

Universidad Politécnica de Madrid



Escuela Técnica Superior de Arquitectura



Trabajo Fin de Grado

**Sergio de la Fuente Sánchez**

**Eficiencia Energética en Terminales de Aeropuertos.**  
*Estrategias arquitectónicas de diseño pasivas y activas.*



**EFICIENCIA ENERGETICA EN TERMINALES DE AEROPUERTOS:**

Estrategias arquitectónicas de diseño pasivas y activas.

ESTUDIANTE

**SERGIO DE LA FUENTE SÁNCHEZ**

TUTOR

**ENRIQUE LARRUMBIDE GÓMEZ-RUBIERA**

DEPARTAMENTO DE CONSTRUCCIÓN Y TECNOLOGÍA ARQUITECTÓNICAS

**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE ARQUITECTURA DE MADRID**

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

SEMESTRE OTOÑO 2024



### **Agradecimientos.**

*Tras un largo camino de esfuerzo, constancia y disciplina, me gustaría agradecer a todas aquellas personas que han estado presentes en mi vida a lo largo de la carrera.*

*En primer lugar, quiero agradecer a mi familia. A mi padre, madre y hermano por haber sido un apoyo incondicional, nunca haber dejado rendirme y animarme a perseguir mis metas y objetivos.*

*A todos mis amigos: Iván, Miguel, Pablo, Alberto, Mateo, José, Antonio, Agudo, Rodri, Martín, Rodrigo, Félix y Jorge. Gracias por hacerme feliz y acompañarme en los momentos más duros, sin vosotros nada hubiese sido posible.*

*Por último, agradezco a los profesores que me han acompañado a lo largo de estos años académicos. Agradecer a su vez, a mi tutor Enrique Larrumbide por su tiempo durante este Trabajo de Fin de Grado.*



*“La arquitectura sostenible no debe ser sólo eficiente, sino también hermosa,  
inspiradora y capaz de mejorar nuestra conexión con el mundo natural”*

*Bjarke Ingels*

# ÍNDICE

- 1. Resumen y Palabras Clave**
- 2. Introducción**
  - 2.1. Objetivo
  - 2.2. Metodología
- 3. Marco Teórico**
  - 3.1. Estrategias Pasivas
  - 3.2. Estrategias Activas
  - 3.3. Marco Normativo
    - 3.3.1. Normativa Española
    - 3.3.2. Normativa Europea
  - 3.4. Eficiencia Energética en el Sector Aeroportuario
- 4. Caso de Estudio**
  - 4.1. Introducción T4 Aeropuerto Adolfo Suarez Madrid-Barajas
  - 4.2. Análisis de Planos
  - 4.3. Estrategias Pasivas T4
    - 4.3.1. Ubicación y climatología
    - 4.3.2. Orientación y Diseño Bioclimático
    - 4.3.3. Envolverte Térmica
  - 4.4. Estrategias Activas T4
    - 4.4.1. Sistema de Climatización (HVAC)
  - 4.5. Propuestas de mejora
- 5. Conclusiones**
- 6. Bibliografía E Ilustraciones**

## **1. Resumen y Palabras Clave**

Este Trabajo de Fin de Grado consiste en el estudio de la eficiencia energética en el panorama aeroportuario, desde el punto de vista de las estrategias de diseño pasivas y activas.

Se analiza en que consisten y que abarcan estas estrategias, cómo y cual es el panorama de la arquitectura eficiente en las terminales de aeropuertos, especialmente a nivel nacional del territorio de España.

Termina con el caso de estudio de la Terminal 4 del Aeropuerto Adolfo Suarez Madrid Barajas, abarcando todos estos aspectos, explicándolos en mayor profundidad, y como influyen en este edificio.

Palabras clave:

**Eficiencia energética – Pasivas – Activas – Climatización – Envoltente – Terminal**

## **2. Introducción**

### **2.1. Objetivo**

La Eficiencia Energética se ha asentado en el panorama arquitectónico debido a su gran impacto, y el futuro sostenible que se prevé en él. Siendo el sector aeroportuario uno de los mayores consumidores energéticos su papel es clave en el camino hacia una infraestructura más eficiente y sostenible. Dentro de este contexto, la Terminal 4 del Aeropuerto Adolfo Suarez Madrid-Barajas es una de las infraestructuras más grandes y complejas de España, siendo un interesante objeto de estudio acerca de su diseño y otros aspectos relacionados con la eficiencia energética.

Tener en cuenta estrategias de diseño pasivas, a la hora del diseño arquitectónico puede llegar a reducir al mínimo la dependencia de sistemas tanto de climatización como ventilación mecánicos, convirtiéndose en un gran reto para esta tipología de edificios que forman las Terminales Aeroportuarias. A lo largo de este trabajo se analizarán diferentes soluciones tomadas en el territorio español para poner en contexto y abordar el tema principal del trabajo, la eficiencia energética. Como gran objetivo se estudiará en profundidad la Terminal 4 del Aeropuerto Adolfo Suarez Madrid-Barajas; en base a los caracteres teóricos expuestos, las estrategias aplicadas en su diseño y obtendremos conocimientos y conclusiones sobre como influyen en el bienestar térmico de los usuarios de este tipo de edificios, y posibles aplicaciones de mejora.

A su vez, las estrategias activas completan este enfoque al trabajar sobre tecnologías avanzadas que consiguen la optimización de recursos energéticos. El objetivo será entender, tras un análisis en profundidad del sistema de climatización (HVAC) de la Terminal caso de estudio, su funcionamiento y, cómo afecta y contribuye su diseño al confort climático del espacio interior.

## 2.2. Metodología

Una vez marcados los objetivos, la estrategia metodológica a seguir será la siguiente.

Se seguirá un enfoque cualitativo, el trabajo consistirá en recopilar información teórica, es decir, una revisión bibliográfica de fuentes especializadas en el sector a estudiar para comprender los principios de la eficiencia energética y de las estrategias de diseño pasivas y activas.

Posteriormente se aplicará a los diferentes aspectos a desarrollar, y una vez se hayan definido los temas teóricos ejemplificarlos con casos. Dando lugar a un Caso de Estudio el cual llevará una mayor extensión, definición y cantidad de documentación tanto teórica como gráfica. Desde un análisis de planos, técnicas constructivas, materiales...de la T4.

Finalmente se llevan a acabo unas conclusiones, que dan lugar a posibles mejoras acerca el caso de estudio, y posibles futuras líneas de investigación.

Las principales herramientas utilizadas fueron libros, guías técnicas, dibujos arquitectónicos, visitas al edificio, reuniones con ingenieros del proyecto.

Un enfoque que busca integrar teoría y práctica, aportando una visión crítica acerca de la eficiencia energética en grandes infraestructuras aeroportuarias.

### 3. Marco Teórico

#### 3.1. Estrategias Pasivas

Las estrategias arquitectónicas de diseño pasivas son aquellas que toman ventaja de servirse de recursos naturales existentes, con el fin de reducir la necesidad y dependencia de instalaciones, lograr el confort deseado en los edificios y promover la eficiencia energética.

El diseño pasivo se traduce como una solución eficiente y sostenible, para hacer frente a los diferentes problemas ambientales y energéticos en la construcción. Partiendo de estrategias como el aprovechamiento de la luz solar, la ventilación natural y el paisaje, al reunir elementos como la orientación adecuada, el aislamiento térmico y el uso de materiales sostenibles se logran espacios confortables. Este sistema de diseño no sólo contribuye a la reducción de consumo energético, sino que promueve una mayor relación con el entorno natural y su aprovechamiento de forma consciente.

Hoy en día, la creciente conciencia sobre el cambio climático y la importancia de reducir las emisiones de carbono han llevado a la gran presencia del diseño pasivo en la arquitectura y siendo cada vez más relevante. El diseño de Terminales Aeroportuarias desde este punto de vista puede lograr ahorros grandes beneficios en cuestión de ahorro energético, reducción de demanda y costos de operación a largo plazo, al tiempo que promueven espacios más cómodos y saludables para sus usuarios.

Algunos de los aeropuertos españoles con iniciativas en eficiencia energética desde las estrategias pasivas :

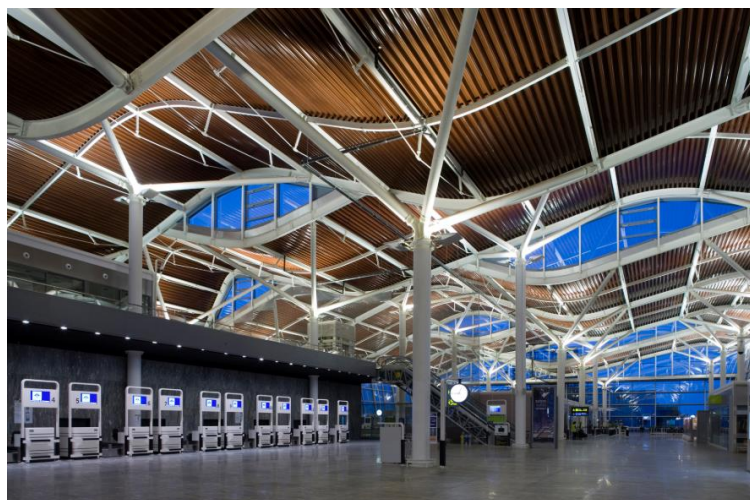
- **Terminal 2 Aeropuerto de Valencia-Manises**
  - a) Aprovechamiento de luz natural: A través de la envolvente que forma la fachada de la terminal (de acero y vidrio) permite una amplia entrada de luz natural, generando amplios espacios en las zonas de embarque y facturación.
  - b) Diseño adaptado a la topografía: El diseño de la terminal se adaptó a la topografía existente, lo que contribuye a una mejor integración con el entorno y potencialmente a un mejor rendimiento térmico.
  - c) Conservación de vegetación autóctona: El proyecto incluyó directrices para conservar la vegetación local, la cual ayuda a regular la temperatura y mejorar la calidad del aire alrededor de la terminal.
  - d) Materialidad adaptativa: La envolvente metálica exterior unifica las diversas funciones y estructuras del edificio, creando un aspecto dinámico y variable que cambia según la luz y la hora del día, contribuyendo al control térmico pasivo.



*Ilustración 1. Exterior fachada T2\_Valencia-Manises*

- **Aeropuerto de Zaragoza**

- a) Aprovechamiento de luz natural: El diseño de la cubierta ondulada con lucernarios estratégicamente ubicados, permite maximizar la entrada de luz natural a los espacios interiores, controlando la ganancia solar con los vidrios selectivos utilizados en estos.
- b) Diseño geométrico eficiente: La terminal se compone por once módulos de disposición alterna, optimizando la distribución interna. La estructura modular genera amplios espacios interiores que contribuyen al confort climático.
- c) Materiales sostenibles: Utilización de materiales como acero, aluminio y pinturas hidrosolubles en base poliéster. Pavimento pétreo que actúa como frontera entre el exterior y el interior, reflejando la luz.
- d) Control térmico pasivo: El propio diseño de la cubierta y la fachada con sistemas de protección pasivos basados en un minucioso modelado térmico.



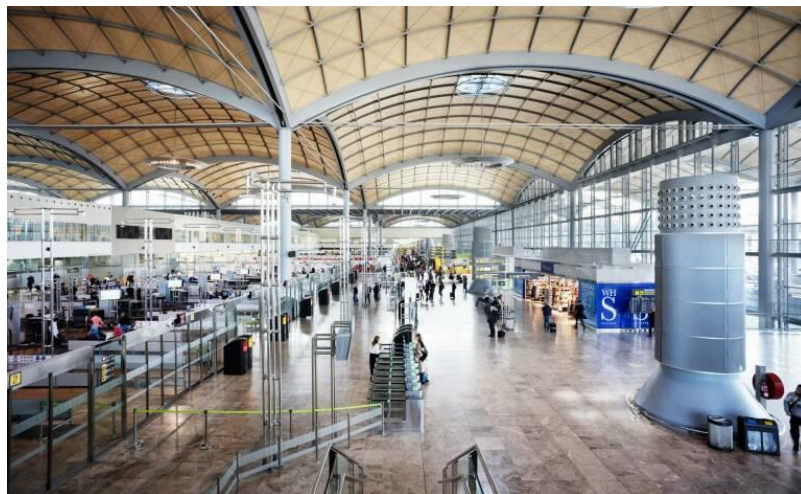
*Ilustración 2. Interior Terminal Aeropuerto de Zaragoza*



*Ilustración 3. Exterior Terminal Aeropuerto de Zaragoza*

- **Aeropuerto de Alicante-Elche**

- a) Ventilación natural: Se utiliza la apertura de exutorios en la cúpulas de la cubierta de la terminal y las puertas de la fachada de acceso para ventilar y mantener la temperatura ambiente dentro de los parámetros establecidos
- b) Aprovechamiento de la luz natural: Se han instalado luxómetros en zonas con entrada de luz natural para controlar el encendido de la iluminación artificial según la iluminación natural.
- c) Diseño eficiente: La presencia de cúpulas y lucernarios como cubierta permiten la entrada de luz natural y facilitan la ventilación.



*Ilustración 4. Interior Terminal Aeropuerto de Alicante-Elche*

### 3.2. Estrategias Activas

Las estrategias activas emergen como herramientas clave para garantizar la eficiencia energética y sostenibilidad operativa en estas infraestructuras aeroportuarias. Consisten en la implementación de tecnologías avanzadas y sistemas mecánicos que optimizan el uso de recursos y reducen el consumo energético. Dentro del estudio sobre terminales de aeropuertos, estas estrategias son esenciales para cumplir con los estándares internacionales de sostenibilidad, reducir costos operativos y adaptarse a las crecientes demandas de los usuarios.

Se basan en tres principios fundamentales:

- i) La eficiencia energética, minimizando el consumo energético mediante tecnologías avanzadas
- ii) El control inteligente, por medio del monitoreo y gestión de los sistemas en tiempo real para maximizar su rendimiento.
- iii) La integración de energías renovables para reducir la dependencia de combustibles fósiles.

Algunos de los aeropuertos españoles con iniciativas en eficiencia energética desde las estrategias activas :

- **Terminal 2 del Aeropuerto de Valencia-Manises.**

A la vanguardia en la implementación de sistemas inteligentes para la gestión energética.

En diciembre de 2021 se inició un proyecto piloto para instalar el innovador sistema "RESPIRA" de inteligencia artificial desarrollado por SENER.

Este sistema aplica inteligencia artificial para gestionar de manera eficiente los sistemas de climatización, regulando la temperatura y humedad para mejorar el confort de los usuarios.

Además de mejorar el confort, el sistema reduce el consumo energético y mejora la calidad del aire, contribuyendo a reducir el riesgo de proliferación de organismos.

Tras el éxito del piloto, se instaló "RESPIRA" en la Terminal 2. Se logró una reducción promedio diaria en el consumo energético entre 18.8% y 23.9%, alcanzando una disminución de hasta 2.676 kWh en días de mayor demanda. Estos resultados supusieron un ahorro de hasta 600 euros/día, y reducción de emisiones de CO2 entre 125-600 kg/día.



*Ilustración 5. Interior T2 Aeropuerto Valencia-Manises*

- **Aeropuerto de La Palma.**

Como ejemplo pionero en la implementación de energía eólica como fuente primaria de energía en el sector aeroportuario europeo.

El sistema consta de dos aerogeneradores de 600kW de potencia nominal cada uno, la producción de los aerogeneradores llega a un centro de transformación ubicado en la central eléctrica del aeropuerto, distribuyéndose en baja tensión directamente al consumo en los distintos centros de transformación del aeropuerto.

Los aerogeneradores y paneles solares suponen la principal fuente de energía del aeropuerto que llega a un autoabastecimiento casi del 90%.



*Ilustración 6. Aeropuerto de La Palma*

- **Aeropuerto de Málaga-Costa del Sol.**

Se encuentra en fase de licitación el proyecto de instalación de una planta fotovoltaica que constará de tres campos solares ubicados dentro de los terrenos aeroportuarios. Una vez que se implemente, la planta solar se prevé que generará energía equivalente al consumo de aproximadamente 3.500 hogares.

Tendrá una potencia total instalada de 6,434 MWp (megavatios pico) y una potencia nominal de 5,55 MW.

No existen cifras pero se espera que contribuya significativamente a la reducción de emisiones de CO<sub>2</sub>, contribuyendo con la sostenibilidad de las instalaciones aeroportuarias.



*Ilustración 7. Aeropuerto de Málaga-Costa del Sol*

### 3.3. Marco Normativo

#### 3.3.1. Normativa Europea

Acorde a los datos revelados por la Comisión Europea, los edificios de la UE contemplan un 40 % de nuestro consumo de energía y del 36 % de las emisiones de gases de efecto invernadero. La revisión de la Directiva relativa a la eficiencia energética de los edificios, presentada por la Comisión el 15 de diciembre de 2021, es parte del paquete denominado «Objetivo 55». La Ley europea sobre el clima de julio de 2021 consagró los objetivos para 2030 y 2050 en un instrumento jurídico vinculante.

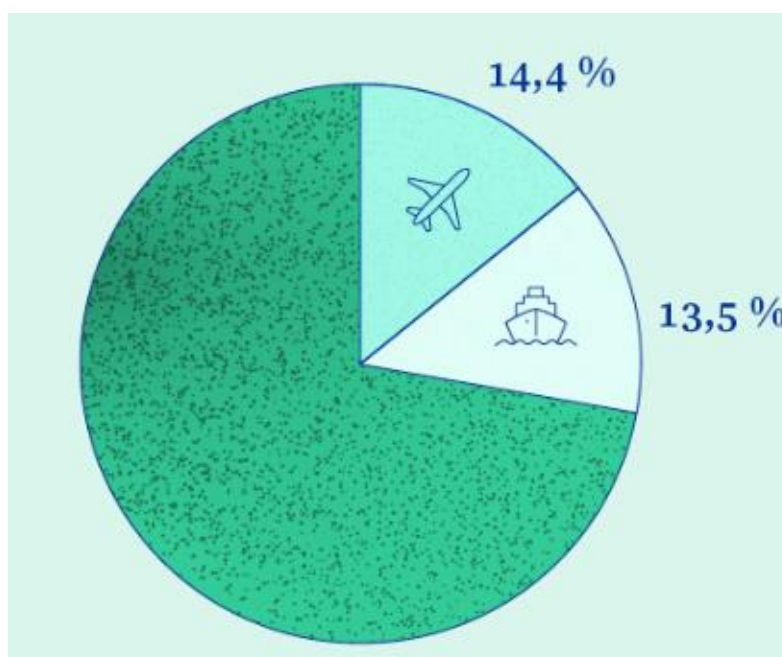


Ilustración 8. Gráfico emisiones de transporte en UE

En este contexto la eficiencia energética sigue la legislación con las propuestas de la Conferencia sobre el panorama futuro europeo de mejorar la independencia energética y la sostenibilidad de la UE.

La revisión propuesta de la Directiva relativa a la eficiencia energética de los edificios tiene por objeto reducir al máximo las emisiones de gases de efecto invernadero y el consumo de energía en el sector de la construcción de la UE de aquí a 2030, y hacerlo climáticamente neutro a partir de 2050. También busca renovar los edificios menos eficientes y mejorar el intercambio de información sobre el rendimiento energético. Se fija como objetivo el deber de todos los edificios nuevos a ser climáticamente neutros a partir de 2030. Los Estados miembros podrán tener en cuenta el potencial de calentamiento global (PCG) a lo largo del ciclo de vida del edificio, que incluye la producción y eliminación de los productos utilizados para construirlo.

Instalaciones solares podrían ser implementadas en aquellos Estados con necesidad, y la aparición de estas infraestructuras sería un proceso paulatino. Abarcarían edificios públicos y no residenciales, dependiendo de su tamaño, y en todos los edificios residenciales nuevos de aquí a 2030.

### **Directiva (UE) 2024/1275 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 24 de abril de 2024, relativa a la eficiencia energética de los edificios**

La Directiva (UE) 2024/1275 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 24 de abril de 2024, relativa a la eficiencia energética de los edificios, fue publicada el 8 de mayo de 2024 en el Diario oficial de la Unión Europea.

La nueva Directiva de Eficiencia Energética en Edificios buscar acelerar el ritmo de renovación de edificios en la UE, especialmente aquellos con peor comportamiento energético, ya que se constituye como un pilar clave para garantizar los objetivos de descarbonización.

Al mismo tiempo, esta Directiva se alinea con las iniciativas desarrolladas en el Plan RePower EU. El mencionado plan nace como respuesta al conflicto entre Rusia y Ucrania, iniciado en 2022, y tiene por objeto reducir la dependencia energética de los combustibles fósiles rusos y acelerar la transición energética. Para ello, las principales metas son incrementar el uso de fuentes de energía renovables, reducir el consumo energético e incrementar el ahorro energético.

Así, el texto refundido de la EPBD (Energy Performance of Buildings Directive) no solo actualiza las disposiciones existentes anteriormente, sino que extiende su campo de actuación para promover la rehabilitación energética, la movilidad sostenible y el aprovechamiento de las fuentes energéticas renovables, con un foco en hogares vulnerables y afectados por la pobreza energética.

Se exponen brevemente algunas de las disposiciones más relevantes para entender la nueva EPBD, en relación al enfoque del trabajo.

#### **Artículo 9 – Requisitos mínimos de Eficiencia Energética (MEPS)**

A nivel de cada Estado Miembro, se establecerán normas mínimas de eficiencia energética para los edificios no residenciales. Concretamente, se establecerán dos umbrales máximos de uso de energía primaria, que reflejen este consumo para el 16% y el 26% de los edificios con peor eficiencia energética del parque no residencial nacional del año 2020. Así, para el año 2030, todos los edificios no residenciales deberán estar por debajo del umbral del 16%, y, para el año 2033 por debajo del umbral del 26%. La finalidad es promover la renovación de los edificios con peor comportamiento energético del parque nacional.

Por otra parte, el Estado Miembro también deberá contar con una estrategia a nivel nacional enfocada en el parque residencial. En este caso, los objetivos serán de reducción del uso medio de energía primaria en el parque residencial. Concretamente, respecto a la imagen del año 2020, dicho uso deberá verse

reducido en un 16% para el año 2030 y entre un 20% y un 22% para el año 2040. Además, deberán fijarse objetivos de reducción progresiva hasta el año 2050, alcanzando un parque inmobiliario residencial de cero emisiones. Se ha de destacar también que, el 55% del cumplimiento de estos objetivos, se debe asociar a la renovación del 43% de los edificios residenciales menos eficientes.

#### **Artículo 22** – Información sobre la eficiencia energética de edificios

El Estado miembro deberá crear una base de datos nacional sobre eficiencia energética en edificios, que no solo recopile datos de los edificios a nivel individual, sino también de la eficiencia global del parque inmobiliario nacional. Los datos agregados y anonimizados del parque inmobiliario nacional serán de acceso público, respetando la normativa nacional y de la Unión relativa a protección de datos.

Los dueños de los edificios podrán acceder, de forma fácil y gratuita, a toda la información relacionada con eficiencia energética disponible de su edificio: certificado de eficiencia energética, consumo anual, informes de inspección, pasaportes de renovación e indicadores, entre otros. Bajo la autorización del dueño, los posibles compradores o arrendatarios del edificio podrán acceder a parte de esta información. Igualmente, se deberá asegurar el acceso autorizado a las entidades financieras en lo que respecta a los edificios en su cartera de inversión.

A lo largo del articulado de la EPBD, se puede encontrar referencias adicionales respecto a las obligaciones de información sobre eficiencia energética en edificios, y la expedición en formato digital de los documentos asociados

#### **3.3.2. Normativa Española**

En 2006 se aprobó el Código Técnico de la Edificación (CTE), mediante el Real Decreto 314/2006 de 17 de marzo 2006. Este documento recogía y plasmaba las exigencias de la LOE. Compuesto por varios Documentos Básicos (DB), por tanto DB HE (Documento Básico de ahorro de Energía). Este documento ha ido evolucionando con los años en función de las necesidades y avances de la sociedad en este sector.

A día de hoy el DB HE se compone de siete subapartados de requisitos básicos obligatorios para edificios de obra nueva e intervenciones en edificios existentes. Sigue en vigor la última de sus revisiones (23 de junio 2024) con modificaciones en la sección HE 0; anteriormente la última gran revisión se llevó a cabo en 2019, con sus modificaciones e incorporaciones sobre el DB HE2013. El séptimo apartado fue incorporado en junio de 2022 (HE 6), especifica las dotaciones mínimas para la infraestructura de recarga de vehículos eléctricos.

HE0	Limitación del <i>consumo energético</i>
HE1	Condiciones para el control de la <i>demanda energética</i>
HE2	Condiciones de las instalaciones térmicas
HE3	Condiciones de las instalaciones de iluminación
HE4	Contribución mínima de energía renovable para cubrir la demanda de agua caliente sanitaria
HE5	Generación mínima de energía eléctrica procedente de fuentes renovables
HE6	Dotaciones mínimas para la <i>infraestructura de recarga de vehículos eléctricos</i>

Ilustración 9. Imagen índice CTE DB HE junio 2022.

Según el **Artículo 15. Exigencias básicas de ahorro de energía (HE):**

1. “El objetivo del requisito básico consiste en conseguir un uso racional de la energía necesaria para la utilización de los *edificios*, reduciendo a límites sostenibles su consumo y conseguir, asimismo, que una parte de este consumo proceda de fuentes de energía renovable, como consecuencia de las características de su *proyecto, construcción, uso y mantenimiento*” .
2. “Para satisfacer este objetivo, los edificios se proyectarán, construirán, utilizarán y mantendrán de forma que se cumplan las exigencias básicas que se establecen en los apartados siguientes”.
3. “El Documento Básico DB HE Ahorro de energía especifica parámetros objetivos y procedimientos cuyo cumplimiento asegura la satisfacción de las exigencias básicas y la superación de los niveles mínimos de calidad propios del requisito básico de ahorro de energía”.  
(Página 3).

Acorde al enfoque del trabajo y los temas que se abordan, a continuación se citarán las exigencias básicas de los subapartados HE 0: Limitación del consumo energético, HE 1: Condiciones para el control de demanda energética, y HE 2: Condiciones de las instalaciones térmicas. Todas ellas adscritas al Artículo 15. Exigencias básicas de ahorro de energía (HE).

**Artículo 15.1. Exigencia básica HE 0: Limitación del consumo energético.**

“El consumo energético de los edificios se limitará en función de la zona climática de su ubicación, el uso del edificio y, en el caso de edificios existentes, el alcance de la intervención. El consumo energético se satisfará, en gran medida, mediante el uso de energía procedente de fuentes renovables”.

### **Artículo 15.2. Exigencia básica HE 1: Condiciones para el control de la demanda energética.**

“Los edificios dispondrán de una envolvente térmica de características tales que limite las necesidades de *energía primaria* para alcanzar el *bienestar térmico* en función de la zona climática de su ubicación, del régimen de verano y de invierno, del uso del edificio y, en el caso de edificios existentes, del alcance de la intervención”.

“Las características de los elementos de la envolvente térmica en función de su zona climática, serán tales que eviten las descompensaciones en la calidad térmica de los diferentes espacios habitables. Así mismo, las características de las *particiones interiores* limitarán la transferencia de calor entre unidades de uso, y entre las unidades de uso y las zonas comunes del edificio”.

“Se limitarán los riesgos debidos a procesos que produzcan una merma significativa de las prestaciones térmicas o de la vida útil de los elementos que componen la envolvente térmica, tales como las condensaciones”.

### **Artículo 15.3. Exigencia básica HE 2: Condiciones de las instalaciones térmicas**

“Las instalaciones térmicas de las que dispongan los edificios serán apropiadas para lograr el bienestar térmico de sus ocupantes. Esta exigencia se desarrolla actualmente en el vigente Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios (RITE), y su aplicación quedará definida en el proyecto del edificio”.  
(Página 3).

Para próximas aplicaciones en otros apartados del trabajo se desarrolla alguno de los apartados del subapartado HE 1. Condiciones para el control de la demanda térmica.

Esta sección aplica sobre edificios de nueva construcción, y sobre intervenciones en edificios existentes (ampliaciones, cambios de uso o reformas). Quedan excluidos de aplicación aquellos edificios protegidos oficialmente, construcciones provisionales, edificios industriales de la defensa y agrícolas no residenciales, y edificios aislados con superficie útil total inferior a 50m<sup>2</sup>.

#### **Cuantificación de la exigencia. Condiciones de la envolvente térmica.**

##### - Transmitancia de la envolvente térmica

La transmitancia térmica (U) es la medida que relaciona el calor que fluye por unidad de tiempo y superficie, que se transfiere a través de un sistema constructivo, cuando hay un gradiente térmico de 1°C (o 1K) de temperatura entre los ambientes.

Sus unidades de medidas en el Sistema Internacional (SI) son W/m<sup>2</sup> K o W/m<sup>2</sup>C

La transmitancia térmica (U) de cada elemento perteneciente a la envolvente térmica no superará el valor límite (Ulim) de la tabla 3.1.1.a-HE1:

Elemento	Zona climática de invierno					
	$\alpha$	A	B	C	D	E
Muros y suelos en contacto con el aire exterior ( $U_s, U_{st}$ )	0,80	0,70	0,56	0,49	0,41	0,37
Cubiertas en contacto con el aire exterior ( $U_c$ )	0,55	0,50	0,44	0,40	0,35	0,33
Muros, suelos y cubiertas en contacto con espacios no habitables o con el terreno ( $U_t$ ) Medianerías o particiones interiores pertenecientes a la envolvente térmica ( $U_{iD}$ )	0,90	0,80	0,75	0,70	0,65	0,59
Huecos (conjunto de marco, vidrio y, en su caso, cajón de persiana) ( $U_H$ )*	3,2	2,7	2,3	2,1	1,8	1,80
Puertas con superficie semitransparente igual o inferior al 50%	5,7					

\*Los huecos con uso de escaparate en unidades de uso con actividad comercial pueden incrementar el valor de  $U_H$  en un 50%.

Ilustración 10. Tabla 3.1.1.a-HE1

- Coeficiente global de

transmisión de calor a través de la envolvente térmica

El objetivo de este indicador es asegurar la eficiencia de la envolvente térmica con relación a la transmisión de calor. Mide la capacidad global de evitar el intercambio de calor por conducción. Este coeficiente se representa por la letra (K). Su valor para edificios con uso distinto al residencial privado no superará el valor límite (Klim) obtenido de la tabla 3.3.3.c-HE1:

Tabla 3.1.1.c - HE1 Valor límite  $K_{lim}$  [W/m<sup>2</sup>K] para uso distinto del residencial privado

	Compacidad V/A [m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> ]	Zona climática de invierno					
		$\alpha$	A	B	C	D	E
Edificios nuevos. Ampliaciones. Cambios de uso. Reformas en las que se renueve más del 25% de la superficie total de la envolvente térmica final del edificio	$V/A \leq 1$	0,96	0,81	0,76	0,65	0,54	0,43
	$V/A \geq 4$	1,12	0,98	0,92	0,82	0,70	0,59

Los valores límite de las compacidades intermedias ( $1 < V/A < 4$ ) se obtienen por interpolación.  
En el caso de ampliaciones los valores límite se aplicarán sólo en caso de que la superficie o el volumen construido se incrementen más del 10%.  
Las unidades de uso con actividad comercial cuya compacidad V/A sea mayor que 5 se eximen del cumplimiento de los valores de esta tabla.

Ilustración 11. Tabla 3.1.1.c-HE1

- Control solar de la envolvente térmica

El objetivo del indicador de control solar ( $q_{sol};j_{ul}$ ) es asegurar la capacidad de control efectivo de las ganancias solares, estableciendo un límite sobre el impacto de radiación solar en la superficie acondicionada.

Para edificios nuevos y ampliaciones, cambios de uso o reformas con renovación superior al 25% de la superficie total de la envolvente térmica final del edificio, el parámetro de control solar ( $q_{sol};j_{ul}$ ) no superará el valor límite de la tabla 3.1.2-HE1:

**Tabla 3.1.2-HE1 Valor límite del parámetro de control solar,  $q_{sol,jul,lim}$  [kWh/m<sup>2</sup>·mes]**

Uso	$q_{sol,jul}$
Residencial privado	2,00
Otros usos	4,00

Ilustración 12. Tabla 3.1.2-HE1

- **Permeabilidad al aire de la envolvente térmica**  
 Propiedad de una superficie al estar sometida a diferencia de presiones, de dejar pasar el aire. Es un parámetro que afecta al confort térmico de los espacios habitables.  
 Las soluciones constructivas y la ejecución de los elementos de la envolvente térmica deberá asegurar una adecuada estanqueidad al aire. Con especial cuidado en encuentros huecos-opacos, puntos de paso a través de la envolvente y puertas de paso a espacios sin acondicionar.  
 La permeabilidad al aire ( $Q_{100}$ ) de los huecos que pertenezcan a la envolvente térmica no superará el valor límite de la tabla 3.1.3.a-HE1:

**Tabla 3.1.3.a-HE1 Valor límite de permeabilidad al aire de huecos de la envolvente térmica,  $Q_{100,lim}$  [m<sup>3</sup>/h·m<sup>2</sup>]**

	Zona climática de invierno					
	$\alpha$	A	B	C	D	E
Permeabilidad al aire de huecos ( $Q_{100,lim}$ ) <sup>*</sup>	$\leq 27$	$\leq 27$	$\leq 27$	$\leq 9$	$\leq 9$	$\leq 9$

Ilustración 13. Tabla 3.1.3.a-HE1

- **Limitación de descompensaciones**  
 En particiones interiores la transmitancia térmica no superará el valor de la tabla 3.2-HE1, en función del uso asignado a las distintas unidades de uso que delimiten:

**Tabla 3.2 - HE1 Transmitancia térmica límite de particiones interiores,  $U_{lim}$  [W/m<sup>2</sup>K]**

Tipo de elemento	Zona climática de invierno						
	$\alpha$	A	B	C	D	E	
Entre unidades del mismo uso	Particiones horizontales	1,90	1,80	1,55	1,35	1,20	1,00
	Particiones verticales	1,40	1,40	1,20	1,20	1,20	1,00
Entre unidades de distinto uso Entre unidades de uso y zonas comunes	Particiones horizontales y verticales	1,35	1,25	1,10	0,95	0,85	0,70

Ilustración 14. Tabla 3.2 HE1

- **Limitación de condensaciones en la envolvente térmica**  
 Ante condensaciones intersticiales en la envolvente térmica, deberán no producir una merma significativa en cuanto a prestaciones, o que supongan un riesgo de degradación o pérdida de su vida útil. La máxima condensación acumulada nunca superará la cantidad de evaporación posible en el mismo periodo.

Por otro lado, en base al **Real Decreto Ley 14/2022 del BOE**, del día 1 de agosto, es relevante destacar el Artículo 11. (Título II). *Obligaciones de los gestores aeroportuarios y de las compañías aéreas*, se dice lo siguiente:

1. “Los gestores de los aeropuertos de interés general abiertos al tráfico civil situados en territorio español y las compañías aéreas de transporte aéreo de pasajeros que operen en los aeropuertos españoles, en sus respectivos ámbitos de responsabilidad y para las operaciones que desarrollen, observarán, en la medida de lo posible, las directrices operativas y, en cualquier caso, cumplirán aquellos preceptos que tengan la consideración de obligatorios.”
  
2. “Los gestores aeroportuarios y compañías aéreas informarán a los pasajeros, entre otros medios, por megafonía del aeropuerto, cartelería, medios digitales y señalética, sobre las medidas preventivas que éstos hayan adoptado en aplicación de las directrices operativas.”
  
3. “A solicitud de las autoridades sanitarias, las compañías aéreas colaborarán facilitando la información a los pasajeros que les sea requerida por dichas autoridades y recabando de éstos la información precisa para la gestión de una emergencia de salud pública de importancia internacional.”

### **3.4. Eficiencia Energética en el Sector Aeroportuario**

La eficiencia energética se ha convertido, a nivel mundial, en una prioridad en diversos sectores. Su fuerte repercusión en el sector aeroportuario ha encaminado hacia un desarrollo sostenible y la implementación de medidas para reducir el consumo energético y las emisiones contaminantes. El sector de la aviación contribuye significativamente a las emisiones globales del GEI, representando un 2.5% a nivel mundial y el 4% en Europa.

En España esta evolución se ve impulsada gracias a Aena, gestor aeroportuario español, que junto con su Plan de Acción Climática (PAC) 2021-2030 marca un hito en la evolución de la estrategia de sostenibilidad, estableciendo objetivos concretos y un plan para alcanzarlos. Como alcanzar la neutralidad de carbono en 2026 y el Net Zero Carbon en 2040.

Un factor clave para alcanzar estas metas es el análisis de los consumos energéticos en los aeropuertos operados por la compañía. Aena, en busca de un mayor rendimiento energético, trabaja identificando las áreas de mejora y aplicando las soluciones más eficientes para reducir su consumo. De esta forma, contribuye así a la eficiencia energética controlando, adecuando y reduciendo el gasto energético en la red. Mejoras de carácter tecnológico en iluminación y climatización, adecuación del consumo energético a la operativa real del

aeropuerto, mejora del control de los consumos de energía eléctrica y combustibles fósiles y un trabajo de concienciación y sensibilización del personal que forma parte de la compañía.

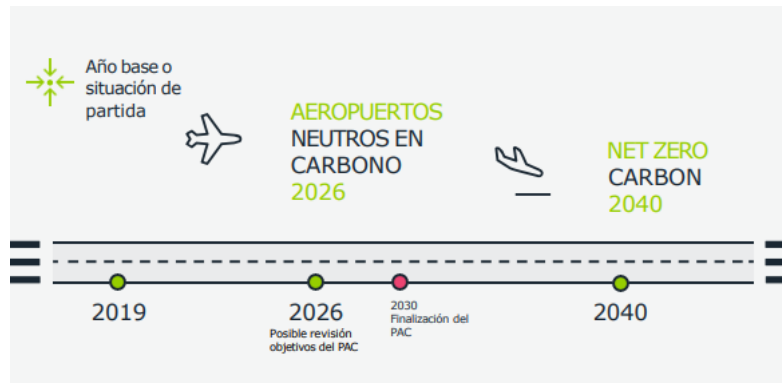


Ilustración 15. Esquema de acción Plan de Acción Climática

La reducción del consumo energético pasa también por una climatización más eficiente. A nivel nacional, Aena ya ha puesto en marcha en sus aeropuertos un plan progresivo de renovación de equipos de climatización: calderas de calefacción y aires acondicionados, son relevados por otros de menor impacto atmosférico y mayor eficiencia energética.

Según el Plan de Acción Climática las metas a cumplir en 2030 es reducir el consumo de energía de climatización por pasajero en un 9% y alcanzar el 90% de energía sostenible en climatización consumida (compra y producción).

Aquellos aeropuertos a nivel nacional gestionados por Aena cumplen con las medidas de ahorro y eficiencia energética contempladas en el último **Real Decreto Ley 14/2022**, anteriormente expuesto en el apartado de normativa, entre las que se encuentran la regularización de la temperatura de los sistemas de climatización, el cierre automático de puertas o el mantenimiento de los edificios terminales apagados cuando permanezcan cerrados o no operativos.

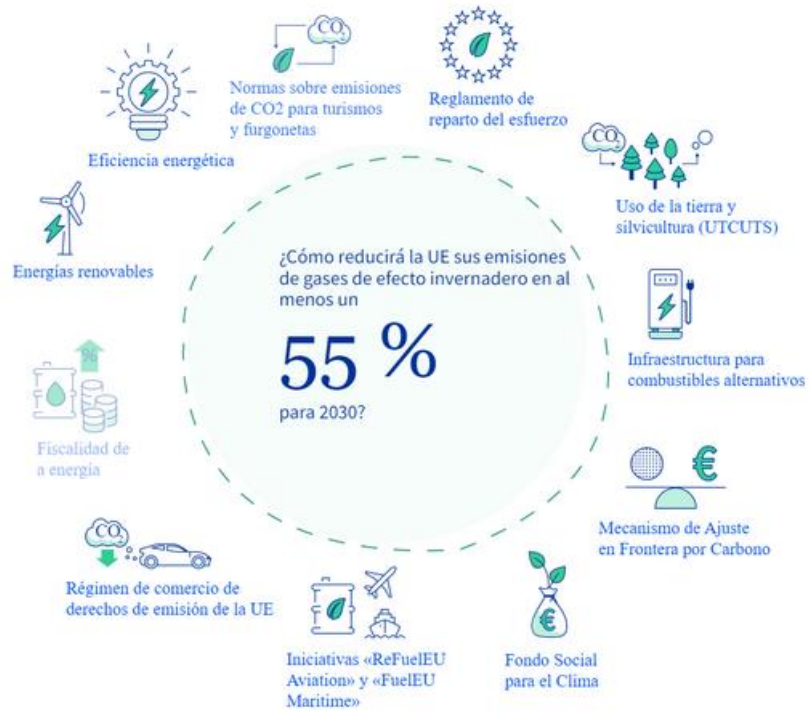


Ilustración 16. Objetivo plan UE

## 4. Caso de Estudio

### 4.1. Introducción Terminal 4 Aeropuerto Adolfo Suarez Madrid-Barajas.

Previo al estudio de el edificio seleccionado para la realización de este Trabajo de Fin de Grado, se quiere contextualizar los orígenes del Aeropuerto de Madrid-Barajas, y la propia Terminal 4.

El aeropuerto Barajas de Madrid, "Adolfo Suarez Madrid-Barajas" a partir del 26 de marzo del 2014, abrió sus puertas en 1933, y desde entonces ha sido ampliado en numerosas ocasiones. La última y más significativa fue en 1997, cuando la empresa Aena convocó un concurso para una nueva ampliación. La propuesta del arquitecto británico Richard Rogers en colaboración con el madrileño Estudio Lamela, resultó ganadora.

Barajas es el aeropuerto más importante de España. Consta de cuatro terminales conocidas como T1, T2, T3 y T4, así como un edificio satélite de la Terminal 4, que se conoce como T4-S. El conjunto de la T4 entró en funcionamiento a comienzos de 2006, convirtiendo al Aeropuerto de Madrid Barajas en el mayor de Europa por superficie de terminales, con un millón de metros cuadrados distribuidos entre T1, T2, T3, T4, T4-S y ciento cuatro pasarelas de embarque directo.

La Terminal 4 está ubicada en el noreste de Madrid, en el distrito de Barajas. El conjunto del sistema de funcionamiento del aeropuerto también se extiende por los municipios de Alcobendas, San Sebastián de los Reyes y Paracuellos de Jarama. Situada a tres kilómetros al norte del antiguo Barajas (terminales T1, T2, y T3).

La Terminal 4 responde a un concepto de diseño centrado en ofrecer una experiencia mejorada a los pasajeros, creando ambientes atractivos y tranquilos.

El proyecto seleccionado para la ejecución de la Terminal 4 se caracteriza por cuatro principios básicos:

- Integración del paisaje. La composición de la terminal busca un diálogo con el horizonte, se genera una continuidad paisajística mediante la transparencia de las fachadas y los cambios de nivel, y una integración tanto formal como visual entre las zonas exteriores e interiores.
- Iluminación natural. Una de las premisas de la propuesta en todo el edificio, mediante cañones y lucernarios, reduciendo así el consumo energético. La luz natural llega hasta los niveles inferiores del edificio, y los desarrollos lineales permiten un máximo perímetro en el dique, que facilita su iluminación natural a través de las fachadas de vidrio.
- Claridad espacial. Una clara separación de flujos de llegada y salida en diferentes niveles favorece la circulación de los pasajeros. El gradiente de

colores de la estructura principal facilita la orientación, junto con la secuencia de funciones y cañones de luz genera un fácil entendimiento del edificio en su trayecto de llegada o salida al pasajero.

- Flexibilidad compositiva. La composición lineal con repetición de elementos o la extrusión de elementos, como forjados, facilita el proceso constructivo, así como las posibles futuras ampliaciones. La suma transversal de los módulos genera los espacios de cañón.

A continuación, se explicará brevemente la funcionalidad y espacialidad el edificio para que, más adelante, se estudie con mayor detalle su forma y organización.

La obra está basada en tres ideas: las cubiertas onduladas, las columnas en pares y una gama de colores del arco iris que va del azul oscuro al rojo, pasando por el amarillo. Mediante el uso de colores en los pilares que sostienen la cubierta ondulada, se identifican las diferentes zonas de la Terminal. El diseño responde a grandes exigencias de ahorro energético y económico, además de una gran funcionalidad. La nueva terminal y el satélite se diseñaron para manejar en el momento de su terminación 35 millones de pasajeros al año, y actualmente en torno a los 50 millones.



*Ilustración 17. Interior edificio Terminal 4, Dique.*

El Edificio Terminal conectado al aparcamiento por dársenas de acceso de vehículos, está pensado para los vuelos nacionales y Schengen (es decir, con destino a países de la Unión Europea). Posee 470.000 m<sup>2</sup> construidos (distribuidos en 6 niveles), cuenta con 174 mostradores de facturación con 38 posiciones de contacto de aeronaves, a través de pasarelas telescópicas ubicadas en el dique de embarque, el cual tiene una longitud de 1,2 km.

Este alberga tres módulos lineales (Facturador, Procesador y Dique), cumpliendo diferentes funciones según los flujos de pasajeros (llegadas o salidas).

Recepción de pasajeros, facturación, control y embarque para vuelos de salida; desembarque, recogida de equipajes y salida de pasajeros del edificio, para vuelos de llegada.

En primer lugar, caracterizamos el edificio con sus respectivos datos. Como bien se nombra en el anterior párrafo, posee una superficie construida de 470.000m<sup>2</sup>, de los cuales 230.000m<sup>2</sup> sobre rasante y 230.000 bajo rasante. Se organiza en seis alturas por nivel. Partimos de el nivel 0 (0.00m), sobre rasante se configuran el nivel +1 (+5.775m) y el nivel +2 (+10.625m), mientras que bajo rasante contamos con cuatro niveles diferentes. Nivel -1i (-5.100m), nivel -2i(-12.425m), nivel -2 (-17.500m) y por último nivel -33 (-23.100m).

Estos módulos principales están separados entre sí por los denominados cañones, con una anchura de 15 metros, que se presentan como grandes grietas de luz mediante las cuales se consigue iluminación natural en los niveles inferiores del edificio. Así pues, los cañones forman parte de la estrategia medioambiental global: iluminación natural, calidad del aire, entorno natural. Esto permite incorporar la utilización de energías alternativas, la reducción de consumos energéticos y, consecuentemente, la de gastos de mantenimiento y conservación. En estos espacios es donde se producen todos los movimientos verticales de os pasajeros, ya sea por escaleras, rampas o ascensores.

Además, constituyen un elemento importante para la orientación del pasajero en su trayecto de llegada o de salida.

- Primer módulo son las dársenas para vehículos, el uso de cada dársena está marcado por el nivel en el que se encuentra. Dársena nivel 0 destinada a llegadas, sobre rasante distinguimos nivel +1: conexión aparcamiento-terminal, nivel +2: salidas. Bajo rasante nivel -1: conexión Terminal con zona de alquiler de vehículos, y nivel -2: estación de tren y metro.
- Segundo módulo es el facturador con unas dimensiones en planta de 350x57m, tres niveles por rasante y dos bajo rasante. Los usos principales se organizan según el nivel, nivel 0: equipajes, nivel +1: gestión de equipaje y oficinas y nivel +2: facturación.
- Tercer módulo cuya función principal es la de un procesador, sus dimensiones en planta y alturas son las mismas que el módulo facturador, con distinción en los usos de los diferentes niveles. Nivel 0: recogida de equipajes, nivel +1: comercio lado aire y oficinas, y nivel +2: comercio lado tierra y controles de seguridad.
- Cuarto y último módulo es el dique, con dimensiones 1.142x39 m consta de 2 niveles sobre rasante y 1 nivel bajo rasante (3 bajo rasante en su parte central). Destinado al embarque y desembarque de los pasajeros



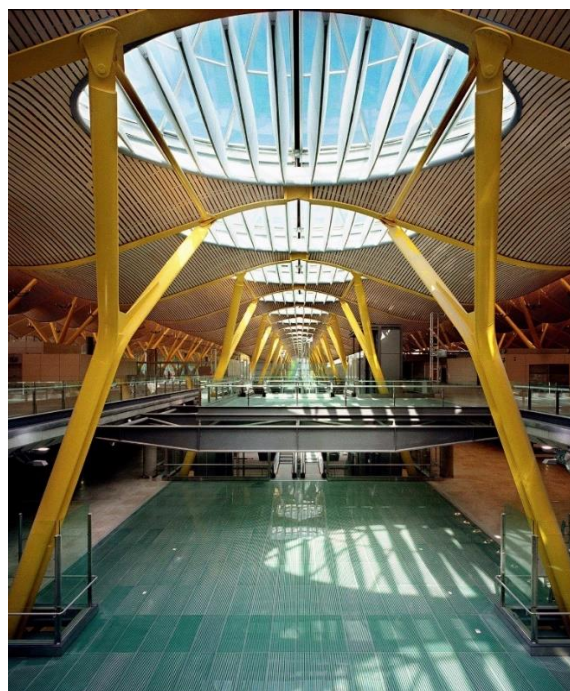
*Ilustración 18. Interior T4: Facturador*



*Ilustración 19. Interior T4: Dique*

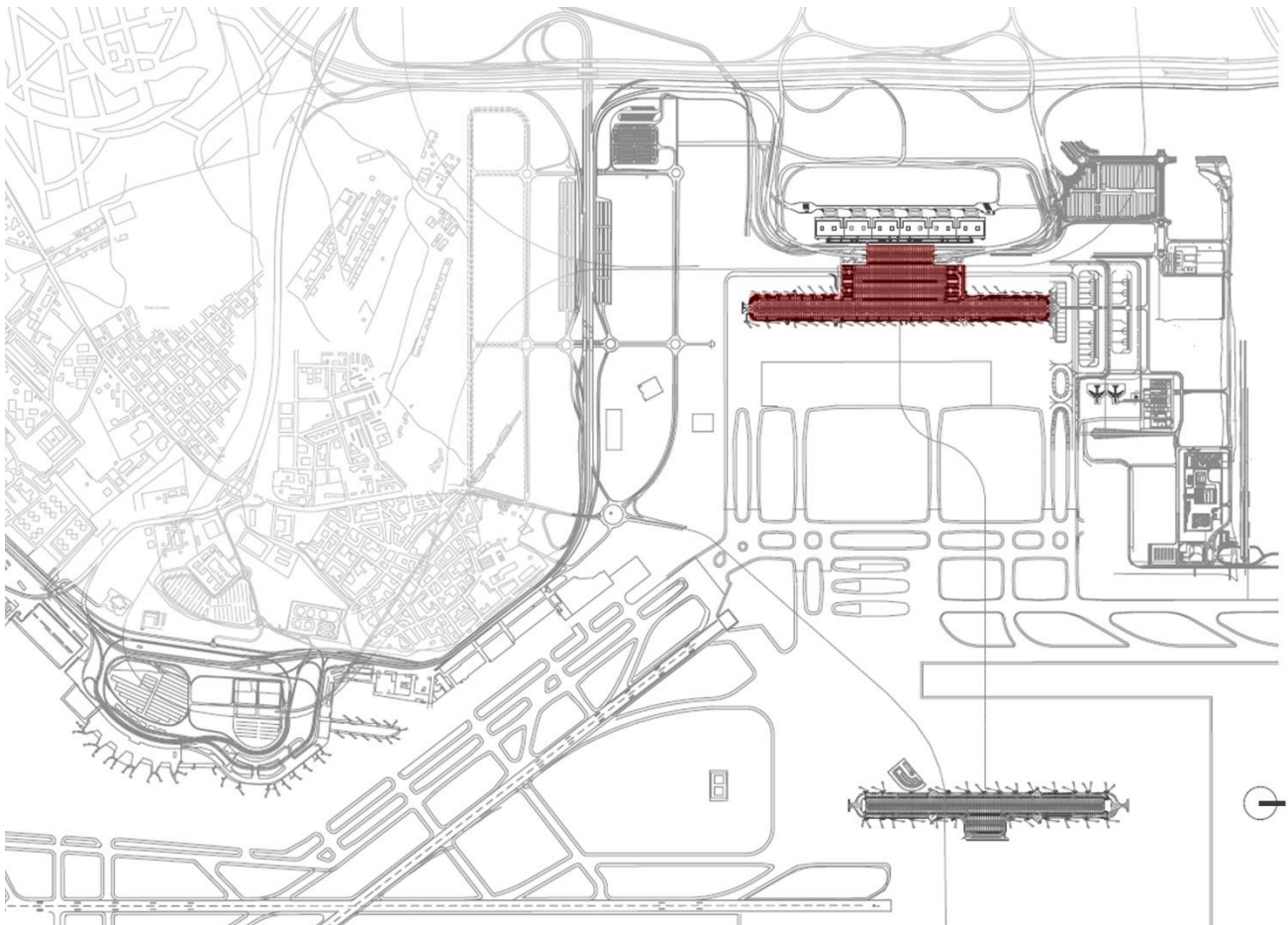


*Ilustración 20. Interior T4. Cañones, comunicaciones verticales*



*Ilustración 21. Interior T4. Cañones*

## 4.2. Análisis de Planos



*Ilustración 22. Plano de Emplazamiento Terminal 4*

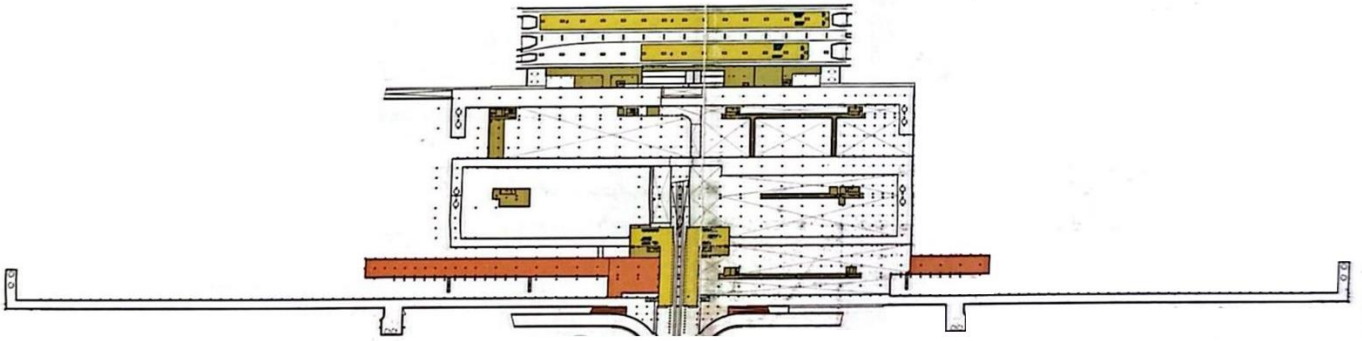


Ilustración 23. Plano Terminal 4. Nivel -1

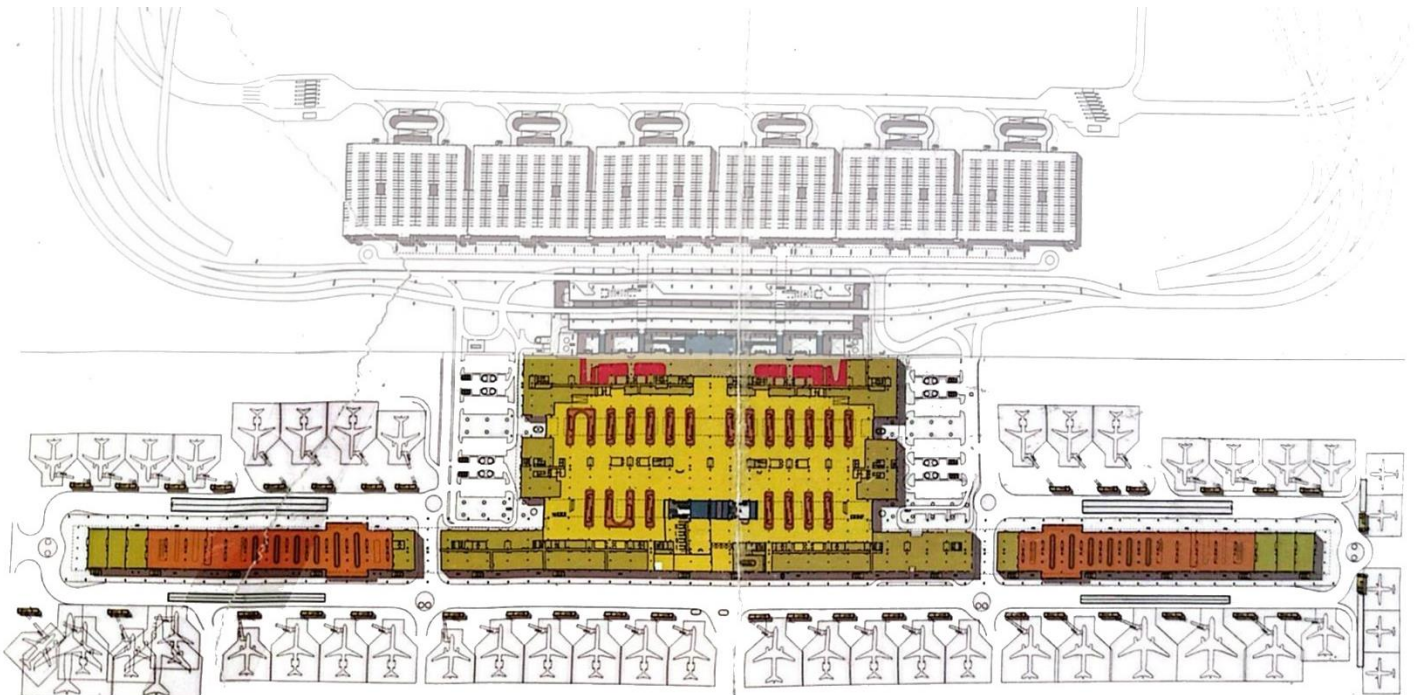


Ilustración 24. Plano Terminal 4. Nivel 0

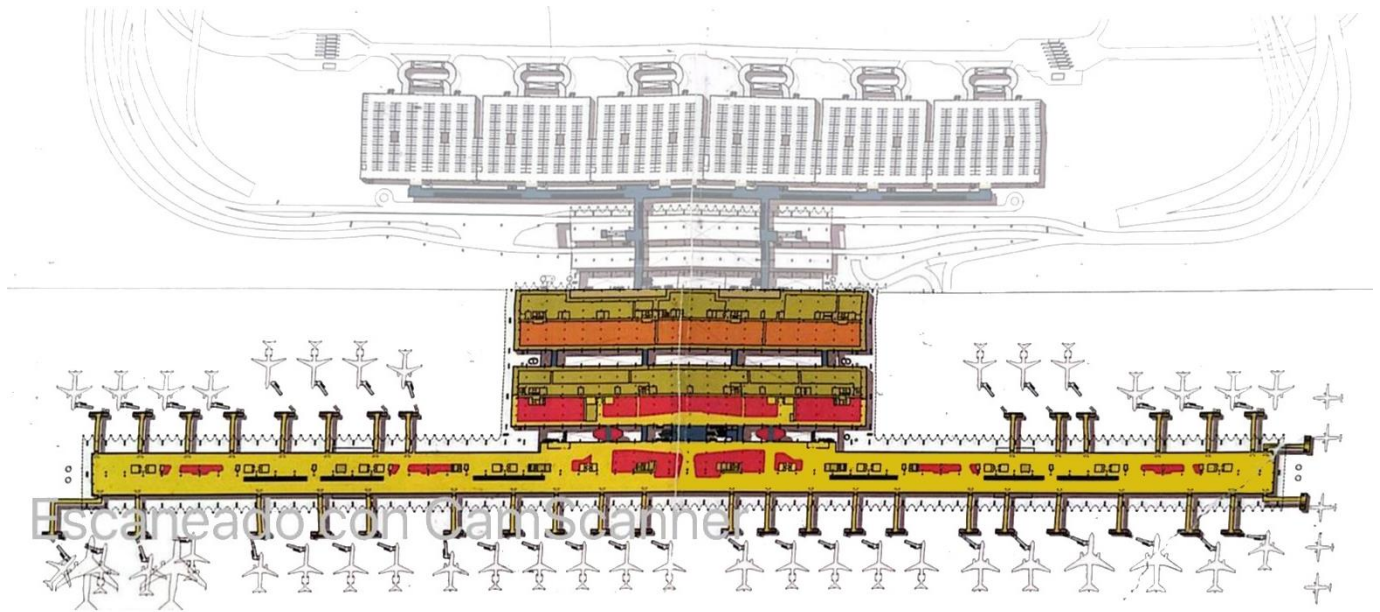


Ilustración 25. Plano Terminal 4. Nivel +1

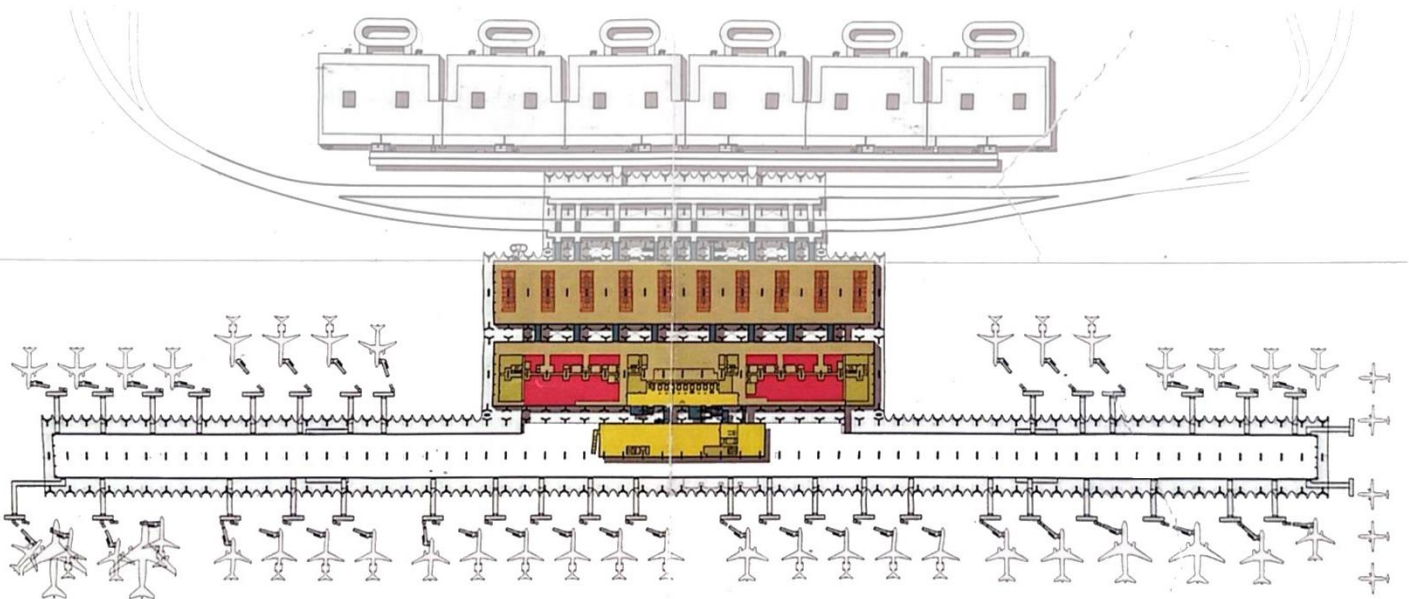
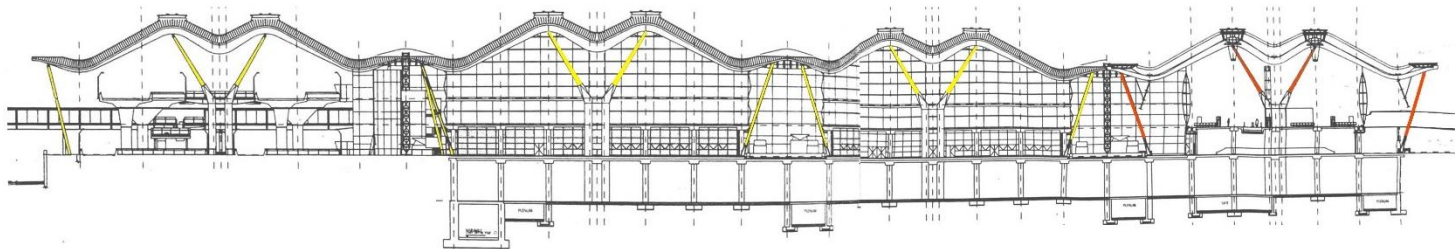
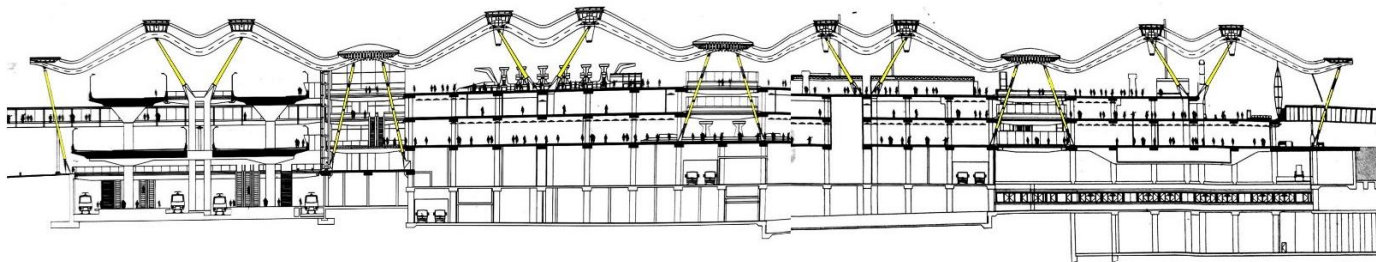


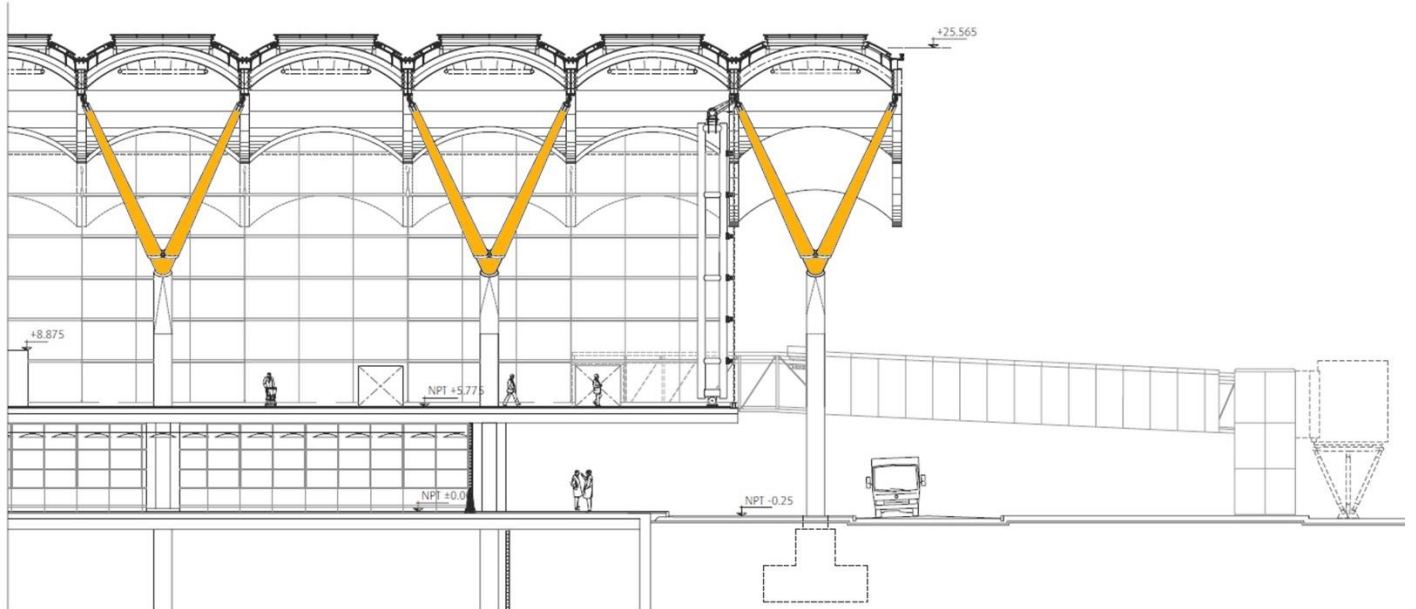
Ilustración 26. Plano Terminal 4. Nivel +2



*Ilustración 27. Alzado y Sección Sur. Terminal 4.*



*Ilustración 28. Sección Transversal. Terminal 4.*

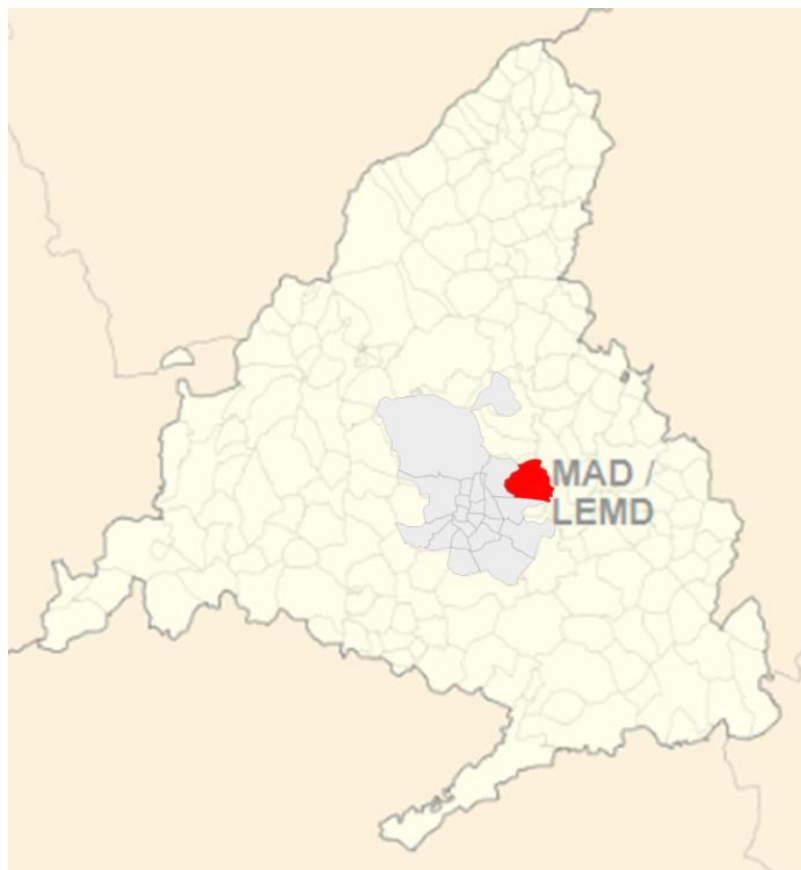


*Ilustración 29. Sección Longitudinal Dique*

### 4.3. Estrategias Pasivas T4

#### 4.3.1. Ubicación y Climatología

La Terminal 4 del Aeropuerto Adolfo Suarez Madrid-Barajas se ubica en el distrito de Barajas al noreste del centro de la ciudad. El conjunto de la infraestructura aeroportuaria a su vez se extiende por los municipios colindantes de Alcobendas, San Sebastián de los Reyes y Paracuellos de Jarama.



*Ilustración 30. Mapa Localización Distrito de Barajas. Elaboración propia*

Previo a analizar la zona climática del distrito de Barajas, la climatología viene marcada por la situación geográfica de la Comunidad de Madrid. A grandes rasgos la característica principal que la define es su contraste térmico entre el día y la noche, al igual que entre situaciones extremas del año como las bajas temperaturas en invierno y muy elevadas en verano. Las temperaturas medias obtenidas a lo largo del año varían desde 4 y 6 °C como medias invernales correspondientes al mes de Enero, en gran parte de la Comunidad, mientras que en el mes de julio las medias varían desde no inferiores a 16 °C hasta superiores a 24 °C, en la zona sur de la Comunidad de Madrid. Esta situación climatológica supone al diseño de los edificios grandes dificultades de tener que adaptarse flexiblemente a condiciones tan extremas.

Para identificar las zonas climáticas que abarca la comunidad, y posteriormente a la que pertenece el distrito de Barajas, el Código Técnico de la Edificación (CTE) en su apartado de Ahorro de Energía DB HE.

Provincia	Altitud sobre el nivel del mar (h)																								
	≤ 50 m	51 - 100 m	101 - 150 m	151 - 200 m	201 - 250 m	251 - 300 m	301 - 350 m	351 - 400 m	401 - 450 m	451 - 500 m	501 - 550 m	551 - 600 m	601 - 650 m	651 - 700 m	701 - 750 m	751 - 800 m	801 - 850 m	851 - 900 m	901 - 950 m	951 - 1000 m	1001 - 1050 m	1051 - 1250 m	1251 - 300 m	≥ 1301 m	
Madrid																									

Ilustración 31. Tabla a-Anejo B. Zonas Climáticas. DB HE

El Aeropuerto Adolfo Suarez Madrid-Barajas posee su punto de referencia en las coordenadas 40° 28' 20" de latitud Norte y 03° 33' 39" de longitud Oeste, a una altitud de 609,6 m, referida a Alicante. Pertenecer a la zona climática D3.

Provincia	Altitud sobre el nivel del mar (h)																								
	≤ 50 m	51 - 100 m	101 - 150 m	151 - 200 m	201 - 250 m	251 - 300 m	301 - 350 m	351 - 400 m	401 - 450 m	451 - 500 m	501 - 550 m	551 - 600 m	601 - 650 m	651 - 700 m	701 - 750 m	751 - 800 m	801 - 850 m	851 - 900 m	901 - 950 m	951 - 1000 m	1001 - 1050 m	1051 - 1250 m	1251 - 300 m	≥ 1301 m	
Madrid																									

Ilustración 32. Tabla a-Anejo B. Zonas Climáticas. DB HE (Barajas)

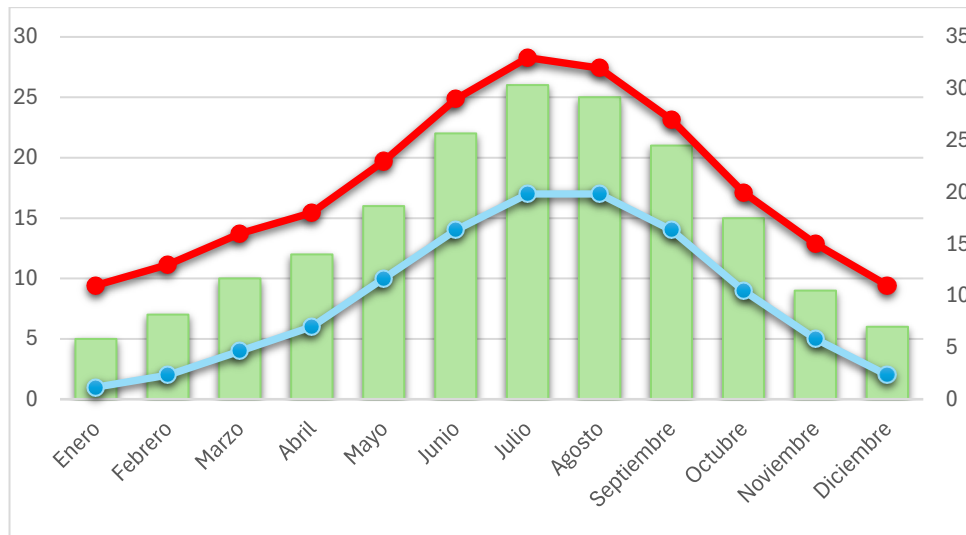


Ilustración 33. Gráfico temperaturas anuales Madrid (Barajas). Elaboración propia

Promedio	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Maxima	11	13	16	18	23	29	33	32	27	20	15	11
Media	5	7	10	12	16	22	26	25	21	15	9	6
Minima	1	2	4	6	10	14	17	17	14	9	5	2

Ilustración 34. Tabla datos temperaturas anuales Madrid (Barajas). Elaboración propia

Como podemos observar en el gráfico, el distrito de Barajas sigue la línea climatológica característica de la Comunidad de Madrid. Durante los meses de invierno las temperaturas medias mínimas se aproximan a los 0 °C, mientras que en los más calurosos rondan cerca de los 35 °C. Se diferencia claramente la temporada fresca, con una duración aproximada de 3,7 meses, del 14 de Noviembre al 5 de Marzo, siendo Enero el mes más frío del Aeropuerto Adolfo Suarez Madrid-Barajas. Por otro lado la temporada calurosa se estima una duración de 2,9 meses, del 15 de Junio al 10 de Septiembre, siendo Julio el mes más cálido.

Estos datos se complementan junto con el siguiente gráfico que analiza la temperatura del aire (TA °C) y la temperatura equivalente solar (TSOL °C) a lo largo del año.

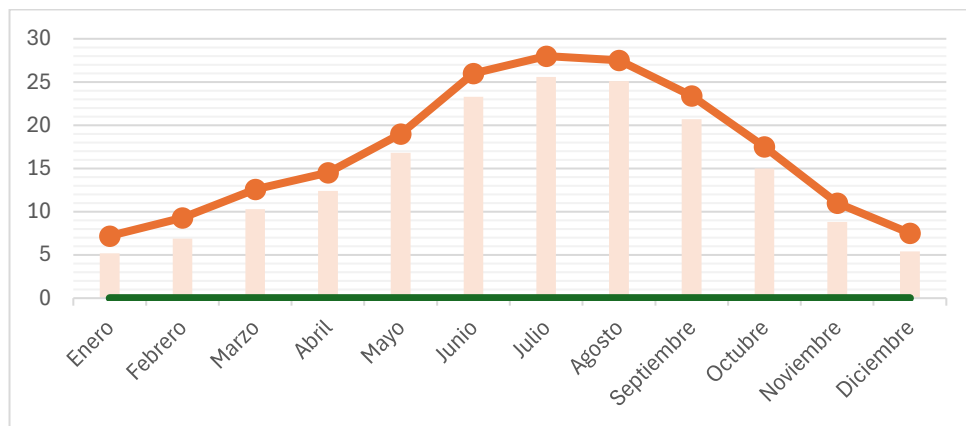


Ilustración 35. Gráfico TA (°C) y TSOL (°C).Elaboración propia.

La TA mide la temperatura del aire (°C) y representa la temperatura media anual del ambiente exterior del Aeropuerto. Este valor resulta de gran interés para la evaluación del comportamiento térmico de la Terminal y sus sistemas HVAC.

La TSOL mide la temperatura equivalente solar (°C), indica el calentamiento exterior de superficies expuestas al sol y otras condiciones climáticas. Fundamental a la hora de decisión sobre los diferentes sistemas de aislamiento térmico y la evaluación de cargas térmicas en edificios.

Promedio	TA(°C)	TASOL(°C)
Enero	5,2	7,2
Febrero	6,9	9,3
Marzo	10,3	12,6
Abril	12,4	14,5
Mayo	16,8	19
Junio	23,3	26
Julio	25,6	28
Agosto	25,1	27,5
Septiembre	20,7	23,4
Octubre	15	17,5
Noviembre	8,8	11
Diciembre	5,4	7,5

Ilustración 36. Tabla valores medios anuales TA y TSOL. Elaboración propia

### 4.3.2. Orientación y Diseño Bioclimático

Un factor fundamental que influye notablemente en el diseño pasivo es la **Orientación** del edificio. La orientación más idónea en cuanto a factores solares y de viento es la orientación Norte-Sur. Este es el caso de la Terminal 4 del Aeropuerto Adolfo Suarez Madrid-Barajas. Su buena orientación, por tanto, permitiría aprovechar los vientos predominantes para la ventilación en verano y minimiza su impacto en invierno.

Una peculiaridad de su diseño, como se explica en el apartado anterior de introducción al caso de estudio, relacionada con la orientación Norte-Sur es la presencia de una gama cromática de colores fríos, indicando el Norte, y colores cálidos, indicando el Sur. Esta idea de diseño genera en el usuario una facilidad de movilidad y reducción de los tiempos de actividad en la terminal.

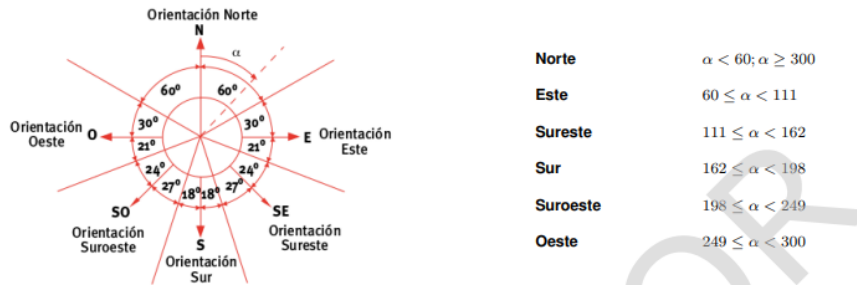


Ilustración 37. Gráfico y tabla de orientaciones CTE

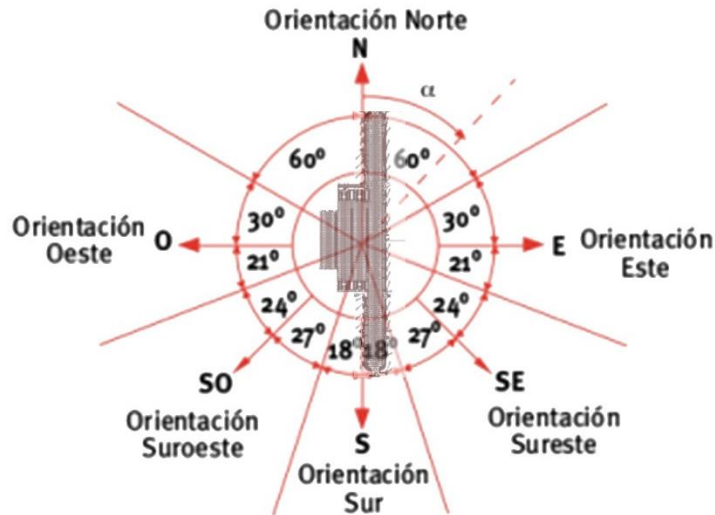
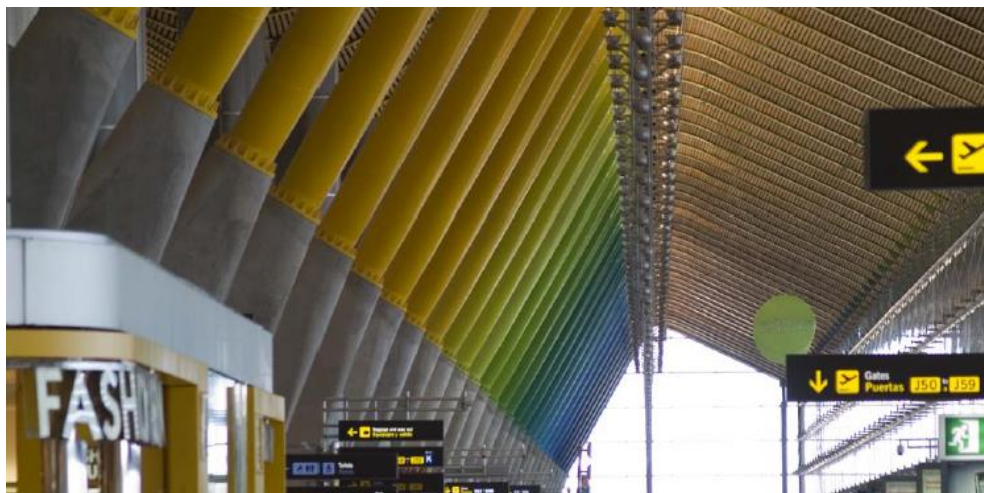


Ilustración 38. Orientación T4 sobre gráfico CTE. Elaboración propia



*Ilustración 39. Interior T4. Secuencia colores fríos orientación Norte*

Por otro lado, siguiendo con el **Diseño Bioclimático** podemos analizar diferentes aspectos de la Terminal, como su relación con el entorno destacando el aprovechamiento de luz natural o los vientos predominantes. Además de tratar sobre los diferentes materiales utilizados en su obra como el bambú de la cubierta o la piedra natural utilizada para el pavimento.

En primer lugar, se define el **viento** como una corriente de aire producida en la atmósfera, fundamentalmente debido a la convección propiciada por la radiación solar generando un aumento de la temperatura del suelo y por tanto calentando el aire circundante.

Por tanto, se convierte en un factor clave a tener en cuenta en el diseño pasivo de la Terminal, pudiendo contribuir en la reducción de calor interno del edificio gracias a la ventilación natural, a través de sistemas como la ventilación cruzada o el efecto Venturi, y zonas de sombra ventiladas.

La diferencia de temperatura, la presión y velocidad del viento son los mecanismos naturales que responden a la **ventilación natural**. La ventilación cruzada se consigue a través del diseño arquitectónico, abriendo huecos en lados opuestos para aprovechar las corrientes de aire generadas, eliminando el calor acumulado y renovando el aire interior. Mientras, el efecto Venturi se consigue por medio del diseño del edificio también, con estrechamientos en huecos y aperturas o variaciones de la geometría, lo que provoca una aceleración en el flujo del aire y así una mejora en la ventilación de ciertos espacios.

Cabe destacar que el edificio Terminal 4 no toma ventaja algunas de estas medidas, y que serán comentadas más adelante en el apartado de conclusiones del trabajo.

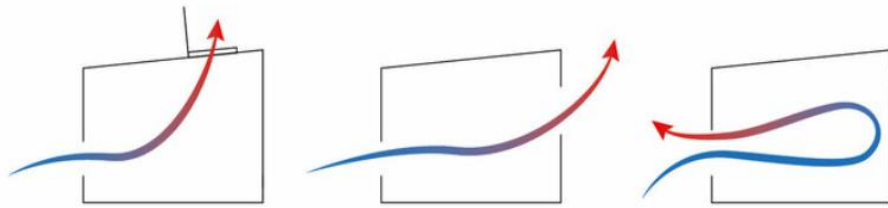


Ilustración 40. Esquemas ventilación natural.

La **luz natural** juega un papel fundamental en el diseño pasivo del edificio. Desde un buen aprovechamiento de la radiación solar para la regulación de temperaturas tanto de los materiales de la envolvente térmica, como del espacio interior. Como se ha explicado anteriormente, este factor viene directamente relacionado a la orientación, en el caso de estudio de la Terminal 4, sus fachadas con menor superficie se encuentran con orientación Norte-Sur. Mientras que las fachadas con mayor superficie son las fachadas Este y Oeste. En Madrid la radiación solar más difícil de controlar sería la Sur, por su cantidad de horas de sol acumuladas y la incidencia sobre la envolvente, junto con la orientación Oeste en el solsticio de verano.



Ilustración 41. Radiación Solar sobre fachada Oeste.

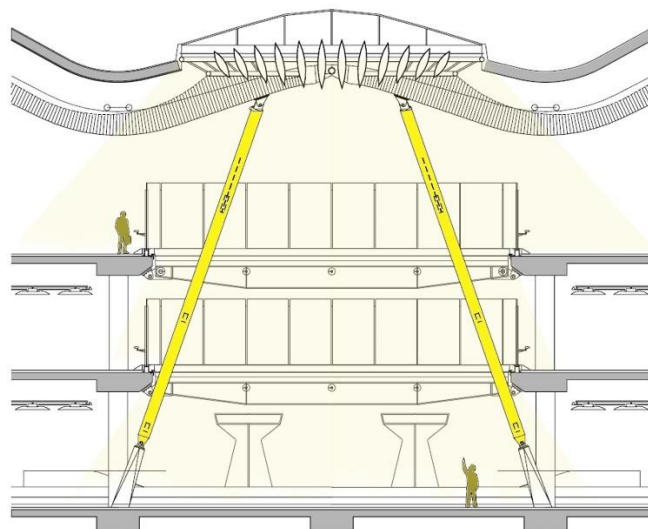


Ilustración 42. Esquema Aprovechamiento luz natural en Cañones. Elaboración propia



*Ilustración 43. Claraboyas luz natural. Cañones*



*Ilustración 44. Claraboyas luz natural. Aprovechamiento niveles inferiores.*



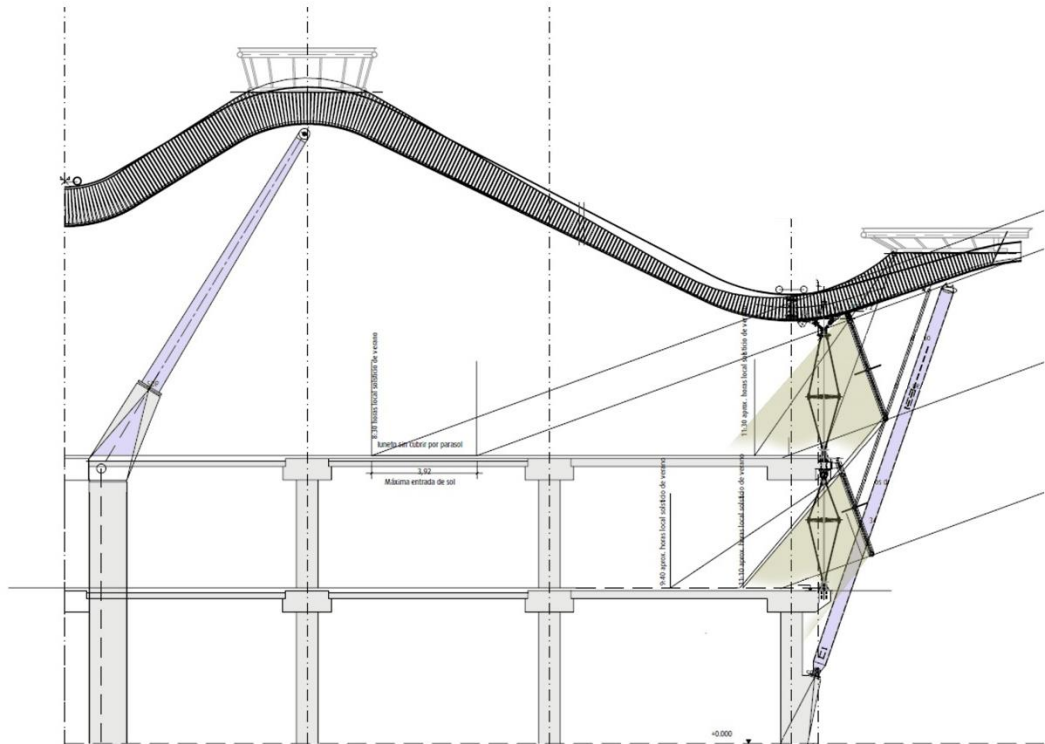


Ilustración 47. Esquema de Soleamiento Fachada Este. 11:10 am. Verano. Elaboración propia

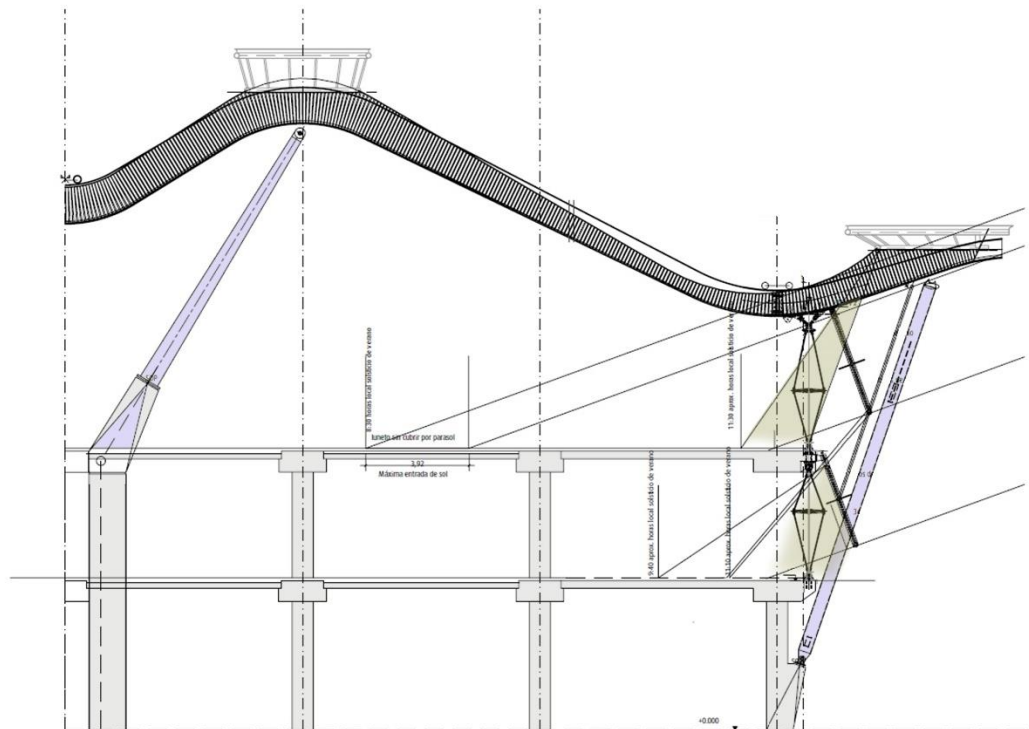


Ilustración 48. Esquema de Soleamiento Fachada Este. 11:40 am. Verano. Elaboración propia

Este aprovechamiento luz natural enfocado a la regulación térmica del edificio puede suponer un inconveniente, ya que depende absolutamente de las horas de sol, que unido al incontrolado proceso de acumulación producido en suelos y paredes genera una irregular distribución del calor.

Será resuelto por medio de sistemas mecánicos de ventilación y climatización, que se explicaran en próximos apartados.

Existen sistemas para solucionar este inconveniente de manera pasiva, como el sistema solar pasivo de *invernadero adosado* y *muro trombe*. Se explicarán en el apartado de conclusiones como posibles intervenciones de mejora del edificio Terminal 4 del Aeropuerto Adolfo Suarez Madrid-Barajas.



*Ilustración 49. Exterior T4. Zona Sur Dique. Soleamiento de Poniente*

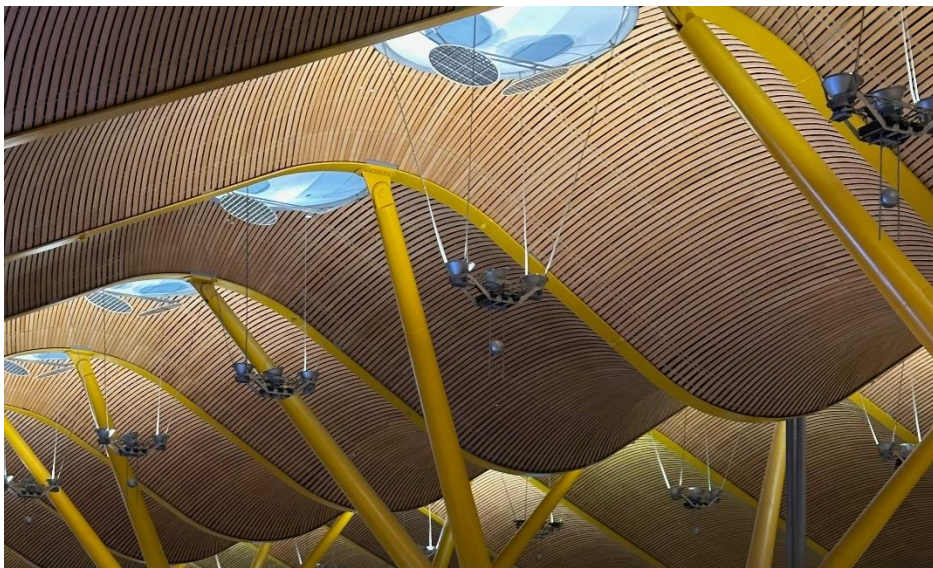
Por último, destaca la utilización de **materiales respetuosos con el medio ambiente** elegidos para el espacio interior de la Terminal 4 . El bambú como acabado del falso techo de la cubierta, y la piedra natural caliza como acabado principal para los pavimentos de las zonas de tránsito de pasajeros.

La cubierta de la terminal abarca 212.000m<sup>2</sup> de bambú, convirtiéndose en uno de los mayores proyectos a nivel mundial que incorpora el **bambú** como solución 100% natural y sostenible. Es un recurso material inagotable, con un crecimiento de hasta un metro de bambú al día, lo que le califica como un gran material sostenible por no suponer prejuicios para el medioambiente.

Cumple con la función de aislamiento acústico, a la vez que confiere carácter y unidad a los espacios interiores.



*Ilustración 50. Cubierta ondulada de Bambú. Elaboración propia*



*Ilustración 51. Cubierta ondulada de Bambú. Elaboración propia*

Para el pavimento de la Terminal 4 se optó por una **pedra natural caliza** como acabado principal de las zonas de tránsito de pasajeros. Cubre una superficie total de 136.000 m<sup>2</sup>. Como finalidades abarcaba diferentes aspectos, desde el punto de vista estético la transmisión de calidez a los espacios gracias a sus tonos. Su durabilidad respondía a los exigentes requisitos de dureza o desgaste.



*Ilustración 52. Pavimento de piedra natural caliza. Recogida de equipajes.*

### 4.3.3. Envoltente Térmica

Uno de los aspectos más característicos de la Terminal 4 del Aeropuerto Adolfo Suarez Madrid-Barajas, es su envoltente. Compuesta por sus grandes fachadas acristaladas, y la característica cubierta ondulada. Forman un conjunto muy reconocible y estético que hacen singular al edificio.



Ilustración 53. Imagen exterior Terminal 4.

La actuación más significativa en el tratamiento de los huecos acristalados es su protección, ya que son éstos los elementos térmicamente más débiles de la construcción. Por un hueco acristalado y orientado al Oeste, a las 15: de un día de julio, en Madrid, atraviesan  $488 \text{ W/m}^2$ . Mientras que en misma situación únicamente  $20 \text{ W}$  atravesarían un muro aislado y pintado de blanco. En otra situación, un hueco acristalado ese mismo mes de julio, en Madrid, pero con orientación Sur sólo capta como máximo  $289 \text{ W/m}^2$ . Tomando soluciones de sombreado, podríamos reducir esta captación solar. Por todo ello, las decisiones en el sistema constructivo y de diseño de la envoltente y cubierta de la Terminal 4.

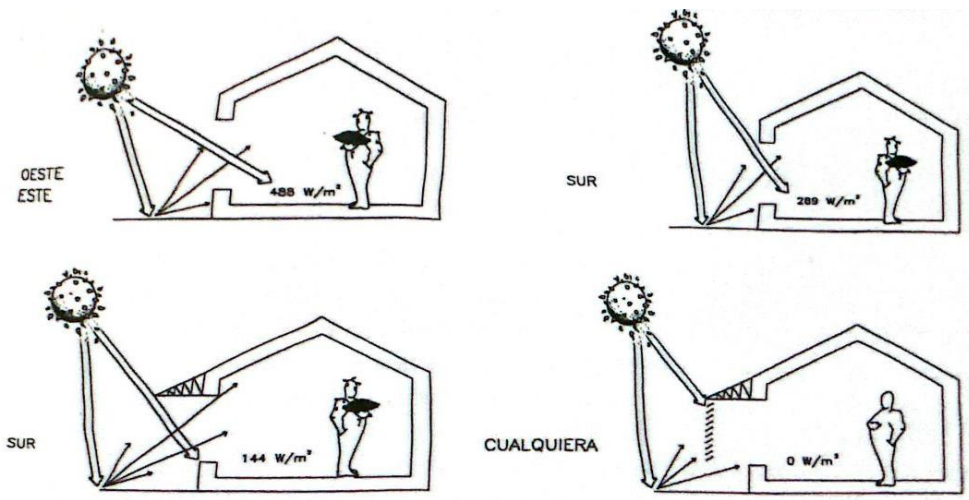


Ilustración 54. Captaciones a través de huecos acristalados, orientación y protecciones.

Para comprender el funcionamiento térmico de una fachada acristalada debemos tener en cuenta los factores físicos del vidrio para evaluar la luz que incide sobre él, y las ganancias o pérdidas energéticas para poder llegar a elegir un tipo de vidrio en base a nuestras condiciones.

- *Transmitancia Lumínica*: Responde al porcentaje de luz visible que deja pasar el vidrio, cuanto mayor es el valor mayor es la entrada de luz.
- *Transmitancia Térmica (U)*: Refleja la capacidad de aislamiento térmico, cuanto más bajo sea mayor aislamiento.
- *Factor Solar (Fs)*: Engloba los porcentajes de energía transmitida a través del vidrio y absorbida por el acristalamiento y reenviada al interior del local, del total de radiación solar incidente en el vidrio. A menor Fs mayor control solar.

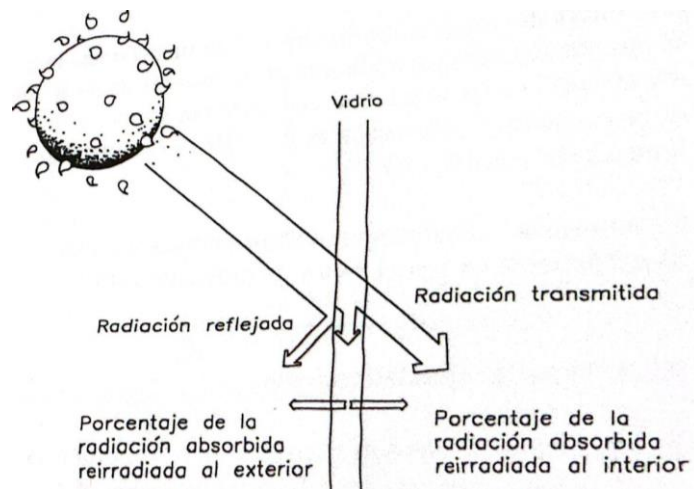


Ilustración 55. Comportamiento de la radiación al incidir en un acristalamiento

Las **fachadas acristaladas** surgen de la idea de concepto de transparencia e iluminación natural, como uno de los objetivos principales del diseño del proyecto. Contribuye a generar una experiencia más agradable desde su interior.

En base a las premisas del proyecto se llevó a cabo mediante un sistema constructivo que minimiza todos los elementos estructurales evitando obstáculos en la visión. Supuso un gran reto debido a la gran superficie acristalada de 40.000 m<sup>2</sup>.

Para evitar sobrecalentamiento de la fachada, se regula convenientemente la entrada directa de sol con elementos que generan sombra y reducen el impacto de la radiación sobre la superficie exterior del vidrio. Una decisión de proyecto fue alargar 16m los aleros de la cubierta ondulada, orientados Este-Oeste, de esta manera impiden la radiación directa durante las horas en las que la posición del sol es alta. Se disponen a su vez, una serie de parasoles que impiden la entrada directa del sol en sus posiciones bajas, es decir, primeras horas de la mañana o últimas horas de la tarde. La posición de estos parasoles es inclinada buscando el máximo aprovechamiento posible de su superficie, compuesta de tubos circulares de aluminio colocados horizontalmente, permitiendo su visión a través de ellos.

Por el diseño de la cubierta, en las fachadas Norte-Sur los aleros no son suficientes como para llevar a cabo la misma función que en las fachadas Este-Oeste, por lo que también se disponen parasoles similares, pero en posición vertical y no inclinada.



*Ilustración 56. Envolverte. Fachada Acristalada + Parasoles*



*Ilustración 57. Elementos de sombra en fachada. Aleros + Parasol*

El vidrio utilizado en la fachada de la Terminal 4 está compuesto por tres capas, una exterior por un vidrio templado con tratamiento ante radiación y calor de 12mm, y una capa interior de vidrio laminar 6+6 incoloro, separadas por una cámara de aire de 12 mm. Se trata de una solución de vidrio de doble acristalamiento con cámara de aire que responde ante un buen comportamiento térmico, destacando por su eficiencia energética al reducir las demandas de calefacción y refrigeración, ayudando a mantener en el interior temperaturas estables al limitar el intercambio térmico. Gracias a la cámara de aire, la transmitancia térmica (U) disminuye a un valor aproximado entre 3.3 y 2.7 W/m<sup>2</sup>K.

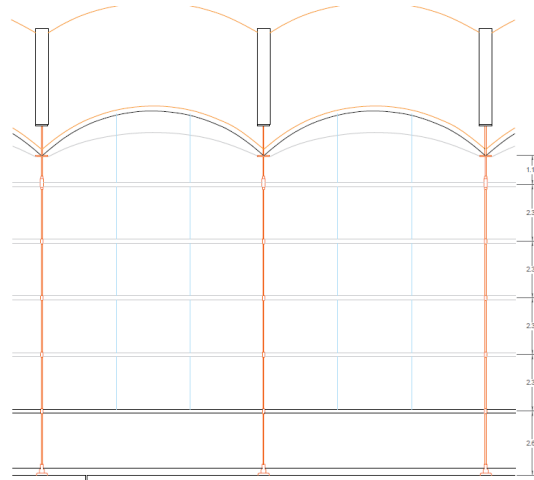
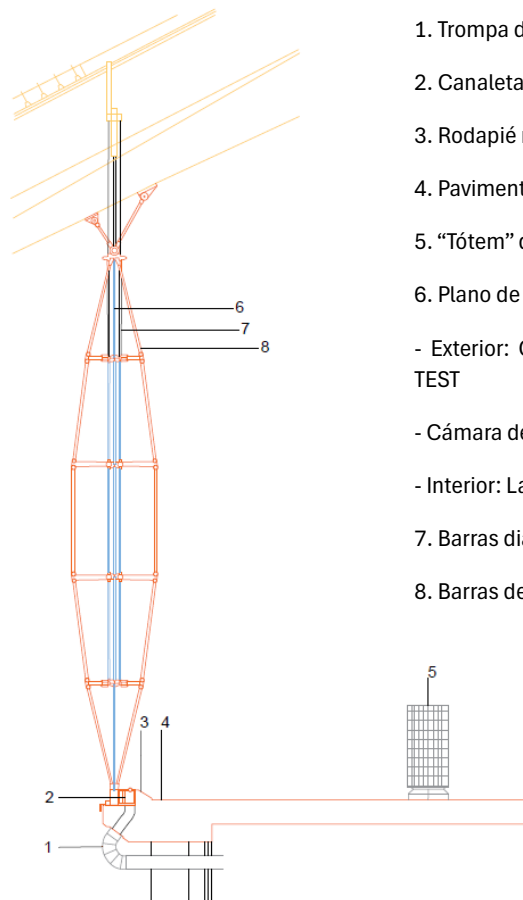


Ilustración 58. Alzado fachada. Elaboración propia



1. Trompa de alimentación de climatización
2. Canaleta de climatización con tapa de aluminio
3. Rodapié macizo de piedra
4. Pavimento de piedra natural
5. "Tótem" de acero inoxidable de impulsión de aire
6. Plano de vidrio:

- Exterior: COOL-Lite kN 155 12mm templado HEAT SOAK TEST

- Cámara de aire de 12mm

- Interior: Laminar 6+6 incoloro SILENCE

7. Barras diámetro 12mm de acero inoxidable

8. Barras de tracción diámetro 33mm de acero.

Ilustración 59. Sección Constructiva Fachada. Elaboración propia

#### 4.4. Estrategias Pasivas T4

##### 4.4.1. Sistema de Climatización (HVAC)

Para concluir con el Caso de Estudio, se analizará en este apartado tanto el diseño como el funcionamiento del Sistema de Climatización ( Heating, Ventilation and Air Condition) del edificio Terminal 4 del Aeropuerto Adolfo Suarez Madrid Barajas.

El sistema está determinado por varias reglas impuestas, explicadas en el libro “*Nueva Área Terminal T4*”.TC Cuadernos.

En primer lugar, un “Concepto Medioambiental. El consumo racional de los recursos energéticos es un invariante que determinó muchas de las decisiones tomadas en todo el proyecto, por motivos medioambientales y económicos. Dadas las dimensiones gigantescas de los edificios, era necesario realizar un uso responsable de la energía, climatizando sólo las zonas indispensables, sin gastos innecesarios.” Acompañado de la “Estética. El recorrido de las instalaciones fue un tema especialmente estudiado. Desde el principio se planteó evitar la inclusión de conductos vistos en el techo de bambú, para mantener completamente limpio el intradós de la cubierta y así mostrarlo en toda su belleza. Además, los elementos difusores y extractores de aire constituyen un elemento característico definitorio de los espacios interiores, por tamaño y por número.”

El edificio Terminal 4 presenta una demanda energética para Climatización de 17.400kW en potencia calorífica y 23.600kW en potencia frigorífica.

La producción proviene de una planta de cogeneración<sup>1</sup> ubicada al noreste, entre el edificio terminal y el satélite, consta de grupos de generadores eléctricos alimentados por gas natural. Se aprovecha el calor generado en los grupos.

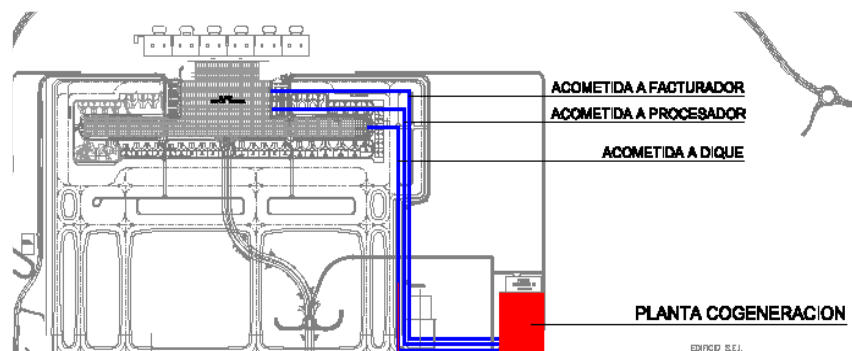


Ilustración 60. Plano de emplazamiento y acometidas. Planta Cogeneración.

<sup>1</sup> Planta de cogeneración: sistema que produce simultáneamente calor y electricidad en una sola planta, alimentada por una única fuente de energía principal.

La Climatización de la dársena Dique se resuelve por medio de un sistema de por desplazamiento del aire, especialmente empleado en edificios de gran altura. Se tratan únicamente los 4 m de aire desde el suelo, y el resto de volumen se mantiene sin acondicionar. La circunstancia de actuación responde a la necesidad que en la zona habitable la necesidad de enfriamiento es menor (por las cargas térmicas debido al uso), obteniendo de esta manera mejor calidad de aire que con un sistema convencional.

Presenta grandes ventajas este tipo de sistema, necesitando menor caudal de aire para climatizar el mismo volumen de espacio. El potencial de uso del *free-cooling*<sup>2</sup> es bastante mayor que con un sistema convencional y se aprovecha más a lo largo del año; en base a estadísticas, hasta 55 días más que por un sistema de ventilación por mezcla. Como consecuencia se reduce en gran cantidad el consumo de energía por enfriamiento.

Tratándose de un edificio de tan gran tamaño, el ahorro energético puede tratarse de magnitudes muy importantes. En los últimos años este sistema ha pasado de utilizarse en edificios industriales, y países con climas fríos, a entrar en acción en España, adaptando a los requerimientos de un clima más cálido. La técnica consiste en impulsar el aire frío y renovado a baja velocidad a nivel del suelo, a unos 10cm del pavimento terminado, haciendo que el aire caliente viciado ascienda al techo, ayudado por el movimiento de los usuarios que favorecen el flujo del aire al desplazarlo. La temperatura de confort en la zona ocupada es de 23°C. Las temperaturas de impulsión son de 19°C en largas épocas de refrigeración (*cooling*) y 26°C en las cortas temporadas de calefacción (*heating*).

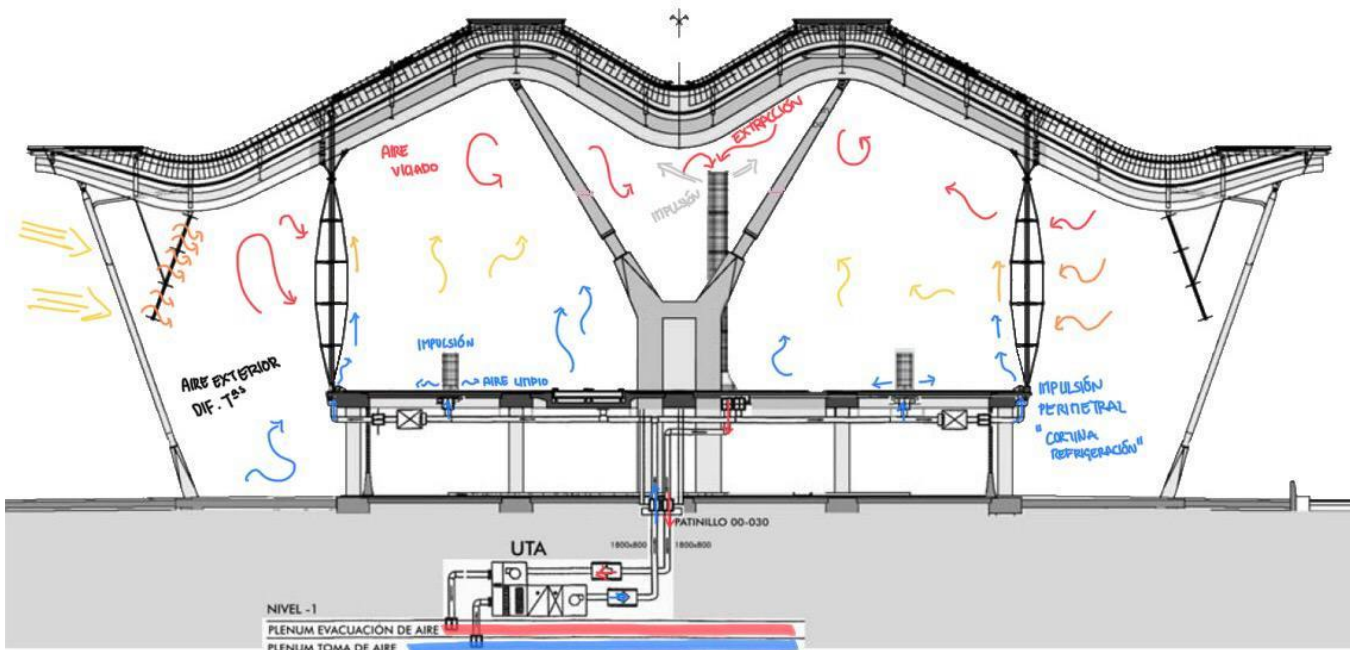


Ilustración 61. Esquema funcionamiento sistema desplazamiento por aire. Climatización Dique. Elaboración propia.

<sup>2</sup> Free-cooling: técnica de climatización que consiste en aprovechar las bajas temperaturas exteriores para enfriar una estancia o local.

Según el aire limpio impulsado va ascendiendo, se mezcla con el aire del ambiente estratificándose en la parte alta de la cubierta, donde se encuentran los elementos extractores para el retorno del aire. Recogen el aire a unos 13m de altura sobre el nivel+1. Por medio de unas toberas cercanas a las bocas de extracción ayuda a mover el aire cercano a las partes más altas de la cubierta evitando que se acumulen masas de aire viciado, generando bolsas de aire caliente.

Los elementos diseñados para la impulsión y extracción del aire están repartidos por todo el Dique. Los **Difusores** encargados de la impulsión de aire limpio a niveles bajos de suelo, siguen una retícula de 12m entre cada uno de ellos. Cada difusor cuenta con dos elementos independientes, la capa exterior y el difusor interior. Ambos cumplen con la función específica del diseño para este edificio, evitando corrientes de aire y previendo el mejor acondicionamiento posible. El elemento interior conduce el aire desde la compuerta cortafuego hasta su parte superior y lo distribuye a través de las perforaciones de la piel exterior. Estos elementos de climatización tienen una altura de 1.50m.



*Ilustración 62. Difusor. Impulsión aire limpio*

Encargados de la extracción del aire contaminado, y de la impulsión del aire para evitar la acumulación de aire caliente en las partes altas de la cubierta, son los denominados “**Tótems**”. Están ubicados en eje próximo al dique, a una distancia de 36m entre ellos. El elemento consta de una rejilla metálica de revestimiento exterior, y en su interior oculta dos conductos. El primero es de acero al carbono para la extracción, a una altura de 13m sobre el nivel del pavimento, con un diámetro de 0.9-1.4m, en función de su ubicación. El segundo conducto presenta una doble pared de acero inoxidable con aislamiento térmico para impulsar el aire de las partes altas de la cubierta.



*Ilustración 63. Tótem. Retorno e impulsión.*

Por último, el sistema se complementa de una inyección perimetral de aire desde el nivel del suelo para hacer un efecto de cortina de aire en las fachadas acristaladas. El aire es impulsado por unas toberas colocadas en las canaletas perimetrales de las instalaciones, en la parte inferior de la fachada. Las fachadas son elementos que tienen contacto con el aire exterior e interior por tanto necesitan de este suplemento climático para evitar condensaciones y pérdidas de calor ante excesivas diferencias de temperatura entre el ambiente y el aire climatizado. En verano no suponen inconvenientes debido a la protección solar de los parasoles y los aleros de la cubierta.



Ilustración 64. Sistema perimetral de climatización. Toberas

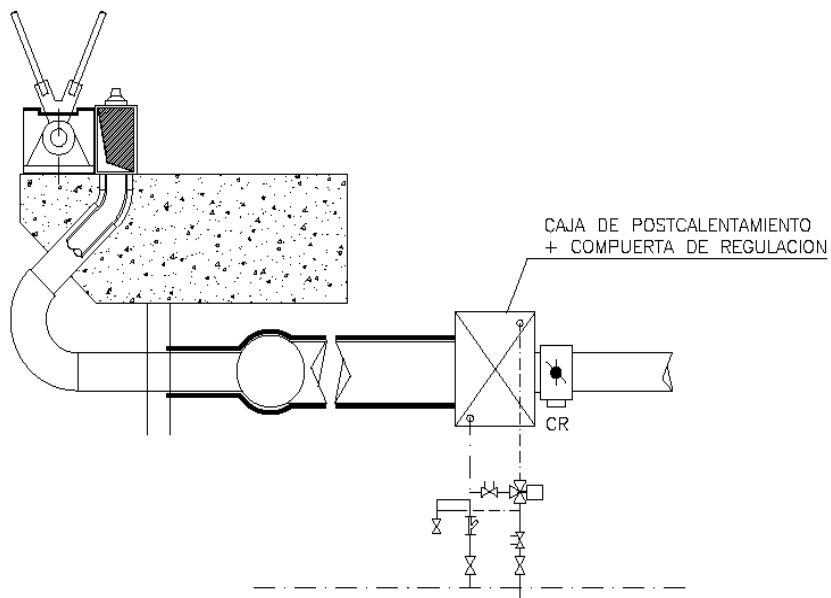


Ilustración 65. Detalle Sistema Perimetral de Climatización



*Ilustración 66. Zoom Exterior. Sistema Perimetral de CLimatización*



*Ilustración 67. Imagen exterior Sistema Perimetral de Climatización*

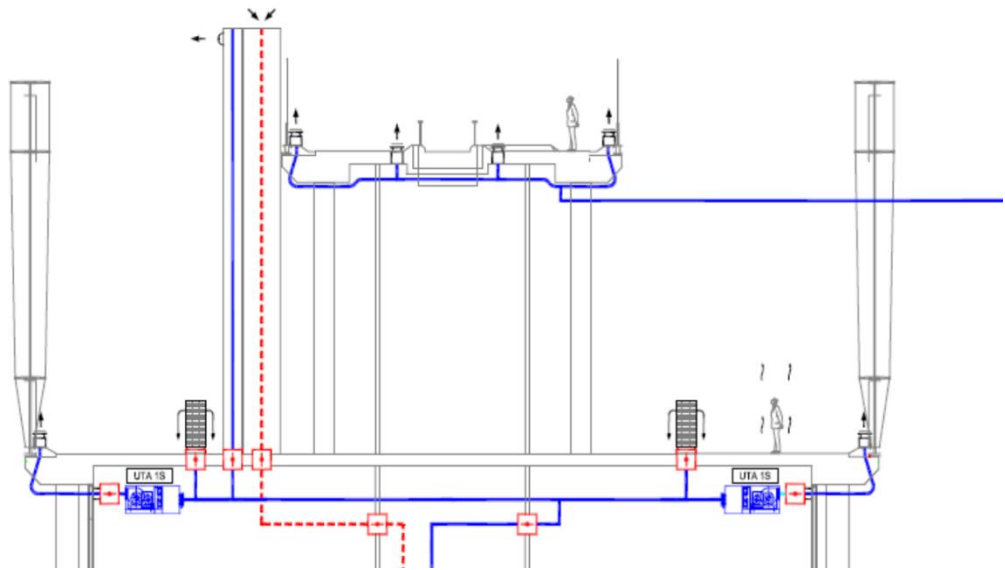


Ilustración 68. Esquema Climatización Dique.

Todo este sistema necesita de presencia de aire exterior. En los niveles bajo cota, se diseñaron galerías por las que poder llevar a cabo un sistema de *plenum*<sup>3</sup> tanto de admisión como de expulsión de aire. Con diferentes funciones como la propia renovación de aire, la refrigeración de zonas técnicas o la evacuación de humos.

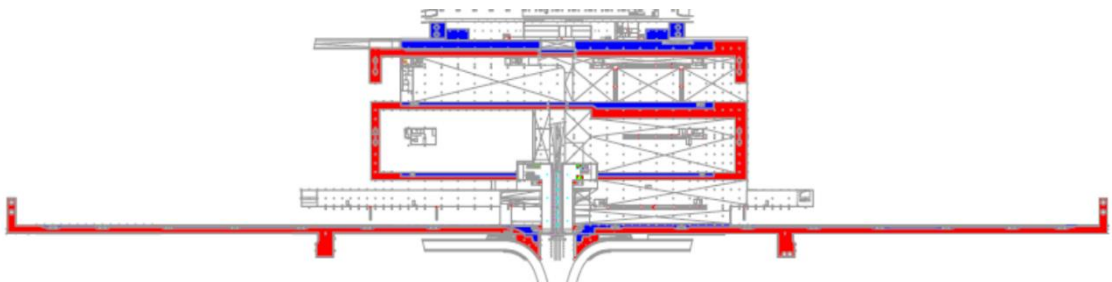


Ilustración 69. Circuitos de Plenum de Admisión (azul) y Extracción (rojo).

El funcionamiento consiste en la captación del aire exterior a través de chimeneas ubicadas proximas a la fachadas Norte-Sur. La diferencia de presiones propicia el desplazamiento del aire por el plenum de admisión, que conecta con la red de conductos que desembocan en las diferentes UTAs (Unidad de Tratamiento de Aire), hasta llegar a los difusores. El proceso inverso para la extracción, los Totem de retorno extraen el aire contaminado desplazandolo hasta desembocar en las UTAs y posteriormente en el plenum de Extracción. Finalmente el aire viciado es expulsado por las chimeneas.

<sup>3</sup> Plenum: Espacio designado para la circulación del aire, específicamente para sistemas de calefacción, ventilación y aire acondicionado. El aire se desplaza a bajas velocidades y presiones ligeramente superiores a la atmosférica.

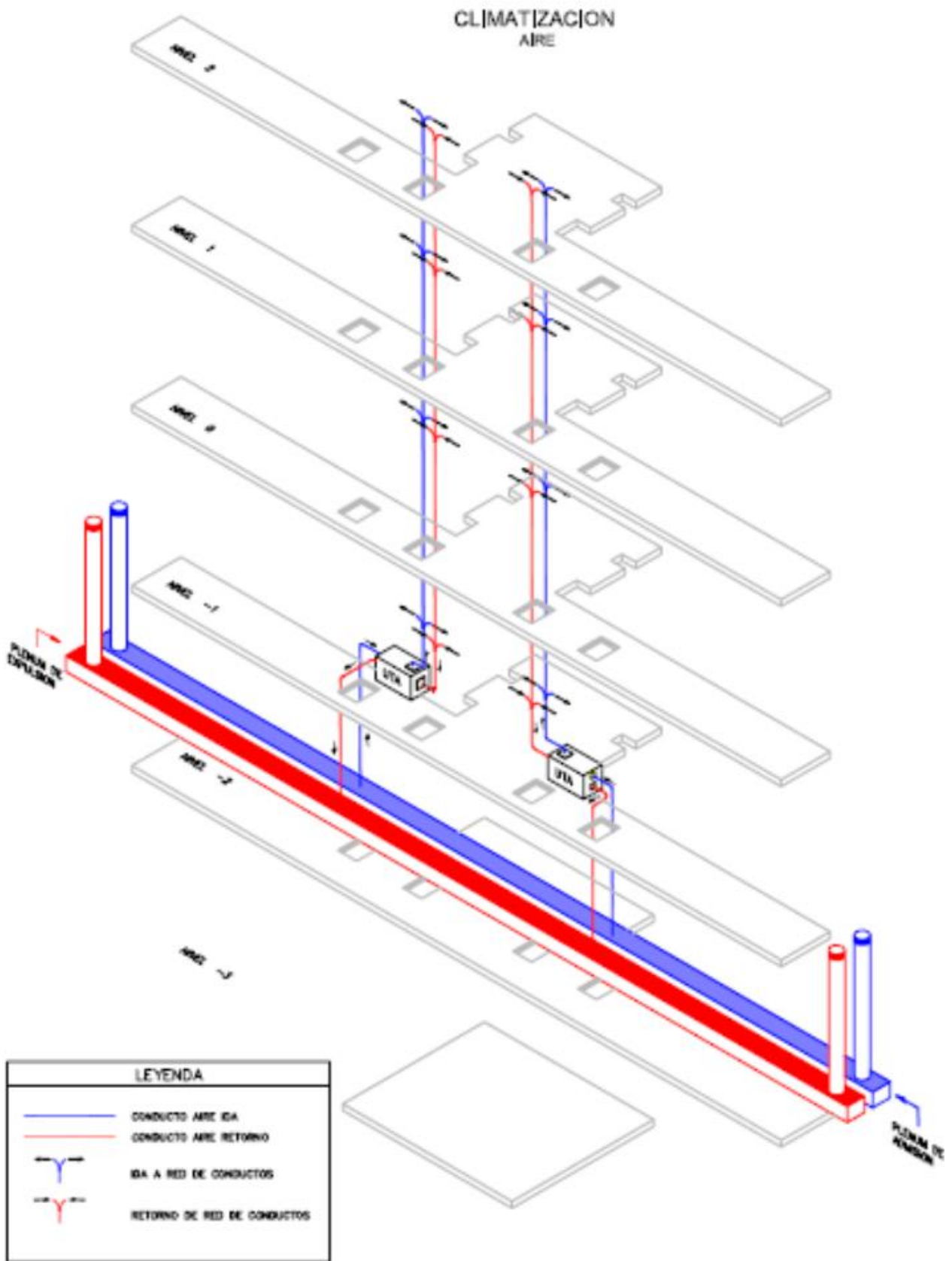


Ilustración 70. Axonométrica Sistema de Climatización con Plenum

#### 4.5. Propuestas de Mejora

Como consecuencia de la investigación se plantean varias cuestiones.

En caso de ampliación de la Terminal 4, ¿Podrían llevarse a cabo sistemas pasivos que reduzcan la demanda de instalaciones mecánicas para la climatización?

¿Sería posible modificar algún aspecto del sistema de climatización actual, para conseguir que la Terminal sea más eficiente?

A continuación, se proponen posibles mejoras en el diseño pasivo de la Terminal 4, y en su sistema de climatización, con la finalidad de reducir se demanda energética y mejora de eficiencia.

En primer lugar se proponen estrategias para la eliminación del sobrecalentamiento.

El sobrecaliento es el fenómeno producido durante el año a consecuencia de la transformación de energía radiante de origen solar en energía térmica. Los mecanismos que actúan son la transformación de radiación, absorbida por los elementos de la envolvente como la cubierta o fachada, y el efecto invernadero, el cual evita la dispersión del calor a través de los vidrios. Este fenómeno provoca que durante los meses más cálidos, puedan alcanzarse temperaturas superiores al ambiente exterior. Mientras que en los meses fríos no se produce un posible alcanzar menores temperaturas en el interior que exterior, por lo general.

Por tanto, enfocado al caso de estudio, podríamos encontrar soluciones de diseño para reducir la demanda energética durante los meses más cálidos donde mayor incidencia solar se recibe.

##### - Ventilación Cruzada en el Dique de la Terminal 4.

Se propone llevar a cabo un sistema auxiliar de ventilación cruzada, el cual reduciría la demanda aprovechando las diferencias de presión y temperatura para promover el flujo natural de aire.

Aperturas presentes en las fachadas con un horario de funcionamiento, en los meses más cálidos de verano, durante las primeras horas del día y las últimas de la tarde, cuando las temperaturas exteriores son menos cálidas en comparación con horas del mediodía. Estas aperturas estarían ubicadas en la parte inferior y superior de los acristalamientos, generando así diferencia de presiones el aire del ambiente interior y probando su desplazamiento.

Su funcionamiento estaría basado en la presencia de una serie de sensores de temperatura y humedad, que activarían en los momentos más favorables las aperturas en las fachadas acristaladas.

Estas aperturas en fachada podrían verse acompañadas de más aperturas en ciertos puntos de la cubierta ondulada, aquellos en los que entra luz natural, creando un efecto de chimenea térmica y sirviendo como salidas de aire caliente asegurando un flujo constante y eficiente a lo largo del volumen del edificio.

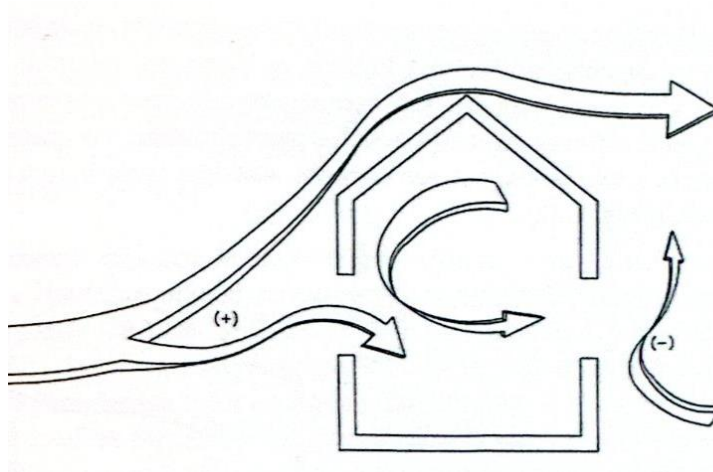


Ilustración 71. Esquema Ventilación Cruzada.

Según las estaciones, podría aprovecharse para diferentes finalidades. Por ejemplo, en verano activarlo durante las noches como sistema para *precooling* del edificio, y en invierno, aunque no tendrían mucha actividad para evitar pérdidas de calor, podrían regular la calidad del aire interior.

Por último, esta propuesta se vería favorecida al diseño modular y la estructura de la Terminal 4, en cuanto a que su implementación no alteraría significativamente ni la estética ni funcionalidad del edificio. Siendo, además, la cubierta ventilada y fachadas acristaladas, una base propicia para integrar un sistema auxiliar de ventilación cruzada.

- Sistema de Climatización con Recuperador de Calor

Según el RITE. CAPITULO II. Exigencias técnicas. **Artículo 12. Eficiencia energética, energías renovables y energías residuales.**

“ Las instalaciones térmicas deben diseñarse y calcularse, ejecutarse, mantenerse y utilizarse de tal forma que globalmente se mejore la eficiencia energética y, como consecuencia, se reduzcan las emisiones de gases de efecto invernadero y otros contaminantes atmosféricos, mediante la utilización de sistemas eficientes energéticamente, de sistemas que permitan la **recuperación de energía** y la utilización de las energías renovables y de las energías residuales, cumpliendo los requisitos siguientes:”

“6. Recuperación de energía: las instalaciones térmicas y las de ventilación incorporarán subsistemas que permitan el ahorro, la recuperación de energía y el aprovechamiento de energías residuales”

A partir del día 1 de julio de 2021 entró en vigor la modificación sobre recuperación de calor del aire de extracción, por la cual se reducía el límite de caudal de aire a recuperar a  $0,28\text{m}^3/\text{s}$ . Esta modificación redujo casi a la mitad la exigencia.

Este sistema de climatización con recuperador de calor, tendría una función de filtro, y a su vez aprovecharía en invierno el aire extraído del volumen de la Terminal, al llegar la UTA, para transferir la temperatura al aire limpio introducido en ella a través del “plenum” de admisión, sin mezclarse pero llegando a realizar una transferencia de temperatura. Este sistema reduce a su vez la carga de trabajo del sistema de climatización.

Por último, durante los meses más cálidos el recuperador presenta una función de derivación (BPF) denominada “by-pass” con la finalidad de aprovechar el aire fresco exterior, durante las noches en especial, contribuyendo a *pre-cooling* el ambiente de manera eficiente.

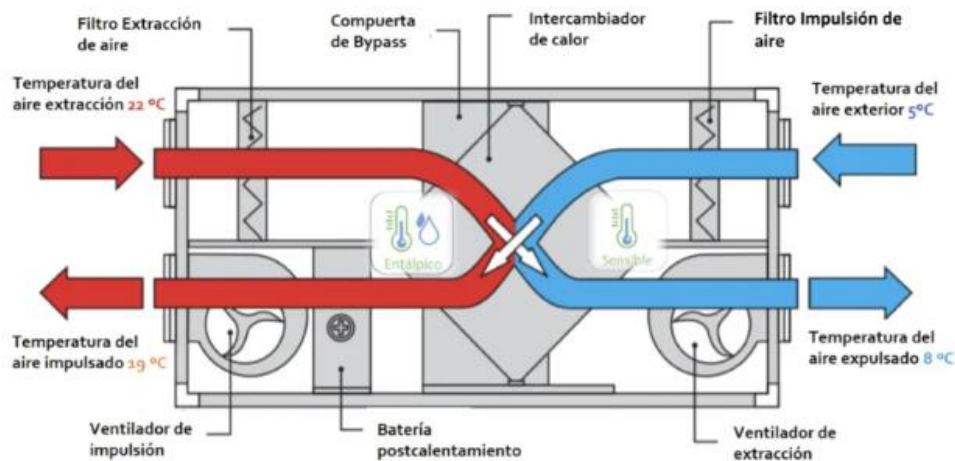


Ilustración 72. Sistema de Climatización. UTA con recuperación de Calor y ByPass

<sup>4</sup> By-Pass: Válvula autorregulable que se instala entre la línea del compresor (gas caliente a alta presión) y la línea de baja presión.

## 5. Conclusiones

Tras esta investigación sobre la Eficiencia Energética en Terminales de Aeropuertos; desde el punto de vista de las estrategias de diseño pasivas y activas, podemos comprobar la gran importancia que desempeñan factores naturales como la luz, la orientación, la climatología... en el diseño arquitectónico. Llegar a un edificio eficiente es la meta a seguir tanto actual como de los años venideros en la Arquitectura, por lo que familiarizarse con este tipo de soluciones debería ser esencial.

Así como los avances que se han conseguido en cuanto a sistemas de climatización a lo largo de los años. Cada día evolucionamos más en este ámbito y la variedad de posibles sistemas para climatizar un edificio poco a poco se convierten en más eficientes.

Dentro del sector aeroportuario hemos podido comprobar las diferentes posibilidades de diseño, y de soluciones y apoyos, para conseguir una actividad más eficiente del edificio. La Terminal 4 del Aeropuerto Adolfo Suarez Madrid-Barajas cumple con muchos de los requisitos para poder hablar y estudiar estos aspectos, aun con todo ello, se trata de un edificio que su principal objetivo nunca fue el de ser eficiente energéticamente.

Como dijo el gran arquitecto Renzo Piano *"La sostenibilidad es el punto de partida de cualquier buen diseño. No podemos seguir diseñando edificios que ignoren su impacto ambiental"*. O el relevante arquitecto con gran experiencia en este sector Luis Vidal *"Entrelazar soluciones de energía y luz sostenibles en la arquitectura es decisivo para la supervivencia de nuestro planeta."*

## 6. Bibliografía y Referencias

### Bibliografía:

- TC Cuadernos. (2007). “*Nueva Terminal Aérea T4 del Aeropuerto Madrid-Barajas*.” Valencia, España: TC Cuadernos.
- Neila González, F. J., & Bedoya Frutos, C. (1997). “*Técnicas arquitectónicas y constructivas de acondicionamiento ambiental*.” Madrid, España: Ediciones UPC

### Referencias:

1. Todo Passivhaus. (n.d.). *Diseño pasivo en arquitectura*. <https://todopassivhaus.es/pasive-house/diseno-pasivo-en-arquitectura/>
2. Huellas de Arquitectura. (2018). *Medidas activas y pasivas en la arquitectura bioclimática*. <https://huellasdearquitectura.com/2018/09/12/medidas-activas-y-pasivas-en-la-arquitectura-bioclimatica/>
3. Hispaviación. (n.d.). *Arquitectura de aeropuertos*. <https://www.hispaviacion.es/arquitectura-de-aeropuertos/>
4. La Casa de la Arquitectura. (n.d.). *Nueva terminal del aeropuerto de Zaragoza*. <https://lacasadelaarquitectura.es/recurso/nueva-terminal-del-aeropuerto-de-zaragoza/3671aad6-0be4-4a43-b43c-20913fccd2e5>
5. Parlamento Europeo. (2024). *Eficiencia energética de los edificios: Nueva ley para descarbonizar el sector*. <https://www.europarl.europa.eu/news/es/press-room/20240308IPR19003/eficiencia-energetica-de-los-edificios-nueva-ley-para-descarbonizar-el-sector>
6. MITECO. (n.d.). *Eficiencia energética de edificios*. <https://www.miteco.gob.es/es/energia/eficiencia/epbd2024.html>
7. Europe Direct Navarra. (2022). *Fit for 55: La UE refuerza los objetivos de emisiones de CO<sub>2</sub> para los coches y furgonetas nuevos*. <https://europedirectnavarra.eu/>
8. Wikipedia. (n.d.). *Transmitancia térmica*. [https://es.wikipedia.org/wiki/Transmitancia\\_t%C3%A9rmica](https://es.wikipedia.org/wiki/Transmitancia_t%C3%A9rmica)
9. EIPOS Grados. (n.d.). *Coefficiente global de transmisión térmica*. <https://eiposgrados.com/blog-energias/coeficiente-global-de-transmision-termica/>

10. EIPOS Grados. (n.d.). *Control solar de la envolvente térmica*.  
<https://eiposgrados.com/blog-energias/control-solar-de-la-envolvente-termica/>
11. Aparejadores Madrid. (n.d.). *Guía técnica de eficiencia energética*.  
<https://www.aparejadoresmadrid.es/documents/20194/36447/GT790.pdf/a39f2fa9-4141-454f-b186-2c44f7ca46b9>
12. WikiArquitectura. (n.d.). *Barajas T4*.  
<https://es.wikiarquitectura.com/edificio/barajas-t4/>
13. Código Técnico de Edificación. (n.d.). *Condiciones técnicas de los procedimientos para la evaluación de la eficiencia energética*.  
[https://www.codigotecnico.org/pdf/DocAdicionales/proyectoRD/Borrador\\_Condiciones\\_tecnicas\\_de\\_los\\_procedimientos\\_para\\_la\\_evaluacion\\_de\\_la\\_eficiencia\\_energetica.pdf](https://www.codigotecnico.org/pdf/DocAdicionales/proyectoRD/Borrador_Condiciones_tecnicas_de_los_procedimientos_para_la_evaluacion_de_la_eficiencia_energetica.pdf)
14. Protectónica. (n.d.). *Control solar en fachadas*. [https://pro-tectonica-s3.s3.eu-west-1.amazonaws.com/art35pdf\\_1554135989.pdf](https://pro-tectonica-s3.s3.eu-west-1.amazonaws.com/art35pdf_1554135989.pdf)
15. Construible. (2007). *La T4 de Barajas consigue un alto ahorro energético*.  
[https://www.construible.es/2007/07/12/la-t4-de-barajas-consigue-un-alto-ahorro-energetico?utm\\_source=chatgpt.com](https://www.construible.es/2007/07/12/la-t4-de-barajas-consigue-un-alto-ahorro-energetico?utm_source=chatgpt.com)
16. Bierzo98. (n.d.). *Bambú en la T4*.  
[https://www.bierzo98.es/bambu-de-t4/?utm\\_source=chatgpt.com](https://www.bierzo98.es/bambu-de-t4/?utm_source=chatgpt.com)
17. Adexsi. (n.d.). *Ventilación natural*.  
<https://www.adexsi.com/es/genatis/ventilacion-natural>
18. Wikipedia. (n.d.). *Barajas*. <https://es.wikipedia.org/wiki/Barajas>
19. IDAE. (n.d.). *Guía técnica de vidrios y cerramientos*.  
[https://www.idae.es/uploads/documentos/documentos\\_GUIA\\_TECNICA\\_Vidrios\\_y\\_cerramiento\\_v05\\_2dfc482b.pdf](https://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_GUIA_TECNICA_Vidrios_y_cerramiento_v05_2dfc482b.pdf)
20. Naturgy. (n.d.). *Qué es el free cooling*.  
[https://www.naturgy.es/Empresas/blog/que\\_es\\_el\\_free\\_cooling#:~:text=El%20free%20cooling%20o%20enfriamiento,su%20uso%20en%20aplicaciones%20industriales.](https://www.naturgy.es/Empresas/blog/que_es_el_free_cooling#:~:text=El%20free%20cooling%20o%20enfriamiento,su%20uso%20en%20aplicaciones%20industriales.)
21. EnelX. (n.d.). *Sistemas de cogeneración*.  
<https://corporate.enelx.com/es/question-and-answers/what-are-cogeneration-systems#:~:text=La%20cogeneraci%C3%B3n%20es%20un%20sistema,dos%20fuentes%20de%20producci%C3%B3n%20separadas.>
22. Wikipedia. (n.d.). *Plenum*. <https://es.wikipedia.org/wiki/Plenum>

23. BOE. (2007). *Real Decreto 1027/2007, de 20 de julio, por el que se aprueba el Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios (RITE)*.  
<https://www.boe.es/buscar/pdf/2007/BOE-A-2007-15820-consolidado.pdf>
24. CNI Instaladores. (n.d.). *Nuevo RITE: Atención al cambio en el caudal de aire*. <https://www.cni-instaladores.com/nuevo-rite-atencion-cambio-caudal-aire/>
25. Tecna. (n.d.). *Recuperador de calor: Funcionamiento y ventajas*.  
<https://tecna.es/recuperador-de-calor-funcionamiento-ventajas/>
26. El País. (n.d.). *Aeropuerto sostenible: Aena*. <https://elpais.com/publico/especial/aeropuerto-sostenible-aena/>
27. Fundación ENAIRE. (n.d.). *Integración de los aeropuertos en el entorno*.  
<https://fundacionenaire.es/conocimiento/integracion-aeropuertos-entorno/>
28. Sener. (n.d.). *SENER y Aena mejoran la calidad del aire y la eficiencia energética en aeropuertos*. <https://www.group.sener/noticias/sener-aena-mejora-calidad-aire-eficiencia-energetica-aeropuertos/>
29. El Confidencial. (2019). *Objetivo sostenibilidad: El consumo energético de Aena bajo control*. [https://www.elconfidencial.com/empresas/2019-09-19/objetivo-sostenibilidad-consumo-aena-bra\\_2218775/](https://www.elconfidencial.com/empresas/2019-09-19/objetivo-sostenibilidad-consumo-aena-bra_2218775/)
30. Grupo Iberia. (n.d.). *Aena e Iberia apuestan por la sostenibilidad en los aeropuertos*. <https://grupo.iberia.es/pressrelease/details/16191>
31. Aena. (n.d.). *Documento de sostenibilidad y eficiencia energética en aeropuertos*.  
<https://www.aena.es/sites/Satellite?blobcol=urldata&blobkey=id&blobtable=MungoBlobs&blobwhere=1576858099076&ssbinary=true>
32. Universitat Politècnica de València. (n.d.). *Estrategias de sostenibilidad en aeropuertos*.  
[https://www.upv.es/contenidos/CAMUNISO/noticia\\_799018v.html](https://www.upv.es/contenidos/CAMUNISO/noticia_799018v.html)

## Ilustraciones

Ilustración 01: Exterior fachada T2\_Valencia-Manises

<https://www.fbarquitectura.com/proyectos/terminal-t2-aeropuerto-de-valencia/>

Ilustración 02: Interior Terminal Aeropuerto de Zaragoza

<https://www.archdaily.cl/cl/02-34151/nuevo-terminal-del-aeropuerto-de-zaragoza-vidal-y-asociados-arquitectos>

Ilustración 03: Exterior Terminal Aeropuerto de Zaragoza

<https://www.archdaily.cl/cl/02-34151/nuevo-terminal-del-aeropuerto-de-zaragoza-vidal-y-asociados-arquitectos>

Ilustración 04: Interior Terminal Aeropuerto de Alicante-Elche

<https://www.aeropuerto-alicante-elche.es/2021/03/la-.html>

Ilustración 05: Interior T2 Aeropuerto Valencia-Manises

<https://www.fbarquitectura.com/proyectos/terminal-t2-aeropuerto-de-valencia/>

Ilustración 06: Aeropuerto de La Palma

<https://www.bluemagmadinglapalma.com/el-aeropuerto/>

Ilustración 07: Aeropuerto de Málaga-Costa del Sol

<https://www.vidaeconomica.com/2021/02/aeropuerto-malaga-costa-del-sol/>

Ilustración 08: Gráfico emisiones de transporte en UE

<https://aviaciondigital.com/las-normas-sobre-propiedad-y-control-europeas-podrian-cambiar-pronto-pero-a-gusto-de-quien/>

Ilustración 09: Imagen índice CTE DB HE junio 2022

<https://www.codigotecnico.org/DocumentosCTE/AhorroEnergia.html>

Ilustración 10: Tabla 3.1.1.a-HE1

<https://www.codigotecnico.org/DocumentosCTE/AhorroEnergia.html>

Ilustración 11: Tabla 3.1.1.c-HE1

<https://www.codigotecnico.org/DocumentosCTE/AhorroEnergia.html>

Ilustración 12: Tabla 3.1.2-HE1

<https://www.codigotecnico.org/DocumentosCTE/AhorroEnergia.html>

Ilustración 13: Tabla 3.1.3.a-HE1

<https://www.codigotecnico.org/DocumentosCTE/AhorroEnergia.html>

Ilustración 14: Tabla 3.2 HE1

<https://www.codigotecnico.org/DocumentosCTE/AhorroEnergia.html>

Ilustración 15: Esquema de acción Plan de Acción Climática

<https://www.aena.es/es/corporativa/sostenibilidad-ambiental/cambio-climatico/plan-accion-climatica.html>

Ilustración 16: Objetivo plan UE

<https://aviaciondigital.com/las-normas-sobre-propiedad-y-control-europeas-podrian-cambiar-pronto-pero-a-gusto-de-quien/>

Ilustración 17: Interior edificio Terminal 4. Dique

TC Cuadernos (2007) *“Nueva Área TerminalT4 del Aeropuerto Madrid-Barajas”*

Ilustración 18: Interior T4: Facturador

TC Cuadernos (2007) *“Nueva Área TerminalT4 del Aeropuerto Madrid-Barajas”*

Ilustración 19: Interior T4: Dique

TC Cuadernos (2007) *“Nueva Área TerminalT4 del Aeropuerto Madrid-Barajas”*

Ilustración 20: Interior T4. Cañones, comunicaciones verticales.

TC Cuadernos (2007) *“Nueva Área TerminalT4 del Aeropuerto Madrid-Barajas”*

Ilustración 21: Interior T4. Cañones

TC Cuadernos (2007) *“Nueva Área TerminalT4 del Aeropuerto Madrid-Barajas”*

Ilustración 22: Plano de Emplazamiento Terminal 4

TC Cuadernos (2007) *“Nueva Área TerminalT4 del Aeropuerto Madrid-Barajas”*

Ilustración 23: Plano Terminal 4. Nivel -1

TC Cuadernos (2007) *“Nueva Área TerminalT4 del Aeropuerto Madrid-Barajas”*

Ilustración 24: Plano Terminal 4. Nivel 0

TC Cuadernos (2007) *“Nueva Área TerminalT4 del Aeropuerto Madrid-Barajas”*

Ilustración 25: Plano Terminal 4. Nivel +1

TC Cuadernos (2007) *“Nueva Área TerminalT4 del Aeropuerto Madrid-Barajas”*

Ilustración 26: Plano Terminal 4. Nivel +2

TC Cuadernos (2007) *“Nueva Área TerminalT4 del Aeropuerto Madrid-Barajas”*

Ilustración 27: Alzado y Sección Sur. Terminal 4

TC Cuadernos (2007) *“Nueva Área TerminalT4 del Aeropuerto Madrid-Barajas”*

Ilustración 28: Sección Transversal. Terminal 4

TC Cuadernos (2007) *“Nueva Área Terminal T4 del Aeropuerto Madrid-Barajas”*

Ilustración 29: Sección Longitudinal Dique

TC Cuadernos (2007) *“Nueva Área Terminal T4 del Aeropuerto Madrid-Barajas”*

Ilustración 30: Mapa Localización Distrito de Barajas. Elaboración propia

Ilustración 31: Tabla a-Anejo B. Zonas Climáticas. DB HE

<https://www.codigotecnico.org/DocumentosCTE/AhorroEnergia.html>

Ilustración 32: Tabla a-Anejo B. Zonas Climáticas. DB HE (Barajas)

<https://www.codigotecnico.org/DocumentosCTE/AhorroEnergia.html>

Ilustración 33: Gráfico temperaturas anuales Madrid (Barajas). Elaboración propia

Ilustración 34: Tabla datos temperaturas anuales Madrid (Barajas) Elaboración propia

Ilustración 35: Gráfico TA (°C) y TSOL (°C). Elaboración propia

Ilustración 36: Tabla de valores medios anuales TA y TSOL. Elaboración propia

Ilustración 37: Gráfico y tabla de orientaciones CTE

<https://www.codigotecnico.org/DocumentosCTE/AhorroEnergia.html>

Ilustración 38: Orientación T4 sobre gráfico CTE. Elaboración propia

Ilustración 39: Interior T4. Secuencia colores fríos orientación Norte

TC Cuadernos (2007) *“Nueva Área Terminal T4 del Aeropuerto Madrid-Barajas”*

Ilustración 40: Esquemas ventilación natural

<https://www.adexsi.com/es/genatis/ventilacion-natural>

Ilustración 41: Radiación Solar sobre fachada Oeste

TC Cuadernos (2007) *“Nueva Área Terminal T4 del Aeropuerto Madrid-Barajas”*

Ilustración 42: Esquema Aprovechamiento luz natural en Cañones. Elaboración propia

Ilustración 43: Claraboyas luz natural. Cañones

TC Cuadernos (2007) *“Nueva Área Terminal T4 del Aeropuerto Madrid-Barajas”*

Ilustración 44: Claraboyas luz natural. Aprovechamiento niveles inferiores

TC Cuadernos (2007) *“Nueva Área Terminal T4 del Aeropuerto Madrid-Barajas”*

Ilustración 45: Esquema de Soleamiento Fachada Este. 8:30 am. Verano. Elaboración Propia

Ilustración 46: Esquema de Soleamiento Fachada Este. 9:40 am. Verano. Elaboración Propia

Ilustración 47: Esquema de Soleamiento Fachada Este. 11:10 am. Verano. Elaboración propia

Ilustración 48: Esquema de Soleamiento Fachada Este. 11:40 am. Verano. Elaboración propia

Ilustración 49: Exterior T4. Zona Sur Dique. Soleamiento de Poniente

TC Cuadernos (2007) *“Nueva Área Terminal T4 del Aeropuerto Madrid-Barajas”*

Ilustración 50: Cubierta ondulada de Bambú. Elaboración propia

Ilustración 51: Cubierta ondulada de Bambú. Elaboración propia

Ilustración 52: Pavimento de piedra natural caliza. Recogida de equipajes

TC Cuadernos (2007) *“Nueva Área Terminal T4 del Aeropuerto Madrid-Barajas”*

Ilustración 53: Imagen exterior Terminal 4

TC Cuadernos (2007) *“Nueva Área Terminal T4 del Aeropuerto Madrid-Barajas”*

Ilustración 54: Captaciones a través de huecos acristalados, orientación y protecciones

Neila González, F. J., & Bedoya Frutos, C. (1997). *“Técnicas arquitectónicas y constructivas de acondicionamiento ambiental.”* Madrid, España: Ediciones UPC

Ilustración 55: Comportamiento de la radiación al incidir en un acristalamiento

Neila González, F. J., & Bedoya Frutos, C. (1997). *“Técnicas arquitectónicas y constructivas de acondicionamiento ambiental.”* Madrid, España: Ediciones UPC

Ilustración 56: Envolverte. Fachada Acristalada + Parasoles

TC Cuadernos (2007) *“Nueva Área Terminal T4 del Aeropuerto Madrid-Barajas”*

Ilustración 57: Elementos de sombra en fachada. Aleros + Parasol

TC Cuadernos (2007) *“Nueva Área Terminal T4 del Aeropuerto Madrid-Barajas”*

Ilustración 58: Alzado fachada. Elaboración propia

Ilustración 59: Sección Constructiva Fachada. Elaboración propia

Ilustración 60: Plano de emplazamiento y acometidas. Planta Cogeneración

Presentación T4\_Ingeniero Gonzalo La Tova

Ilustración 61: Esquema funcionamiento sistema desplazamiento por aire. Climatización Dique. Elaboración propia.

Ilustración 62: Difusor. Impulsión aire limpio

TC Cuadernos (2007) “*Nueva Área Terminal T4 del Aeropuerto Madrid-Barajas*”

**Ilustración 63:** Tótem. Retorno e impulsión

TC Cuadernos (2007) “*Nueva Área Terminal T4 del Aeropuerto Madrid-Barajas*”

**Ilustración 64:** Sistema perimetral de climatización. Toberas

TC Cuadernos (2007) “*Nueva Área Terminal T4 del Aeropuerto Madrid-Barajas*”

**Ilustración 65:** Detalle Sistema Perimetral de Climatización

Presentación T4\_Ingeniero Gonzalo La Tova

**Ilustración 66:** Zoom Exterior. Sistema Perimetral de Climatización

Presentación T4\_Ingeniero Gonzalo La Tova

**Ilustración 67:** Imagen exterior Sistema Perimetral de Climatización

Presentación T4\_Ingeniero Gonzalo La Tova

**Ilustración 68:** Esquema Climatización Dique

Presentación T4\_Ingeniero Gonzalo La Tova

**Ilustración 69:** Circuitos de Plenum de Admisión (azul) y Extracción (rojo).

Presentación T4\_Ingeniero Gonzalo La Tova

**Ilustración 70:** Axonométrica Sistema de Climatización con Plenum

Presentación T4\_Ingeniero Gonzalo La Tova

**Ilustración 71:** Esquema Ventilación Cruzada

Neila González, F. J., & Bedoya Frutos, C. (1997). “*Técnicas arquitectónicas y constructivas de acondicionamiento ambiental.*” Madrid, España: Ediciones UPC

**Ilustración 72:** Sistema de Climatización. UTA con recuperación de Calor y ByPass

<https://tecna.es/recuperador-de-calor-funcionamiento-ventajas/>