural, cumplimiento de normativa, etc.

2.3. Herramientas de simulación energética

Existen múltiples categorías, que se pueden clasificar por nivel de detalle o tipo de análisis que realizan, dentro de las herramientas de simulación energética, que se diferenciarán en Software de certificación energética oficial, modelado detallado, software de pre-diseño o uso educativo.

- ❖ Software de certificación energética oficial: Herramientas que son certificadas por organismos oficiales que permiten crear certificados de eficiencia energética en función del cumplimiento del Código Técnico de la Edificación. Las herramientas son: HULC (Herramienta Unificada Líder-Calener) y CYPETHERM HE Plus.
 - HULC (Herramienta Unificada Líder-Calener): Programa de simulación desarrollado por el Ministerio para la Transición Ecológica en colaboración con el IDEA. Su uso es obligatorio para la otorgación de certificados necesarios antes de la edificación y utiliza el motor de cálculo energético EnergyPlus.

CYPETHERM HE Plus: Programa que permite realizar simulaciones con el motor de cálculo energético EnergyPlus orientado a justificar el cumplimiento normativo técnico.

- ❖ Software de modelado detallado: Herramientas que permiten el cálculo y análisis de datos realistas del comportamiento del edificio con una amplia flexibilidad y complejidad. Estas herramientas se caracterizan por la composición de una plataforma de previsualización de la edificación y de un motor de cálculo energético. Las herramientas son: EnergyPlus, TRNSYS, IES-VE, DesignBuilder y OpenStudio.
 - EnergyPlus: Motor de cálculo altamente extendido desarrollado por U.S. Department of Energy. El motor carece de interfaz gráfica y por ende está integrado en programas que si las ofrece, los cálculos que realiza se centran en HVAC (Heating, Ventilation, and Air Conditioning), cálculo de iluminación, almacenamiento y sistema programado de control.
 - DesignBuilder: Interfaz gráfica que se combina con el motor de cálculo EnergyPlus para ofrecer datos gráficos detallados, modelo visual 3D optimizado y comparación de alternativas de diseño.
 - TRNSYS: Herramienta centrada en redes energéticas, energías renovables, sistemas de alta tensión, optimizado para la investigación.
 - IES-VE (Integrated Environmental Solutions – Virtual Environment: Herramienta centrada en el comportamiento ambiental del edificio, con módulos integrados de iluminación, emisiones, ventilación natural y análisis energético.
 - OpenStudio: Plataforma ampliable que permite combinarse con EnergyPlus y scripts para ofrecer soluciones al análisis energético.
- ❖ Software de pre-diseño o uso educativo: Herramientas que se centran en la educación, caracterizándose por un diseño sencillo y datos básicos. Las herramientas son: SketUp específico para análisis energético, TAS, eQuest.
 - SketUp: Entorno básico de diseño de edificaciones en 3D que combinado con módulos energéticos puede ofrecer un resultado simplificado de datos reales.
 - eQuest: Herramienta con interfaz optimizada para el manejo sencillo que permite realizar simulaciones rápidas muy extendida en Estados Unidos.

- TAS (Thermal Analysis Software): Herramienta que permite realizar mediante un modelado arquitectónico previo, una simulación térmica del edificio, muy extendido en Reino Unido.

3. Descripción de la instalación y datos de entrada

Esta sección trata de los datos obtenidos por distintas vías, mediante la memoria de proyecto, la propuesta climática y distintas reuniones con el equipo que realizó la rehabilitación de la clínica.

3.1. Descripción general de la instalación

La instalación objeto de estudio es una clínica odontológica situada en la ciudad de Madrid (véase figura 8), con una superficie de 369 m². Su función principal, tal como indica el título, es la de clínica dental. En el mismo año de publicación de este TFG se diseñó y puso en marcha un nuevo sistema de climatización. La clínica cuenta con 22 estancias, aunque no todas disponen de climatización (por ejemplo, aseos, acceso al sótano, etc.). Además, incluye seis gabinetes, de los cuales dos son quirófanos, junto con otras zonas clave para el desarrollo de la actividad clínica.

En la Figura 8 se muestra un plano en planta de la calle donde se sitúa la clínica odontológica, obtenido a través de la sede electrónica del Catastro. Este plano ha sido empleado para extraer las dimensiones y disposiciones de los edificios adyacentes para con ello, conseguir un entorno de simulación más preciso en DesignBuilder. La incorporación de esta información representa una mejora que repercute en los parámetros críticos como la proyección de sombras sobre las ventanas, la velocidad y dirección del viento o la inercia de la radiación solar sobre la envolvente del edificio.

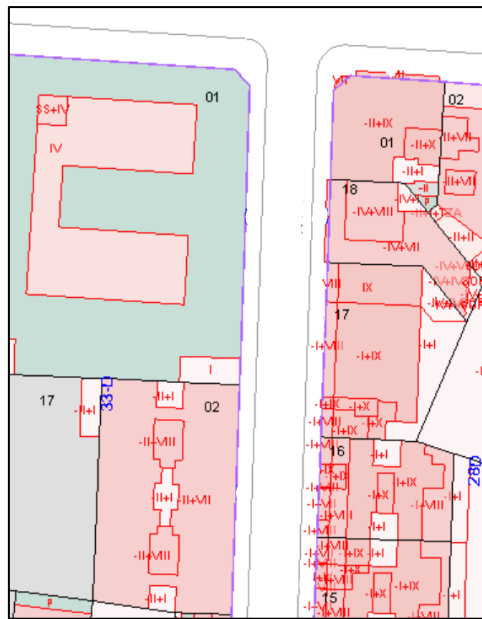


Figura 8: Plano aéreo del emplazamiento (Sede Electrónica del Catastro - Fondo mapa de España, s. f.)

3.1.1. Plano de la clínica

En la Figura 9 se muestra un plano en planta, de 368,94 m², donde se describe las distintas estancias y la distribución funcional del edificio. La organización espacial se estructura en un anillo exterior, un anillo interior que se define como distribuidor, y el núcleo central.

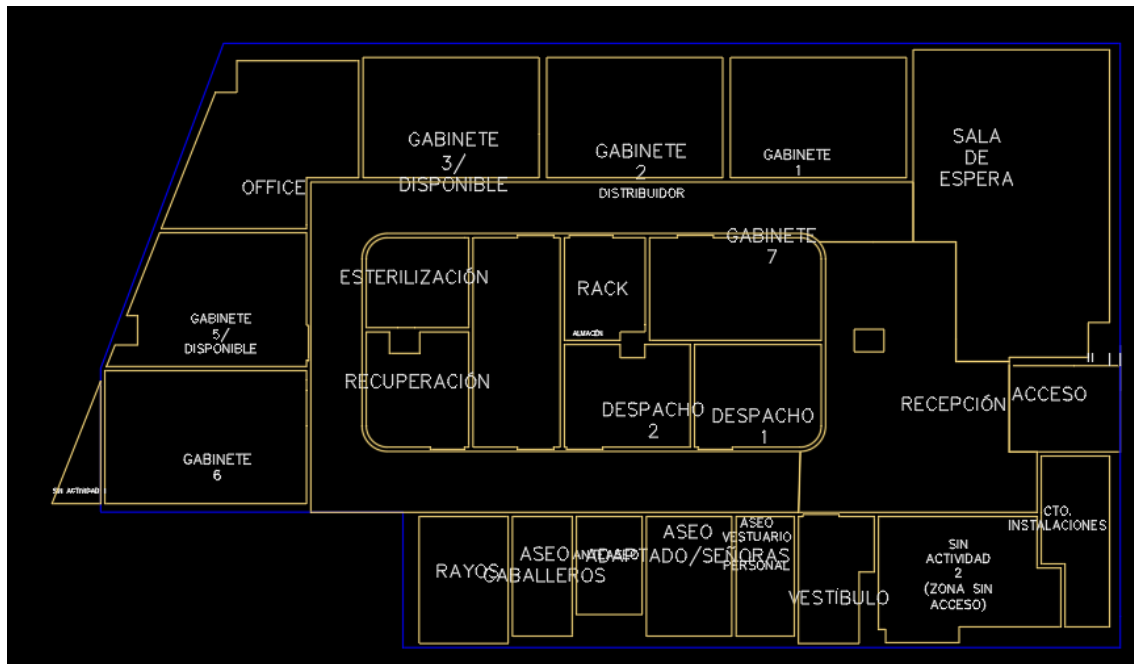


Figura 9: Plano de la primera planta clínica facilitado por Luis de Pereda en el programa AUTOCAD

Iniciando por el anillo exterior, se sitúa la Sala de espera en el cuadrante superior derecho, justo debajo se el acceso y la recepción, y continúa el centro de instalaciones que alberga el tanque de inercia de 300 L, el acceso al sótano clasificado como “sin actividad 2” debido a que el acceso se realizó con posterioridad a la creación del plano. El recorrido continúa por el vestíbulo, todos los distintos aseos y adyacente a ellos, la sala de rayos. completando el anillo se encuentra los gabinetes 6-5-3-2, y la oficina.

En el anillo interior se encuentra el distribuidor que actúa como conexión de las zonas funcionales. Finalmente, en el núcleo central se encuentra la esterilización, recuperación, el despacho 1 y 2, y el gabinete 7. Entre estas estancias se sitúa un pasillo sin denominación específica que pasará a llamarse “pasillo” en la descripción estructural de la simulación, que comunica ambos lados del distribuidor.

En la Figura 10, se describe, mediante un plano en planta correspondiente al espacio destinado al sótano. Se trata de un ala abierta, en cuyo muro del cuadrante derecho se hallan los paneles geotérmicos de muy baja entalpía. Estos paneles estarán conectados hidráulicamente a una bomba de calor geotérmica, encargado de impulsar el fluido de intercambio térmico desde el sótano hasta la sala de instalaciones ubicado en la planta superior, donde se encuentra el tanque de inercia de 300 L.

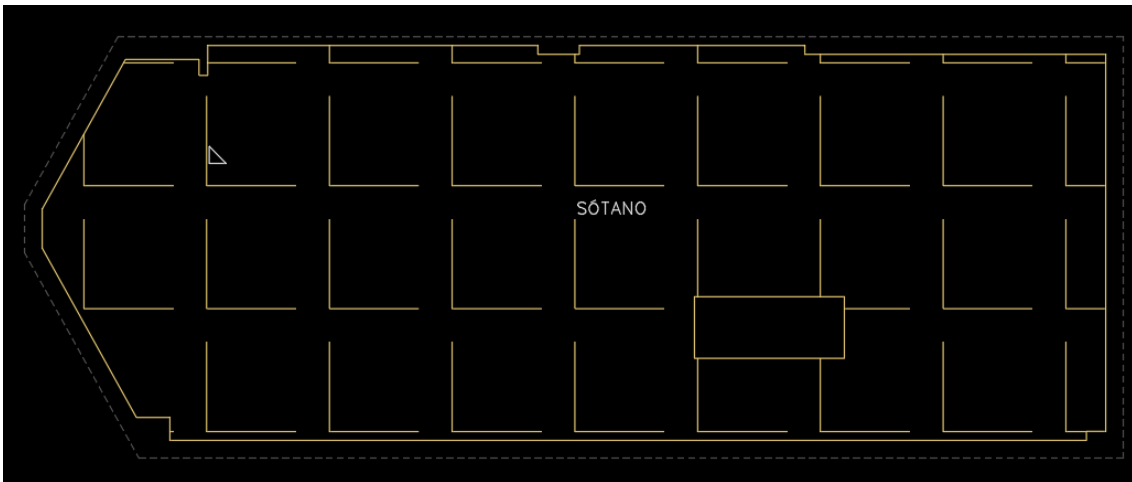


Figura 10: Plano del sótano de la clínica facilitado por Luis de Pereda mediante el programa AUTOCAD

En la Figura 11 se muestra un plano en alzado que corresponde a la fachada de la clínica, a partir del cual se ha tomado medidas de las ventanas y la puerta principal. Esta información resulta fundamental para la fase de diseño constructivo en el entorno de modelización del programa DesignBuilder.



Figura 11: Plano en alzado de la fachada de la clínica facilitado por Luis de Pereda mediante el programa AUTOCAD

3.1.2. Características estructurales

Los materiales que se van a mencionar a continuación no se han obtenido de la memoria del proyecto sino de reuniones técnicas posteriores. Por este motivo, tanto los espesores o como las especificaciones exactas pueden presentar ligeras variaciones respecto a la ejecución real. No obstante, los valores de transmitancia térmica de las envolventes y particiones sí que se han obtenido de la memoria del proyecto, por lo que se dispone de datos exactos y verificados.

En la tabla 4 se describe los tipos de materiales empleados en las distintas superficies del edificio, junto con su espesor correspondiente. Esta información resulta fundamental para el entorno de modelización de la simulación en el programa DesignBuilder, ya que permite definir con precisión las características constructivas de la envolvente térmica, influyendo en las ganancias energéticas de la simulación.

Al igual que la tabla 3, la tabla 4 y 5 dotan también de la información esencial para el entorno de modelización en DesignBuilder. La tabla 5 recoge los datos correspondientes a las ventanas y los marcos, permitiendo de finir sus propiedades térmicas. Por su parte, la tabla 6, tiene como objetivo la verificación de los valores de transmitancia térmica resultantes de los cálculos internos que realiza el programa.

Clasificación de muros	Tipo de material	Espesor (mm)
Muro exterior	Ladrillo	100
	Aislante de poliestileno	79
	hormigón	100
	Placa de yeso	13
Particiones	Placa de yeso	100
Suelo de la clínica	hormigón reforzado	300
	Aislante de poliestileno	30
	Mortero	30
	Madera prensada	50
Suelo del sótano	Hormigón reforzado	154

Tabla 3: Características de muros, cerramientos y suelos. Creación propia

Clasificación de ventanas	Tipo de material	Espesor (mm)
Ventanas exteriores	Doble capa con interior de aire	6 vidrio/6 aire
Ventanas interiores	Monocapa	3
Marcos exteriores	Aluminio con capa térmica	4
Marcos interiores	Madera	4

Tabla 4: Características de ventanas. Creación propia

Cerramiento	Regimen invierno (W/m ² °C)	Regimen verano (W/m ² °C)
Muro exterior	0,61	0,61
Muro medianero	1,15	1,15
Muro interior	1,45	1,45
Vidrio	3,5	3,5
Forjado de suelo	0,58	0,63
Cubierta	0,58	0,63

Tabla 5: Características de transmitancia térmica. Creación propia

3.1.3. Características de iluminación

Los datos que se presentan a continuación en la Tabla 6, reflejan el tipo de iluminación instalada y la potencia eléctrica asociada. Si bien no se dispone de información detallada acerca de los niveles de iluminancia, y posicionamiento de las luminarias, se puede afirmar que los valores reales cumplen con los requisitos establecidos por el Documento Básico HE-3 del Código Técnico de la Edificación, relativo a la eficiencia energética de las instalaciones de iluminación, y por tanto, se pueden extraer de dicho documento de manera aproximada los valores de iluminancia para el entorno de simulación en el programa DesignBuilder.

Clasificación de tipo de luminarias	nº	Pot unitaria (W)	Pot instalada (W)	Coficiente	Pot cálculo (W)
Focos empotrables	28	20	560	1,2	672
Tiras LED	330	9,6	3.168	1,2	3802
DOWNLIGHT LED	30	18	540	1,2	648
ESTANCA	15	40	600	1,2	720
Equipos autónomos	41	8	328	1	328
TOTAL POTENCIA INSTALADA ALUMBRADO (W): 5.196					
TOTAL POTENCIA CON FACTOR DE ARRANQUE (W): 6.170					

Tabla 6: Características de iluminación. Creación propia

3.2. Sistemas de climatización de la instalación

El sistema de climatización de la clínica odontológica consta de:

- ❖ 3 bombas de calor de 10 kW de potencia de calefacción y refrigeración.
- ❖ 12 paneles geotérmicos de muy baja entalpía instalados en la pared del sótano.
- ❖ Bomba de calor geotérmica de 3000 W.
- ❖ Dos tanques de inercia, uno de 100 L, cuyo poder de calefactar o enfriar el agua de su interior depende de la bomba geotérmica y otro de 300 L donde su poder de calefactar o enfriar depende del tanque de inercia de 100 L y de las 3 bombas de calor.
- ❖ Suelo radiante con un aporte de calefacción de 60 W/m² y de refrigeración de 45 W/m².
- ❖ Unidad de Tratamiento de Aire que da soporte a la climatización de la ventilación junto con un recuperador de calor con baterías de calefacción y refrigeración.
- ❖ 2 Fancoils que dan soporte térmico a las zonas de Recepción, entrada y sala de espera.

El esquema del sistema de climatización que se aplica a la simulación se puede observar en la Figura 8.

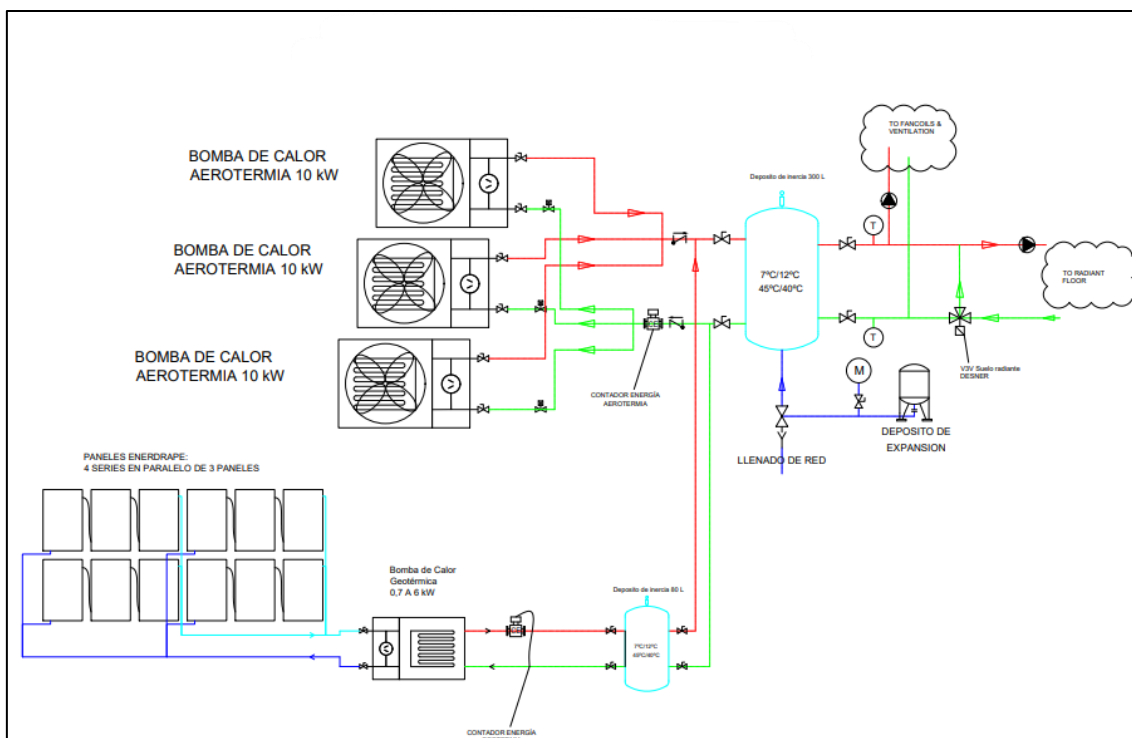


Figura 12: Por cortesía de Luis de Pereda. Esquema energético de la clínica

Los datos correspondientes a los distintos equipos de climatización, que será empleada para el dimensionamiento y configuración de los sistemas térmicos en el entorno de simulación del programa DesignBuilder.

3.2.1. Bomba de calor

En la Tabla 7 se recogen las características técnicas de la bomba de calor, extraídas directamente de la memoria del proyecto y complementadas con información obtenida en reuniones técnicas posteriores.

Bomba de calor	Especificaciones
Potencia de refrigeración	10 kW
Potencia de calefacción	10 kW
Consumo eléctrico	3,5 kW
COP	2,27
EER	2,62

Tabla 7: Especificaciones de la bomba de calor. Creación propia

3.2.2. Fancoils

En la Tabla 8 se recogen las características técnicas de los Fancoils, instalados en la sala de espera y recepción, extraídas directamente de la memoria del proyecto y complementadas con información obtenida en reuniones técnicas posteriores.

2 Fancoils	Especificaciones
Tipo	dos tubos
Potencia de frío	3,95 kW
Potencia en calefacción	3,65 kW
caudal nominal interior	700 m ³ /h

Tabla 8: Especificaciones de los Fancoils. Creación propia

3.2.3. Equipo de recuperación

En la Tabla 9 se recogen las características técnicas del recuperador, instalado en la unidad de tratamiento de aire (UTA), extraídas directamente de la memoria del proyecto y complementadas con información obtenida en reuniones técnicas posteriores.

Equipo recuperador	Especificaciones
Batería calefacción	4,8 kW
Batería refrigeración	5,9 kW
Ventilador	2000 m ³ /h

Tabla 9: Especificaciones del equipo de recuperación. Creación propia

3.2.4. Suelo radiante

En la Tabla 10 se recogen las características técnicas del suelo radiante, instalado en el suelo del emplazamiento, extraídas directamente de la memoria del proyecto y complementadas con información obtenida en reuniones técnicas posteriores.

Suelo Radiante	Especificaciones
Circuitos	20 a 25
Separación tubo	5 y 10 cm
Aporte refrigeración	45 W/m ²
Aporte calefacción	60 W/m ²

Tabla 10: Especificaciones del suelo radiante. Creación propia

3.2.5. Tanques de inercia

Se procede a la incorporación de dos tanques de inercia con el objetivo de garantizar la estabilidad térmica del sistema y optimizar el rendimiento de los equipos de generación.

- ❖ El primero es un tanque de 300 litro, conectado en producción a las bombas de calor y en demanda a los elementos climáticos del edificio (suelo radiante, Fancoils, etc.)
- ❖ El segundo es un tanque de 100 litros, específicamente conectado a la bomba de calor geotérmica.

3.2.6. Bomba de calor geotérmica

Se instala una bomba geotérmica de baja entalpía, ubicada en el sótano del edificio, con una potencia térmica útil de calefacción de 6 kW. Esta bomba se encuentra conectada a un campo geotérmico compuesto por paneles verticales de baja entalpía instalados en la

pared del sótano. Estas placas se modelizan en el programa DesignBuilder mediante los siguientes datos:

Características de la bomba de calor	Valores
Diámetro interior de tubo	0,01 m
Espaciamiento de los tubos	0,01 m
Número de circuitos	4
Longitud de la superficie	4,40 m
Ancho de la superficie	2,89 m

Tabla 11: Características de la bomba de calor geotérmica. Creación propia

3.2.7. Ventilación nominal

En la Tabla 12 se presentan los caudales nominales de ventilación asignados a cada una de las zonas de la clínica, expresados en m³/h como en m³/s. Estos valores han sido definidos con el objetivo de cumplir con los requisitos establecidos en la normativa técnica vigente en materia de ventilación. La conversión a m³/s ha sido realizada de forma manual, ya que el software DesignBuilder opera internamente con dicho sistema de unidades para los flujos de aire.

Ubicación en la clínica	Caudal nominal (m ³ /h)	Caudal nominal (m ³ /s)
Acceso Sótano	0	0,000
Anteaseo	0	0,000
Aseo señoras	0	0,000
Aseo señores	0	0,000
Aseo vestuario	0	0,000
Despacho 1	169	0,047
Despacho 2	169	0,047
Distribuidor	169	0,047
Entrada	300	0,083
Esterilización	200	0,056
Gabinete 1	200	0,056
Gabinete 2	200	0,056
Gabinete 3	200	0,056
Gabinete 4	169	0,047
Gabinete 5	200	0,056
Gabinete 6	200	0,056
Instalaciones	0	0,000
Office	200	0,056
Pasillo	169	0,047
Rack	100	0,028
Rayos	100	0,028
Recepción	169	0,047
Recuperación	169	0,047
Sala de espera	200	0,056
Vestíbulo	200	0,056
Sótano	0	0,000

Tabla 12: Caudales de la ventilación nominal. Creación propia

3.3. Horarios-Consigna de funcionamiento del sistema climático

Debido al método de recogida de información empleado, basado en datos extraídos de una plataforma web que remite datos a tiempo real de la instalación, únicamente ha sido posible acceder a los horarios correspondientes a los últimos cambios registrados, por ende, desde el momento de inicio de recogida de datos, se tiene registro de manera completa únicamente el mes de marzo, y es por ello, que la simulación se centrará en el mes mencionado.

Los horarios representados a continuación se visualizan mediante celdas codificadas por colores, en las que el color blanco indica apagado y el color verde indica encendido. Los equipos encargados de la climatización directa contarán con valores específicos de temperatura de consigna asignados por horario, mientras que para el resto de los elementos se les asignará una codificación binaria mediante los valores de TRUE o FALSE. En este esquema, un estado False impide el arranque del equipo, salvo que el

sistema de termine una necesidad térmica que requiera de su activación, en cuyo caso se cambiará a TRUE. Así, los dispositivos permanecerán apagados o encendidos en función de la demanda de climatización.

Este planteamiento responde al hecho de que el color verde representa el tiempo total disponible de funcionamiento durante el año, mientras que la lógica TRUE/FALSE permite al controlador del sistema de climatización interpretar la activación o no del equipo en cada franja horaria, según los requerimientos del modelo térmico

3.3.1. Horario consigna recuperador de calor

El horario representado en la Tabla 13, muestra unos valores que, pese a lo indicado anteriormente, no implica que el sistema de climatización pretenda alcanzar dicha temperatura. En realidad, estos valores actúan como referencia para la activación del recuperador de calor, cuya función depende de las condiciones del aire exterior y su relación con la consigna térmica establecida.

En modo calefacción, si la temperatura del aire exterior está por debajo de la consigna, el recuperador envía el flujo a través del conducto cruzado, aprovechando la recuperación térmica. Si, por el contrario, la temperatura antes de la unidad de tratamiento de aire (UTA), fijada en 19 °C para el mes de marzo, el flujo se redirige por el conducto de bypass directamente, sin recuperación.

En modo refrigeración, se aplica el criterio inverso, si la temperatura exterior está por encima de la consigna, se activa el conducto cruzado; de lo contrario, si está por debajo, pero próxima a la consigna, el flujo atraviesa el bypass.

Cabe señalar que el horario que se le asigna al recuperador de calor puede ser distinto al de la ventilación, aunque ambos sistemas están operativamente vinculados. Esto implica que, en caso de que el recuperador esté en consigna de funcionamiento, pero la ventilación no, el recuperador se apaga.

Horas/día	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes	Sábado	Domingo
1:00-5:00							
6:00-7:00	10 °C	10 °C	10 °C	10 °C	10 °C	10 °C	10 °C
8:00							
9:00-11:00	20 °C	20 °C	20 °C	20 °C	20 °C	20 °C	20 °C
12:00-13:00	19 °C	19 °C	19 °C	19 °C	19 °C	19 °C	19 °C
14:00-21:00	18,5 °C	18,5 °C	18,5 °C	18,5 °C	18,5 °C	18,5 °C	18,5 °C
23:00-0:00							

Tabla 13: Horario recuperador de calor. Creación propia

3.3.2. Horario consigna tanque de inercia 300 L

Tal como se ha expuesto en el apartado 3.3., los valores que figuran en el horario de la Tabla 14 corresponden a temperaturas de consigna establecidas por el sistema de control, las cuales han sido definidas como las más adecuadas para el correcto funcionamiento operativo del tanque de inercia. Estos valores no han sido seleccionados arbitrariamente, sino que forman parte de la lógica de regulación interna del equipo, respondiendo a criterios de eficiencia y estabilidad térmica durante el periodo simulado.

Horas/día	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes	Sábado	Domingo
1:00-6:00	45 °C	45 °C	45 °C	45 °C	45 °C	45 °C	45 °C
7:00-19:00	7 °C	7 °C	7 °C	7 °C	7 °C	45 °C	45 °C
20:00-0:00	45 °C	45 °C	45 °C	45 °C	45 °C	45 °C	45 °C

Tabla 14: Horario tanque de inercia de 300 L. Creación propia

3.3.3. Horario paneles de geotermia

Como se muestra en la Tabla 15, y tal como se ha explicado previamente, todos los horarios representados en color verde —que indican el estado encendido— están asociados al valor lógico TRUE. Esto implica que el sistema operará conforme a la programación horaria establecida mediante dicha codificación cromática, activándose automáticamente durante los periodos definidos en verde.

Horas/día	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes	Sábado	Domingo
1:00-6:00	TRUE	TRUE	TRUE	TRUE	TRUE	TRUE	TRUE
7:00							
8:00-20:00	TRUE	TRUE	TRUE	TRUE	TRUE	TRUE	TRUE
21:00							
22:00-0:00	TRUE	TRUE	TRUE	TRUE	TRUE	TRUE	TRUE

Tabla 15: Horario paneles de geotermia. Creación propia

3.3.4. Horario purga nocturna

Como se muestra en la Tabla 16, pese a estar en estado -encendido- de 6:00 a 7:00, y de 16:00 a 0:00, al tener asignado un -FALSE-, se tomará como apagado.

Horas/día	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes	Sábado	Domingo
1:00-5:00							
6:00-7:00	FALSE	FALSE	FALSE	FALSE	FALSE		
8:00-15:00							
16:00-0:00	FALSE	FALSE	FALSE	FALSE	FALSE		

Tabla 16: Horario purga nocturna. Creación propia

3.3.5. Horario ventilación mecánica

Como se muestra en la Tabla 17, aunque el sistema aparece en estado -encendido- entre las 10:00 y las 22:00, y a las 6:00 hasta las 7:00, al estar asociados a un valor lógico False, dichos periodos serán considerados como apagados, en la simulación. Esto responde a la lógica previamente descrita, en la que la condición TRUE/FALSE determina la activación efectiva del sistema, independientemente del horario potencial de funcionamiento.

Horas/día	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes	Sábado	Domingo
1:00-5:00							
6:00	FALSE	FALSE	FALSE	FALSE	FALSE		
7:00-9:00							
10:00-22:00	TRUE	TRUE	TRUE	TRUE	TRUE		
23:00-0:00							

Tabla 17: Horario ventilación. Creación propia

3.3.6. Horario Suelo radiante

Como se muestra en las Tablas 18 y 19, el sistema de control del suelo radiante se rige por una configuración binaria TRUE/FALSE, que determina la activación o desactivación del sistema en función del horario establecido. Esta lógica de funcionamiento se

diferencia entre los días laborables y los fines de semana, permitiendo así una gestión energética más eficiente.

Esta separación tiene como objetivo garantizar condiciones de confort adecuadas los lunes por la mañana, evitando que se generen grandes cargas térmicas al inicio de la jornada, lo cual podría dar lugar a periodos de discomfort térmico y un aumento puntual de la demanda energética.

Horas/día	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes	Sábado	Domingo
1:00-7:00	TRUE	TRUE	TRUE	TRUE	TRUE		
8:00-21:30							
21:30-0:00	TRUE	TRUE	TRUE	TRUE	TRUE		

Tabla 18: Horario suelo radiante entre semana. Creación propia

Horas/día	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes	Sábado	Domingo
0:00-11:00	TRUE	TRUE	TRUE	TRUE	TRUE		
12:00-14:00							
15:00-19:00	TRUE	TRUE	TRUE	TRUE	TRUE		
20:00-22:00							
23:00-0:00	TRUE	TRUE	TRUE	TRUE	TRUE		

Tabla 19: Horario suelo radiante fin de semana. Creación propia

3.3.7. Consignas límite de valores apertura de ventilación

Este subapartado aborda las consignas límite de apertura asignadas a los conductos de ventilación en cada una de las zonas del edificio que disponen de sistema de renovación de aire. En particular, las áreas de sala de espera, entrada y recepción cuentan, además, con una segunda consigna límite, correspondiente al funcionamiento de los fancoils instalados como sistema de apoyo a la climatización en dichas zonas. La combinación de ambas consignas permite optimizar la distribución del caudal de aire y ajustar el aporte térmico en función de la demanda específica de cada espacio.

Zonas/condición	Apertura máxima (%)	Apertura mínima (%)
Despacho 1	60	0
Despacho 2	100	0
Distribuidor	100	40
Esterilización	75	0
Gabinete 1	55	0
Gabinete 2	45	0
Gabinete 3	30	30
Gabinete 4	100	0
Gabinete 5	40	40
Gabinete 6	100	0
Office	50	0
Pasillo	100	40
Recepción	75	0
Recuperación	75	0

Tabla 20: Consigna de apertura límite de la ventilación. Creación propia

3.3.8. Consignas de apertura límite bypass

En este subapartado se introducen los valores límite de los conductos de bypass, tanto para los fancoils como para el sistema de suelo radiante, con el objetivo de delimitar la cantidad mínima o máxima de fluido que atraviesa los respectivos elementos de intercambio térmico. En el caso de los fancoils, el fluido en cuestión es el aire procedente del sistema de ventilación, mientras que en el suelo radiante se trata del agua del circuito hidráulico.

Ambos elementos se analizan de forma conjunta debido a las limitaciones tecnológicas propias de los sistemas con bypass, ya que, incluso cuando no se requiere climatización activa, una parte del fluido continúa circulando por el sistema. Este comportamiento implica que siempre existe una fracción residual de energía transferida, lo cual debe ser tenido en cuenta en el modelado energético para garantizar una representación precisa del comportamiento térmico real.

Condición/Valor	Porcentaje (%)
Apertura mínima bypass fancoils	15
Apertura máxima bypass fancoils	90
Apertura mínima bypass del suelo radiante	15
Apertura máxima bypass del suelo radiante	90

Tabla 21: Consigna de límite de apertura en fancoils y suelo radiante. Creación propia

3.3.9. Consignas ida suelo radiante

En este subapartado se establecen los valores límite de temperatura —tanto máxima como mínima— que deben mantenerse en los conductos del sistema de suelo radiante. Estos valores tienen como finalidad garantizar el correcto funcionamiento hidráulico del sistema, así como asegurar unas condiciones óptimas de confort térmico en los espacios climatizados. El control de estos umbrales resulta esencial para evitar tensiones térmicas en los materiales, prevenir condensaciones y optimizar la eficiencia del intercambio de calor entre el circuito y el ambiente interior.

Consigna ida suelo radiante	T (°C)
Max ida suelo radiante	42
Min ida suelo radiante	28

Tabla 22: Consigna límite de temperatura de suelo radiante. Creación propia

3.3.10. Consignas idas bombas de calor

En este subapartado se definen los límites de temperatura máxima y mínima del agua que circula desde las bombas de calor hacia los conductos de demanda térmica del edificio. Es importante señalar que la temperatura de impulsión del agua generada por la bomba de calor se sitúa, de forma intencionada, por encima de la temperatura de consigna del tanque de inercia de 300 L y del sistema de suelo radiante, dado que estos componentes representan los puntos de mayor exigencia térmica dentro del circuito. Esta configuración permite garantizar un suministro energético suficiente y mantener la estabilidad del sistema hidráulico, optimizando a su vez la eficiencia del proceso de climatización.

Consignas ida bombas calor	T (°C)
Máxima consigna calor	45
Mínima consigna calor	30
Máxima consigna frío	13
Mínima consigna frío	8,5

Tabla 23: Consigna límite temperatura de bomba de calor. Creación propia

3.3.11. Consignas diferenciales de arranque del fancoil

En este subapartado se define la diferencia de temperatura requerida entre la sala y la consigna térmica para activar el funcionamiento del fancoil. Esta condición de arranque se establece debido a que, en las zonas consideradas, la Unidad de Tratamiento de Aire

(UTA) y el suelo radiante no aportan por sí solos la potencia térmica suficiente para cubrir completamente la demanda de climatización. Por este motivo, los fancoils han sido configurados como elementos de apoyo, cuya activación se produce únicamente cuando la desviación respecto a la temperatura objetivo supera un umbral determinado, garantizando así una operación eficiente y ajustada a las necesidades reales del espacio.

Condición/Temperatura	T (°C)
Diferencial arranque invierno fancoil recepción	10
Diferencial arranque verano fancoil recepción	0,5
Diferencial arranque invierno fancoil sala de espera	10
Diferencial arranque verano fancoil sala de espera	0,5

Tabla 24: Consigna diferencial de fancoil en la recepción y sala de espera

3.3.12. Valores de ocupación

En este subapartado se abordan los valores de ocupación previstos para las distintas áreas del edificio, los cuales resultan fundamentales para su incorporación al modelo de simulación. Dichos valores permiten estimar con mayor precisión la carga interna de calor generada por los ocupantes —principalmente por radiación y convección térmica— así como la producción de dióxido de carbono (CO₂). La inclusión de este parámetro en el entorno de modelización de DesignBuilder permite obtener resultados más realistas y representativos del comportamiento térmico y de la calidad del aire interior en condiciones de uso habitual.

Clínica	Área	Ocupación
Zonas	Área (m ²)	Área suelo por persona (m ² /persona)
Acceso Sótano	9,23	6,71
Anteaseo	5,1	5,1
Aseo señoras	6,53	3
Aseo señores	4,67	3
Aseo vestuario	4,6	3
Despacho 1	7,51	10
Despacho 2	7,63	10
Distribuidor	43,1	6,8
Entrada	5,04	6,8
Esterilización	5,36	5,36
Gabinete 1	13,98	5
Gabinete 2	13,55	5
Gabinete 3	13,59	5
Gabinete 4	13,47	5
Gabinete 5	16,35	5
Gabinete 6	10,13	5
Instalaciones	7,52	7,52
Office	16,27	16,27
Pasillo	10,69	6,71
Rack	5	5
Rayos	7,21	7,21
Recepción	26,46	6
Recuperación	6,82	6,82
Sala de espera	31,41	6,8
Vestíbulo	5,78	5,78
Sótano	128,99	6,71

Tabla 25: Valores de ocupación y áreas de las zonas de la clínica. Creación propia

4. Metodología para Simulación energética de la instalación

4.1. Herramientas y software utilizados

4.1.1. Herramienta principal

La herramienta principal utilizada es Designbuilder versión 7.3.1 con el motor de cálculo EnergyPlus versión 9.4.

La cuenta de DesignBuilder con la que se desarrolla el proyecto es de nivel “Ingeniería Pro” como se muestra en la tabla 3, que mediante la licencia estudiante, permite tener todos los módulos con un precio reducido, con cambios en: Sin aporte de tutoriales que cuenta la versión original, prohibición en uso para proyectos profesionales, no permite generar el Excel correspondiente al LEED Minimum Energy Performance Calculator (MEPC), e incluye marcas de agua en las representaciones gráficas de visualización, simulación, CFD e iluminación.

PAQUETE/LICENCIA	MÓDULOS INCLUIDOS*	1 AÑO	2 AÑOS	3 AÑOS
Arquitectura	Visualización, Simulación, Iluminación Natural	1.175€	2.125€	3.000€
Arquitectura Plus	Visualización, Simulación, Iluminación Natural, Coste, Optimización	1.650€	2.975€	4.200€
Ingeniería Lite	Visualización, Simulación, Iluminación Natural, HVAC	1.525€	2.750€	3.900€
Ingeniería	Visualización, Simulación, Iluminación Natural, HVAC, LEED, Coste	1.925€	3.475€	4.900€
Ingeniería Plus	Visualización, Simulación, Iluminación Natural, HVAC, LEED, Coste, Optimización, Scripting	2.625€	4.725€	6.700€
Ingeniería Pro	Visualización, Simulación, Iluminación Natural, HVAC, LEED, Coste, Optimización, Scripting, CFD	3.925€	7.075€	10.000€

Tabla 26: Tipos de versiones comercializables de DesignBuilder(Comprar DesignBuilder, s. f.)

4.1.2. Herramientas complementarias

AUTOCAD: Se utiliza la herramienta para visualizar los planos de la clínica y generar una modelización 3D en DesignBuilder a partir de exportar un archivo BIN de AUTOCAD a DesignBuilder y poder ver los planos en este último.

deEPWaCSV: Programa que se utiliza para convertir un archivo climático con formato EPW a CSV, formato que Excel permite leer y de esta forma modificar el archivo mencionado.

Weather statistics and conversions: Programa que se instala junto a DesignBuilder y que se utiliza para traspasar un archivo climático con formato EPW al lector de archivos climáticos dentro del programa DesignBuilder.

Excel: Programa que se utiliza para trabajar con la información proveniente de DesignBuilder.

4.2.Descripción general de la metodología seguida

A continuación, se presenta una descripción detallada del proceso de construcción de la simulación en el programa DesignBuilder, acompañada de una explicación del proceso

de desarrollo e investigación seguido, así como de las limitaciones identificadas en el modelo.

La descripción se organiza en cuatro fases, tal como se representa en la Figura 13:

- ❖ Fase 1: Construcción del modelo tridimensional. Esta etapa incluye el diseño geométrico del edificio y la distribución espacial de los elementos arquitectónicos.
- ❖ Fase 2: Definición del “Sitio”. En esta fase se introducen los datos climáticos y geográficos correspondientes a la ubicación real de la clínica, así como los parámetros específicos del entorno inmediato, tales como orientación, altitud, condiciones solares y sombreado urbano.
- ❖ Fase 3: Configuración del “Edificio 1”. Se detallan los aspectos relativos a la actividad de uso, los cerramientos térmicos, aberturas, sistemas de iluminación, sistemas HVAC, generación de cargas internas y los parámetros económicos necesarios para el análisis de consumo y coste energético.
- ❖ Fase 4: Descripción del sistema HVAC. En esta última etapa se expone con profundidad el modelo energético, especificando la lógica de funcionamiento, el control de consignas, los perfiles horarios, los equipos de producción térmica, distribución y emisión, así como su integración en el entorno de simulación.

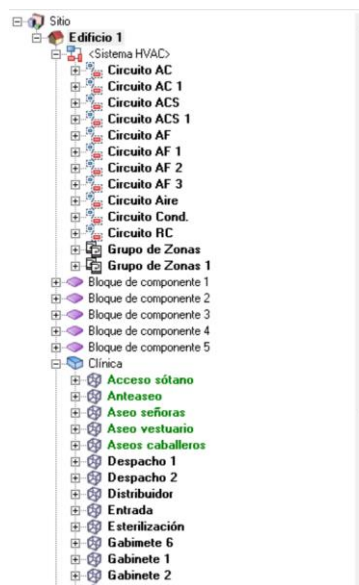


Figura 13: Árbol descriptivo. Creación propia en el programa DesignBuilder

4.2.1. Diseño tridimensional de la clínica en DesignBuilder

La construcción del modelo tridimensional de la clínica constituye una de las fases más laboriosas y prolongadas del proyecto, debido a la complejidad y limitaciones operativas que presenta el entorno gráfico del software. Este proceso se inicia a partir de los planos arquitectónicos en formato DWG, un estándar ampliamente utilizado y compatible con herramientas de diseño como AutoCAD.

Desde AutoCAD, se procede a la selección de las capas relevantes, limitándose únicamente a aquellas que contienen las delimitaciones espaciales de las zonas y las medidas geométricas necesarias para la reconstrucción del modelo. Una vez filtradas las capas de interés, se utiliza la función de exportación para generar un archivo en formato DXF, el cual ofrece una mayor compatibilidad con el entorno de modelado de DesignBuilder.

El archivo DXF se importa posteriormente en DesignBuilder como un dibujo en 2D, tal como se muestra en la Figura 14, permitiendo su visualización y uso como plantilla base para la recreación tridimensional del edificio. Esta técnica permite trazar con mayor precisión las superficies, volúmenes y particiones necesarias para definir correctamente la geometría del modelo energético.

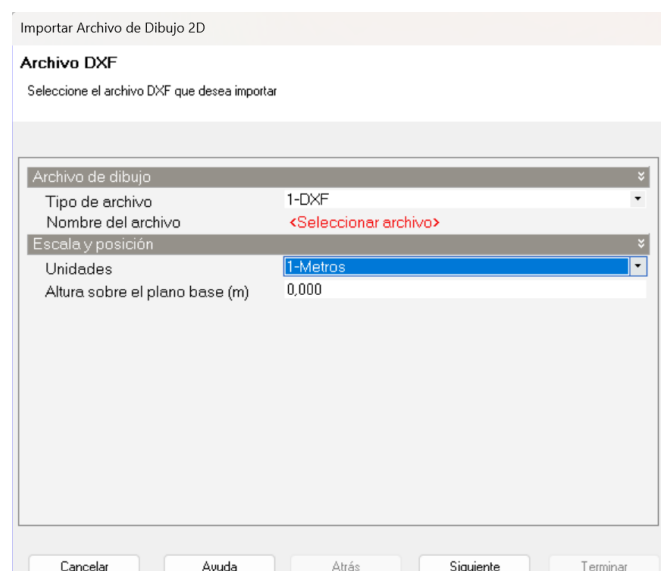


Figura 14: Selector de dibujo en 2D. Creación propia en el programa DesignBuilder

Una vez importado el plano en formato DXF, se procede a trazar el modelo geométrico siguiendo las líneas guía mediante la herramienta "dibujar bloque de componente" de DesignBuilder. Esta fase resulta especialmente tediosa debido a una característica

estructural del software: al definir una pared, DesignBuilder considera que la línea dibujada representa el eje central del cerramiento, es decir, el centro de masas del muro

Este criterio de interpretación no se corresponde con la convención habitual en planos arquitectónicos, donde las paredes se representan por sus líneas exteriores, lo que genera una desviación en el alineamiento si no se ajusta previamente el plano. Por este motivo, resulta necesario reconstruir las líneas centrales de cada cerramiento en AutoCAD antes de la exportación, o bien corregir manualmente las posiciones dentro del entorno de DesignBuilder, lo cual incrementa significativamente el tiempo de modelado.

Una vez finalizada la construcción del volumen general del edificio, se procede a definir la distribución interior utilizando la herramienta "dibujar particiones", con la que se trazan los tabiques que separan las distintas zonas térmicas. Tras completar el trazado de todas las particiones y asignar una altura estándar de 3,5 metros, se obtiene la geometría tridimensional definitiva del modelo, lista para la asignación de materiales y sistemas.



Figura 15: Desarrollo tridimensional de la clínica. Creación propia en el programa DesignBuilder

Las líneas amarillas que separan la sala de espera, la recepción y la entrada han sido incorporadas como divisiones virtuales, con el propósito de definir subzonas climáticas independientes dentro del modelo. Esta segmentación resulta necesaria para poder asignar sistemas de climatización específicos y calcular de forma diferenciada las demandas térmicas en cada área.

Es importante señalar que el programa DesignBuilder interpreta estas delimitaciones amarillas como particiones no físicas, es decir, sin cerramiento constructivo real, lo que implica que no existe resistencia térmica ni barrera al flujo de aire entre las zonas contiguas. Este recurso permite modelar espacios abiertos o conectados visualmente, manteniendo al mismo tiempo la flexibilidad necesaria para la simulación energética y de control independiente por zonas.

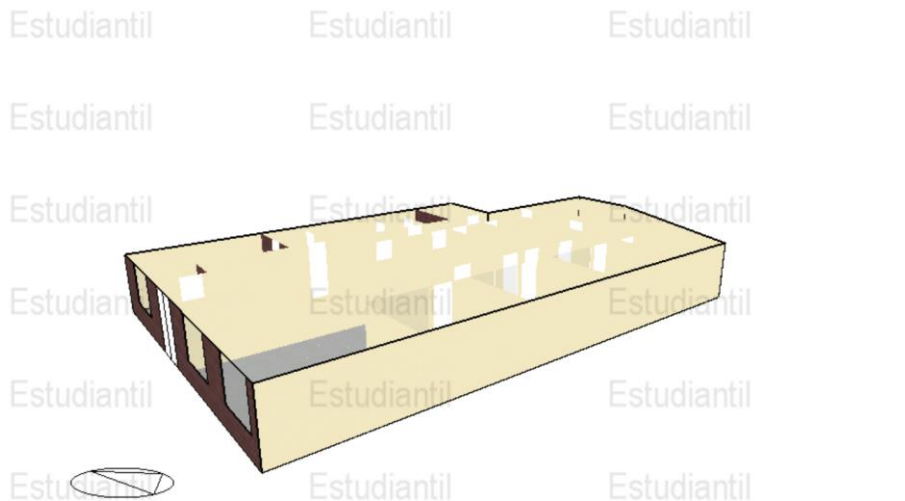


Figura 16: Vista renderizada de la clínica. DesignBuilder

Una vez finalizada la modelización de la clínica en superficie, se repiten los mismos procedimientos para la construcción del sótano, siguiendo las fases previamente descritas: importación del plano base, trazado de bloques, definición de particiones interiores y asignación de alturas. El resultado obtenido tras este proceso se muestra a continuación, representando con precisión la disposición espacial del ala subterránea, que alberga elementos clave del sistema geotérmico y del equipamiento técnico de climatización.

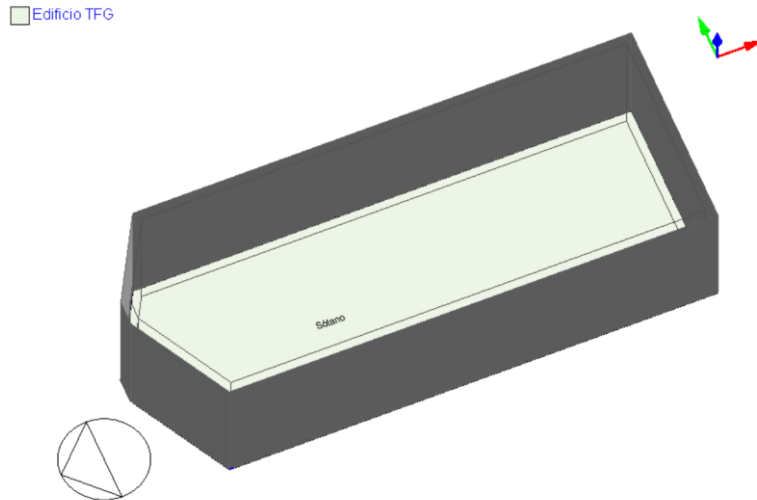


Figura 17: Desarrollo tridimensional del sótano. DesignBuilder

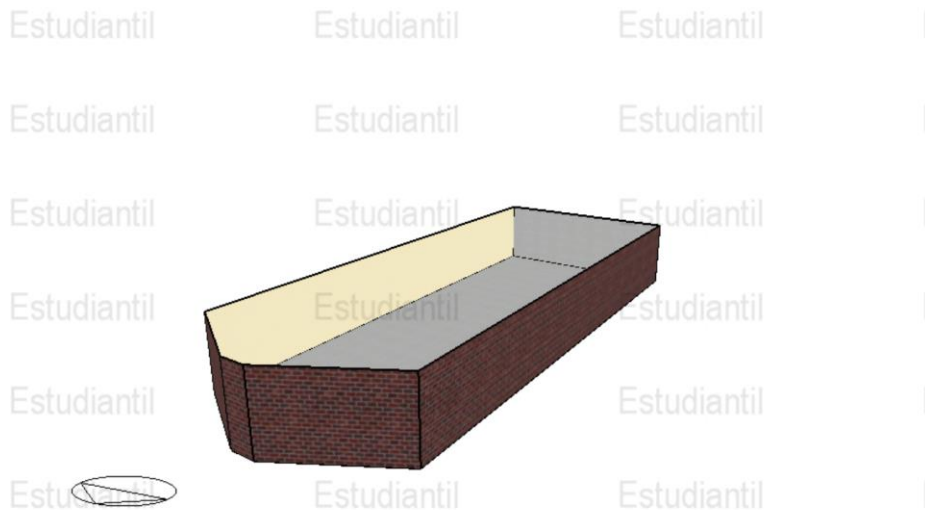


Figura 18: Figura 35: Vista renderizada del sótano. DesignBuilder

Una vez finalizada la construcción del modelo correspondiente a la planta superior de la clínica y al sótano, se procede a la creación de las plantas superiores y de las edificaciones adyacentes, con el fin de garantizar una simulación precisa de las sombras proyectadas y de las velocidades del viento que afectan al entorno inmediato.

Este proceso se lleva a cabo utilizando la misma herramienta empleada para la creación del modelo de la clínica, con la particularidad de que, en este caso, se selecciona la opción "bloque de contorno" dentro de la herramienta "dibujar bloque de componente". Esta funcionalidad permite generar estructuras que interactúan con los cálculos de radiación

solar y dinámica del aire, pero que no interfieren en otros aspectos de la simulación, como las cargas térmicas o los flujos internos de energía.

Para definir con precisión la geometría de las construcciones colindantes, se ha recurrido a la información disponible en el catastro urbano, tal como se muestra en la Figura 12. Mediante la herramienta de medición de distancias de la plataforma catastral, y tomando como referencia las esquinas del edificio de la clínica, se ha procedido a trazar las edificaciones cercanas y el volumen general del edificio envolvente, tal como se representa en la Figura 19.

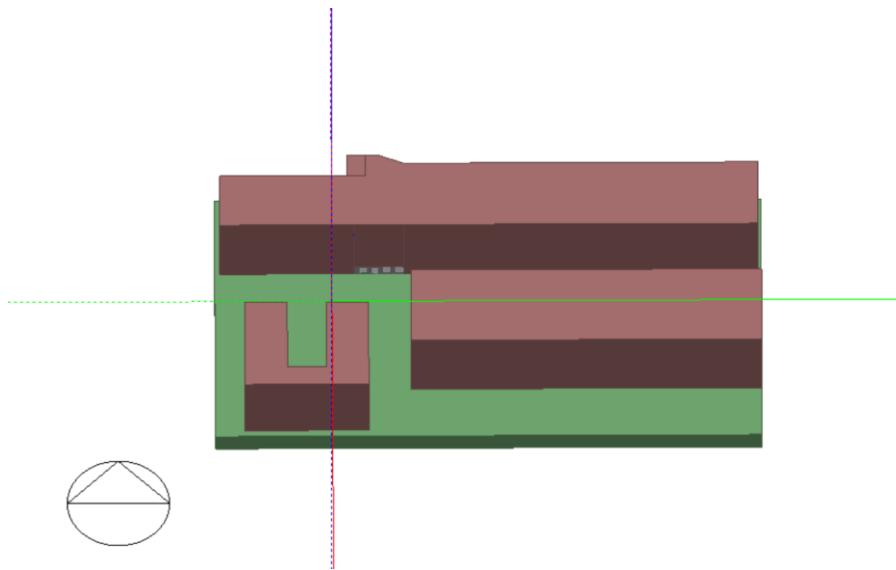


Figura 19: Desarrollo tridimensional del barrio. Creación propia en el programa DesignBuilder

Una vez completado el trazado de los edificios adyacentes, se da por finalizado el proceso de construcción tridimensional del modelo. A partir de este punto, el entorno geométrico queda plenamente definido, permitiendo avanzar hacia las siguientes fases del modelado energético y la configuración de los sistemas de simulación en DesignBuilder, a excepción de las características de transmitancia térmica de los cerramientos, suelos, paredes y techos, que serán definidas en fases posteriores del proyecto.

4.2.2. Descripción de “Sitio”

En el presente subapartado, correspondiente a la descripción del sitio, se detallarán los datos introducidos en los apartados “Datos de sitio” y “Datos de región” dentro del entorno de trabajo de DesignBuilder. Esta información constituye el punto de partida para la modelización energética del edificio, ya que define las condiciones geográficas,

climáticas y de entorno urbano sobre las que se estructurará el comportamiento térmico del modelo.

4.2.2.1. Datos del sitio

La "plantilla de sitio" utilizada, tal como se muestra en la Figura 20, se basa en los datos predeterminados de la estación meteorológica MADRID/BARAJAS, lo que permite al programa DesignBuilder asignar automáticamente la zona climática ASHRAE 3C. Esta clasificación, definida por el estándar ASHRAE, segmenta el planeta en regiones climáticas con características similares, facilitando así la selección de parámetros coherentes para el análisis energético.

Dado que la ubicación exacta de la clínica es privada y no puede ser compartida, se ha optado por utilizar la latitud y longitud de MADRID/BARAJAS (40,45° N, -3,55° O), junto con su altitud sobre el nivel del mar (582 m) y una presión atmosférica estándar de 94,5 kPa, como referencia para establecer las condiciones iniciales del emplazamiento.



Figura 20: Carpetas de datos en Datos del sitio. Creación propia en el programa DesignBuilder



Figura 21: Carpeta de Ubicación. Creación propia en el programa DesignBuilder

Los "Detalles de Sitio", representados en la Figura 22, se han mantenido con los valores estandarizados correspondientes a la localización de MADRID/BARAJAS. Dado que no se han realizado modificaciones específicas sobre estos parámetros, y que su

configuración responde a los valores por defecto del programa, no se abordarán en profundidad en el presente proyecto.

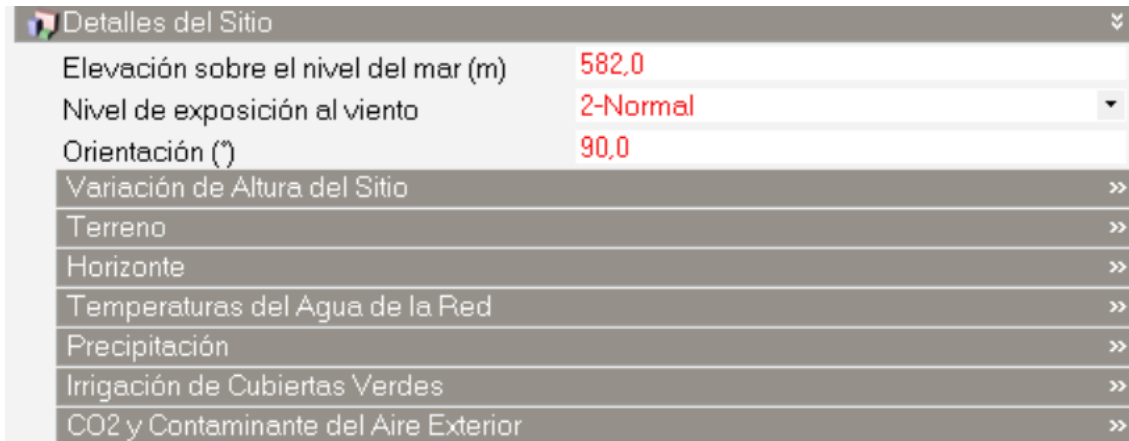


Figura 22: Carpeta de Detalles de sitio. Creación propia en el programa DesignBuilder

En el apartado “Hora y horario de verano” se ha seleccionado la zona horaria GMT +1, correspondiente al horario oficial utilizado en España. Esta configuración garantiza la correcta alineación temporal de los perfiles horarios de ocupación, climatización e iluminación durante la simulación energética.



Figura 23: Carpeta de Hora y Horario de Verano. Creación propia en el programa DesignBuilder

Los “datos climáticos para la simulación”, representados en la Figura 24, constituyen uno de los elementos de mayor relevancia en la configuración del modelo energético. Para esta simulación se ha utilizado el archivo climático ESP_Madrid.082210_IWEC_modificadoEPW, descargado desde un repositorio gratuito

de datos climáticos en formato EPW, ampliamente compatible con el entorno de EnergyPlus y, por tanto, con DesignBuilder.

El objetivo de utilizar este archivo modificado es aumentar la precisión de la simulación, integrando en él los valores reales de humedad y temperatura exterior registrados en la propia instalación. Para ello, se ha empleado el programa “deEPWaCSV”, que permite extraer, editar y volver a compilar archivos climáticos en formato EPW a partir de hojas de cálculo personalizadas. Esta personalización garantiza una mayor fidelidad entre el entorno simulado y las condiciones reales del emplazamiento durante el mes analizado.



Figura 24: Capeta de Datos Climáticos para Simulación. Creación propia en el programa DesignBuilder

Se emplea el formato CSV debido a que Microsoft Excel permite su lectura y edición de forma directa, lo que facilita la modificación del archivo climático. Al abrir el archivo en Excel, se visualizan múltiples columnas de datos, tal como se muestra en la Figura 25. Sin embargo, únicamente aquellos campos precedidos por un asterisco (*) son los que DesignBuilder puede procesar y modificar correctamente.

En esta simulación, los parámetros editados son la temperatura seca del aire (T_{seca} , °C), cuyos valores han sido extraídos y coinciden con los representados en la Figura 75, y la humedad relativa (HR, %), cuyos valores corresponden a los indicados en la Figura 76.

Una vez realizada la edición de los datos de interés, el archivo se guarda y se vuelve a importar en el programa deEPWaCSV, utilizando la opción “CSV a EPW”, como se ilustra en la Figura 41, para recompilar el archivo climático en un formato compatible con el motor de simulación de EnergyPlus.

Año	*Mes	*Día	*Hora	*Minuto	Origen de dat	*Tseca(°C)	*Trociolo(°C)	*HR(%)	*Patm(Pa)	RadHorExtrat	RadNorExtrat	*RadInfrCielc	RadGloHor(W	*RadDirNor(W	*Rac
1994	1	1	1	1	60 C9C9C9C9*(	9,2	7,4	85	95700	0	1415	299	0	0	0
1994	1	1	1	2	60 C9C9C9C9*(	8,4	6,9	82	95700	0	1415	298	0	0	0
1994	1	1	1	3	60 C9C9C9C9*(	8,4	6,2	80	95700	0	1415	291	0	0	0
1994	1	1	1	4	60 C9C9C9C9*(	8,2	5,4	77	95700	0	1415	289	0	0	0
1994	1	1	1	5	60 C9C9C9C9*(	7,8	4,6	75	95700	0	1415	292	0	0	0
1994	1	1	1	6	60 C9C9C9C9*(	7,2	3,7	73	95700	0	1415	293	0	0	0
1994	1	1	1	7	60 A7A7E8E8*0'	6,8	1	66	95700	0	1415	285	0	0	0
1994	1	1	1	8	60 B8C8E8B8*0'	6,6	1,1	65	95800	0	1415	289	0	0	0
1994	1	1	1	9	60 B8C8E8B8*0'	6,2	1,3	64	95900	10	1415	293	2	0	0
1994	1	1	1	10	60 A7A7E8E8*0I	6,7	1,4	63	96000	182	1415	297	20	0	0
1994	1	1	1	11	60 B8C8E8B8*0'	9,2	3,6	67	96000	377	1415	302	126	68	0
1994	1	1	1	12	60 B8C8E8B8*0'	10,3	5,5	70	95900	522	1415	308	263	268	0
1994	1	1	1	13	60 A7A7E8E8*0I	11,3	7,2	72	95900	608	1415	312	368	520	0
1994	1	1	1	14	60 B8C8E8B8*0'	11,5	5,7	65	95900	627	1415	312	352	415	0
1994	1	1	1	15	60 B8C8E8B8*0'	11,3	4,1	57	95800	579	1415	311	271	211	0
1994	1	1	1	16	60 A7A7E8E8*0I	11,7	2,3	49	95800	467	1415	306	152	32	0
1994	1	1	1	17	60 B8C8E8B8*0'	11,5	3,4	56	95800	299	1415	304	105	85	0
1994	1	1	1	18	60 B8C8E8B8*0'	10,9	4,4	63	95900	88	1415	301	20	0	0
1994	1	1	1	19	60 A7A7E8E8*0'	10,7	5,3	72	95900	0	1415	299	0	0	0
1994	1	1	1	20	60 A7A7E8E8*0'	10,8	4	66	95900	0	1415	296	0	0	0
1994	1	1	1	21	60 B8C8E8B8*0'	11,4	4,8	74	95900	0	1415	294	0	0	0
1994	1	1	1	22	60 B8C8E8B8*0'	11,2	4,5	76	95900	0	1415	295	0	0	0
1994	1	1	1	23	60 B8C8E8B8*0'	10,8	4,3	78	95900	0	1415	292	0	0	0

Figura 25: Archivo climático ESP_Madrid.082210_IWEC_modificadoEPW en Excel. Creación propia en el programa Excel

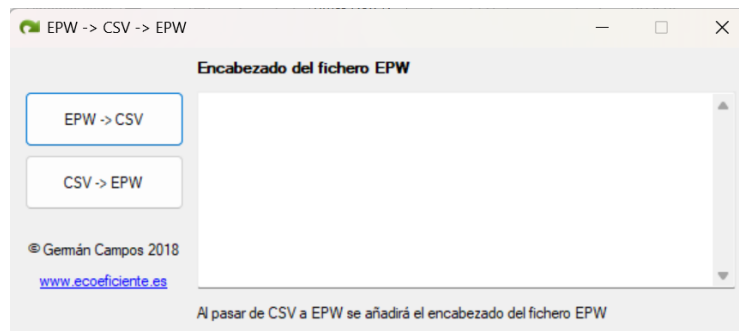


Figura 26: Interfaz de programa deEPWaCSV. Creación propia

Una vez obtenido el archivo climático modificado en formato EPW, este se introduce en el programa Weather Statistics and Conversion, tal como se muestra en la Figura 27, con el fin de preprocesarlo para su correcta integración en DesignBuilder. Este paso es necesario para que el software reconozca y registre el archivo como válido dentro de su sistema de gestión climática.

Finalizado este proceso, el archivo queda disponible en el apartado “Datos climáticos horarios”, donde puede visualizarse el nombre del archivo EPW modificado. A partir de este momento, los valores personalizados de temperatura y humedad exterior quedan

integrados en la simulación, garantizando una mayor precisión en el análisis energético del modelo.

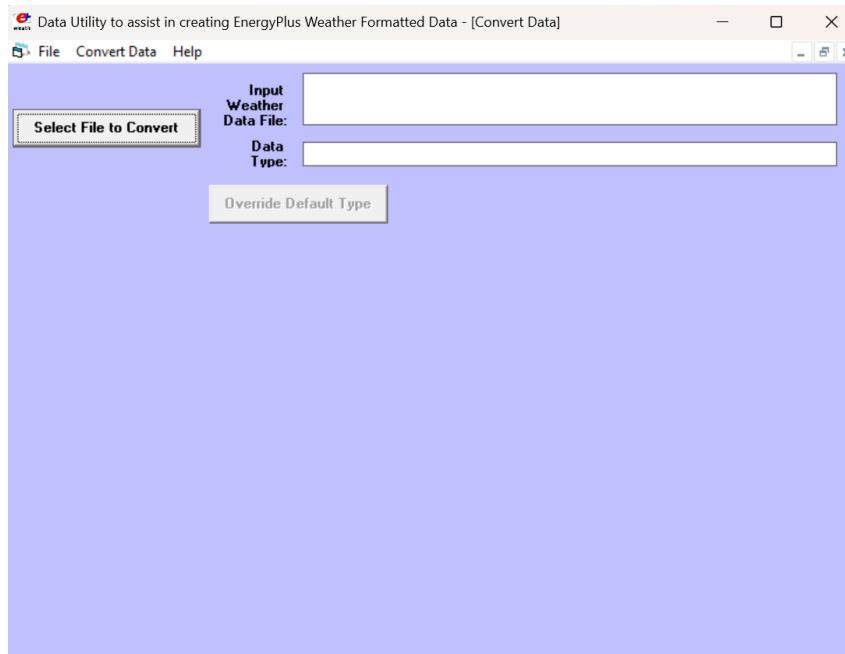


Figura 27: Interfaz del programa Weather statistics and conversion. Creación propia

4.2.2.2. Datos de Región

Los datos de región hacen referencia a parámetros de carácter legislativo relacionados con las opciones de certificación energética que el programa DesignBuilder permite generar de forma automática. No obstante, dado que este aspecto no forma parte del alcance del presente trabajo, no se profundizará en su configuración ni en su uso. Los tipos de certificados disponibles y opciones intraducibles pueden consultarse en la Figura 28.



Figura 28: Carpetas de Región Legislativa. Creación propia en el programa DesignBuilder

4.2.3. Descripción de “edificio 1”

Para comprender en mayor profundidad este subapartado, es importante precisar la lógica con la que se estructuran e implementan los datos en el modelo. Tal como se observa en la Figura 29, toda información introducida en el nivel de “Sitio” se propaga de forma descendente (aguas abajo) hacia todos los niveles inferiores del modelo, incluyendo plantas, zonas y habitaciones.

No obstante, si se introduce un cambio específico en una habitación concreta o en la configuración general de la clínica, dicho ajuste se convierte en dominante y, por lo tanto, modifica nuevamente la propagación descendente, sobrescribiendo los valores anteriores. Esta jerarquía de herencia de datos resulta fundamental para entender el comportamiento del modelo y garantizar la coherencia de los parámetros asignados durante el proceso de simulación.

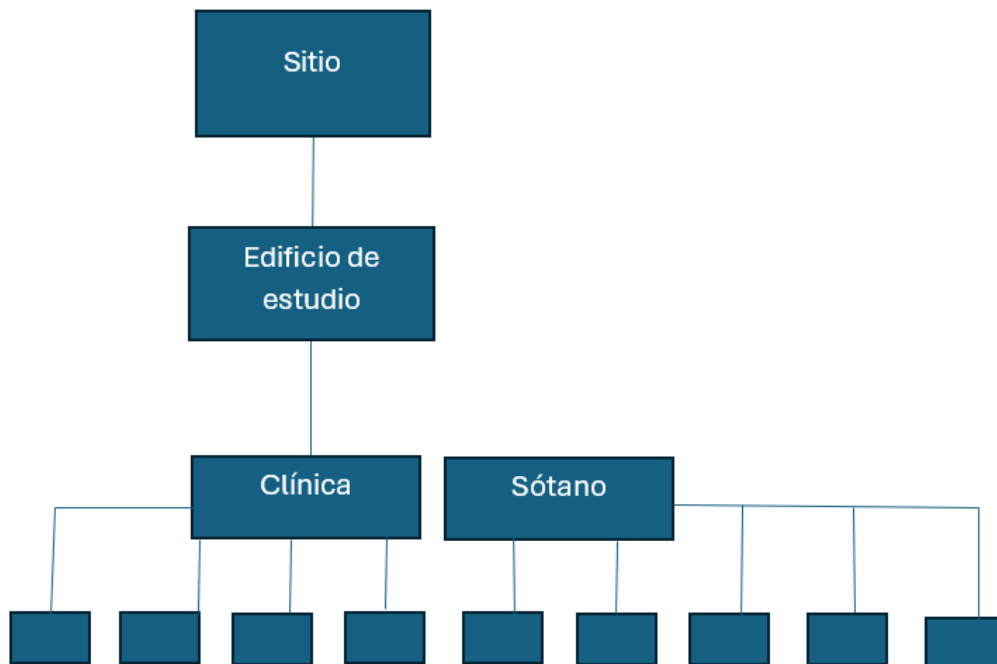


Figura 29: Esquema de asignación de dato. Creación propia

Este esquema jerárquico de introducción de datos será de especial relevancia en fases posteriores del proyecto, ya que ciertos parámetros, como la ocupación o los equipos de oficina, varían considerablemente en función del uso específico de cada habitación. En estos casos, si se consulta el parámetro desde el nivel superior (Edificio de estudio), es

posible que aparezca desmarcado o sin definir, ya que su configuración se realiza a nivel de zona o habitación.

A continuación, se abordarán desde su subapartado correspondiente los siguientes parámetros clave que intervienen en la modelización energética del edificio:

- ❖ Actividad
- ❖ Cerramientos
- ❖ Aberturas
- ❖ Iluminación
- ❖ HVAC

4.2.3.1. Actividad

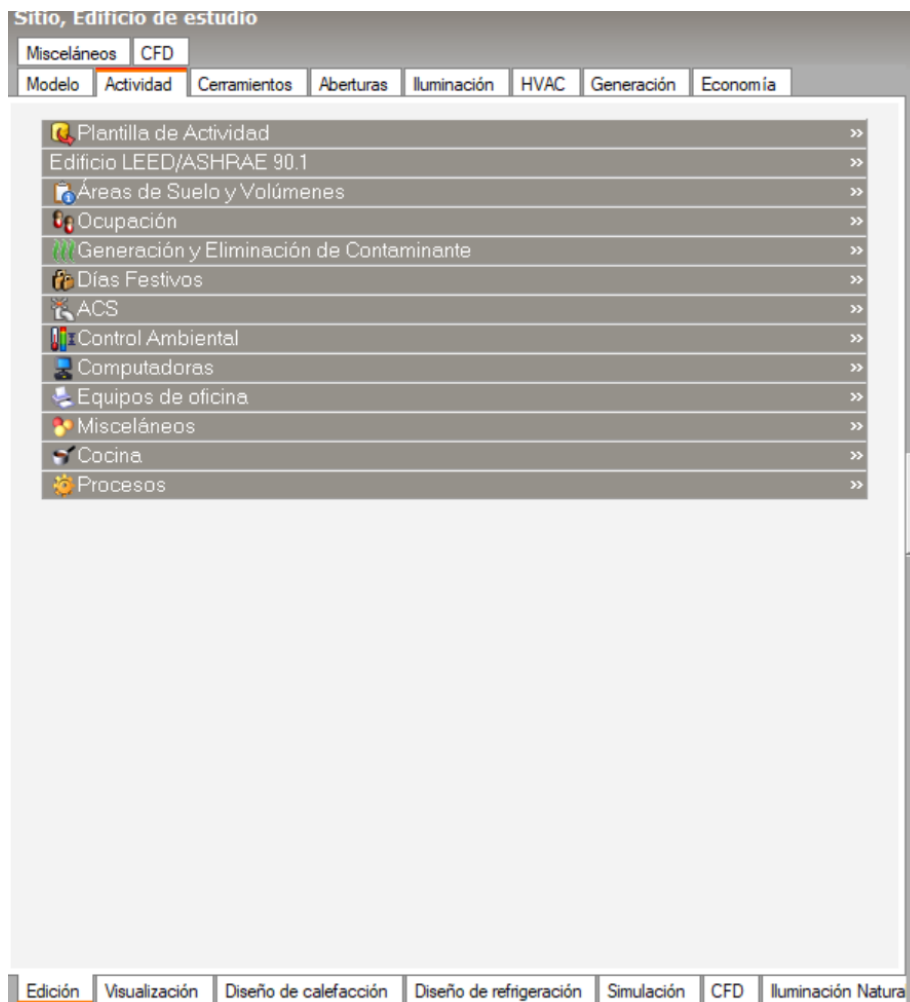


Figura 30: Carpeta de actividad. Creación propia en el programa DesignBuilder

Partiendo de la Figura 30, se identifican las subcarpetas que serán editadas de forma general para todas las zonas del modelo, aplicando configuraciones comunes en función de los criterios establecidos para la simulación energética. Estas subcarpetas son las siguientes:

- ❖ Plantilla de actividad
- ❖ Edificio LEED/ASHRAE 90.1
- ❖ Áreas de suelos y volúmenes
- ❖ Generación y eliminación de contaminantes
- ❖ Días festivos
- ❖ Agua caliente sanitaria (ACS)
- ❖ Control ambiental
- ❖ Procesos
- ❖ Cocina
- ❖ Misceláneo

Por otro lado, existen determinados parámetros cuya configuración se realiza de forma específica para cada zona o habitación, debido a su variabilidad en función del uso del espacio. Estos serán presentados en formato tabular y corresponden a las siguientes subcarpetas:

- ❖ Ocupación
- ❖ Computadoras
- ❖ Equipos de oficina

Plantilla de actividad

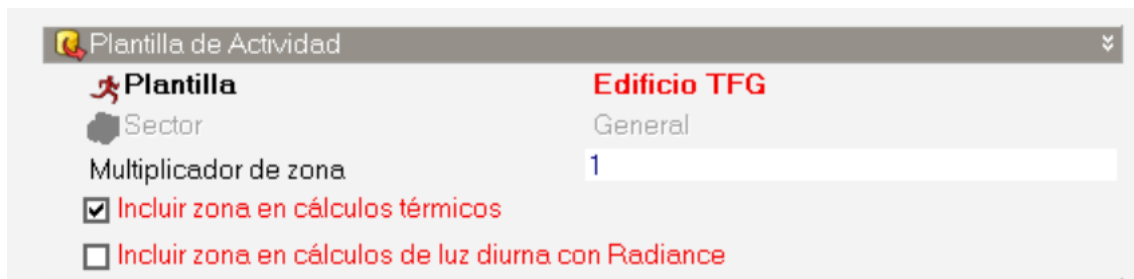


Figura 31: Carpeta de plantilla de actividad. Creación propia en DesignBuilder

En la Figura 31 se muestran los diferentes apartados que conforman la Plantilla de Actividad en el entorno de modelado de DesignBuilder. Dentro de estos, la opción

“Incluir zona en cálculos de luz diurna con Radiance” no se aborda ni se tiene en cuenta en el presente proyecto, ya que no forma parte del objeto de estudio.

Por otro lado, la casilla “Incluir zona en cálculos térmicos” sí es utilizada, y su función, como indica su denominación, consiste en designar la zona como parte activa del cálculo térmico del modelo. Es importante tener en cuenta que, si en el esquema de HVAC —que se desarrollará en apartados posteriores— se incluye una zona que no tiene esta casilla activada, o si se omite una zona que sí la tiene activada, el programa emitirá un mensaje de advertencia al intentar ejecutar la simulación. Esta función actúa como un control de coherencia para evitar errores de asignación en la modelización energética.

Clinica	Zona incluida en cálculos térmicos
Acceso Sótano	NO
Anteaseo	NO
Aseo señoras	NO
Aseo señores	NO
Aseo vestuario	NO
Despacho 1	SI
Despacho 2	SI
Distribuidor	SI
Entrada	SI
Esterilización	SI
Gabinete 1	SI
Gabinete 2	SI
Gabinete 3	SI
Gabinete 4	SI
Gabinete 5	SI
Gabinete 6	SI
Instalaciones	NO
Office	SI
Pasillo	SI
Rack	SI
Rayos	SI
Recepción	SI
Recuperación	SI
Sala de espera	SI
Vestíbulo	SI
Sótano	NO

Tabla 27: Clasificación de zonas según su inclusión en los cálculos térmicos. Creación propia

La Tabla 27 indica qué zonas del edificio han sido incluidas en los cálculos térmicos del modelo. En el entorno del programa, estas zonas aparecen identificadas con su nombre

en color negro, mientras que las zonas marcadas en verde representan aquellas excluidas del cálculo térmico.

La decisión de excluir el sótano responde al hecho de que este no dispone de un sistema de climatización activo, por lo que su inclusión en el esquema HVAC no resulta operativamente relevante. No obstante, cabe señalar que esta zona sí se ve afectada por otros parámetros del modelo, como la ocupación, la transferencia térmica con otras zonas y la influencia de condiciones ambientales exteriores, aspectos que siguen siendo considerados en la simulación global.

4.2.3.2. Edificio LEED/ASHRAE 90.1

Edificio LEED/ASHRAE 90.1	
Tipo de edificio	1-Propuesto
Categoría de condición primaria	1-No residencial
Fuente de energía para calefacción	2-Electricidad y otras
🔦 Categoría de iluminación	Hospital - Patient Room
🏠 Definición de suelo	Floor 1

Figura 32: Carpeta de Edificio LEED/ASHRAE 90.1. Creación propia en DesignBuilder

La carpeta de contenido mostrada en la Figura 32 ha sido completada con los valores predeterminados del programa DesignBuilder. No obstante, esta información no reviste relevancia para el presente proyecto, ya que no se llevará a cabo un análisis conforme a los estándares LEED o ASHRAE 90.1. Por tanto, no se profundizará en su contenido ni se considerará en las fases posteriores de la simulación.

4.2.3.3. Áreas de Suelo y Volúmenes

Áreas de Suelo y Volúmenes	
Rotación del edificio (°)	0,0
Condicionado/No acondicionado	
Área de suelo acondicionado (m²)	262,6
Volumen acondicionado (m³)	919,2
Área de suelo no acondicionado (m²)	166,6
Volumen no acondicionado (m³)	796,2
Ocupado/Desocupado	
Área de suelo ocupado (m²)	429,3
Volumen ocupado (m³)	1715,4
Área de suelo desocupado (m²)	0,0
Volumen desocupado (m³)	0,0

Figura 33: Carpeta de Áreas de suelo y Volúmenes. Creación propia en DesignBuilder

Los valores que se muestran en la Figura 33 han sido generados automáticamente por el programa, en función del modelo tridimensional construido. No obstante, con el objetivo de aumentar la precisión del modelo, se han introducido manualmente las áreas y volúmenes reales de cada una de las zonas, tal como se recoge en la Tabla 28. Esta decisión responde a la detección de pequeñas discrepancias entre los valores calculados por defecto y los datos reales obtenidos a partir de la documentación técnica del proyecto.

Clínica	Área (m ²)	Volumen (m ³)
Acceso Sótano	9,2	45,2
Anteaseo	5,1	25,0
Aseo señoras	6,5	32,0
Aseo señores	4,7	22,9
Aseo vestuario	4,6	22,5
Despacho 1	7,5	36,8
Despacho 2	7,6	37,4
Distribuidor	43,1	211,2
Entrada	5,0	24,7
Esterilización	5,4	26,3
Gabinete 1	14,0	68,5
Gabinete 2	13,6	66,4
Gabinete 3	13,6	66,6
Gabinete 4	13,5	66,0
Gabinete 5	16,4	80,1
Gabinete 6	10,1	49,6
Instalaciones	7,5	36,8
Office	16,3	79,7
Pasillo	10,7	52,4
Rack	5,0	24,5
Rayos	7,2	35,3
Recepción	26,5	129,7
Recuperación	6,8	33,4
Sala de espera	31,4	153,9
Vestíbulo	5,8	28,3
Sótano	129,0	632,1

Tabla 28: Áreas y volúmenes físicos y/o reales de la clínica. Creación propia

4.2.3.4. Ocupación

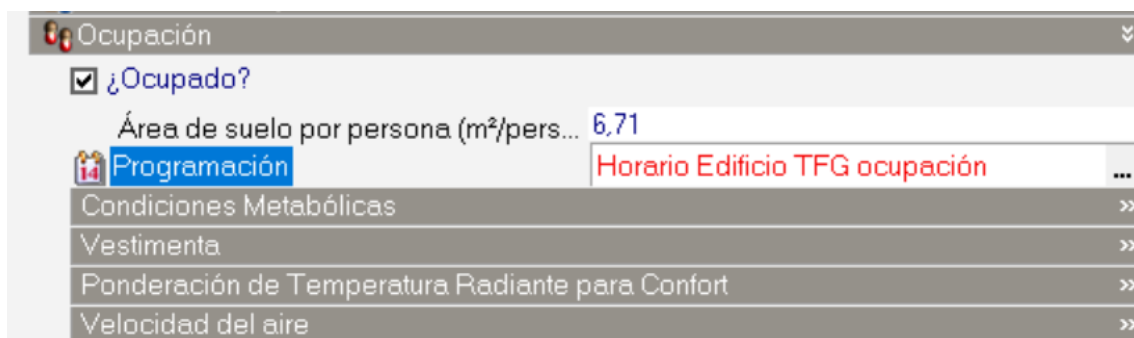


Figura 34 Carpeta de ocupación. Creación propia en DesignBuilder

En este subapartado se abordarán diversas carpetas de configuración relacionadas con la ocupación y el confort térmico. Los apartados de Ocupación, Condiciones metabólicas y Vestimenta serán tratados de forma individualizada por zona, y sus valores se presentan

en la Tabla 29 y 30 a continuación. Estos datos han sido establecidos según la memoria del proyecto, garantizando la coherencia entre la modelización y la realidad operativa del edificio.

Por otro lado, los parámetros correspondientes a “Ponderación de temperatura radiante para confort” y “Velocidad del aire” no serán objeto de análisis en este trabajo. En consecuencia, dichos valores se mantendrán en su configuración predeterminada, tal como aparece por defecto en el entorno de DesignBuilder.

Clinica	Área	Ocupación
Zonas	Área (m ²)	Área suelo por persona (m ² /persona)
Acceso Sótano	9,23	6,71
Anteaseo	5,1	5,1
Aseo señoras	6,53	3
Aseo señores	4,67	3
Aseo vestuario	4,6	3
Despacho 1	7,51	10
Despacho 2	7,63	10
Distribuidor	43,1	6,8
Entrada	5,04	6,8
Esterilización	5,36	5,36
Gabinete 1	13,98	5
Gabinete 2	13,55	5
Gabinete 3	13,59	5
Gabinete 4	13,47	5
Gabinete 5	16,35	5
Gabinete 6	10,13	5
Instalaciones	7,52	7,52
Office	16,27	16,27
Pasillo	10,69	6,71
Rack	5	5
Rayos	7,21	7,21
Recepción	26,46	6
Recuperación	6,82	6,82
Sala de espera	31,41	6,8
Vestíbulo	5,78	5,78
Sótano	128,99	6,71

Tabla 29: Tabla de Ocupación por zonas. Creación propia

La Tabla 29 hace referencia a las carpetas de Ocupación y Actividad del modelo. En ella se recogen los valores máximos de ocupación para cada una de las zonas de la clínica, conforme a lo establecido en la memoria del proyecto.

Los datos de ocupación quedarán dependientes del horario de la clínica que se expone a continuación en la Figura 35.



Figura 35: Carpeta de horario de ocupación. Creación propia en DesignBuilder

La Figura 36 indica que el horario seleccionado para la ocupación de la clínica será uniforme durante todos los días laborables del año, con la excepción de los sábados y domingos, en los que se ha definido una ausencia total de ocupación, al no desarrollarse actividad clínica durante el fin de semana.

El perfil de ocupación diario para los días laborables se presenta en la Figura 51, donde se ha optado por una distribución horaria representativa del funcionamiento típico de una jornada laboral, basada en valores medios obtenidos a partir de referencias disponibles en fuentes especializadas en entornos empresariales ofrecido dentro de la comunidad Ecoeficientes.es, comunidad oficial de ayuda en el programa DesignBuilder. Este perfil

ha sido incorporado con el objetivo de reflejar un comportamiento realista y coherente con el uso previsto de las instalaciones.

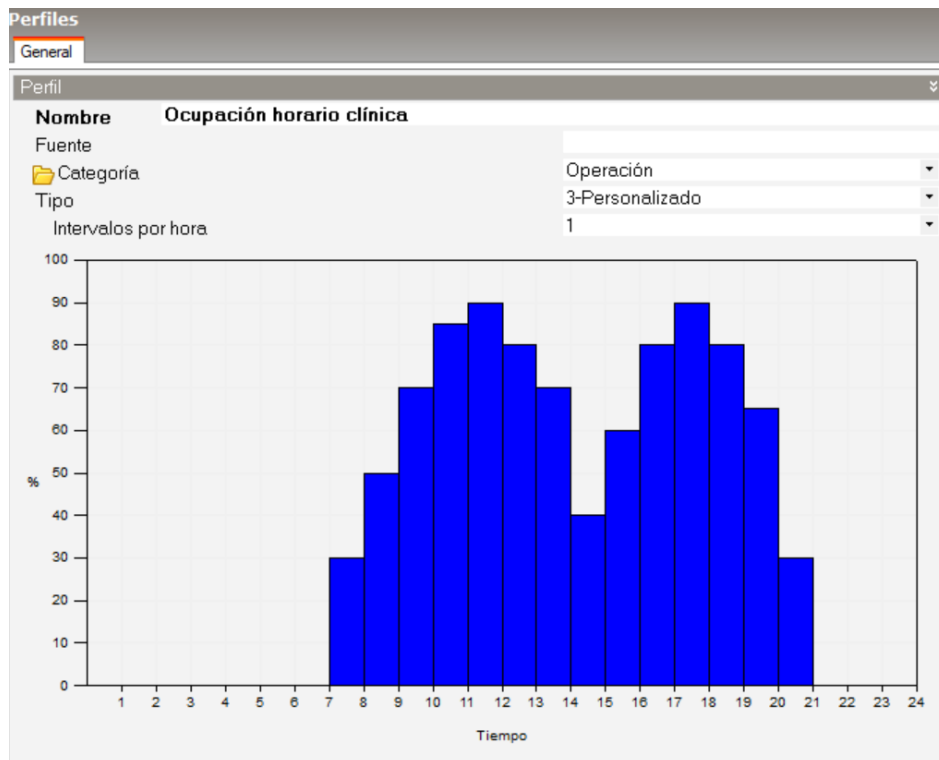


Figura 36: Distribución de ocupación a lo largo del día. Creación propia en DesignBuilder

En lo que respecta a las condiciones metabólicas, se ha realizado una selección estimada por el redactor del presente trabajo, en función del tipo de actividad que previsiblemente se desarrolla en cada una de las zonas de la clínica. Esta estimación se ha basado en el uso previsto de cada espacio y en criterios de ocupación típicos en entornos sanitarios y administrativos.

Las categorías seleccionadas —como Standing/Waiting, Seated Quiet, Walking 3.2 km/h, Light Activity, entre otras— corresponden a opciones predeterminadas disponibles en el programa DesignBuilder, y han sido aplicadas según el nivel de actividad asociado a cada zona.

Estas condiciones metabólicas inciden directamente en la producción de calor corporal y en la emisión de dióxido de carbono (CO₂) por parte de los ocupantes, factores clave en la evaluación del confort térmico y en el dimensionamiento del sistema de ventilación. Los valores asignados se presentan en la Tabla 30.

Condiciones metabólicas		
Tasa metabólica		
	Categoría	Tasa metabólica por persona [W/m]
Acceso Sótano	3,2km/h (caminando)	207
Anteaseo	Standing/walking	140
Aseo señoras	Seated quiet	108
Aseo señores	Seated quiet	108
Aseo vestuario	Seated quiet	108
Despacho 1	Light office work	120
Despacho 2	Light office work	120
Distribuidor	3,2km/h (caminando)	207
Entrada	3,2km/h (caminando)	207
Esterilización	Light	216
Gabinete 1	Light	216
Gabinete 2	Light	216
Gabinete 3	Light	216
Gabinete 4	Light	216
Gabinete 5	Light	216
Gabinete 6	Light	216
Instalaciones	Standing relaxed	126
Office	Light office work	120
Pasillo	3,2km/h (caminando)	207
Rack	Light	216
Rayos	Light	216
Recepción	Office work/Standing/Walking	127
Recuperación	Bedroom	104
Sala de espera	Reading seated	99
Vestíbulo	Reading seated	99
Sótano	Light	216

Tabla 30: Table de condiciones metabólicas en la clínica. Creación propia

En lo que respecta a los apartados de vestimenta, ponderación de la temperatura radiante para confort y velocidad del aire, se han introducido los valores predeterminados del programa, tal como se muestra en la Figura 37. Estos parámetros no serán abordados en profundidad en el presente trabajo.



Figura 37: Carpetas de Vestimenta, Ponderación de temperatura, y velocidad del aire. Creación propia en DesignBuilder

4.2.3.5. Control Ambiental

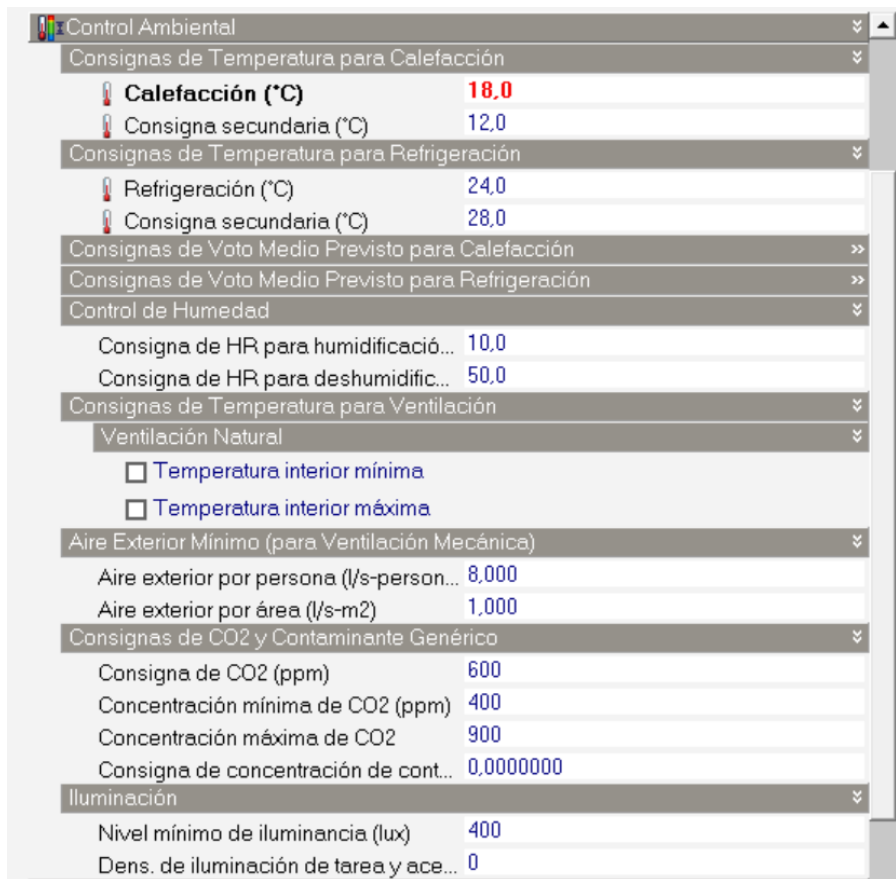


Figura 38: Carpeta desglosada de Control Ambiental. Creación propia en DesignBuilder

En el apartado de control ambiental se configuran diversos parámetros que afectan directamente al funcionamiento del sistema HVAC. Uno de los aspectos más relevantes es que las temperaturas de consigna para calefacción y refrigeración deben establecerse iguales o superiores a las consignas de ventilación, ya que, de no ser así, el programa generará un error crítico (fatal error) que interrumpirá el proceso de simulación.

Las consignas de “voto medio previsto” (PMV) para calefacción y refrigeración no se abordan en este proyecto, dado que no forman parte del enfoque definido para el análisis.

En cuanto al control de humedad, se establece un valor de consigna general, aunque el resultado final dependerá de la capacidad real de cada zona para evacuar o mantener la humedad, en función de su ventilación, ocupación y condiciones térmicas.

Asimismo, los valores correspondientes a aire exterior mínimo, concentración máxima de CO₂ y niveles de iluminación se han fijado de acuerdo con lo especificado en la

memoria del proyecto, con el objetivo de cumplir la normativa vigente en materia de edificación y control ambiental.

4.2.3.6. Computadoras y Equipos de oficina



Figura 39: Carpeta de computadoras y Equipos de Oficina. Creación propia en DesignBuilder

Tanto los equipos informáticos (computadoras) como los equipos de oficina se han definido de forma específica para cada zona, y los valores introducidos son de carácter estimativo, ajustados según el uso previsto del espacio. Ambas carpetas siguen el mismo perfil horario de ocupación, tal como se detalla en las Figuras 35 y 36, dentro de la subcategoría de Ocupación.

Los datos correspondientes a cada zona se recogen en la Tabla 31, donde se reflejan las potencias asignadas para cada tipo de equipo. Los valores de consumo energético aplicados a los equipos de oficina y computadoras han sido seleccionados a partir de valores estandarizados y estimaciones técnicas, de acuerdo con lo establecido en el ASHRAE Handbook – Fundamentals. Según esta fuente, las ganancias térmicas por equipos en laboratorios-sanitarios oscilan entre 50 y 220 W/m², mientras que en oficinas generales se sitúan habitualmente entre 9 y 13 W/m².

Estos rangos de referencia respaldan la elección de una carga interna de 135 W/m² para las zonas con equipos de uso laboratorio-sanitario, y de 10 W/m² para las zonas con equipos de oficina, como los despachos o salas office. Adicionalmente, se ha asignado una carga térmica extra de 9 W/m² por uso de ordenadores a todas las salas con puestos informáticos, reflejando así el aporte térmico asociado a la actividad informática general.

	Computadoras	Consumo Oficinas
	Densidad potencia (W/m ²)	Densidad de potencia (W/m ²)
Acceso Sótano	FALSO	0
Anteaseo	FALSO	0
Aseo señoras	FALSO	0
Aseo señores	FALSO	0
Aseo vestuario	FALSO	0
Despacho 1	VERDADERO	10
Despacho 2	VERDADERO	10
Distribuidor	FALSO	0
Entrada	FALSO	0
Esterilización	FALSO	135
Gabinete 1	VERDADERO	135
Gabinete 2	VERDADERO	135
Gabinete 3	VERDADERO	135
Gabinete 4	VERDADERO	135
Gabinete 5	VERDADERO	135
Gabinete 6	VERDADERO	135
Instalaciones	FALSO	135
Office	VERDADERO	10
Pasillo	FALSO	0
Rack	VERDADERO	10
Rayos	VERDADERO	0
Recepción	VERDADERO	10
Recuperación	FALSO	10
Sala de espera	FALSO	0
Vestíbulo	FALSO	0
Sótano	VERDADERO	0

Tabla 31: Valores de computadoras y consumo oficinas por zonas. Creación propia

4.2.4. Cerramientos

En este subapartado se abordan las características físicas de los elementos constructivos principales de la clínica: muros, techos, suelos y particiones internas. Tal como se muestra en la Figura 40, se han creado dos tipos de muros diferenciados: por un lado, los muros exteriores, definidos bajo el nombre "Muro de la Clínica TFG", y por otro, los muros en contacto con el terreno, clasificados como "Muro de sótano de la clínica".

Respecto a los suelos, también se han definido dos plantillas específicas: una correspondiente a los suelos sobre terreno, denominada "Suelo de la Clínica TFG", y otra para los suelos del sótano, registrada como "Suelo sótano TFG". Estas configuraciones permiten reflejar con mayor precisión las condiciones térmicas de contacto con el exterior y con el terreno, respectivamente.

Por último, dentro de las subcarpetas tratadas en este apartado, se incluye el parámetro de estanqueidad al aire, ya que el resto de los elementos de esta sección son simplemente descriptivos de los componentes previamente construidos y no se desarrollan en profundidad en este documento. Para este parámetro, se ha adoptado un valor de $n_{50} = 0,5$

h^{-1} , lo que equivale a una renovación completa del volumen de aire interior cada dos horas.

Este valor se establece como una medida conservadora, aplicando un factor de seguridad $\times 2$ respecto al valor límite de $n_{50} = 1,0 h^{-1}$ recomendado en el estándar EnerPHit para proyectos de rehabilitación energética, que admite una renovación completa cada hora. La aplicación de este factor se justifica por la ausencia de datos reales de estanqueidad en el proyecto y busca garantizar la robustez del modelo ante incertidumbres. (Fuente: Criteria for Buildings – Passive House, EnerPHit and PHI Low Energy Building Standard, Passive House Institute, versión 10c, 2023).

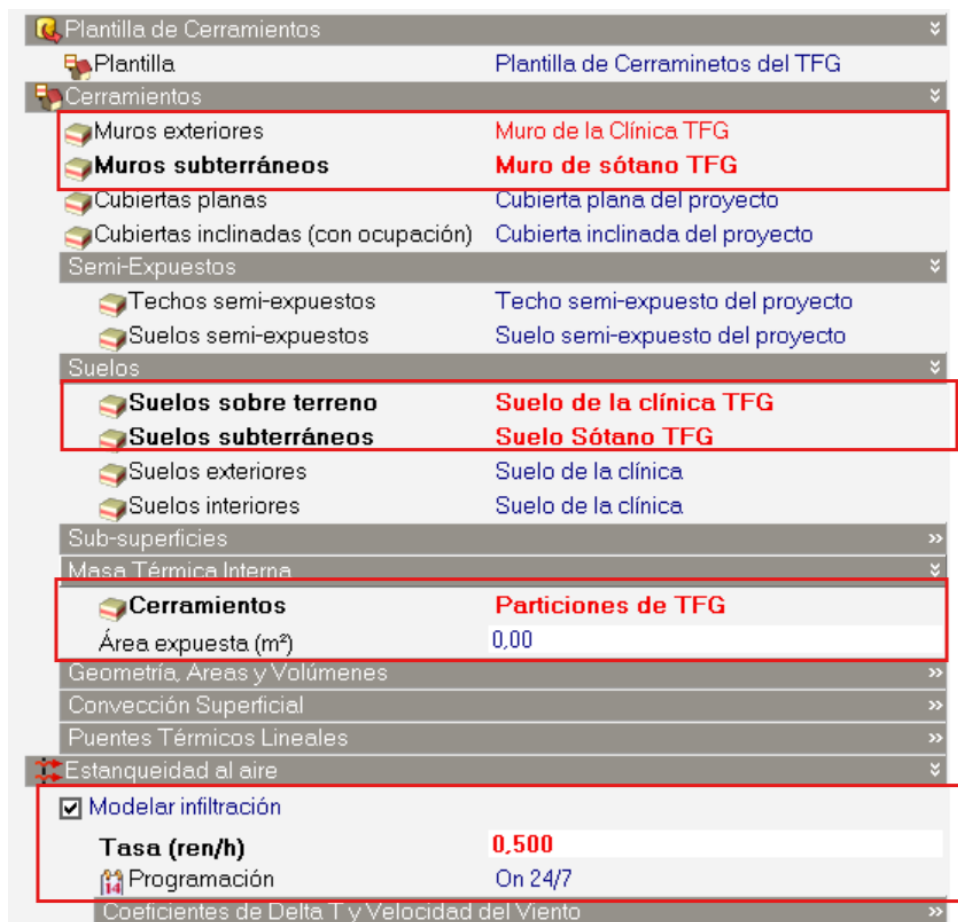


Figura 40: Carpeta cerramientos. Creación propia en DesignBuilder

Lo que se muestra en las Figuras 41, 42, 43, 44, 45 y 46 es la composición material de las distintas superficies constructivas de la clínica, incluyendo muros, suelos y particiones internas. Estas configuraciones responden a las composiciones reales descritas en la Tabla 3, mientras que los valores de transmitancia térmica (U) han sido ajustados manualmente

conforme a lo establecido en la Tabla 5, para garantizar la fidelidad del modelo frente a los datos del proyecto.

En el caso del suelo de la clínica, y la pared del sótano con los paneles geotérmicos en la Figura 43 y 46, la línea horizontal azul que se observa en las figuras simboliza la posición exacta en la que se ubicará un equipo energético dentro del modelo. Este elemento visual permite, en fases posteriores de la descripción energética, indicar con precisión la zona física en la que se sitúa el sistema dentro del edificio. En el caso del suelo radiante, el programa interpreta que la fuente de energía se encuentra en el suelo interior de las zonas seleccionadas, mientras que, en el caso de la geotermia horizontal, se entiende que la fuente se ubica en las paredes donde se haya colocado manualmente la línea azul o “fuente interna”. Por tanto, la correcta colocación de esta línea es esencial para representar con realismo el comportamiento del sistema energético en la simulación, y se selecciona como se representa en la Figura 47.



Figura 41: Muro de la clínica. Creación propia en DesingBuilder



Figura 42: Muro del sótano. Creación propia en DesingBuilder

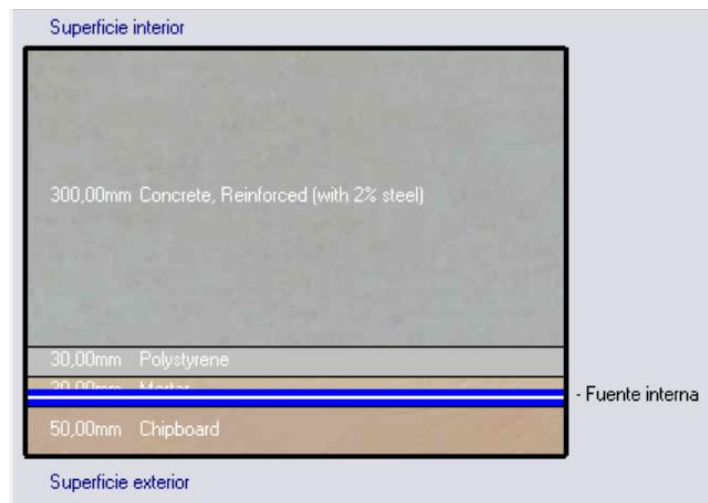


Figura 43: Suelo de la clínica. Creación propia en DesingBuilder



Figura 44: Suelo del sótano. Creación propia en DesingBuilder



Figura 45: Particiones de la clínica. Creación propia en DesingBuilder

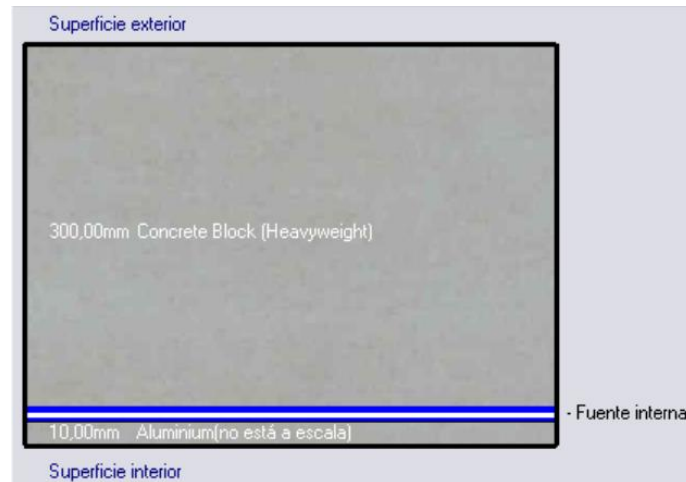


Figura 46: Pared del sótano donde se sitúan los paneles geotérmicos. Creación propia en DesignBuilder



Figura 47: Carpeta de fuente interna. Creación propia en DesignBuilder

4.2.5. Aberturas

En este subapartado se abordan las aberturas estructurales del modelo, concretamente ventanas y puertas. El análisis se centrará especialmente en las ventanas, dado que constituyen un elemento clave en el comportamiento térmico y lumínico del edificio. Se realizará una descripción detallada del tipo de ventana seleccionado para el proyecto, basándose en las características reales de los elementos instalados en la clínica, con el objetivo de reflejar con la mayor fidelidad posible su impacto en la simulación energética.

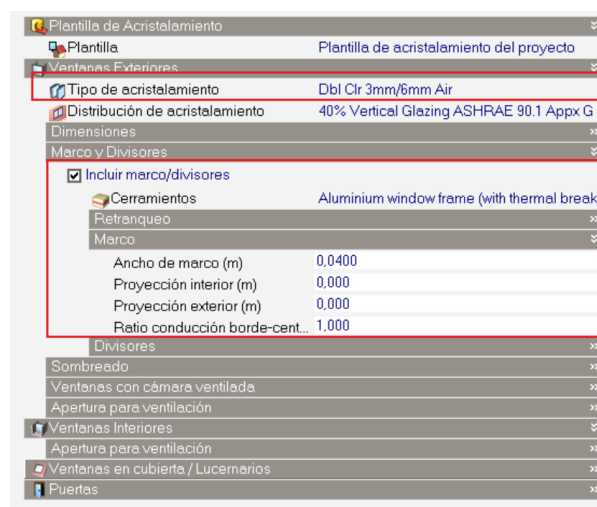


Figura 48: Subcarpetas dentro de aberturas. Creación propia en DesignBuilder

Como se muestra en la Tabla 32, se detallan el tipo de acristalamiento y los cerramientos seleccionados para las ventanas exteriores e interiores, en función de las características recogidas en la memoria del proyecto y como se indica en la Tabla 5. La elección de estos elementos se ha realizado con el objetivo de representar fielmente las propiedades térmicas y constructivas reales del edificio, garantizando así la coherencia del modelo con la situación existente.

Apertura	Tipo de Acristalamiento o material
Ventanas interiores	DbI Clr 3mm/6mm Air
Ventanas exteriores	Sgl Clr 6mm
Marcos interiores	Aluminium window frame
Marcos exteriores	Aluminium window frame

Tabla 32 : Tabla de acristalamiento y cerramientos de ventanas. Creación propia

En la Tabla 6 se establece una transmitancia térmica de referencia de 3,5 W/m²·K para las ventanas exteriores. Sin embargo, el programa DesignBuilder no permite forzar directamente un valor concreto de transmitancia, sino que lo calcula automáticamente en función de las propiedades del acristalamiento y del marco seleccionados. Como resultado, el valor final de transmitancia obtenido para las ventanas exteriores en el modelo es de 3,159 W/m²·K, lo que representa una diferencia mínima con respecto al valor previsto, pero que se considera aceptable dentro del margen técnico.

4.2.6. Iluminación

En este subapartado se abordan los datos utilizados para la simulación del sistema de iluminación. El programa DesignBuilder no permite una diferenciación detallada por tipo de luminaria en distintas zonas, por lo que la iluminación se generaliza en función de un único valor de densidad de potencia instalada (W/m²) aplicado a cada área.

Para el cálculo de este valor, se ha tomado como base la superficie útil de la clínica, que asciende a 368,69 m², junto con la potencia total instalada en alumbrado (5195 W). A partir de estos datos, y aplicando la fórmula:

$$\text{Densidad de potencia} = \frac{P_{\text{Instalada}}}{S_{\text{útil}}} \quad \text{Ecuación 3}$$

se ha obtenido un valor estimado de 14 W/m², que ha sido introducido en el modelo como valor representativo de la carga lumínica general.

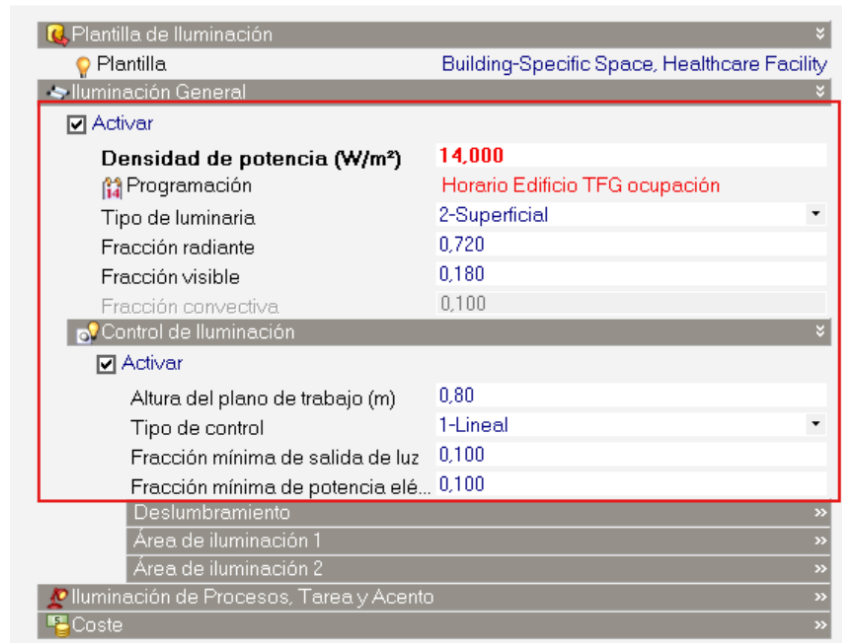


Figura 49: Carpeta de iluminación. Creación propia en DesignBuilder

Además, la simulación cuenta con un control de iluminación simplificado respecto al que existe en la realidad, debido a que no se dispone de información concreta sobre el tipo de sistema de control lumínico instalado en la clínica.

4.2.7. HVAC

En este subapartado se abordan los parámetros generales de la simulación energética. Esta carpeta no forma parte de la estructura del sistema HVAC que se definirá en apartados posteriores, pero sí cumple una función clave en la activación de los horarios generales de los modos de calefacción, refrigeración y ventilación mecánica.

Es importante señalar que, aunque posteriormente se configure un sistema HVAC completo, si alguno de estos modos se encuentra desactivado en esta sección, dicho sistema no podrá funcionar, independientemente de su configuración detallada. Por ejemplo, si la calefacción está desactivada en esta carpeta, el sistema de calefacción definido más adelante no se activará durante la simulación, aunque esté correctamente implementado.

Del mismo modo, si se desea que un sistema como el suelo radiante funcione en verano, pero en los horarios generales no está habilitada la refrigeración para ese periodo del año,

el sistema no entrará en funcionamiento. Por ello, esta sección constituye un paso esencial para garantizar la coherencia entre los horarios operativos globales y el comportamiento de los sistemas energéticos en la simulación.

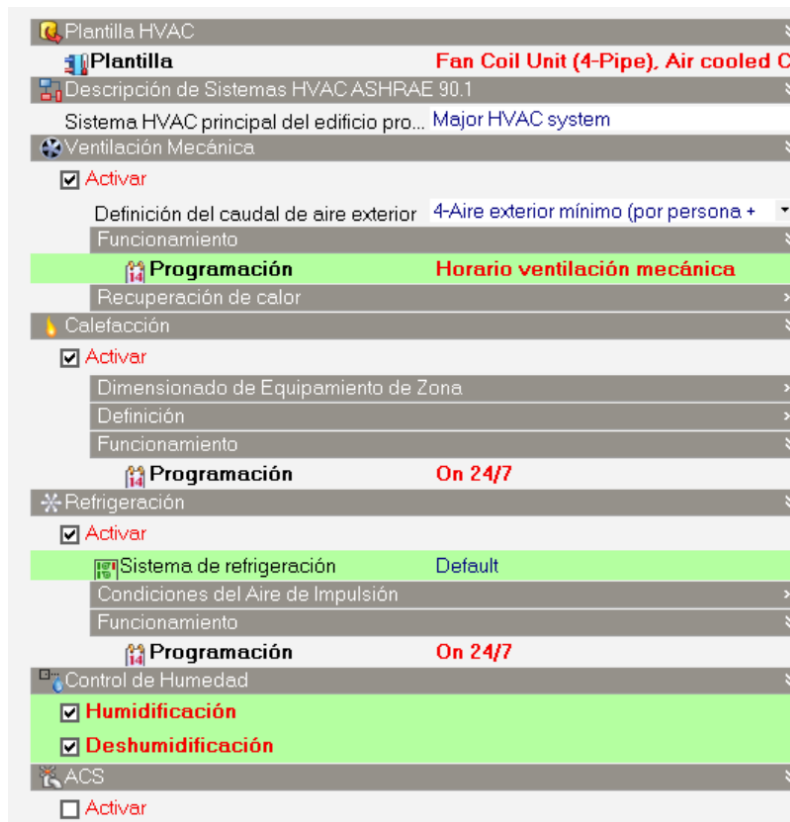


Figura 50: Carpeta de HVAC. Creación propia en DesignBuilder

El único horario que se analizará en profundidad en este apartado es el correspondiente a la ventilación mecánica, ya que los modos de calefacción y refrigeración se mantendrán siempre activados durante todo el año. Esta decisión permite que el programa pueda gestionar libremente el funcionamiento de los equipos de climatización en cualquier momento, en función de la demanda térmica detectada.

Esta configuración se adopta con el objetivo de permitir la extensión del modelo a periodos posteriores a mayo, en caso de que se considere necesario continuar con simulaciones adicionales. De este modo, se garantiza la operatividad total de los sistemas durante cualquier periodo del año, sin necesidad de reconfigurar manualmente los horarios generales.

En cuanto a la ventilación mecánica, esta se establece según lo indicado en la Tabla 17, utilizando el modo “verde”, que indica la posibilidad de funcionamiento. Posteriormente,

en fases avanzadas del modelo, se aplicará una lógica binaria (TRUE/FALSE) que determinará si el sistema se activa o permanece inactivo, en función de la ocupación real y las condiciones de calidad del aire definidas.

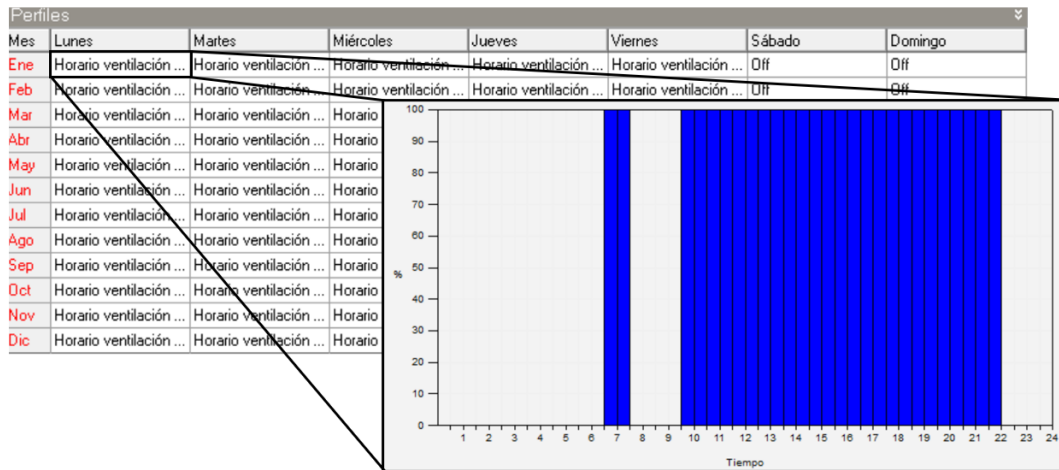


Figura 51: Horario de ventilación mecánica. Creación propia en Designbuilder

En esta carpeta también se habilita la opción de control de humedad, mediante la activación de las funciones de humidificación y deshumidificación. Esta configuración permite, en fases posteriores —concretamente en la sección de HVAC detallado—, asociar sistemas específicos de control de humedad a partir de los valores de consigna.

Por otro lado, la sección correspondiente a la producción de Agua Caliente Sanitaria (ACS) se mantiene desactivada, debido a que no se dispone de datos reales de consumo. Esta omisión tendrá un impacto directo en los resultados de la simulación, y será tomada en cuenta en el análisis y discusión final.

Del mismo modo, la ventilación natural es un aspecto que no se aborda en este proyecto, por lo que también se ha optado por mantenerla desactivada en la configuración general de la simulación.

4.3. Descripción del sistema HVAC detallado

En este subapartado se ofrece una descripción detallada de la instalación y ajuste de los reglajes de los distintos equipos de climatización configurados dentro del apartado de HVAC avanzado del modelo energético.

El orden que se seguirá es el siguiente:

- ❖ Bomba de calor aerotérmica
- ❖ Bomba de calor geotérmica
- ❖ Tanques de inercia de 300 L y 100 L
- ❖ Unidad de Tratamiento de Aire (UTA)
- ❖ Instalación de los grupos de zonas, que incluye los sistemas de:
 - Ventilación mecánica controlada
 - Suelo radiante
 - Aire acondicionado (para aquellas zonas que lo tengan instalado)

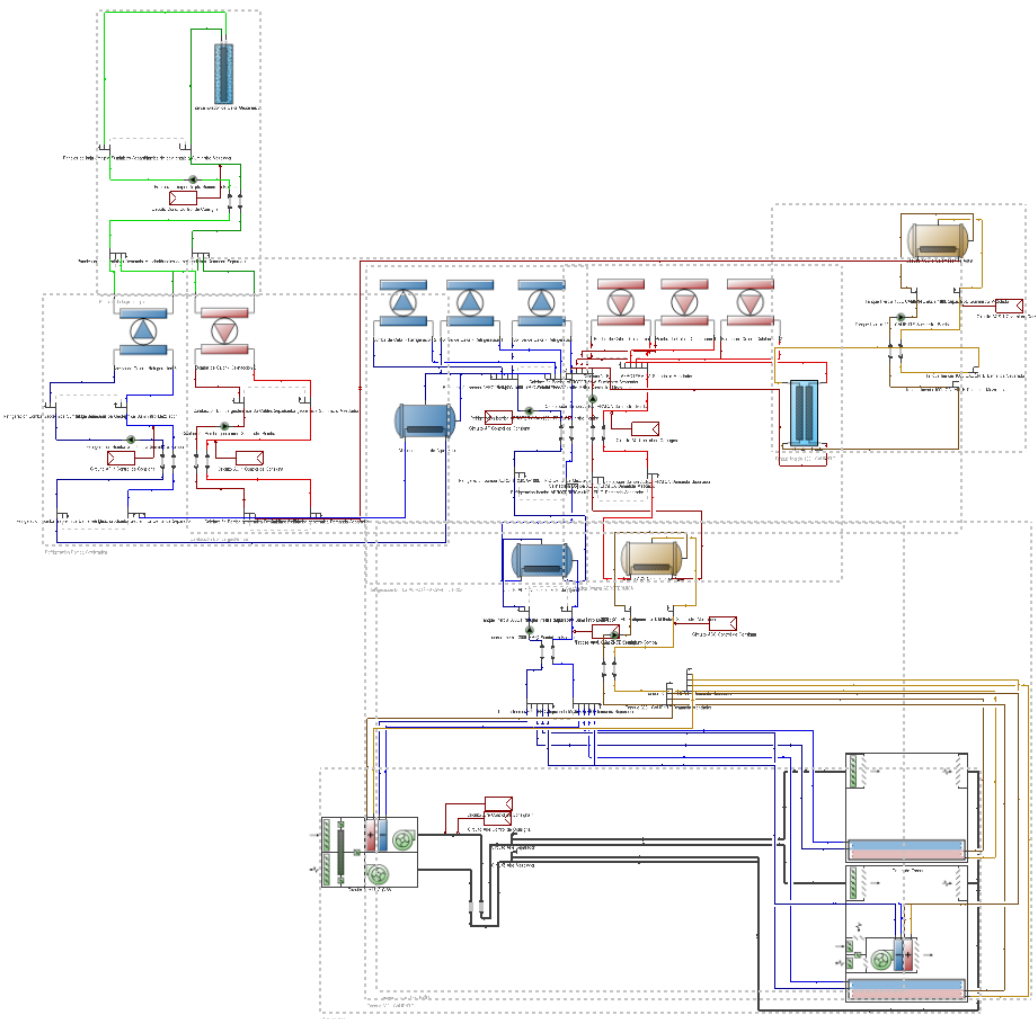


Figura 52: Diseño de climatización de la clínica. Creación propia en DesignBuilder

Antes de profundizar en el siguiente apartado, es fundamental comprender la lógica de configuración del programa DesignBuilder. El proceso se organiza en tres niveles jerárquicos principales:

- ❖ En primer lugar, se definen las características generales del sistema a través del menú ubicado en el panel izquierdo del programa, dentro del denominado "Árbol del modelo".
- ❖ A continuación, se establecen los valores de consigna correspondientes a cada uno de los bloques independientes o diferenciados del sistema, los cuales pueden visualizarse delimitados por líneas punteadas de color gris en el entorno gráfico.
- ❖ Finalmente, se procede a la configuración detallada de cada componente dentro de las zonas correspondientes.

Esta lógica se explicará de forma simplificada utilizando como ejemplo el primer sistema definido: la bomba de calor aerotérmica, concretamente en su circuito de agua fría.

El proceso comienza accediendo al bloque denominado "Refrigeración bomba AEROTÉRMICA + 100L Frío", cuya estructura se analizará más adelante junto con la decisión de implementar el tanque de inercia de agua fría de 100 L en dicha configuración.

En primer lugar, se deben definir las condiciones básicas del sistema, como la temperatura de funcionamiento (que debe coincidir con los valores de consigna definidos previamente), así como los valores de dimensionado y el caudal de diseño.

En segundo lugar, se procede a introducir los valores de consigna en los controladores de consigna.

Por último, en una tercera fase, se ajustan las características específicas del equipo, incluyendo su comportamiento operativo, eficiencia, rangos de funcionamiento y su integración con los elementos asociados del sistema HVAC.

Todo esto queda ilustrado en la Figura 53.

Editar Circuito de planta -

General Operación del Equipamiento de la Planta

Funcionamiento

Operación del Equipamiento de la Planta

Nombre	Refrigeración bomba AEROTERMICA-100L F
Tipo de fluido	1-Agua
Volumen del circuito de planta (m³)	Autocalculado
Tipo de Caudal	2-Caudal variable
Tipo de caudal del circuito de planta	2-Caudal variable
Temperatura	
Temperatura máxima del circuito (°C)	13.00
Temperatura mínima del circuito (°C)	8.50
Caudal	
Caudal máximo del circuito (m³/s)	Autosize
Caudal mínimo del circuito (m³/s)	0.000000
Esquema de distribución de cargas	1-Secuencial
Esquema de cálculo de la demanda del circuito de planta	2-DualSetPointDeadband
Elementos	
Temperatura nominal a la salida del circuito (°C)	10.00
Salto térmico en el circuito (°C)	4.00
Funcionamiento	
Programación de disponibilidad	On 24/7
Operación con Temperatura Exterior	<input type="checkbox"/>
Operación con temperatura exterior	<input type="checkbox"/>

Circuito de Agua Fria

El Circuito de agua fría consiste en:

- Sub-circuito de suministro, que con enfriadoras, una bomba y un admir consignas.
- Sub-circuito de demanda, que distribuye a baterías de frío, techos y vigas.

Este diálogo abarca los detalles de dir funcionamiento del circuito en su conjunto.

Esquema de Distribución de Cargas

El Esquema de Distribución de Cargas algoritmo empleado para secuenciar el de los equipos para satisfacer la demanda de planta. Hay tres opciones:

- Secuencial - Emplea cada pieza de su máxima fracción de carga parcial última pieza de equipamiento entre mínima y máxima de carga parcial la demanda del circuito.
- Óptimo - Emplea cada pieza de equipamiento entre sus fr y máxima de carga parcial para satisfacer la demanda del circuito.
- Uniforme - Distribuye la demanda c

Figura 53: Fases de detalle en HVAC DETALLADO. Creación propia en DesignBuilder

4.3.1. Bomba de calor aerotérmica

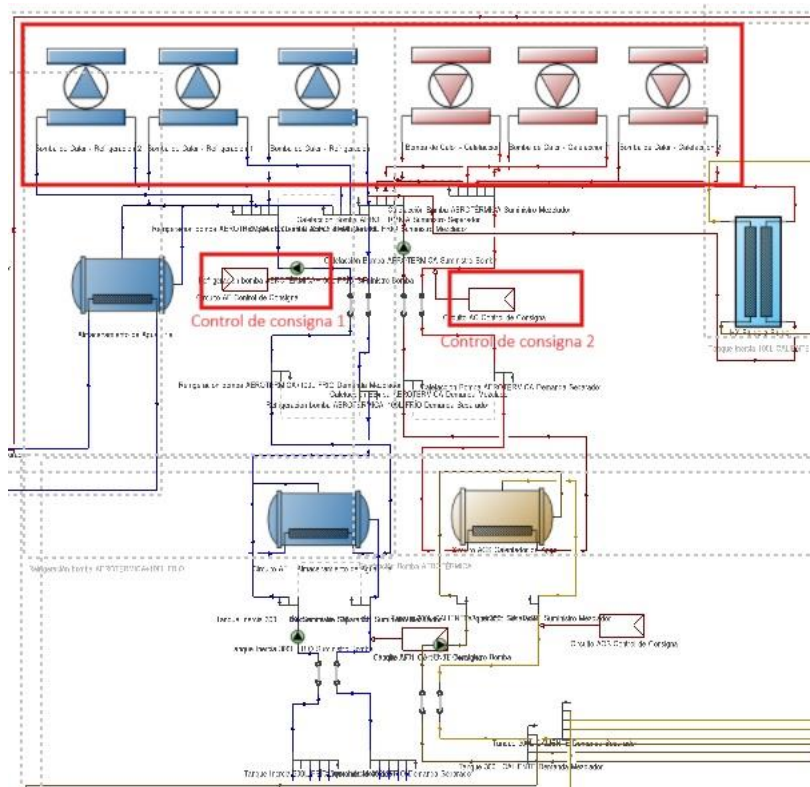


Figura 54: Bomba de calor aerotérmica. Creación propia en DesignBuilder

En la Figura 54 se muestra la representación virtual de una bomba de calor aerotérmica en el entorno de modelado de DesignBuilder. Como puede observarse a simple vista, aunque en la realidad las bombas de calor instaladas cuentan con la capacidad de funcionamiento reversible —es decir, pueden operar tanto en modo calefacción como en refrigeración—, DesignBuilder no permite implementar esta dualidad en un único componente. Por este motivo, en la figura se representan seis módulos independientes: tres de color rojo, correspondientes a las bombas de calor para los circuitos de agua caliente, y tres de color azul, destinadas a los circuitos de agua fría.

Antes de profundizar en el diseño y configuración específica de las bombas de calor aerotérmicas, es relevante destacar los elementos marcados en cuadrados rojos, identificados como “Control de consigna 1” y “Control de consigna 2”. Estos controles hacen referencia a los valores definidos en el apartado 3.3.10. “Consignas de ida de bomba de calor”, y están basados específicamente en los datos representados en la Tabla 23, titulada “Consigna límite de temperatura de bomba de calor. Creación propia”. Estos

elementos permiten establecer las condiciones de activación y operación de las bombas dentro de la lógica de simulación HVAC detallada.

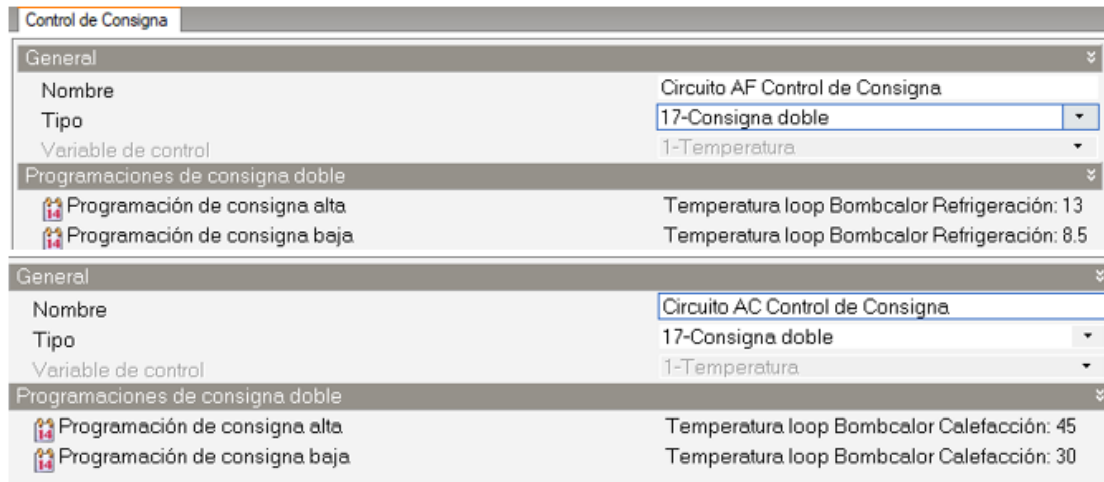


Figura 55: Menús de los controles de consigna 1 y 2. Creación propia en DesignBuilder

En la Figura 55 se muestran los menús de configuración correspondientes a ambas consignas de control. En primer lugar, se presenta el Control de Consigna 1, en el que se establece el uso de un tipo de control por doble consigna, permitiendo definir valores límite superiores e inferiores para la activación y desactivación de los equipos.

Los valores asignados a esta consigna se introducen manualmente en el programa a través de una programación específica, la cual se detalla en la Figura 56. Esta programación permite que la bomba de calor opere en función de las condiciones térmicas definidas previamente.

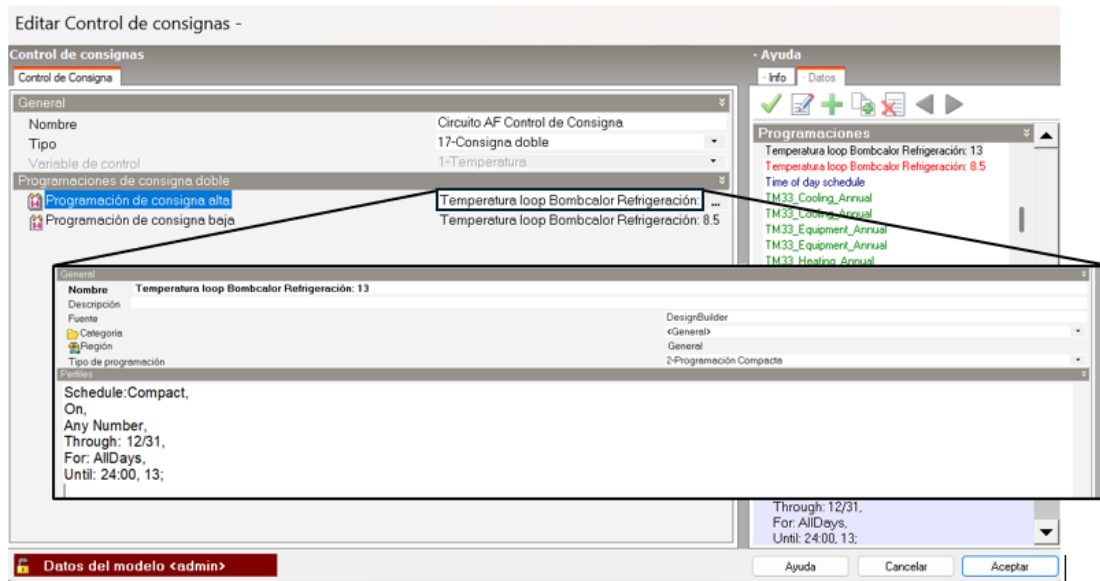


Figura 56: Menú de programación de consigna alta de refrigeración. Creación propia en DesignBuilder

General	
Nombre	Bomba de Calor - Refrigeracion 1
Tipo	2-Bomba de calor con EIR de circuito de planta
CoP de referencia	3,50
Factor de dimensionado	1,00
Caudales y capacidad	
Caudal de referencia en la parte de las cargas (m ³ /s)	0,005000
Caudal de referencia en la parte de la fuente (m ³ /s)	Autosize
Capacidad de referencia (W)	10000,0
Curvas de Rendimiento	
<input checked="" type="checkbox"/> Curva de capacidad en función de la temperatura	Capacity Modifier Function of Temperature Curve
<input checked="" type="checkbox"/> Curva de relación entrada-salida eléctrica en función de la temperatura	EIR Modifier Function of Temperature Curve
<input checked="" type="checkbox"/> Curva de relación entrada-salida eléctrica en función de la carga parcial	EIR Modifier Function of Part Load Ratio Curve
Condensador	
Tipo de condensador	1-Fuente de aire

Figura 57: Menú de configuración de bomba de calor. Creación propia en DesignBuilder

A continuación, se procede a profundizar en el bloque correspondiente a la bomba de calor aerotérmica, que se puede visualizar en la Figura 57, bajo el título "Menú de configuración de bomba de calor". Tal como se ha detallado previamente en este proyecto, el diseño del sistema de climatización contempla la instalación de tres bombas de calor, cada una con una potencia térmica de 10.000 W. Según la información facilitada por el fabricante, se ha considerado un Coeficiente de Rendimiento (COP) de referencia de 3,5. En cuanto a los caudales, se han configurado en modo Autosize en el lado de la fuente térmica, permitiendo que el programa ajuste automáticamente el valor en función de las necesidades del sistema. Por el contrario, en el lado de las cargas, se ha definido un caudal nominal fijo, tal como se ha especificado previamente en la configuración del sistema.

Dado que se trata de una bomba de calor aerotérmica, el condensador utiliza aire como fluido de intercambio, lo que implica que el rendimiento dependerá de las condiciones térmicas del entorno exterior.

Tanto para las bombas de calor que se instalan en los circuitos de agua fría, como para los de agua caliente, la configuración de la Figura 58 se establece igual.

Por último, las curvas de rendimiento del equipo se han mantenido según los valores predeterminados del programa DesignBuilder, ya que no se dispone de información específica del fabricante para ajustar dichos parámetros. Esta aproximación se considera válida dentro del margen de precisión aceptable para este tipo de simulación.

General	
Nombre	Refrigeración bomba.AEROTÉRMICA+100L F
Tipo de fluido	1-Agua
Volumen del circuito de planta (m³)	Autocalculate
Tipo de Caudal	
Tipo de caudal del circuito de planta	2-Caudal variable
Temperatura	
Temperatura máxima del circuito (°C)	13.00
Temperatura mínima del circuito (°C)	8.50
Caudal	
Caudal máximo del circuito (m³/s)	Autosize
Caudal mínimo del circuito (m³/s)	0,000000
Esquema de distribución de carga	1-Secuencial
Esquema de cálculo de la demanda del circuito de planta	2-DualSetPointDeadband
Dimensionado	
Temperatura nominal a la salida del circuito (°C)	10,00
Salto térmico en el circuito (°C)	4,00
Funcionamiento	
Programación de disponibilidad	On 24/7
Operación con Temperatura Exterior	
<input type="checkbox"/> Operación con temperatura exterior	

Figura 58: Menú de planta dentro del árbol del modelo. Creación propia en DesignBuilder

Para la configuración general del sistema, situada en el árbol del modelo, y representada en la Figura 58. La diferencia principal entre los circuitos “Refrigeración bomba aerotérmica” y “Calefacción bomba aerotérmica” radica en los valores de temperatura mínima y máxima asignados a cada uno de ellos, los cuales se han definido previamente en el apartado 3.3.10. “Consignas de ida de bomba de calor”.

4.3.2. Bomba de calor geotérmica

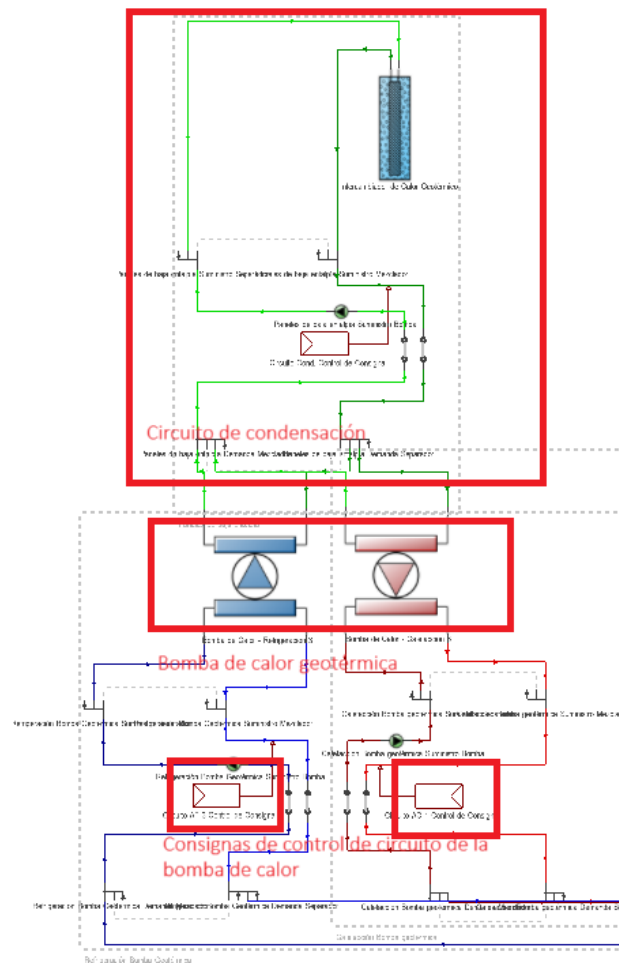


Figura 59: Bomba de calor geotérmica. Creación propia en DesignBuilder

En este subapartado se describe la configuración de la bomba de calor geotérmica definida en la simulación, siguiendo una secuencia estructurada en tres fases:

- ❖ Definición del circuito de condensación:
- ❖ Definición de las bombas de calor geotérmicas:
- ❖ Definición de los valores de consigna del circuito de bomba de calor

4.3.2.1. Circuito de condensación

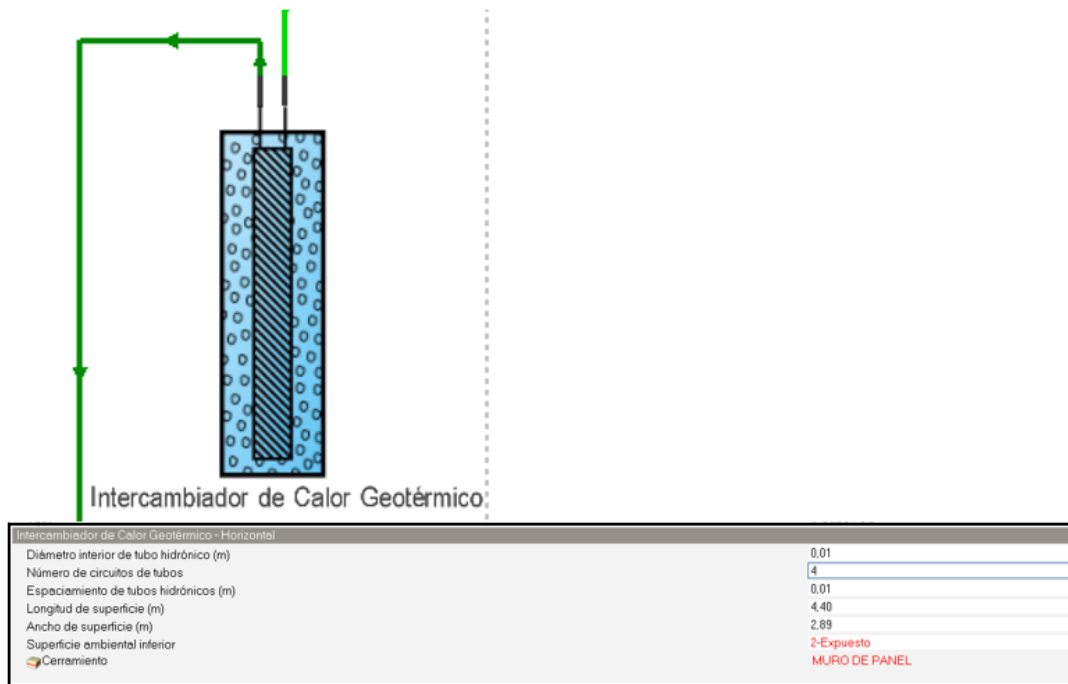


Figura 60: Menú del intercambiador de Calor Geotérmico

Las características mostradas en la Figura 60 corresponden a la configuración definida en la Tabla 12 “Características de la Bomba de Calor Geotérmica”, incluida en el apartado 3.3.4.5 “Bomba de calor geotérmico”. Además, se ha establecido como superficie de instalación de los paneles geotérmicos la pared corta horizontal del sótano, cuya composición constructiva y asignación de zona se detalla en la Figura 46, dentro del apartado 4.2.4. “Cerramientos”.

La elección de una capa de aluminio de 10 mm de espesor responde a las condiciones reales del sistema instalado. Si bien en la práctica la capa de aluminio utilizada para garantizar el intercambio térmico con el fluido es más delgada, este valor representa el espesor mínimo permitido por el programa para este tipo de material, y se ha adoptado para mantener la fidelidad técnica dentro de las limitaciones del entorno de simulación.

4.3.2.2. Bomba de calor geotérmica

Caudal y Capacidad Nominales	
Caudal nominal en la parte de las cargas (m ³ /s)	0,000570
Caudal nominal en la parte de la fuente (m ³ /s)	0,000570
Capacidad nominal de refrigeración (W)	2000,0
Consumo energético nominal de refrigeración (W)	2900,0

Figura 61: Menú de configuración de la bomba de calor geotérmica. Creación propia en DesignBuilder

Un caso particular de estas bombas de calor geotérmicas es que cuentan con un COP de referencia elevado, fijado en 5,5. Este valor se justifica porque, en la práctica, el sistema de control está diseñado para priorizar el uso de la bomba geotérmica en los momentos en que su rendimiento es más alto, es decir, cuando la diferencia entre la temperatura de la fuente (el subsuelo) y la temperatura de demanda es máxima.

La potencia nominal de cada bomba geotérmica es de 2000 W, como ya se ha mencionado en apartados anteriores, y su ubicación en el modelo se sitúa en el sótano, coherente con la disposición real de la instalación.

En cuanto al caudal nominal del lado de las cargas, este se ha dejado en configuración automática, permitiendo que sea la plantilla del programa quien lo determine. Esta decisión se debe a la falta de información específica sobre ese valor en la documentación del proyecto, optando así por una solución técnica válida dentro del entorno de simulación.

4.3.2.3. Definición de valores de consigna

Para los valores de consigna de la bomba de calor geotérmica se han establecido las mismas limitaciones de temperatura máxima y mínima que las definidas previamente para la bomba de calor aerotérmica, tal como se muestra en la Figura 55 “Menús de consigna 1 y 2. Creación propia en DesignBuilder”. Esta decisión se debe a que el planteamiento de los circuitos que conectan ambas bombas de calor con sus respectivos tanques de inercia es estructuralmente similar.

Además, dado que el programa DesignBuilder exige obligatoriamente la introducción de valores de consigna, y en ausencia de criterios diferenciados para el sistema geotérmico, se ha optado por establecer las mismas condiciones máximas y mínimas, garantizando así la coherencia del modelo y evitando inconsistencias en la simulación.

4.3.3. Tanque de Inercia de 300L

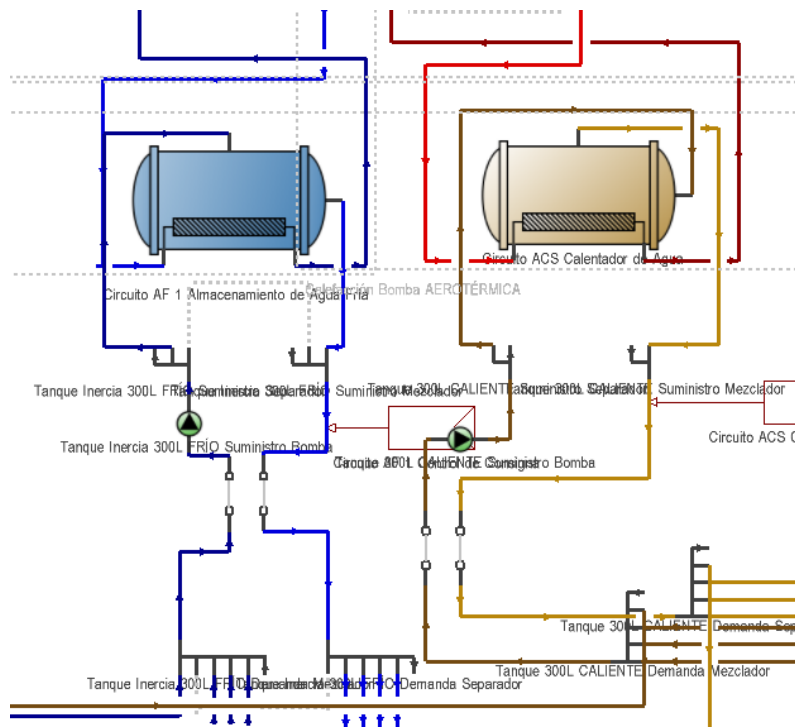


Figura 62: Tanque de inercia de 300L. Creación propia en DesignBuilder

En este subapartado se describe la configuración del tanque de inercia dentro del programa DesignBuilder. Debido a cómo está estructurado el software, no es posible representar un único tanque físico con funciones combinadas, por lo que ha sido necesario instalar dos tanques separados: uno para el circuito de agua fría y otro para el circuito de agua caliente.

Como puede observarse en el tanque situado a la derecha, el color de los conductos es amarillo en lugar de rojo, ya que se ha utilizado el tipo de circuito correspondiente a ACS (Agua Caliente Sanitaria). Este tipo es el único que permite asociar un tanque de agua caliente dentro del programa y, además, habilita su conexión con los equipos de climatización que demandan agua caliente. La Figura 62 muestra la configuración aplicada a ambos tanques.

Ambos depósitos cuentan con el mismo volumen, pero presentan una diferencia clave en su funcionamiento: el tanque de agua fría tiene una temperatura máxima configurada de 30 °C. Por tanto, en los periodos en los que la consigna térmica es de 40 °C, el programa desactiva el tanque frío y activa el tanque caliente, garantizando así el cumplimiento de los requerimientos térmicos.

Asimismo, se ha definido la ubicación del tanque en el modelo, seleccionando la zona RACK, que corresponde al lugar real donde está instalado.

En cuanto a la configuración térmica, esta se establece según lo indicado en la Figura 63, siguiendo los criterios definidos en la Tabla 14 “Horario del tanque de inercia de 300 L. Creación propia”, dentro del apartado 3.3.2. “Horario consigna del tanque de inercia de 300 L”. Una de las principales diferencias respecto a la realidad es que el programa limita la temperatura máxima a 40 °C, mientras que en el sistema real se alcanza una consigna de 45 °C. Esta discrepancia de 5 grados se tendrá en cuenta en el análisis de resultados.

General	
Nombre	Circuito ACS Calentador de Agua
Tipo	1-Mezclado
Volumen del tanque (m³)	0,3000
Conexión de Planta de Calor Externa	
<input checked="" type="checkbox"/> Conexión de planta de calor externa	
Tiempo de recuperación indirecta de calentamiento de agua (hr)	1,50
Configuración de Temperaturas	
Programación de consigna de temperatura	Parámetros uso Tanque inercia
Diferencia de temperatura de banda muerta (°C)	5,00
Límite de temperatura máxima (°C)	80,00
Configuración de Transferencia de Calor al Ambiente	
Indicador de temperatura ambiente	2-Zona
Zona de referencia para temperatura ambiente	CLINICA:RACK

Figura 63: Menú de configuración de los tanques de inercia. Creación propia en DesignBuilder

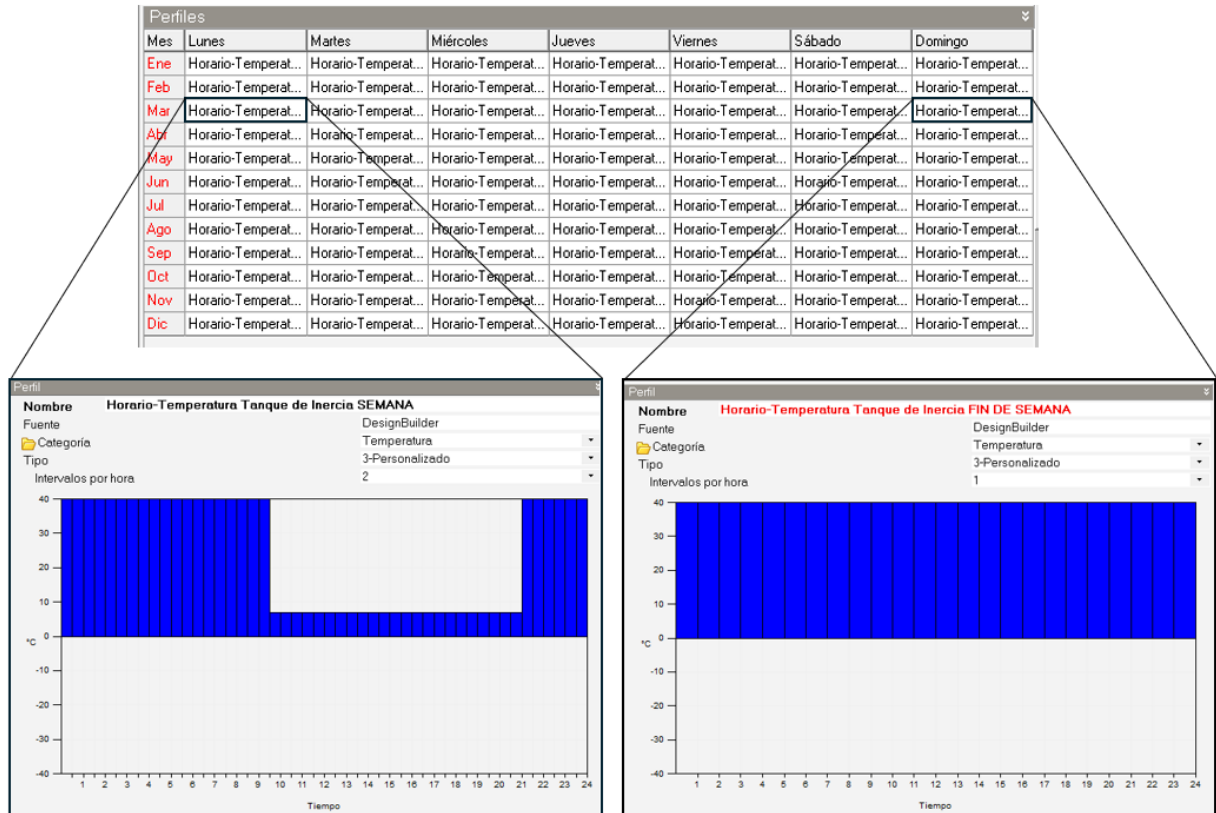


Figura 64: Menú de configuración de horario de funcionamiento de los tanques de inercia. Creación propia en DesignBuilder

4.3.4. Tanque de inercia de 100L

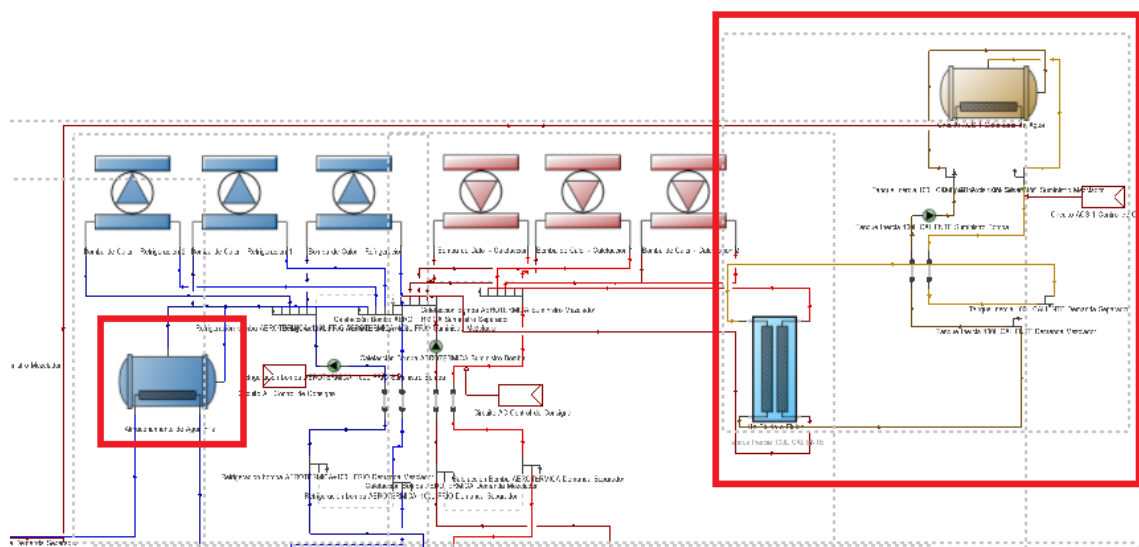


Figura 65 Tanque de inercia de 100L. Creación propia en DesignBuilder

En este subapartado se describe la configuración del tanque de inercia de 100 L, uno de los elementos del sistema cuya representación más difiere respecto a su funcionamiento real. Esta discrepancia se debe a que, en la instalación real, el tanque de inercia principal (300 L) cuenta con dos conexiones independientes para el control de temperatura: una vinculada a las bombas de calor aerotérmicas y otra conectada al tanque auxiliar de 100 L. Sin embargo, DesignBuilder únicamente permite integrar un único sistema de control térmico por tanque, lo que impide simular correctamente el comportamiento combinado del tanque de 100 L con el resto de los equipos de climatización.

Ante esta limitación, la solución adoptada ha sido integrar el tanque de agua fría directamente en el conducto de salida de las bombas de agua del circuito de refrigeración, lo que da lugar al bloque denominado “Refrigeración bomba de calor AEROTÉRMICA + 100 L frío”. Esta integración permite que el tanque de 100 L reciba también el aporte térmico generado por la bomba de calor geotérmica, facilitando su participación en el circuito. Sin embargo, esta configuración impide que el sistema active la bomba geotérmica únicamente en los momentos en los que su rendimiento es más elevado, como sí ocurre en la instalación real. En consecuencia, la eficiencia del sistema en la simulación será inferior a la real, y se prevé una caída del COP simulado respecto al comportamiento esperado, lo cual se tendrá en cuenta en el análisis de resultados.

De forma análoga, se ha planteado una solución para el tanque de agua caliente, aunque en este caso, como ya se ha explicado anteriormente, no existen conductos específicos para el agua caliente (color rojo) que admitan la inserción directa de un tanque. Por ello, se ha empleado un tanque de tipo ACS, similar al utilizado en la configuración del tanque de 300 L, pero conectado a un intercambiador de calor ideal. Esta solución permite simular el comportamiento de acumulación sin alterar directamente los cálculos del sistema de climatización.

La incorporación del intercambiador de calor ideal es necesaria debido a que el programa no permite conectar un tanque de ACS directamente a la zona de suministro (la cual debe contener el controlador de consigna). Tampoco es posible conectar un tanque de inercia directamente a la zona de demanda, ya que DesignBuilder no admite la existencia de dos suministros hidráulicos independientes hacia una misma zona. En este sentido, la zona de demanda solo puede conectarse a circuitos de consumo térmico directo, como el suelo

radiante o la Unidad de Tratamiento de Aire (UTA) con su correspondiente recuperador de calor.

Dado que ambos tanques están conectados directamente a las tuberías hidráulicas de salida de las bombas de calor, la temperatura de salida de los tanques de inercia será una mezcla térmica que dependerá de la configuración general del sistema. En concreto, estos tanques comparten la programación definida en la Tabla 14 “Horario del tanque de inercia de 300 L”, lo que implica que heredan los mismos valores de consigna establecidos para los tanques principales.

Además, debido a esta conexión directa, los tanques tienden a igualar su temperatura con la de salida de las bombas de calor, lo que provoca que pierdan en parte el comportamiento funcional que tienen en la instalación real, donde operan con lógica de control diferenciada. No obstante, su presencia en la simulación se mantiene con el fin de asegurar el aporte de potencia térmica al sistema global, aunque se reconoce que su representación no refleja completamente su papel específico en el funcionamiento real.

4.3.5. UTA (Unidad de Tratamiento de Aire)

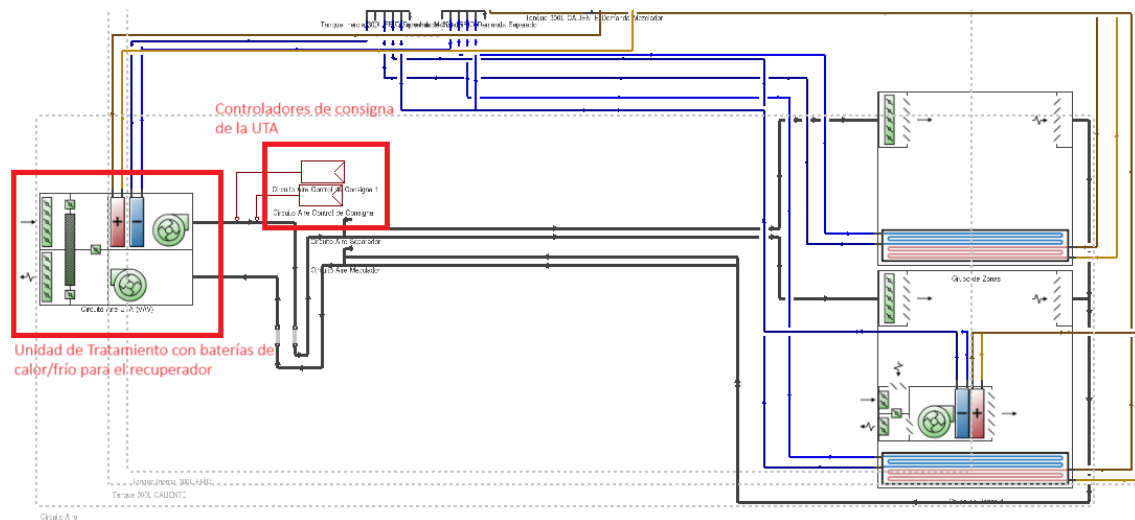


Figura 66 Unidad de Tratamiento de Aire. Creación propia en DesignBuilder

En este subapartado se describe la configuración de la Unidad de Tratamiento de Aire (UTA) en el programa DesignBuilder, siguiendo los parámetros preestablecidos en el apartado 3.3.1. “Equipo de recuperación”. La configuración incorpora tanto el sistema de recuperación de calor como las baterías de apoyo térmico, cuya función es proporcionar

soporte adicional al sistema mecánico de recuperación y al suelo radiante en condiciones de mayor demanda térmica.

Las baterías de climatización tienen una potencia nominal de 4,8 kW y 5,9 kW, respectivamente, y se encuentran conectadas al circuito principal del sistema, es decir, a la salida del tanque de inercia de 300 L, lo que permite que utilicen el mismo circuito hidráulico que alimenta otros equipos emisores.

En DesignBuilder, la configuración de una UTA con recuperador de calor se gestiona a través de dos menús diferenciados: el primero corresponde al funcionamiento de la ventilación mecánica, y el segundo al propio recuperador de calor. Ambos deben configurarse de forma coordinada para representar correctamente el comportamiento del sistema.

Adicionalmente, aunque desde el menú del recuperador es posible incluir una potencia térmica adicional (las baterías de apoyo), estas se configuran de manera independiente. Al hacer clic sobre cada batería dentro del esquema gráfico, se abre un menú específico donde puede asignarse una potencia térmica separada, siempre con la condición de que sea inferior o igual a la potencia nominal del recuperador.

Es en este apartado donde se han introducido los valores establecidos en el apartado 3.3.1. “Recuperador de calor”, correspondientes a las potencias de 4,8 kW y 5,9 kW y los 2000 m³/s garantizando así que el soporte térmico adicional del sistema quede correctamente representado en la simulación energética.

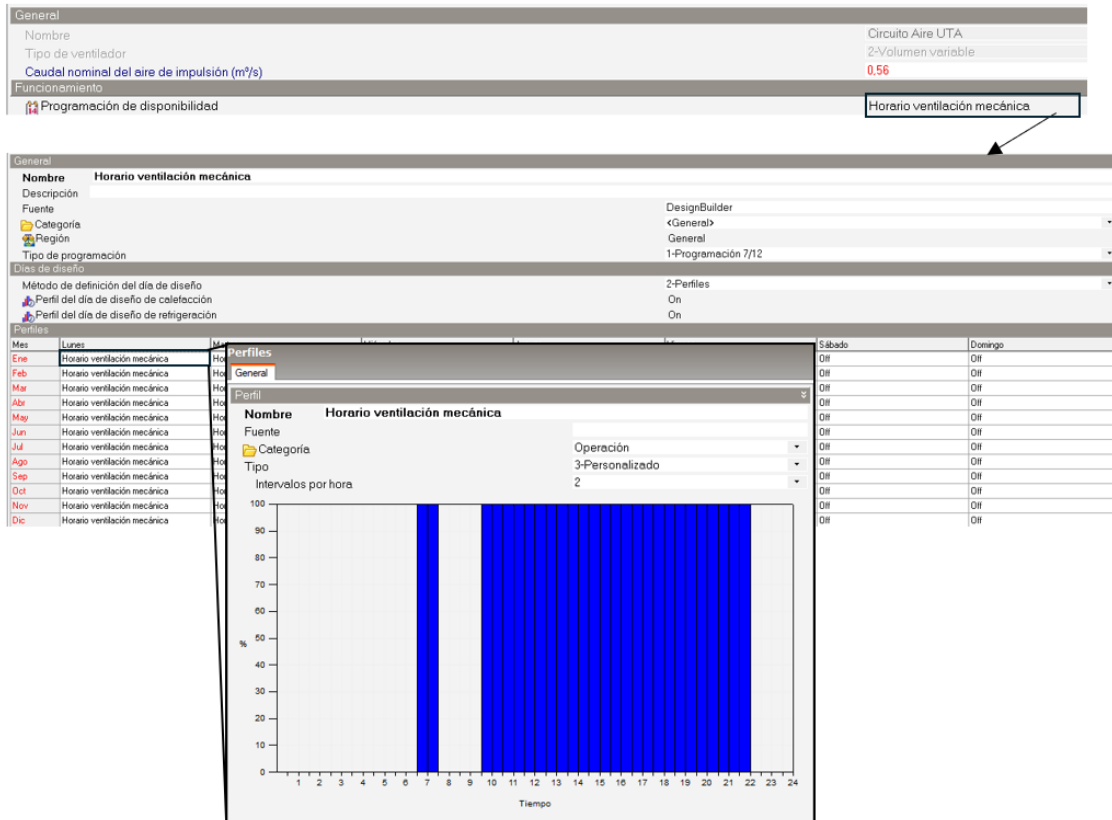


Figura 67: Menú de configuración de la ventilación mecánica en la UTA. Creación propia en DesignBuilder

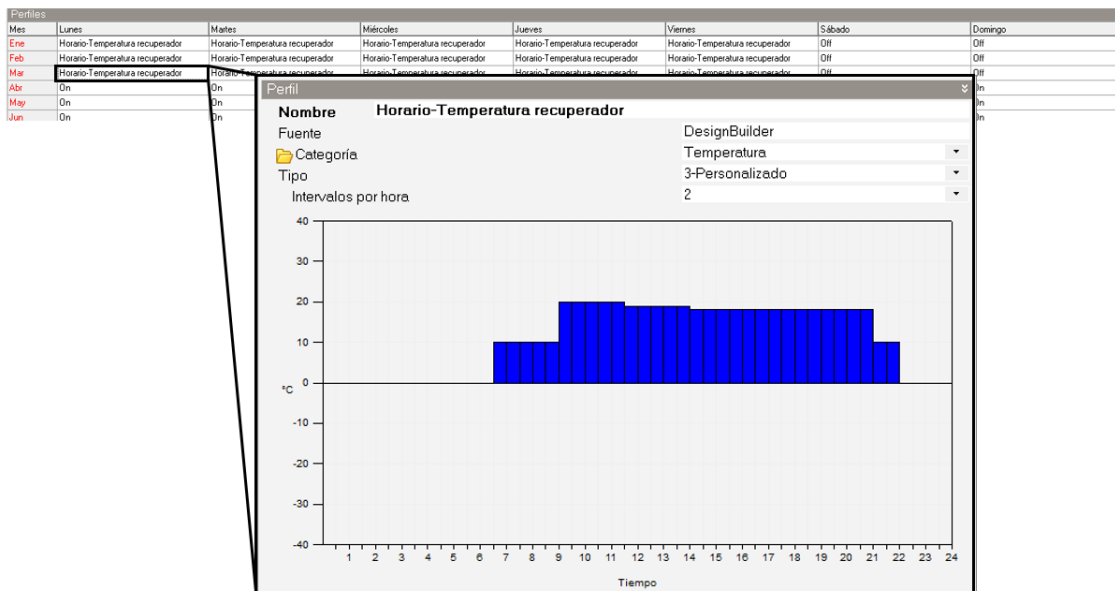


Figura 68: Menú de configuración de horario del recuperador de calor. Creación propia en DesignBuilder

A continuación, se explican las dos consignas principales configuradas en la UTA, las cuales definen el comportamiento del sistema de tratamiento de aire en la simulación.

La primera consigna está orientada a forzar al programa a mantener niveles de humedad relativa inferiores al 50 % en las zonas climatizadas, con el objetivo de asegurar un ambiente interior confortable y acorde con los requisitos higrotérmicos establecidos.

La segunda consigna tiene como finalidad mantener la temperatura del aire impulsado dentro de un rango habitable, concretamente entre 18 °C y 22 °C, como umbrales de confort térmico. Si bien, como se analizará en la sección de validación de datos, algunas zonas alcanzan temperaturas ligeramente superiores a los valores de consigna, la gran mayoría se mantiene dentro del rango definido, lo que demuestra la coherencia general del sistema en condiciones de simulación.

4.3.6. Instalación de los grupos de zonas

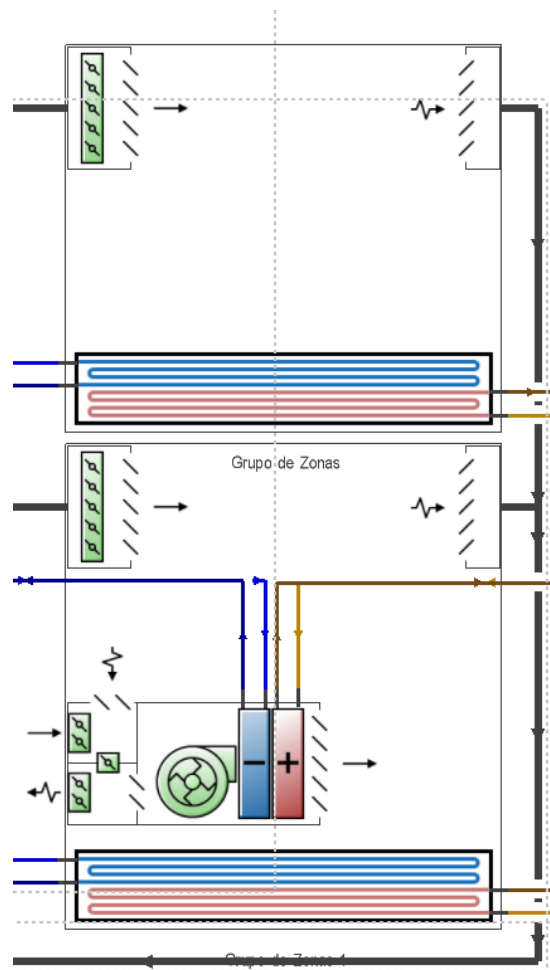


Figura 69: Grupos de zonas. Creación propia en DesignBuilder

En este subapartado se describe la configuración de los dos grupos de zonas definidos en el modelo, los cuales pueden observarse en la Figura 69.

El primer grupo de zonas agrupa todos aquellos espacios a los que no se les ha instalado un fancoil de soporte térmico, es decir, todas las zonas excepto la sala de espera, la recepción y la entrada. Además, este grupo se compone únicamente de las zonas en las que se ha definido la aplicación de una carga climatizada dentro de la simulación.

Las zonas que integran este primer grupo son: Despacho 1, Despacho 2, Gabinetes 1 a 6, Instalaciones, Office, Pasillo, Rack, Rayos y Recuperación. Todas estas zonas comparten un mismo esquema de distribución energética y de control de consigna, al no requerir un sistema adicional de refuerzo como los fancoils que se detallarán en el grupo restante.

Además, la configuración del suelo radiante y de los fancoils es idéntica en todas las salas en las que están instalados, manteniendo los mismos parámetros de control y dimensionado. La única diferencia significativa entre zonas radica en el caudal asignado a la ventilación mecánica, el cual ha sido modificado de forma manual para cada espacio, siguiendo los criterios establecidos en la Tabla 20: “Consigna de apertura límite de la ventilación. Creación propia”, incluida en el apartado 3.3.7 “Consignas límite de valores de apertura de ventilación”.

4.3.6.1. Suelo radiante

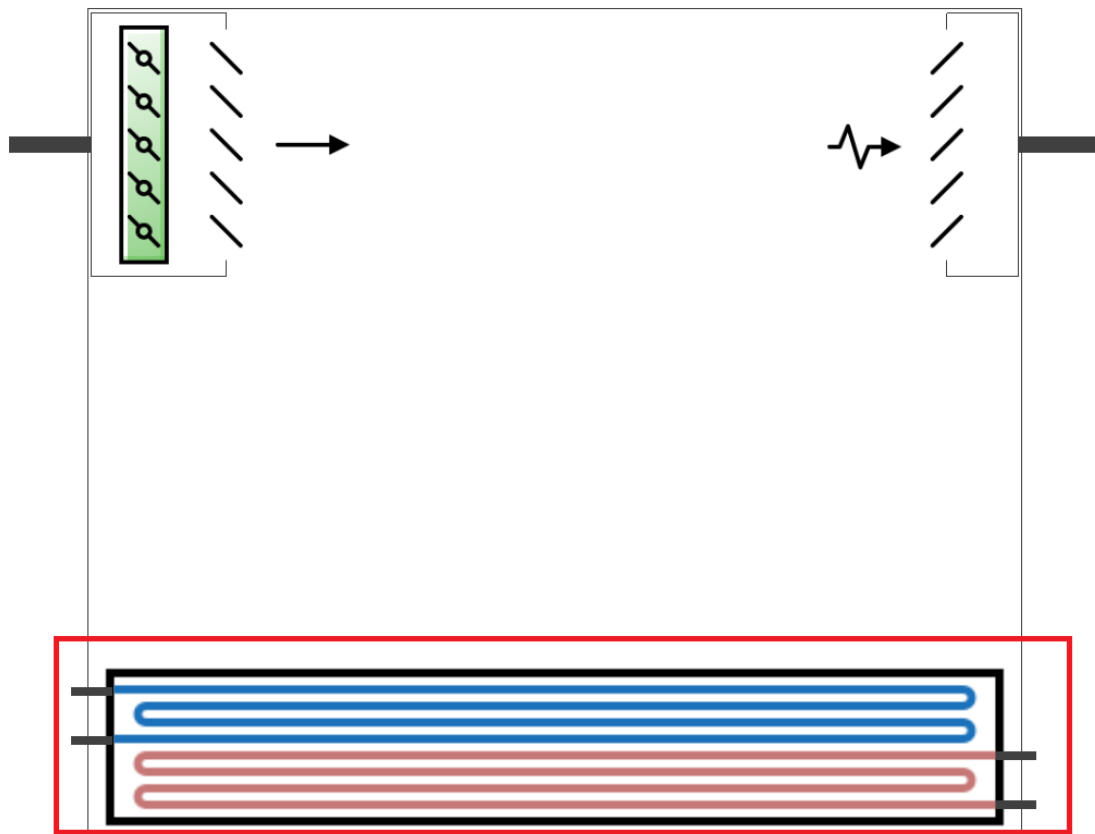


Figura 70: Suelo radiante. Creación propia en DesignBuilder

En este subapartado se detalla la configuración aplicada al sistema de suelo radiante dentro del modelo de simulación, siguiendo las especificaciones definidas en el apartado 3.2.4 “Suelo radiante”, y en particular los datos recogidos en la Tabla 10 “Especificaciones de suelo radiante”.

Además, gracias a diversas reuniones posteriores con el equipo técnico, se obtuvo información adicional que permitió incorporar características técnicas específicas del circuito, como la longitud y el diámetro interior del tubo, datos que han sido incorporados en el modelo para mejorar la precisión de la simulación.

Por otro lado, tal como se muestra en la Figura 71, se han configurado los horarios de funcionamiento del sistema de suelo radiante de acuerdo con lo descrito en el apartado 3.3.6 “Horario de funcionamiento del suelo radiante”, específicamente, la Tabla 18 y 19 “Horario de suelo radiante entre semana-fin de semana”, lo que garantiza la coherencia entre la operativa real del sistema y su representación en el entorno de DesignBuilder.

General	
Nombre	CLINICA-RAYOS Superficie radiante
Tipo	2-Caudal variable
Configuración de la tubería	
Diámetro interior de la tubería hidrónica (m)	0,013
Longitud de la tubería hidrónica (m)	Autosize
Número de circuitos	2-Calcular a partir de longitud del circuito
Longitud del circuito (m)	106,700
Funcionamiento	
Programación de disponibilidad	Suelo Radiante Enero-Febrero
Calefacción	
<input checked="" type="checkbox"/> Tiene elemento de calefacción	
Método de definición de la capacidad nominal de calefacción	2-Capacidad por área de suelo
Capacidad nominal de calefacción por área de suelo (W/m²)	60,000
Caudal máximo de agua caliente (m³/s)	Autosize
Control	
Rango de regulación (°C)	2,000
Refrigeración	
<input checked="" type="checkbox"/> Tiene elemento de refrigeración	
Método de dimensionado de refrigeración	2-Capacidad por área de suelo
Capacidad nominal de refrigeración por área de suelo (W/m²)	40,000
Caudal máximo de agua fría (m³/s)	Autosize

Figura 71: Menú de configuración del suelo radiante. Creación propia en DesignBuilder

Como bien se ha explicado antes, la figura 72 corresponde a la configuración de horarios en función de las Tablas 18-19.

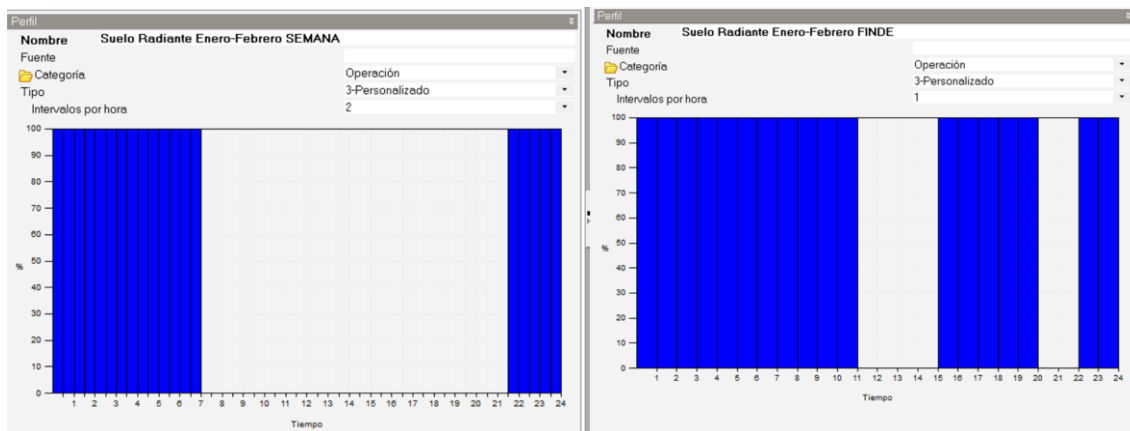


Figura 72: menú de configuración de horario suelo radiante. Creación propia en DesignBuilder

4.3.6.2. Apertura del sistema de VAV (volumen de aire variable)

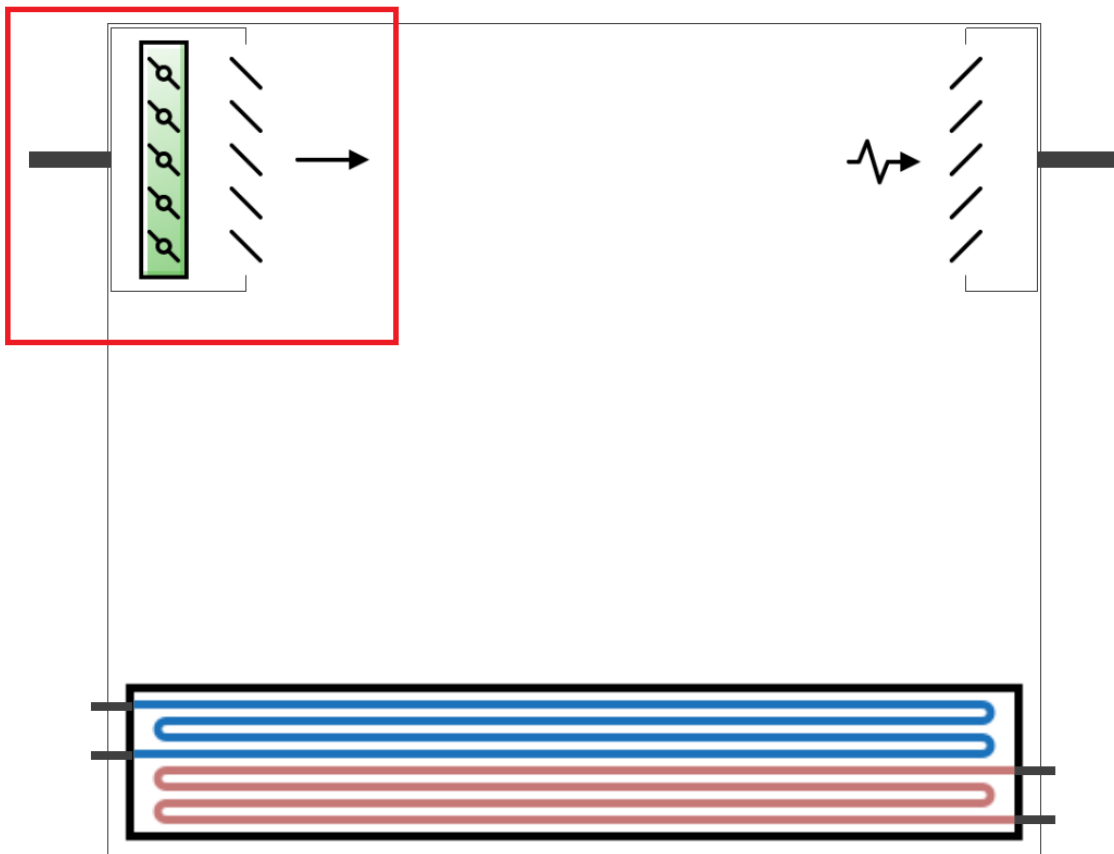


Figura 73: VAV (sistema de Volumen de Aire Variable). Creación propia en DesignBuilder

El menú de configuración del sistema VAV (Volumen de Aire Variable) en DesignBuilder es relativamente sencillo. La configuración se realiza zona por zona, únicamente en aquellas que cuentan con acceso a ventilación mecánica. En cada caso, se introduce el valor correspondiente a la apertura mínima del sistema de ventilación, según lo indicado en la Tabla 22 “Consigna límite de ventilación. Creación propia”.

Además, para delimitar el caudal máximo de aire que puede entrar en cada zona, se han tomado como referencia los valores establecidos en la Tabla 12 “Caudales de ventilación nominal. Creación propia”. No obstante, es importante señalar que DesignBuilder solo permite asignar directamente la apertura mínima, y por tanto, la apertura máxima no puede ser introducida explícitamente en el programa, lo que constituye una limitación a tener en cuenta en la simulación.

4.3.6.3. Fancoils de Sala de espera, Recepción y entrada

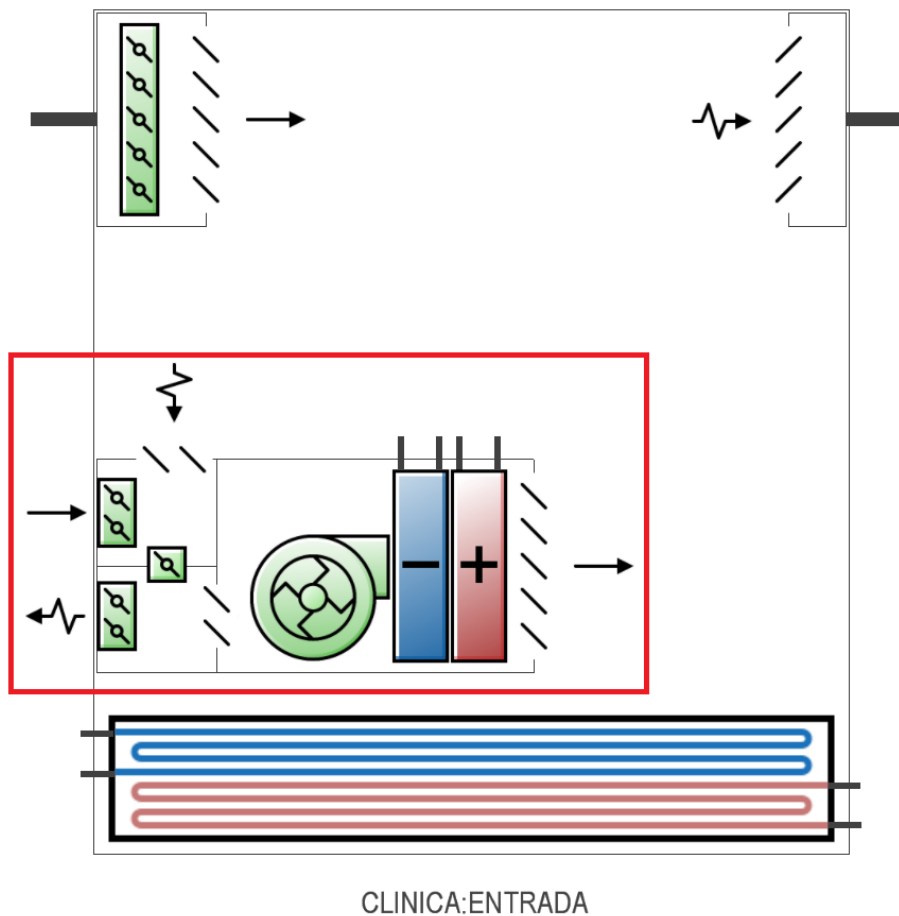


Figura 74: Fancoils. Creación propia en DesignBuilder

La configuración aplicada a los fancoils en el modelo sigue los parámetros definidos en la Tabla 8 “Especificaciones de los Fancoils”, perteneciente al apartado 3.2.2. “Fancoils”. En ella se indican los valores de apertura mínima y máxima, que determinan el rango de funcionamiento del sistema según las condiciones térmicas de cada zona.

El método de configuración es similar al empleado para la UTA. Desde el menú principal del sistema, se establece el caudal nominal correspondiente al equipo. Para definir la potencia de las baterías de frío y calor, se debe hacer clic sobre los bloques azul (frío) y rojo (calor) en la representación gráfica del sistema. Al abrirse el menú contextual de cada bloque, se introducen los valores de potencia y características técnicas de las baterías, permitiendo ajustar su comportamiento a los valores reales definidos en el proyecto.

En lo que respecta al horario de funcionamiento de los fancoils, se ha optado por aplicar el mismo horario definido para la ventilación mecánica, dado que no se dispone de una

programación específica para estos equipos. Esta configuración permite mantener la coherencia operativa del sistema en ausencia de criterios diferenciados. El horario utilizado corresponde al descrito en la Tabla 17, dentro del apartado 3.3.5. “Horario de ventilación mecánica”.

4.4. Escenario de simulación

En este apartado se expone el escenario de simulación planteado, así como el razonamiento que ha motivado su elección.

El sistema de control de climatización implementado en la clínica presenta un elevado nivel de detalle, con consignas ajustadas individualmente para cada parámetro en función de las condiciones climáticas cambiantes. No obstante, el programa que centraliza esta información y que ha servido como fuente para la presente modelización únicamente conserva los horarios-consigna correspondientes a la última configuración vigente, lo cual supone una limitación significativa.

Concretamente, si se ha producido una transición desde el régimen térmico invernal (vigente hasta febrero) hacia un comportamiento más variable propio del mes de marzo, los valores de consigna horarios correspondientes a febrero se sobrescriben y no pueden recuperarse. Esta restricción fue detectada en el momento en que se inició el trabajo de simulación centrado en marzo, y provocó la pérdida de todos los datos de consigna anteriores, imposibilitando la recreación de escenarios correspondientes a meses previos.

Por este motivo, y con el fin de mantener la coherencia de los datos disponibles, se tomó la decisión de emplear el mes de marzo como unidad de análisis y entorno de simulación, ya que constituye el único periodo con información horaria completa y verificable, permitiendo así un desarrollo riguroso de los escenarios de control térmico y energético en el modelo.

4.5. Datos para validación – sistema en operación

En este apartado se exponen los datos empleados para la validación de la simulación energética, con el objetivo de comprobar que los valores obtenidos mediante el modelo sean lo más representativos y próximos posible a los datos reales registrados en la clínica.

Para ello, se han considerado los siguientes parámetros de control:

- ❖ Temperatura exterior

- ❖ Humedad exterior
- ❖ Temperatura media de la clínica
- ❖ Concentración media de CO₂ en la clínica
- ❖ Temperatura de cada una de las zonas
- ❖ Temperatura de ida de la bomba de calor
- ❖ Temperatura del tanque de inercia de 300 L
- ❖ Temperatura del tanque de inercia de 100
- ❖ Temperatura de impulsión del suelo radiante
- ❖ Temperatura de impulsión del recuperador de aire

Para cada uno de estos parámetros se realizarán gráficas comparativas con el fin de proporcionar una representación visual clara del comportamiento simulado frente al comportamiento real. Además, se adjuntará la tabla completa de datos utilizados, la cual incluye registros horarios desde el 1 al 31 de marzo, es decir, un total de 744 filas de datos.

Los gráficos han sido diseñados siguiendo una estética coherente con la que ofrece el software DesignBuilder, y se ha optado por representar las fechas en intervalos de tres días para mejorar la legibilidad visual. No obstante, a nivel de cálculo y representación interna, se incluyen la totalidad de los datos correspondientes a todos los días del mes, asegurando así la fidelidad estadística de la comparación.

4.5.1. Temperatura exterior

En este subapartado se representa la temperatura exterior registrada en el entorno de la clínica, medida mediante un termostato instalado en la entrada principal del edificio. Los datos corresponden al periodo comprendido entre el 1 y el 31 de marzo de 2025, y se han representado los valores máximos registrados por hora.

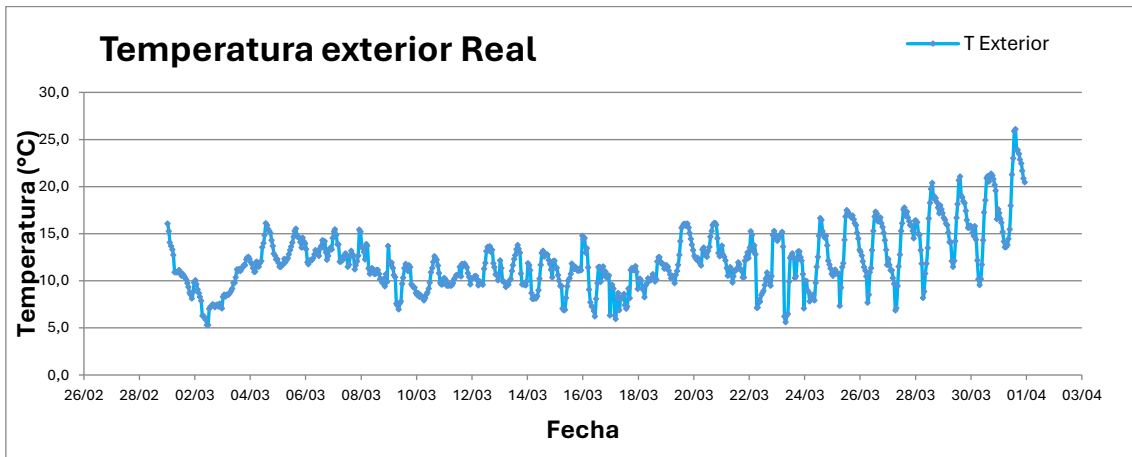


Figura 75: Gráfica temperatura exterior-fecha. Creación propia

4.5.2. Humedad exterior

En este subapartado se representa la humedad relativa exterior en el entorno de la clínica, medida mediante un higrómetro ubicado en la entrada principal del edificio. Los datos corresponden al periodo comprendido entre el 1 y el 31 de marzo de 2025, y se han representado los valores máximos registrados por hora.

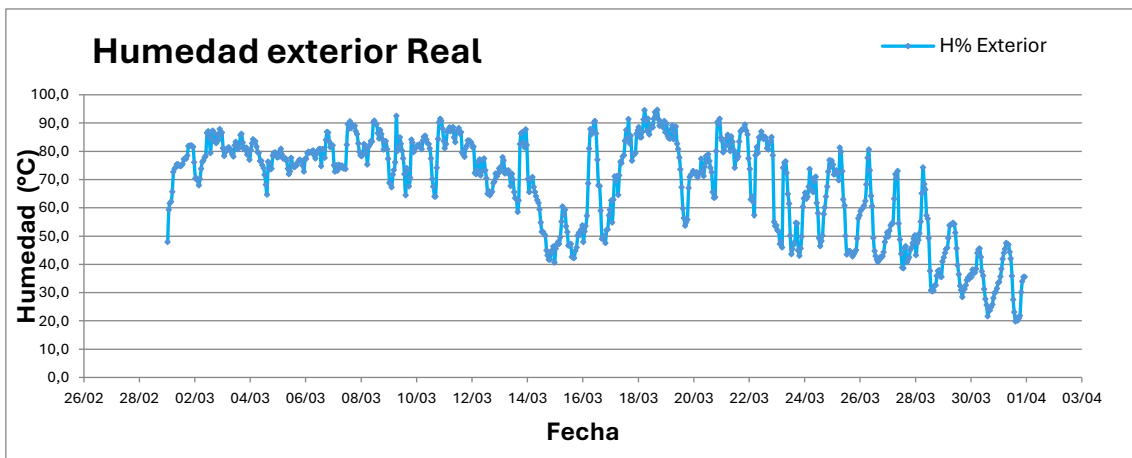


Figura 76: Gráfica humedad exterior-fecha. Creación propia

4.5.3. Temperatura media de la clínica

En este subapartado se representa la temperatura media de la clínica, calculada a partir del promedio de las lecturas registradas por los termostatos instalados en cada una de las zonas del edificio. La serie de datos abarca el periodo comprendido entre el 1 y el 31 de marzo de 2025, y se han representado los valores máximos correspondientes a cada hora.

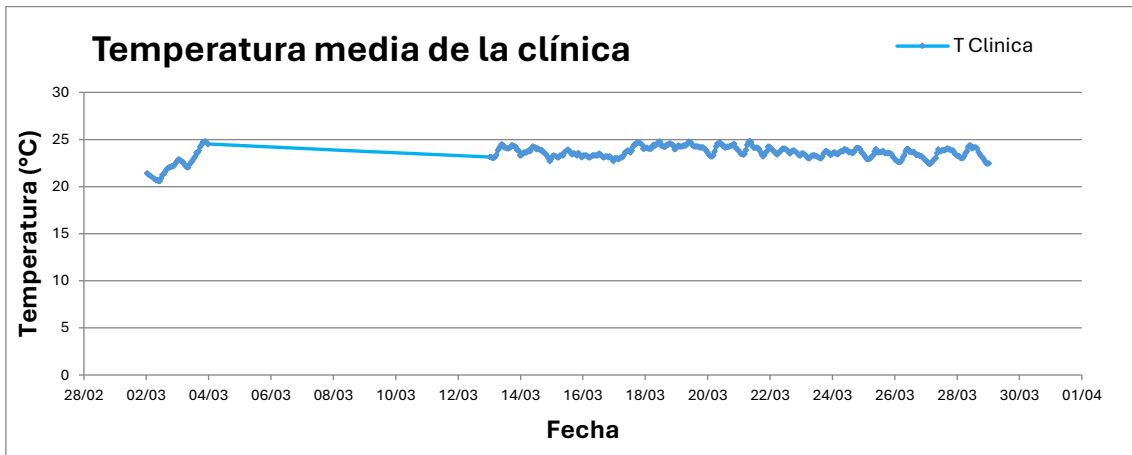


Figura 77: Gráfica temperatura media de la clínica-fecha. Creación propia

4.5.4. CO2 medio de la clínica

En este subapartado se representa la concentración de CO₂ en el interior de la clínica, medida mediante un sensor instalado en la sala de espera, considerado como espacio representativo de la calidad del aire interior del edificio. La gráfica abarca el periodo comprendido entre el 1 y el 31 de marzo de 2025, y muestra los valores máximos registrados por hora.

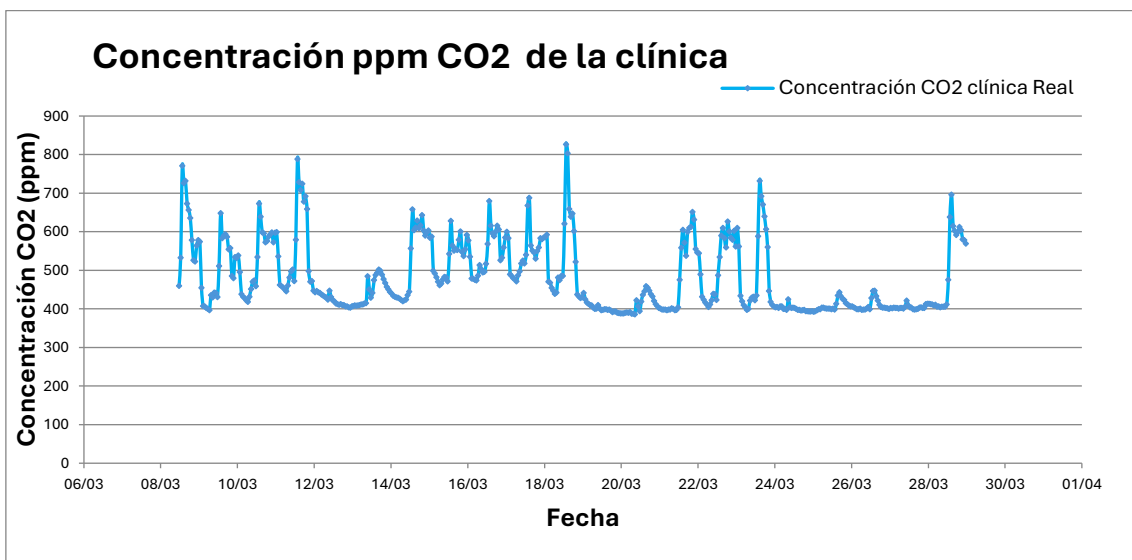


Figura 78: Gráfica CO2 medio de la clínica-fecha. Creación propia

4.5.5. Temperatura de cada una de las zonas

En este subapartado se presentan las temperaturas medias registradas en cada una de las zonas de la clínica odontológica durante el periodo comprendido entre el 1 y el 31 de marzo de 2025. La representación gráfica se ha realizado a partir de los valores máximos

de cada hora, si bien para la comparación cuantitativa con los resultados de la simulación se tomará en consideración la totalidad de los datos horarios disponibles.

Con el fin de mejorar la legibilidad y comprensión visual de los resultados en la descripción del proyecto, se ha optado por una organización gráfica por grupos funcionales de espacios. Así, en la Figura 79 se muestran todas las zonas superpuestas en un mismo gráfico, mientras que las siguientes figuras desglosan los datos por categorías:

- ❖ Figura 80: Temperaturas en los despachos
- ❖ Figura 81: Temperaturas en los gabinetes
- ❖ Figura 82: Temperaturas en los quirófanos
- ❖ Figura 83: Temperaturas en las zonas restantes (distribuidor, esterilización, recepción, recuperación y sala de espera)

Este enfoque permite observar con mayor claridad el comportamiento térmico diferenciado de cada conjunto de espacios, facilitando el análisis posterior en el proceso de validación del modelo.

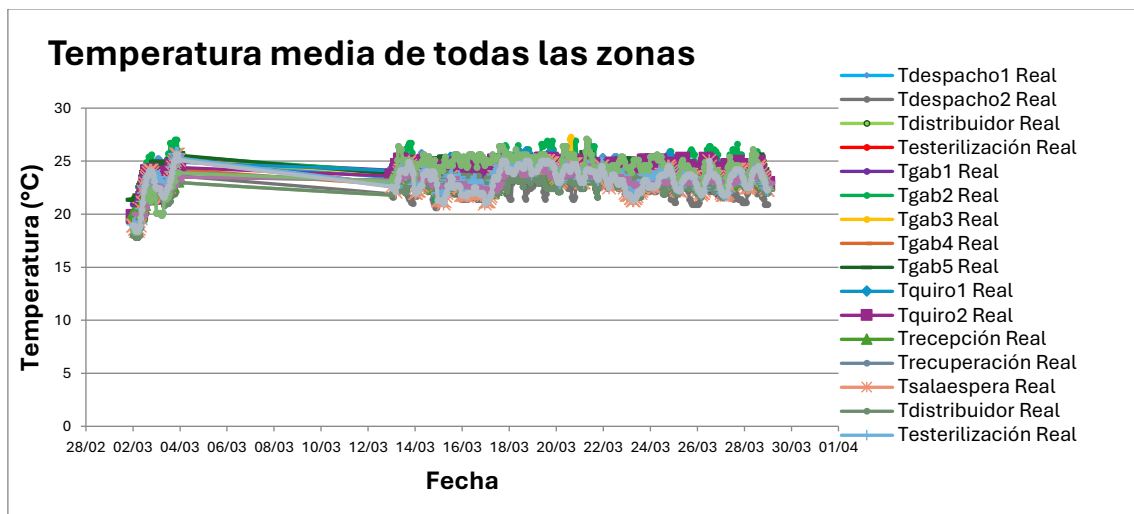


Figura 79: Gráfica temperatura media de cada zona-fecha. Creación propia

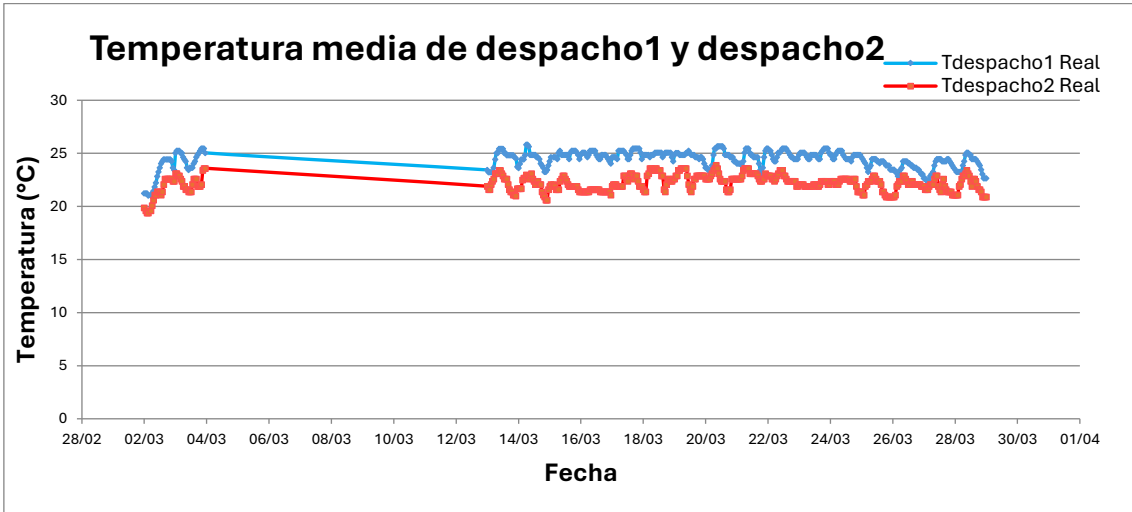


Figura 80: Gráfica temperatura media de los despachos-fecha. Creación propia

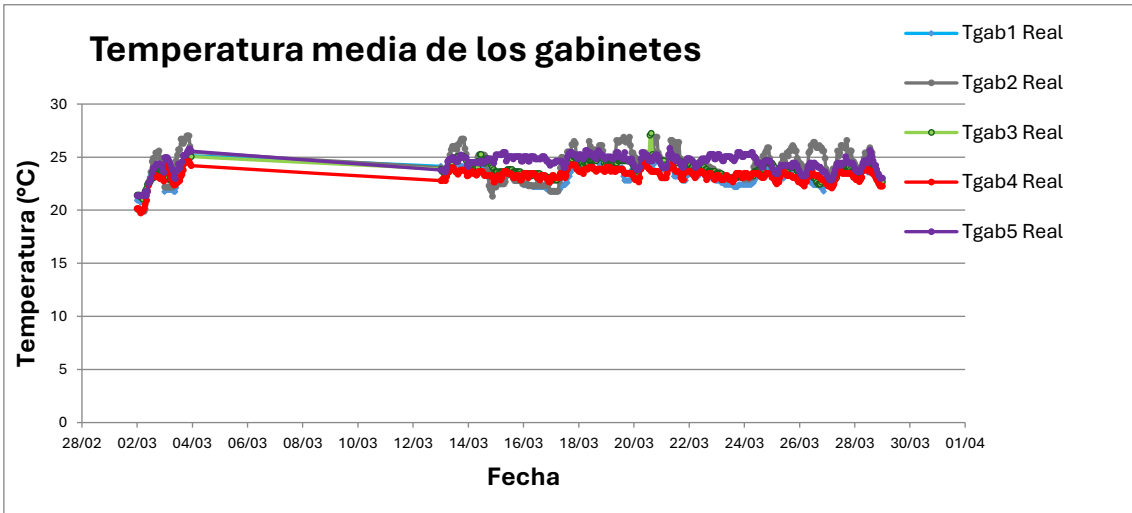


Figura 81: Gráfica temperatura media de los gabinetes-fecha. Creación propia

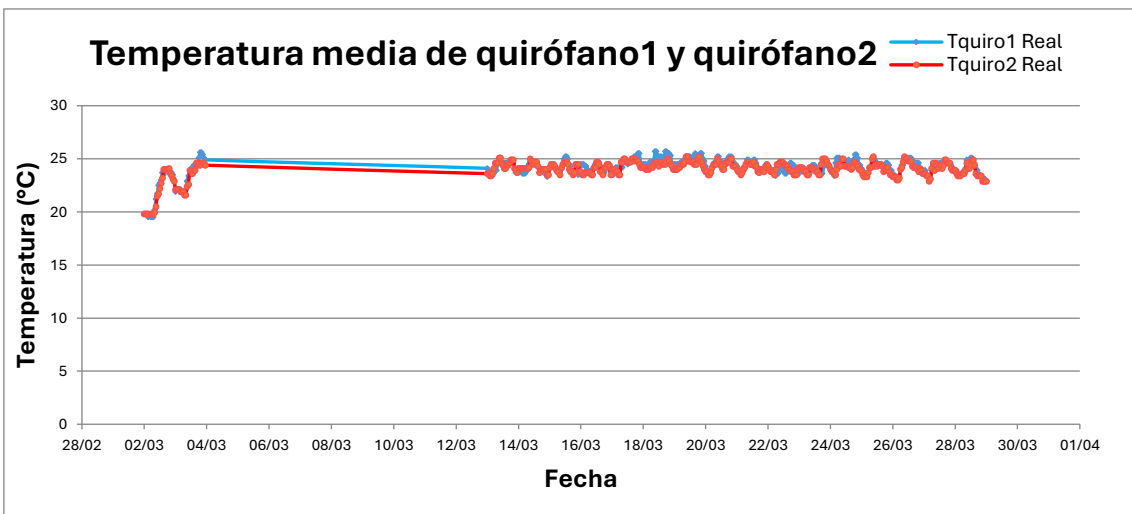


Figura 82: Gráfica temperatura media de los quirófanos-fecha. Creación propia

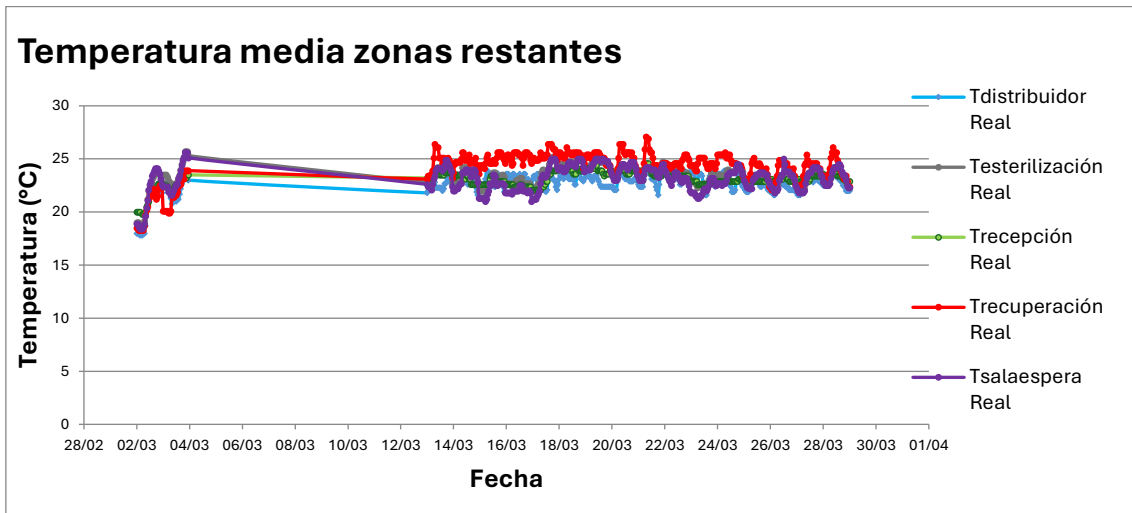


Figura 83: Gráfica temperatura media de las habitáculos restantes-fecha. Creación propia

4.5.6. Temperatura ida bomba de calor

En este subapartado se representa la temperatura de salida de la bomba de calor, correspondiente al flujo térmico que se inyecta en el intercambiador del tanque de inercia, durante el periodo comprendido entre el 1 y el 31 de marzo de 2025.

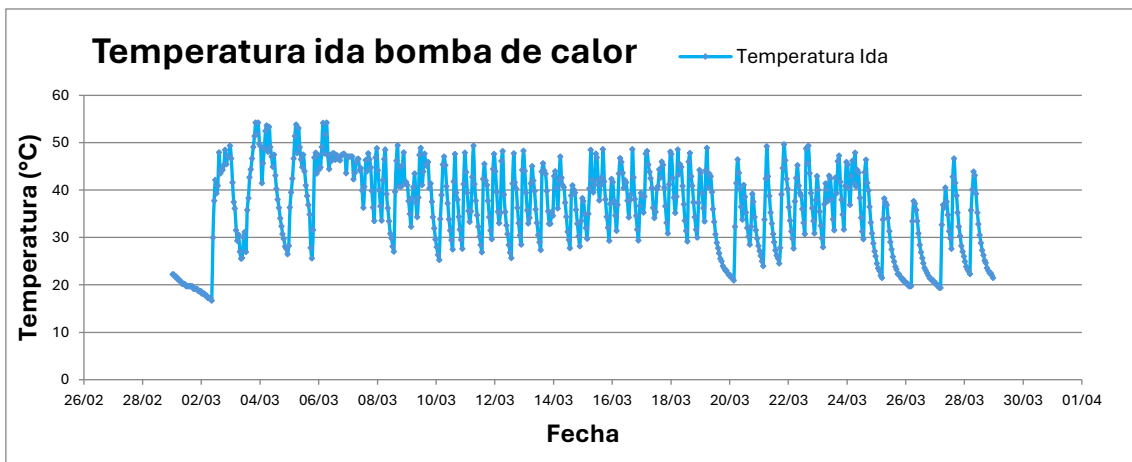


Figura 84: Gráfica temperatura ida bomba de calor-fecha. Creación propia

4.5.7. Temperatura del tanque de inercia de 300 L

En este subapartado se representa la temperatura interior del tanque de inercia de 300 litros, el cual actúa como elemento de distribución central para todos los sistemas de climatización del edificio. La representación gráfica abarca el periodo comprendido entre el 1 y el 31 de marzo de 2025, y muestra los valores máximos registrados por hora, con

el fin de analizar la respuesta térmica del sistema frente a la demanda global y evaluar su correspondencia con los resultados obtenidos en la simulación energética.

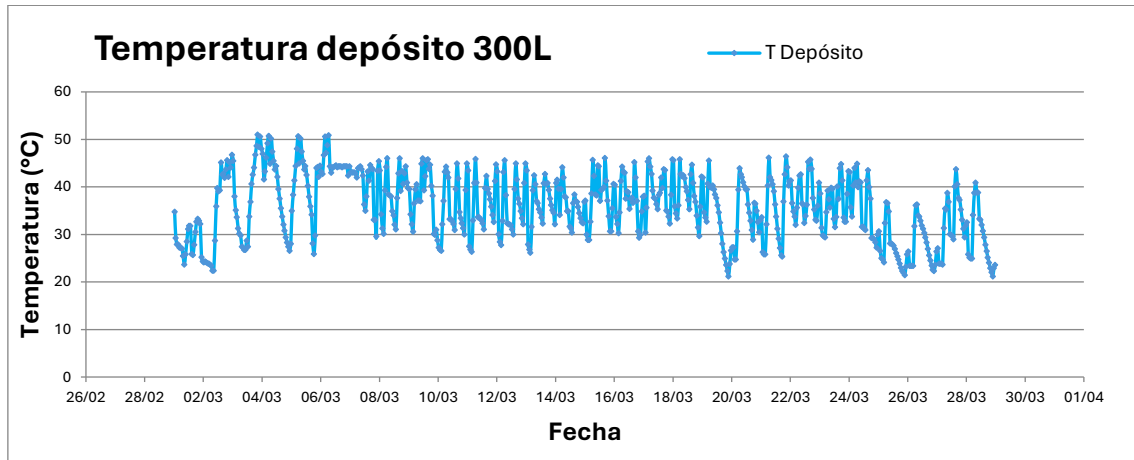


Figura 85: Gráfica temperatura del tanque de inercia de 300L-fecha. Creación propia

4.5.8. Temperatura del tanque de inercia de 100 L

En este subapartado se representa la temperatura interior del tanque de inercia de 100 litros, el cual actúa como elemento de soporte térmico del tanque principal de 300 litros. La gráfica recoge los datos correspondientes al periodo comprendido entre el 1 y el 31 de marzo de 2025, mostrando los valores máximos registrados por hora.

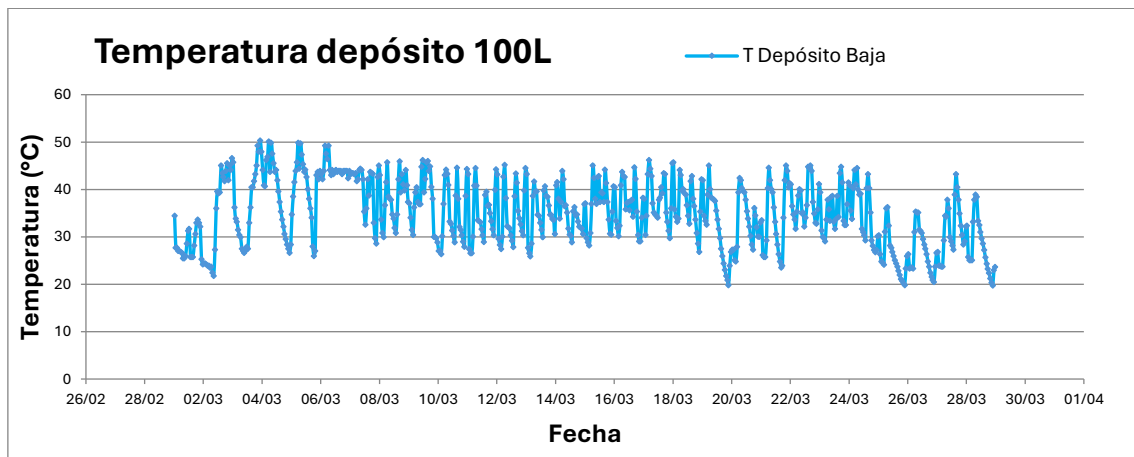


Figura 86: Gráfica temperatura del tanque de inercia de 100L-fecha. Creación propia

4.5.9. Temperatura de impulsión del Suelo Radiante

En este subapartado se representa la temperatura de impulsión del sistema de suelo radiante, correspondiente al periodo comprendido entre el 1 y el 31 de marzo de 2025. La

gráfica elaborada muestra los valores máximos registrados por hora, permitiendo analizar el comportamiento térmico del sistema de emisión a baja temperatura y su respuesta ante las distintas condiciones de demanda energética del edificio durante el mes de estudio.

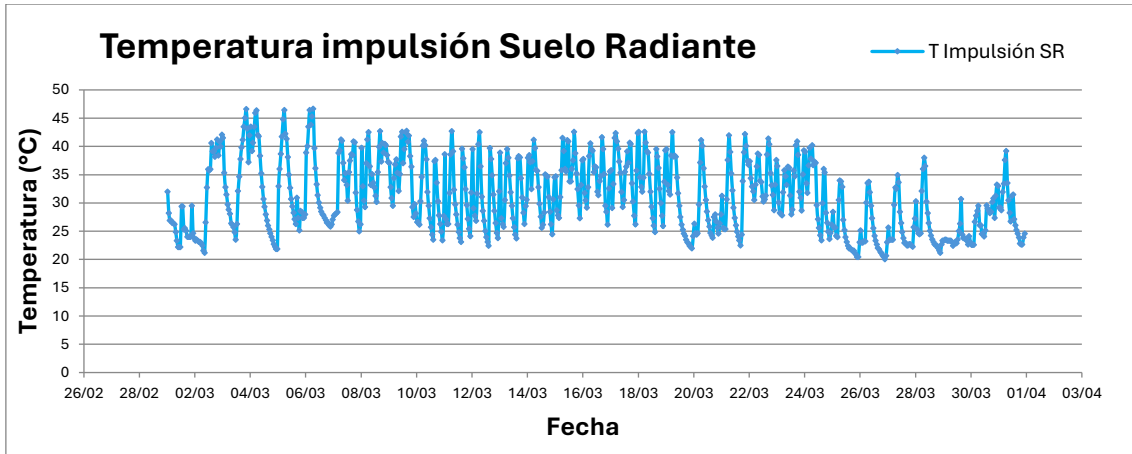


Figura 87: Gráfica temperatura impulsión de SR-fecha. Creación propia

4.5.10. Temperatura impulsión del recuperador de aire

En este subapartado se representa la temperatura de impulsión del aire procedente del recuperador de calor, correspondiente al periodo comprendido entre el 1 y el 31 de marzo de 2025. La gráfica muestra los valores máximos registrados por hora, con el objetivo de analizar el comportamiento del sistema de ventilación en términos de aporte térmico y su interacción con las condiciones ambientales interiores y exteriores a lo largo del mes de estudio.

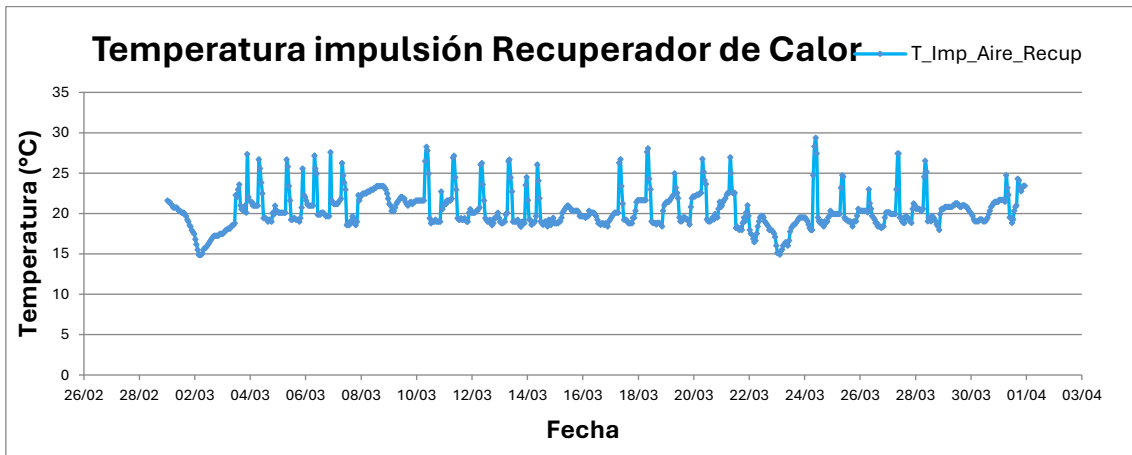


Figura 88: Gráfica temperatura impulsión del recuperador de calor-fecha. Creación propia

4.6. Herramientas estadísticas para la validación de la simulación

En este apartado se expondrán las herramientas estadísticas que se utilizarán para la comparación, validación y análisis de los resultados obtenidos en la simulación. Estas herramientas permitirán evaluar el grado de concordancia entre los valores reales y los valores simulados, así como identificar posibles desviaciones significativas y patrones de comportamiento térmico dentro del modelo.

Las herramientas que se utilizarán en el apartado 5 “Análisis de resultados” para la comparación y validación del modelo son las siguientes:

- ❖ Comparación hora a hora entre los valores reales registrados y los valores simulados por el modelo.
- ❖ Análisis del MAE (Error Absoluto Medio), que permite cuantificar la magnitud promedio del error, sin considerar la dirección de la desviación.

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i^{sim} - y_i^{real}| \quad \text{Ecuación 4}$$

Donde:

y_i^{sim} : valor simulado en el instante i

y_i^{real} : valor real en el instante i

n : número total de observaciones

$|\cdot|$: valor absoluto

Que además quedará integrado en el programa Excel para su cálculo mediante la siguiente fórmula: = PROMEDIO (ABS (Simulado - Real))

- ❖ Análisis del MAPE (Error Porcentual Absoluto Medio), que expresa el error en términos relativos, permitiendo valorar la precisión de la simulación en proporción al valor real.

$$MAPE = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{y_i^{sim} - y_i^{real}}{y_i^{real}} \right| \quad \text{Ecuación 5}$$

Donde comparte los mismos parámetros que la fórmula del MAE, que además quedará integrado en el programa Excel para su cálculo mediante la siguiente fórmula: = (PROMEDIO (ABS ((Simulado - Real) /Real))) *100

5. Resultados

5.1. Resultados de validación del modelo

En este subapartado se llevará a cabo el análisis y comparación de los resultados obtenidos a partir de la simulación, empleando las herramientas estadísticas descritas en el apartado 4.6., y siguiendo el orden de variables planteado en el apartado 4.5. “Datos para la validación”.

La comparación se realizará entre los valores simulados y los datos reales registrados durante el periodo de estudio, utilizando métricas como el MAE (Error Absoluto Medio) y el MAPE (Error Porcentual Absoluto Medio), así como una comparación hora a hora, con el fin de evaluar el grado de ajuste del modelo. Las variables analizadas serán las siguientes:

- ❖ Temperatura exterior
- ❖ Humedad exterior
- ❖ Temperatura media de la clínica
- ❖ Concentración media de CO₂ en la clínica
- ❖ Temperatura de cada una de las zonas
- ❖ Temperatura de ida de la bomba de calor
- ❖ Temperatura de retorno de la bomba de calor
- ❖ Temperatura del tanque de inercia de 300 L
- ❖ Temperatura del tanque de inercia de 100
- ❖ Temperatura de impulsión del suelo radiante
- ❖ Temperatura de impulsión del recuperador de aire

Parámetros	Variabes	Excelente	Bueno	Aceptable	Mejorable
MAE	Temperatura	< 1 °C	1-2 °C	2-3 °C	> 3 °C
	Humedad	< 3 %	3-5 %	5-7 %	> 7 %
	ppm CO2	< 100 ppm	100-150 ppm	150-250 ppm	> 250 ppm
MAPE	Temperatura	< 5%	5-10 %	10-13 %	> 13 %
	Humedad	< 7 %	7-12 %	12-15 %	> 15 %
	ppm CO2	< 10 %	10-15 %	15-25 %	> 25 %

Figura 89: Clasificación de resultados obtenidos. Creación propia

Con el objetivo de clasificar los resultados obtenidos en el proceso de validación, se ha optado por agruparlos en cuatro categorías de calidad: excelente, bueno, aceptable y mejorable. Esta clasificación se ha definido con base en criterios normativos y en el tipo de uso del edificio.

Como referencia se ha adoptado la norma UNE-EN 16798-1:2020, que establece las categorías de calidad del ambiente interior (IDA). En el contexto de este proyecto, se ha tomado como objetivo el cumplimiento de la categoría IDA 2, recomendada para espacios como despachos, consultas y salas de espera, donde se requiere un nivel de confort elevado, pero no excepcional.

En función de dicha categoría, se han considerado aceptables aquellas desviaciones que se mantengan dentro de los siguientes márgenes respecto a los valores reales:

- ❖ $\pm 2-3$ °C en temperatura
- ❖ $\pm 5-7$ % en humedad relativa
- ❖ $\pm 150-250$ ppm en concentración de CO₂

Siempre que se respeten estos límites y se mantengan dentro de los rangos definidos por la norma, los resultados se clasificarán como aceptables. Valores dentro de márgenes aún más estrechos serán considerados buenos o excelentes, mientras que desviaciones superiores a estos umbrales se etiquetarán como mejorables, indicando posibles áreas de ajuste en el modelo de simulación.

5.1.1. Temperatura exterior

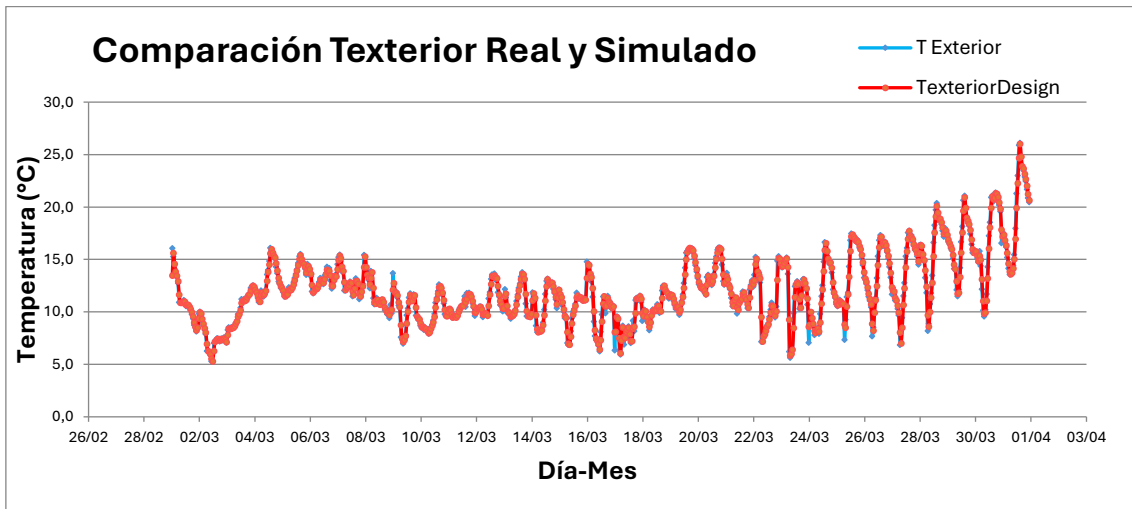


Figura 90: Comparación de Temperatura exterior Real y Simulada. Creación propia

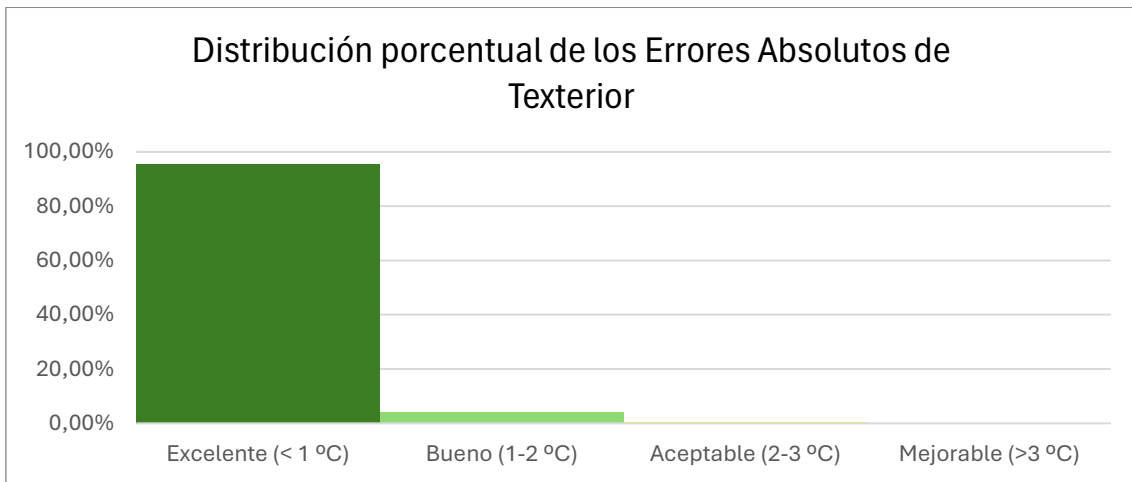


Figura 91: Distribución porcentual de los Errores Absolutos de Temperatura exterior. Creación propia

Parámetros de validación	Texterior
Error absoluto medio (MAE)	0,29
Error porcentual medio absoluto (MAPE)	2,6%

Tabla 33: Valores de MAE y MAPE de Temperatura exterior. Creación propia

Como es de esperar, el error asociado a la temperatura exterior es mínimo en comparación con los valores reales, debido a que se han forzado dichos valores mediante su introducción directa en el archivo climático EPW modificado. No obstante, la ligera diferencia observada en algunos momentos frente a los datos reales sugiere que existen otros parámetros dentro del modelo de simulación que influyen en la temperatura exterior

simulada, más allá de la información contenida en el propio archivo climático. Estos factores pueden estar relacionados con la configuración de intercambios térmicos, radiación incidente o condiciones específicas del entorno construido, y reflejan la complejidad inherente al modelado energético detallado.

5.1.2. Humedad exterior

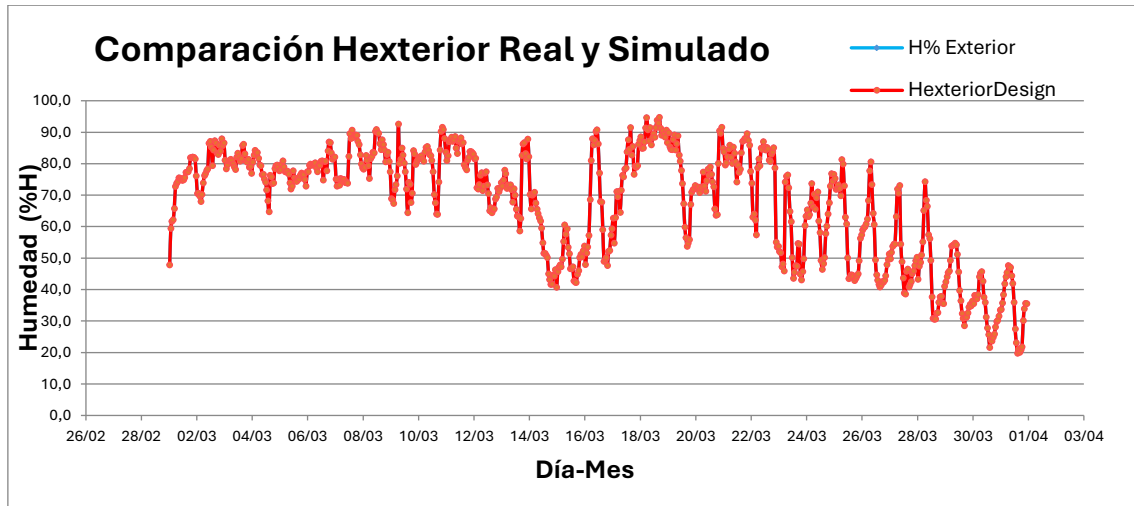


Figura 92: Comparación de la Humedad exterior Real y Simulada. Creación propia

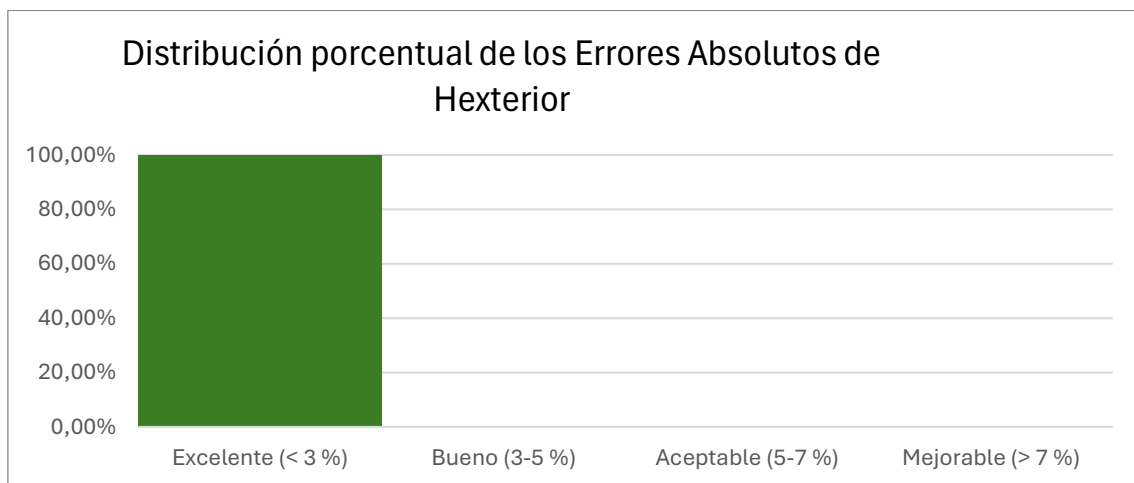


Figura 93: Distribución porcentual de los Errores Absolutos de Humedad exterior. Creación propia

Parámetros de validación	Texterior
Error absoluto medio (MAE)	0,00
Error porcentual medio absoluto (MAPE)	0,0%

Tabla 34: Valores de MAE y MAPE de Humedad exterior. Creación propia

Como es de esperar, al igual que en el caso de la temperatura exterior, la comparación entre los valores reales y simulados de humedad relativa exterior resulta prácticamente exacta, dado que ambos parámetros han sido forzados e introducidos manualmente en el archivo climático utilizado por el programa.

5.1.3. Temperatura media de la clínica

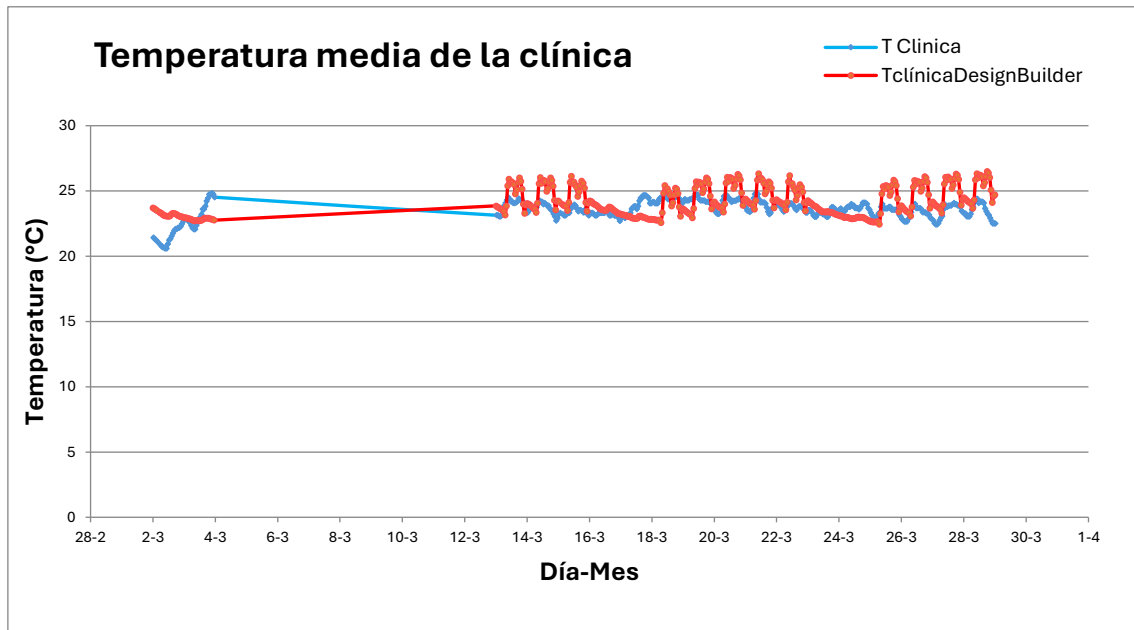


Figura 94: Comparación de Temperatura de la clínica Real y Simulada. Creación propia

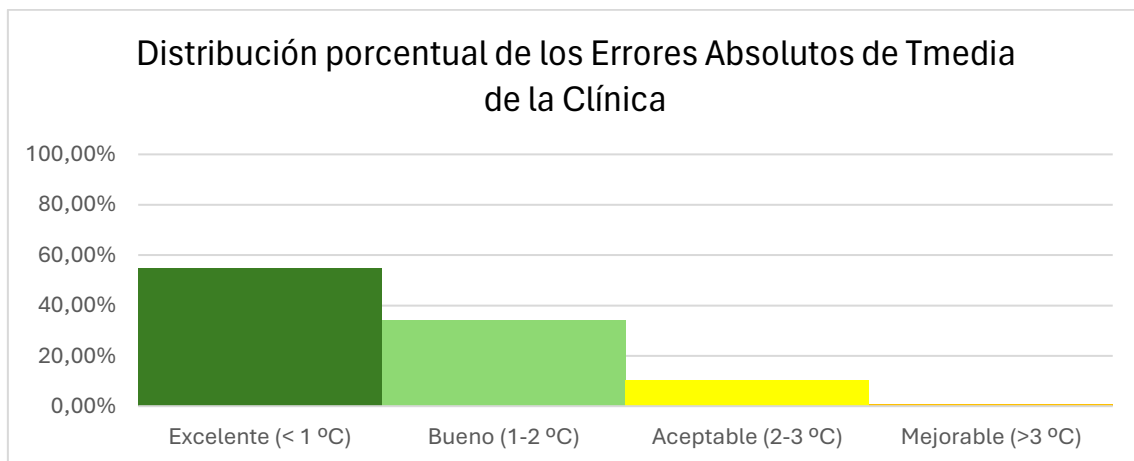


Figura 95: Distribución porcentual de los Errores Absolutos de la Temperatura de la clínica. Creación propia

Parámetros de validación	Tmedia de la clínica
Error absoluto medio (MAE)	1,06
Error porcentual medio absoluto (MAPE)	4,5%

Tabla 35: Valores de MAE y MAPE de Temperatura de la clínica. Creación propia

Como se puede observar en la comparación entre los valores reales y los simulados, el comportamiento térmico general de la clínica es similar en ambos casos. Esta correspondencia se refleja también en el resto de los parámetros analizados, con un MAE clasificado como “bueno” y un MAPE dentro del rango considerado “excelente”. Es importante destacar que este análisis se ha realizado a partir de la media horaria de la temperatura en las distintas zonas de la clínica, tanto en la simulación como en los registros reales, lo que permite una validación global del comportamiento térmico del edificio.

Además, cabe destacar que existe una pérdida de datos registrada entre los días 3 y 13 de marzo, debida a que, en los registros reales, la información correspondiente fue sobrescrita accidentalmente, imposibilitando su recuperación. Esta discontinuidad ha sido tenida en cuenta en el análisis y comparación de resultados.

5.1.4. Concentración media de CO2 de la clínica

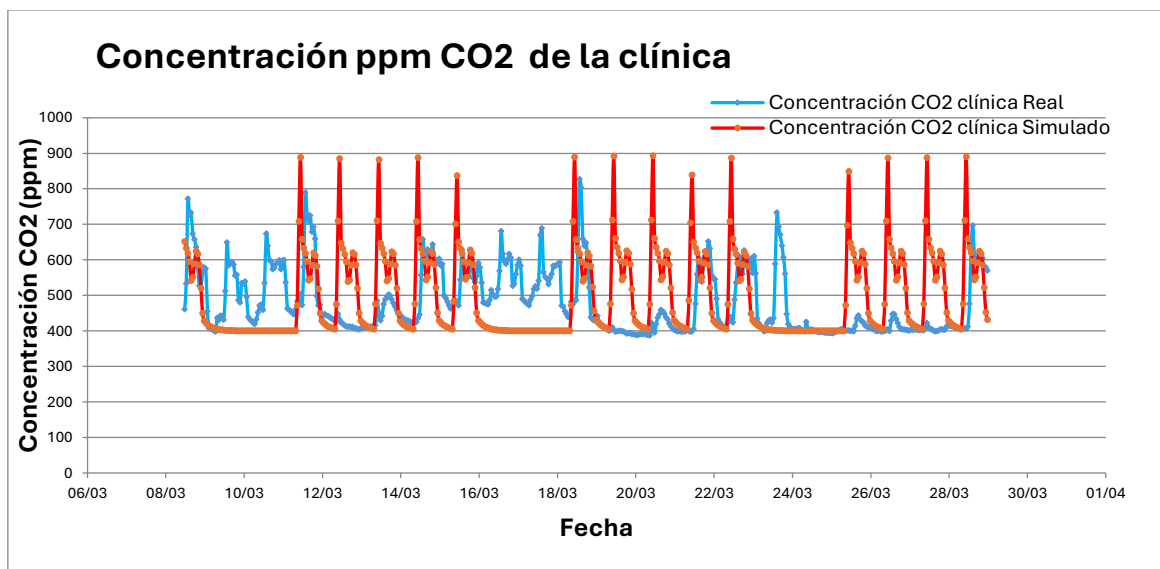


Figura 96: Comparación concentración de CO2 de la clínica Real y Simulada. Creación propia

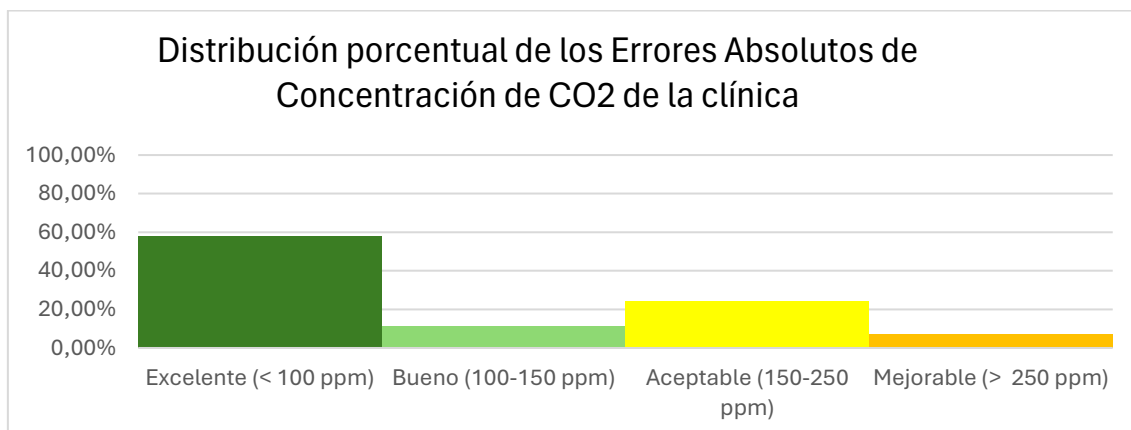


Figura 97: Distribución porcentual de los Errores Absolutos de la concentración CO2 de la clínica. Creación propia

Parámetros de validación	Tida bomba de calor
Error absoluto medio (MAE)	102,92
Error porcentual medio absoluto (MAPE)	21,5%

Tabla 36: Valores de MAE y MAPE de concentración de CO2 de la clínica. Creación propia

Al igual que en el caso de la temperatura media de la clínica, se ha realizado un análisis de la concentración de CO₂ en todas las zonas, tanto para los valores reales como los obtenidos en la simulación. Asimismo, se ha producido una pérdida de datos en los registros reales desde el día 1 hasta el día 8 a las 22:00, lo que ha limitado la comparación completa durante ese periodo. Considerando un MAE Bueno, y un MAPE aceptable, se daría como válido la simulación en cuanto a calidad del aire.

Temperatura de cada una de las zonas

En concreto, para el análisis comparativo de cada una de las zonas, se ha optado por realizar una descripción detallada acompañada de las tablas con los resultados de MAE y MAPE, agrupadas según la tipología de los espacios con características similares, como pueden ser los gabinetes, los despachos, entre otros. Para una mejor visualización, las gráficas comparativas correspondientes se incluyen en el Anexo 1.

Parámetros de validación	Tdespacho1	Tdespacho2	Tdistribuidor	Testerilización
Error absoluto medio (MAE)	1,89	0,88	1,16	1,26
Error absoluto porcentual medio (MAPE)	8%	4%	5%	5%

Tabla 37: Valores de MAE y MAPE de Temperatura del despacho 1, despacho 2, distribuidor y esterilización. Creación propia

En el caso de los espacios correspondientes al Despacho 1, Despacho 2, el distribuidor y la sala de esterilización, los resultados obtenidos para los indicadores MAE y MAPE muestran un comportamiento similar entre sí, lo que sugiere que las condiciones reales observadas presentan patrones de funcionamiento térmico equivalentes en estas zonas. Esta homogeneidad permite asumir que los parámetros de simulación reflejan de forma coherente el comportamiento térmico de estos espacios en la realidad.

Parámetros de validación	Tgab1	Tgab2	Tgab3	Tgab4
Error absoluto medio (MAE)	3,24	1,56	2,58	3,41
Error absoluto porcentual medio (MAPE)	14%	6%	11%	15%

Tabla 38: Valores de MAE y MAPE de Temperatura del gabinete de 1 al 4. Creación propia

Se observa que, tanto en términos porcentuales como absolutos, los gabinetes presentan un error aproximadamente el doble que el registrado en otras zonas. Este comportamiento sugiere que la carga térmica generada por los instrumentos instalados en dichos espacios requiere una mayor capacidad de refrigeración, lo que indica que la ventilación actual resulta insuficiente para cubrir dicha demanda térmica. Cabe destacar que en la monitorización real también se ha evidenciado un comportamiento superior al previsto en cuanto a la demanda de climatización, lo que ha motivado un replanteamiento de las condiciones de estos espacios con el fin de mejorar su rendimiento térmico y garantizar el confort interior.

Parámetros de validación	Tquiro1	Tquiro2	Trecepción	Trecuperación	Tsalaespera
Error absoluto medio (MAE)	2,05	1,35	1,18	2,01	1,32
Error absoluto porcentual medio (MAPE)	8%	6%	5%	8%	6%

Tabla 39: Valores de MAE y MAPE de Temperatura de quirófano 1 y 2, recepción, recuperación y sala de espera. Creación propia

Para estas zonas se observa un error porcentual y absoluto similar al del primer grupo de zonas analizado, lo que permite considerar dicha variación como representativa del comportamiento estándar en espacios que no presentan carencias de potencia de climatización. Esto indica que, en estas áreas, el diseño y dimensionado de los sistemas térmicos resulta adecuado para mantener las condiciones de confort previstas.

5.1.5. Temperatura de ida de la bomba de calor

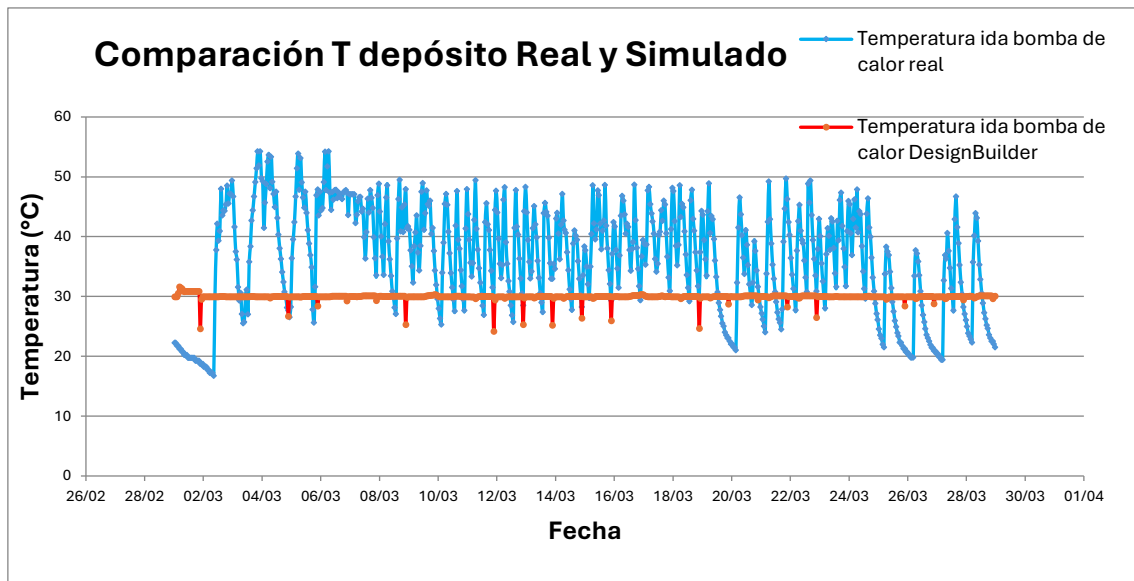


Figura 98: Comparación de la Temperatura de ida de la bomba de calor Real y Simulada. Creación propia

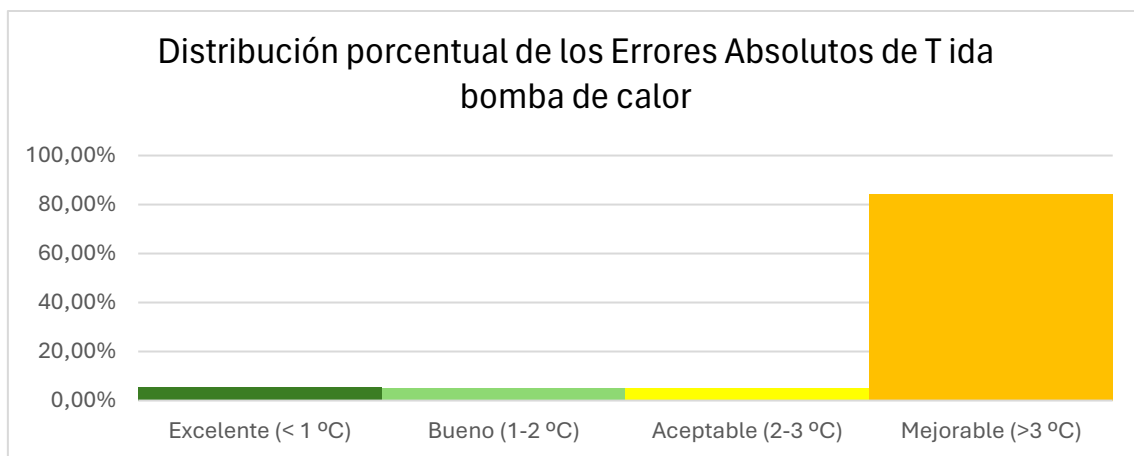


Figura 99: Distribución porcentual de los Errores Absolutos de la Temperatura de ida bomba de calor. Creación propia

Parámetros de validación	Tida bomba de calor
Error absoluto medio (MAE)	9,42
Error porcentual medio absoluto (MAPE)	25,3%

Tabla 40: Valores de MAE y MAPE de Temperatura de ida de la bomba de calor. Creación propia

Este es uno de los primeros valores que presenta una mayor divergencia respecto a los datos reales. Todo indica que, en la realidad, no se cumplen las limitaciones de temperatura establecidas, mientras que en la simulación sí se respetan. Este

comportamiento sugiere que el sistema es capaz de proporcionar una potencia de climatización suficiente incluso con temperaturas de impulsión inferiores a las previstas, lo que podría deberse a una mayor eficiencia térmica del sistema o a condiciones operativas más favorables en la instalación real.

5.1.6. Temperatura del tanque de inercia de 300 L

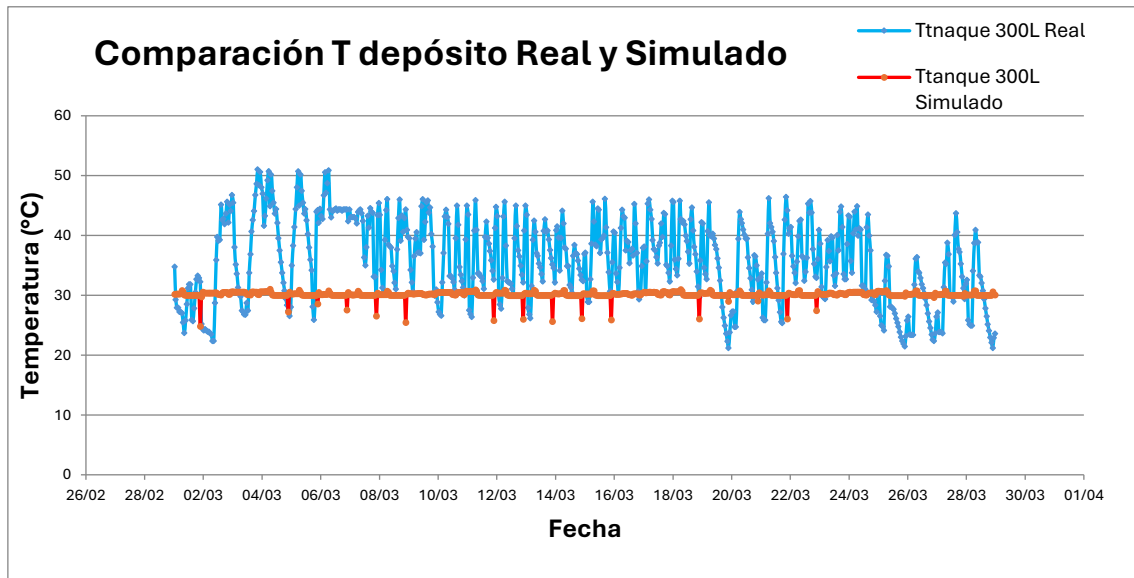


Figura 100: Comparación de la Temperatura del depósito de 300L Real y Simulada. Creación propia

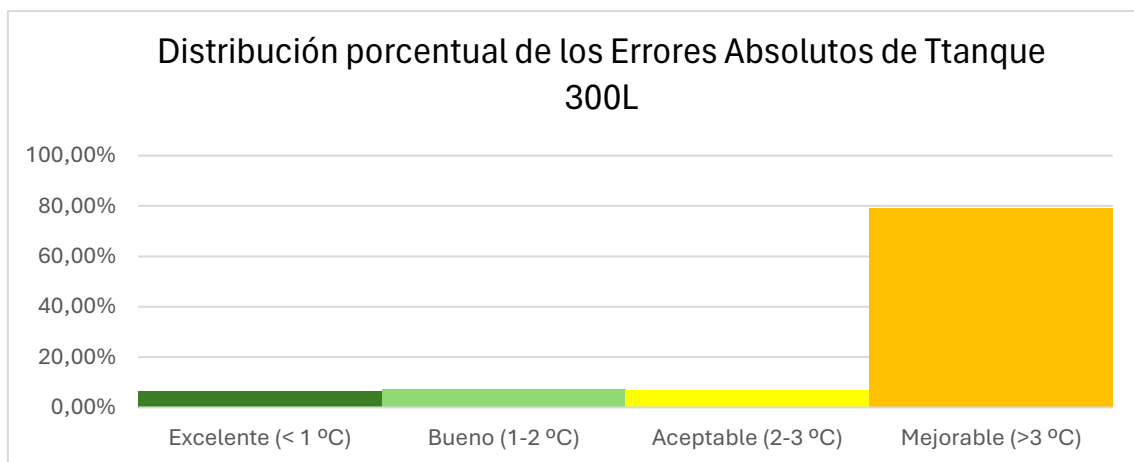


Figura 101: Distribución porcentual de los Errores Absolutos de la temperatura del depósito de 300L. Creación propia

Parámetros de validación	Ttanque300L
Error absoluto medio (MAE)	7,55
Error porcentual medio absoluto (MAPE)	19,7%

Tabla 41: Valores de MAE y MAPE de la Temperatura del tanque de 300L. Creación propia

El tanque de inercia de 300 L presenta una desviación significativa entre los datos reales y los simulados. Tal como se observa, en la simulación no se alcanza la temperatura máxima configurada de 40 °C, limitándose su operación a valores por debajo de los 30 °C, mientras que en la instalación real se superan dichos umbrales en varios momentos. Esta discrepancia puede explicarse, en parte, por la configuración del modelo, que divide el tanque en dos entidades independientes: una para agua caliente y otra para agua fría. Para el presente análisis se ha considerado únicamente el tanque correspondiente al circuito de calefacción, dado que la demanda térmica predominante durante el mes de marzo es de carácter calefactor.

5.1.7. Temperatura del tanque de inercia de 100

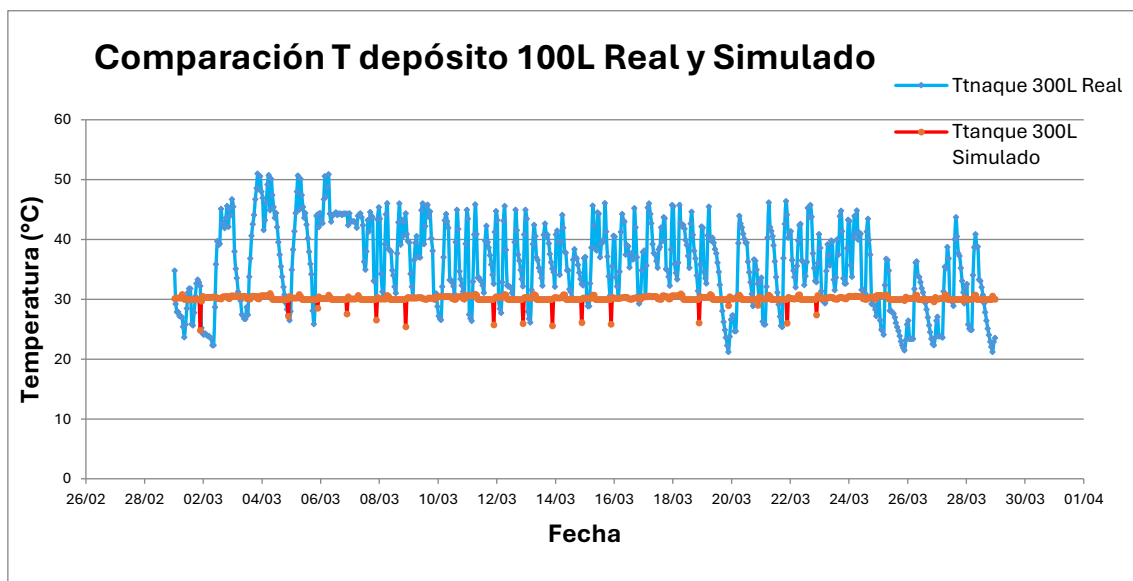


Figura 102: Comparación de la Temperatura del depósito de 100L Real y Simulada. Creación propia

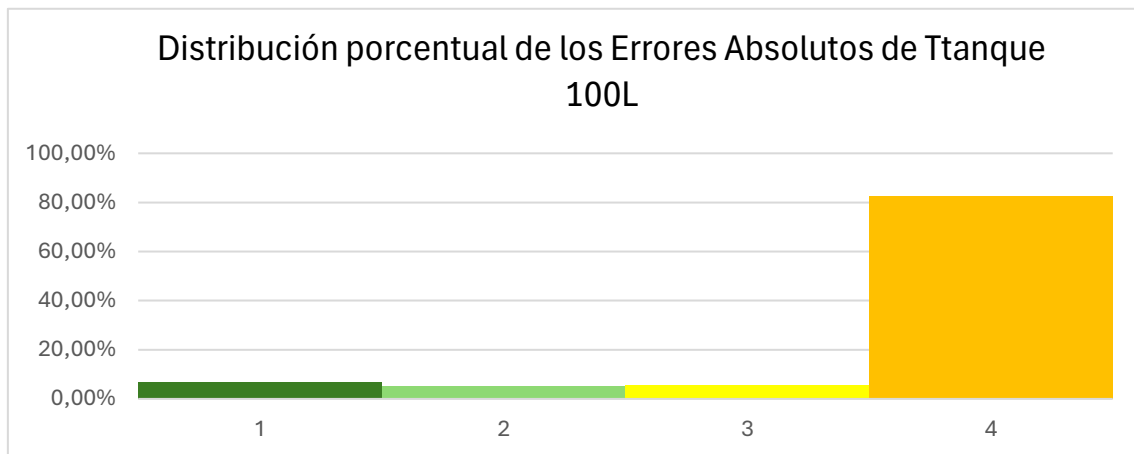


Figura 103: Distribución porcentual de los Errores Absolutos de la temperatura del depósito de 100L. Creación propia

Parámetros de validación	Ttanque100L
Error absoluto medio (MAE)	11,17
Error porcentual medio absoluto (MAPE)	29,7%

Tabla 42: Valores de MAE y MAPE de Temperatura del tanque de 100L. Creación propia

En el caso del tanque de 100 L, se observa un comportamiento análogo al del tanque de 300 L, utilizándose para el análisis el correspondiente al circuito de agua caliente, por las mismas razones expuestas previamente. Además, las limitaciones propias del programa de simulación han impedido replicar con precisión la configuración real del sistema, lo que ha generado una discrepancia notable en términos constructivos. Esta divergencia representa una desconexión sustancial respecto a la instalación real, comprometiendo la fidelidad de la simulación en lo que respecta al funcionamiento conjunto del tanque de 100 L con el resto de los sistemas de climatización.

5.1.8. Temperatura de impulsión del suelo radiante

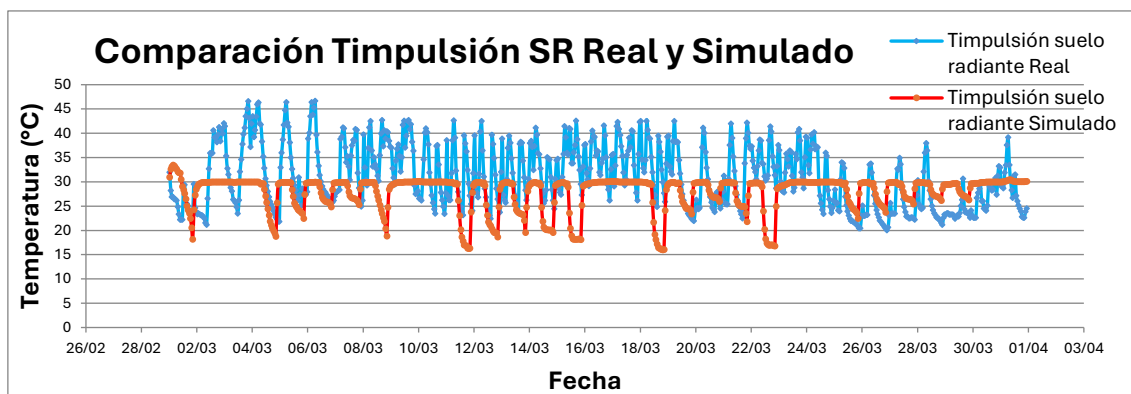


Figura 104: Comparación de la Temperatura del suelo radiante Real y Simulada. Creación propia

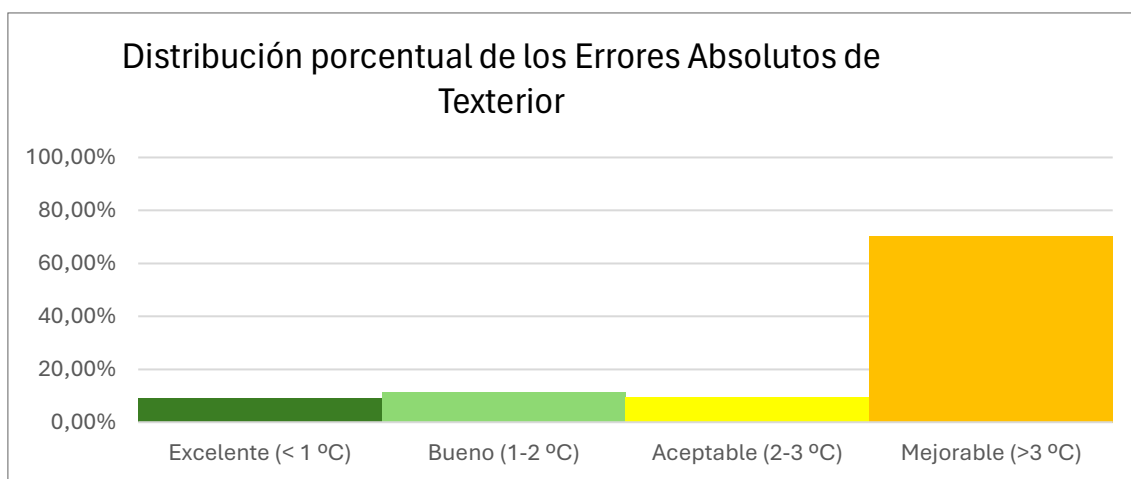


Figura 105: Distribución porcentual de los Errores Absolutos de la tempera suelo radiante. Creación propia

Parámetros de validación	Timp suelo radiante
Error absoluto medio (MAE)	6,02
Error porcentual medio absoluto (MAPE)	19,0%

Tabla 43: Valores de MAE y MAPE de Temperatura del suelo radiante. Creación propia

En el análisis del suelo radiante se observa que, en el caso simulado, la temperatura máxima operativa se mantiene en torno a los 30 °C, sin llegar a sobrepasarse en ningún momento, aunque dicho valor no representa el límite superior permitido por el sistema. En cambio, en la realidad, se alcanzan temperaturas de hasta 45 °C, lo que podría indicar que el sistema real prioriza el uso del suelo radiante como fuente principal de climatización, a diferencia de lo que ocurre en la simulación. Esta diferencia sugiere que en el modelo virtual no se llega a requerir la máxima capacidad térmica del suelo radiante

para satisfacer la demanda, lo que podría estar relacionado con una distribución distinta de cargas térmicas o con un criterio de priorización de equipos no replicado fielmente en la simulación.

5.1.9. Temperatura de impulsión del recuperador de aire

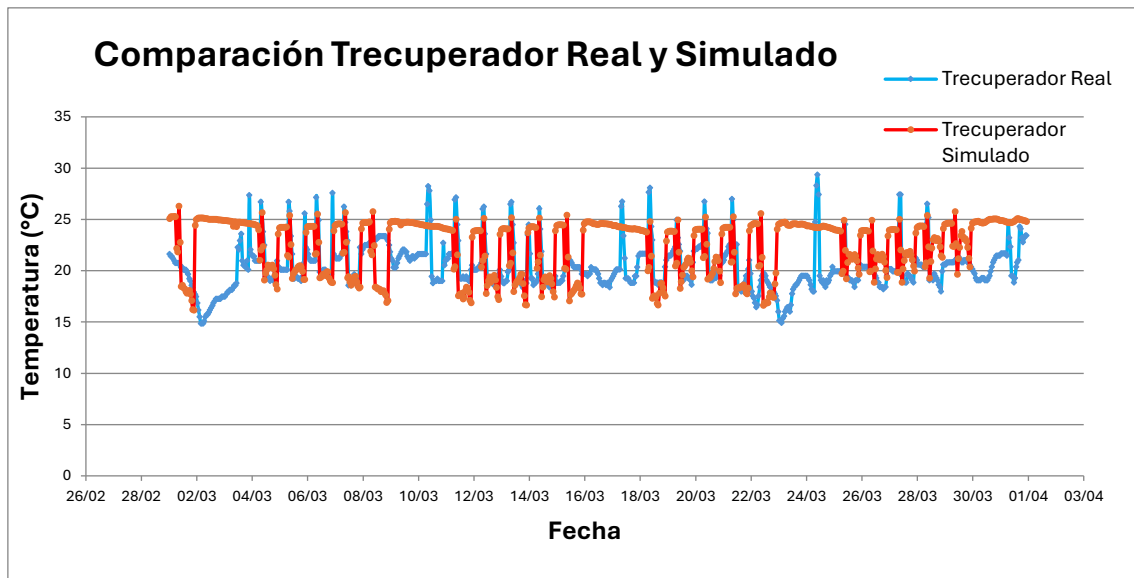


Figura 106: Comparación de la Temperatura del recuperador de calor Real y Simulada. Creación propia

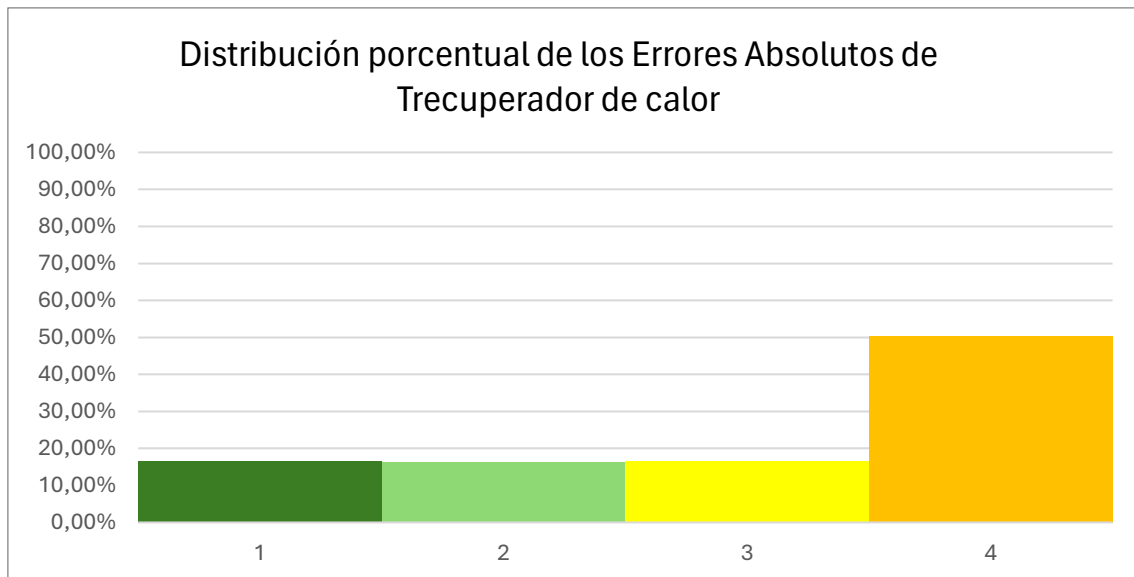


Figura 107: Distribución porcentual de los Errores Absolutos de la Temperatura del recuperador de calor. Creación propia

Parámetro de validación	Trecuperador de calor
Error absoluto medio (MAE)	3,27
Error absoluto porcentua medio (MAPE)	16,7%

*Tabla 44: Valores de MAE y MAPE de la Temperatura del recuperador de calor.
Creación propia*

El análisis del comportamiento del intercambiador permite concluir que sí se alcanzan los valores mínimos de temperatura establecidos como límite, aunque en el caso real se sobrepasan con mayor frecuencia que en la simulación. En concreto, se observa que la temperatura del intercambiador en la simulación no supera los 25 °C, situándose en promedio unos 3 °C por encima de los valores reales. Esta diferencia sugiere que, aunque ambos sistemas operan mayoritariamente en modo de refrigeración durante el periodo analizado, la simulación se ajusta de forma más estricta al límite configurado, lo que refleja un control más conservador frente al comportamiento observado en la realidad.

6. Discusiones y Conclusiones

Una vez realizada la comparación de los resultados en el apartado 5.0, este apartado tiene como objetivo evaluar los resultados obtenidos, así como exponer las principales limitaciones encontradas durante el desarrollo del proyecto, permitiendo así ofrecer una visión global del trabajo realizado, junto con la formulación de las conclusiones.

6.1. Evaluación de la simulación

Los resultados obtenidos en la evaluación del proyecto evidencian que las temperaturas simuladas en las distintas zonas de la clínica, así como la temperatura media global y la concentración media de CO₂, presentan una alta concordancia con los valores reales registrados. Este ajuste adecuado entre los datos simulados y los reales demuestra que el modelo desarrollado responde con precisión a las necesidades climáticas del edificio, validando así la eficacia del sistema propuesto en términos de confort térmico y calidad del aire interior.

Además de los resultados satisfactorios en cuanto a las condiciones ambientales interiores, se ha identificado una significativa discrepancia entre los valores reales y simulados de los equipos de climatización ubicados en el lado de suministro, tales como el tanque de inercia, la bomba de calor aerotérmica y la bomba geotérmica. Esta divergencia se debe principalmente a la elevada complejidad de los datos requeridos por el programa de simulación para configurar adecuadamente dichos equipos. En ausencia de información técnica detallada sobre ciertos parámetros reales, se optó por utilizar valores estandarizados proporcionados por el propio software con el fin de evitar introducir datos erróneos. Esta decisión, si bien metodológicamente prudente, ha derivado en diferencias sustanciales respecto al comportamiento real de estos sistemas. Por tanto, se propone que en futuros desarrollos se contemple una estrategia de modelado centrada exclusivamente en la simulación del rendimiento de los equipos de climatización, con el objetivo de lograr una mayor fidelidad entre el modelo y la realidad.

Parte de las desviaciones observadas entre los datos simulados y los reales pueden atribuirse al hecho de que, en la realidad, se han sobrepasado los límites establecidos en los parámetros de control del sistema. Esto sugiere que dichos límites podrían no estar correctamente ajustados para reflejar el comportamiento real del edificio. En particular, si las variables que exceden esos umbrales son las temperaturas —como se ha observado

en varios puntos del análisis—, sería necesario reconsiderar y posiblemente ampliar los valores límite establecidos en la simulación. De este modo, se permitiría al programa replicar con mayor precisión las condiciones reales, contribuyendo así a una proyección más fiel del comportamiento térmico y ambiental del edificio.

Clasificación de datos para validación	MAE				MAPE			
	Excelente	Bueno	Aceptable	Mejorable	Excelente	Bueno	Aceptable	Mejorable
Temperatura exterior	X				X			
Humedad exterior	X				X			
Temperatura media de la clínica		X				X		
Concentración media de CO2 de la clínica		X					X	
Temperatura despacho 1		X				X		
Temperatura despacho 2	X					X		
Temperatura distribuidor		X				X		
Temperatura esterilización		X				X		
Temperatura gabinete 1				X				X
Temperatura gabinete 2		X					X	
Temperatura gabinete 3			X				X	
Temperatura gabinete 4				X				X
Temperatura quirófano 1			X			X		
Temperatura quirófano 2		X				X		
Temperatura recepción		X				X		
Temperatura recuperación				X		X		
Temperatura sala de espera		X				X		
Temperatura ida bomba de calor				X				X
Temperatura depósito 300L				X				X
Temperatura depósito 100L				X				X
Temperatura de impulsión de suelo radiante				X				X
Temperatura recuperador de calor				X				X

Tabla 45: Resumen-clasificación de datos de validación. Creación propia

Por otro lado, tal como se muestra en la Tabla 45, se valida lo expuesto en el primer y segundo párrafo: la simulación ofrece un ajuste considerado “bueno” respecto a las condiciones reales en lo que se refiere al comportamiento térmico de las zonas interiores. Sin embargo, en la parte correspondiente al sistema de suministro, los resultados presentan una mayor desviación. Esta diferencia proporciona información relevante sobre posibles puntos de mejora del modelo, los cuales serán abordados y discutidos en detalle en el apartado de Limitaciones del proyecto.

6.2. Limitaciones del Estudio

En este subapartado se van a tratar las limitaciones encontradas durante la investigación y desarrollo del proyecto. Se centrará en tres aspectos principales.

- ❖ Limitaciones constructivas

- ❖ Limitaciones de diseño de climatización
- ❖ Limitaciones del programa de recogida de datos

6.2.1. Limitaciones constructivas

En relación con los materiales empleados en los cerramientos, muros, techos y suelos, no se han identificado problemas resaltables. La principal limitación se encuentra en la capacidad térmica de las paredes y techos para transmitir calor desde o hacia el exterior. Para mitigar posibles imprecisiones derivadas de este fenómeno, se ha optado por definir como adiabáticas las superficies adyacentes. Esta decisión responde a la imposibilidad de simular adecuadamente la actividad térmica de los edificios colindantes y de los pisos superiores del inmueble donde se sitúa la clínica, lo cual sería necesario para estimar correctamente las pérdidas o ganancias térmicas estructurales.

Cabe destacar, asimismo, que las mediciones realizadas a partir del plano en AutoCAD no coincidían con las superficies reflejadas en la memoria del proyecto. Aunque se ha forzado al programa a simular con los valores de superficie definidos en dicha memoria, es relevante señalar que cualquier comparación entre el edificio modelado en la simulación y el edificio real presentará ciertas desviaciones visuales, a no ser que se consideren expresamente los datos introducidos manualmente.

Un aspecto relevante por mencionar, es la ausencia de datos completos sobre la iluminación instalada. Se dispone de información que indica que, en gabinetes y quirófanos, se han colocado luminarias con una elevada fracción radiante, lo que podría estar generando un sobrecalentamiento adicional en estas zonas, especialmente al sumarse al calor producido por los equipos e instrumental médico. En la simulación se observa un comportamiento térmico similar, aunque será necesario profundizar en futuras investigaciones para determinar si existe una correlación directa entre ambos fenómenos.

6.2.2. Limitaciones de diseño de climatización

Para iniciar el apartado correspondiente a las limitaciones técnicas de la simulación, se presenta en la Figura 134 una comparación visual entre el esquema ideal que se hubiera esperado implementar en el programa y la instalación final efectivamente configurada. Esta comparación permite identificar de forma clara las discrepancias derivadas del sistema lógico de conexión impuesto por el software DesignBuilder.

Con el fin de facilitar la explicación detallada que se desarrollará a continuación, se ha optado por utilizar como ejemplo representativo de tanque de inercia el dibujo del tanque de ACS (agua caliente sanitaria), que ha sido empleado en la simulación como tanque de agua caliente. Asimismo, para simplificar la visualización del sistema de producción térmica, se ejemplificará la bomba de calor únicamente con el módulo correspondiente a calefacción (color rojo), omitiendo en esta representación la división entre calefacción y refrigeración que exige el programa en su configuración real.

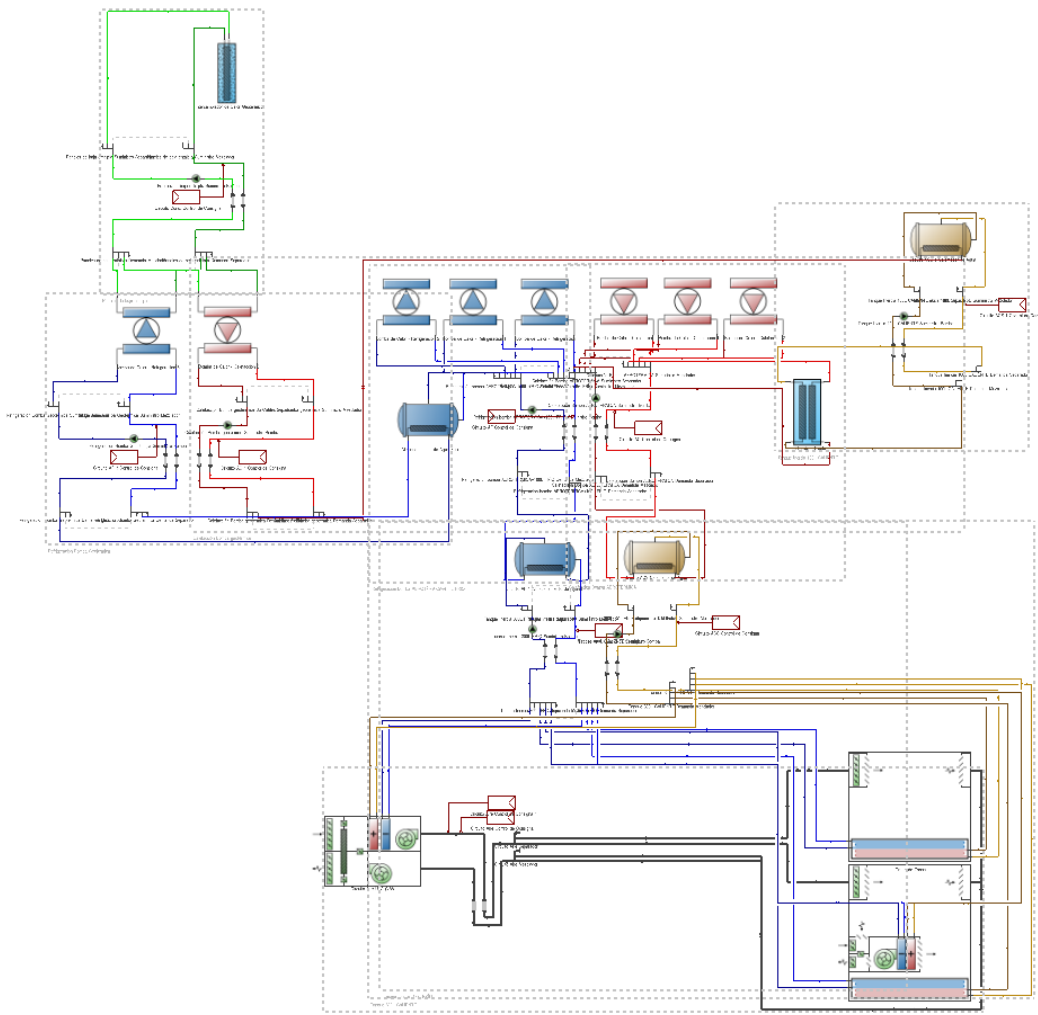


Figura 108: Planteamiento Real en DesignBuilder. Creación propia en DesignBuilder

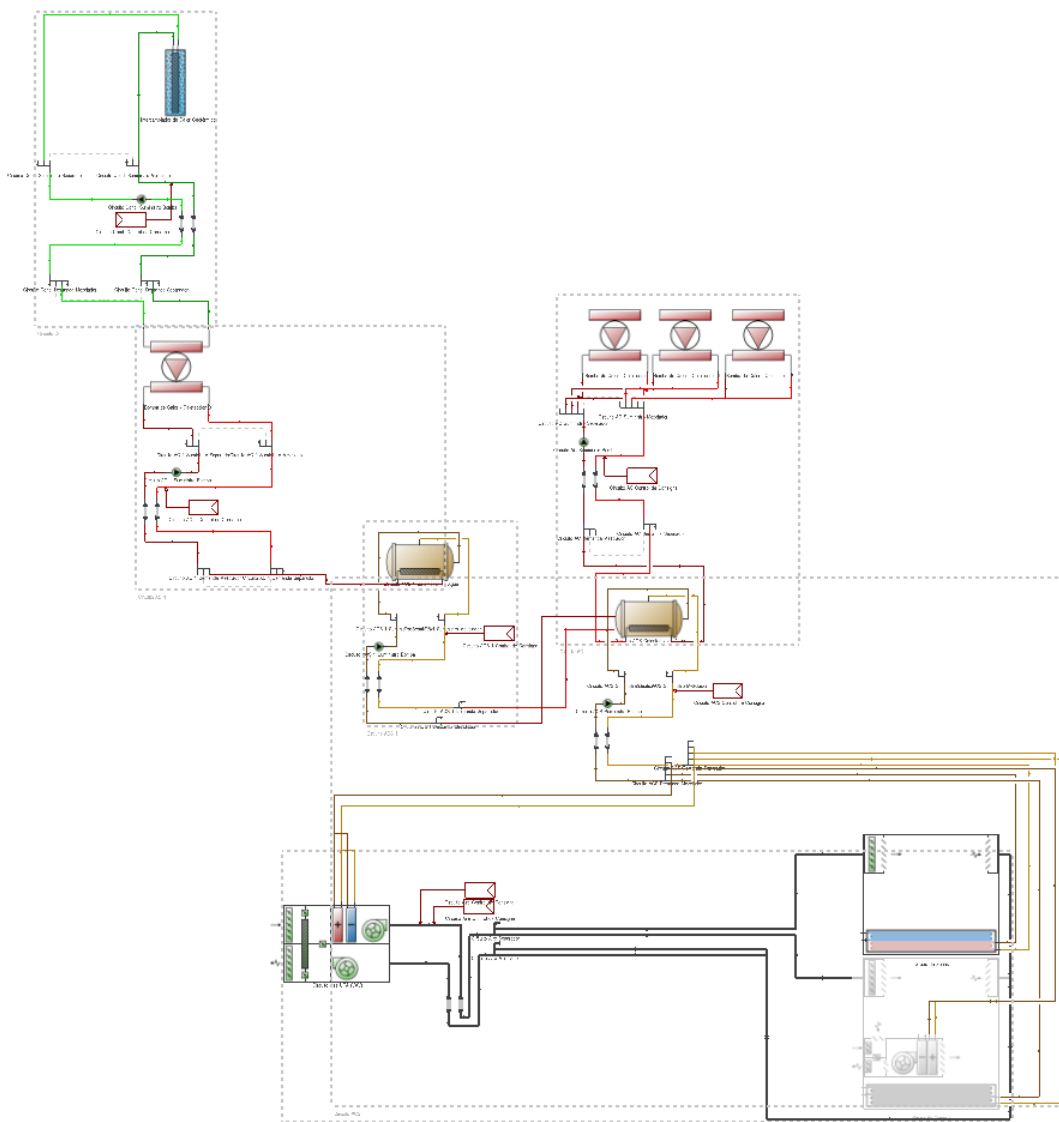


Figura 109: Planteamiento Ideal en DesignBuilder. Creación propia en DesignBuilder

Tal como se ha señalado en el párrafo anterior, en la parte superior de la Figura 109 se representa el esquema conceptual que inicialmente se pretendía implementar en la simulación, mientras que en la parte inferior, Figura 108 se muestra la configuración final obtenida.

En cuanto a la bomba de calor, la intención original era que se comportara como una única unidad capaz de operar tanto en modo calefacción como en modo refrigeración. Esto permitiría aprovechar los estados transitorios en los que la bomba comienza a calentar o enfriar, contribuyendo a mejorar el rendimiento global del sistema. Aunque se ha programado el funcionamiento exclusivo en modo calefacción o refrigeración para evitar activaciones indeseadas, el programa mantiene activas las bombas hidráulicas correspondientes al suministro de refrigeración, lo cual se ve condicionado por la necesidad estructural de definir los tanques de forma separada —uno para agua caliente y otro para agua fría.

En lo referente al tanque de inercia, el planteamiento inicial consistía en modelar una única unidad capaz de gestionar tanto la producción de calor como de frío. Al igual que en el caso de la bomba de calor, esto permitiría aprovechar los gradientes térmicos intermedios —especialmente relevantes para maximizar el rendimiento de la bomba geotérmica— asegurando así su operación a potencia nominal y manteniendo un COP elevado. Uno de los aspectos clave de este diseño era precisamente su papel en el suministro continuo al tanque de 300 L.

Adicionalmente, tal como se aprecia en el esquema final, ha sido necesario incorporar un intercambiador de calor ideal conectado al circuito de agua caliente, ya que el programa no permite una conexión directa en esta configuración. Esta barrera física entre fluidos altera el comportamiento real del sistema, incluso cuando el intercambiador está idealizado, introduciendo así una diferencia significativa entre la instalación simulada y la instalación real.

Además, para el funcionamiento conjunto de estos sistemas, tal como se muestra en el esquema superior de la Figura 109, el tanque de inercia de 100 L se conecta de manera independiente al tanque de 300 L, estableciendo dos conexiones hidráulicas

diferenciadas. Por un lado, se vincula directamente a la bomba de calor aerotérmica, con un caudal y una temperatura específicos; por otro lado, establece una conexión paralela, también con condiciones de operación propias, proveniente del tanque de 100 L.

Sin embargo, como se observa en el esquema inferior —que representa la implementación real en DesignBuilder—, la arquitectura del programa únicamente permite una conexión auxiliar de temperatura por tanque, lo que limita severamente la capacidad de replicar esta configuración. Esta restricción obliga a conectar los tanques de 100 L (tanto el de agua fría como el de agua caliente) directamente al circuito hidráulico de la bomba de calor, compartiendo así tanto el caudal como la temperatura en el punto de conexión. Esta solución impide un funcionamiento independiente de ambos sistemas, lo que representa una desviación significativa respecto al diseño real y compromete la precisión de la simulación en lo que respecta al comportamiento térmico y dinámico del sistema.

6.2.3. Limitaciones del programa de recogida de datos

Como introducción al proceso de recogida de datos, cabe destacar que la versión definitiva del sistema comenzó a ejecutarse en el mes de febrero. Inicialmente, se configuró un disco duro con capacidad de 10 GB, el cual estaba programado para sobrescribir los datos más antiguos una vez alcanzado el límite de almacenamiento. Esta limitación obligaba a realizar una descarga y almacenamiento periódico de la información, especialmente ante la preocupación de perder datos relevantes antes de finalizar el mes de marzo.

Sin embargo, a partir del mes de abril se incorporó un nuevo sistema de almacenamiento con un disco de 500 GB, lo que permitió registrar los datos de forma continua sin necesidad de sobrescribir información previa. Esta mejora ha facilitado un seguimiento más exhaustivo y fiable, aunque durante el mes de marzo fue necesario llevar un control manual y periódico de los datos recogidos para evitar la pérdida de información clave para la validación del modelo.

Durante el inicio del proceso de recogida de datos, algunos sensores aún no se encontraban completamente operativos. Este hecho explica, entre otras cosas, la ausencia de registros de consumo eléctrico de los equipos, lo que imposibilita realizar comparaciones de COP o rendimientos energéticos, consumo de equipos e iluminación

para poder compararlos con la simulación u otros casos distintos. Por tanto, el análisis se ha centrado exclusivamente en variables como la temperatura y la concentración de CO₂ donde si se ha realizado un registro continuo desde el inicio.

Asimismo, se detectaron interrupciones temporales en determinados sensores durante la fase inicial de pruebas. Concretamente, los sensores de temperatura de diversas zonas presentaron una desconexión entre los días 3 y 13 de marzo, mientras que el sensor de CO₂ estuvo inactivo desde el día 1 hasta el 8 del mismo mes. Estas incidencias se han tenido en cuenta en la interpretación de los resultados y limitan la comparabilidad continua de los datos monitorizados en ese periodo.

Además, tal como se detalló en el apartado 3.3.5 “Horarios – Consigna de funcionamiento del sistema climático”, el programa DesignBuilder gestiona el funcionamiento de los sistemas mediante un calendario horario en el que se asigna el estado de operación para cada hora de cada día. Sin embargo, este sistema presenta una limitación relevante: no permite establecer configuraciones diferenciadas para un mismo día de la semana en semanas distintas. Es decir, si se modifica la consigna correspondiente al último lunes del mes, el cambio se aplicará automáticamente a todos los lunes registrados en el calendario. Esta restricción puede provocar discrepancias con la realidad cuando se han producido variaciones progresivas o puntuales en los horarios de consigna a lo largo del mes. Cabe destacar que esta situación es especialmente probable en el caso del mes de marzo, donde se observó un inicio templado seguido de un final considerablemente más frío, con precipitaciones presentes en la mayoría de los días. Esto refuerza la hipótesis de que los cambios dinámicos en el funcionamiento real de los sistemas no han podido reflejarse con precisión en la simulación. Dado que los datos de los distintos instrumentos de monitorización se han ido obteniendo en fechas diferentes a lo largo del mes de marzo, no ha sido posible garantizar que todas las configuraciones corresponden a un único planteamiento en la realidad.

6.3. Recomendaciones para futuras investigaciones

Para proyectos similares o posibles ampliaciones del presente trabajo, se considera fundamental realizar un estudio exhaustivo de la herramienta de simulación desde fases iniciales. Esta evaluación temprana permitirá comprobar si la plataforma se ajusta plenamente a las necesidades del proyecto, tanto a nivel técnico como funcional.

En este caso concreto, tras varios meses de aprendizaje y uso intensivo de la herramienta, se ha constatado en fases avanzadas una limitación significativa: la imposibilidad de conectar correctamente los tanques de inercia y las bombas de calor, lo que ha condicionado parte de la modelización energética.

Asimismo, se recomienda establecer un sistema de actualización periódica de los datos recogidos desde la plataforma de monitorización, preferiblemente con una frecuencia casi diaria, con el fin de evitar la sobreescritura de datos valiosos, como ocurrió en ciertas franjas del mes analizado. Esta práctica garantizaría una mayor integridad y trazabilidad de la información disponible para futuras validaciones o comparativas.

Además, tomando como referencia el presente caso, se considera recomendable que el sistema de monitorización empleado sea capaz de registrar datos clave como potencias térmicas, caudales de agua o consumos eléctricos, ya que estos parámetros son esenciales para el cálculo de rendimientos reales (como el COP) y para poder ajustar con mayor precisión la simulación de los equipos de climatización a su comportamiento real.

La ausencia de este tipo de datos ha representado una limitación significativa a la hora de validar el modelo energético, y su incorporación permitiría realizar estudios más completos y fieles a la realidad operativa del edificio.

6.4. Conclusiones

Para la elaboración de las conclusiones del proyecto, se procederá a realizar un análisis comparativo entre los objetivos y el alcance inicialmente planteados y los resultados obtenidos al finalizar el desarrollo del modelo. De forma razonada, se valorará si dichos objetivos han sido alcanzados y en qué medida, permitiendo así extraer una visión crítica y fundamentada sobre el grado de cumplimiento del trabajo realizado.

En cuanto a la recopilación de información necesaria, se puede considerar una tarea exitosa en términos de acceso, análisis y aprovechamiento de los datos disponibles tanto en la documentación del proyecto como en el sistema de monitorización de la clínica. Sin embargo, también se ha identificado una carencia de ciertos datos clave que habrían sido necesarios para una simulación más precisa y detallada, como valores reales de caudales, potencias térmicas o rendimientos específicos de los equipos. Esta limitación no ha impedido la realización del modelo, pero sí ha condicionado algunos apartados críticos del mismo.

En cuanto a la modelización del edificio, se ha conseguido desarrollar un modelo virtual de la clínica que refleja con precisión su configuración geométrica y funcional, logrando una alta fidelidad respecto a la realidad construida. Las diferencias se han limitado principalmente a aspectos visuales no relevantes numéricamente. No obstante, la ausencia de un planteamiento que permita simular de forma realista la influencia de edificios adyacentes, así como la falta de datos específicos sobre la instalación de iluminación — como se ha detallado en apartados anteriores—, han supuesto limitaciones significativas. Por tanto, si bien el alcance puede considerarse válido en términos generales, no puede calificarse como completamente exitoso debido a los condicionantes descritos.

En relación con la validación del modelo de simulación y el análisis de resultados, no se ha abordado en profundidad si el mes de marzo es el periodo óptimo para representar un comportamiento representativo y comparativo entre la realidad y la simulación. Sin embargo, a pesar de las limitaciones detectadas en los datos disponibles —tanto en términos de cobertura como de precisión—, el proceso de validación ha permitido obtener conclusiones consistentes, con resultados fácilmente interpretables y evaluables frente a la realidad observada. Por tanto, si bien no se puede afirmar que la simulación sea completamente fidedigna en todos sus aspectos, los resultados obtenidos pueden considerarse aceptables dentro de un margen de mejora, especialmente en aquellas variables señaladas previamente en el apartado de validación.

Las propuestas de mejora han quedado recogidas de forma explícita a lo largo del presente documento, principalmente en los apartados dedicados a las limitaciones del estudio y a las recomendaciones para futuras investigaciones. Estas sugerencias abarcan tanto aspectos técnicos de la herramienta utilizada como consideraciones metodológicas relacionadas con la recogida y tratamiento de datos reales. Su implementación permitirá mejorar la precisión, fiabilidad y alcance de futuros trabajos de simulación energética en entornos reales como el aquí analizado.

7. Análisis Económico

7.1 Indicadores Económicos

En este apartado se detallan los indicadores económicos del proyecto, acompañados de una breve descripción y de la fórmula matemática correspondiente que permite analizar su comportamiento en el contexto de evaluación del proyecto.

7.1.1. Tiempo de retorno

indica el tiempo necesario para recuperar la inversión inicial a través de los ingresos o ahorros generados. Es una herramienta sencilla e intuitiva para valorar el riesgo financiero a corto plazo, ya que muestra la velocidad con la que se amortiza el sistema.

$$TR = \frac{I}{AHanual}$$

TR: Tiempo de retorno (años)

I: Inversión inicial (€)

AHanual: Ahorro anual (€/año)

7.1.2. Valor Actual Neto (VAN)

El Valor Actual Neto (VAN) representa el valor presente de todos los flujos de caja futuros generados por una inversión, descontados a una tasa de interés determinada. Un VAN positivo indica que los ingresos futuros, actualizados a valor presente, superan la inversión inicial, lo que implica que el proyecto es económicamente viable.

$$VAN = -I_o + \sum_{t=1}^n \frac{F_t}{(1+k)^t}$$

VAN: Valor Actual Neto (€)

F_t : Flujo neto de caja en el año t (€)

I_o : Inversión inicial (€)

n: vida útil del proyecto (años)

k: tasa de descuento

t: tiempo (años)

7.1.3. Tasa Interna de Retorno (TIR)

La TIR es la tasa de descuento que iguala a cero el Valor Actual Neto (VAN) de un proyecto. Representa la rentabilidad anual esperada y permite compararla con una tasa mínima exigida, como el coste de capital o la inflación. Su expresión en forma porcentual facilita su interpretación y comparación entre proyectos. Por consiguiente, una TIR inferior a la tasa de interés del crédito acometido significaría que el proyecto ofrece una rentabilidad menor que el coste financiero del préstamo. Asimismo, la TIR resulta especialmente útil para comparar distintas alternativas de inversión: cuanto mayor sea este valor, mayor será la rentabilidad del proyecto en términos relativos.

$$VAN = -I_o + \sum_{t=1}^n \frac{F_t}{(1+k)^t} = 0$$

7.1.4. Coste de Energía Ahorrada (CEAH)

El CEAH permite evaluar la eficiencia económica de una inversión desde una perspectiva energética. Se calcula dividiendo el coste total de la inversión entre la energía que se espera ahorrar durante la vida útil del sistema. Este indicador facilita la comparación con el precio de la energía convencional (€/kWh) y resulta especialmente útil en proyectos de eficiencia energética. La independencia respecto al precio de la energía hace de este medidor, una herramienta muy útil a la hora de valorar este proyecto

$$CEAH = \frac{I_o * FRC}{dE}$$

CEAH: Coste Energía Ahorrado

I_o : Inversión inicial (€)

FRC: Factor de recuperación de capital

dE: Ahorro anual de energía (kWh)

$$FRC = \frac{k}{1 - (1+k)^{-n}}$$

7.2. Estudio de viabilidad económica

A continuación, se llevará a cabo un estudio de viabilidad comparando el coste inicial de instalación de los equipos de climatización del proyecto con una estimación correspondiente a una instalación convencional. Además, a partir de la configuración realizada en el mes de marzo, se va a realizar una simulación utilizando dicha configuración con el resto del año para así obtener los consumos anuales de la clínica simulada, y con ello obtener los costes operativos (OPEX) del proyecto.

7.2.1. Costes Iniciales y Operativos

En el apartado de Costes Totales Operativos se presentará una serie de cálculos con el objetivo de determinar el CAPEX, el ahorro energético y el ahorro monetario anual derivados de la comparación entre el sistema de climatización actualmente instalado y una alternativa convencional basada en caldera. A partir de estos valores, se procederá al cálculo del Valor Actual Neto (VAN), la Tasa Interna de Retorno (TIR) y el Coste de Energía Ahorrada (CEAH).

Equipos de climatización	Unidades	Coste (€)
Bomba de calor marca Airlan	3	4320
Fancoil Airlan	2	1458
Recuperador de calor Airlan	1	8470
Ventilador Tubular Helicocentrífugo	1	215
Ventilador Tubular Helicocentrífugo	1	135,67
Depósito de Inercia 300L	1	800
Depósito de Inercia 100L	1	600
Bomba de calor Geotérmica	1	750
Suelo radiante	1	10000
Coste total (€)		26749

Tabla 46: Inversión Inicial. Creación propia

Para las próximas dos tablas se ha tenido en cuenta el consumo eléctrico asociado a los sistemas de calefacción y refrigeración obtenido del año completo a partir de la simulación. Como se detalla en la tabla correspondiente, se han tomado como referencia un precio de la electricidad de 0,15 €/kWh y un precio del gas de 0,07 €/kWh. Para realizar la conversión entre ambos sistemas, se ha considerado un COP medio de 3,5 para el sistema de climatización instalado, lo que permite transformar el consumo eléctrico simulado en un equivalente térmico. A partir de este consumo térmico, y aplicando un rendimiento de 0,9 para la caldera de gas, se ha estimado el consumo eléctrico equivalente

del sistema convencional, obteniendo así una estimación anual de coste energético para ambos sistemas.

Estudio costes anuales	Valores
Consumo Electricidad (kWh)	68207,0
Coste por kWh	0,2
Coste electricidad (€)	10231
Consumo calefacción (kWh)	11280,0
Consumo refrigeración (kWh)	1063,0
Coste calefacción+refrigeración (€)	1851
Coste anual (€)	12083

Tabla 47: Costes Anuales nuevo sistema. Creación propia

Estudio costes anuales	Valores
Consumo electricidad (kWh)	68207,00
coste por kWh eléctrico	0,15
Coste electricidad (€)	10231
Consumo gas en calefacción (kWh)	43866,67
Coste gas kWh	0,07
Coste calefacción (€)	3071
Consumo refrigeración (kWh)	1063,00
Coste refrigeración (€)	159
Coste total (€)	13461

Tabla 48: Costes Anuales Sistema con caldera. Creación propia

Tipo de ahorro	Valores
Ahorro anual (€)	1379
Ahorro de energía (kWh)	32586,67

Tabla 49: Comparación de ahorros entre sistemas. Creación propia

7.2.2. Tiempo de Retorno

Actuación	Inversión inicial (€)	Ahorro anual (€)	TR (años)
Cambio sistema de climatización	26749	1379	19

Tabla 50: Tiempo de retorno. Creación propia

El objetivo de calcular el tiempo de retorno es determinar, en comparación con la vida útil estimada del sistema, cuántos años son necesarios para recuperar la inversión inicial a partir del ahorro económico anual generado. En este caso, el resultado obtenido es de 19,40 años, lo que es inferior a los 25 años de vida útil previstos para un sistema de

climatización. Esta concordancia temporal aprueba bajo este método la viabilidad económica de la inversión bajo los parámetros actuales.

7.2.3. VAN

Para proceder al cálculo del VAN, se han tomado dos valores estimativos: en primer lugar, una vida útil de 25 años, correspondiente a la estimación habitual para sistemas de climatización; y, en segundo lugar, una tasa de descuento del 3 % (0,03), que se ha considerado equivalente a la rentabilidad media del bono del Estado español a 10 años.

Cambio de sistema climático				
Año	Flujo de caja (€)	Tasa de descuento	Flujo de caja (€)	VAN (€)
1	1379	0,03	1339	-25410
2	1379	0,03	1300	-24111
3	1379	0,03	1262	-22849
4	1379	0,03	1225	-21624
5	1379	0,03	1189	-20435
6	1379	0,03	1155	-19280
7	1379	0,03	1121	-18159
8	1379	0,03	1088	-17071
9	1379	0,03	1057	-16014
10	1379	0,03	1026	-14988
11	1379	0,03	996	-13992
12	1379	0,03	967	-13025
13	1379	0,03	939	-12087
14	1379	0,03	911	-11175
15	1379	0,03	885	-10290
16	1379	0,03	859	-9431
17	1379	0,03	834	-8597
18	1379	0,03	810	-7787
19	1379	0,03	786	-7001
20	1379	0,03	763	-6238
21	1379	0,03	741	-5496
22	1379	0,03	720	-4777
23	1379	0,03	699	-4078
24	1379	0,03	678	-3400
25	1379	0,03	658	-2742

Tabla 51: Tabla de VAN. Creación propia

Lo que se observa en el cálculo del VAN es que el ahorro generado a nivel anual no resulta suficiente para rentabilizar la inversión inicial en un horizonte de 25 años con una tasa de descuento del 3 %. Esto puede deberse, por un lado, a que los valores de ahorro utilizados son estimaciones poco precisas y, por otro, a que la inversión en este tipo de sistema no resulta rentable bajo las condiciones asumidas. En relación con lo anterior, se señala que la estimación del ahorro anual se ha realizado mediante una extrapolación de los parámetros del mes de marzo al resto del año. Esta metodología no es del todo rigurosa,

ya que la configuración energética de un único mes no puede considerarse representativo del conjunto del año.

7.2.4. TIR

El cálculo de la TIR se ha realizado de forma iterativa a partir del VAN. El resultado obtenido, una TIR del -1 %, indica que, bajo las condiciones actuales, la inversión no es económicamente viable en ningún escenario. Este valor negativo refleja que los flujos de ahorro generados a lo largo de la vida útil del sistema no alcanzan a cubrir la inversión inicial, ni siquiera en el largo plazo.

7.2.5. CEAH

Actuación	Factor Recuperación Capital	Ahorro anual de energía (kWh)	Coste de Energía Ahorrado (€/kWh)
Sustitución sistema de climatización	0,057	32586,67	0,047

Tabla 51: Resumen valores CEAH. Creación propia

Para el CEA (Coste de Energía Ahorrada), el objetivo es determinar el coste por kilovatio hora de energía ahorrada al comparar el sistema actual con un sistema convencional basado en calderas. El valor obtenido, 0,047 €/kWh, es inferior al coste medio estimado de la electricidad en España (0,15 €/kWh). Esto implica que, desde el punto de vista energético, el sistema implementado resulta viable, ya que permite una reducción efectiva en la factura energética.

8. Bibliografía

Aurea Consulting. (s. f.). *Comprar DesignBuilder: Tipos de licencia, precios, etc.* Recuperado el 20 de abril de 2025, de <https://ecoeficiente.es/comprar-designbuilder/>

DesignBuilder Software Ltd. (2002, marzo 29). *Engineering Reference*. U.S. Department of Energy. https://energyplus.net/assets/nrel_custom/pdfs/pdfs_v22.1.0/EngineeringReference.pdf

El blog de la ventilación inteligente. (2020, julio 17). *Cómo calcular la escala de calificación energética y su optimización*. <https://www.siberzone.es/blog-sistemas-ventilacion/como-calcular-la-escala-calificacion-energetica-optimizacion/>

Geotermia Vertical. (s. f.). *Suelo Radiante*. Recuperado el 18 de abril de 2025, de <https://www.geotermiavertical.es/suelo-radiante/>

Fonseca González, N. E. (s. f.). *Transformación y uso del recurso geotérmico*.

Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE). (s. f.). *20151123-Calificación de eficiencia energética en edificios*. Recuperado el 19 de abril de 2025, de <https://www.miteco.gob.es/content/dam/miteco/es/energia/files-1/Eficiencia/CertificacionEnergetica/DocumentosReconocidos/documentos-reconocidos/normativamodelosutilizacion/20151123-Calificacion-eficiencia-energetica-edificios.pdf>

Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE). (s. f.). *2023 Informe de seguimiento - Certificación energética V5*. Recuperado el 19 de abril de 2025, de https://www.miteco.gob.es/content/dam/miteco/es/energia/files-1/Eficiencia/CertificacionEnergetica/documentosinformativos/2023_Informedeseguimie nto_11_CERTIFICACION_ENERGETICA_V5.pdf

Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana. (s. f.). *ERESEE 2020 (versión en inglés)*. Recuperado el 19 de abril de 2025, de https://cdn.mitma.gob.es/portal-web-drupal/ERESSE/ERESEE_2020version_ingles.pdf

Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana. (s. f.). *DBHE - Documento Básico de Ahorro de Energía*. Recuperado el 19 de abril de 2025, de <https://www.codigotecnico.org/pdf/Documentos/HE/DBHE.pdf>

MyGeoEnergyNow. (s. f.). *Geotermia - Volumen 25, número 2*. Recuperado el 17 de abril de 2025, de <https://publications.mygeoenergynow.org/journals/Geotermia-Vol25-2.pdf#page=60>

Pis, P. (2022). *Análisis de la eficiencia energética en un centro hospitalario* [Trabajo Fin de Grado, Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales y de Telecomunicación, Universidad de Cantabria]. <https://repositorio.unican.es/xmlui/bitstream/handle/10902/24746/440806.pdf?sequence=1>

Sede Electrónica del Catastro. (s. f.). *Fondo mapa de España*. Recuperado el 20 de abril de 2025, de <https://www1.sedecatastro.gob.es/Cartografia/mapa.aspx>

TÜV SÜD. (s. f.). *Gestión de modelado de construcción BIM*. Recuperado el 19 de abril de 2025, de <https://www.tuvsud.com/es-es/industrias/construccion-real-estate/edificios/gestion-modelado-informacion-construccion-bim>

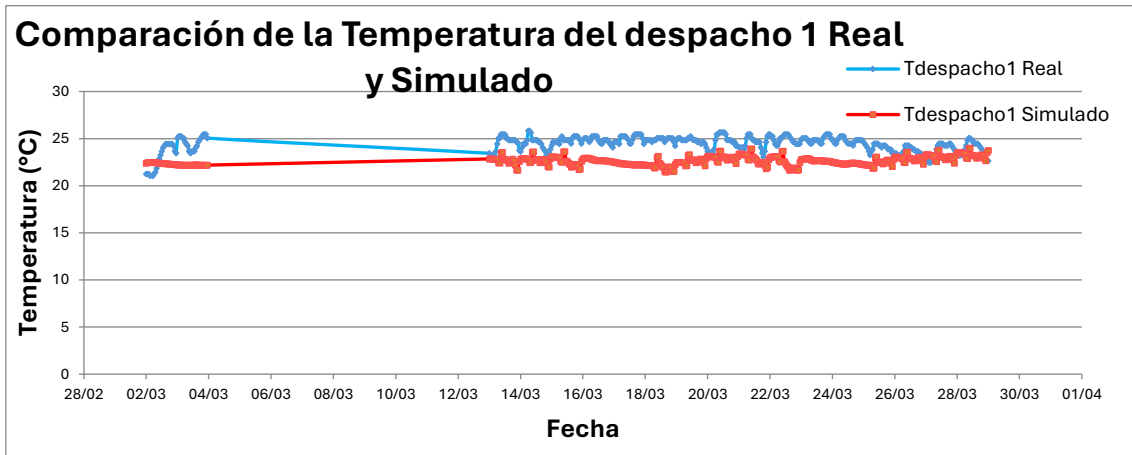
UNE. (2020). *UNE-EN 16798-1:2020 Eficiencia energética de los edificios. Ventilación de edificios*. Recuperado el 27 de mayo de 2025, de <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0063261>

Universidad Politécnica de Madrid (UPM). (s. f.). Martín Blas, T., & Serrano Fernández, A. *Ciclo de Carnot*. <https://www2.montes.upm.es/dptos/digfa/cfisica/termo2p/carnot.html>

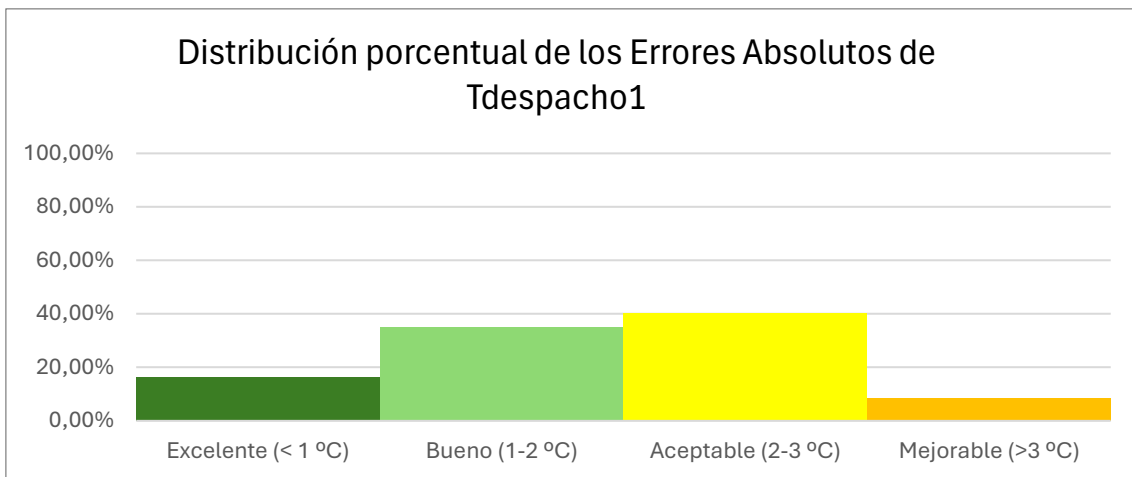
¿Qué es una unidad de tratamiento de aire (UTA)? (2021, abril 27). *Airtecnicos*. <https://www.airtecnicos.com/es/noticias/que-es-una-unidad-de-tratamiento-de-aire-uta>

Ibaiondo. (s. f.). *Manual de instrucciones PF*. Recuperado el 17 de abril de 2025, de <https://www.ibaiondo.com/wp-content/uploads/sites/250/2022/06/Manual-Instrucciones-PF.pdf>

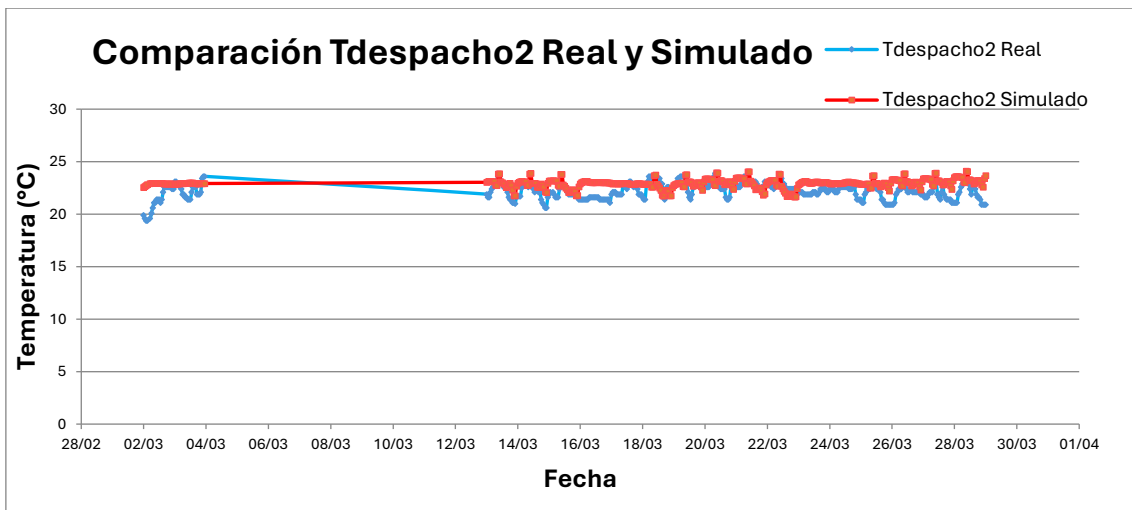
9. ANEXO 1. Gráficas comparativas de cada una de las zonas



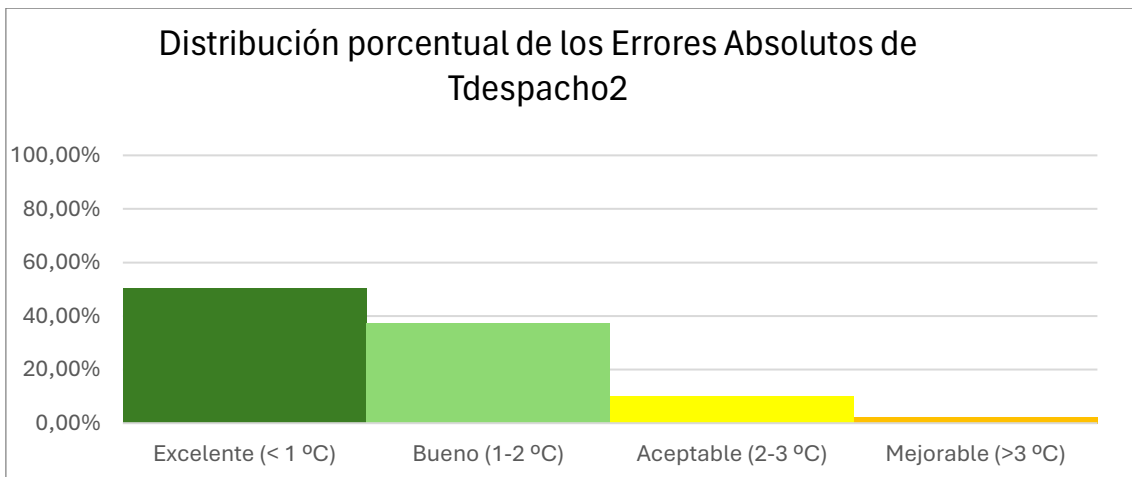
A1. 1: Comparación de la Temperatura del despacho 1 Real y Simulada. Creación



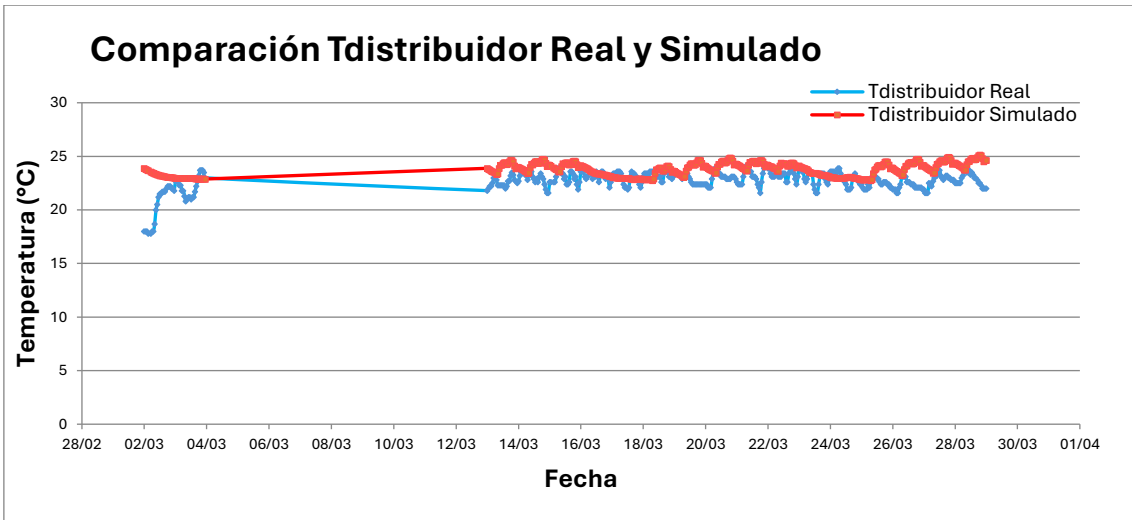
A1. 2: Distribución porcentual de los Errores Absolutos de la Temperatura del despacho 1. Creación propia



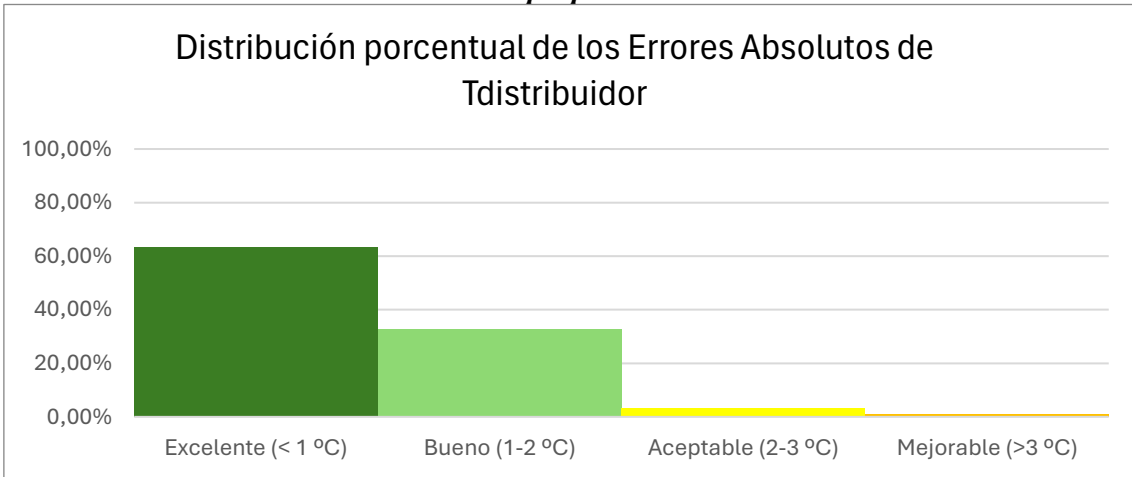
A1. 3: Comparación de la Temperatura del despacho2 Real y Simulada. Creación propia



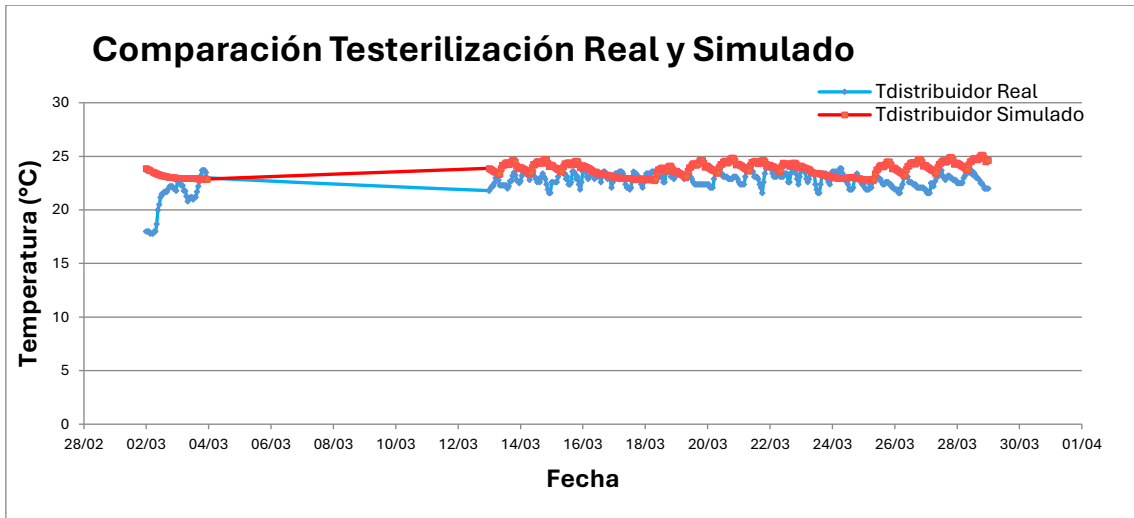
A1. 4: Distribución porcentual de los Errores Absolutos de la Temperatura del despacho 2. Creación propia



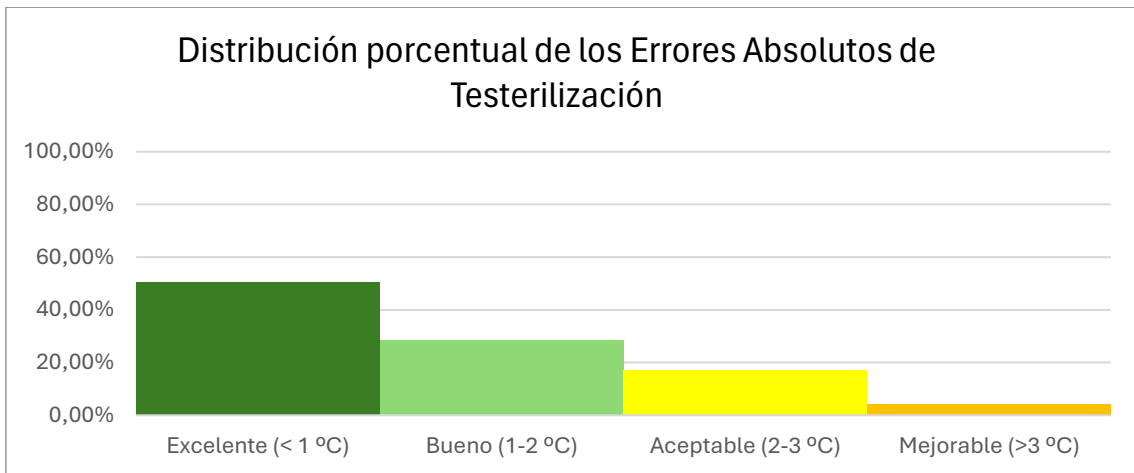
A1. 5: Comparación de la Temperatura del distribuidor Real y Simulada. Creación propia



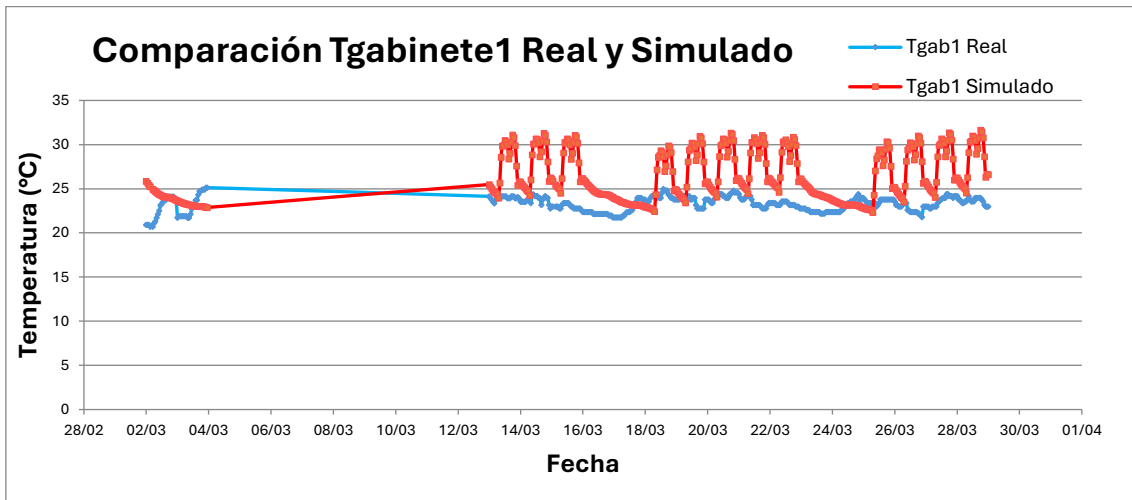
A1. 6: Distribución porcentual de los Errores Absolutos de la Temperatura del distribuidor. Creación propia



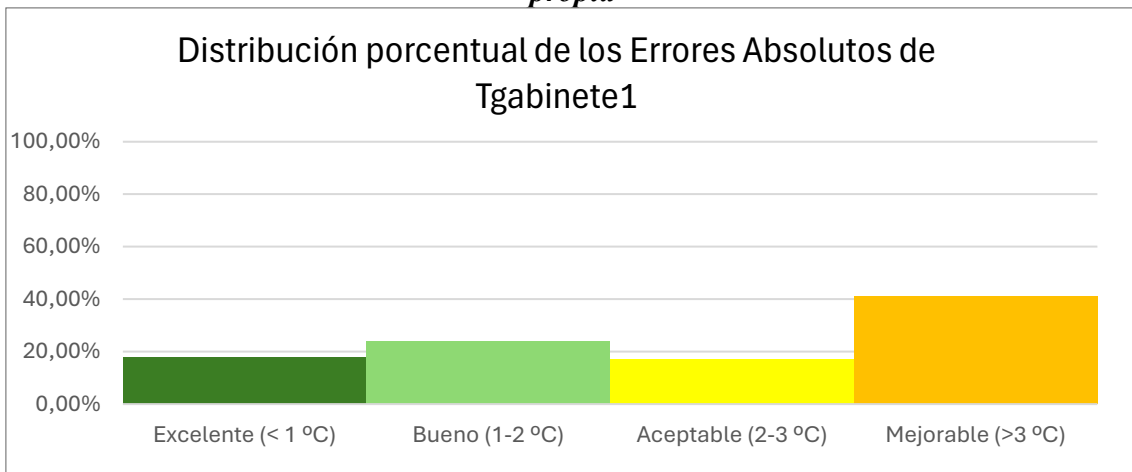
A1. 7: Comparación de la Temperatura de esterilización Real y Simulada. Creación propia



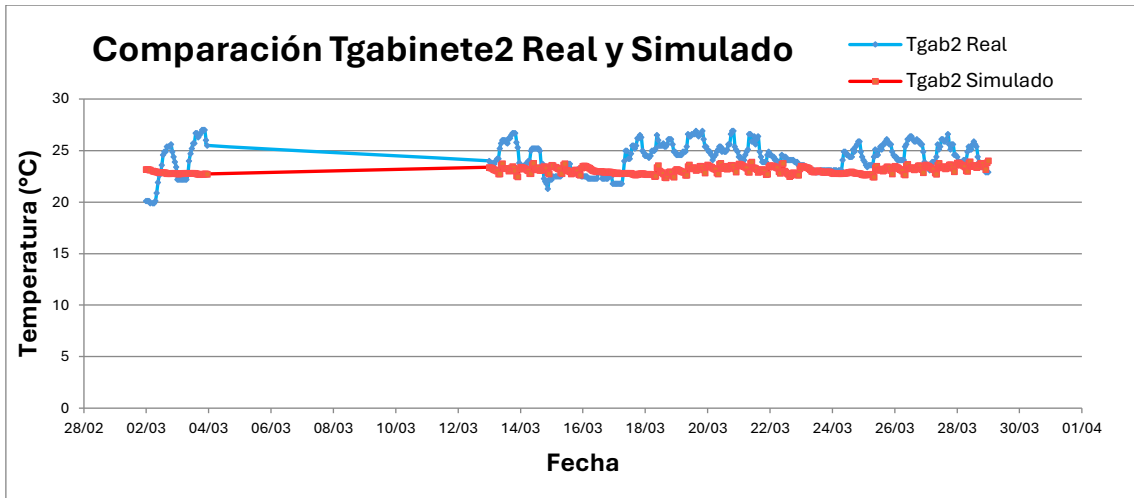
A1. 8: Distribución porcentual de los Errores Absolutos de la Temperatura de esterilización. Creación propia



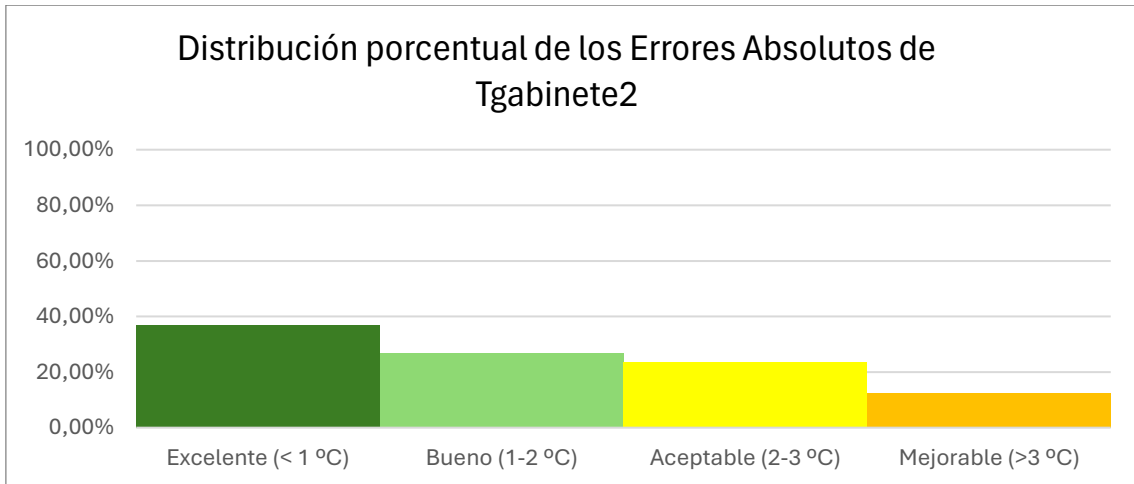
A1. 9: Comparación de la Temperatura del gabinete 1 Real y Simulada. Creación propia



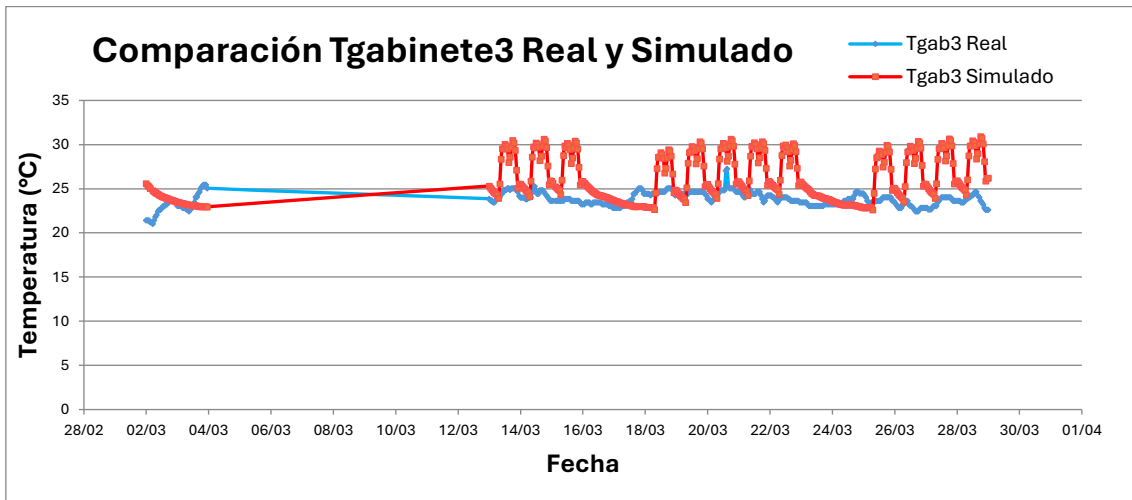
A1. 10: Distribución porcentual de los Errores Absolutos de la temperatura del gabinete 1. Creación propia



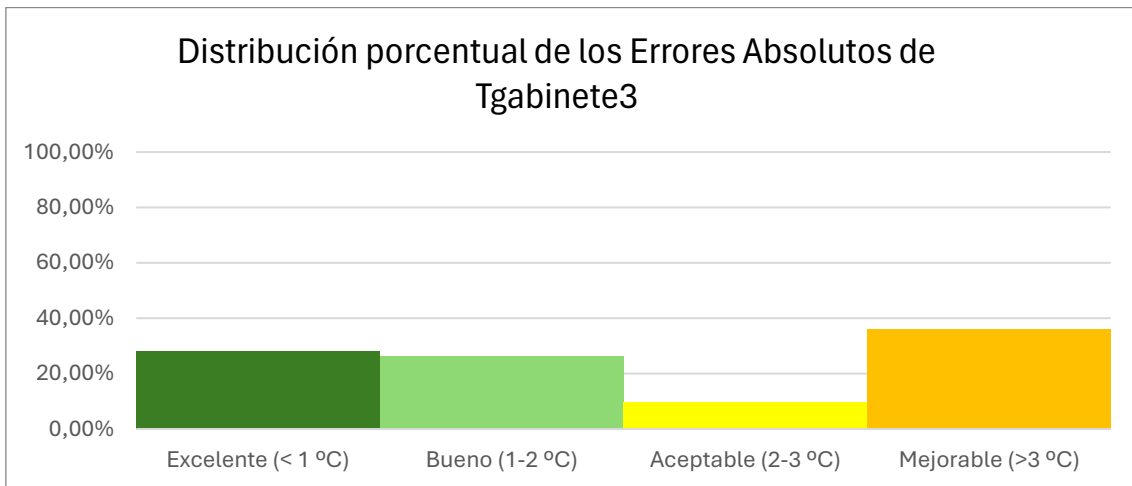
A1. 11: Comparación de la Temperatura del gabinete 2 Real y Simulada. Creación propia



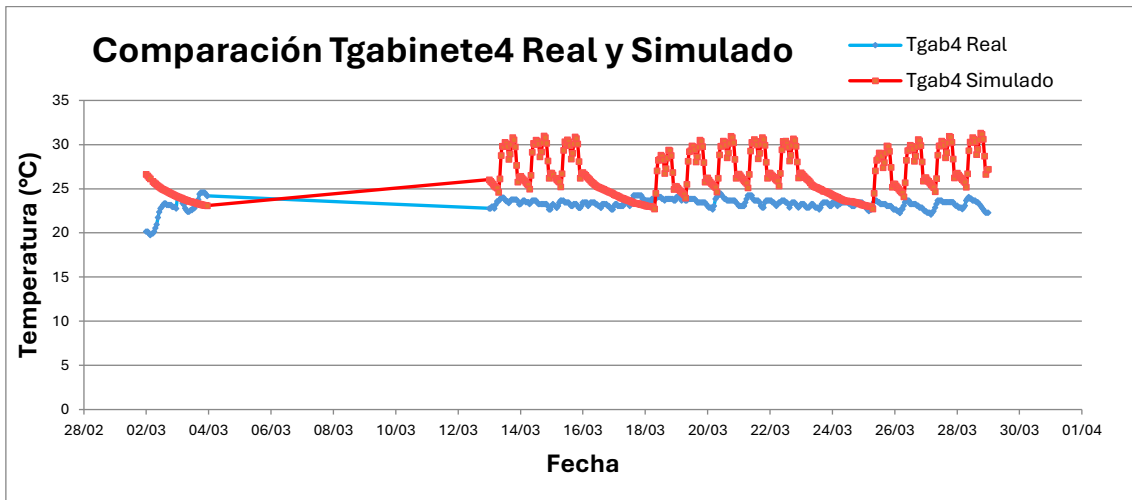
A1. 12: Distribución porcentual de los Errores Absolutos de la Temperatura del gabinete 2. Creación propia



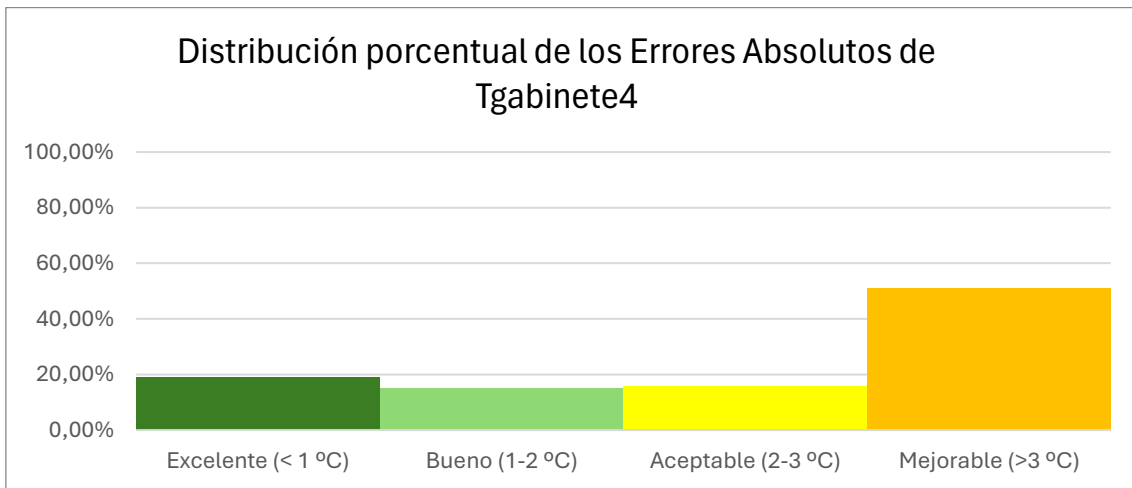
A1. 13: Comparación de la Temperatura del gabinete 3 Real y Simulada. Creación propia



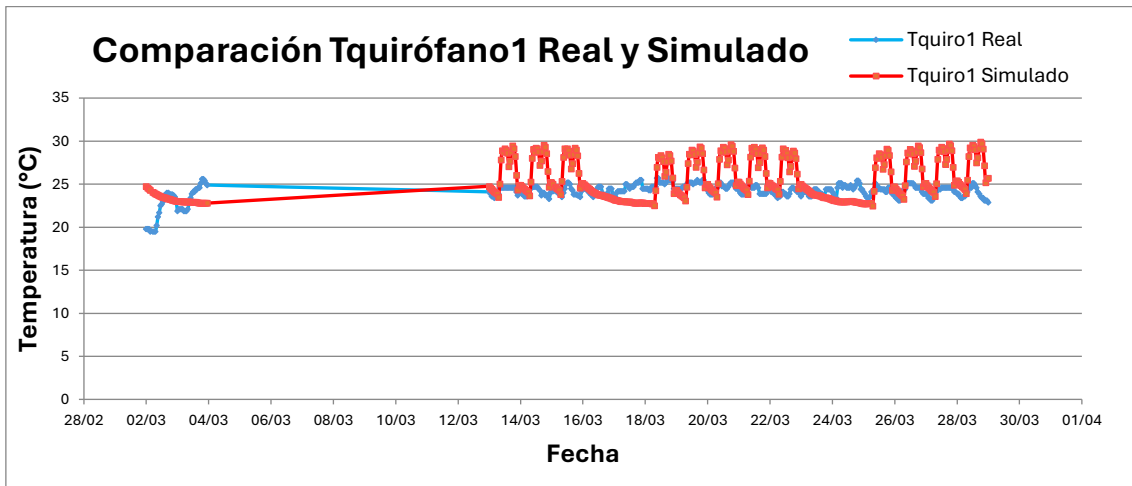
A1. 14: Distribución porcentual de los Errores Absolutos de la Temperatura del gabinete 3. Creación propia



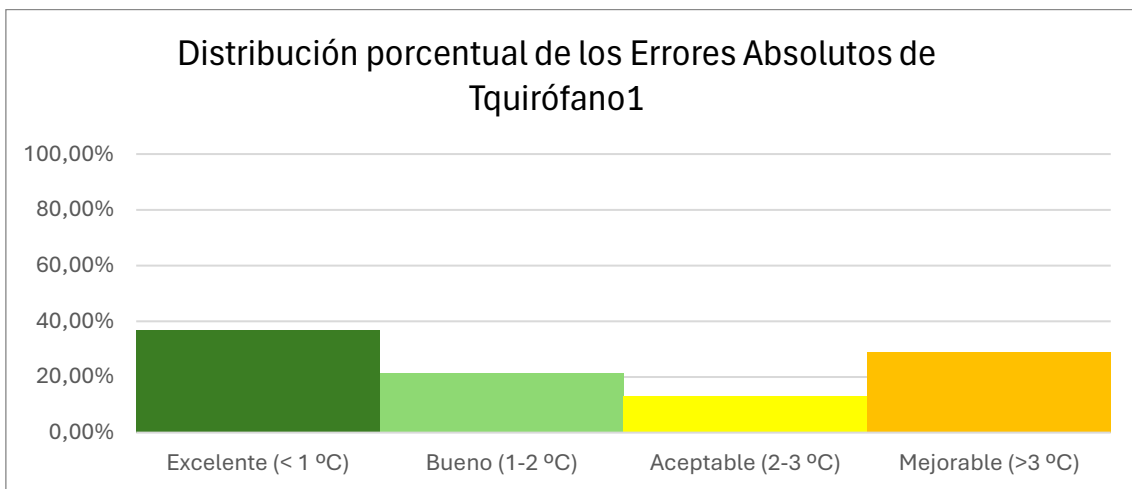
A1. 15: Comparación de la Temperatura del gabinete 4 Real y Simulada. Creación propia



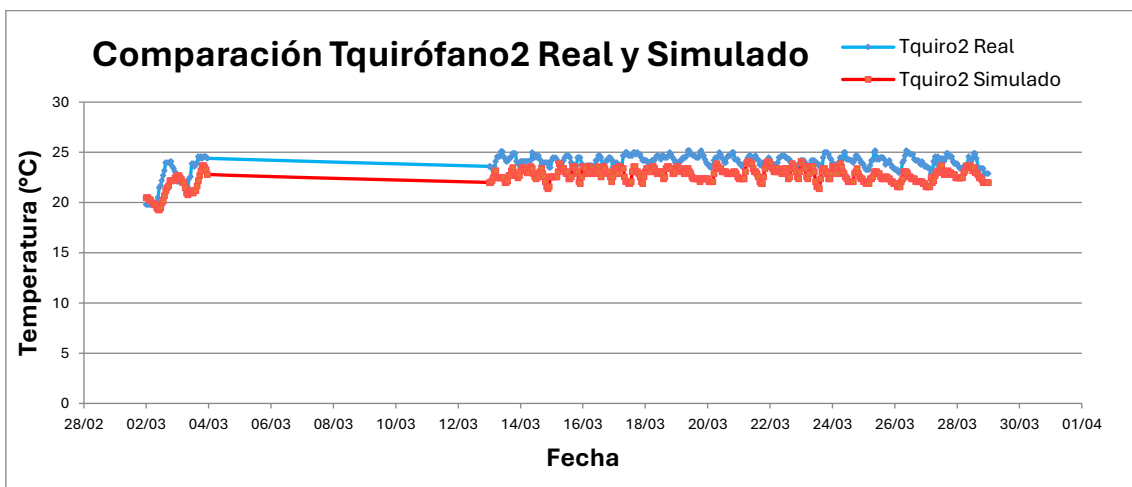
A1. 16: Distribución porcentual de los Errores Absolutos de la Temperatura del gabinete 4. Creación propia



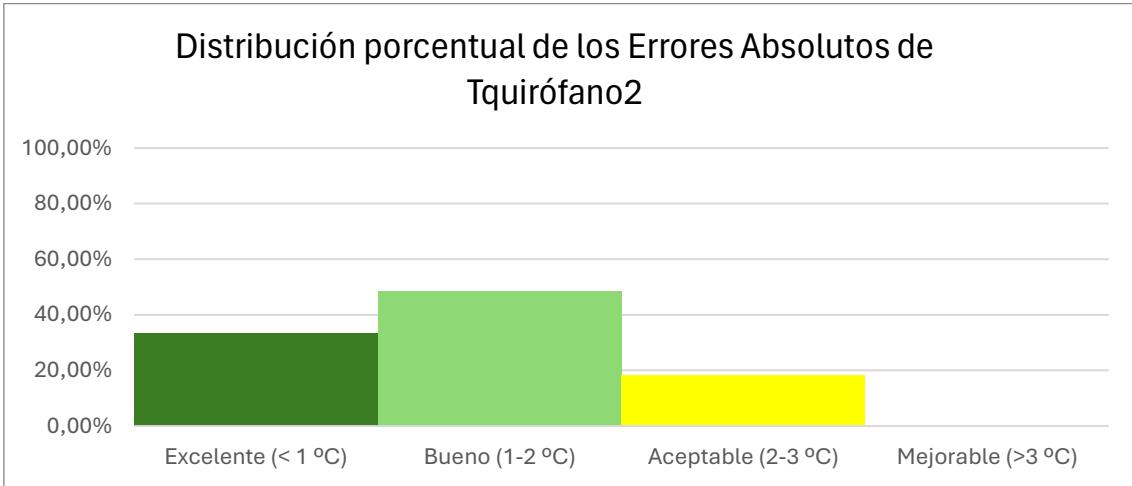
A1. 17: Comparación de la Temperatura del quirófano 1 Real y Simulada. Creación propia



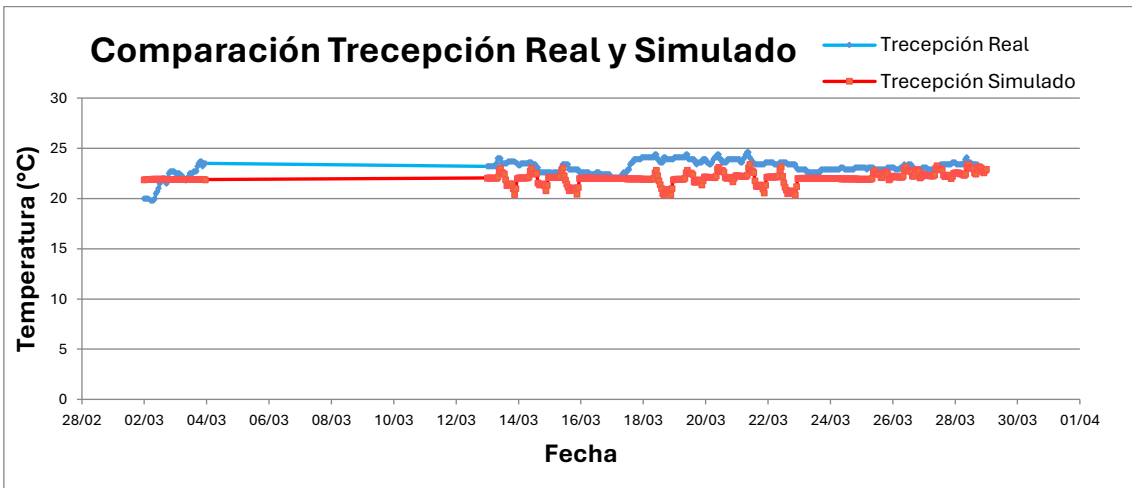
A1. 18: Distribución porcentual de los Errores Absolutos de la Temperatura del quirófano 1. Creación propia



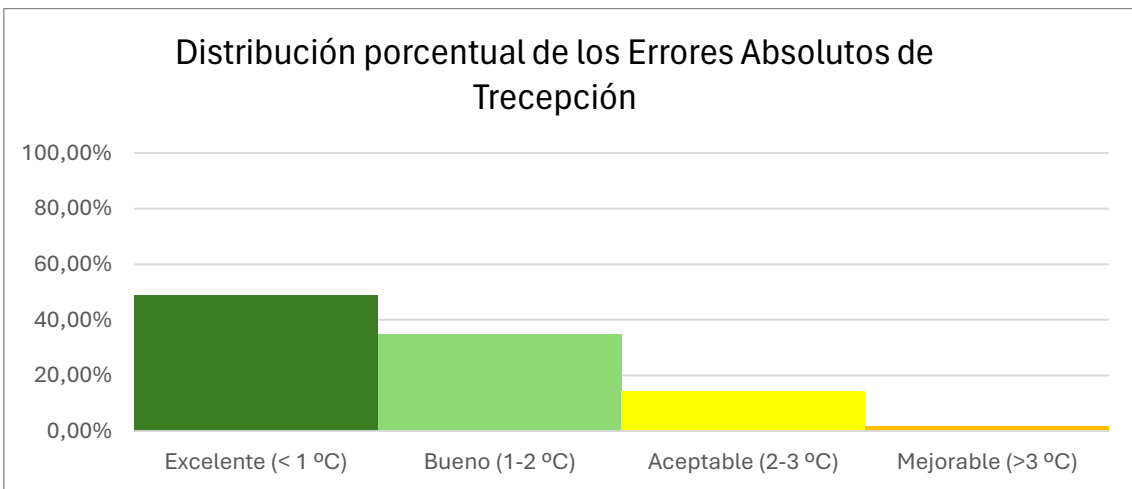
A1. 19: Comparación de la Temperatura del quirófano 2 Real y Simulada. Creación propia



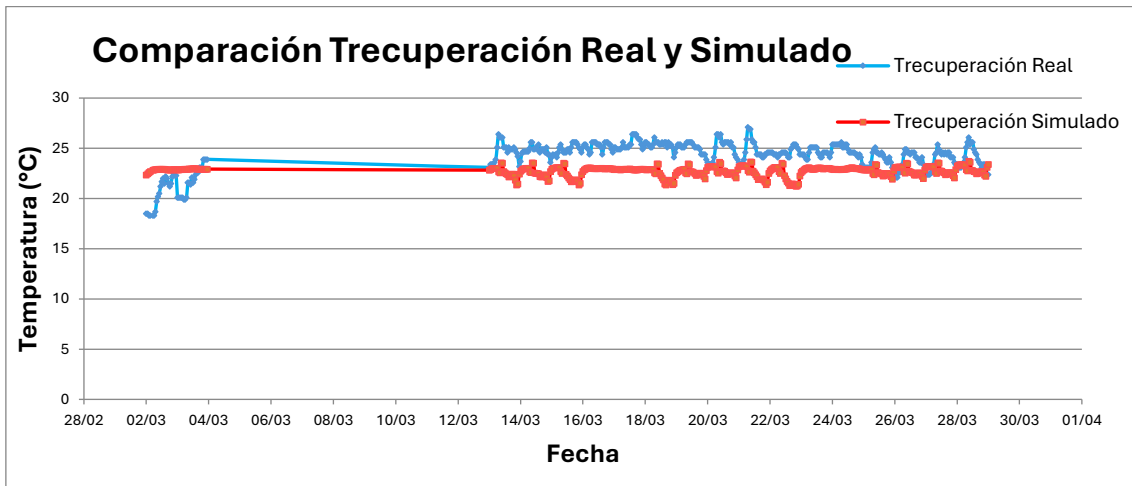
A1. 20: Distribución porcentual de los Errores Absolutos de la Temperatura del quirófano 2. Creación propia



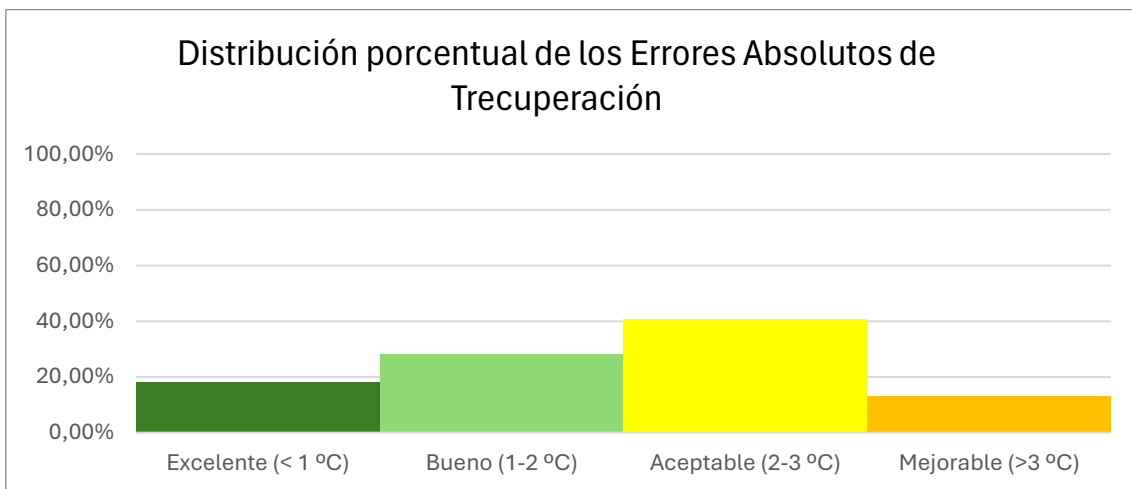
A1. 21: Comparación de la Temperatura de recepción Real y Simulada. Creación propia



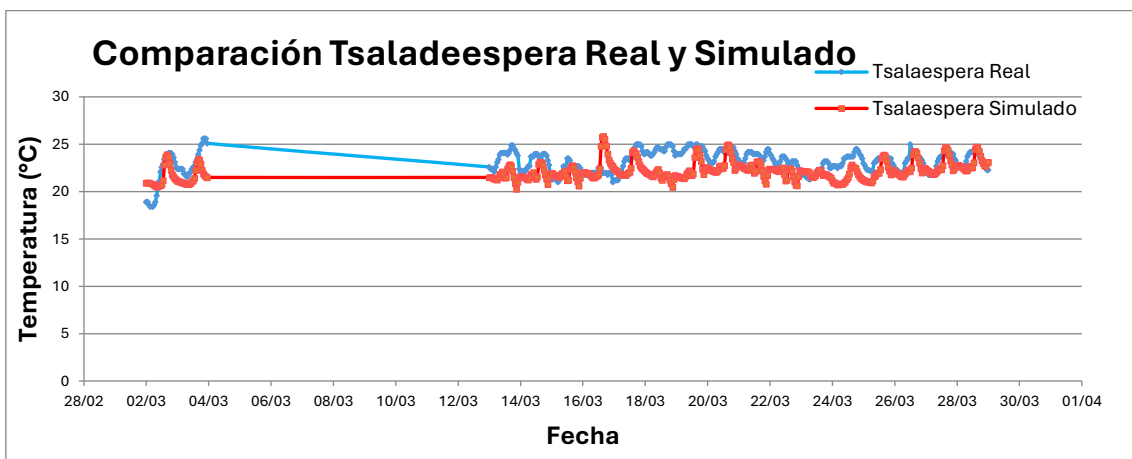
A1. 22: Distribución porcentual de los Errores Absolutos de la Temperatura de recepción. Creación propia



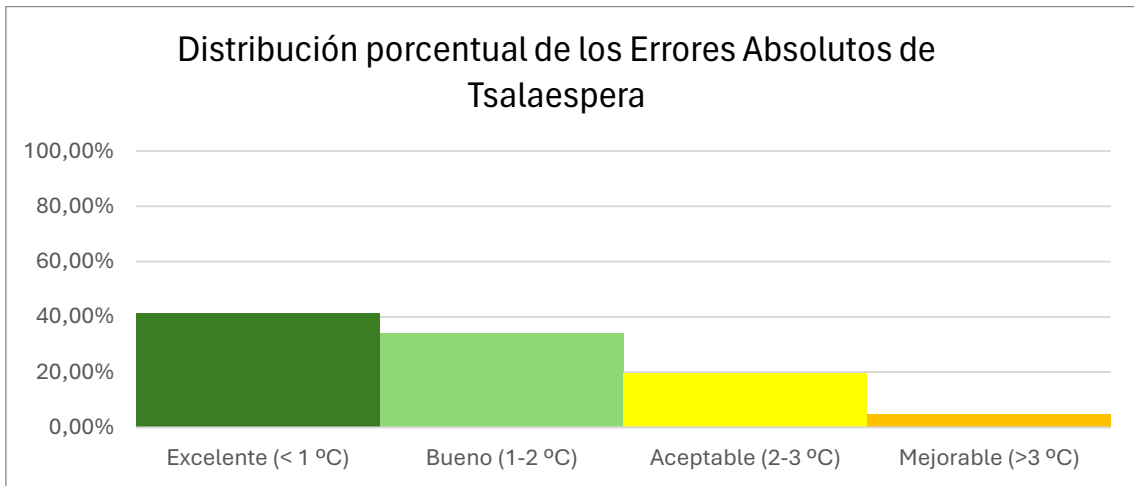
A1. 23: Comparación de la Temperatura de recuperación Real y Simulada. Creación propia



A1. 24: Distribución porcentual de los Errores Absolutos de la Temperatura de recuperación. Creación propia



A1. 25: Comparación de la Temperatura de la sala de espera Real y Simulada. Creación propia



A1. 26: Distribución porcentual de los Errores Absolutos de la Temperatura de la sala de espera. Creación propia