



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

*Validación del modelo térmico del edificio del CUD-ENM a
partir de datos experimentales*

Grado en Ingeniería Mecánica

ALUMNO: Salvador Rendo García

DIRECTORAS: Ana Ogando Martínez
Lara Febrero Garrido

CURSO ACADÉMICO: 2025-2026

Universida_{de}Vigo



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

*Validación del modelo térmico del edificio del CUD-ENM a
partir de datos experimentales*

Grado en Ingeniería Mecánica
Intensificación en Tecnología Naval
Cuerpo General

UniversidadeVigo

RESUMEN

El presente Trabajo de Fin de Grado aborda la creación, calibración y validación de un Gemelo digital térmico del edificio del Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar, con el objetivo de optimizar su eficiencia energética y garantizar el confort de sus usuarios. Para ello, se ha llevado a cabo una exhaustiva campaña de monitorización experimental mediante sensores *IoT*. Estos datos reales han permitido ajustar un modelo de simulación dinámica en *OpenStudio* y *EnergyPlus*. El proceso iterativo de calibración ha reducido drásticamente la brecha de desempeño (*Performance gap*), logrando un error estadístico CV(RMSE) inferior al 10 %, lo que asegura el estricto cumplimiento de la normativa internacional ASHRAE *Guideline* 14 y el protocolo IPMVP.

A partir de este modelo validado, se han evaluado cuatro Medidas de Ahorro Energético (MAE): optimización de consignas horarias de climatización, actualización del parque lumínico con tecnología LED, instalación de láminas de control solar y aplicación de un sistema de aislamiento térmico exterior (SATE). La simulación de un "Escenario óptimo" demuestra una significativa reducción del 35,47 % en la demanda energética global. Esta mejora se traduce en un ahorro económico de 3.549 € anuales y evita la emisión de más de 7,5 toneladas de CO₂ al año, consolidando la viabilidad técnica, financiera y medioambiental del proyecto.

PALABRAS CLAVE

Gemelo digital, Eficiencia energética, Calibración térmica, Medidas de ahorro, Simulación térmica

AGRADECIMIENTOS

Quisiera expresar mi más sincero agradecimiento a mis directoras, Lara Febrero Garrido y Ana Ogando Martínez, por su inestimable dedicación y el apoyo brindado a lo largo de estos meses. Su rigor profesional y su excelente orientación han sido fundamentales para el correcto desarrollo de este Trabajo de Fin de Grado.

A mis padres y a mi hermana, por su paciencia infinita, su apoyo incondicional y por ser mi mayor pilar. Gracias por confiar siempre en mí y por darme la fuerza necesaria para alcanzar cualquier meta.

CONTENIDO

Contenido	1
Índice de Figuras	5
Índice de Tablas.....	8
1 Introducción y objetivos	9
1.1 Antecedentes y motivación	9
1.2 Justificación del estudio: el “ <i>Performance gap</i> ”	10
1.3 Objetivos	12
1.3.1 Objetivo general.....	12
1.3.2 Objetivos específicos	12
2 Estado del arte	14
2.1 Contexto energético y normativo	14
2.1.1 Contexto energético global y marco legislativo europeo.....	14
2.1.2 Marco normativo en España: El Código Técnico de la Edificación.....	15
2.1.3 Fundamentos del confort térmico: el Modelo de Fanger.....	16
2.1.4 Discontinuidades en los muros: Puentes térmicos.....	17
2.1.5 Eficiencia energética en infraestructuras de Defensa	17
2.1.6 Zona climática y características del entorno	18
2.1.7 El concepto de Gemelo digital.....	18
2.2 Simulación energética de edificios (BEM)	19
2.2.1 Evolución del régimen estacionario a la simulación dinámica.....	19
2.2.2 El motor de cálculo: EnergyPlus	20
2.2.3 Entorno de simulación: OpenStudio	21
2.2.4 Datos climáticos: Generación del año meteorológico real	22
2.2.5 La problemática de la interfaz BIM-BEM.....	22
2.3 Calibración y validación experimental del modelo.....	23
2.3.1 Procedimientos de calibración: Manual o automático.....	23
2.3.2 Herramientas y software para la calibración de modelos	23
2.3.3 La brecha de rendimiento energético: “ <i>Performance gap</i> ”	24
2.3.4 Metodología de calibración: ASHRAE Guideline 14	25
2.4 Monitorización higrotérmica y obtención de datos reales	26
3 Metodología y desarrollo del modelo.....	27
3.1 Caracterización del edificio y su entorno.....	28
3.1.1 Localización geográfica.....	28

3.1.2 Condiciones climáticas del entorno	28
3.1.3 Influencia del entorno urbano en la geometría solar	29
3.1.4 Caracterización arquitectónica y funcional del edificio CUD-ENM.....	30
3.2 Campaña de monitorización y caracterización climática.....	31
3.2.1 Selección de parámetros ambientales monitorizados	31
3.2.2 Arquitectura y distribución del sistema de adquisición de datos.....	32
3.2.3 Distribución estratégica de los sensores	33
3.2.4 Especificaciones técnicas de los sensores.....	34
3.2.5 Conectividad de los sensores y protocolo de extracción de datos	35
3.2.6 Evaluación de la incertidumbre instrumental y propagación del error.....	36
3.2.7 Adquisición y procesamiento de datos meteorológicos brutos.....	37
3.2.8 Generación del archivo climático experimental AMY	37
3.3 Modelado geométrico del Gemelo digital.....	39
3.3.1 Diseño geométrico	39
3.3.2 Modelado geométrico de la fenestración	39
3.3.3 Estrategia de zonificación térmica.....	40
3.4 Caracterización constructiva	41
3.4.1 Fenestración	43
3.4.2 Definición de las propiedades difusivas y capacitivas de los cerramientos	43
3.5 Análisis de cargas internas y condiciones operacionales.....	44
3.5.1 Parametrización de la carga térmica por ocupación	45
3.5.2 Parametrización de las cargas eléctricas	46
3.5.3 Balance global de cargas térmicas internas	46
3.5.4 Patrones de carga y régimen horario.....	46
3.5.5 Asignación de cargas por zona térmica	47
3.6 Definición del acondicionamiento térmico y perfiles operativos	48
3.6.1 Implementación del modelo de cargas ideales	48
3.6.2 Configuración de los termostatos	49
3.6.3 Definición de los horarios estacionales	49
3.7 Configuración de los <i>simulation settings</i>	50
3.8 Calibración paramétrica y optimización del modelo	51
3.8.1 Metodología de simulación automatizada y diseño del entorno de evaluación.....	52
3.8.2 Identificación y selección de variables para la calibración.....	53
3.8.3 Desarrollo del código de evaluación en Python.....	54
4 Resultados y calibración del Gemelo digital	57
4.1 Análisis de los datos térmicos monitorizados	57

4.1.1 Validación cruzada de los sistemas de adquisición de datos	57
4.1.2 Evolución térmica global de la infraestructura	58
4.1.3 Análisis del comportamiento higrométrico	59
4.2 Evaluación térmica del modelo base sin calibrar	60
4.2.1 Comportamiento del modelo en régimen de oscilación libre y validación de la inercia térmica	60
4.2.2 Respuesta del modelo con sistemas HVAC activos	61
4.2.3 Cuantificación del error inicial CV(RMSE)	63
4.3 Calibración secuencial y ajuste del modelo	65
4.3.1 Calibración de las consignas de los termostatos	65
4.3.2 Calibración de las infiltraciones de aire del edificio	66
4.3.3 Calibración de la capacitancia térmica	67
4.3.4 Calibración de la temperatura fuera del horario laboral (lunes-viernes)	69
4.3.5 Validación matemática del modelo calibrado	70
4.4 Validación gráfica del modelo térmico calibrado	71
4.5 Demanda energética anual del modelo calibrado	72
4.6 Simulación de medidas de ahorro energético	73
4.6.1 MAE 1: Ajuste y optimización del control termostático	73
4.6.2 MAE 2: Implementación de tecnología LED y sus consecuencias en las cargas térmicas	75
4.6.3 MAE 3: Optimización de la envolvente acristalada mediante láminas de baja emisividad y control solar	76
4.6.4 MAE 4: Mejora de la envolvente mediante Sistema de Aislamiento Térmico Exterior (SATE)	77
4.6.5 Escenario óptimo: implementación conjunta de las MAE	78
4.7 Análisis de viabilidad económica del escenario óptimo	79
4.8 Reducción de la huella de carbono mediante el escenario óptimo	80
4.8.1 Análisis de viabilidad económica y periodo de recuperación de la inversión	81
5 Conclusiones y líneas futuras	83
5.1 Conclusiones sobre la metodología y el Gemelo digital	83
5.2 Análisis de las MAE	83
5.3 Cierre del proyecto	84
5.4 Líneas futuras	85
Ampliación y optimización de la campaña de monitorización	85
Modelado detallado del sistema de climatización	85
Integración de sistemas de generación de energía renovable	85

6 Bibliografía.....	86
Anexo I: Implicaciones Sociales, y/o Económicas, y/o Ambientales	90
Anexo II: Reflexiones Éticas y Sociales	92
Anexo III: Fichas técnicas de los instrumentos de medición	94

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1 Representación conceptual del Performance gap. Fuente: Elaboración propia.....	11
Figura 2-1 Participación global del sector de la edificación en la demanda final de energía. Fuente: The GlobalABC	14
Figura 2-2- Relación entre el PMV y el PPD. Fuente: INSHT	17
Figura 2-3 Diagrama del volumen de control para el balance térmico en la superficie interior en <i>EnergyPlus</i> . Fuente: <i>Bigladder software</i>	21
Figura 2-4 Diagrama comparativo de flujos de trabajo. Fuente: Elaboración propia	23
Figura 2-5 Niveles de certificación LEED. Fuente: U.S. Green Building Council (USGBC).....	24
Figura 3-1 Diagrama de flujo de la metodología del proyecto. Fuente: Elaboración propia.	27
Figura 3-2 Vista aérea de la Escuela Naval Militar. Fuente: Google Earth	28
Figura 3-3 Patio de aulas de la Escuela Naval Militar. Fuente: Ministerio de Defensa.....	30
Figura 3-4 Esquema del flujo de trabajo para la monitorización y adquisición de datos térmicos. Fuente: Elaboración propia	31
Figura 3-5 Sensor 8 de la red primaria conectado durante la fase de medición. Fuente: Elaboración propia	32
Figura 3-6 Arquitectura de bloques del sistema de monitorización primario. Fuente: Elaboración propia	33
Figura 3-7 Ubicación de los puntos de monitorización en la planta baja. Fuente: Elaboración propia	34
Figura 3-8 Ubicación de los puntos de monitorización en la planta alta. Fuente: Elaboración propia	34
Figura 3-9. Interfaz de Elements durante el proceso de generación del archivo EPW. Fuente: Elaboración propia	38
Figura 3-10 Evolución de la temperatura y humedad relativa correspondiente al periodo de medición. Fuente: Elaboración propia	38
Figura 3-11 Diseño 2D de la planta baja del edificio CUD-ENM. Fuente: Elaboración propia.....	39
Figura 3-12 Vista tridimensional del edificio. Fuente: Elaboración propia	40
Figura 3-13 Esquema de zonificación térmica del modelo. Fuente: Elaboración propia.....	41
Figura 3-14 Estratificación del muro de las fachadas principales. Fuente: Elaboración propia	42
Figura 3-15 Distribución del total de las cargas térmicas internas. Fuente: Elaboración propia	45
Figura 3-16. Panel de configuración y asignación detallada de cargas internas en OpenStudio. Fuente: Elaboración propia	47
Figura 3-17 Perfil diario de temperatura de consigna para el sistema de calefacción. Fuente: Elaboración propia	50
Figura 3-18 Panel de control de la configuración. Fuente: Elaboración propia.....	51
Figura 3-19 Diagrama de flujo de la arquitectura de simulación desarrollada. Fuente: Elaboración propia	53

Figura 3-20 Esquema de comunicación entre <i>GenOpt</i> y el programa de simulación. Fuente: Lawrence Berkeley National Laboratory	54
Figura 3-21 <i>Script</i> de cálculo del error CV(RMSE). Fuente: Elaboración propia	55
Figura 3-22 Parametrización de la plantilla del modelo. Fuente: Elaboración propia	56
Figura 3-23 Archivo de configuración de <i>GenOpt</i> . Fuente: Elaboración propia	56
Figura 4-1 Comparativa de temperaturas registradas por la red primaria y secundaria durante el mes de febrero. Fuente: Elaboración propia	57
Figura 4-2 Evolución térmica horaria de los 8 despachos monitorizados con la red primaria y media global durante la fase de monitorización. Fuente: Elaboración propia	58
Figura 4-3 Evolución de la humedad relativa de los 8 despachos monitorizados con la red primaria y media global durante la fase de monitorización. Fuente: Elaboración propia	59
Figura 4-4 Evolución de la temperatura media en régimen de oscilación libre. Fuente: Elaboración propia	60
Figura 4-5 Comparativa horaria de la temperatura exterior frente a la interior en régimen de oscilación libre. Fuente: Elaboración propia	61
Figura 4-6 Evolución de la temperatura con el sistema de calefacción activo. Fuente: Elaboración propia	62
Figura 4-7 Demanda energética media del sistema de calefacción. Fuente: Elaboración propia	62
Figura 4-8 Demanda energética simulada mensual del edificio del CUD-ENM durante el año 2026. Fuente: Elaboración propia.	63
Figura 4-9 Cálculo del error medio CV(RMSE) inicial (4 semanas). Fuente: Elaboración propia .	64
Figura 4-10 Cálculo del error medio CV(RMSE) inicial (6 semanas). Fuente: Elaboración propia	65
Figura 4-11 Evolución de la F.O. frente a la variación de la temperatura de la calefacción. Fuente: Elaboración propia	66
Figura 4-12 Evolución de la F.O. frente a la variación de las infiltraciones exteriores. Fuente: Elaboración propia	67
Figura 4-13 Evolución de la F.O. frente a la variación de la capacitancia térmica. Fuente: Elaboración propia	68
Figura 4-14 Evolución de la F.O. frente a la variación de la temperatura fuera del horario laboral (lunes-viernes). Fuente: Elaboración propia	70
Figura 4-15. Evolución del error CV(RMSE) durante las distintas fases de calibración secuencial del modelo. Fuente: Elaboración propia.	71
Figura 4-16. Comparativa entre las mediciones empíricas y las simuladas para el 13 de febrero de 2026 del despacho 208. Fuente: Elaboración propia	71
Figura 4-17 Distribución porcentual de la demanda energética anual del CUD-ENM por uso final. Fuente: Elaboración propia.	73
Figura 4-18 Comparativa de la demanda energética: modelo base frente a MAE 1. Fuente: Elaboración propia.	74
Figura 4-19 Comparativa de la demanda energética: modelo base frente a MAE 2. Fuente: Elaboración propia	75

Figura 4-20 Comparativa de la demanda energética: modelo base frente a MAE 3. Fuente: Elaboración propia	77
Figura 4-21 Comparativa de la demanda energética: modelo base frente a MAE 4. Fuente: Elaboración propia	78
Figura 4-22 Comparativa de la demanda energética: modelo base frente a escenario óptimo. Fuente: Elaboración propia	79
Figura 4-23 Desglose del ahorro energético y balance económico anual del Escenario óptimo. Fuente: Elaboración propia	80
Figura A1-0-1 Diagrama de la integración de los criterios EUR-ACE aplicados al desarrollo del Gemelo digital del edificio CUD-ENM. Fuente: Elaboración propia	91
Figura A2-0-1 Esquema piramidal de los pilares éticos y sociales. Fuente: Elaboración propia	93

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1- Límites máximos admisibles para la validación de modelos. Fuente: Elaboración propia	25
Tabla 3-1. Cuadro comparativo de las especificaciones técnicas de los sistemas de adquisición de datos. Fuente: Elaboración propia.....	35
Tabla 3-2. Ejemplo de estructura del archivo .csv generado por el sensor. Fuente: Elaboración propia	36
Tabla 3-3. Especificaciones metrológicas de los sensores. Fuente: Elaboración propia	36
Tabla 3-4 Propiedades termofísicas de los materiales del muro exterior. Fuente: Elaboración propia	44
Tabla 3-5 Resumen de cargas internas por zonas térmicas. Fuente: Elaboración propia.....	48
Tabla 4-1 Resumen de la variación de parámetros durante la calibración secuencial. Fuente: Elaboración propia	70
Tabla 4-2 Resumen de la demanda energética anual del modelo calibrado. Fuente: Elaboración propia.	72
Tabla 4-3 Comparativa de propiedades técnicas del acristalamiento. Fuente: Elaboración propia .	76
Tabla 4-4 Balance de reducción de emisiones de CO ₂ mediante la implementación del Escenario óptimo. Fuente: Elaboración propia.....	80
Tabla A3-0-1. Especificaciones técnicas del sensor DHT22. Fuente: Elaboración propia.....	94
Tabla A3-0-2. Especificaciones técnicas del sensor TH01. Fuente: Elaboración propia.....	95

1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1 Antecedentes y motivación

La eficiencia energética en el ámbito del Ministerio de Defensa ha experimentado un cambio notable en los últimos años. Ha pasado de ser tratada de forma tangencial y casi superflua en la Estrategia de Tecnología e Innovación para Defensa 2010 (ETID) [1], a ser un objetivo prioritario para la seguridad nacional en la ETID 2020 [2]. En este último documento, publicado por el Ministerio de Defensa, esta materia dispone de un capítulo destinado únicamente a este ámbito: “Sostenibilidad energética”, el cual define claramente la energía como un aspecto clave para el rendimiento futuro de la defensa nacional.

Este paradigma responde a que el Ministerio de Defensa concibe la dependencia exterior y la ineficiencia energética como vulnerabilidades críticas susceptibles de ser aprovechadas por agentes externos, poniendo en riesgo la seguridad nacional. En este sentido, una gestión energética deficiente deriva directamente en una pérdida de autonomía operativa.

Con el fin de mejorar este aspecto, la Organización del Tratado del Atlántico Norte (OTAN) ha tomado las medidas necesarias para liderar un cambio de rumbo en los países miembros de la coalición. Esto se ha reflejado en la doctrina *Green Defence* [3], un concepto que tiene como objetivo principal poner en el foco de atención la eficiencia energética y la protección medioambiental en el marco de las operaciones militares, reduciendo de este modo la huella logística. Referente a esto último, la propia OTAN destaca que mejorar la eficiencia energética trae consigo beneficios más allá de la protección medioambiental, suponiendo además una mejora en la eficacia operativa.

Tal y como señala la Asamblea Parlamentaria de la OTAN en su Informe General de 2023 [4], la dependencia energética por parte de las bases de la alianza es una carga logística crítica, obligando a un transporte constante de medios a través de zonas sensibles con exposición constante al riesgo, especialmente en el panorama geopolítico actual, caracterizado por la constante inestabilidad.

España, como estado miembro de la coalición, ha trasladado este objetivo OTAN a la doctrina nacional. Esto se ve reflejado en la ETID 2020 [2], la cual enfoca la gestión energética inteligente como uno de los pilares básicos para la modernización de las Fuerzas Armadas. De hecho, el objetivo denominado “Eficiencia energética y sostenibilidad” establece la adopción de medidas para la gestión inteligente de la energía en bases militares y plataformas. Esto no hace más que poner en reflejo la trascendencia que este objetivo tiene para el Ministerio de Defensa.

El presente Trabajo de Fin de Grado aborda este desafío actual con un panorama singular, puesto que el edificio del Centro Universitario de la Defensa que está situado en la Escuela Naval Militar (CUD-ENM) fue construido a principios de la década de 1940, aprovechando los muros de carga de un

edificio del antiguo polígono de tiro que había en el lugar, al cual se le añadió una planta adicional y se renovó la estructura horizontal. Sin embargo, este mismo edificio sufrió una importante reforma en profundidad con el fin de adaptarlo a su uso actual como el edificio principal del CUD-ENM. Esta modificación fue dirigida por el Tcol. Ingeniero del CIP (Cuerpo de Ingenieros Politécnicos) D. Félix González de la Campa, finalizándose en el año 2010 para realizarse su posterior inauguración, junto con la implementación del Grado en Ingeniería Mecánica, en el curso 2010-2011. Por tanto, a pesar de ser relativamente reciente esta reforma en comparación con el año de construcción inicial del edificio, esta sigue siendo previa a la nueva era en la que la OTAN se encuentra inmersa actualmente, teniendo como uno de sus pilares básicos la eficiencia energética. En consecuencia, esta construcción presenta un aspecto moderno y robusto, debido a como fue concebido y diseñado por su compleja situación a escasos metros de la Ría de Pontevedra. Sin embargo, desde el punto de vista térmico está fundamentado en normativas derogadas ya hace más de una década con todo lo que ello conlleva en cuanto a desperdicio energético.

La motivación principal del presente trabajo radica en abordar el estudio térmico del edificio del CUD-ENM, superando el alcance de los análisis energéticos convencionales. Para ello, se incorpora como principal novedad el desarrollo de un Gemelo digital, extrapolando a la edificación un concepto tecnológico que ya ha sido implementado en otros ámbitos estratégicos de la Armada, tal y como ocurre en el programa de las fragatas F-110 [5]. El principal beneficio asociado a esta herramienta radica en la capacidad de simular múltiples escenarios de mejora de la eficiencia energética con un impacto económico mínimo o nulo. Esta optimización es viable gracias a la integración de tecnologías de Internet de las Cosas (*IoT*, por sus siglas en inglés: “*Internet of Things*”), empleadas fundamentalmente para la monitorización y adquisición de datos del entorno real. De este modo, se pretende dotar a la Escuela Naval Militar, y por extensión a la Armada, de un instrumento que garantice una rigurosa gestión energética de sus infraestructuras, en estricta alineación con el Plan de Medidas de Ahorro y Eficiencia Energética de la Administración General del Estado (PMAEE-AGE), publicado en el BOE el 25 de mayo de 2022 [6].

1.2 Justificación del estudio: el “*Performance gap*”

En el contexto de la simulación energética en la edificación, cabe destacar una problemática constante y ampliamente documentada: el “*Performance gap*” o “Brecha de desempeño energético”. Dicho fenómeno tiene su origen en la inevitable divergencia existente entre el consumo energético teórico, calculado mediante programas informáticos, y el consumo empírico registrado una vez que el edificio entra en funcionamiento. Por ello, este concepto ha sido estudiado en profundidad con el objetivo de optimizar la capacidad predictiva de los modelos y, de este modo, reducir tiempos y costes en el sector de la construcción.

Uno de los estudios de referencia en este campo es el del Doctor Pieter De Wilde, el cual publicó las conclusiones sobre sus estudios en el año 2014 en su obra “*The gap between predicted and measured energy performance*” [7]. El autor pudo demostrar que la diferencia en los resultados no es algo trivial, sino que esa divergencia en los resultados en edificios públicos similares al del CUD-ENM puede oscilar entre el 50 % - 100 %, pudiendo llegar a comprometer la estrategia energética prevista originalmente al contrastar con la realidad operativa. Para ilustrar esta problemática, la Figura 1-1 muestra una representación conceptual de esta desviación, evidenciando la diferencia habitual entre las predicciones del modelo teórico y la demanda operativa real.

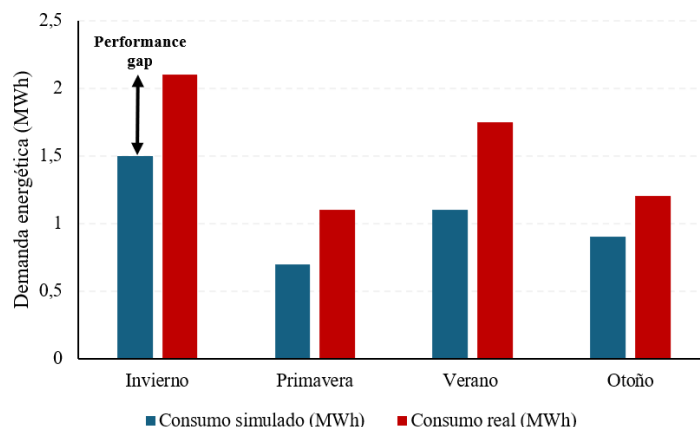


Figura 1-1 Representación conceptual del Performance gap. Fuente: Elaboración propia

Como ya se introdujo previamente, el origen de esta divergencia no es debida únicamente a un vector aislado, sino que responde a múltiples factores. En primer lugar, la simplicidad en la representación virtual del edificio mediante los softwares utilizados. Resulta prácticamente imposible representar a la perfección un edificio de estas características en un programa informático destinado a cálculos termodinámicos. No obstante, este no suele ser el factor más influyente, puesto que el modelado geométrico se asemeja con un alto grado de exactitud a la realidad.

En segundo lugar, cabe destacar que a pesar de haber sufrido una reforma hace algo menos de dos décadas, muchos de los materiales presentes en la arquitectura estructural actual del edificio son de su construcción hace ya más de 80 años. Es por ello por lo que, debido a la exposición constante del edificio al ambiente marino y al transcurso del tiempo, estos materiales han sufrido con toda probabilidad cierta degradación, no ofreciendo, por tanto, el rendimiento que se esperaría de ellos y con los que se cuenta a la hora de realizar los cálculos teóricos.

En tercer lugar, y probablemente el más influyente, se encuentra la imposibilidad de predecir el comportamiento exacto de los usuarios de las instalaciones, debido a la naturaleza del comportamiento humano y a la variabilidad de los patrones de ocupación del centro, y aún más si cabe en el entorno dinámico en el que se mueven, en la Escuela Naval Militar. Por tanto, resulta imposible establecer unos patrones sistemáticos de movimientos de las cargas internas del edificio.

En cuarto lugar, cabe destacar otra fuente de error de vital importancia: el archivo climático empleado en la simulación. La fiabilidad del balance térmico depende directamente de los datos meteorológicos introducidos, existiendo desviaciones notables dependiendo de si se utiliza un archivo con datos climáticos reales del periodo exacto (AMY, por sus siglas en inglés: “*Actual Meteorological Year*”), o si se opta por un archivo climático estandarizado (TMY, por sus siglas en inglés: “*Typical Meteorological Year*”), el cual puede presentar discrepancias significativas respecto a las condiciones reales a las que se expone el edificio.

Bajo esta casuística, el fin último del presente Trabajo de Fin de Grado reside en la necesidad de encontrar una solución para solventar el problema de la divergencia en los datos obtenidos por la vía teórica y la real. Para llegar a alcanzar este objetivo no basta con reproducir la geometría del edificio del CUD-ENM y activar el programa informático para obtener unos resultados, sino que es clave disponer de datos obtenidos de forma experimental a lo largo de un periodo de tiempo lo suficientemente extenso como para poder hacer uso de la información obtenida por los sensores. Sólo una vez se disponga de toda esa información será posible ajustar el modelo virtual para que se adecúe a la realidad y disponer así de un Gemelo digital fiable que cumplirá con la normativa vigente, y a través del cual se podrán estudiar posibles mejoras energéticas sin la necesidad de implementarlas en el edificio real.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

El objetivo principal del presente Trabajo de Fin de Grado (TFG) es el desarrollo de un modelo termodinámico validado mediante datos experimentales con el fin de disponer de un Gemelo digital desde el punto de vista de la energía para el edificio del CUD-ENM. De este modo, se pretende predecir la respuesta de la infraestructura a cambios en la misma, ya sea en su estructura o en su funcionamiento, con las ventajas que ello conlleva en cuanto a ahorro temporal y económico tratando de conseguir así un edificio lo más optimizado a nivel energético posible. Asimismo, este modelo también dotará a la ENM de una herramienta que permitirá evaluar el impacto de posibles cambios en el edificio sin necesidad de interferir en su uso diario.

Este propósito trasciende la mera representación geométrica de la arquitectura del edificio, sino que se hace uso de una potente herramienta como lo es *EnergyPlus*, que será el motor de cálculo del proyecto utilizando de base toda la información introducida en el otro principal programa informático del presente trabajo que es *OpenStudio*. Mediante el software utilizado, es posible parametrizar casi en su totalidad todos los elementos que influyen en la termodinámica del edificio: desde las capas utilizadas en la cimentación de la infraestructura hasta el horario de uso de la oficina por parte del Sr. director del Centro Universitario de la Defensa. El resultado perseguido es tratar de diseñar una herramienta calibrada y validada mediante datos experimentales que se ajuste lo máximo posible a la realidad y pueda ser de utilidad en posibles modificaciones del edificio del CUD-ENM.

La robustez del modelo estará definida por la divergencia en el resultado final obtenido, buscando siempre que ese error siempre sea el mínimo posible ajustando el mayor número de variables posibles buscando una alta precisión en todo momento. Para realizar la configuración del modelo teórico y poder ajustarlo con los datos reales, se contrastará con la información obtenida a través de unos sensores instalados por distintas estancias del edificio, los cuales almacenarán a intervalos regulares de tiempo los datos relativos a temperatura y humedad relativa.

1.3.2 Objetivos específicos

Con el fin de alcanzar lo expuesto en el objetivo general, se han establecido una serie de hitos intermedios que serán la derrota a seguir a lo largo del trabajo para establecer una línea lógica:

Desplegar una campaña de medición experimental. Planificación estratégica e instalación de sensores de medición en distintos puntos del recinto para obtener una base de datos experimental en cuanto a temperatura y humedad relativa se refiere. Esta fase incluye la comprobación de los requisitos técnicos y de uso que deben tener los sensores de medida, así como su correcto funcionamiento y mitigar posibles desviaciones en la calibración de los instrumentos, para finalmente instalarlos de forma estratégica en los lugares que se consideren clave para la obtención de una base de datos útil para elaborar el modelo térmico.

Construir el modelo energético del edificio (BEM). Generar una representación tridimensional de la arquitectura lo más fidedigna posible y configurar los condicionantes que influyen en su termodinámica mediante el programa *OpenStudio* y su herramienta de diseño nativa *FloorspaceJS*. En esta fase se definen con un alto grado de detalle los materiales constructivos, los horarios de uso de cada estancia y las cargas internas. Posteriormente, utilizando *EnergyPlus* como motor de cálculo, se procederá a la ejecución de la simulación del modelo con el fin de obtener y analizar los resultados sobre el comportamiento térmico y energético del edificio.

Validar el modelo térmico computacional. Llevar a cabo un ajuste detallado mediante el método iterativo para disminuir la incertidumbre entre el modelo teórico y los datos obtenidos *in situ* por los sensores, todo ello mediante el programa informático *GenOpt*. Este hito culminará con la comprobación de que lo obtenido se encuentra dentro del marco legal según la normativa vigente, marcada especialmente por los criterios de calidad descritos en la ASHRAE *Guideline* 14 (por sus siglas en inglés:

“American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers”), así como por el IPMVP (por sus siglas en inglés: *“International Performance Measurement and Verification Protocol”*).

Evaluar las medidas de ahorro energético. Realizar simulaciones con distintas Medidas de Ahorro Energético (MAE) con el fin de mejorar la eficiencia energética del edificio. En esta fase se busca tratar de buscar diversas medidas, tanto activas como pasivas, y simularlas con el fin de obtener nuevas formas de ahorrar energía, reduciendo de este modo la huella energética del edificio del CUD-ENM.

2 ESTADO DEL ARTE

2.1 Contexto energético y normativo

2.1.1 Contexto energético global y marco legislativo europeo

Tras la aprobación del Acuerdo de París en el año 2015 la normativa medioambiental se vio sumergida en una continua transformación, estableciéndose unos límites claramente definidos respecto al cambio climático. Aquellos aspectos relativos a este ámbito que, previamente a la Cumbre de París, eran considerados simplemente como una guía de *buena praxis* en ingeniería, han pasado a constituir una prioridad urgente y un pilar básico en cualquier proyecto actual. En este sentido, la arquitectura y la edificación, lejos de resultar ajenas a este nuevo paradigma, se han visto profundamente involucradas en su consecución. Desde la UE se ha puesto el foco en este sector puesto que acumula alrededor del 40 % del consumo energético total en los países europeos (a nivel mundial esta cifra disminuye a un 34 % como se aprecia en la Figura 2-1) y tiene un impacto directo en el 36 % de las emisiones que favorecen el efecto invernadero, siendo por tanto un punto crítico para tratar de reducir las emisiones [8].

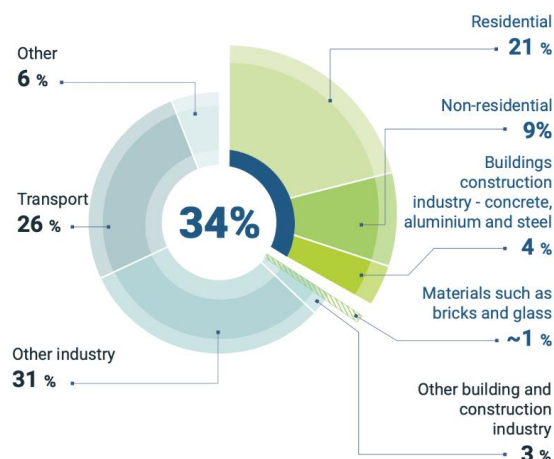


Figura 2-1 Participación global del sector de la edificación en la demanda final de energía. Fuente: The GlobalABC

Por otra parte, el Pacto Verde Europeo (*European Green Deal*) ha sido concebido con el objetivo estratégico de convertir el continente europeo en el primero climáticamente neutro para el año 2050. Además, para tratar de acelerar esta transformación y conseguir lo antes posible el objetivo se han establecido un paquete de medidas conocidas como “Objetivo 55”, las cuales endurecen las exigencias

fijando una reducción obligatoria del 55 % de los gases de efecto invernadero para el 2030 respecto al año 1990 [9].

El principal instrumento legal adoptado por la UE (Unión Europea) para materializar estos objetivos en el ámbito de la edificación es la Directiva relativa a la eficiencia energética de los edificios (EPBD, por sus siglas en inglés: “*Energy Performance of Buildings Directive*”). La primera versión de esta directiva, aprobada en 2010, exigía al sector público ejercer un papel ejemplarizante, estableciendo el año 2018 como fecha límite para que los edificios de titularidad pública cumplieren con el estándar de Edificio de Consumo de Energía Casi Nulo (nZEB, por sus siglas en inglés: “*nearly Zero-Energy Building*”). No obstante, la UE reorientó posteriormente su estrategia mediante la aprobación de la Modificación 2018/844. Este cambio de enfoque se produjo al constatar que la mayor parte de las emisiones provenían del parque edificatorio más envejecido, motivo por el cual se impulsó la rehabilitación energética de las infraestructuras existentes a través de herramientas como los pasaportes de renovación de edificios [10].

La IEA (por sus siglas en inglés: “*International Energy Agency*”) define claramente que para poder llegar a alcanzar el objetivo de neutralidad climática por parte de la UE, esta debe reducir un 24 % su consumo energético para el 2030 [10]. Por todo ello, y tal como se ha expuesto previamente, las actuaciones no deben limitarse a poner el foco en los edificios de nueva construcción. La clave para alcanzar los objetivos de sostenibilidad reside en identificar ineficiencias y optimizar el parque edificatorio existente, garantizando así una gestión energética inteligente. En este contexto, herramientas como la validación de modelos térmicos adquieren un papel protagonista a la hora de diagnosticar dichas deficiencias y proyectar medidas correctoras fundamentadas en datos experimentales.

2.1.2 Marco normativo en España: El Código Técnico de la Edificación

En el ámbito nacional, la adaptación de la normativa de la UE a la nacional ha supuesto una importante transformación en los requisitos de edificación. El documento de referencia en esta materia ha sido desde sus inicios el Código Técnico de la Edificación (CTE), el cual fue aprobado por el Real Decreto 314/2006. No obstante, debido a la situación climática actual, el CTE estuvo sometido a una redefinición profunda de sus exigencias más básicas. Esta modificación fue ratificada en el Real Decreto 732/2019 y tuvo una actualización posterior en el 2022. Cabe destacar que esta última versión conjuga al mismo tiempo los exigentes criterios de edificación con el concepto de Edificio de Consumo de Energía Nulo o Casi Nulo (ZEB o nZEB), prestando especial atención a los requisitos exigidos en temas de aislamiento y eficiencia [11], aplicables siempre que se trate de una obra de nueva construcción o de una reforma importante.

Desde un punto de vista funcional, el Documento Básico de Ahorro de Energía (DB-HE) [12], el cual se divide en dos partes, reúne todas las exigencias necesarias para la evaluación térmica de cualquier infraestructura. Por un lado, el HE-1 (condiciones para el control de la demanda energética) regula el comportamiento pasivo, fijando entre otros datos los valores límite de transferencia de calor por conducción y radiación a través de muros y ventanas, aspectos transcendentales a tener en cuenta frente a climas agresivos. Por otro lado, el documento HE-0 se encarga de establecer los requisitos relativos al desempeño de los sistemas activos del edificio, limitando el consumo máximo admisible de energía primaria. Este parámetro sirve como referencia fundamental para calificar la eficiencia energética del inmueble, constituyendo el umbral frente al cual se contrastarán los resultados arrojados por el modelo térmico validado [12].

De manera complementaria a las exigencias expuestas anteriormente, en las infraestructuras que cuentan con sistemas de climatización, se debe tener también en cuenta el Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios (RITE) [13]. Esta normativa define las exigencias de bienestar e higiene que las estancias del edificio deben cumplir para ser habitables, estableciendo requisitos de temperatura y las exigencias de renovación de aire para asegurar una calidad del mismo adecuada en el interior de cada estancia. Estos valores exigidos por el marco normativo se introducen en los programas de simulación

como cargas internas (renovación del aire) y termostatos virtuales (temperatura), asegurando de este modo que el modelo térmico se basa en la misma normativa que el edificio real a la hora de realizar las simulaciones [14].

Un vector determinante para la precisión de un modelo térmico es la definición del entorno que rodea al edificio y las condiciones de este. Para ello, el DB-HE en el Apéndice B realiza una caracterización de distintos territorios de España mediante la “Zonificación climática”, estableciendo la severidad climática del invierno (letras) y del verano (números) en cada lugar. De este modo, se establecen las exigencias de aislamiento térmicos requeridos para el edificio dependiendo en qué punto de la geografía española esté situado. Por tanto, deberá utilizarse siempre el archivo climático (*weatherfile*) correspondiente a la zona de estudio. Este archivo asegura que la simulación se asemeje lo máximo posible a la realidad, teniendo en cuenta las particularidades climáticas locales, como pueden ser los vientos o una alta humedad relativa.

En paralelo a estas exigencias del CTE, si bien la eficiencia energética es un pilar fundamental a la hora de realizar el diseño térmico de un edificio, el objetivo primordial es garantizar unas condiciones óptimas de habitabilidad en lo que a calidad del aire se refiere. En la normativa nacional, estas condiciones están definidas en el RITE (Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios). De acuerdo con esta normativa [14], los edificios destinados a una actividad docente o principalmente de oficina se encuentran encuadrados en el grupo IDA 2 (por sus siglas en inglés: “*Indoor Air*”) (véase apartado IT 1.1.4.2.2. del RITE [14]). Esta clasificación conlleva el cumplimiento de una normativa exigente que marca un estricto rango en cuanto a renovación del aire y humedad relativa.

De acuerdo con el RITE, con el fin de garantizar el bienestar higrotérmico, se establecen unas temperaturas operativas de diseño comprendidas entre los 21 °C y 23 °C en la estación de invierno, y entre los 23 °C y 25 °C en la de verano. En paralelo a estas exigencias térmicas, es recomendable mantener una humedad relativa de entre el 40 % y el 60 %. Sin embargo, este último es un requisito complicado de cumplir en edificios que se encuentran inmersos en un clima costero, donde la humedad relativa media suele situarse entre el 75 % y el 85 % a lo largo del año. Ignorar esta variable en la concepción de la arquitectura de la infraestructura sería un error fatal puesto que derivaría en la aparición de condensación y moho. Debido a esto, existe un motivo claro, y además con trasfondo legal, para tener que realizar siempre el estudio de la humedad relativa del aire en conjunto con la temperatura.

No obstante, al analizar estas exigencias normativas relativas al diseño térmico e higrométrico, es fundamental mantener en perspectiva la realidad del parque edificatorio existente. Gran parte de las infraestructuras públicas nacionales actuales fueron construidas décadas antes de la implantación de los actuales estándares de eficiencia energética. Por tanto, la aplicación de estos criterios modernos sobre estos edificios antiguos supone un desafío para la ciencia. En estos casos, el objetivo no radica en el diseño arquitectónico desde cero, sino en comprender cómo responden térmicamente estas envolventes antiguas, lo que convierte a la simulación energética en una herramienta de diagnóstico indispensable para evaluar su rendimiento frente a la legislación vigente.

2.1.3 Fundamentos del confort térmico: el Modelo de Fanger

La normativa RITE es el marco normativo que define los rangos en los cuales deben estar ciertos parámetros para que la infraestructura sea viable en cuanto a calidad del aire, sin embargo, estas normas están profundamente influenciadas por parámetros subjetivos y fenómenos fisiológicos. Dado que la práctica de la ingeniería exige la aplicación de criterios objetivos y cuantificables, se recurre al Modelo de Fanger. Este método se basa en una sencilla premisa, y es que el bienestar de la persona en cuanto a confort térmico se refiere se alcanza cuando existe un balance nulo de energía entre la misma y el entorno. Esta herramienta es utilizada por *EnergyPlus* para tratar el confort térmico como algo concreto y no subjetivo que dependa de cada usuario.

El modelo se sirve por tanto de seis variables en total para obtener una solución al equilibrio térmico. Las primeras cuatro variables son condiciones ambientales: temperatura seca del aire, temperatura

radiante, humedad relativa y velocidad del aire; las otra dos depende del usuario y son: actividad metabólica y vestimenta. El conjunto de todas estas variables permite al programa realizar el cálculo y obtener un resultado definitivo. Mediante este dato final, *EnergyPlus* calcula otros dos valores que son: PMV (por sus siglas en inglés: “*Predicted Mean Vote*”, valor medio de la sensación térmica de un grupo de personas) y PPD (por sus siglas en inglés: “*Predicted Percentage of Dissatisfied*”, porcentaje de personas insatisfechas). Como se puede comprobar en la Figura 2-2, la relación entre estas dos variables no es lineal, sino que tiene una variación muy particular puesto que depende de múltiples factores. En primer lugar, el PMV predice la sensación térmica y está acotado entre un valor comprendido entre -3 “mucho frío” y 3 “mucho calor”; y, en segundo lugar, el PPD representa el porcentaje de personas que sentirían mucho frío/calor, es decir, estarían en disconfort térmico. Este último nunca es 0 incluso en condiciones óptimas debido a que siempre habrá, como mínimo, un 5 % de personas que están incómodas desde el punto de vista térmico en esa condición. Por ello, tal y como se puede apreciar en la Figura 2-2, el INSHT (Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo) recomienda mantener el PMV entre -0,5 y +0,5 con el fin de tener en todo momento, como máximo, un 10 % del personal insatisfecho.

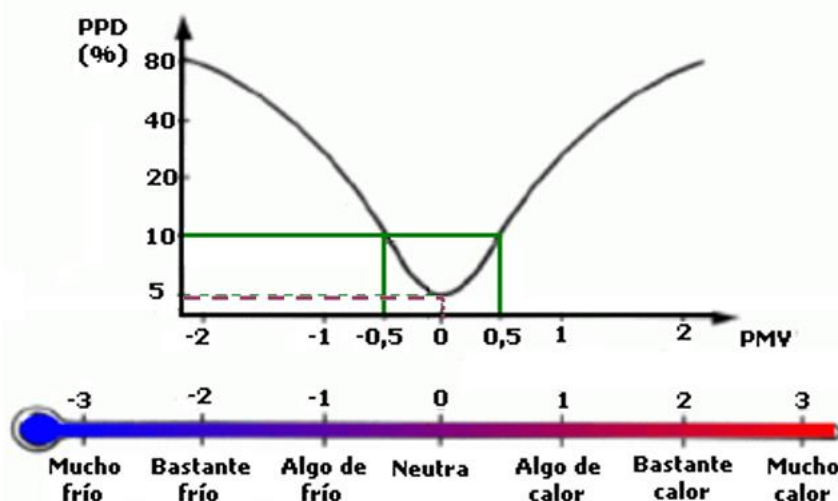


Figura 2-2- Relación entre el PMV y el PPD. Fuente: INSHT

2.1.4 Discontinuidades en los muros: Puentes térmicos

La fase de definición de los cerramientos, tanto exteriores como interiores, requiere de un alto grado de precisión, puesto que en estos lugares hay elementos, que a pesar de en muchos casos tener un espesor muy reducido, pueden tener una gran influencia en el resultado final, este es el caso de los puentes térmicos. De acuerdo con el CTE DB-HE [12], estas zonas se definen como puntos en los cuales el cerramiento pierde su uniformidad, y esto puede ser debido por cambios geométricos, de material o introducir elementos entremedias con distinta conductividad térmica.

A nivel termodinámico estas variaciones tienen múltiples consecuencias en cualquier edificación, donde estos puentes térmicos tienen lugar habitualmente en las esquinas del edificio, en las ventanas o puertas entre otros. Las consecuencias directas de estos puentes térmicos son que las líneas de flujo de calor, que en un principio son unidireccionales, debido a estos cambios pasan a ser tridimensionales, intensificando por tanto la pérdida energética.

2.1.5 Eficiencia energética en infraestructuras de Defensa

La aplicación de criterios de sostenibilidad ambiental y eficiencia energética en el ámbito de Defensa hoy en día van más allá de un simple cumplimiento de la normativa o un ahorro económico, sino que son concebidos como un punto clave en la estrategia de Seguridad Nacional. En cuanto al panorama

internacional, la OTAN ha liderado un cambio en la concepción de este concepto desde las FAS introduciendo el concepto *Green Defence* [15], el cuál principalmente establece que la gestión inteligente de la energía es un multiplicador de la fuerza. En este contexto, la optimización de la energía en las instalaciones fijas supone un ahorro de recursos que pueden ser utilizados para el apoyo a la fuerza.

A nivel nacional, el Ministerio de Defensa ha asumido como propias las directrices de la OTAN en este campo, tomando las medidas necesarias para poder realizar los correspondientes cambios con garantías de éxito. Este paquete de medidas que rigen la evolución tecnológica es la ETID [2], cuya última versión salió en el año 2020 y se espera que a lo largo del 2026 salga la siguiente debido a los cambios que ha habido a nivel medioambiental durante los últimos años. Encuadrada en la ETID 2020, concretamente en el área de “Energía y sostenibilidad”, se establece que la gestión eficiente de las bases y acuartelamientos es un punto crítico para el Ministerio de Defensa, buscando convertir estos lugares en entornos inteligentes y sostenibles mediante modelos de simulación energética, consiguiendo de este modo optimizar las infraestructuras y asegurar su capacidad operativa en el largo plazo.

En el caso particular de las instalaciones militares y centros de formación de las Fuerzas Armadas, la utilización de una herramienta de simulación energética (BEM, por sus siglas en inglés: “*Building Energy Modeling*”) como lo es el diseño de un modelo térmico simulado se presenta como la mejor opción para mejorar la eficiencia energética, debido a lo complejo que sería interferir en la rutina diaria de estos recintos, sometidos a estrictos horarios y a un constante trasiego de personal. De este modo, estas infraestructuras podrían contar con un Gemelo digital que les permitiría evaluar su eficiencia energética bajo distintos paradigmas (variaciones en aislamientos, materiales, nuevos horarios de climatización, etc.) de forma rápida, económica y sin ningún perjuicio para el personal.

2.1.6 Zona climática y características del entorno

Un aspecto transcendental por considerar a la hora de realizar el estudio energético de un edificio es su emplazamiento geográfico, puesto que las condiciones exteriores condicionan fuertemente las características termodinámicas de la infraestructura. La orientación, la exposición a los vientos predominantes de la costa y la lluvia afectan de forma constante a las fachadas, especialmente durante los meses del periodo invernal.

A nivel normativo, el Documento Básico de Ahorro de Energía (DB-HE) [12] establece diferentes zonas climáticas como ya se había introducido previamente en este capítulo. Esta denominación de los lugares tiene un doble significado: por una parte, se asigna una letra que indica la severidad climática frente a la presencia de inviernos severos y la consiguiente demanda de calefacción; por otra parte, se asigna un número que refleja la severidad del verano, determinando si el sobrecalentamiento es un problema en la zona y si se debe dar prioridad a los sistemas de refrigeración frente a los de calefacción.

Sin embargo, esta división teórica descrita por zonas climáticas no tiene un cumplimiento estricto en la práctica a la hora de realizar simulaciones de alta precisión, puesto que presta especial atención a la temperatura seca, pero apenas tiene en consideración un factor clave en cualquier zona de costa: la humedad relativa.

Debido a la proximidad al mar, la humedad relativa medida en las edificaciones costeras es relativamente alta durante gran parte del año en comparación con zonas de interior. Esto tiene una influencia directa en el comportamiento termodinámico de los edificios. Al introducirse este aire exterior, el sistema de climatización no solo debe vencer la carga sensible del aire, sino también la elevada carga latente asociada a la humedad del ambiente, lo que penaliza significativamente el consumo energético.

2.1.7 El concepto de Gemelo digital

En el entorno del Ministerio de Defensa, cada vez está más presente el concepto de Gemelo digital, el cual apareció por primera vez por parte de *Navantia* con el proyecto de las fragatas F-110 [5], diseño totalmente integrado en el paradigma de la Industria 4.0. Cabe destacar que esta, no es una característica

más de una larga lista de novedades que traen estas nuevas unidades de la Armada, sino que constituía uno de los hitos fundamentales establecidos por la Armada desde la génesis del proyecto. Un Gemelo digital trasciende mucho más allá de una simple representación geométrica de la infraestructura/unidad en 3D mediante un programa CAD; sino que hay un flujo bidireccional de información constante con el cuál se consigue tener una representación virtual dinámica que está en constante actualización. De este modo, se pueden realizar comprobaciones del estado de la infraestructura/unidad e incluso predecir su comportamiento ante posibles futuros escenarios si se tiene conocimiento de lo que puede ocurrir. Siendo de este modo, una herramienta más que la cadena de Mando y Control (C2) de la Armada puede tener a su disposición para tomar en todo momento la mejor decisión posible.

En consecuencia, tras el éxito inicial en el desarrollo del Gemelo digital para las fragatas F-110, resulta de gran interés asemejar la aplicabilidad que este sistema tiene en las infraestructuras que la Armada tiene en tierra. Poniendo en este caso el foco en la parte termodinámica con el fin de conseguir alcanzar una mejora en la eficiencia energética. Por tanto, el disponer de un modelo termodinámico virtual de las edificaciones militares podría concebirse como una analogía al Gemelo digital de las nuevas unidades que la Armada está incorporando en la Flota, implementando así los objetivos de la Armada 4.0 en proyectos tangibles.

2.2 Simulación energética de edificios (BEM)

2.2.1 Evolución del régimen estacionario a la simulación dinámica

El método tradicional para dimensionar los sistemas de climatización de un edificio ha sido el régimen estacionario, debido a la mayor simplicidad que este tenía respecto al dinámico, puesto que no se disponía de los *softwares* actuales. No obstante, esta metodología estacionaria asume condiciones constantes que no se corresponden con la realidad debido a la inviabilidad de realizar los cálculos para todas las posibilidades que se puedan dar a lo largo del tiempo. De este modo, la principal limitación de este régimen estacionario es ofrecer únicamente la solución para un instante de tiempo determinado. Es por ello, que con la aparición de los programas informáticos se vio favorecida la aparición del cálculo de simulación dinámica, pudiendo así obtener unos resultados más semejantes a la realidad, considerando en cada momento del día las condiciones reales de ese instante y no una media del conjunto.

El motivo por el que resulta necesario aplicar el método de simulación dinámica en edificaciones reside principalmente en su elevada inercia térmica, debida al gran espesor de los muros de las fachadas y la cimentación. En esta misma línea, cabe destacar que, debido al considerable espesor y materiales utilizados habitualmente en los muros interiores y exteriores, este tipo de infraestructuras poseen una elevada capacidad calorífica. Desde un punto de vista termodinámico, hay que reseñar la presencia de dos fenómenos que provocan una alteración en la transmisión de las condiciones exteriores al interior del edificio: un factor de decrecimiento, el cual suaviza los picos de temperatura al reducir la intensidad de la ganancia/pérdida de calor; y el retardo de propagación, que provoca un desfase temporal en cuanto a la transmisión de las condiciones externas.

Características de la respuesta dinámica: Desfase y amortiguamiento

La inercia térmica de una infraestructura está definida por la capacidad de sus cerramientos para almacenar energía y transmitirla, pero siempre con un desfase temporal entre ambas caras de la pared. Este fenómeno se aprecia especialmente en las fachadas que dan al exterior, no así tanto en las particiones interiores puesto que dan a otras zonas del edificio y por tanto no existe tanta diferencia de temperatura entre ambas caras del cerramiento. De este modo, debido a los materiales por los que están compuestos los muros de las fachadas, estos actúan como un regulador natural, acumulando la energía recibida durante las horas diurnas, y liberándola paulatinamente al interior principalmente durante las horas nocturnas, que es cuando descienden las temperaturas en el exterior. De este modo, se suavizan las variaciones de temperatura en el interior del edificio.

En base a lo anteriormente expuesto, la inercia térmica se define por dos parámetros que son: factor de decrecimiento y desfase temporal (también denominado retardo de onda o *time lag*). El primero indica una disminución entre las variaciones que se dan en el lado exterior del muro y en el interior. Es decir, ante una oscilación térmica externa pronunciada (por ejemplo, una variación de 15 °C entre el día y la noche), la masa térmica del muro amortigua dicha onda, permitiendo que al interior solo se transmita una fracción de esa amplitud térmica, estabilizando así la temperatura. El desfase temporal, por su parte, se trata del tiempo que tarda la energía en atravesar el cerramiento y llegar al interior de la zona térmica. Es decir, los efectos de los rayos solares incidentes a las 12 del mediodía sobre la fachada no se transmiten al momento al interior del edificio, sino que esa energía llegará a las estancias pasado un instante de tiempo determinado.

Cabe destacar, que los programas de simulación energética avanzada no realizan el estudio de los cerramientos como un único bloque homogéneo, sino que permiten crear una sección multicapa en la que se introducen todos los materiales que componen cada muro, con sus dimensiones y características particulares cada uno. La estratificación de los materiales por el medio no es algo aleatorio, y su orden provoca variaciones en los resultados obtenidos a nivel termodinámico, siendo crucial definir correctamente los elementos que aportan masa térmica, los que actúan como aislantes minimizando el flujo de calor, y los revestimientos interiores que dictan la rapidez con la que se calienta el ambiente al encender los sistemas de climatización.

En este contexto, y para comprender plenamente la evolución tecnológica descrita, resulta fundamental establecer la distinción metodológica entre las herramientas informáticas asociadas a cada régimen de cálculo:

- Software de simulación en régimen estacionario. Estos programas realizan cálculos térmicos simplificados, normalmente con medias mensuales o anuales. Su objetivo principal es obtener el certificado energético del edificio para cumplir con la ley. En España, los más utilizados son CE3X o CERMA [16]. Sin embargo, al no realizar el cálculo horario de cómo se intercambia la energía a través de los muros, no sirven para estudiar el comportamiento térmico detallado de una infraestructura.
- Software de simulación en régimen dinámico. Estos programas calculan el intercambio de calor paso a paso, en intervalos de una hora o incluso menos. Aquí destacan herramientas avanzadas como *EnergyPlus* [17] o TRNSYS [18]. A pesar de que obligan al usuario a introducir información muy detallada sobre los materiales, son los únicos que ofrecen la precisión necesaria para poder comparar y calibrar el modelo virtual con los datos reales medidos por los sensores con total garantía.

2.2.2 El motor de cálculo: *EnergyPlus*

La simulación energética normalmente utiliza como motor de cálculo principal *EnergyPlus* [19], que se trata de un software con una alta capacidad para resolver las ecuaciones termodinámicas de cualquier tipo de infraestructura y un referente internacional para el modelado energético. Este programa surge como resultado de la fusión de dos herramientas predecesoras, BLAST y DOE-2, pero a diferencia de estas dos, *EnergyPlus* ha incorporado la posibilidad de poder realizar cálculos simultáneos de la carga térmica y la respuesta del edificio a los diversos cambios en cada instante de tiempo. Además, destacar que el software ha sido validado por la normativa emitida por la ASHRAE [20].

El funcionamiento técnico de *EnergyPlus*, en cuanto a cálculos se refiere, se basa en el método del balance térmico. Este consiste en realizar un equilibrio termodinámico entre las superficies del edificio y la masa de aire que hay en el interior de este, asegurando de este modo que la suma de flujos térmicos entrantes y salientes (véase la Figura 2-3) en cada instante de tiempo sea igual a cero (véase ecuación 2.1).

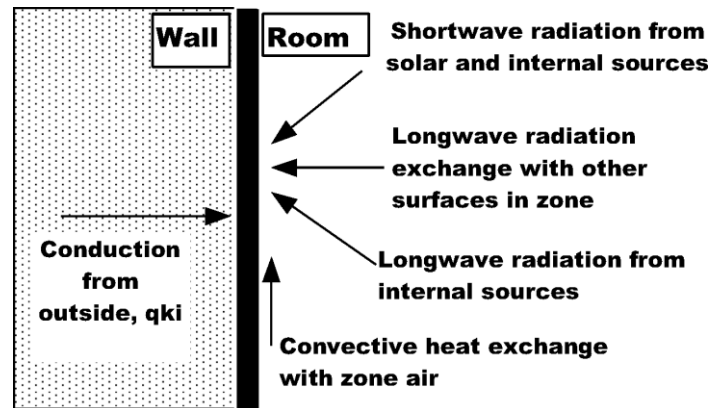


Figura 2-3 Diagrama del volumen de control para el balance térmico en la superficie interior en *EnergyPlus*.
Fuente: *Bigladder software*

$$q_{LWX} + q_{SW} + q_{LWS} + q_{ki} + q_{conv.} = 0 \quad (2.1)$$

Donde:

q_{LWX} : Longwave radiation exchange with other surfaces in zone (Intercambio radiante con las demás superficies de las estancias).

q_{SW} : Shortwave radiation from solar and internal sources (Radiación solar absorbida y calor proveniente de las luces).

q_{LWS} : Longwave radiation from internal sources (Calor radiante emitido por los ocupantes y los equipos informáticos).

q_{ki} : Conduction from outside (Flujo de calor que atraviesa el muro desde el exterior por conducción).

$q_{conv.}$: Convective heat exchange with zone air (Transferencia de calor entre la superficie del muro y el aire de la habitación).

Para realizar los cálculos de la cantidad de energía que atraviesa los muros de una infraestructura, el programa se sirve de las Funciones de Transferencia de Conducción (CTF, por sus siglas en inglés: “Conduction Transfer Functions”). A nivel físico, esto supone una gran ventaja puesto que dota al modelo de “memoria”, ya que el flujo de calor no se transmite instantáneamente, sino que requiere de un tiempo de propagación.

Este es un aspecto vital, especialmente para simular casos meteorológicos concretos; por ejemplo, cuando los rayos solares comienzan a impactar en la fachada, estos no transmiten inmediatamente calor al interior, especialmente en infraestructuras con una gran masa térmica. En definitiva, estas ecuaciones CTF son capaces de relacionar el calor transmitido con el desfase temporal que tiene lugar para que la energía pueda atravesar los muros.

2.2.3 Entorno de simulación: OpenStudio

El diseño de la geometría virtual de una infraestructura con fines de estudio termodinámico se lleva a cabo habitualmente a través de aplicaciones como *OpenStudio*, puesto que *EnergyPlus* carece de una interfaz gráfica en la que introducir los datos referentes a la arquitectura del edificio. A su vez, dentro de *OpenStudio* se utiliza una herramienta CAD (por sus siglas en inglés: “Computer-Aided Design”) integrada para realizar el modelado, denominada *FloorSpaceJS*. Su elección y uso frecuente se deben fundamentalmente a que se encuentra directamente insertada dentro del propio entorno de *OpenStudio*, facilitando el flujo de datos.

El proceso de diseño mediante este software busca en todo momento la sencillez y simplifica aquellos elementos decorativos o arquitectónicos que se considera que tienen poca influencia desde el punto de vista termodinámico. El flujo de trabajo estándar consiste en, partiendo de los planos del edificio en 2D, dibujar las zonas térmicas deseadas. Asignando posteriormente una altura a cada planta para realizar la extrusión. De este modo, se asegura una geometría limpia y libre de errores típicos del modelado en 3D.

A pesar de las simplificaciones geométricas aplicadas, en caso de existir pequeños errores de ajuste en las uniones, el programa propone automáticamente soluciones que resultan satisfactorias conforme a los estándares de precisión requeridos en proyectos de simulación energética.

2.2.4 Datos climáticos: Generación del año meteorológico real

Un aspecto clave en los modelos de simulación termodinámica es establecer con exactitud las condiciones existentes en el exterior del edificio. Para lograr este objetivo, se recurre a los archivos climáticos, los cuales consisten en una extensa base de datos que recopila el comportamiento meteorológico horario de una ubicación geográfica a lo largo de un año completo. En el caso del motor de cálculo *EnergyPlus*, esta información se introduce mediante un archivo con extensión EPW (*EnergyPlus Weather*). Este formato resulta fundamental, puesto que reúne todas aquellas variables imprescindibles para resolver el balance termodinámico de la infraestructura, tales como la temperatura de bulbo seco, la humedad relativa, la radiación solar o la velocidad del viento.

A la hora de definir este entorno exterior existen diferentes alternativas. Por un lado, los modelos convencionales suelen emplear un archivo estadístico del tipo TMY. Este realiza una media basada en los datos obtenidos en las últimas décadas, por tanto, raramente supone un fiel reflejo de la realidad climática del año específico que se pretende simular. Para realizar una calibración adecuada resulta transcendental que las variables meteorológicas utilizadas en la simulación se correspondan perfectamente con las reales del periodo de estudio.

Debido a esto, en procesos de validación experimental de calidad se recurre a la generación de un archivo meteorológico específico denominado AMY, en lugar de uno tipo TMY. Al utilizar un archivo AMY, el motor de cálculo dispone de una información del entorno (temperatura, radiación solar o humedad entre otros) que coincide cronológicamente con los datos experimentales recogidos, permitiendo así una comparación rigurosa entre el comportamiento del modelo y el del edificio real.

2.2.5 La problemática de la interfaz BIM-BEM

La transferencia de información entre la herramienta utilizada para el entorno BIM (por sus siglas en inglés: “*Building Information Modeling*”) y el entorno BEM (por sus siglas en inglés: “*Building Energy Modeling*”) es un punto crítico en cualquier proceso de simulación energética. Si bien es cierto que *OpenStudio* permite importar documentos provenientes de estándares abiertos como IDF, gbXML y OSM, la realidad es que es común encontrar fallos de tipo arquitectónico y el intercambio de información entre los distintos *softwares* acostumbra a ser lento y complejo. Con frecuencia, la geometría de un programa, que *a priori* está en perfectas condiciones, al exportarla a otro presenta una geometría errónea, con intersecciones, huecos o paredes que no coinciden y requiriendo una elevada inversión de tiempo en labores de corrección manual por parte del usuario. Para ilustrar esta problemática, la Figura 2-4 muestra un esquema comparativo en el cual se contraponen este flujo de trabajo tradicional (gris), altamente propenso a errores de importación, frente a la alternativa de modelado simplificado (azul) actual.

Debido a la problemática expuesta, en muchos flujos de trabajo se opta por descartar la opción de importar el proyecto desde programas externos y se prefiere realizar el diseño completo sirviéndose de herramientas de modelado simplificado integradas, como es el caso de *FloorSpaceJS* en *OpenStudio*. Aunque mediante este tipo de herramientas resulta más complejo el diseño de elementos decorativos o pequeños detalles arquitectónicos, su uso garantiza una generación directa del modelo. Dado que estos elementos ornamentales carecen habitualmente de relevancia desde el punto de vista termodinámico,

esta simplificación no influye negativamente en el rigor de los resultados obtenidos en estudios de simulación energética.

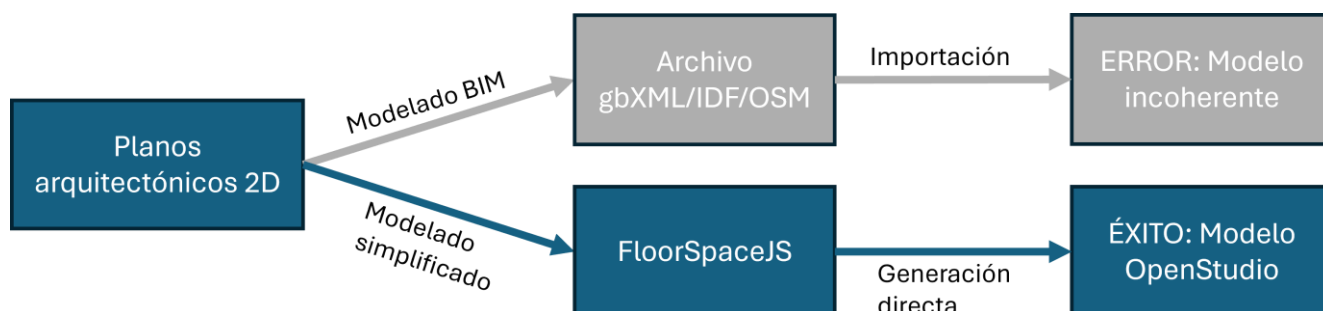


Figura 2-4 Diagrama comparativo de flujos de trabajo. Fuente: Elaboración propia

2.3 Calibración y validación experimental del modelo

La creación del modelo geométrico y la definición de las cargas teóricas no resulta suficiente para conseguir que un modelo térmico simulado se corresponda con la realidad. De hecho, en las primeras fases de cualquier simulación es habitual encontrar discrepancias significativas debido al grado de incertidumbre en los parámetros introducidos, tales como el perfil de uso real de la iluminación, la ocupación exacta de cada zona en cada instante o el comportamiento real de los sistemas de climatización.

Debido a esto, es necesario el uso de métodos iterativos de calibración para aproximarse de forma progresiva a un modelo que se asemeje lo máximo posible al comportamiento real de la infraestructura. Este proceso consiste en comparar los datos de salida del modelo simulado con los datos experimentales obtenidos mediante monitorización directa en el edificio. El objetivo final de esta metodología es alcanzar un Gemelo digital fiable, cuya respuesta termodinámica esté validada y se corresponda con un alto grado de precisión con el edificio real objeto de estudio.

2.3.1 Procedimientos de calibración: Manual o automático

El proceso de minimización de la diferencia entre los resultados reales y el modelo que se pretende simular no consiste en un único paso, sino que se trata de un proceso iterativo que puede realizarse de dos formas distintas [21].

Por una parte, existe la calibración automática, la cual se sirve de algoritmos matemáticos y, dependiendo de la capacidad del software, puede llegar a ajustar decenas de parámetros simultáneamente. El inconveniente de esta modalidad es que, en ocasiones, esas variaciones automáticas pueden no corresponderse con la realidad física del edificio, a pesar de obtener un resultado numérico más semejante al real. Por otra parte, se encuentra el procedimiento manual, en el cual el investigador varía los parámetros físicos uno por uno en base a su conocimiento y experiencia, siendo consciente en todo momento de la coherencia de los cambios que se están realizando sobre el modelo.

Debido a lo anteriormente expuesto y dado el carácter experimental de muchos proyectos de investigación, se suele optar por una combinación donde la supervisión manual sea la protagonista. De este modo, se asegura que las variables modificadas se encuentren en todo momento dentro de unos rangos lógicos, garantizando la obtención de un modelo coherente con la realidad y no supeditado a un simple ajuste matemático cuyo fin único sea reducir la diferencia numérica entre la realidad y la simulación.

2.3.2 Herramientas y software para la calibración de modelos

En la actualidad, el proceso de calibración de modelos energéticos dispone de una amplia gama de herramientas computacionales. La elección de una u otra depende fundamentalmente del grado de

automatización deseado y de la complejidad del motor de simulación empleado. De forma general, estas herramientas se pueden clasificar en cuatro grandes grupos:

- Entornos de optimización genéricos. Programas diseñados para ejecutarse en paralelo a motores de simulación externos (como *EnergyPlus* o TRNSYS) y ejecutar algoritmos de optimización. El ejemplo más destacado es *GenOpt* [22], el cual permite automatizar la variación de parámetros del modelo hasta encontrar aquellos que minimizan el error respecto a los datos reales.
- Gestores de simulación paramétrica. Las herramientas orientadas a realizar simulaciones paramétricas, como *EnergyPlus* [23], están orientadas a gestionar grandes volúmenes de simulaciones en paralelo. Su función principal es permitir al usuario explorar múltiples combinaciones de variables de forma organizada, facilitando la identificación de las soluciones que mejor se ajustan al modelo que se desea diseñar.
- Lenguajes de programación y scripts personalizados. El uso de lenguajes como *Python* [24] o MATLAB representa la tendencia más avanzada en la investigación y hacia donde apuntan todas las líneas futuras de este campo. Mediante librerías específicas que permiten interactuar con los archivos de simulación, el usuario puede programar algoritmos a medida, integrando técnicas de análisis estadístico y de sensibilidad para lograr un control total sobre el proceso de optimización.

2.3.3 La brecha de rendimiento energético: “Performance gap”

En el ámbito de la ingeniería energética existe prácticamente en todos los casos una discrepancia entre el consumo teórico simulado y el real, esa diferencia es lo que se define como “Performance gap”. Dependiendo del ajuste que se haya llevado a cabo esta divergencia puede llegar a ser bastante considerable. Esto se debe principalmente a la idealización de las condiciones por parte del programa en cuanto a materiales, ocupación o cargas entre otros. A pesar de poder estrechar esa brecha bastante durante el proceso de calibración, poder eliminarla resulta prácticamente imposible porque nunca se podrá realizar una réplica exacta de la realidad al 100 %, y por tanto siempre se debe tener en cuenta la existencia de esa diferencia.

Un caso mediático que ilustra a la perfección este concepto es el del rascacielos *Bank of America Tower*, situado en pleno centro de Nueva York. Este edificio contaba en sus inicios con la máxima certificación del sistema de evaluación para edificaciones sostenibles LEED, en base a sus resultados teóricos (LEED Platinum como se aprecia en la Figura 2-5). Esto situaba al famoso edificio como un referente medioambiental a nivel mundial. Sin embargo, tras su inauguración, los informes relevaban que su consumo real era muy superior al previsto teóricamente, llegando a superar incluso a edificios bastante más antiguos (y *a priori* menos eficientes) como el mítico *Empire State*. Se concluye, por tanto, que la brecha de rendimiento energético afecta a todo tipo de infraestructuras a cualquier nivel y es un aspecto muy importante en todas las fases del edificio.



Figura 2-5 Niveles de certificación LEED. Fuente: U.S. Green Building Council (USGBC)

2.3.4 Metodología de calibración: ASHRAE Guideline 14

Con el fin de garantizar unos resultados fiables y delimitar el grado de incertidumbre de estos, resulta fundamental seguir los criterios establecidos en la normativa *ASHRAE Guideline 14: Measurement of Energy, Demand, and Water Savings*. Este documento es utilizado internacionalmente como una guía técnica para la calibración de modelos energéticos, fijando los umbrales de error máximos admisibles de forma cuantitativa para validar los datos obtenidos mediante simulación respecto a los reales medidos experimentalmente. De este modo, se asegura que el modelo simulado tiene un rango de error asumible al encontrarse dentro de los límites estandarizados.

La normativa permite realizar la validación en dos escalas temporales principales: mensual u horaria. En aquellos casos donde la frecuencia de muestreo de la monitorización permite obtener datos experimentales con una alta resolución, se opta habitualmente por la calibración horaria. Esta metodología es considerablemente más precisa que la mensual al exigir un mayor nivel de detalle, permitiendo capturar mejor el comportamiento del edificio.

Con el objetivo de asegurar la validez de un modelo calibrado, la normativa *ASHRAE Guideline 14* establece unos valores límite para acotar el rango en el cual deben encontrarse los parámetros estadísticos obtenidos. Estos límites varían dependiendo de la frecuencia temporal de muestreo; sin embargo, para modelos con resolución horaria, se deben cumplir los criterios de tolerancia que se presentan en la Tabla 2-1.

Índice estadístico	Calibración mensual	Calibración horaria
NMBE	5 %	10 %
CV (RMSE)	15 %	30 %

Tabla 2-1- Límites máximos admisibles para la validación de modelos. Fuente: Elaboración propia

De acuerdo con los valores reflejados en la tabla anterior, la normativa *ASHRAE Guideline 14* estipula que para dar por calibrado un modelo es obligatorio realizar la comprobación matemática de, al menos, uno de los dos índices estadísticos principales.

El primero de ellos es el NMBE (por sus siglas en inglés: “*Normalized Mean Bias Error*”), el cual se calcula según la ecuación 2.2. Este índice determina el error promedio total del modelo, siendo su función principal comprobar si la tendencia de la simulación es a proporcionar resultados sistemáticamente superiores o inferiores a los datos reales medidos.

$$NMBE = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)}{(n - 1) \cdot \bar{y}} \times 100 \quad (2.2)$$

El segundo parámetro evaluado es el CV(RMSE) (Coeficiente de Variación de la Raíz del Error Cuadrático Medio), obtenido mediante la ecuación 2.3. Este coeficiente mide la dispersión de los datos obtenidos, asegurando que el perfil de la curva simulada se asemeje lo máximo posible a la real, y penalizando aquellas desviaciones horarias que ocurren en los picos y valles de esta.

$$CV(RMSE) = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n-1}}}{\bar{y}} \times 100 \quad (2.3)$$

Donde:

y_i : valor empírico medido experimentalmente en el edificio durante el intervalo de tiempo i .

$\hat{y}_i$: valor simulado por el modelo termodinámico para ese mismo intervalo de tiempo i .

n : número total de mediciones analizadas durante el periodo de estudio.

$\bar{y}$: media aritmética de todos los valores empíricos medidos (y_i) durante el periodo completo de calibración.

n : número de intervalos horarios analizados

2.4 Monitorización higrotérmica y obtención de datos reales

Hoy en día, para que la calibración de un modelo energético sea precisa, es obligatorio contar con datos reales del edificio. Por esta razón, la monitorización de las condiciones interiores se ha convertido en una parte fundamental de cualquier estudio de simulación. Este proceso consiste en instalar una red de sensores y equipos de registro para ver cómo cambian las variables de confort dentro de las zonas que se quieren estudiar a lo largo del tiempo.

En lo que se refiere al estado higrotérmico, los datos más importantes que hay que recopilar son la temperatura y la humedad relativa del aire interior. Para que luego, se puedan comparar estos datos con los que simula el programa informático seleccionado. Es de vital importancia que los sensores sean de buena calidad y que estén configurados para guardar la información cada hora o en el intervalo de tiempo deseado de acuerdo con las necesidades del proyecto. Asimismo, se debe facilitar que los datos reales tengan la misma frecuencia que los resultados generados por *EnergyPlus*, facilitando así el análisis posterior sin necesidad de realizar un posprocesado de los datos recopilados.

Un punto muy importante en este tipo de trabajos es decidir la ubicación exacta de los sensores. Si se colocan incorrectamente, los datos no servirán porque estarán falseados. Algunos criterios que se deben cumplir son por ejemplo intentar que no les dé el sol directamente o que no estén en medio de una corriente de aire de una ventana.

Gracias a los nuevos sistemas de registro (*dataloggers*) y a la tecnología inalámbrica, ahora estas mediciones se pueden hacer de forma automática y sin tener que realizar instalaciones eléctricas por todo el edificio. Esto es muy útil sobre todo cuando se trabaja con edificios que ya tienen bastantes años, porque permiten obtener todos los datos necesarios sin tener que realizar obras. Al final, el objetivo es obtener el perfil térmico real del edificio para poder ajustar después el modelo informático y que los resultados coincidan, pero todo sin perjudicar al estado del edificio actual ni al personal que trabaje en el mismo.

3 METODOLOGÍA Y DESARROLLO DEL MODELO

En este capítulo se detalla de forma secuencial la metodología llevada a cabo para la construcción, parametrización y optimización del modelo energético del edificio del CUD-ENM, cuyo esquema general se resume en el diagrama de flujo de la Figura 3-1. El flujo de trabajo comienza con la obtención de datos experimentales, tanto climáticos (por parte de la estación meteorológica “Porto de Marín”) como de monitorización de las condiciones internas de cada zona. A continuación, se procede a la traslación de estas variables al entorno virtual mediante el modelado geométrico. En este se realiza la definición de la envolvente, las cargas internas y los sistemas de climatización. Posteriormente, se establecen las bases del proceso de calibración paramétrica, sentando los fundamentos teóricos y computacionales necesarios para ajustar el comportamiento termodinámico del modelo virtual a la realidad monitorizada. Finalmente, se proponen una serie de mejoras de ahorro energético tomando como base los resultados obtenidos en la calibración del modelo.

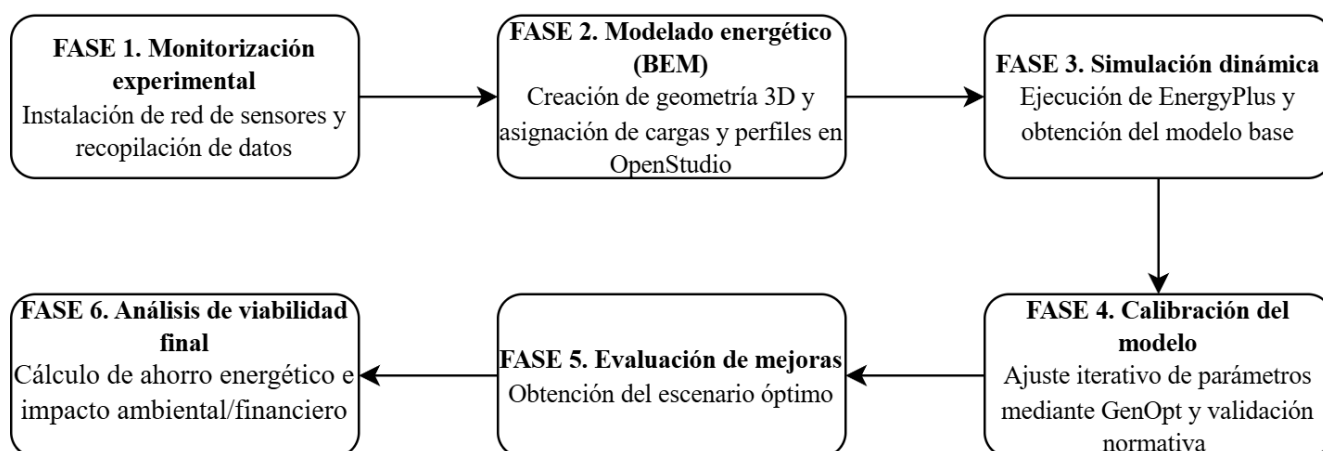


Figura 3-1 Diagrama de flujo de la metodología del proyecto. Fuente: Elaboración propia.

3.1 Caracterización del edificio y su entorno

El primer paso antes de comenzar a realizar simulaciones y calibrar el modelo es situar el mismo geográficamente en el mapa, puesto que los resultados dependerán directamente de las características ambientales del entorno en el que esté situado.

3.1.1 Localización geográfica

El edificio objeto de modelado se encuentra en el interior del recinto perteneciente a la Escuela Naval Militar (Marín, Pontevedra), destacado en la Figura 3-2. Esta ubicación, a orillas de la Ría de Pontevedra impone unas elevadas exigencias termodinámicas para cualquier infraestructura construida en la zona.

Con el objeto de dotar al *software* de *OpenStudio* de la información necesaria para la realización de los cálculos pertinentes, se han introducido las siguientes coordenadas geográficas: latitud: 42,39° N y longitud: 8,70° W. Asimismo, ha sido necesario definir el huso horario de la zona, el cual durante los meses de la fase de toma de datos (21 de enero – 5 de marzo) es GMT +1.

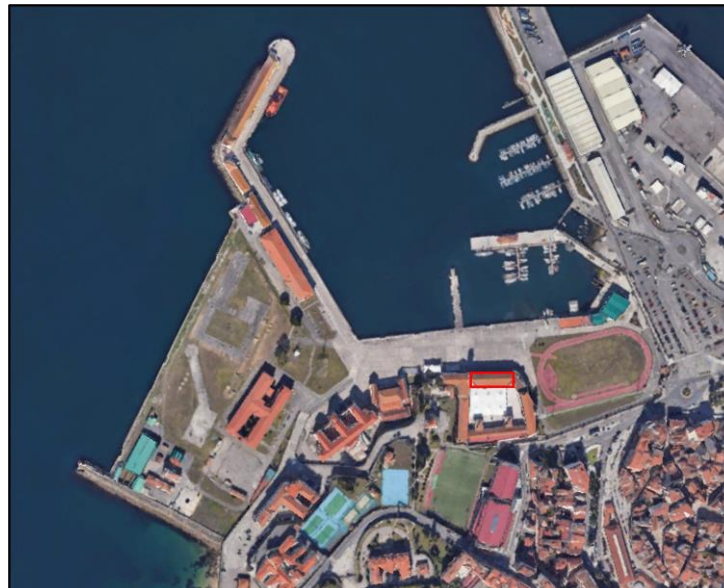


Figura 3-2 Vista aérea de la Escuela Naval Militar. Fuente: Google Earth

3.1.2 Condiciones climáticas del entorno

El Documento Básico de Ahorro de Energía (DB-HE) [12] establece que la ciudad de Pontevedra se encuentra situada en la zona climática C1 en base a los datos históricos de la zona. Esta denominación tiene un doble significado: por una parte, la letra C indica la presencia de inviernos severos con una gran demanda de calefacción durante esos meses; en cuanto al 1, este refleja veranos suaves, con lo que el sobrecalentamiento en verano no es el principal problema de la zona, dando prioridad por tanto a los sistemas de calefacción frente a los de refrigeración.

Sin embargo, esta división descrita por zonas climáticas no tiene un estricto cumplimiento en la práctica, puesto que presta especial atención a la temperatura, pero apenas tiene en consideración otros factores influyentes a nivel termodinámico. Las variables con mayor incidencia real sobre el edificio del CUD-ENM son las siguientes:

- Inercia térmica marina. La proximidad a la Ría de Pontevedra actúa como un regulador de la temperatura en la zona, mitigando las variaciones bruscas de la misma, y, en consecuencia, disminuyendo la amplitud térmica diaria respecto a otras zonas del interior de Galicia. Esto se traduce, por tanto, en una mayor estabilidad en las condiciones ambientales de la zona.

- Humedad relativa. Es un factor clave en cualquier costa, pero especialmente en la gallega. Los registros históricos de Marín evidencian una elevada humedad relativa sostenida durante el año, intensificándose este fenómeno durante los meses de invierno con un promedio de entre el 75 % y el 85 %. Esto tiene una influencia directa en el comportamiento termodinámico del edificio, puesto que el aire exterior tiene una mayor entalpía que en climas secos. Por tanto, mediante el sistema de calefacción no se debe calentar únicamente el aire, sino también ese vapor presente en el ambiente, provocando así un mayor gasto energético para alcanzar una misma temperatura en un ambiente húmedo respecto de un ambiente seco. Además, este dato actúa como un multiplicador de la sensación térmica, provocando una mayor sensación de bochorno durante el periodo estival y agudizando la sensación de malestar debida al frío durante el periodo invernal.
- Exposición eólica. La fachada norte está constantemente afectada por vientos propios de la costa y por la lluvia, especialmente durante los meses de invierno y otoño. La ausencia de barreras físicas en esta fachada expone al edificio a las fuertes rachas de viento predominantes en la costa gallega durante el invierno debidas principalmente a las borrascas provenientes del Océano Atlántico.
- Temperatura del terreno. Un factor crítico del entorno que interactúa directamente con la infraestructura es la temperatura del subsuelo situado bajo la solera de hormigón de la planta baja. En la parametrización del modelo se ha analizado esta variable, concluyendo que el considerable espesor y la alta masa térmica del suelo del edificio del CUD-ENM amortiguan fuertemente las variaciones térmicas exteriores. Además, dado que las temperaturas reales del suelo en esta ubicación apenas difieren de los valores que el motor de simulación (*OpenStudio*) asume por defecto para esta zona y época del año, se ha optado por mantener la configuración propuesta por el propio programa.

Por otra parte, atendiendo a la climatología, cabe destacar que Marín presenta un clima de tipo oceánico con abundantes precipitaciones (superiores a 1.500 mm anuales) y temperaturas medias. Sin embargo, tienen especial interés los meses de enero, febrero y marzo, por tratarse del periodo exacto en el que se desarrolló la campaña de monitorización. Durante este trimestre invernal, la envolvente del edificio se enfrenta a las condiciones más desfavorables del año: temperaturas medias en torno a 9 °C-11 °C (con mínimas de 5 °C) y una alta concentración de frentes atlánticos [25]. Esta exigente casuística maximiza las pérdidas térmicas del edificio y su demanda energética se enfrenta a picos diarios de consumo, especialmente a primera hora de la mañana.

3.1.3 Influencia del entorno urbano en la geometría solar

El edificio se ve influenciado tanto por el entorno que lo rodea como por sí mismo en cuanto al análisis de los efectos solares. Por una parte, en cuanto a la influencia de las edificaciones próximas, esta es probablemente la menos significativa puesto que solo afectarían en la zona sur y durante las primeras horas del día. Además, su impacto no supone una penalización térmica significativa dado que la altura de los edificios del patio de aulas no es reseñable con respecto al edificio del CUD-ENM y no arrojan sombras apreciables durante el periodo de tiempo que el edificio recibe el impacto de los rayos solares directos. Por otra parte, en cuanto al autosombreado (en inglés *self-shading*) provocado por el propio edificio, se encuentra una particularidad en la cara sur. La primera planta sobresale en voladizo 2 metros con respecto a la planta baja (véase en la izquierda de la Figura 3-3), siendo los soportales del patio de aulas y ofreciendo sombra a la planta baja. Por ello, la planta inferior no recibe luz solar directa en ningún momento del día, provocando una reducción drástica de las ganancias solares en esta con respecto al nivel superior.



Figura 3-3 Patio de aulas de la Escuela Naval Militar. Fuente: Ministerio de Defensa

3.1.4 Caracterización arquitectónica y funcional del edificio CUD-ENM

Una vez analizados los condicionantes externos, se debe contextualizar la situación del edificio CUD-ENM, dadas sus particulares características. El edificio se integra en el conjunto del “Patio de Aulas D. Álvaro de Bazán” de la Escuela Naval Militar. Aunque su estructura original data de la década de 1940, la edificación actual es fruto de una reforma llevada a cabo entre el año 2007 y 2010. Esta intervención no fue únicamente estética, sino que supuso una remodelación profunda para adaptar los espacios interiores a las exigencias de habitabilidad y eficiencia energética marcadas por la nueva normativa y el nuevo uso que se le daría al edificio a partir del curso 2010/2011.

Desde un punto de vista global, la infraestructura en su conjunto presenta una geometría rectangular con una longitud de 50 metros de largo y 15 metros de ancho. La configuración espacial se puede dividir en sus dos niveles principales:

- Planta baja. Está destinada principalmente a la actividad docente y despachos de distintos departamentos. Cuenta con una superficie útil de 624 m² y tiene una altura libre de 5,45m. En la zona norte se sitúan los despachos impares (del 101 al 113), mientras que en la zona sur se ubican los despachos pares y el seminario 2 (aula docente). Cada uno de los despachos tiene una superficie media de 28,2 m² y están diseñados para poder trabajar 2 personas.
- Planta primera. Esta planta presenta una altura libre de 4,52 m y una superficie útil de 685,7 m². Esta tiene, aparte del carácter docente, un carácter administrativo, albergando la dirección del centro, secretaría y el despacho de asuntos económicos. Paralelamente a la planta baja, los despachos impares tienen orientación norte y los pares orientación sur.

En total, la infraestructura cuenta con una superficie construida de 1.309,7 m², constituyendo una infraestructura de gran inercia térmica en su conjunto.

Por último, el comportamiento térmico del edificio está supeditado a un sistema de climatización basado en una bomba de calor situada en el exterior, la cual se encarga de dar servicio a una red de unidades de ventilación (*fancoils*) instaladas en el falso techo de las estancias. Este sistema permite controlar la temperatura de las salas tanto en invierno como en verano.

Por otro lado, para cumplir con las exigencias de calidad del aire que marca la normativa, el edificio dispone de un sistema de renovación del mismo, que introduce aire limpio del exterior de forma constante. Todo este conjunto está diseñado para mantener las condiciones de temperatura y humedad dentro de los parámetros de confort establecidos para cada zona térmica, garantizando así la correcta habitabilidad de los diferentes espacios.

3.2 Campaña de monitorización y caracterización climática

Para garantizar la precisión en la calibración de un modelo energético, es necesario disponer de datos experimentales del edificio bajo condiciones operativas reales. Por este motivo, la monitorización de las condiciones interiores constituye una fase fundamental en el presente estudio. Este proceso consiste en el despliegue de una red de sensores y sistemas de adquisición de datos orientada a registrar la evolución temporal de las variables termodinámicas en las distintas zonas térmicas analizadas, tal y como se ilustra en el flujo de trabajo de la Figura 3-4.

En lo relativo al estado higrotérmico, las magnitudes prioritarias a monitorizar son la temperatura de bulbo seco y la humedad relativa del aire interior. El registro continuo de estos parámetros permite su posterior contraste con los resultados arrojados por el motor de simulación. Para ello, resulta de vital importancia asegurar la fiabilidad de los instrumentos y establecer una frecuencia de muestreo acorde al grado de precisión que se desea obtener. En este caso se realiza una medición cada 10 minutos (a pesar de que después se realiza la media horaria para la comparación con la simulada), coincidente con el paso de simulación (*timestep*) empleado en *EnergyPlus*. De este modo, se garantiza la compatibilidad de los datos experimentales y virtuales, agilizando el análisis analítico posterior sin necesidad de aplicar un posprocesado complejo.



Figura 3-4 Esquema del flujo de trabajo para la monitorización y adquisición de datos térmicos.
Fuente: Elaboración propia

Un factor crítico en el diseño de la campaña de medición es la ubicación espacial de los sensores. Una disposición inadecuada introduciría sesgos en las lecturas, invalidando el proceso de calibración. Por consiguiente, los sensores se han instalado, tal y como ya ha sido explicado previamente, evitando la radiación solar directa, las corrientes de aire procedentes de la fenestración y la proximidad a cargas internas o fuentes de calor (como equipos informáticos), asegurando así la lectura de una temperatura del aire acorde a la realidad.

Gracias a la implantación de registradores de datos (*dataloggers*) de última generación y al uso de protocolos de transmisión inalámbrica, la monitorización se ha podido llevar a cabo de forma automatizada y mínimamente invasiva. En definitiva, el propósito de este despliegue es capturar el perfil térmico real del edificio para fundamentar el ajuste paramétrico del Gemelo digital que se desarrollará en fases posteriores.

3.2.1 Selección de parámetros ambientales monitorizados

El protocolo de adquisición de datos se ha concebido y diseñado de forma estratégica con el fin de registrar las magnitudes termodinámicas que definen el estado del aire en el interior del edificio. Para lograr una caracterización precisa de este entorno, la campaña de medición se ha centrado en la monitorización continua de dos variables fundamentales: la temperatura del aire y la humedad relativa.

Cada una de estas variables desempeña una función específica y complementaria dentro del marco del proyecto. Por un lado, la temperatura asume un papel fundamental a la hora de ejecutar la calibración matemática del modelo virtual, siendo el indicador principal sobre el que iteran los algoritmos de optimización. Por otro lado, la humedad relativa, analizada en conjunto con la temperatura, resulta un

factor indispensable para poder comprobar los índices de bienestar higrotérmico en el interior de los despachos.

Por último, analizar la temperatura y la humedad simultáneamente permite entender cómo reacciona realmente el edificio ante el clima exterior. Esto es fundamental para evaluar el efecto de la inercia térmica, es decir, cómo los materiales de la fachada acumulan y liberan calor. Gracias a esta doble medición, se pueden detectar problemas reales de funcionamiento, como que el edificio retenga demasiado calor durante la noche o que sufra caídas bruscas de temperatura justo en las horas en las que más se necesita la calefacción.

3.2.2 Arquitectura y distribución del sistema de adquisición de datos

La medición de las variables se ha realizado mediante un sistema interconectado de sensores de dos tecnologías diferentes, uno primario y otro secundario, este último como sistema de redundancia ante eventuales fallos de hardware o pérdida de señal.

El principal instrumento de medición es una red de sensores DHT22 (de aquí en adelante serán denominados red primaria) conectados a placas Raspberry Pi (instaladas como se puede ver en la Figura 3-5), distribuida entre las dos plantas del edificio del CUD-ENM (4 en cada planta, situadas a su vez 2 en la cara norte y 2 en la cara sur) de forma estratégica, con el fin de conseguir una base de datos lo más completa posible sin dejar zonas “ciegas”. Estos sistemas de adquisición de datos tienen insertado un código el cual les ordena ejecutar una medición de temperatura y humedad cada 10 minutos y almacenarla en una tarjeta de memoria SD. La posibilidad de disponer de estos dispositivos para realizar la medición es clave, ya que tienen una alta precisión y permiten trabajar con una alta frecuencia de muestreo. Esto es fundamental para garantizar que los resultados finales reflejan con fidelidad la respuesta dinámica del edificio ante los cambios en su interior/exterior.

No obstante, a pesar de la alta precisión y fiabilidad ofrecida por parte de los sensores primarios empleados, se ha decidido disponer de una segunda herramienta para tener una base de datos de respaldo en caso de un fallo fatal del sistema principal. Dada la criticidad temporal de la campaña de medición, esta redundancia garantiza la continuidad e integridad de los datos ante cualquier imprevisto. El segundo instrumento escogido han 6 dispositivos *IoT* comerciales (de aquí en adelante serán denominados red secundaria) que se integran en el ecosistema *SmartLife*, los cuales obtienen los registros relativos a temperatura y humedad relativa con una frecuencia horaria. La ventaja de este segundo tipo de sistemas es que no dependen de la red eléctrica, sino que funcionan mediante una batería de 1,5 V ; de este modo, en caso de interrupción del suministro eléctrico, la toma de datos no sufriría ningún vacío, garantizando la continuidad de la campaña.



Figura 3-5 Sensor 8 de la red primaria conectado durante la fase de medición. Fuente: Elaboración propia

El uso de redes de sensores relativamente sencillas, basadas en plataformas como DHT22 o dispositivos *IoT* comerciales, ha demostrado ser una metodología válida y precisa para la monitorización continua del confort térmico en interiores [26].

Para clarificar el flujo de la información monitorizada mediante estos dispositivos, la Figura 3-6 esquematiza la arquitectura de red empleada, abarcando desde la medición de las variables térmicas hasta su almacenamiento local en la tarjeta microSD (red primaria) y su posterior extracción para el análisis mediante el programa informático *WinSCP*.

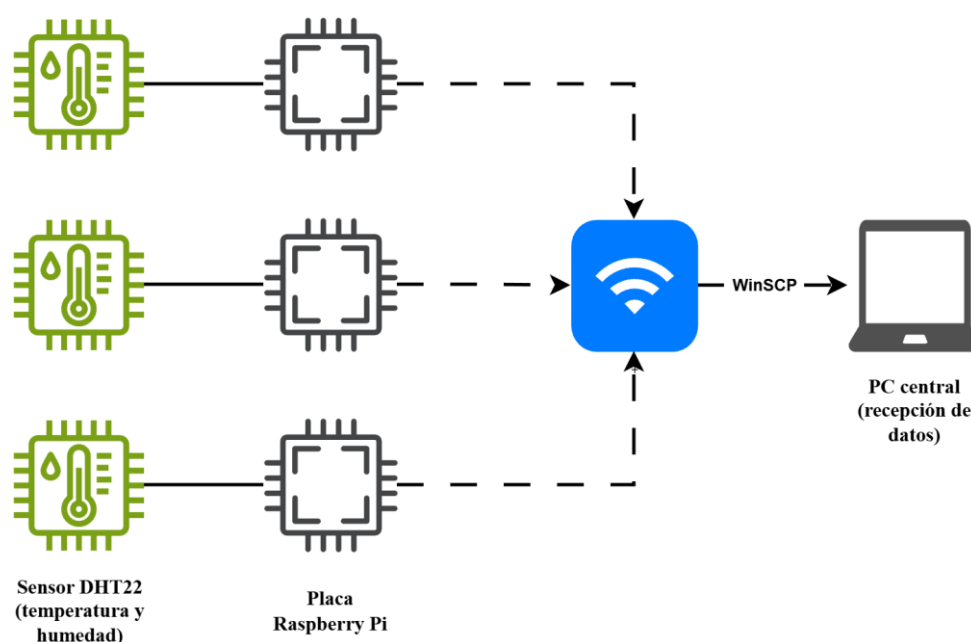


Figura 3-6 Arquitectura de bloques del sistema de monitorización primario. Fuente: Elaboración propia

3.2.3 Distribución estratégica de los sensores

La distribución de los sensores en las estancias del edificio del CUD-ENM no responde a un criterio aleatorio, sino que se han situado de forma estratégica para obtener una representación lo más fiel posible de la situación termodinámica de la infraestructura. Se han escogido un total de 8 estancias, 4 en cada planta, las cuales son en su mayoría despachos (con diversos niveles de ocupación) aunque también se encuentra la dirección de asuntos económicos entre las zonas de estudio seleccionadas. Un factor determinante en el momento de seleccionar los despachos adecuados para tomar las medidas es la orientación geográfica de los mismos, asegurando que haya el mayor balance posible entre ambas fachadas principales. La cara norte del edificio se caracteriza por estar afectada de forma directa por las inclemencias meteorológicas de la Ría de Pontevedra, presentando una alta exposición a la acción del viento, la humedad y el aerosol marino. En cambio, la cara sur del edificio está orientada hacia el “Patio de aulas D. Álvaro de Bazán” de la Escuela Naval Militar, estando por tanto sujeta a una mayor protección frente a los efectos meteorológicos (véase la Figura 3-3).

Siguiendo la estrategia de distribución explicada anteriormente y teniendo como base la redundancia en cuanto a la toma de datos, se han situado los sensores de la red primaria en 8 estancias, de los cuales 6 de ellos disponen, de forma complementaria, de otro dispositivo auxiliar perteneciente a la red secundaria. La situación exacta de cada uno de los aparatos en el interior del edificio es la mostrada en la Figura 3-7 y la Figura 3-8 sobre los planos de la planta del edificio. Se ha empleado un código de colores para identificar los instrumentos situados en cada estancia: las zonas marcadas en rojo únicamente disponen de medidores de la red primaria, mientras que aquellos marcados en naranja cuentan tanto con sensores de la red primaria como secundaria.

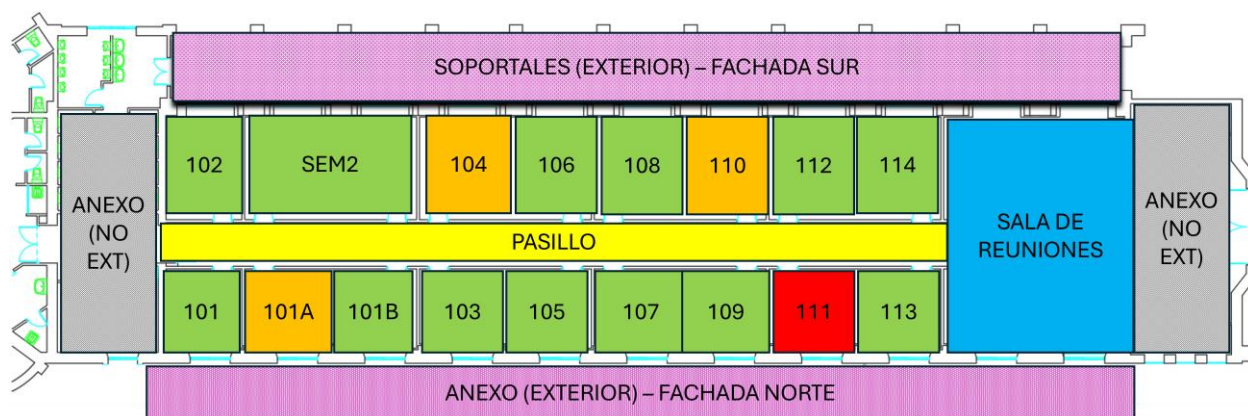


Figura 3-7 Ubicación de los puntos de monitorización en la planta baja. Fuente: Elaboración propia

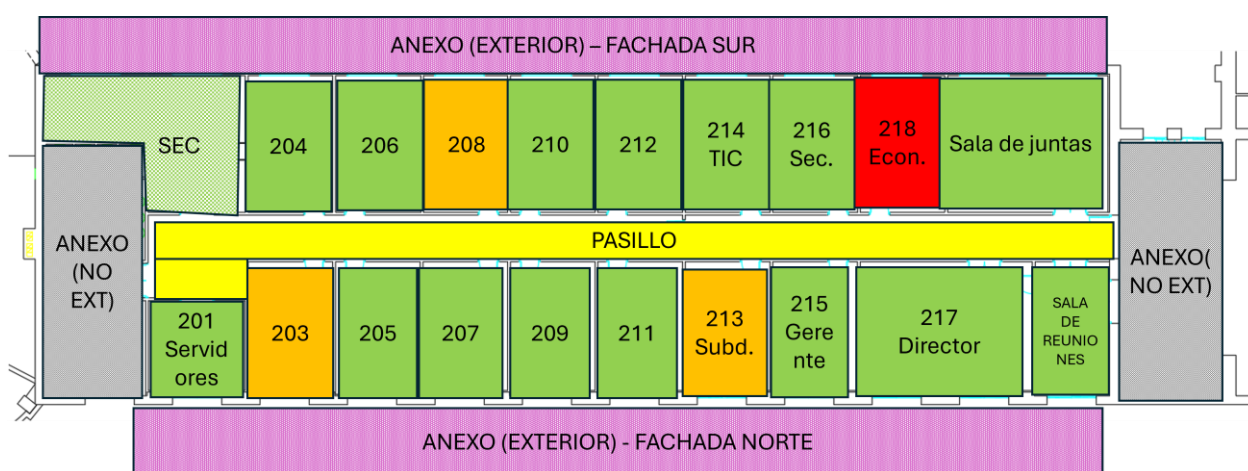


Figura 3-8 Ubicación de los puntos de monitorización en la planta alta. Fuente: Elaboración propia

3.2.4 Especificaciones técnicas de los sensores

El funcionamiento de los sensores de la red primaria (sensor DHT22) es totalmente autónomo una vez se le introduce el código correspondiente, almacenando los datos de forma continua hasta que se desconecta o se borran en la base de datos. Cada uno de los sensores ha sido configurado para realizar una medición cada 10 minutos, la cual es una frecuencia de muestreo alta y completamente acorde a la calidad de validación de modelo que se pretende obtener, puesto que se estarán obteniendo muestras a lo largo de un mes y medio. En cada medición, el sistema activa el sensor, toma los valores de temperatura y humedad, y los almacena automáticamente en la tarjeta SD insertada en el equipo. De este modo, se asegura el almacenamiento de los datos independientemente de la conexión a la red.

Por otra parte, en cuanto a los sensores de la red secundaria (modelo TH01), cabe destacar que se trata de dispositivos integrados en el paradigma de Internet de las Cosas. En la actualidad, constituyen una herramienta ampliamente utilizada en entornos residenciales para la monitorización y automatización de lo que comúnmente se denomina “Hogar inteligente” o “*Smart home*”. Estos dispositivos almacenan los datos obtenidos en la nube (*Cloud computing*) en lugar de en una tarjeta de memoria física, por tanto, necesitan de conexión a la red para transmitir los valores medidos. Otra gran diferencia, es que su intervalo de medición es cada 60 minutos (o superior según se configure) en lugar de cada 10 como lo hacían los sensores de la red primaria, lo cual sigue siendo una frecuencia de medición asumible para obtener un resultado fiable, puesto que la fase de medición dura un mes y medio. En la Tabla 3-1 que se presenta a continuación se pueden apreciar las principales diferencias entre ambos sensores:

Característica	Red primaria (DHT22)	Red secundaria (TH01)
Variables registradas	Temp. aire / Humedad relativa	Temp. aire / Humedad relativa
Frecuencia de muestreo	10 minutos	1 hora
Almacenamiento	Local (tarjeta SD)	Remoto
Alimentación	Corriente eléctrica	Batería
Conectividad	Wi-Fi	Wi-Fi

Tabla 3-1. Cuadro comparativo de las especificaciones técnicas de los sistemas de adquisición de datos.
Fuente: Elaboración propia

3.2.5 Conectividad de los sensores y protocolo de extracción de datos

En la fase de obtención de datos del edificio del CUD-ENM, el proceso de medición reviste tanta importancia como el de su posterior transmisión, garantizando así un flujo de información robusto y fiable, base fundamental para la validación del modelo térmico. Ante la posibilidad de caídas en la red Wi-Fi, y como ya se ha expuesto previamente, cada sistema de monitorización dispone de almacenamiento local mediante tarjeta SD o remoto según corresponda. Los datos registrados se sincronizan con la red únicamente cuando la conexión se encuentra disponible, evitando así pérdidas de información. Debido a la naturaleza de este proyecto, se ha priorizado la continuidad y el almacenamiento seguro de los datos frente a su transmisión inmediata. Por consiguiente, el tratamiento de las mediciones se estructura en las tres fases que se detallan a continuación:

Estrategia de almacenamiento y resistencia a fallos de conectividad. Cada uno de los sensores de la red primaria han sido configurados para actuar de forma totalmente independiente, sin depender de una red común para su realizar las mediciones. Tras realizar la medición de temperatura y humedad, cada 10 minutos, esta se almacena en la tarjeta SD del aparato de forma automática con el siguiente formato *Timestamp, Temperature, Humidity* (véase la Tabla 3-2). Mediante este método de almacenamiento, el sistema cuenta con una gran resistencia frente a interrupciones en la red Wi-Fi al no depender constantemente de la misma, y esto es un aspecto muy positivo en un entorno docente como lo es el edificio del CUD-ENM, que acostumbra a tener una alta demanda de conectividad por parte de los usuarios y no es descartable sufrir interrupciones en las horas pico de uso.

Interfaz de acceso a la base de datos. El procedimiento de extracción de datos no requiere de un acceso físico al aparato, sino que se ha optado por un acceso mediante red. Los sensores actúan como FTP pasivos (con el fin de evitar que los cortafuegos de la red eviten la transferencia de archivos), y se puede acceder a ellos mediante cualquier dispositivo conectado a la misma red que los sensores y disponiendo de alguna de las diversas aplicaciones que permiten el acceso a este tipo de archivos. En este caso se ha hecho uso de *WinSCP*, en cuya pantalla de inicio se deben añadir cada uno de los dispositivos de la red primaria, introduciendo la siguiente información de cada uno: *Display name, Host name/IP, Port, User name y Password*. Una vez han sido agregados, se accede a cada uno de ellos y se pueden ver todas las carpetas en las que se almacenan múltiples archivos relacionados con la medición de temperatura y humedad, pero siguiendo el directorio adecuado se llega a un archivo tipo *.csv*, que es el que se muestra en la Tabla 3-2 (siendo *nan* que no se ha registrado medición), y es el que realmente contiene la información útil para este TFG. El resto de las carpetas contienen posibles fallos del sensor o el propio *script* entre otros.

Extracción simultánea y adaptación para la simulación. La transferencia de datos de los archivos .csv desde el instrumento hasta el equipo informático en el que se va a realizar la validación se puede llevar a cabo de forma rápida, permitiendo acumular un conjunto de paquetes que contienen información de varias semanas y exportarlos de forma instantánea. Una vez extraídos, los archivos son sometidos a un proceso de filtración para asegurar que no hay ningún espacio de tiempo sin medición por el medio o algún error de cualquier otro tipo. Finalmente se genera el archivo con las condiciones ambientales experimentales, el cual será la base para comparar con el simulado y a partir de ahí comenzar el proceso de calibración del modelo.

Timestamp	Temperature (°C)	Humidity (%)
28/01/2026 10:10	nan	nan
28/01/2026 10:20	22,5	47,9
28/01/2026 10:30	22,4	48,1
28/01/2026 10:40	22,7	48,0

Tabla 3-2. Ejemplo de estructura del archivo .csv generado por el sensor. Fuente: Elaboración propia

3.2.6 Evaluación de la incertidumbre instrumental y propagación del error

La calibración de los modelos energéticos requiere una integración de datos empíricos recopilados, que llevan consigo un error asociado imposibilitando así un resultado con un 0 % de error [27]. En el presente estudio, los datos ambientales registrados (temperatura y humedad) poseen un margen de error asociado a los sensores utilizados: principal y secundario. Ignorar esta incertidumbre instrumental e inferir los datos como absolutos introduciría un sesgo analítico al evaluar los criterios establecidos por la ASHRAE: NMBE y CV(RMSE) [28].

Caracterización del error según el tipo de sistema de adquisición de datos utilizado

- Primario (DHT22). Constituyen la fuente principal de obtención de datos ambientales en el proyecto. Estos instrumentos tienen integrados los sensores digitales de tipo estándar DHT22, que proporcionan una alta resolución, logrando acortar su error sistemático a márgenes muy estrechos (en torno al $\pm 0,5$ °C en temperatura y $\pm 2,0$ % en humedad relativa) [29].
- Secundario (TH01). Actúan como una red de medición redundante. Se tratan de dispositivos habitualmente utilizados en el ámbito de la domótica durante largos periodos de tiempo, priorizando por tanto en su diseño el bajo consumo de batería y facilitando la conectividad inalámbrica (IoT). Debido a la integración de la tecnología inalámbrica, se pierde parte de la precisión (en torno al $\pm 1,0$ °C en temperatura y $\pm 5,0$ % en humedad relativa) y frecuencia de muestreo (máximo una medición por hora).

A continuación, en la Tabla 3-3 se presenta el cuadro resumen de las tolerancias asumidas en la fase de medición en función del sensor, según las fichas técnicas de cada fabricante [30] [31]:

Sistema de medición	Variable	Resolución	Error sistemático ($\pm$)	Rango operativo fiable
Primario	Temperatura	0,1 °C	0,5 °C	-40 °C - 80 °C
	Humedad relativa	0,1 %	2,0 %	0 % - 100 %
Secundario	Temperatura	0,1 °C	1,0 °C	-20 °C - 60 °C
	Humedad relativa	1,0 %	5,0 %	10 % - 90 %

Tabla 3-3. Especificaciones metrológicas de los sensores. Fuente: Elaboración propia

Por todo lo anteriormente expuesto se ha decidido dar prioridad y establecer como fuente primaria los sensores DHT22. Garantizando sumar el menor error posible a cada medición y que el resultado final sea lo más semejante a la realidad posible (para más información sobre los equipos utilizados consultar el Anexo III: Fichas técnicas de los *instrumentos* de medición).

3.2.7 Adquisición y procesamiento de datos meteorológicos brutos

La fuente primaria de registro ha sido la estación meteorológica “Porto de Marín”, ubicada a 400 metros del edificio del CUD-ENM. Sin embargo, la toma de datos por parte de la estación es diezminutal, lo cual no es compatible con *Energyplus*, que trabaja en franjas horarias con archivos EPW. Este conflicto entre ambos programas obligó a hacer uso de *Microsoft Excel* para reducir los 6 valores horarios a un único dato para ese mismo intervalo temporal.

Para configurar la base de datos, fue necesario llevar a cabo las siguientes acciones:

- Integración temporal. En primer lugar, se hizo uso de tablas dinámicas para reducir el número de datos (pasar de diezminutal a horario), aplicando un promedio. En cuanto a la radiación solar, esta fue la única que se procesó de diferente forma, dividiéndola en directa y difusa en lugar de realizar un promedio.
- Compatibilidad de las unidades físicas. Debido a la discrepancia de las magnitudes físicas entre la estación meteorológica y los archivos EPW, fue necesario realizar una conversión de estas. Este cambio fue necesario realizarlo tanto en la velocidad del viento como en la presión atmosférica.

3.2.8 Generación del archivo climático experimental AMY

Un aspecto clave para garantizar la validez experimental del modelo es la caracterización precisa de las condiciones exteriores. Para ello, con el fin de que exista una perfecta correlación entre los datos tomados durante la fase de monitorización y la simulación, se ha generado un archivo AMY en lugar de insertar el tradicional archivo TMY. La generación del archivo AMY requirió una filtración exhaustiva de los datos meteorológicos medidos por la estación meteorológica “Porto de Marín”, cuyos datos son de acceso público a través de la página de *Meteogalicia*. A mayores, fue necesario el tratamiento de los datos proporcionados tras su filtrado debido a incompatibilidades de las unidades físicas de ambos programas y sobre todo a los requisitos de formato específicos exigidos por el software *Elements*, que es el programa informático utilizado para la lectura de los archivos *EPW* proporcionados por *Meteogalicia* y su posterior edición.

Elements permite trabajar de forma intuitiva con los archivos proporcionados en la página web de *Meteogalicia*, y al mismo tiempo editar la matriz climática del año 2026, que es el principal objetivo para generar el archivo AMY para este estudio. La mayor problemática en el momento de volcar los datos fueron los relativos a la radiación solar, puesto que *EnergyPlus* y *Elements* requieren diferenciar entre la radiación global solar directa (proveniente directamente del sol sin interrupciones) y la radiación solar difusa (que es aquella atenuada por las nubes u otros obstáculos que pudiera haber en medio a modo de obstáculo pero que permiten pasar una parte de los rayos solares).

La información proporcionada por estación meteorológica “Porto de Marín” únicamente proporciona la radiación global solar directa (definida como *Global solar* en *Elements*). Sin embargo, el software propone una solución a esta problemática mediante un cálculo interno del propio programa. Habiendo marcado previamente como constante la variable *Diffuse solar* (véase la Figura 3-9) y tras la introducción del valor correspondiente a la columna *Global solar* (obtenido del archivo proporcionado por *Meteogalicia*), el programa realiza una descomposición vectorial y calcula por una parte la radiación directa normal (*normal solar*), y por otra parte la radiación solar difusa (*diffuse solar*). De este modo, se asegura que el archivo de datos introducidos en *EnergyPlus* es lo más completo posible para calcular de la forma lo más exacta posible las ganancias térmicas.

Finalmente, se introdujeron los datos que se reflejan en la Figura 3-9 para completar la matriz de datos meteorológicos: *dry bulb temperatura* (temperatura de bulbo seco), *relative humidity* (humedad relativa), *atmospheric pressure* (presión atmosférica), *wind speed* (velocidad del viento) y *wind direction* (dirección del viento).

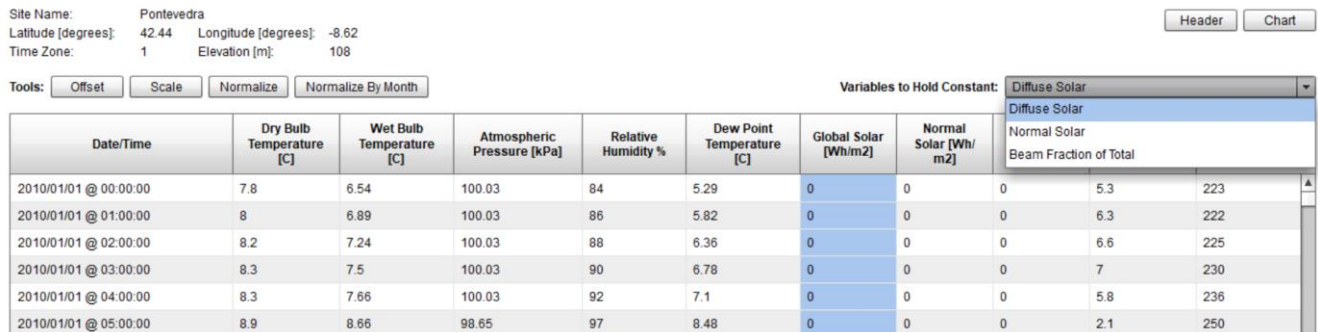


Figura 3-9. Interfaz de Elements durante el proceso de generación del archivo EPW. Fuente: Elaboración propia

El resultado obtenido tras todo el proceso es un archivo EPW perfectamente compatible con el que solicita *Energyplus* para realizar los cálculos y que reproduce fielmente las condiciones climáticas existentes en la Escuela Naval Militar durante la fase de medición.

La motivación del desarrollo de un archivo AMY se ve aún más justificada si cabe al observar que los datos recopilados por la estación meteorológica “Porto de Marín” durante los últimos años revelan bastantes discrepancias respecto a los datos históricos, presentando una fuerte influencia del clima atlántico. La observación de la Figura 3-10 muestra como las temperaturas rara vez han subido de los 16 °C en el periodo de medición; por otra parte, cabe destacar la alta humedad relativa constante a lo largo del mes y medio de estudio. Desde el punto de vista termodinámico, este es un aspecto crítico, puesto que el aire exterior contiene un alto grado de vapor de agua, elevando por tanto su entalpía y obligando al edificio a realizar una generación extra de energía para tratar esa alta humedad relativa presente en el ambiente. Esta mayor demanda de energía no se vería reflejada en el caso de utilizar un archivo TMY, el cual se sirve de datos históricos, puesto que en estos la humedad relativa durante el periodo invernal oscila entre el 70 % - 80 %.

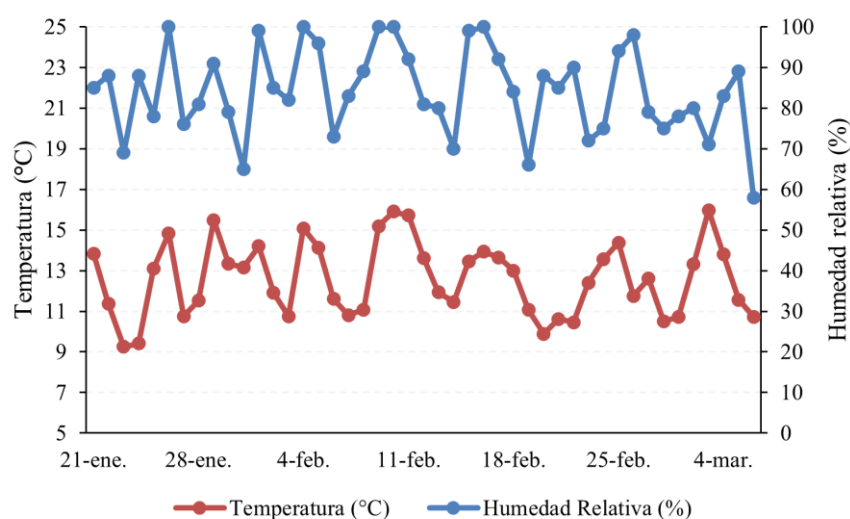


Figura 3-10 Evolución de la temperatura y humedad relativa correspondiente al periodo de medición. Fuente: Elaboración propia

3.3 Modelado geométrico del Gemelo digital

La definición geométrica del edificio es un paso crítico en el modelado térmico del edificio, ya que constituye la base infraestructural sobre la que el software realiza el balance térmico. A pesar de que existe una amplia gama de programas informáticos de tipo arquitectónico, se ha optado por realizarlo mediante *FloorSpaceJS*, integrado de forma nativa en *OpenStudio*. De este modo, se evita importar *plugins* externos, impidiendo así problemas de interoperabilidad, pérdida de información geométrica o corrupción de código durante el proceso de exportación.

Asimismo, mediante *FloorSpaceJS* se alcanza una coherencia geométrica perfecta mediante su sistema de ajuste automático de los vértices, evitando errores topológicos críticos que impiden la simulación y aportando una solución rápida y fiable.

3.3.1 Diseño geométrico

El modelado del edificio del CUD-ENM se ha realizado siguiendo una secuencia lineal, tomando como base los planos actualizados tras la reforma del año 2007.

En primer lugar, se importaron los planos en *AutoCAD* a escala 1:1 como plantilla base (capa *background*), realizando el diseño 2D sobre los mismos con la orientación geográfica real. Este último aspecto es crítico, puesto que determina la incidencia solar directa sobre cada zona térmica.

En segundo lugar, se trazaron los perímetros exteriores y las divisiones interiores, simplificando pequeños recovecos o discontinuidades sin importancia desde un punto de vista termodinámico. De este modo, se optimiza la malla de cálculo termodinámico al priorizar ortogonalidades, reduciendo drásticamente el coste computacional y mitigando posibles errores topológicos.

Por último, una vez finalizado el trazado en 2D (apreciable en la Figura 3-11), se procede a la extrusión para generar el volumen tridimensional. Para ello, se define la altura de cada planta, teniendo en cuenta que la altura de cada una es con respecto al techo de la inferior, o al suelo en caso de la planta baja.

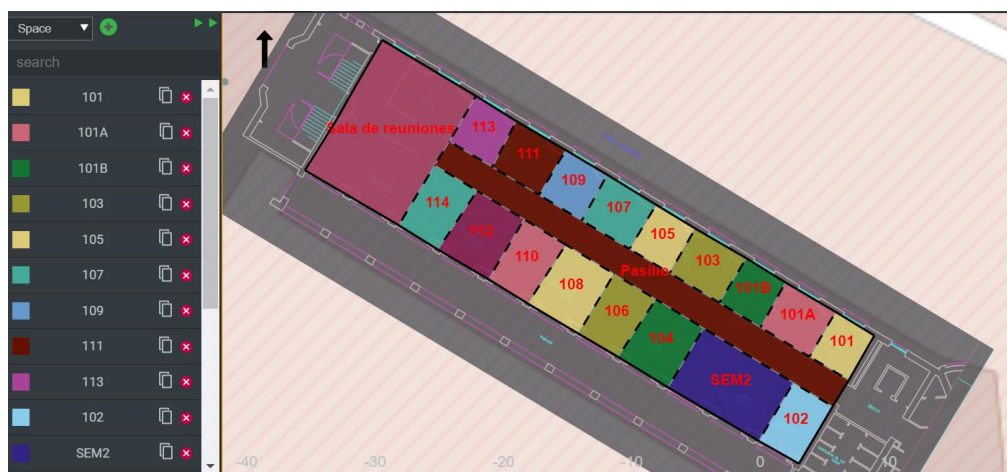


Figura 3-11 Diseño 2D de la planta baja del edificio CUD-ENM. Fuente: Elaboración propia

3.3.2 Modelado geométrico de la fenestración

Completado el modelado geométrico del edificio, se ha procedido con la integración de la fenestración (véase Figura 3-12). Para ello, *FloorSpaceJS* tiene una herramienta que permite, en lugar de tener que manipular el volumen en 3D, introducir sobre el plano en 2D los parámetros correspondientes a cada apertura, ya sea puerta o ventana, y el programa automáticamente genera ese hueco.

Para la realización de las aperturas han sido necesarias introducir las cotas dimensionales de cada ventana, así como su posicionamiento relativo respecto a algunos puntos de la infraestructura. Una vez introducidos esos valores, el software sustrae ese material, genera el hueco y en su lugar coloca lo que se haya seleccionado, ya sea puerta o ventana (en el caso del edificio del CUD-ENM las ventanas son todas *operable window*). Este hueco quedará guardado como *subsurface*, lo cual será un detalle clave para posteriormente definir las características de cada uno de esos subespacios, puesto que tendrán unas propiedades diferentes del resto del muro, y con una gran influencia a nivel termodinámico.

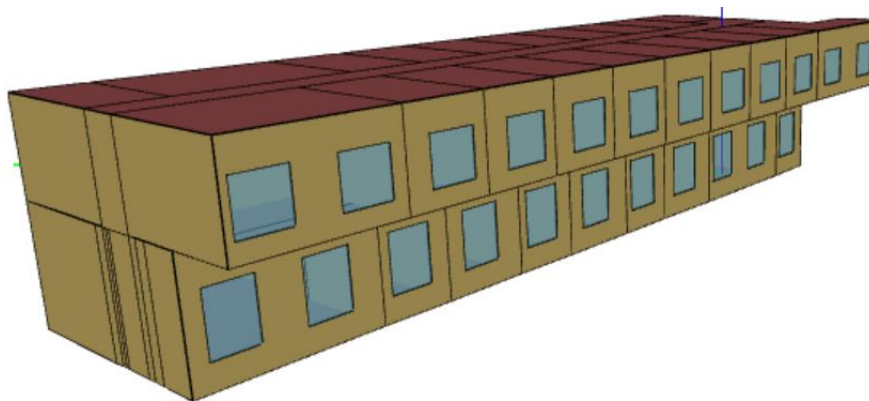


Figura 3-12 Vista tridimensional del edificio. Fuente: Elaboración propia

3.3.3 Estrategia de zonificación térmica

La distribución interna del edificio por zonas térmicas no responde únicamente a criterios arquitectónicos, sino a exigentes condicionantes termodinámicos. A efectos de simulación en *EnergyPlus*, una zona térmica se considera como un volumen de control isotérmico, en el cual se asume que no existen gradientes de temperatura espaciales y que el aire en su interior está perfectamente homogeneizado. Esta temperatura única es la variable fundamental que utiliza el motor de cálculo para resolver las ecuaciones de balance de energía en cada intervalo de tiempo de la simulación.

Con el objeto de obtener unos resultados que repliquen la realidad del edificio del CUD-ENM con la máxima fidelidad, se ha optado por una estrategia de zonificación térmica de muy alta resolución (véase la Figura 3-13). Se ha evitado expresamente realizar simplificaciones globales, ya que esto diluiría el impacto real de la orientación solar y el comportamiento particular de los usuarios, conllevando a una aproximación energética incorrecta.

Es fundamental recalcar que, aunque en la representación gráfica de *OpenStudio* algunas estancias puedan compartir gama cromática (debido a la limitación de la paleta de colores por defecto del software), cada uno de los espacios listados a continuación ha sido modelado como una zona térmica totalmente independiente. Esta independencia permite asignar a cada recinto sus propias cargas internas, dimensiones, horarios y perfiles de infiltración. Para proceder a ello, se han modelado por separado los siguientes bloques:

- Despachos de la dirección del CUD. Estas estancias cuentan con ciertas particularidades cada una debido especialmente a sus perfiles de uso y el personal que trabaja en cada una de ellas. En esta tipología se incluyen: despacho del director del CUD, subdirectora del CUD, gerente, secretaría económica y TIC.
- Salas de reuniones. Estos espacios tienen un perfil de uso muy específico puesto que su índice de ocupación es esporádico. A efectos de simulación térmica durante el periodo de estudio, se ha considerado nula la carga interna por ocupación en estos espacios debido a su escaso impacto termodinámico durante el mes y medio de medición.
- Sala de servidores. Esta zona situada en la primera planta cuenta con un amplio conjunto de equipos informáticos, lo cual requiere un alto grado de refrigeración. Sin embargo, dado que

la potencia instalada es constante, el sistema de refrigeración también opera en régimen continuo con carga constante y de este modo se consigue mantener la temperatura constante en el tiempo, no afectando así al global del edificio.

- Despachos tipo. Estos espacios son los más comunes en el edificio del CUD-ENM y tienen todas unas características muy similares, únicamente variando entre ellos las dimensiones. En su mayoría, comparten un mismo perfil de uso, equipos informáticos e iluminación.
- Pasillos. Estos espacios de circulación común actúan como zonas de transición térmica.
- Aula. En la planta baja se encuentra un aula docente que es utilizada a diario por los alumnos del CUD, aunque bien es cierto que no en continuo. Asimismo, en esta estancia se imparten, en diferentes periodos a lo largo del año, cursos de formación a personal del CUD. Por tanto, este espacio será muy particular, con un bajo perfil de uso (aproximadamente una hora al día) pero con una carga elevada durante ese tiempo puesto que la ocupación media es de 14 personas.

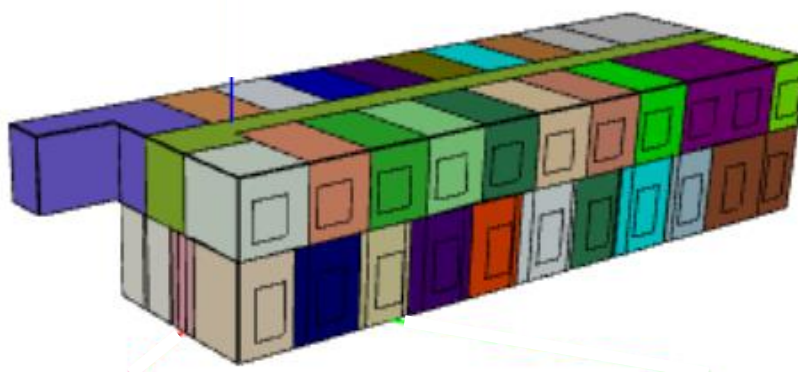


Figura 3-13 Esquema de zonificación térmica del modelo. Fuente: Elaboración propia

3.4 Caracterización constructiva

La validez del modelo energético está directamente relacionada con el grado de fidelidad de los parámetros constructivos introducidos en *OpenStudio* respecto a los reales. Como documento base para la mayor parte de los materiales se ha utilizado el Inventario del proyecto, redactado por el Tcol. Ingeniero del CIP D. Félix González de la Campa, para la reforma del año 2007. La información extraída se ha introducido en el programa en el apartado *Materials*, procediendo posteriormente a su ensamblaje en la sección *Constructions* para configurar de este modo los muros de fachada, soleras, forjados, divisiones interiores y cubierta.

OpenStudio permite crear una sección multicapa en la que se introducen todos los materiales que componen cada muro o forjado, con sus dimensiones y características particulares. La estratificación de los materiales no es algo aleatorio, ya que su orden provoca variaciones en los resultados termodinámicos. A continuación, se detalla la composición de los elementos constructivos más relevantes:

Muros de fachada exterior

Los muros exteriores (fachadas norte y sur) del edificio del CUD-ENM tienen una configuración multicapa renovada en la reforma ejecutada en el 2007. Previamente, la hoja exterior carecía de aislamiento, pero con la remodelación se le instaló y se le dotó así de mayor resistencia térmica. La estratificación, desde el exterior hacia el interior, es la siguiente (véase la Figura 3-14): la capa más externa corresponde al mortero de cemento que actúa como revestimiento, tras la cual se encuentra la hoja principal de ladrillo hueco; ambos elementos aportan la mayor parte de la inercia térmica estructural. A continuación, se dispone de una cámara de aire (15 mm) para la ruptura del puente térmico, seguida de un panel aislante de lana de roca. La baja conductividad de este aislamiento minimiza el flujo

de calor por transmisión. Finalmente, el trasdosado interior está formado por placas de yeso laminado (Pladur) de 15 mm, las cuales tienen una baja inercia térmica, favoreciendo un calentamiento veloz del aire interior en cuanto entran en funcionamiento los sistemas de calefacción.

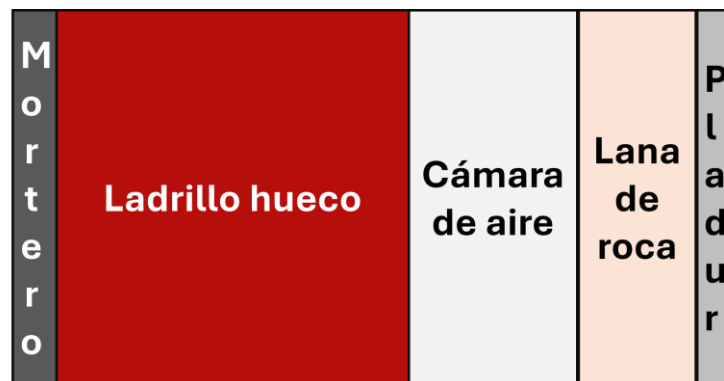


Figura 3-14 Estratificación del muro de las fachadas principales. Fuente: Elaboración propia

Tabiquería interior

La compartimentación interior del edificio, que separa los distintos despachos, seminarios y zonas comunes, se ha modelado reproduciendo fielmente la configuración instalada durante su última gran reforma. Se trata de tabiquería ligera seca con un espesor total de 130 mm. Su núcleo está compuesto mayormente por acero galvanizado con un relleno interior de fibra mineral, para dotar a la pared de un mayor aislamiento termoacústico. Este material interno se encuentra protegido por ambos lados mediante una doble placa de yeso laminado de 15 mm de espesor por cada cara. Como revestimiento superficial interior se ha aplicado una capa de pintura plástica lisa.

Falso techo

En el límite superior de los recintos habitables (situado a 3,7 metros de altura), se ha modelado el falso techo existente compuesto por bandejas metálicas de aluminio perforado en color blanco (60x60 cm) provistas de fieltro acústico.

Forjado entre plantas

Formados por una losa de hormigón estructural de 20 cm sobre la que descansa el pavimento continuo de mármol rojo.

Pavimento de la planta baja

El edificio está sustentado sobre una cimentación de arena y grava. Sobre ella, se dispone una solera de hormigón armado de 30 cm de grosor (armado con mallazo de 4 mm), cuyo acabado superficial es un pavimento continuo de mármol rojo. Este último se caracteriza por ser un material de alta densidad y elevada conductividad térmica.

Cierre superior (Cubierta)

Los techos correspondientes a la última planta no se exponen directamente a la radiación exterior, sino que limitan con una zona intermedia no acondicionada ubicada bajo la cubierta inclinada del tejado. Por consiguiente, a nivel termodinámico en *OpenStudio*, este cierre se ha configurado mediante una condición de frontera térmica (*Boundary Ceiling*), definiendo el forjado superior que aísla las zonas térmicas climatizadas de la temperatura oscilante de esa cámara de aire superior.

3.4.1 Fenestración

Las ventanas se han modelado con la herramienta *Simple Glazing system window materials*. Puesto que disponen de doble cristal, se debe especificar este detalle en las características del tipo de ventana y la cámara de aire entre ambos cristales que conforman la misma. Se han introducido los parámetros para tener ventanas 4-6-4 en todo el edificio, que están compuestas por dos vidrios de 4 mm con una cámara de aire intermedia de 6 mm.

Adicionalmente a las dimensiones geométricas, es necesario introducir en el software los siguientes parámetros termodinámicos referentes a la fenestración:

Transmitancia térmica (U-factor). Se ha definido $3,3 \text{ W/m}^2\text{K}$ de acuerdo con lo establecido por parte del IDAE (Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía) en su *Guía Técnica para la Rehabilitación de la Envolvente Térmica de los Edificios* (en la página 8 establece el U-factor para ventanas del tipo 4-6-4) [32].

Factor solar (SHGC). En el mismo documento citado para consultar la transmitancia térmica se puede encontrar, en el mismo apartado, pero en la página 9, el valor del factor solar para doble acristalamiento con vidrio incoloro estándar, el cual se ha establecido 0,75 (g). Puesto que no se ha aplicado ningún tratamiento de control solar, las ganancias térmicas serán significativas y claves durante el periodo invernal para alcanzar el balance energético.

Transmitancia visible. Se ha establecido 0,83 siguiendo la ficha técnica de vidrio base publicada por SGG PLANICLEAR [33], la cual define una transmitancia de 0,91 para un vidrio individual, y puesto que en la ventana existe una doble capa, la transmisión global visible resultante será la solución de la operación $0,91 \times 0,91 \approx 0,83$.

3.4.2 Definición de las propiedades difusivas y capacitivas de los cerramientos

Si bien en el apartado 3.3.1. *Composición multicapa del muro exterior* se definió la geometría de los cerramientos exteriores del edificio, resulta necesario establecer de forma clara las propiedades físicas que caracterizan a estos materiales utilizados. Las variables termofísicas críticas para la ejecución del cálculo dinámico (densidad, calor específico y conductividad) determinan la masa térmica de la infraestructura, factor clave para medir la velocidad con la que la envolvente distribuye la energía en función de la situación en el exterior y el interior de esta.

Para reproducir fielmente la respuesta termodinámica del edificio, se han definido las propiedades termofísicas de cada material, destacando por su impacto las siguientes:

Conductividad térmica (λ). Regula el flujo de calor a través del material según la Ley de Fourier.

Densidad (ρ) y Calor específico (c_p). La relación entre ambas magnitudes establece la masa térmica del cerramiento. Este factor de relación determina la inercia térmica del edificio, dando respuesta a los fenómenos de desfase de la onda térmica y amortiguamiento previamente explicados.

En la Tabla 3-4 se detallan de forma pormenorizada cada uno de los materiales con sus correspondientes propiedades, que son las introducidas en *OpenStudio* para el cálculo del modelo teórico y que han sido extraídos principalmente de dos fuentes: por una parte, de la documentación de la reforma del edificio que finalizó en el 2010 y, por otra parte, del Catálogo de Elementos Constructivos del CTE [11]. Asimismo, cabe destacar que en el caso de algunos materiales ha sido necesaria realizar una interpolación porque las propiedades/medidas proporcionadas en el CTE no se correspondían con las reales del material en el edificio objeto de estudio.

Material	Espesor (m)	Conductividad λ (W/m K)	Densidad ρ (kg/m ³)	Calor específico c_p (J/kg K)
Mortero de cemento	0,015	1	1.800	1.000
Ladrillo hueco	0,115	0,490	1.200	1.000
Cámara de aire	0,015			
Lana de roca	0,045	0,035	30	1.000
Pladur	0,015	0,250	900	1.000

Tabla 3-4 Propiedades termofísicas de los materiales del muro exterior. Fuente: Elaboración propia

La disposición y los materiales utilizados dotan a la fachada exterior del edificio de unas características muy particulares, pero a la vez bastante comunes en arquitectura. Se destacan las siguientes propiedades de su comportamiento:

Aislamiento resistivo. La capa de 45 mm de lana de roca ($\lambda = 0,035$ W/m K) actúa como la principal barrera térmica de la fachada, rompiendo el puente térmico entre la parte exterior e interior de las estancias, reduciendo el intercambio de energía en forma de calor.

Respuesta inercial asimétrica. La envolvente del muro exterior presenta dos partes bien diferenciadas dentro del mismo atendiendo a la densidad de los materiales. Por su parte, la capa exterior (compuesta por el mortero de cemento y el ladrillo hueco) presenta una densidad superior, lo que le permite aportar estabilidad térmica al edificio, acumulando la energía recibida durante el periodo diurno y liberándola de forma paulatina durante la noche debido al concepto de desfase de onda explicado previamente. Por otra parte, la capa interior (compuesta por la lana de roca y el Pladur) posee una densidad menor, en la que se destaca la lana de roca ($\rho = 30$ kg/m³). En esta parte interna del muro la respuesta ante variaciones térmicas es mucho más rápida, lo cual supone una gran ventaja puesto que se busca una reacción instantánea del edificio ante variaciones en el sistema de calefacción/refrigeración, minimizando de este modo las pérdidas energéticas en los periodos de transición.

Respecto a la cámara de aire de 15 mm, su modelado termodinámico difiere del aplicado a los elementos sólidos del cerramiento. El motor de cálculo, *EnergyPlus*, calcula la resistencia térmica de esta cavidad mediante un proceso iterativo utilizando de base unos algoritmos ya incorporados en el programa que buscan representar fielmente la realidad en función de las oscilaciones térmicas de lo que rodea esta cámara de aire.

3.5 Análisis de cargas internas y condiciones operacionales

El comportamiento energético real del edificio difiere de los resultados obtenidos en un análisis estático puesto que, además de las condiciones exteriores cambiantes, en el interior existen fluctuaciones derivadas de la ocupación, equipos electrónicos y la regulación del aire.

En el análisis dinámico, estas variables se introducen en forma de perfiles horarios y densidades de carga térmica o el valor concreto en caso de conocerse. Las cargas internas tienen una gran influencia en el balance global; de hecho, no todas ellas tienen la misma relevancia, sino que los equipos informáticos y la iluminación son los más influyentes tal y como se refleja en la Figura 3-15.

La obtención de estos porcentajes se ha realizado mediante un cálculo analítico directo. En primer lugar, se ha cuantificado el valor absoluto de cada fuente de calor (ocupación, iluminación y equipos) a partir de la documentación técnica y observación de la realidad del edificio. Seguidamente, se han sumado estos valores para calcular la carga térmica total del edificio a plena capacidad. Finalmente, el

porcentaje exacto de cada tipología se ha obtenido dividiendo su aporte individual entre el global, lo que permite identificar rápidamente qué elementos tienen mayor impacto termodinámico en la simulación, que como ya se ha introducido previamente son la iluminación (40 %) y los equipos (38 %).

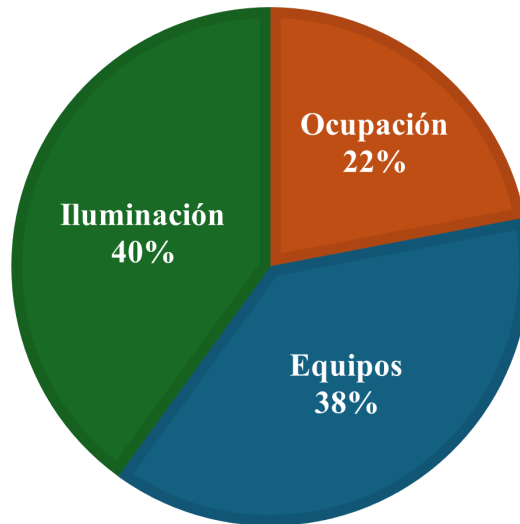


Figura 3-15 Distribución del total de las cargas térmicas internas. Fuente: Elaboración propia

3.5.1 Parametrización de la carga térmica por ocupación

Cualquier objeto que esté a una temperatura diferente a su entorno está constantemente intercambiando energía con el mismo, y el metabolismo humano no es una ajeno a este fenómeno. En *EnergyPlus*, el cuerpo humano es percibido como un sistema termodinámico abierto. Se ha analizado el perfil de un profesor del CUD, con el fin de analizar su actividad metabólica y de este modo cuantificar la energía liberada por su cuerpo de acuerdo a la UNE-EN ISO 7730 [34]. Esta fue definida por el Gobierno de España mediante el INSST (Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo, perteneciente al Ministerio de Empleo y Seguridad Social) entre 1,0 met (en reposo absoluto) y 1,3 met (trabajo físico activo). Realizando la conversión y la media entre ambos valores se obtiene un valor de potencia media de 120 W por persona (resultado obtenido según la *ecuación 3.1* y utilizado por *EnergyPlus* por defecto). De ese total parte se corresponde con carga sensible y lo restante con carga latente. Este desglose es clave porque tendrá influencia en la demanda energética del edificio para mantener la temperatura y humedad en el rango de valores adecuado.

$$Q = \text{Mets} \times 58,2 \times A = 1,15 \times 58,2 \times 1,8 = 120 \text{ W} \quad (3.1)$$

Donde:

Mets: unidad del índice metabólico que cuantifica la tasa de energía generada por el cuerpo humano en función de la actividad física desarrollada.

58,2 (W/m^2): constante de conversión estándar que indica el calor generado por una persona en reposo por cada m^2 de piel.

A (m^2): área de la superficie corporal promedio de una persona adulta según *DuBois*.

Naturaleza de la actividad desarrollada. Los profesores del CUD emplean, en promedio, el 60 % del tiempo de la jornada laboral en los despachos en su mesa de trabajo, corrigiendo material o preparando

la documentación docente. Por consiguiente, la energía disipada es superior a la tasa metabólica basal al desarrollar un trabajo (físico y cognitivo) continuado.

Seguridad en el periodo estival. La actividad docente en la ENM no finaliza hasta finales de julio y por ello se debe tener en cuenta ese periodo a pesar de que no sea el de medición como tal. Durante el verano, se debe asegurar que el edificio es capaz de asumir ese aumento de energía liberada por la carga metabólica y mantener una temperatura de bienestar para el personal.

3.5.2 Parametrización de las cargas eléctricas

Las cargas internas de tipo eléctrico tienen una característica clave, y es que suponen una ganancia térmica favorable durante la temporada invernal, puesto que aportan energía al edificio reduciendo de este modo la energía necesaria procedente de la calefacción. Sin embargo, durante los meses de verano estas suponen un perjuicio puesto que van en contra de los objetivos del sistema de refrigeración.

Iluminación. Como bien se ha definido previamente en el presente trabajo se ha establecido una potencia para cada zona térmica según el número de luminarias fluorescentes que hay en cada despacho y la potencia de cada una de estas. Esta carga se divide entre radiación, la cual es transmitida a las superficies de cada despacho, y convección, la cual es absorbida por el aire.

Equipos informáticos. Se ha introducido una carga de 75 W por cada PC y 250 W para el proyector que hay en el seminario de la planta baja.

3.5.3 Balance global de cargas térmicas internas

Debido a los dos usos que tiene el centro, tanto docente como de oficina, tiene una alta carga de elementos tecnológicos que influyen notablemente en las cargas internas del edificio, como se ha destacado previamente en la Figura 3-15. Por tanto, este hecho condiciona el perfil de funcionamiento del sistema de climatización. Estos equipos informáticos, junto con las luminarias fluorescentes, suponen el 78 % del total de las cargas térmicas internas, alcanzando un total de 25,1 kW. Su influencia es notable y tiene un impacto bidireccional dependiendo de la época del año como ya se ha detallado.

Finalizada la modelización geométrica y constructiva del edificio, se definen las condiciones de operación del edificio, las cuales dependerán de la estancia. Por consiguiente, se establecen unas condiciones particulares para cada zona térmica. Las cargas térmicas con mayor influencia son las personas, los equipos electrónicos y la iluminación, y por tanto es de vital importancia describir los horarios en los cuales cada una de estas cargas afecta a cada estancia para obtener un resultado lo más fidedigno posible, y más teniendo en cuenta que es un centro docente muy característico.

3.5.4 Patrones de carga y régimen horario

Se ha modelado un perfil de uso específico para los despachos, asumiendo un bloque de horas ocupados idéntico para casi todos ellos. Por otra parte, se ha establecido uno diferente para el aula de la planta baja, estimando un uso estimado de una hora al día. A nivel general, se han configurado en el calendario virtual los festivos y días no laborables del CUD, asegurando que *EnergyPlus* los tenga en cuenta para el cálculo de la simulación anual. Por tanto, de acuerdo con lo establecido se distinguen los siguientes tipos de periodos:

Periodo lectivo. Abarca desde septiembre hasta julio (excluyendo vacaciones, festivos y periodo de embarque/prácticas del alumnado). El horario establecido es de 08:00-19:00 para los despachos y de una hora por la mañana para el seminario. En esta franja horaria se ha fijado una tasa de ocupación del 100 %, y se asume que cuando el personal del CUD abandona las instalaciones, la tasa desciende hasta el 0 %.

Fines de semana, festivos y periodos vacacionales. Se considera el edificio totalmente vacío, con los sistemas de climatización, ordenadores e iluminación desconectados. En consecuencia, el porcentaje de ocupación establecido en este periodo es del 0 %.

3.5.5 Asignación de cargas por zona térmica

La definición de la carga térmica de los equipos electrónicos se ha realizado basándose en las especificaciones técnicas reales de cada aparato, mientras que la potencia de iluminación consumida en cada estancia se ha extraído directamente de los planos de la reforma. Este enfoque evita depender de las estimaciones genéricas por parte de *OpenStudio* (como el cálculo de la ocupación en función de los m² de una estancia, por ejemplo), dotando al modelo de una mayor precisión. Para cada zona se han introducido los siguientes valores relativos a número de personas, iluminación y equipos electrónicos (véase la Figura 3-16), pudiéndose ver un resumen de todas las estancias en la Tabla 3-5.

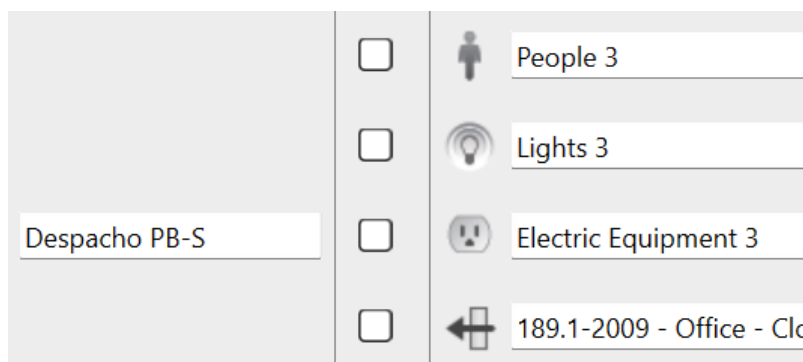


Figura 3-16. Panel de configuración y asignación detallada de cargas internas en OpenStudio.
Fuente: Elaboración propia

Ocupación. El personal de cada estancia se ha definido de forma específica para cada una, realizando un conteo directo de forma individualizada.

Iluminación. La potencia utilizada por las luminarias fluorescentes en cada estancia se ha calculado a partir de la información proporcionada por los planos de la reforma del 2007. Teniendo en cuenta que existen despachos con luminaria empotrable o *troffer* compuesta por 3x36 W y otros con 3x18 W, se ha calculado la potencia de iluminación total de cada uno e introducido directamente en *OpenStudio*. Asimismo, a lo largo del pasillo hay instaladas luces de 2x20 W que también han sido introducidas en el modelo.

Equipos electrónicos. Se ha realizado un conteo individualizado de los mismos al igual que con el personal. Teniendo en cuenta todo ello, se ha considerado que la potencia utilizada por cada PC, incluyendo monitor y torre de procesamiento, son 75 W (ASHRAE define en la [35] una cantidad ligeramente superior, sin embargo, la propia ASHRAE recomienda ajustar este valor empíricamente en función de las especificaciones técnicas particulares de los equipos instalados). Por otra parte, en el caso del proyector que hay en el aula de la planta baja, su potencia emitida se ha considerado de 250 W (media aproximada entre 270W que es la potencia pico de funcionamiento del aparato y 223 W que es la mínima) de acuerdo con la información proporcionada por el fabricante [36].

Tipo de zona	Ocupación (personas)	Iluminación (W)	Equipos electrónicos (W)
Aula planta baja	14	864	400
Despacho Sr. director	1	864	150
Despacho subdirectora	1	432	150
Despacho PB-Norte	2	216	300
Despacho PB-Sur	2	432	300
Despacho P1-Norte	2	432	300
Despacho P1-Sur	2	432	300
Sala de reuniones PB ¹	10	1.296	0
Pasillo PB	0	600	0
Pasillo P1	0	960	0
Secretaría	4	648	900

Tabla 3-5 Resumen de cargas internas por zonas térmicas. Fuente: Elaboración propia

3.6 Definición del acondicionamiento térmico y perfiles operativos

Habiendo realizado previamente toda la modelación geométrica del edificio, así como la asignación de las cargas internas más relevantes, es necesario establecer los parámetros que condicionarán la demanda energética del edificio. Esta varía en función de los requisitos exigidos por el usuario. En todo momento se busca que en el interior del edificio haya una sensación de bienestar térmico, y por ello, mediante los termostatos se regulan los *fancoils*.

En el presente TFG se ha optado por hacer uso de la opción que ofrece *OpenStudio* de cargas ideales (*Ideal Air Loads*), que, combinada con los termostatos, permite simular la respuesta térmica de la infraestructura con un alto grado de precisión sin necesidad de modelar la complejidad mecánica de los equipos físicos. A continuación, se detalla cómo se ha realizado el proceso de configuración del control térmico para cada zona.

3.6.1 Implementación del modelo de cargas ideales

Para el cálculo de la demanda energética, se ha optado por implementar el algoritmo de *cargas ideales* en *OpenStudio* (*Ideal Air Loads* en la interfaz de *Thermal Zones*). Este sistema asume varias premisas que no se ajustan completamente a la realidad: una eficiencia del 100 % del sistema de calefacción/refrigeración y una capacidad infinita en los equipos, inyectando o extrayendo energía para adecuarse a la temperatura de consigna deseada. La elección de este método de cálculo simplificado, pero termodinámicamente riguroso, se fundamenta en los siguientes criterios:

¹ Las salas de reuniones se han modelado con un aforo determinado, pero esto es un dato únicamente informativo, puesto que el porcentaje de ocupación se ha definido del 0% debido a su ocupación esporádica, la cual no influye significativamente en el resultado final.

Aislamiento de la demanda térmica neta. Permite conocer directamente la energía necesaria en MWh para mantener el confort térmico, aislando el comportamiento de la envolvente arquitectónica y evitando introducir incertidumbre con parámetros mecánicos complejos.

Diagnóstico preciso. Facilita la detección de errores de modelado geométrico, ya que cualquier anomalía provendrá de la envolvente y no de fallos en el diseño de los sistemas HVAC.

Reducción de variables. Prescindir del diseño de los circuitos y posteriores configuraciones reduce el elevado número de ecuaciones que debe resolver *EnergyPlus*, optimizando los tiempos de cálculos en las múltiples simulaciones iterativas.

3.6.2 Configuración de los termostatos

La legislación de las condiciones ambientales necesarias en las zonas de trabajo está establecida por el RITE, y estas se regulan en el edificio del CUD-ENM mediante los termostatos, dando lugar así a un rango de temperaturas entre las que el edificio se mantiene. Ese margen en el que la temperatura puede oscilar sin entrar en funcionamiento ningún sistema HVAC es el conocido como “Banda muerta”.

De este modo, se evitan consumos energéticos innecesarios puesto que se aprovecha la inercia térmica del edificio y siempre que sea suficiente se prescinde del uso de la calefacción/refrigeración. Siguiendo el criterio, recientemente modificado por el RITE y publicado en el BOE [37], se han establecido los siguientes límites para permitir el uso de los sistemas HVAC en los edificios de la administración pública, con el fin de reducir hasta un mínimo de un 7 % el consumo energético:

Heating setpoint. Fijado en 22 °C, por debajo de esta temperatura, siempre que sea durante el horario establecido, se pondrá en funcionamiento el sistema de calefacción.

Cooling setpoint. Establecido en 27 °C como el límite a partir del cual se activa el sistema de refrigeración para no permitir que la temperatura siga subiendo.

3.6.3 Definición de los horarios estacionales

El edificio del CUD-ENM cuenta con un sistema de climatización a dos tuberías, con lo cual no es capaz de estar en modo calefacción y refrigeración simultáneamente, sino que todo el edificio debe estar en un único modo. Por este motivo se ha visto necesario definir dos horarios estacionales (en el apartado de *Schedules* dentro de *OpenStudio*) a lo largo del año natural para definir en qué época del año estará activada la calefacción y en cuál la refrigeración, siendo el principal criterio la meteorología predominante en la zona.

La parametrización de los horarios operativos representa un proceso crítico debido a las restricciones de simultaneidad del motor de cálculo de *EnergyPlus*, el cual interrumpe la simulación (*fatal error*) ante la mínima incongruencia físico-termodinámicas. Por ello, con el objetivo de evitar esta problemática se ha optado por establecer una serie de criterios para que el programa interprete correctamente en todo momento lo que debe ocurrir en el interior del edificio desde el punto de vista energético. La estrategia utilizada se define en los siguientes parámetros:

Horario de calefacción → H_Calefaccion

- Periodo activo (invierno en días lectivos 08:00 - 19:00) → Se fija en 22 °C.
- Periodo inactivo (resto del tiempo) → Se fija en 0 °C. Se establece este valor extremo (0 °C) para forzar la inactividad algorítmica del sistema, dado que es termodinámicamente inviable que el interior del edificio alcance dicha temperatura de forma natural durante la época estival.

Horario de refrigeración → H_Refrigeracion

- Periodo activo (verano en días lectivos 08:00 - 19:00) → Se fija en 27 °C.

- Periodo inactivo (resto del tiempo) → Se fija en 99 °C. El límite debe estar comprendido entre los 0 °C -100 °C, y, puesto que durante el invierno resulta imposible alcanzar esa temperatura cercana a los 100 °C, el sistema de refrigeración nunca entraría en funcionamiento.

Esta amplitud térmica extrema (99 °C) entre los límites de inactividad de ambos sistemas resulta imperativa para prevenir inestabilidades numéricas y conflictos algorítmicos en *EnergyPlus*. Del mismo modo, se asegura que el modelo se ajusta a la realidad del sistema a dos tubos que tiene el edificio del CUD-ENM.

Para la correcta integración de los perfiles de uso en el motor de simulación, la información se ha parametrizado mediante perfiles diarios (*schedules*). En el caso específico de los sistemas HVAC, estos horarios definen la temperatura de consigna activa en cada instante. A modo de ejemplo, en la Figura 3-17 se representa el perfil de consigna para el sistema de calefacción durante las jornadas lectivas estándar (lunes a jueves).

Como se observa, la temperatura objetivo se establece en 22 °C durante la jornada laboral del personal del CUD-ENM (08:00 - 19:00), obligando al sistema a inyectar calor si la estancia desciende de ese valor. Fuera de esa franja horaria, la consigna se reduce drásticamente a 0 °C, con el fin de que este valor actúe como una orden de apagado virtual para *EnergyPlus*, ya que resulta termodinámicamente inviable que la temperatura interior del edificio descienda por debajo de los 0 °C de forma natural, garantizando así la inactividad del sistema HVAC fuera del horario lectivo.

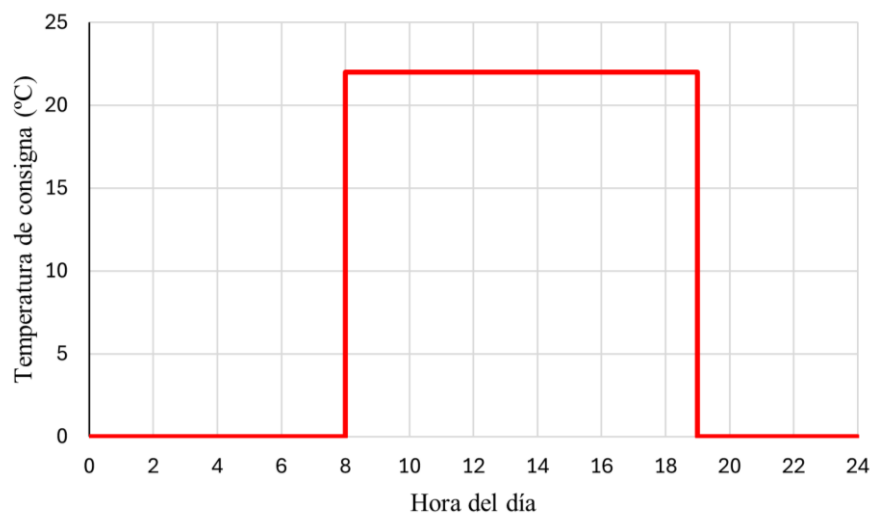


Figura 3-17 Perfil diario de temperatura de consigna para el sistema de calefacción. Fuente: Elaboración propia

3.7 Configuración de los *simulation settings*

La validez de los resultados obtenidos no depende únicamente de la geometría y de los valores termodinámicos introducidos en el modelo, sino que la configuración de los ajustes de simulación es un aspecto clave. En este apartado se define el comportamiento de los algoritmos de cálculo utilizados por *EnergyPlus*. Dadas las características del edificio del CUD-ENM, se ha decidido establecer los parámetros de simulación que se explican a continuación, los cuales han sido configurados directamente a través del panel de *OpenStudio* (véase la Figura 3-18).

En primer lugar, la simulación energética se ha estructurado en dos fases operativas. Mediante la activación de *Do zone sizing calculation* y *Do plant sizing calculation*, el motor de cálculo ejecuta una fase de diseño en la que obtiene las cargas térmicas máximas y dimensiona los sistemas HVAC para hacer frente a las condiciones más desfavorables del año. Una vez dimensionados los equipos, se ejecuta

la fase de simulación dinámica propiamente dicha para evaluar el comportamiento del edificio, prestando especial atención al periodo de monitorización para su posterior contraste con los datos de los sensores. Adicionalmente, respecto a los algoritmos de convección superficial, se ha empleado el modelo *TARP* para el cálculo interior y el algoritmo *DOE-2* para el exterior [38].

Por otra parte, atendiendo a las constantes fluctuaciones meteorológicas en las inmediaciones del edificio, se ha establecido una resolución temporal de 10 minutos. Esto se implementa configurando el parámetro de resolución temporal (*Number of Timesteps per hour*) con un valor de 6. Esta es una alta frecuencia de muestreo, pero resulta estrictamente necesaria para la simulación dinámica correcta del modelo, ya que minimiza el error derivado de cambios meteorológicos rápidos. No obstante, para el proceso de calibración final se ha procedido a la agregación horaria de los resultados temporales, optimizando así el volumen de datos y reduciendo el coste computacional sin pérdida de rigor estadístico.

Asimismo, dado que el edificio del CUD-ENM se encuentra situado próximo a otras estructuras dentro del patio de aulas de la ENM, se ha seleccionado el algoritmo *FullInteriorAndExterior* en el apartado de distribución solar (*Solar Distribution*). De este modo, se establece un cálculo de sombras diario, frente a la interpolación cada 20 días que el motor de cálculo *EnergyPlus* establece por defecto, consiguiendo así un análisis de la radiación solar mucho más preciso.

Finalmente, un factor crítico en edificios con una gran masa térmica, como es el caso del edificio objeto de estudio, es el error inicial de “arranque en frío”. Por ello, se ha establecido un periodo de calentamiento (*Warmup Days*) de 25 días previo al inicio de la simulación. Con ello se asegura que los muros exteriores de la fachada, caracterizados por una elevada capacidad calorífica, se encuentran en equilibrio termodinámico antes de comenzar el registro de datos del periodo de estudio. Este proceso iterativo estabiliza las temperaturas internas de los materiales de gran inercia, garantizando que el modelo parte de unas condiciones en los cerramientos físicamente realistas, evitando así cualquier sesgo o anomalía térmica en los resultados de las primeras semanas.

The image shows a software interface titled "Simulation Control". It contains several settings organized in two columns:

- Left Column:**
 - Do Zone Sizing Calculation:** A toggle switch set to "on".
 - Do Plant Sizing Calculation:** A toggle switch set to "on".
 - Run Simulation For Weather File Run Periods:** A toggle switch set to "on".
 - Minimum Number Of Warmup Days:** A text input field containing the value "25".
 - Temperature Convergence Tolerance Value:** A text input field containing "0.400000" with a unit dropdown set to "K".
 - Do HVAC Sizing Simulation for Sizing Periods:** A toggle switch set to "on".
- Right Column:**
 - Do System Sizing Calculation:** A toggle switch set to "on".
 - Run Simulation For Sizing Periods:** A toggle switch set to "on".
 - Maximum Number Of Warmup Days:** A text input field containing the value "25".
 - Loads Convergence Tolerance Value:** A text input field containing the value "0.040000".
 - Solar Distribution:** A dropdown menu currently showing "FullInteriorAndExterior".
 - Maximum Number of HVAC Sizing Simulation Passes:** A text input field containing the value "1".

Figura 3-18 Panel de control de la configuración. Fuente: Elaboración propia

3.8 Calibración paramétrica y optimización del modelo

Tras completar el desarrollo del modelo térmico, es necesario llevar a cabo su calibración. Este proceso consiste fundamentalmente en ajustar ciertos parámetros de la simulación con el objetivo de reducir el error y aproximar los resultados obtenidos por el programa a los datos reales recogidos durante la monitorización.

3.8.1 Metodología de simulación automatizada y diseño del entorno de evaluación

El elevado número de parámetros e iteraciones dificulta enormemente realizar el ajuste manual del modelo resultando un proceso analítico inviable, tanto por las severas restricciones temporales como por la incapacidad humana de iterar simultáneamente en un espacio paramétrico multidimensional. Para solventar esta casuística, se ha diseñado un entorno de simulación altamente automatizado capaz de intercambiar información de forma autónoma entre distintos *softwares* totalmente independientes. Mediante un código ejecutado con *Python* el sistema es capaz de iterar el número de veces que se hayan definido, evaluando en cada uno de estos pasos la Función Objetivo (F.O.). La arquitectura de este sistema se sostiene en tres pilares fundamentales que son los que a continuación se detallan:

EnergyPlus → Motor de simulación

Resuelve los balances energéticos del edificio basándose en los datos meteorológicos a partir del archivo climático *EPW*, así como de los datos geométricos. Del mismo modo, proporciona posteriormente a la simulación un archivo con el nombre *eplusout.eso*, dónde se contienen todos los datos que se le hayan solicitado al programa relativos a termodinámica.

Python → Interfaz de procesamiento de datos

Actúa como pasarela entre la simulación y la optimización. Esto se debe a que *GenOpt* no es capaz de interpretar el código binario facilitado por *EnergyPlus* en los resultados de sus simulaciones ni tampoco realizar ciertos cálculos estadísticos. Para resolver esta problemática, se ha elaborado un *script* en *Python*, el cual extrae los datos obtenidos en la simulación, los compara con los datos experimentales de los sensores y los evalúa para determinar el error CV(RMSE).

GenOpt → Motor de optimización

Este programa informático tiene incorporados algoritmos que se encargan de realizar correcciones automáticas del modelo geométrico. Una vez recibe la función objetivo, facilitada por *Python*, aplica el algoritmo de optimización *GPS Hooke-Jeeves* [22] para recalcular los parámetros de diseño con el fin de reducir el error inicial. El algoritmo seleccionado se ajusta a las necesidades del modelo puesto que todas las variables son de tipo continuo y por tanto no requiere el cálculo de gradientes. Asimismo, cabe destacar que se puede dividir en dos fases su funcionamiento: una primera en la que realiza un tanteo, para evaluar cómo reacciona la F.O. ante cambios locales (según el *step* definido) en la variable seleccionada para decidir qué dirección tomar, si de ascenso o descenso en el valor del parámetro. En la segunda fase, el algoritmo ejecuta un movimiento de patrón en caso de que la dirección se mantenga con el fin de acelerar la optimización en esa misma dirección. Si por el contrario la solución óptima y los tanteos comienzan a fallar, el algoritmo comienza a reducir el tamaño de la malla para garantizar un alto grado de precisión en el resultado final proporcionado al usuario. Cabe destacar que el número de parámetros recalculados en cada proceso de optimización dependen del usuario, y en el presente trabajo se ha realizado de forma individual con el fin de evaluar el impacto real de cada variable.

Como colofón a lo explicado anteriormente, en la Figura 3-19 se puede visualizar el esquema general de la arquitectura utilizada para la optimización y calibración del modelo.

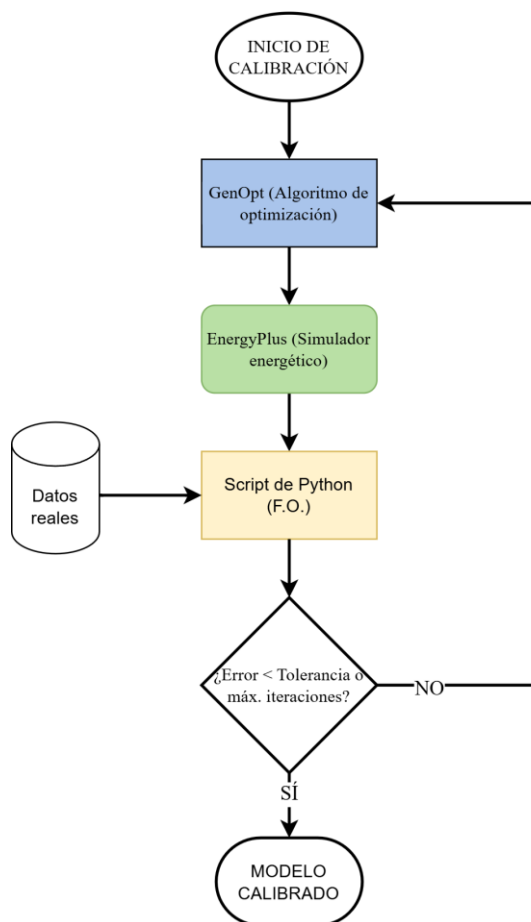


Figura 3-19 Diagrama de flujo de la arquitectura de simulación desarrollada. Fuente: Elaboración propia

3.8.2 Identificación y selección de variables para la calibración

La simulación está altamente automatizada, como ya se ha explicado previamente, y ello permite utilizar el método iterativo de forma rápida y ágil. Sin embargo, el software de optimización carece de interpretación física de las variables. Es decir, *GenOpt* por sí mismo podría alcanzar un error CV(RMSE) del 0 %, pero al atender únicamente a criterios matemáticos, podría asignar valores físicamente imposibles o absurdos a ciertos parámetros (como, por ejemplo, aislamientos negativos o temperaturas de consigna incompatibles con el confort humano).

En consecuencia, con el fin de garantizar que el modelo digital sea un fiel reflejo de la realidad, se ha realizado una selección de los parámetros ajustables basada en el análisis experimental y criterio físicos. Se ha priorizado el ajuste de aquellos parámetros que presentan una mayor incertidumbre inicial (debido a la escasa información proporcionada por el constructor o al comportamiento impredecible del personal que trabaja en el edificio del CUD-ENM) y que, al mismo tiempo, poseen una alta sensibilidad sobre la demanda energética del edificio. De este modo, se consigue minimizar el error variando el menor número posible de variables.

Para llevar a cabo esta selección, se optó por un enfoque analítico iterativo basado en el método OAT (por sus siglas en inglés: “*One at a Time*”). Mediante pruebas preliminares sobre el modelo base en *OpenStudio* y *EnergyPlus*, se modificaron gradualmente variables con alta incertidumbre para observar de forma aislada su impacto en el comportamiento global del edificio. Aquellos parámetros que demostraron tener un impacto marginal en el consumo o en la curva de temperaturas fueron descartados. Así se garantizó que, a la fase final de optimización mediante el motor algorítmico, únicamente llegasen

aquellas variables con capacidad real para corregir de forma crítica el comportamiento termodinámico del Gemelo digital.

Tras ejecutar este análisis de sensibilidad, se seleccionaron las cuatro variables definitivas para la calibración. Las variables escogidas para este proceso fueron:

- La tasa de infiltraciones naturales de aire exterior (ACH).
- La multiplicidad de la capacitancia térmica.
- La temperatura de consigna de la calefacción en horario laboral.
- La temperatura de seguridad fuera del horario laboral.

3.8.3 Desarrollo del código de evaluación en Python

Como paso previo a profundizar en el desarrollo y la sintaxis de los distintos *scripts* generados, resulta imprescindible comprender la arquitectura de comunicación entre las diferentes herramientas de *software* empleadas. Como se ilustra en la Figura 3-20, *GenOpt* opera bajo un esquema de optimización genérica basado en archivos de texto, lo que le permite acoplarse de forma transparente al motor de cálculo de *EnergyPlus* y a las rutinas de evaluación en *Python*.

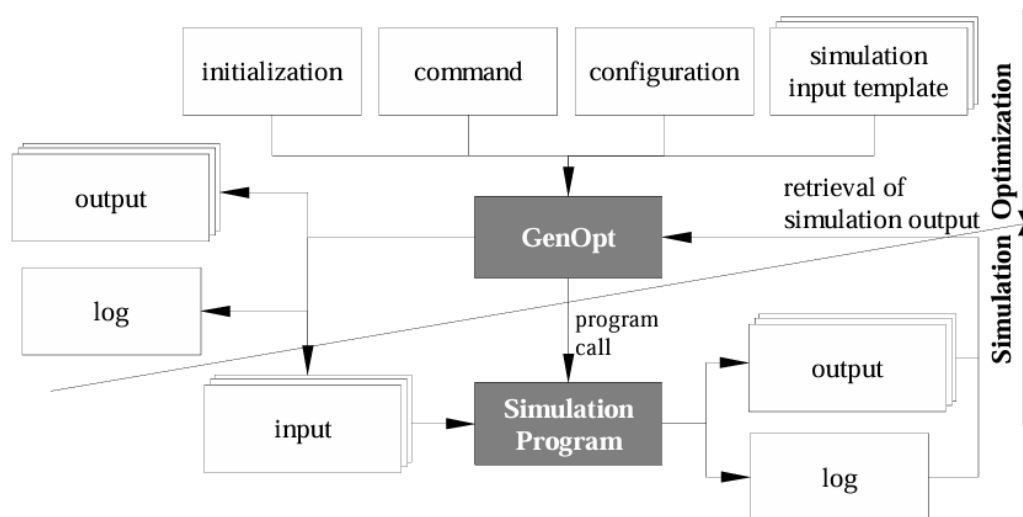


Figura 3-20 Esquema de comunicación entre *GenOpt* y el programa de simulación.
Fuente: Lawrence Berkeley National Laboratory

Según este diagrama de flujo, el algoritmo necesita tres elementos fundamentales, los cuales han sido desarrollados para este proyecto y se explican en detalle en los subapartados posteriores:

- Un archivo de inicialización y comandos que dicta las reglas de la simulación.
- Una plantilla del modelo (.idf) en la que las variables a calibrar han sido sustituidas por etiquetas de texto.
- Un script de evaluación (*calcularerror.py*) encargado de leer los resultados de la simulación, compararlos con los datos reales y devolver el valor de la Función Objetivo al optimizador.

Script de evaluación de Python (*calcularerror.py*)

El cálculo de la Función Objetivo (F.O.) se maneja mediante el script *calcularerror.py* (véase la Figura 3-21). Una de las principales particularidades de este código es su gestión del flujo de datos, que haciendo uso del *software GenOpt* realiza las siguientes acciones: en cada iteración, genera un conjunto de carpetas temporales con los datos obtenidos, que, de no ser la última iteración, son borradas automáticamente del dispositivo con la siguiente iteración y sobrescritas en el siguiente paso. De este

modo, el *script* opera combinando rutas dinámicas para los datos virtuales con la ruta estática de los datos de los sensores DHT22.

Por otra parte, *EnergyPlus* no muestra los resultados en un formato legible, sino que se sirve del código binario. Por ello es necesario incorporar la librería *esoreader*, y al mismo tiempo, se integra una función que localiza la variable *Zone air temperature* en cada una de las iteraciones.

La matemática asociada al cálculo de la CV(RMSE) ha sido incluida en el código para automatizarlo en *Python* mediante el uso de matrices que contienen los datos teóricos y reales. A continuación, se detalla un fragmento clave del script que compone el archivo *calcularerror.py*:

```
# 1. Función matemática para el cálculo del error (CV(RMSE))
def ErrorCalc(d1, d2):
    rmse = mean = 0
    for a, b in zip(d1, d2):
        rmse += (a - b)**2
        mean += b
    return math.sqrt(rmse / len(d1)) / (mean / len(d2)) * 100

# 2. Lógica principal de evaluación por iteración
# [...] (Extracción de datos omitida por brevedad)

# Cruce de datos: Suma de Zonas Térmicas vs Sensores Reales
dataTZ = dataTZ1 + dataTZ2 + dataTZ3+...+dataTZ8
dataS = DataSensorRead(PATH_TO_SENSORS)

# Evaluación y envío del resultado a GenOpt
error = ErrorCalc(dataTZ, dataS)
WriteError(error)
```

Figura 3-21 Script de cálculo del error CV(RMSE). Fuente: Elaboración propia

Adaptación del modelo base (*plantilla_modelo.idf*)

El último paso del proceso es la adaptación de los archivos para ser interpretados por *GenOpt*, por ello es necesario adaptar el archivo base proporcionado por *EnergyPlus* (.idf) en un documento de simulación, el cual en este caso se ha denominado *plantilla_modelo.idf* (véase la Figura 3-22).

En este último archivo, las variables paramétricas objeto de optimización son reemplazadas por etiquetas de texto delimitadas por el carácter "%", y el nombre asignado al parámetro a optimizar suele ser el nombre de la variable. Este código indica a *GenOpt* en qué lugar exacto debe sobrescribir el resultado obtenido en cada iteración, como se muestra en el siguiente fragmento:

```
# 1. Infiltraciones parametrizadas (%infil%)
ZoneInfiltration_DesignFlowRate,
Infiltracion_Despachos,
Despacho_PB_N,
Always_On_Discrete,
AirChanges_Hour,
%infil%;      # <-- AQUI GenOpt inyecta el valor

# 2. Capacitancia termica parametrizada (%capa%)
ZoneCapacitanceMultiplier_ResearchSpecial,
Multiplicador_Especial,
%capa%;      # <-- AQUI GenOpt inyecta el valor

# 3. Horarios de Consigna parametrizados (%calef%, %segu%)
Schedule_Day_Interval,
```

```
Defecto_2, Temperature_3, No,
08:00, %segu%,      # Temperatura de Seguridad
19:00, %calef%,     # Temperatura de Calefaccion
24:00, %segu%;      # Temperatura de Seguridad
```

Figura 3-22 Parametrización de la plantilla del modelo. Fuente: Elaboración propia

Configuración de parámetros y algoritmo (comandos.txt)

Una vez definida la ubicación de la variable que se desea optimizar, se deben establecer unos límites para la misma, puesto que de lo contrario *GenOpt* le asignaría valores hasta obtener un error del 0%, pero los resultados podrían carecer de lógica desde un punto de vista físico. Estos márgenes se definen en el archivo *comandos.txt* (véase la Figura 3-23), el cual se puede dividir principalmente en tres grandes bloques:

- **Bloque *Parameter*.** Define los límites de la variable que se desea optimizar, que en este caso corresponde a las infiltraciones de aire (*Infil*). Se parte de un valor inicial (*Ini=0.7*), y se acota la búsqueda entre un límite inferior (*Min=0.1*) y un límite superior (*Max=1.0*), definiendo los saltos entre las iteraciones (*Step=0.05*). De este modo se asegura que el resultado final se encuentra en unos valores termodinámicamente lógicos.
- **Bloque *OptimizationSettings*.** Determina los criterios de fin de las iteraciones por diversos motivos. Entre ellos se incluyen un número máximo de iteraciones (*MaxIte=50*) así como un número máximo de resultados idénticos consecutivos (*MaxEqualResults=5*). Este último con el fin de evitar que el proceso se quede estancado de forma infinita en un mínimo local.
- **Bloque *Algorithm*.** Designa el método matemático seleccionado, el cual en este caso es *GPSHookeJeeves*, detallado anteriormente en este trabajo. Asimismo, se designa el parámetro de reducción de malla (*MeshSizeDivider*), el cual su función principal es, una vez se aproxima el resultado final, arrojar la mayor precisión posible.

```
# BLOQUE 1: Limites de la variable de Infiltraciones
Vary {
  Parameter {
    Name = Infil;
    Min  = 0.1;
    Ini  = 0.7;
    Max  = 1.0;
    Step = 0.05;
  }
}

# BLOQUE 2: Criterios de parada de la simulacion
OptimizationSettings {
  MaxIte = 50;
  MaxEqualResults = 5;
  WriteStepNumber = false;
}

# BLOQUE 3: Seleccion y configuracion del algoritmo
Algorithm {
  Main = GPSHookeJeeves;
  MeshSizeDivider = 2;
  InitialMeshSizeExponent = 0;
  MeshSizeExponentIncrement = 1;
  NumberOfStepReduction = 4;
}
```

Figura 3-23 Archivo de configuración de *GenOpt*. Fuente: Elaboración propia

4 RESULTADOS Y CALIBRACIÓN DEL GEMELO DIGITAL

Tal y como se detalló en el planteamiento inicial, de forma previa a la validación de cualquier modelo digital, resulta imperativo comprender la respuesta termodinámica real de la infraestructura. Para ello, se ha procedido a la medición y análisis exhaustivo de los datos registrados por los sistemas de adquisición de datos instalados en las diferentes zonas térmicas del edificio del CUD-ENM.

4.1 Análisis de los datos térmicos monitorizados

4.1.1 Validación cruzada de los sistemas de adquisición de datos

Con el fin de garantizar la fiabilidad de los datos medidos, se decide utilizar dos sistemas de registro distintos. La red primaria consiste en una red de microordenadores que tienen como elemento central los sensores DHT22, que estuvieron registrando la temperatura y la humedad de forma continua desde el 21 de enero hasta el 5 de marzo de 2026. A pesar de algún lapso temporal con fallos de alguno de ellos, en líneas generales, el funcionamiento de este sistema ha sido muy robusto.

Como sistema de respaldo ante eventuales interrupciones del suministro eléctrico o caídas del sistema informático, se instaló la red secundaria ya explicada en el capítulo 3. Estos equipos secundarios se utilizaron para tomar datos de control durante el mismo periodo de tiempo. Tener esta redundancia ha permitido comparar las mediciones de ambos equipos (véase la Figura 4-1)

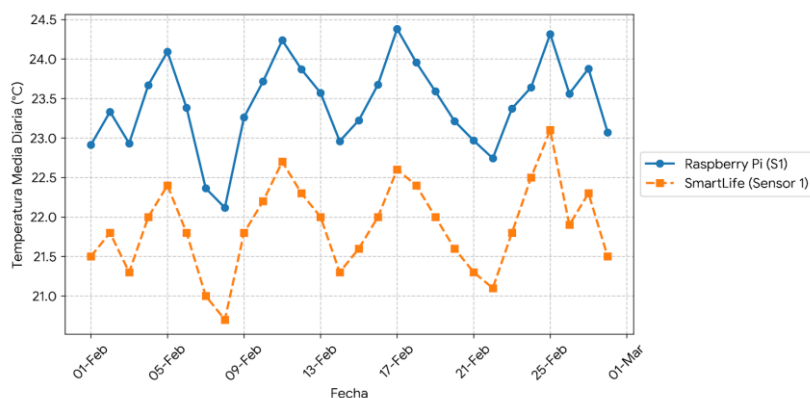


Figura 4-1 Comparativa de temperaturas registradas por la red primaria y secundaria durante el mes de febrero.
Fuente: Elaboración propia

Tal y como se observa en la Figura 4-1, las curvas de temperatura registradas por el sistema primario (azul, placa Raspberry Pi) y por el sistema secundario (naranja, sensor tipo *SmartLife*) muestran una

evolución totalmente paralela, reproduciendo las mismas subidas y bajadas a lo largo de las semanas. Aunque existe una pequeña diferencia térmica constante entre ambas. Esta ligera discrepancia sistemática es inherente a la calibración de fábrica de cada dispositivo y a la ubicación exacta de los equipos de medición dentro de cada despacho. El hecho de que las curvas se comporten igual demuestra que el sistema principal ha adquirido los datos de forma correcta. Esto confirma que los datos obtenidos son totalmente válidos para llevar a cabo la calibración del modelo térmico. Aparte cabe destacar, que los fabricantes recomiendan ajustar los dispositivos y calibrarlos, de ahí la divergencia en las mediciones obtenidas.

Una vez corroborada la fiabilidad de las mediciones mediante esta validación cruzada, la decisión de priorizar la arquitectura de microordenadores (red primaria) como sistema principal de adquisición de datos se fundamenta en dos grandes pilares técnicos. En primer lugar, por la superior fiabilidad y precisión metrológica de las sondas de esta red, las cuales ofrecen una menor tolerancia de error y mayor rigor científico en comparación con los sensores genéricos integrados en los dispositivos domóticos de la red secundaria. En segundo lugar, por su mayor robustez en la gestión de la información. A diferencia de los equipos comerciales, que dependen estrictamente de la conexión a internet y de servidores en la nube para guardar el historial, el sensor DHT22 opera como un sistema de adquisición local, almacenando la información de manera local en su tarjeta de memoria SD, evitando cualquier pérdida de información ante posibles cortes de red en las instalaciones del CUD-ENM.

4.1.2 Evolución térmica global de la infraestructura

Una vez comprobada la fiabilidad de la monitorización mediante la validación cruzada descrita en el apartado anterior (donde se evidenció que ambos equipos registraban de manera idéntica las fluctuaciones térmicas), se procede a analizar la evolución térmica global de la infraestructura utilizando los datos registrados por parte del sistema de adquisición de datos principal.

Se han procesado de forma conjunta los datos de los 8 microordenadores desplegados por el edificio. La Figura 4-2 representa la evolución de las temperaturas medias horarias de cada zona térmica, así como la curva de la temperatura media global del inmueble (representada por la línea negra de mayor grosor) durante la totalidad de la campaña de medición, comprendida entre el 21 de enero y el 5 de marzo de 2026.

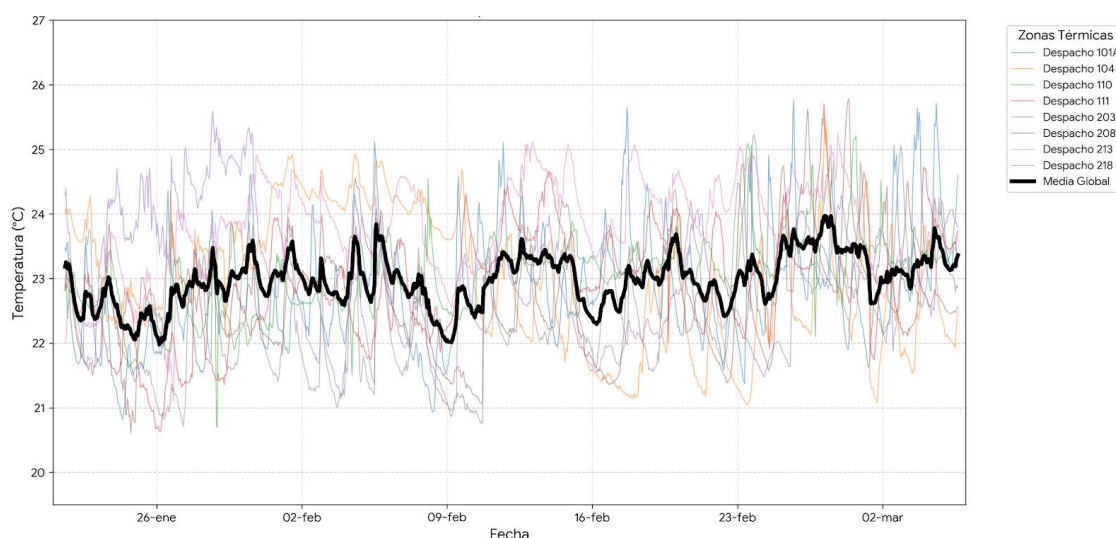


Figura 4-2 Evolución térmica horaria de los 8 despachos monitorizados con la red primaria y media global durante la fase de monitorización. Fuente: Elaboración propia

Tal y como se observa en la Figura 4-2, las curvas correspondientes a las distintas estancias siguen un patrón de comportamiento prácticamente idéntico. Aunque existen ligeras divergencias térmicas entre los despachos, la tendencia general confirma que el edificio responde termodinámicamente como un

conjunto unificado ante las variaciones meteorológicas. Estas variaciones de temperatura entre las zonas térmicas se deben fundamentalmente a dos factores. En primer lugar, a la orientación geográfica, estando los despachos situados en la fachada norte (despachos impares) más expuestos a las inclemencias meteorológicas frente a los de la cara sur. En segundo lugar, al comportamiento de los propios usuarios, ya que cada despacho dispone de termostatos individuales que permiten al personal docente regular las condiciones de confort térmico según sus preferencias personales. Este último factor es el más determinante en la temperatura final de cada despacho, especialmente durante la jornada laboral puesto que mediante la regulación de estos termostatos se regula la entrada de aire mediante los *fancoils* a cada despacho.

Por otra parte, destaca la notable estabilidad de la temperatura media global de la infraestructura, oscilando en una franja de entre los 21 °C y los 25 °C de media, algo inusualmente elevado para el periodo invernal. Estos elevados registros son consecuencia directa del constante funcionamiento del sistema HVAC y del elevado aporte de las cargas térmicas internas (equipos informáticos, iluminación y ocupación), que disipan una gran cantidad de calor al ambiente, especialmente durante la jornada laboral.

Finalmente, cabe destacar la presencia de los valles en la geometría de las curvas, los cuales revelan la posición temporal de los fines de semana. Durante estos periodos de inactividad, en los que no hay cargas internas, la temperatura interior experimenta un enfriamiento suave y progresivo hasta la primera hora del lunes. Este fenómeno evidencia empíricamente la elevada inercia térmica de los cerramientos del edificio, los cuales actúan como un acumulador que retiene la energía recibida durante la semana y la libera paulatinamente, amortiguando la oscilación térmica. Destacar que, la bomba de calor que tiene el sistema HVAC, está en funcionamiento constantemente, incluidos festivos y fines de semana.

4.1.3 Análisis del comportamiento higrométrico

Complementando el estudio térmico, resulta fundamental analizar la evolución de la humedad relativa dentro de la infraestructura. Como se ha mencionado en capítulos anteriores, la ubicación del edificio del CUD-ENM a escasos metros de la ría de Pontevedra condiciona significativamente esta variable, influyendo de manera directa tanto en el confort de los usuarios como en la demanda energética.

Siguiendo la misma metodología que en el análisis de temperaturas, la Figura 4-3 muestra los registros de humedad relativa de los 8 equipos del sistema de adquisición de datos principal y la media global resultante (negro). Además, se han representado en color rojo los límites de confort higrométrico que establece el RITE (IT 1.1.4.1.2) para el periodo invernal, los cuales se sitúan entre el 40 % y el 50 %.

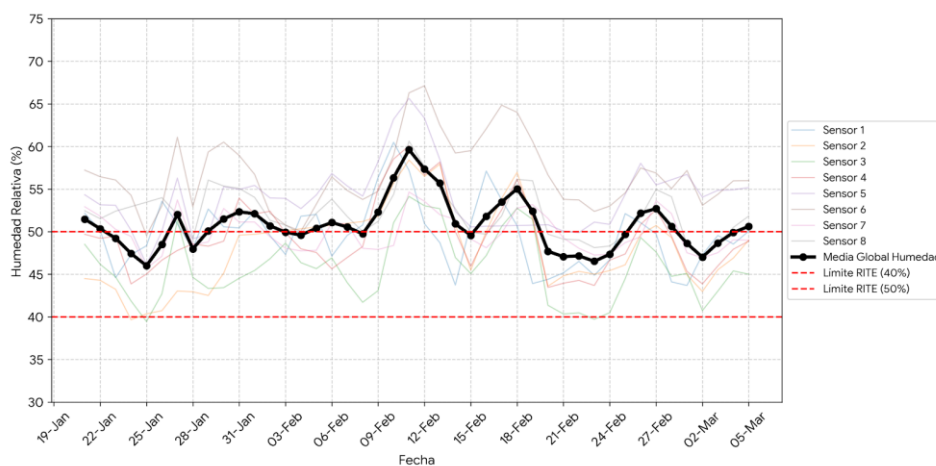


Figura 4-3 Evolución de la humedad relativa de los 8 despachos monitorizados con la red primaria y media global durante la fase de monitorización. Fuente: Elaboración propia

Tal y como se observa en la Figura 4-3, la humedad relativa media se mantiene en valores altos, con un promedio del 50,7 % y picos que rozan el 60 %. Esto supone que, durante casi toda la medición, el edificio está por encima del límite superior recomendado del 50 % que marca el RITE para la época del año en la que se desarrolla la fase de monitorización.

Este exceso de humedad se debe a la clara influencia del ambiente marino exterior. Desde un punto de vista técnico, este factor es clave, ya que obliga al sistema HVAC a trabajar más para procesar la carga latente del aire, lo que aumenta el consumo energético.

4.2 Evaluación térmica del modelo base sin calibrar

4.2.1 Comportamiento del modelo en régimen de oscilación libre y validación de la inercia térmica

Una vez configuradas las condiciones de contorno y verificado el correcto funcionamiento computacional de *EnergyPlus*, resulta imperativo comprobar la coherencia termodinámica de los resultados obtenidos. El objetivo de esta fase es analizar la respuesta pasiva del edificio frente a las sollicitaciones externas e internas en ausencia de sistemas de climatización (HVAC). En consecuencia, se simula el modelo en régimen de flotación térmica, permitiendo que la temperatura interior oscile libremente en función de dichas cargas, sin la intervención de equipos activos ni consignas de control que regulen el ambiente.

Una vez llevada a cabo la simulación, los datos y gráficas obtenidos confirman que el edificio se comporta de forma lógica bajo el régimen de oscilación libre, tal y como se observa en la Figura 4-4. A lo largo del periodo de medición se registra una temperatura máxima en el interior de 22,1 °C y una mínima de 9,7 °C, quedando la media fuera de lo que se considera zona de confort de acuerdo con el RITE.

No obstante, mediante la Figura 4-4 también se comprueba que, una vez hay cargas térmicas en el edificio durante la jornada laboral (a partir del 10 de enero), durante la noche la temperatura en el interior se estabiliza alrededor de los 13 °C - 15 °C, confirmando de este modo la alta inercia térmica del edificio y evitando una caída más exagerada que podría llegar a igualarse con la temperatura exterior. Asimismo, cabe destacar que los primeros días del mes de enero la temperatura de oscilación es considerablemente inferior puesto que, al tratarse del periodo vacacional correspondiente a Navidad, no hay cargas térmicas de ningún tipo en el interior del edificio, siendo este por tanto mayoritariamente influenciado por las condiciones meteorológicas externas.

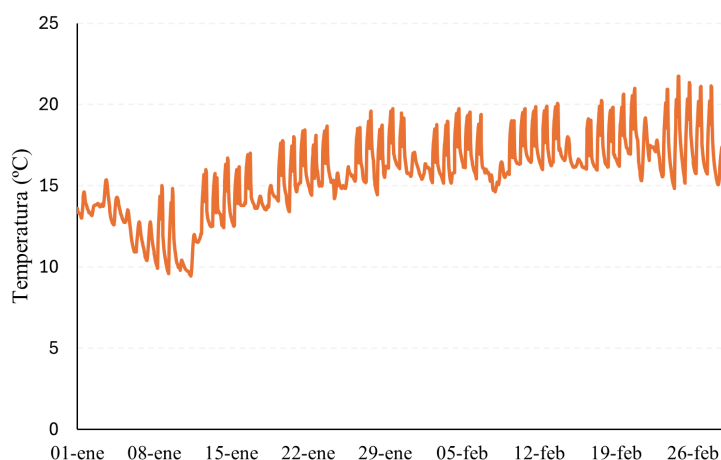


Figura 4-4 Evolución de la temperatura media en régimen de oscilación libre. Fuente: Elaboración propia

Precisamente, con el fin de evaluar este comportamiento pasivo y la capacidad protectora de la envolvente de forma detallada, resulta imperativo comparar la evolución de la temperatura interior frente

a la exterior. En la Figura 4-5 se representa esta comparativa para los meses de enero y febrero del 2026. En ella se aprecia de forma evidente el efecto de la inercia térmica de las instalaciones del CUD-ENM: mientras que la curva de temperatura exterior presenta fluctuaciones diarias marcadas, con picos pronunciados y caídas significativas durante la noche, la temperatura interior muestra un perfil notablemente más estable.

Este contraste permite validar visualmente dos propiedades termodinámicas fundamentales de la envolvente arquitectónica:

El amortiguamiento térmico. La amplitud de la onda térmica (la diferencia entre la temperatura máxima y mínima diaria) se reduce en el interior del edificio.

El desfase temporal. El instante en el que se registra el pico máximo de temperatura interior ocurre con cierto retraso respecto al pico máximo exterior, debido al tiempo que tarda el calor en atravesar los cerramientos.

Ambos factores confirman el adecuado comportamiento pasivo del modelo, demostrando que la envolvente simulada actúa de manera eficaz como barrera y filtro frente a las severas variaciones climáticas exteriores.

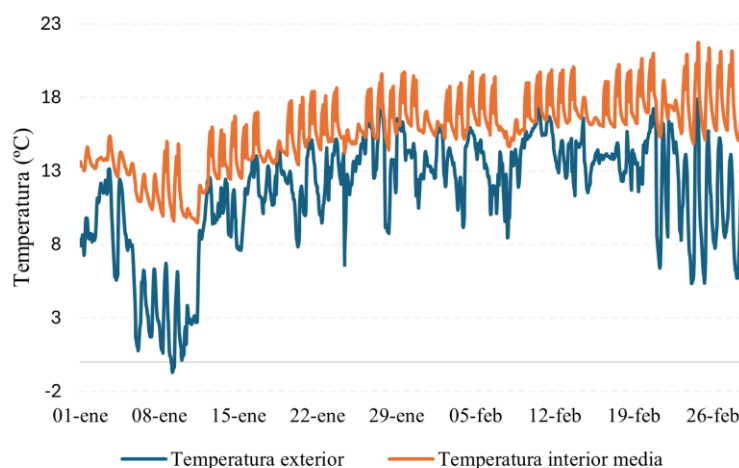


Figura 4-5 Comparativa horaria de la temperatura exterior frente a la interior en régimen de oscilación libre.
Fuente: Elaboración propia

4.2.2 Respuesta del modelo con sistemas HVAC activos

Una vez validado el modelo en régimen de oscilación libre en el apartado anterior, resulta necesario comprobar si el edificio presenta una respuesta termodinámica lógica ante los cambios provocados por la entrada en funcionamiento de los sistemas HVAC. Esta comprobación se lleva a cabo mediante dos vías complementarias: por una parte, se verifica que la temperatura interior alcanza el punto de consigna en los horarios establecidos, y, por otra parte, se corrobora que dicha estabilización térmica se corresponde de manera coherente con la demanda energética exigida al edificio en esa misma franja horaria.

En primer lugar, se realiza la comprobación del perfil de temperaturas. Tal y como era de esperar al activar los sistemas HVAC, el rango de oscilación térmica varía considerablemente respecto al modelo con régimen de oscilación libre (Figura 4-5). Como se comprueba mediante la Figura 4-6, durante los horarios de ocupación de los días laborables la temperatura se estabiliza en los 22 °C. Esta estabilización lineal se debe a la utilización del modo *Ideal Air Loads System* de *EnergyPlus*, el cual inyecta energía de forma instantánea para contrarrestar las pérdidas y mantener la temperatura de consigna seleccionada. Asimismo, se observa que, durante los periodos nocturnos de inactividad de la calefacción, a partir del

reinicio de las clases el día 10 de enero, la temperatura interior ya raramente desciende por debajo de los 15 °C.

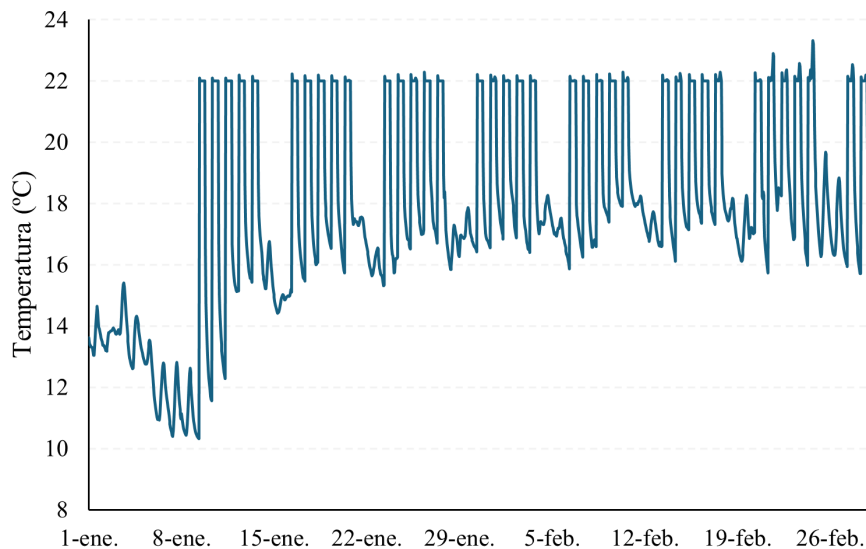


Figura 4-6 Evolución de la temperatura con el sistema de calefacción activo. Fuente: Elaboración propia

En segundo lugar, establecer y mantener una temperatura interior de confort, forzando al edificio a alejarse de su equilibrio térmico natural, conlleva inevitablemente un esfuerzo por parte de los sistemas HVAC. Para comprobar este aporte, se ha recurrido a la gráfica de demanda energética (véase la Figura 4-7).

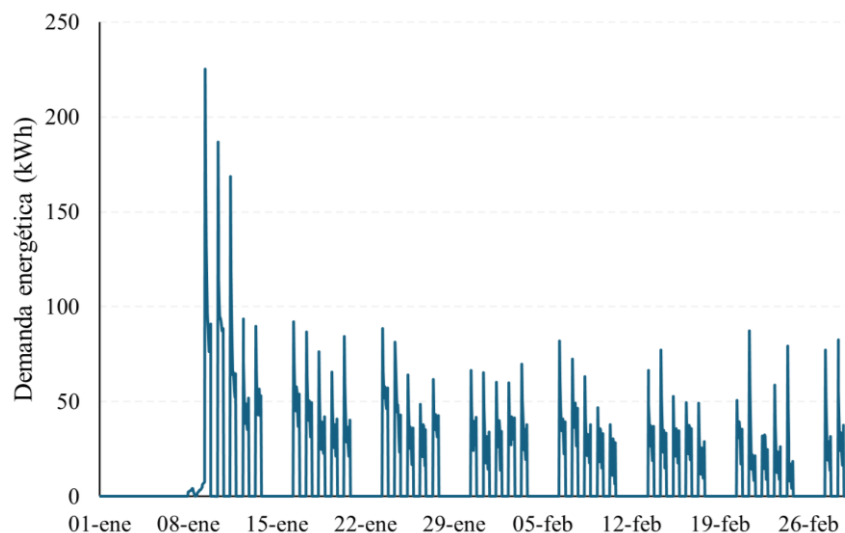


Figura 4-7 Demanda energética media del sistema de calefacción. Fuente: Elaboración propia

Con esta gráfica se corrobora que el mantenimiento de los 22 °C durante el horario lectivo no supone un estado de equilibrio natural a nivel termodinámico para el edificio, sino que requiere de una inyección continua de energía. Al comparar ambas gráficas, se hace evidente la correlación directa y proporcional existente entre las horas en las que la temperatura se mantiene a 22 °C en la Figura 4-6 y la aparición de los picos de demanda energética en la Figura 4-7.

Como culminación a este análisis, y con el objetivo de validar el comportamiento termodinámico del edificio a nivel global, se ha ampliado el estudio para evaluar la demanda energética mensualizada a lo largo de un año completo (véase la Figura 4-8). Esta perspectiva macroscópica permite constatar que

el modelo computacional reacciona de manera lógica frente a las variaciones meteorológicas. Tal y como se observa, los meses de invierno presentan un claro dominio de la demanda de calefacción, mientras que en la época estival el sistema invierte su carga térmica para satisfacer las necesidades propias de estos meses mediante el sistema de refrigeración.

Por otra parte, cabe destacar el comportamiento del modelo durante los meses de entretiempo, tomando como claro ejemplo el mes de mayo. En este periodo, la demanda energética es prácticamente nula. Esto se debe a que las condiciones meteorológicas exteriores, combinadas con las ganancias térmicas internas, permiten que la temperatura de los espacios fluctúe de manera natural dentro de la banda de confort térmico (22 °C - 27 °C). Por consiguiente, el edificio opera en régimen de oscilación libre, sin requerir la intervención de los sistemas HVAC y suponiendo un claro ahorro energético.

Finalmente, resulta especialmente destacable también el comportamiento reflejado durante el mes de agosto, donde la demanda energética es nula. Este resultado confirma que la configuración de los calendarios operativos (*schedules*) introducidos en el modelo refleja con precisión la realidad operativa del centro, el cual se encuentra cerrado este periodo y, en consecuencia, los sistemas HVAC no entran en funcionamiento.

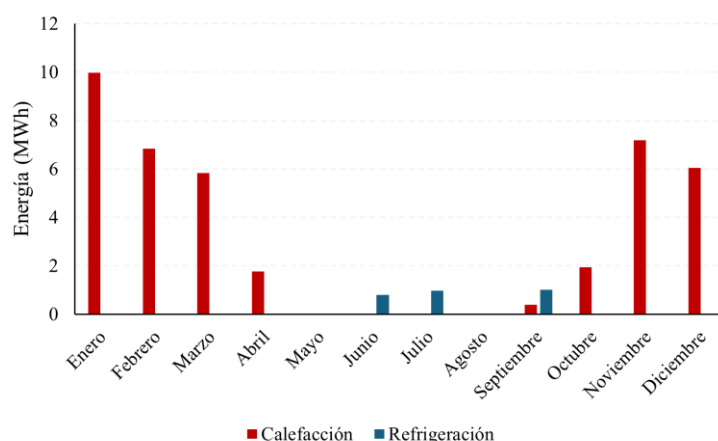


Figura 4-8 Demanda energética simulada mensual del edificio del CUD-ENM durante el año 2026.
Fuente: Elaboración propia.

De este modo, teniendo el conjunto de las gráficas analizadas, se pueden asegurar, que, entre otras, las siguientes exigencias que todo modelo térmico debe cumplir son:

- El sistema de calefacción/refrigeración tiene establecido correctamente sus horarios y modos de funcionamiento.
- El modelo térmico es capaz de cuantificar correctamente la demanda energética anual.
- El modelo debe tener en cuenta que el edificio no está perfectamente aislado, sino que tiene pérdidas energéticas que deben ser compensadas por los sistemas HVAC. Siempre y cuando no sea posible a través del conjunto de las cargas térmicas internas, meteorología y arquitectura conseguir la temperatura deseada.

4.2.3 Cuantificación del error inicial $CV(RMSE)$

El modelo térmico inicial presenta desviaciones respecto al comportamiento real debido a las aproximaciones asumidas durante su diseño geométrico y constructivo. Para mitigar esta divergencia, se ejecuta la calibración del Gemelo digital tomando como patrón de referencia la base de datos experimental obtenida por la red primaria. Tal y como se fundamentó previamente en los capítulos metodológicos, este proceso iterativo, automatizado mediante el algoritmo *GenOpt*, busca minimizar la

Función Objetivo evaluando el grado de ajuste a través del indicador estadístico de error horario CV(RMSE) exigido por la normativa ASHRAE y la IPMVP.

Por ello, habiendo finalizado la geometría y ajustado todos los parámetros de acuerdo con la documentación disponible, se procede a realizar una primera simulación preliminar (tras 4 semanas de fase de medición), la cual arroja un error medio del 24,58 % entre las 8 zonas térmicas (véase la Figura 4-9), que equivalen a los 8 despachos en los cuales se estuvieron recopilando las mediciones (véase la Figura 3-7 y la Figura 3-8). De acuerdo con la *ASHRAE Guideline 14: Measurement of Energy, Demand, and Water savings* [28], el error final para considerar que un modelo está correctamente calibrado es un 30 %, sin embargo, el protocolo internacional más exigente en esta materia, que es el IPMVP (por sus siglas en inglés: “*International Performance Measurement and Verification Protocol*”), establece en su *Option D: Best applications* que el CV(RMSE) debe ser inferior al 20 % [39]. En consecuencia, con el fin de cumplir con los más altos protocolos de exigencia se va a tratar de disminuir el error lo máximo posible, pero teniendo como objetivo primario disminuirlo del 20 %.

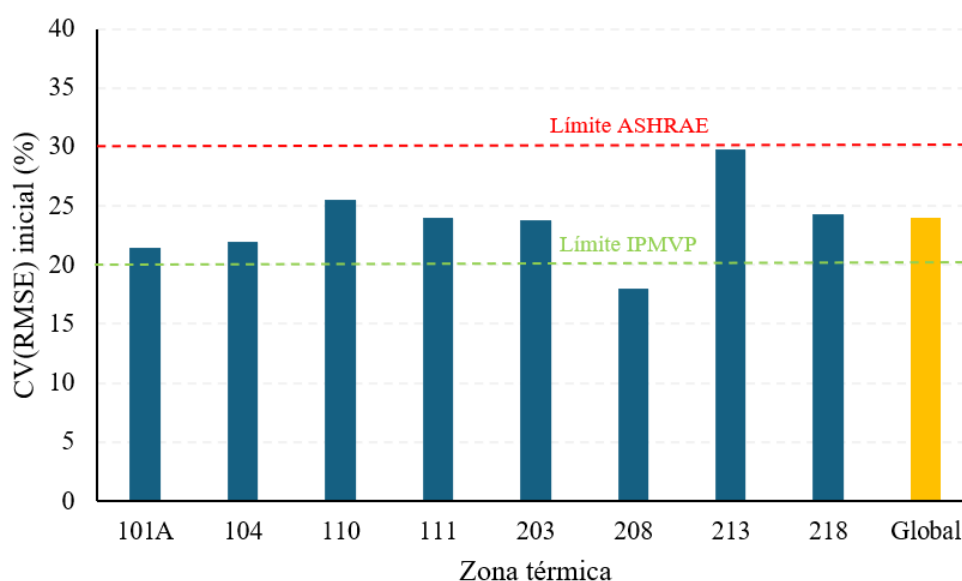


Figura 4-9 Cálculo del error medio CV(RMSE) inicial (4 semanas). Fuente: Elaboración propia

A pesar de lo expuesto anteriormente, finalmente se toma la decisión de prorrogar la fase de medición con el fin de tener un modelo calibrado lo más completo posible. Esta decisión tiene un impacto directo en el error inicial del modelo.

Como bien se ha introducido, la propuesta inicial de medición era de 4 semanas con los sensores instalados, y tras dicho periodo, se realiza una primera comprobación que arroja un error inicial medio del 24,58 %. Sin embargo, con el fin de dotar al modelo calibrado de un mayor rigor científico y aplicabilidad real, se amplía esa ventana de medición hasta las 6 semanas. Periodo tras el cual se realiza una nueva comprobación, obteniendo ahora un nuevo error inicial medio de todas las zonas del 31,84 % (véase la Figura 4-10).

Este incremento en el error inicial no debe interpretarse, bajo ningún concepto, como un retroceso en el proyecto. Por el contrario, constituye un indicador de robustez que avala la fiabilidad de la metodología de calibración. Dicho aumento se justifica por la menor variabilidad meteorológica inherente a un periodo de cuatro semanas frente a uno de seis; al presentar unas condiciones de contorno más estáticas, el ajuste matemático del modelo resulta artificialmente más sencillo. En este sentido, la inclusión de dos semanas adicionales de monitorización supuso un reto técnico al introducir fuertes fluctuaciones atmosféricas. Superar este desafío dota al modelo de una fiabilidad superior, demostrando su capacidad para adaptarse a la alta variabilidad real del clima.

Este cambio de rumbo hacia un escenario más exigente garantiza que el proceso de calibración del modelo no esté sesgado por un único periodo con unas condiciones definidas. El propósito fundamental de este TFG no radica en el sobreajuste matemático del algoritmo (*overfitting*) para forzar un error nulo irreal, sino en desarrollar un Gemelo digital robusto y termodinámicamente coherente. Por ello, es clave asegurar que el modelo final sea capaz de predecir el comportamiento termodinámico del edificio en cualquier época del año y bajo condiciones variopintas, pudiendo ser así de aplicabilidad real las medidas de ahorro energético que se propondrán en capítulos posteriores.

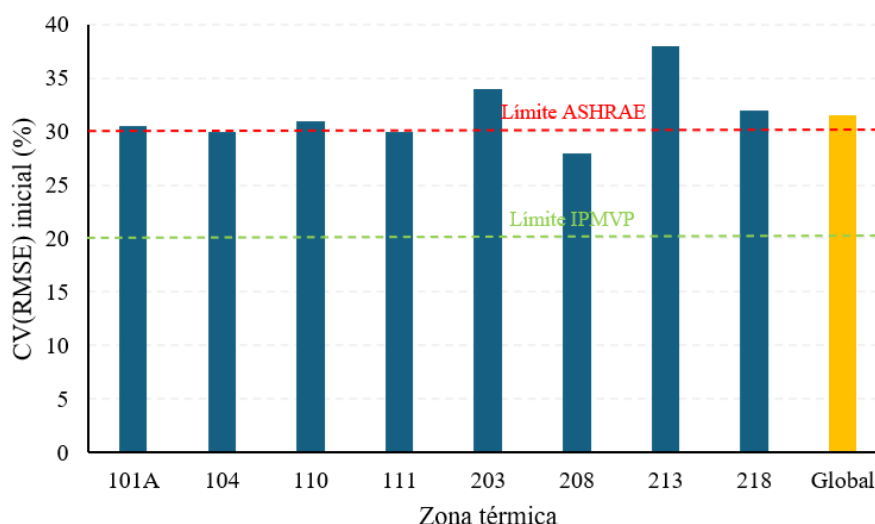


Figura 4-10 Cálculo del error medio CV(RMSE) inicial (6 semanas). Fuente: Elaboración propia

4.3 Calibración secuencial y ajuste del modelo

Tras efectuar un análisis preliminar sobre un amplio espectro de parámetros susceptibles de minimizar el error, se ha optado en última instancia por aquellas variables de mayor impacto en el modelo, tal y como se detalla en el *Capítulo 3*. Independientemente de los resultados estadísticos que pudieran derivarse de la alteración de otras variables o de la ampliación de sus rangos límite, se ha priorizado en todo momento la coherencia física de la calibración. Por consiguiente, se ha restringido estrictamente la adopción de valores irreales o carentes de justificación empírica, evitando así forzar un ajuste numérico que, si bien facilitaría la reducción del error, desvirtuaría el comportamiento termodinámico real de la infraestructura.

4.3.1 Calibración de las consignas de los termostatos

En la fase inicial de la calibración se aborda el parámetro que más condiciona la demanda energética del edificio dada su influencia en el comportamiento termodinámico del edificio: la temperatura de la calefacción durante el horario laboral (“%Tempcalef%” en la simulación de acuerdo con el parámetro empleado en *GenOpt*). Dentro de *EnergyPlus*, esta variable rige los momentos en los que es necesaria una mayor demanda energética para cumplir con los estándares de confort establecidos para el edificio. El análisis se realiza aislando el resto de las variables y únicamente en el horario laboral (de 08:00 - 19:00 de lunes a jueves, y en horario de 08:00 - 13:00 los viernes), garantizando de este modo que cualquier alteración en el error final es debida única y exclusivamente a las modificaciones realizadas en este parámetro.

Inicialmente, atendiendo únicamente a la normativa vigente [40] se define una temperatura de calefacción de 22 °C. Esta imposición puramente teórica penalizaba la precisión del modelo, trayendo consigo un error de base inicial del 31,84 %. Al igual que se procede con el resto de las variables que le siguen, el ajuste de esta variable para la calibración se realiza mediante el software de *GenOpt* con el

algoritmo *GPS Hooke-Jeeves*. Se configura un rango de posibles valores entre 19 °C y 24 °C, para garantizar que en ningún caso se pierde el sentido físico, y con un salto iterativo de 0,5 °C. Tras realizar diversas iteraciones, el programa refleja que 24 °C es el valor que más reduce la F.O.

La convergencia del valor final en 24 °C en lugar de los 22 °C iniciales supone una mayor aproximación a la realidad si se compara con la base de datos experimental, puesto que rara vez durante el periodo invernal en horario laboral los usuarios permiten (mediante la regulación de los dispositivos de apertura de los *fancoils*) que la temperatura alcance los 22 °C de media entre todas las zonas térmicas. Se recuerda que la temperatura es establecida por cada uno de los usuarios puesto que tienen a su disposición un dispositivo que permite regular la apertura del *fancoil* en cada despacho (zona térmica).

La intervención exclusiva sobre este parámetro ha supuesto una importante corrección, tal y como se había anticipado durante los ensayos preliminares. Tras la corrección propuesta por *GenOpt*, el error se ve reducido del 31,84 % inicial a un 30,05 %, lo cual supone una mejora de 1,79 puntos porcentuales con una única variable.

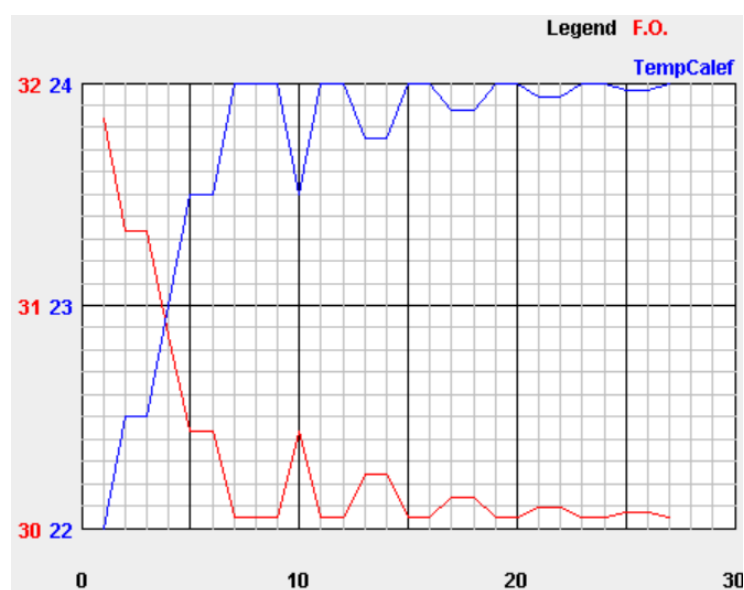


Figura 4-11 Evolución de la F.O. frente a la variación de la temperatura de la calefacción.
Fuente: Elaboración propia

Mediante el análisis de la Figura 4-11 se comprueba lo anteriormente expuesto. La Función objetivo (rojo) disminuye a medida que la temperatura de la calefacción (en azul y denominada “TempCalef”) aumenta, llegando al máximo establecido mediante el script introducido en el documento *comandos.txt* y explicado previamente en el trabajo. Una vez alcanzada esa temperatura con ese grado de error asociado, realiza diversas reducciones de la longitud del intervalo (*Iterations step reduced cost* definido en *comandos.txt* de acuerdo con *Python*) para ajustar lo máximo posible el resultado final.

4.3.2 Calibración de las infiltraciones de aire del edificio

Tras establecer el valor calibrado de los termostatos en el apartado anterior, el siguiente paso se centra en las infiltraciones naturales de aire del edificio (% *InfACH* %), críticas en la determinación de la demanda energética de la infraestructura. En *EnergyPlus*, esta variable se define en el apartado de cada zona térmica denominado: *ZoneInfiltration:DesignFlowRate*.

Su destacado impacto desde el punto de vista termodinámico radica en su carácter continuo a lo largo de todos los días del año. Además, en Marín, debido a la temperatura y humedad externa, este parámetro debe definirse meticulosamente dado que su valor supondrá un gran impacto en el resultado final.

Previo al ajuste, el modelo tenía un valor de 0,7 ACH, puesto que según los estándares ASHRAE [28] es el valor que se debe asumir cuando no se dispone de ensayos. Se establece entonces una horquilla de valores para las infiltraciones del edificio de entre 0,1 ACH (muy hermético) hasta 1,0 ACH (muy permeable), teniendo un intervalo de 0,1 en cada iteración. Durante la simulación, *GenOpt* pronto descarta la opción de aumentar la tasa de infiltración y se aprecia una clara relación inversamente proporcional entre la F.O. y la variable, convergiendo el valor en el mínimo establecido de 0,1 ACH como punto en el que el CV(RMSE) disminuye al mínimo (véase la Figura 4-12)

El descenso de la tasa de infiltración de aire propuesto por *GenOpt* se ajusta perfectamente a la realidad física del edificio. Anteriormente, ese 0,7 ACH exigía una elevada demanda energética para compensar esa elevada renovación del aire interior constante por parte del aire exterior. Sin embargo, tras diversas iteraciones el software concluye que la tasa de renovación de aire del edificio de forma natural es muy baja. Tanto es así que lo establece en 0,1 ACH, que es el mínimo de acuerdo con los parámetros exigidos en la iteración. Por tanto, el dato arrojado destaca la hermeticidad del edificio, lo cual está en consonancia con la realidad. A pesar de que, según los cálculos previos este parámetro no parecía influir tanto, el estudio aislado de este parámetro supone el mayor salto en cuanto a disminución de la F.O. se refiere. Esta disminución es causada por la eliminación de gran parte de las infiltraciones de aire exterior, permitiendo reducir la curva de demanda energética y que esta se ajuste más a la real.

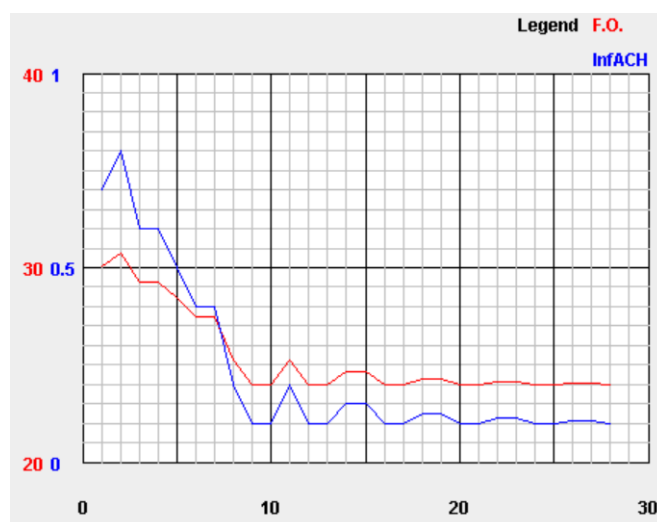


Figura 4-12 Evolución de la F.O. frente a la variación de las infiltraciones exteriores.
Fuente: Elaboración propia

El error inicial de base en esta iteración era de 30,05 %, y tras la convergencia de la tasa de infiltración (en azul y denominado *InfACH*) la F.O. disminuye hasta un 23,94 % final. Estos 6 puntos porcentuales de reducción reflejan la transcendencia termodinámica de este parámetro y las consecuencias que tiene su variabilidad.

4.3.3 Calibración de la capacitancia térmica

Una vez estabilizados los termostatos de la calefacción y la tasa de infiltración, el tercer paso del proceso de calibración se enfoca en la capacitancia térmica. Esta fase surge al observar cambios excesivamente rápidos de temperatura en los momentos de mayor demanda energética. Dicho comportamiento requirió un análisis detallado para su corrección mediante el fenómeno físico del desfase temporal.

Puesto que *EnergyPlus* asume por defecto que los espacios se encuentran vacíos, el modelo inicial no reflejaba la realidad del edificio del CUD-ENM, donde cada despacho cuenta con una carga considerable de mobiliario y material docente. Este conjunto de elementos añade una inercia térmica

extra que actúa como amortiguador, influyendo tanto en la temperatura final como en el tiempo necesario para alcanzarla.

Esta metodología se fundamenta en lo descrito por el manual técnico de *EnergyPlus* bajo el concepto de «Modelado Híbrido» o «Inverso» [41] (sección 13.3.3.2. *Zone capacitance multiplier*). En dicha documentación se detalla el uso del objeto *ZoneCapitanceMultiplier:ResearchSpecial* como herramienta para definir la capacidad real de almacenamiento de calor de una zona. Mientras que el valor por defecto de 1,0 contempla únicamente la capacitancia del aire, el incremento de este multiplicador permite representar la influencia de la “masa interna” (mobiliario, libros etc.) que no ha sido modelada geométricamente en el entorno 3D.

La aplicación de este enfoque permite emplear el multiplicador como un factor de “freno” térmico, evitando las oscilaciones bruscas de temperatura detectadas ante la incidencia de la radiación solar o la climatización. En última instancia, esta técnica asegura que el comportamiento térmico del aire en el modelo se ajuste con precisión a los datos experimentales registrados por los sistemas de adquisición de datos. Todo estos ajustes, están contemplados en el manual de *EnergyPlus* [19].

En cuanto a los resultados, el error inicial previo al estudio de esta variable era del 23,94 %. Aunque este valor ya resultaba asumible según la normativa ASHRAE [20], se procedió a disminuir el CV(RMSE) para intentar cumplir con el estándar IPMVP [39], que establece un límite más exigente del 20 %. Para la simulación, se estableció una horquilla entre 1,0 (sala vacía) y 10,0 (sala con alta densidad de mobiliario), con un intervalo de 0,2. La gráfica mostró una tendencia clara: a medida que aumenta la capacitancia térmica, disminuye el error, convergiendo finalmente en el límite superior del intervalo.

Este resultado confirma que el mobiliario del CUD, compuesto mayoritariamente por madera (material con elevada capacidad calorífica), es determinante para estabilizar los cambios de temperatura del aire interior. Asimismo, además de suavizar la curva durante el horario laboral, estos elementos evitan que la caída de temperatura nocturna sea tan exagerada como se mostraba en las fases iniciales del modelo. Por tanto, el impacto de esta variable es decisivo a nivel termodinámico para que el modelo represente de forma fidedigna la realidad del edificio.

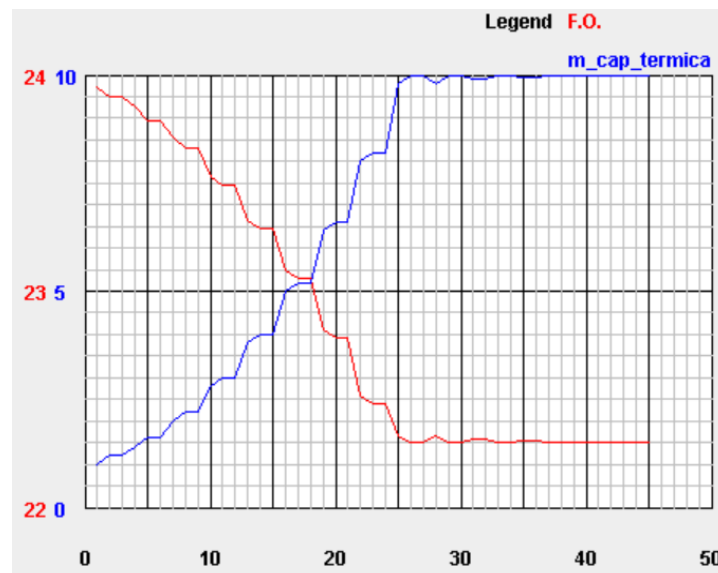


Figura 4-13 Evolución de la F.O. frente a la variación de la capacitancia térmica.
Fuente: Elaboración propia

El proceso de optimización (véase Figura 4-13) refleja una caída del error a medida que aumenta la capacitancia térmica, llegando a un CV(RMSE) mínimo de 22,29 % con la capacitancia térmica establecida en 10, que fue el máximo permitido en la optimización con el fin de preservar la coherencia termodinámica del modelo.

4.3.4 Calibración de la temperatura fuera del horario laboral (lunes-viernes)

Una vez calibradas y validadas las tres primeras variables, al realizar una comparación entre la temperatura de la simulación y la real medida por los sensores se observa similitud dentro del horario laboral pero una clara divergencia fuera del mismo. El modelo digital tiende a enfriarse rápidamente a partir de las 19:00 los días laborales o en días no laborales. Con el fin de aproximar la simulación y la realidad lo máximo posible, se hace uso de la herramienta de los termostatos en los horarios de *EnergyPlus* (*defecto 2*, *Defecto 3* y *Defecto 6*). Estos horarios son los correspondientes a los días de entre semana fuera de la jornada laboral de 08:00 - 19:00. El uso de esta herramienta se justifica por el hecho de que es un método sencillo de simular la inercia térmica y capacidad calórica de la envolvente térmica que tiene la instalación real.

Inicialmente, la temperatura de seguridad del edificio (a partir de la cual entraban en funcionamiento los *fancoils*) eran 10 °C, y con ello se tenía un error inicial de 22,29 %. Sin embargo, se observa en la base de datos experimental que la temperatura rara vez desciende de los 21,5 °C - 22 °C fuera del horario laboral de lunes a viernes, y por ello se decide establecer como rango de búsqueda para el proceso de optimización entre los 14 °C y los 22 °C. De inicio, se parte de 16 °C y se realiza la optimización con un error inicial del 20,84 %, lo cual ya suponía una disminución de dos puntos porcentuales respecto al resultado final tras el ajuste de la capacitancia térmica. Tras diversas iteraciones, *GenOpt* pronto encuentra la tendencia a seguir puesto que rápidamente desecha la idea de mantener la temperatura baja. Cada incremento de temperatura supone una disminución del error, convergiendo finalmente en los 22 °C, que es el límite superior establecido.

Esto es debido en gran parte a la elevada inercia térmica que tiene el edificio, como se ha venido demostrando a lo largo del trabajo. La envolvente actúa como un volante térmico, acumulando energía en forma de calor a lo largo del día (especialmente durante la jornada laboral aprovechando el uso de la calefacción) y la libera durante el resto del día, evitando de este modo una brusca caída de las temperaturas. Asimismo, aparte del mobiliario, también hay equipos electrónicos y servidores que permanecen encendidos todo el día y también aportan energía en forma de calor al entorno, favoreciendo esa suavidad en la curva de la temperatura de la que se hablaba previamente. Por otra parte, como ya se introdujo previamente la bomba de calor está en constante funcionamiento las 24 horas del día, inyectando energía en forma de calor si las condiciones de temperatura en el interior lo requieren.

La calibración de esta variable es el hito más importante de esta fase, puesto que ha demostrado ser un factor determinante para que la simulación y la realidad se ajusten por debajo del 10 % de error. Como se puede observar en la Figura 4-14, la F.O. y la temperatura fuera del horario laboral son inversamente proporcionales. Mientras la temperatura (curva azul) asciende partiendo desde los 16 °C iniciales y estabilizándose en los 22 °C, el error realiza el proceso inverso. En esta convergencia, cabe destacar como se pueden apreciar las oscilaciones locales a partir de la décima iteración, con el fin de proporcionar el resultado más ajustado posible una vez converge definitivamente. El CV(RMSE) final obtenido es de un 8,49 %, superando la barrera del 10 % y cumpliendo holgadamente con los objetivos legales establecidos.

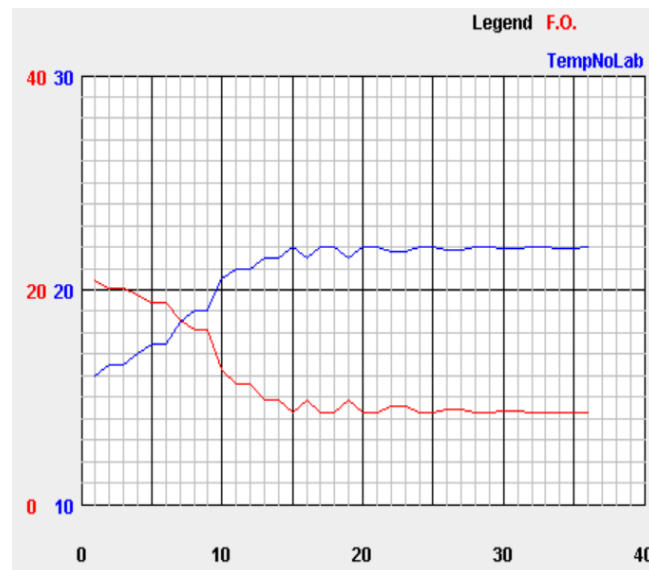


Figura 4-14 Evolución de la F.O. frente a la variación de la temperatura fuera del horario laboral (lunes-viernes).
Fuente: Elaboración propia

4.3.5 Validación matemática del modelo calibrado

A modo de síntesis de todo el proceso de optimización descrito en los apartados anteriores, la Tabla 4-1 recoge los cuatro parámetros termodinámicos y operacionales que han sido sometidos a calibración. Se detalla el valor teórico del que partía el modelo base, el rango de iteración permitido al algoritmo de *GenOpt* para mantener el sentido físico, y el valor final de convergencia que mejor aproxima el modelo a la realidad experimental.

Parámetro	Valor inicial	Rango de búsqueda	Valor final
T^a calefacción (°C) (Horario laboral)	22	19 – 24	24
Infiltraciones de aire (ACH)	0,7	0,1 – 1,0	0,1
Capacitancia térmica	1	1– 10	10
T^a seguridad (°C) (Fuera de horario de lunes a viernes)	10	14 – 22	22

Tabla 4-1 Resumen de la variación de parámetros durante la calibración secuencial. Fuente: Elaboración propia

Como consecuencia directa de la actualización de estos cuatro parámetros en el motor de cálculo, el modelo ha experimentado una drástica corrección en su desviación respecto a las mediciones reales de la red primaria. En la Figura 4-15 se ilustra gráficamente la evolución del CV(RMSE) a medida que se han ido integrando y validando estas variables en la simulación.

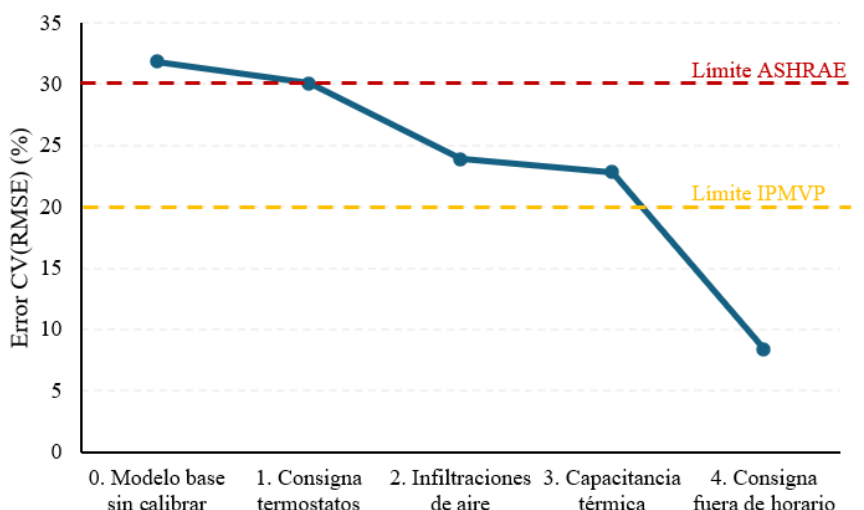


Figura 4-15. Evolución del error CV(RMSE) durante las distintas fases de calibración secuencial del modelo.
Fuente: Elaboración propia.

4.4 Validación gráfica del modelo térmico calibrado

Una vez definidos e implementados los nuevos parámetros de ajuste resumidos en la Tabla 4-1, es necesario comprobar visual y cuantitativamente la fidelidad del modelo térmico calibrado. Para ello, se ha llevado a cabo una superposición de los datos experimentales frente a los resultados horarios arrojados por la nueva simulación de *EnergyPlus* con las variables calibradas.

Como caso de estudio demostrativo de esta metodología de validación, se ha analizado en detalle el comportamiento del despacho 208. En la Figura 4-16 se expone la comparativa entre los registros empíricos registrados *in situ* por el sistema de adquisición de datos situado en el despacho 208 y la curva de temperaturas interiores simulada a través del modelo calibrado para esa misma zona térmica para el día 13 de febrero de 2026.

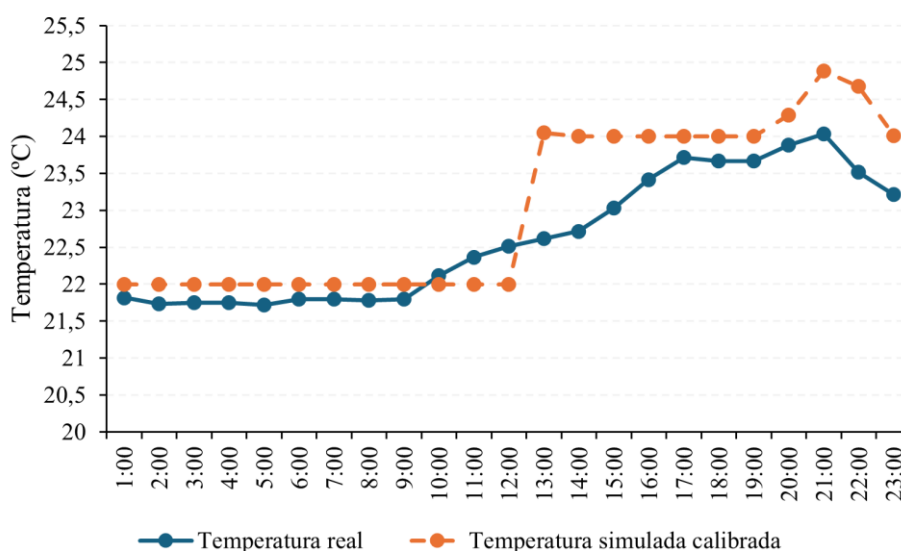


Figura 4-16. Comparativa entre las mediciones empíricas y las simuladas para el 13 de febrero de 2026 del despacho 208. Fuente: Elaboración propia

Como se puede apreciar en la Figura 4-16, una vez calibradas las variables definidas en el capítulo anterior, la curva de temperaturas simuladas se ajusta con gran precisión a la curva de temperaturas real. Cuantitativamente, y tal como se reflejó previamente en el proceso de optimización (realizado en el capítulo 3), este ajuste global se traduce en un CV(RMSE) del 8,49 %. Este valor consolida la validez del modelo, situándose por debajo de los límites máximos de tolerancia exigidos por los estándares internacionales de calibración energética para edificios (siendo el más restrictivo el IPMVP [39] con un 20 % de error máximo permitido).

4.5 Demanda energética anual del modelo calibrado

Tras llevar a cabo el proceso de validación térmica, el modelo calibrado se establece como el "Modelo base" del edificio del CUD-ENM. Este modelo pasa a representar por tanto el comportamiento termodinámico real de las instalaciones de esta infraestructura, incluyendo sus perfiles ocupacionales, cargas internas y demás variables que influyen en el rendimiento térmico del edificio. Definir este escenario como punto de partida resulta indispensable para disponer de una referencia de consumo energético frente a la cual cuantificar el ahorro de las posteriores medidas de reducción del consumo energético.

Para evaluar el estado energético actual del inmueble, se simuló en *OpenStudio* un año meteorológico natural completo. La extracción de la demanda energética anual resultante se llevó a cabo mediante dos metodologías independientes con el fin de cruzar los resultados obtenidos por cada vía como medio de comprobación:

- Extracción directa de los valores globales presentados en la tabla de usos finales (*End Uses*) generada por *EnergyPlus* en su informe HTML (*eplusbl.htm*). Dado que este documento expresa la energía en Gigajulios (GJ), se aplicó el correspondiente factor de conversión a megavatios hora (MWh) ($1 \text{ GJ} = 0,27778 \text{ MWh}$).
- Sumatorio de las variables de salida horarias extraídas del archivo de resultados *eplusout.csv*. Mediante este método, se procesaron y acumularon las demandas sensibles de calefacción y refrigeración de todas las zonas térmicas del edificio, así como el consumo eléctrico de equipos e iluminación y el conjunto de las cargas internas, todo ello a lo largo de todo el año.

La comparativa entre ambos procedimientos arrojó resultados prácticamente idénticos, confirmando la fiabilidad de los resultados obtenidos. De este modo, en la Tabla 4-2 y la Figura 4-17 se desglosan los valores definitivos que caracterizan el perfil energético anual del modelo calibrado

Concepto	Demanda de energía (MWh/año)
Demanda de la calefacción	33,61
Demanda de la refrigeración	7,27
Consumo eléctrico (Iluminación y equipos)	35,45
TOTAL	76,33

Tabla 4-2 Resumen de la demanda energética anual del modelo calibrado. Fuente: Elaboración propia.

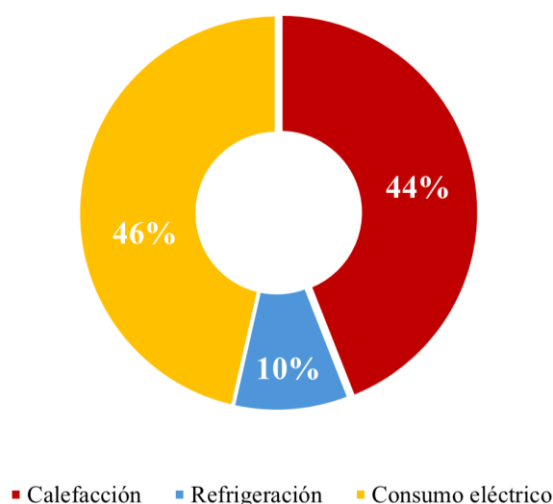


Figura 4-17 Distribución porcentual de la demanda energética anual del CUD-ENM por uso final.
Fuente: Elaboración propia.

Como se puede observar en los resultados de la simulación anual, el edificio del CUD-ENM presenta una clara dominancia de la demanda energética de calefacción respecto a la de refrigeración, la cual supone casi la mitad del requerimiento energético total. Este dato resulta coherente atendiendo a la ubicación geográfica del inmueble y, especialmente, teniendo en cuenta su calendario académico, puesto que los periodos de ocupación docente coinciden con los meses más fríos del año.

En conjunto, el edificio del CUD-ENM parte de una demanda energética total que asciende a 76,33 MWh/año. Este elevado valor invita a implementar soluciones de mejora orientadas a aumentar la eficiencia energética del inmueble. Por consiguiente, en el siguiente capítulo de este trabajo se empleará este modelo anual validado como herramienta predictiva para cuantificar, comparar y validar el ahorro energético derivado de diferentes medidas de ahorro energético.

4.6 Simulación de medidas de ahorro energético

El diseño y ajuste de un modelo del edificio CUD-ENM trasciende el hecho de estudiar el estado actual de la infraestructura. Tras el proceso de calibración y la validación conforme a los criterios de rigor estadístico exigidos por el protocolo IPMVP [39], el modelo deja de ser un simple diseño mediante CAD, y pasa a ser un campo de pruebas para realizar ensayos y modificaciones en la geometría o condiciones térmicas del edificio del CUD-ENM con el fin de probar su consumo y funcionamiento en distintas situaciones. Esta es una característica fundamental en la ingeniería actual, el contar con un Gemelo digital que permita en este caso simular Medidas de Ahorro Energético (MAE) sin ser puestas en funcionamiento en la realidad, dotando de este modo al profesional de una herramienta que le proporciona información muy útil ante posibles cambios a un coste prácticamente insignificante en comparación con el coste real que supondría aplicar esas medidas a modo de prueba.

Por ello, con el fin de aplicar dichas medidas y de este modo aumentar la eficiencia energética del edificio, se han planteado cuatro escenarios de intervención, que son los que se consideran más probables que se puedan llevar a cabo teniendo en cuenta la naturaleza de la instalación, minimizando cualquier afección al funcionamiento regular de la instalación y garantizando el confort del personal.

4.6.1 MAE 1: Ajuste y optimización del control termostático

En las infraestructuras de uso común por parte de varios usuarios, una de las mayores fuentes de ineficiencia energética es el ajuste incorrecto de los termostatos por parte de los usuarios desde un punto de vista de optimización energética. Puesto que cada persona tiene sus preferencias, la constante

manipulación de los equipos provoca ciclos irregulares de apertura y cierre de los *fancoils* de cada despacho. De este modo, se obliga al sistema a trabajar en ciclos intermitentes y cerca de sus máximos en algunos momentos de picos de demanda, provocan un gasto excesivo y a la vez evitable. Con el fin de erradicar esta problemática, se propone la implementación de una banda térmica de funcionamiento, teniendo como base la normativa RITE y la establecida por el propio Ministerio de Defensa.

Para dar cumplimiento a estas directrices se plantea que dicha banda de funcionamiento del sistema se establezca de tal modo que permita activar la calefacción durante el periodo invernal hasta alcanzados los 22 °C, y la refrigeración entre en funcionamiento hasta una vez alcanzados los 27 °C durante el periodo estival. El establecimiento de estas dos temperaturas tiene una justificación científica además de la legal, y es que el aumento/disminución de un único grado la temperatura supone un incremento de hasta el 7 %, según indica el IDAE (Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía) en su *Guía práctica de la energía: Consumo eficiente y responsable* [40]. A pesar de los nuevos requisitos de temperatura establecidos, el modelo de Fanger sigue arrojando un índice de confort térmico entre -0,5 y +0,5 que eran los objetivos establecidos desde un inicio según lo establecido por la ASHRAE 55 [42].

Para evaluar y cuantificar el impacto de esta medida organizativa, se ha procedido a modificar los perfiles operacionales en *OpenStudio* (*Schedules*), limitando la temperatura de consigna de calefacción a 22 °C durante los periodos de ocupación, y manteniendo inalterada la consigna de refrigeración en los 27 °C estipulados por normativa y que era la ya establecida en el modelo calibrado. Tras ejecutar la simulación anual y procesar los resultados, se ha elaborado la comparativa mostrada en la Figura 4-18 frente al modelo base.

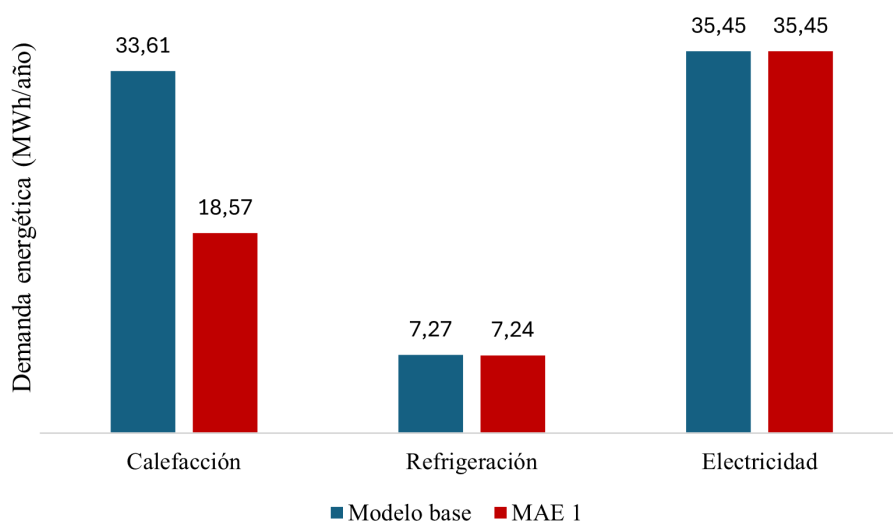


Figura 4-18 Comparativa de la demanda energética: modelo base frente a MAE 1. Fuente: Elaboración propia.

Tal y como se observa en la Figura 4-18, aplicar este control estricto sobre los termostatos reduce drásticamente la demanda de calefacción, logrando un ahorro de 15,04 MWh anuales (un 55 % menos frente a la situación original). La demanda de refrigeración apenas baja un 0,7 % (este parámetro no ha sido modificado), siendo este cambio relativamente insignificante debido, en gran medida, a la elevada inercia térmica del edificio. El consumo eléctrico, por su parte, se mantiene inalterado al no haber modificado tampoco los valores asociados a iluminación y equipos.

A nivel global, esta MAE 1 reduce el consumo total del edificio a 15,07 MWh/año, lo que supone un ahorro del 19,75 % respecto al modelo base.

4.6.2 MAE 2: Implementación de tecnología LED y sus consecuencias en las cargas térmicas

En la actualidad, desde la reforma acometida hace casi dos décadas, el edificio dispone de luminarias fluorescentes de diversas potencias como medio principal de iluminación, variando su disposición en función de la estancia. Con el objetivo de adecuar la instalación a las exigencias del Valor de Eficiencia Energética de la Instalación límite (VEEI lím.) establecido en el Documento Básico HE-3 del Código Técnico de la Edificación (CTE) [12], se propone la sustitución integral por tecnología LED. Esta actuación permitirá reducir considerablemente la densidad de potencia de iluminación (W/m^2) de los espacios.

Cabe destacar que esta sustitución presenta un impacto térmico bidireccional. Al reducir drásticamente la potencia eléctrica de las luminarias, disminuye también el calor que estas disipan al entorno en forma de cargas internas. En consecuencia, se prevé un ligero aumento de la demanda de calefacción durante el periodo invernal y, paralelamente, una reducción de la demanda de refrigeración en la época estival. A pesar de la penalización térmica en invierno, el balance global resulta ampliamente positivo. Además, los sistemas HVAC constituyen el método más eficiente, rápido y controlable para regular la temperatura de las zonas térmicas, resultando ineficiente depender del calor residual incontrolado emitido por las luminarias.

Para la evaluación de esta propuesta en el modelo de *OpenStudio*, se ha procedido a sustituir las definiciones de iluminación (*Lights Definitions*), estableciendo un estándar de alta eficiencia de 5 W/m^2 (introducido en forma de potencia total en cada zona térmica atendiendo a los m^2 de cada) en las zonas operativas, tomando como referencia el modelo base calibrado para analizar la medida de forma aislada.

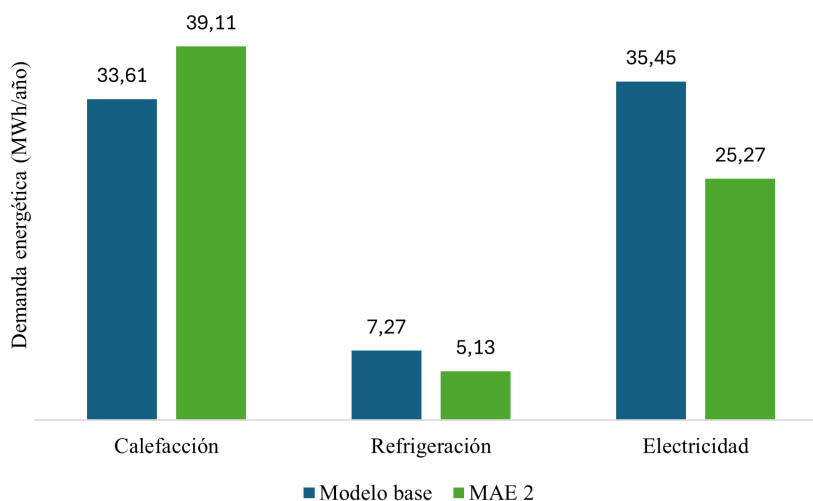


Figura 4-19 Comparativa de la demanda energética: modelo base frente a MAE 2. Fuente: Elaboración propia

Como se puede observar en la Figura 4-19, el ahorro más significativo se produce en el consumo eléctrico (luces y equipos), con una reducción de 10,18 MWh/año (disminución del 28,7 %). Este descenso de la carga interna tiene un efecto positivo inmediato en la época estival, reduciendo la necesidad de refrigeración en casi un 30 %.

No obstante, tal y como se previó, en invierno el sistema de calefacción debe compensar la pérdida de ese "calor gratuito" que aportaban las luminarias fluorescentes, incrementando su demanda en un 16 %. A pesar de este repunte de la calefacción, el balance global es netamente positivo para la instalación, logrando una reducción de la demanda energética total del 6,8 %.

4.6.3 MAE 3: Optimización de la envolvente acristalada mediante láminas de baja emisividad y control solar

Tras el análisis detallado de la envolvente térmica del edificio del CUD-ENM, se ha identificado que las ventanas constituyen los puntos de mayor transferencia energética. Actualmente, el edificio dispone de un doble acristalamiento estándar (4-6-4) con una transmitancia térmica $U = 3,3 \text{ W/m}^2\text{K}$ y un factor solar $g = 0,76$.

Dada la elevada demanda de calefacción detectada en el modelo base, se propone la instalación de láminas de alta tecnología (iguales o similares al modelo comercial *3M™ Thinsulate™ Climate Control Serie 75* [43]). Esta solución permite mejorar las prestaciones térmicas del vidrio existente sin necesidad de sustituir las carpinterías ni realizar ningún tipo de obra, instalándose directamente sobre la cara interior del cristal actual.

La elección de esta tecnología se basa en su capacidad para actuar de forma selectiva según la época del año:

- En invierno la capa de baja emisividad refleja el calor generado por el sistema de calefacción hacia el interior, reduciendo las pérdidas por conducción a través del vidrio.
- En verano permite el control solar bloqueando parte del espectro infrarrojo, reduciendo así las ganancias térmicas por radiación solar y aliviando la carga de los equipos de refrigeración.

Para la simulación en el Gemelo digital, se han actualizado los valores de los materiales de las ventanas, empleando los valores certificados por el fabricante para esta configuración y reflejados en la Tabla 4-3 [44]:

Parámetro	Ventana base	Ventana MAE3
Transmitancia térmica (U) ($\text{W/m}^2\text{K}$)	3,3	2,0
Factor solar (g)	0,76	0,51
Transmisión de luz visible (%)	81	66

Tabla 4-3 Comparativa de propiedades técnicas del acristalamiento. Fuente: Elaboración propia

Una vez introducidos estos nuevos datos en *OpenStudio*, los resultados muestran que esta medida resulta efectiva para reducir el gasto energético del edificio, tal como se observa en la comparativa de la Figura 4-20.

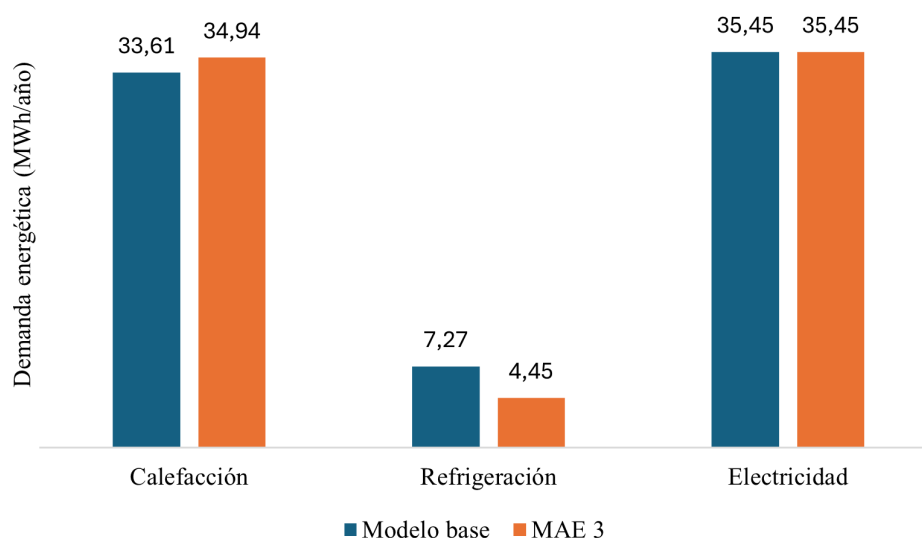


Figura 4-20 Comparativa de la demanda energética: modelo base frente a MAE 3. Fuente: Elaboración propia

La mayor beneficiada de esta modificación es la refrigeración, la cual experimenta una bajada del 38,7 % gracias a que la lámina filtra el calor del sol mucho mejor que el vidrio original.

En conclusión, con esta MAE 3 se consigue ahorrar un total de 1,85 MWh (reducción del 2 % anual respecto al modelo base) al año de energía térmica, a pesar de la ligera subida del consumo de calefacción. Un aspecto muy positivo de esta propuesta es que se puede llevar a cabo sin necesidad de realizar obras ni sustituir las ventanas actuales.

4.6.4 MAE 4: Mejora de la envolvente mediante Sistema de Aislamiento Térmico Exterior (SATE)

En esta cuarta MAE se ha continuado el estudio de la envolvente del edificio del CUD-ENM. El modelo digital revela que el muro de las fachadas actuales carece de un nivel de aislamiento necesario para hacer frente a la severidad del clima de la costa pontevedresa, provocando importantes fugas de energía.

Para corregir esta deficiencia, se plantea la aplicación de un Sistema de Aislamiento Térmico Exterior (SATE). Se ha optado por incorporar paneles de poliestireno expandido (EPS) de 0,08 m de espesor. Las principales ventajas de esta propuesta radican en su alta viabilidad constructiva.

Por un lado, minimiza las pérdidas térmicas invernales al envolver el edificio de forma continua, lo que permite eliminar los puentes térmicos de la estructura. Por otro lado, al instalarse por el exterior, no reduce la superficie útil de los despachos ni interrumpe la actividad normal de las instalaciones. Además, el revestimiento final replicará fielmente la estética actual.

A la hora de trasladar esta mejora al Gemelo digital mediante *OpenStudio*, se ha modificado la composición de los muros de las fachadas añadiendo las propiedades termodinámicas del nuevo material. Una vez ejecutada la simulación con esta nueva configuración, se ha obtenido un nuevo balance térmico cuyas variaciones de consumo respecto al escenario base quedan reflejadas a continuación en la Figura 4-21:

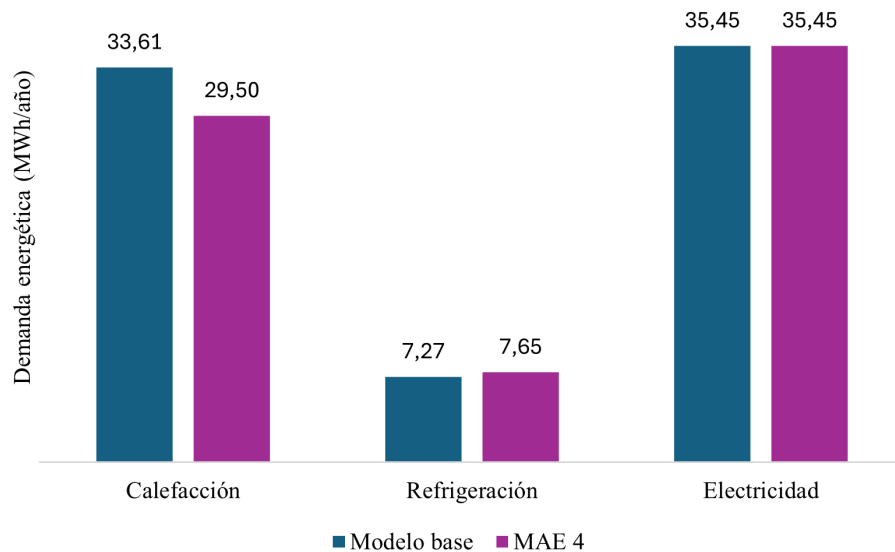


Figura 4-21 Comparativa de la demanda energética: modelo base frente a MAE 4. Fuente: Elaboración propia

Como se puede observar en la Figura 4-21, la simulación de esta medida refleja un impacto sumamente positivo en el balance energético de la instalación.

La principal mejora recae sobre la demanda de calefacción, donde la colocación del aislamiento logra un descenso del 12,28 % del consumo, lo que equivale a un ahorro de 4,11 MWh anuales. Esto confirma que revestir la fachada frena drásticamente la disipación del calor interno durante el invierno.

En definitiva, la MAE 4 propicia una disminución de 4,49 MWh en el consumo térmico anual (lo que representa una caída del 6 % sobre el gasto energético total del modelo base), confirmándose como una estrategia de rehabilitación altamente eficaz.

4.6.5 Escenario óptimo: implementación conjunta de las MAE

Una vez evaluada la viabilidad y el impacto individual de cada una de las Medidas de Ahorro Energético propuestas a lo largo de este capítulo, el paso definitivo consiste en analizar el comportamiento termodinámico del edificio al implementar todas las mejoras de forma simultánea.

La creación de este "Escenario óptimo" en el Gemelo digital es fundamental, ya que, en la física, y más concretamente en la termodinámica, los datos totales no son siempre un sumatorio de los individuales. Las medidas interactúan entre sí generando sinergias; por ejemplo, la reducción de la carga interna de calor al sustituir la iluminación compensa la mayor retención térmica lograda por el aislamiento, al mismo tiempo que los nuevos termostatos aprovechan la inercia del edificio mejorado.

Para llevar a cabo esta simulación global en *OpenStudio*, se ha configurado un modelo que integra las cuatro propuestas: la nueva temperatura de consigna a 22 °C (MAE 1), la implantación de iluminación LED (MAE 2), la mejora de las ventanas mediante la colocación de láminas (MAE 3) y el incremento de la resistencia térmica en los cerramientos mediante SATE (MAE 4).

Una vez ejecutada la simulación aplicada todas las medidas, se ha obtenido un nuevo balance térmico cuyas variaciones de consumo respecto al escenario base quedan reflejadas en la Figura 4-22:

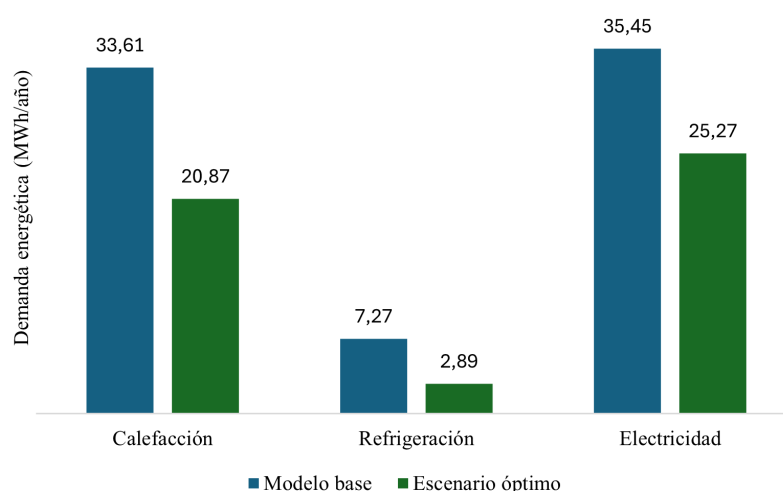


Figura 4-22 Comparativa de la demanda energética: modelo base frente a escenario óptimo. Fuente: Elaboración propia

Una vez simulado este nuevo escenario en *OpenStudio*, los resultados muestran que la combinación de las cuatro medidas resulta altamente efectiva. Al implementarse de forma simultánea, se generan sinergias entre los sistemas que superan el impacto individual de cada medida por separado, tal como se observa en la Figura 4-22.

En cuanto al consumo eléctrico, se destaca la sustitución por parte de la tecnología LED (MAE 2) que logra una reducción directa del 28,71 %.

Respecto a la calefacción, se consigue un ahorro del 37,9 %. Esto se debe principalmente a la mejora de la envolvente, gracias a las MAE 3 y 4. Tras la implementación de estas medidas, el edificio retiene el calor de forma mucho más eficiente. Asimismo, esta mayor inercia térmica permite que la optimización de la temperatura de consigna (MAE 1) funcione mejor.

Por otro lado, la refrigeración es el apartado que presenta una mayor mejora relativa, con una bajada del 60,28 %. Este descenso es el fruto directo de sumar una menor carga térmica interior, el bloqueo de la radiación solar en las ventanas y el mayor aislamiento de las fachadas.

En conclusión, la implementación conjunta de las cuatro MAE consigue ahorrar un total de 27,25 MWh/año. Esto supone una reducción global del 35,47 % sobre el consumo total del modelo base, logrando una mejora notable en la eficiencia energética del edificio de manera viable y garantizando en todo momento el bienestar térmico.

4.7 Análisis de viabilidad económica del escenario óptimo

Para finalizar el estudio de las MAE, resulta imprescindible cuantificar el impacto financiero que supondría la implementación del "Escenario óptimo". El sistema de climatización del edificio del CUD-ENM, basado en una bomba de calor aire-agua y una red de *fancoils*, implica que la totalidad del consumo térmico y lumínico depende de la red eléctrica.

Por ello, para el cálculo económico se ha tomado como referencia el precio medio del mercado eléctrico en España durante el año 2025, estableciendo un coste de 130 €/MWh. Bajo esta premisa, el ahorro económico se determina a partir del balance energético global, cuyos resultados se desglosan visualmente en la Figura 4-23:

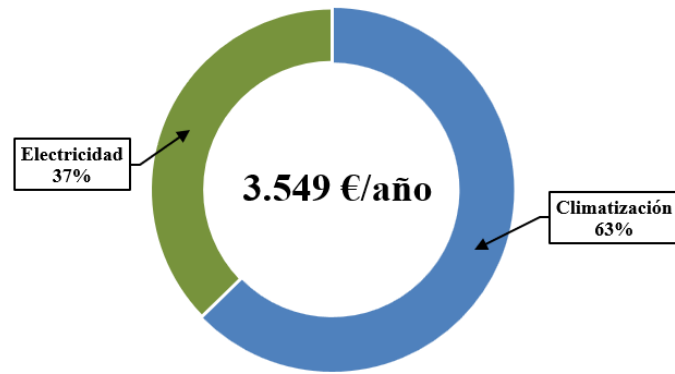


Figura 4-23 Desglose del ahorro energético y balance económico anual del Escenario óptimo.
Fuente: Elaboración propia

Como se puede observar en la Figura 4-23, la integración de las cuatro medidas de ahorro permite alcanzar un ahorro económico de 3.549 € anuales.

Este dato es especialmente relevante, ya que demuestra que la rehabilitación energética del CUD-ENM no solo es una mejora técnica en el confort térmico, sino una inversión rentable. El ahorro obtenido transforma el gasto operativo actual del centro en una gestión más eficiente y sostenible de los recursos.

4.8 Reducción de la huella de carbono mediante el escenario óptimo

Como colofón a la aplicación de las MAE, reseñar que además del ahorro financiero ya analizado en el punto 4.7, la puesta en marcha de estas propuestas tiene una repercusión directa en la sostenibilidad del edificio del CUD-ENM, colaborando así con la política *Green Defence* [15]. En esta, cabe destacar que la reducción del consumo energético se presenta como un pilar fundamental para la reducción de la huella de carbono por parte de las infraestructuras pertenecientes al Ministerio de Defensa.

Para cuantificar este impacto, se ha utilizado el factor de emisión oficial para el mix eléctrico peninsular publicado por el Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO, 2025) [45], cuyo valor está establecido en 283 kg CO₂/MWh. Al aplicar este factor sobre el ahorro energético global obtenido en el “Escenario óptimo”, se obtienen los resultados que se muestran en la Tabla 4-4:

Concepto	Valor anual
Energía eléctrica ahorrada	27,25 MWh
Factor de emisión (MITECO, 2025)	283 kg CO ₂ /MWh
Emisiones de CO₂ evitadas	7.711,18 kg de CO₂

Tabla 4-4 Balance de reducción de emisiones de CO₂ mediante la implementación del Escenario óptimo.
Fuente: Elaboración propia

En definitiva, la ejecución de las medidas propuestas permitiría dejar de emitir a la atmósfera más de 7 toneladas y media de CO₂ anuales. Resulta pertinente aclarar que esta cuantificación emplea el factor de emisión oficial del MITECO, el cual pondera rigurosamente el “mix eléctrico” nacional y las distintas fuentes de energía (renovables y fósiles) de las que proviene la electricidad consumida. Para poner esta cifra en perspectiva, cabe destacar que este ahorro ambiental equivale aproximadamente a la

capacidad de absorción de unos 375 árboles durante un año, utilizando como referencia la “Guía para la estimación de absorciones de dióxido de carbono” [46].

De este modo, el proyecto no solo se valida como una solución técnica y económicamente rentable, sino que con este *apartado 4.8* consolida el compromiso del CUD con la eficiencia energética y la protección del entorno natural.

4.8.1 Análisis de viabilidad económica y periodo de recuperación de la inversión

La presente sección tiene como propósito realizar una evaluación económica preliminar sobre los costes de ejecución material asociados a las cuatro Medidas de Ahorro Energético (MAE) validadas. Cabe destacar que este estudio constituye una estimación técnica aproximada y en ningún caso representa un presupuesto definitivo de obra. Si bien los cálculos se fundamentan en precios unitarios actualizados y extraídos de bases de datos oficiales de la construcción, las cifras resultantes tienen una finalidad estrictamente analítica. Su traslación a un escenario operativo real precisaría de un proyecto de ejecución formal y un reajuste de costes adaptado a las normativas de contratación del sector público.

MAE 1: Optimización de consignas horarias

La primera medida propuesta se fundamenta en el control estricto de las temperaturas de consigna. Dado que los termostatos analógicos actuales instalados en los equipos del edificio únicamente permiten la selección manual de tres niveles de intensidad (sin control numérico de temperatura real), resulta imprescindible su modernización. Para garantizar el cumplimiento normativo de las consignas, se plantea la sustitución de estos equipos obsoletos por termostatos digitales programables individuales en cada despacho. La instalación de estos termostatos se realizará por parte del personal de mantenimiento de la ENM.

- Coste estimado (material): 59 €/termostato [47]
- Volumen estimado: 42 termostatos digitales
- Inversión total MAE 1: 2.478 €

Mediante el cálculo del Periodo de Retorno de la Inversión (PRI, en inglés *Payback*), se obtiene el tiempo necesario para amortizar la inversión de la MAE 1:

$$Payback(\text{años}) = \frac{\text{Inversión total}}{\text{Ahorro anual}} = \frac{2.478,00}{1.959,36} = 1,26 \text{ años}$$

MAE 2: Actualización de las luminarias fluorescentes por tecnología LED

La sustitución de las luminarias fluorescentes tradicionales por paneles LED de alta eficiencia requiere únicamente la inversión en la compra del material. Al igual que en la MAE 1, la mano de obra para su montaje y el correspondiente tratamiento de residuos será asumida por el propio personal de mantenimiento de la ENM, eliminando así los costes de instalación externos.

- Coste estimado (material): 35 €/panel LED [48]
- Volumen estimado: 176 paneles
- Inversión total MAE 2: 6.160 €

Mediante el cálculo del Periodo de Retorno de la Inversión (PRI, en inglés *Payback*), se obtiene el tiempo necesario para amortizar la inversión de la MAE 2:

$$Payback(\text{años}) = \frac{\text{Inversión total}}{\text{Ahorro anual}} = \frac{6.160,00}{910} = 6,76 \text{ años}$$

MAE 3: Instalación de láminas de control solar

Para optimizar el rendimiento de la envolvente acristalada, mediante esta tercera se plantea la instalación de láminas poliméricas de control solar y baja emisividad térmica, pero únicamente en los huecos de la fachada norte dado que es la que tendrá un mayor impacto. Cabe destacar que la aplicabilidad de esta medida no se limita al control de la radiación solar en verano, sino que también es altamente efectiva durante el invierno puesto que su capa de baja emisividad actúa reflejando el calor de la calefacción hacia el interior, reduciendo drásticamente las pérdidas por conducción a través del vidrio.

- Coste estimado (material e instalación): 45 €/m² [43]
- Volumen estimado (11 ventanas de 2,15x2,50 m): 59,13 m²
- Inversión total MAE 3: 2.660,85 €

Mediante el cálculo del Periodo de Retorno de la Inversión (PRI, en inglés *Payback*), se obtiene el tiempo necesario para amortizar la inversión de la MAE 3:

$$Payback(años) = \frac{Inversión\ total}{Ahorro\ anual} = \frac{2.660,85}{237,25} = 11,2\ años$$

MAE 4: Aislamiento térmico exterior (SATE)

La cuarta medida propuesta constituye la de mayor impacto económico debido a la elevada complejidad técnica y logística de su instalación. En el presupuesto se contempla la instalación de andamiaje, preparación del soporte, fijación de paneles aislantes de EPS (80 mm) y aplicación de mortero acrílico de acabado en la fachada final para conservar la estética actual. Todo ello aplicado en la cara norte y sur del edificio del CUD-ENM.

- Coste estimado (instalación completa): 75 €/m² [49]
- Volumen estimado: 980 m²
- Inversión total MAE 4: 73.500 €

Mediante el cálculo del Periodo de Retorno de la Inversión (PRI, en inglés *Payback*), se obtiene el tiempo necesario para amortizar la inversión de la MAE 4:

$$Payback(años) = \frac{Inversión\ total}{Ahorro\ anual} = \frac{73.500}{583,57} = 125\ años$$

Como se evidencia en el desglose del cálculo del PRI de cada una de las MAE, existen dos velocidades de actuación. Por un lado, las intervenciones en sistemas e instalaciones (MAE 1 y MAE 2) resultan altamente atractivas desde el punto de vista financiero, amortizándose en menos de 7 años, lo que justifica técnica y económicamente su implementación inmediata en el edificio del CUD-ENM.

Por otro lado, las intervenciones pasivas sobre la envolvente presentan amortizaciones más dilatadas. La MAE 3 (láminas solares) arroja un retorno muy competitivo de 11,2 años, resultando altamente recomendable por su eficacia frente a la radiación, su baja inversión y nula invasividad. Finalmente, aunque el aislamiento SATE (MAE 4) carece de viabilidad financiera a corto/medio plazo. Sin embargo, su estudio se ha incluido para evaluar todos los escenarios posibles y establecer así el techo teórico de eficiencia energética de la infraestructura.

5 CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

El desarrollo del presente Trabajo de Fin de Grado ha tenido como propósito central la caracterización, modelado y optimización térmica del edificio del CUD-ENM mediante el diseño de un modelo térmico calibrado. Tras completar exhaustivamente las fases de recopilación de datos experimentales mediante los sistemas de adquisición de datos, calibración del Gemelo digital mediante *GenOpt* y la posterior simulación de alternativas de mejoras de ahorro energético, se puede afirmar que se han cumplido satisfactoriamente todos los objetivos planteados al inicio del proyecto.

A continuación, se desglosan las conclusiones más relevantes extraídas de la investigación, estructuradas según las diferentes áreas de impacto del estudio.

5.1 Conclusiones sobre la metodología y el Gemelo digital

En primer lugar, cabe destacar el éxito de la estrategia de monitorización empleada. La instalación de la red principal y secundaria ha demostrado ser una estrategia altamente eficaz y de bajo coste para la obtención de perfiles térmicos reales en el edificio del CUD-ENM. Esta toma de datos *in situ* ha revelado la existencia de una "brecha de desempeño" (*Performance gap*) inicial entre el comportamiento teórico del edificio y su respuesta termodinámica real.

Una vez obtenida la base de datos experimental, se procedió a la construcción del modelo energético (BEM) de forma exitosa. La integración geométrica y termodinámica mediante el entorno de *OpenStudio* y su herramienta *FloorspaceJS*, combinada con el motor de cálculo *EnergyPlus*, ha permitido replicar con un altísimo nivel de detalle los materiales constructivos, los horarios de uso y las cargas internas de la instalación.

Respecto a la validación del modelo térmico, el proceso iterativo de ajuste de parámetros ha permitido consolidar un Gemelo digital de un alto nivel de precisión, lográndose un CV(RMSE) inferior al 10 %. Este valor certifica que el modelo cumple de forma estricta con los exigentes criterios de calidad establecidos por la normativa internacional ASHRAE *Guideline* 14 e IPMVP. En definitiva, se ha dotado al CUD y a la ENM de una herramienta virtual robusta, capaz de predecir el comportamiento energético del edificio frente a cualquier modificación futura sin poner en riesgo la operatividad real del centro y a un coste mínimo.

5.2 Análisis de las MAE

El análisis del modelo calibrado puso de manifiesto diversas carencias. Por ello, la simulación aislada de las diferentes Medidas de Ahorro Energético (MAE) ha permitido extraer conclusiones precisas sobre el origen de las ineficiencias:

- Sistemas activos y de gestión (MAE 1 y MAE 2). Se ha evidenciado que el control horario de las instalaciones es un factor crítico. La optimización de las consignas de climatización (MAE 1) adaptadas a la ocupación real del personal del CUD, ha demostrado ser la medida con la ratio coste/beneficio más inmediato. Por otro lado, la sustitución del parque lumínico tradicional por tecnología LED (MAE 2) ha resultado ser determinante, ya que no solo reduce el consumo eléctrico directo en un 28,71 %, sino que disminuye drásticamente la carga térmica interna disipada en las aulas, aliviando el trabajo de los *fancoils* en régimen de refrigeración durante el periodo estival.
- Intervención en la envolvente térmica (MAE 3 y MAE 4). El modelo calibrado ha confirmado que los muros originales y las ventanas constituyen los principales vectores de pérdida y ganancia indeseada de calor. La simulación de láminas de control solar (MAE 3) ha probado ser una solución óptima y poco invasiva para bloquear el exceso de radiación incidente en verano, mitigando el sobrecalentamiento. Paralelamente, la instalación de un sistema SATE (MAE 4) ha logrado eliminar los puentes térmicos en los forjados, dotando al edificio de una mayor inercia térmica capaz de estabilizar las oscilaciones de temperatura en invierno.

Por otra parte, un aspecto analítico fundamental de este proyecto consiste en evaluar el comportamiento del edificio bajo el denominado "Escenario óptimo". Cabe destacar que la implementación simultánea de las cuatro medidas no produce una simple suma matemática de ahorros, sino que genera sinergias termodinámicas altamente beneficiosas para el balance global de la instalación.

Al mejorar la estanqueidad y el aislamiento de las fachadas, el edificio es capaz de retener el calor de forma mucho más eficiente. Esta mayor inercia permite que la optimización de las consignas trabaje sobre un sistema más estable, haciendo que la demanda de calefacción descienda. Sin embargo, el efecto combinado más notable se produce en la demanda de refrigeración. La unión de una menor carga térmica interior (debida a la iluminación LED) y el bloqueo exhaustivo de la radiación solar en los huecos provoca un desplome del 64,28 % en la necesidad de refrigeración estival.

En síntesis, la ejecución del plan integral de rehabilitación logra una reducción absoluta de 27,25 MWh anuales, lo que se traduce en un ahorro energético global del 35,47 % respecto al modelo base del edificio actual del CUD-ENM.

En cuanto a la viabilidad económica del proyecto se refiere, los resultados obtenidos corroboran la total viabilidad del proyecto. Al estar el sistema de climatización del edificio fundamentado en una bomba de calor aire-agua (*fancoils*), el total del ahorro energético impacta de manera directa sobre la factura eléctrica.

Tomando como referencia el precio medio del mercado eléctrico fijado en 130 €/MWh, el ahorro del 35,47 % en la demanda se transforma en una reducción del gasto operativo de 3.549 € anuales.

Adicionalmente al impacto económico expuesto, las simulaciones proyectan un beneficio medioambiental de gran relevancia. Aplicando los factores de emisión oficiales del MITECO, la reducción del consumo eléctrico evitaría la emisión a la atmósfera de más de 7 toneladas y media de CO₂ anuales. De este modo, la investigación demuestra que es plenamente viable alinear las instalaciones del CUD-ENM con la transición ecológica y las directivas de la *Green Defence* impulsadas por la OTAN.

5.3 Cierre del proyecto

En definitiva, este Trabajo de Fin de Grado demuestra que, combinando el uso de programas de simulación con medidas de ahorro reales, se puede transformar un edificio con carencias constructivas en una instalación mucho más eficiente y sostenible.

Cabe destacar que el modelo calibrado que se ha desarrollado supone una herramienta predictiva de alto valor para evaluar futuras reformas arquitectónicas sin necesidad de recurrir a ensayos empíricos de

prueba y error, sirviendo además de base para estudiar mejoras en otras instalaciones de la Armada. Todo ello, garantizando siempre unas buenas condiciones de confort térmico para el personal, que es el principal activo en toda empresa, y por supuesto también en el Ministerio de Defensa.

5.4 Líneas futuras

El presente TFG ha permitido establecer una base sólida y un modelo térmico altamente fiable del edificio del CUD-ENM. Sin embargo, la complejidad de la modelación de las infraestructuras actuales y la simulación energética abren un amplio abanico de posibilidades para continuar perfeccionando este Gemelo digital. Con base en las limitaciones encontradas y a los resultados obtenidos, se proponen las siguientes líneas de investigación futuras:

Ampliación y optimización de la campaña de monitorización

En primer lugar, cabe destacar que la precisión de cualquier Gemelo digital es directamente proporcional a la calidad y cantidad de los datos experimentales recopilados durante la fase de monitorización. Una línea de mejora evidente consistiría en ampliar la fase de medición, abarcando un año natural completo. Esto permitiría calibrar el modelo frente a las condiciones climatológicas más diversas, reduciendo aún más el margen de error estadístico.

Por otro lado, resultaría de gran interés ampliar la red de sensores *IoT* para monitorizar otras variables influyentes en el resultado final, tales como la temperatura exterior o la radiación solar directa que incide sobre las fachadas norte y sur del edificio del CUD-ENM.

Modelado detallado del sistema de climatización

Para la evaluación del comportamiento térmico del edificio, se ha recurrido al uso de cargas ideales, lo cual es una metodología perfectamente válida para dimensionar la demanda energética de la envolvente. No obstante, el paso definitivo para refinar la simulación sería modelar detalladamente el sistema HVAC real del edificio.

Esto implicaría introducir en el entorno de *EnergyPlus* los parámetros técnicos exactos de la bomba de calor aire-agua y la red de distribución de *fancoils*. Al simular el rendimiento de la planta térmica a cargas parciales, teniendo en cuenta las fluctuaciones del COP en función de la temperatura exterior real, se obtendría una estimación del consumo eléctrico y económico aún más fidedigna.

Integración de sistemas de generación de energía renovable

Respecto al escenario óptimo planteado en el apartado 4.6.5, se ha logrado una reducción drástica de la demanda energética. Alcanzado este punto de eficiencia, el edificio se encuentra en la situación ideal para estudiar la integración de energías renovables y avanzar decididamente hacia la consecución de los objetivos estratégicos de la OTAN en el marco de la política *Green Defence*.

6 BIBLIOGRAFÍA

- [1] Ministerio de Defensa (España). Dirección General de Armamento y Material (DGAM)., «Estrategia de Tecnología e Innovación para la Defensa (2010)», Ministerio de Defensa, Madrid, jul. 2010.
- [2] Ministerio de Defensa, «Estrategia de Tecnología e Innovación para la Defensa (ETID 2020)». Secretaría de Estado de Defensa. Accedido: 18 de enero de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://publicaciones.defensa.gob.es/estrategia-de-tecnologia-e-innovacion-para-la-defensa-etid-2020-libros-pdf.html>
- [3] NATO, «Environment, climate change and security», NATO. Accedido: 15 de enero de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.nato.int/en/what-we-do/wider-activities/environment-climate-change-and-security>
- [4] H. Baldwin, «Russia's War Against Ukraine and Transatlantic Energy Security Challenges». NATO Parliamentary Assembly, 8 de octubre de 2023. Accedido: 18 de enero de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.nato-pa.int/document/2023-energy-security-report-baldwin-023-esc>
- [5] Navantia, «Gemelo Digital: Soluciones de vanguardia para la gestión integral de buques», Navantia - Sostenibilidad y Superioridad Tecnológica. Accedido: 18 de enero de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.navantia.es/es/producto/digital-twin/>
- [6] «Orden PCM/466/2022, de 25 de mayo, por la que se publica el Acuerdo del Consejo de Ministros de 24 de mayo de 2022, por el que se aprueba el plan de medidas de ahorro y eficiencia energética de la Administración General del Estado y las entidades del sector público institucional estatal.» Boletín Oficial del Estado, núm. 125, 26 de mayo de 2022. Accedido: 18 de enero de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.boe.es/eli/es/o/2022/05/25/pcm466>
- [7] P. de Wilde, «The gap between predicted and measured energy performance of buildings: A framework for investigation», *Automation in Construction*, vol. 41, pp. 40-49, 2014, doi: 10.1016/j.autcon.2014.02.009.
- [8] Comisión Europea, «Oleada de renovación para Europa: ecologizar nuestros edificios, crear empleo, mejorar vidas». 2020. Accedido: 26 de enero de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/PDF/?uri=CELEX:52020DC0662>
- [9] Consejo de la Unión Europea, «Objetivo 55: el plan de la UE para una transición ecológica». 2023. Accedido: 26 de enero de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.consilium.europa.eu/es/policies/fit-for-55/>
- [10] Agencia Internacional de la Energía (IEA), «World Energy Outlook 2022», París, 2022. Accedido: 26 de enero de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2022>
- [11] Ministerio de Vivienda, «Catálogo de Elementos Constructivos del CTE», Instituto Eduardo Torroja de ciencias de la construcción (IETcc-CSIC), may 2008. Accedido: 9 de febrero de 2026. [En línea]. Disponible en: https://www.codigotecnico.org/pdf/Programas/CEC/CAT-EC-v05.0_MAYO08.pdf

- [12] Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana, «Documento Básico HE Ahorro de Energía (DB-HE)», Código Técnico de la Edificación, Madrid, 2022. Accedido: 26 de enero de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.codigotecnico.org/pdf/Documentos/HE/DBHE.pdf>
- [13] Ministerio de la Presidencia, «Real Decreto 1027/2007, de 20 de julio, por el que se aprueba el Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios». Boletín Oficial del Estado, núm. 207, 29 de agosto de 2007. Accedido: 28 de enero de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=BOE-A-2007-15820>
- [14] Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (España), «Documentos reconocidos del RITE». Accedido: 11 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.miteco.gob.es/es/energia/eficiencia/rite/documentos-reconocidos.html>
- [15] North Atlantic Treaty Organization (NATO), «Environment, climate change and security», NATO Topics. Accedido: 28 de enero de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.nato.int/en/what-we-do/wider-activities/environment-climate-change-and-security>
- [16] Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (España), «Certificación de eficiencia energética de los edificios», MITECO (Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico). Accedido: 11 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.miteco.gob.es/es/energia/eficiencia/certificacion-energetica.html>
- [17] Drury B. Crawley, Curtis O. Pedersen, Linda K. Lawrie, Frederick C. Winkelmann, «EnergyPlus: Energy Simulation Program», *ASHRAE Journal*, vol. 42, n.º 4, pp. 49-56, 2000.
- [18] S. A. Klein, «TRNSYS 17 — A TRaNsient System Simulation program. Volume 4: Mathematical Reference», Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin-Madison, Madison, WI, may 2014. Accedido: 11 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: https://trnsys.org/MaillistArchive/pdfkSLYr_lzDr.pdf
- [19] U.S. Department of Energy, «EnergyPlus Engineering Reference: The Reference to EnergyPlus Calculations (Version 22.1.0)», U.S. Department of Energy, 2022. Accedido: 29 de enero de 2026. [En línea]. Disponible en: https://energyplus.net/assets/nrel_custom/pdfs/pdfs_v22.1.0/EngineeringReference.pdf
- [20] ASHRAE, «ANSI/ASHRAE Addendum a to ANSI/ASHRAE Standard 140-2017», ASHRAE, ANSI/ASHRAE Standard 140-2017 Addendum a, 2020.
- [21] D. Coakley, P. Raftery, y M. Keane, «A review of methods to match building energy simulation models to measured data», *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 37, pp. 123-141, 2014, doi: 10.1016/j.rser.2014.05.007.
- [22] M. Wetter, «GenOpt: Generic Optimization Program. User Manual Version 3.1.1», Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, CA, 2011. Accedido: 24 de febrero de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://simulationresearch.lbl.gov/GO/download/manual-3-1-1.pdf>
- [23] Yi Zhang, «“Parallel” EnergyPlus and the development of a parametric analysis tool», en *Proceedings of Building Simulation 2009: 11th Conference of International Building Performance Simulation Association (IBPSA)*, Glasgow, Escocia, 2009, pp. 557-564. Accedido: 11 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: https://www.jeplus.org/wiki/lib/exe/fetch.php?media=docs:bs2009p557v2_nl.pdf
- [24] Enrico Fabrizio y Valentina Monetti, «Methodologies and Advancements in the Calibration of Building Energy Models», *Energies*, vol. 8, n.º 4, pp. 2548-2574, 2015, doi: 10.3390/en8042548.
- [25] Ineco (Ingeniería y Economía del Transporte), «Meteorología de Pontevedra: Anejo n.º 4. Climatología e Hidrología», Ministerio de Fomento (España), 2017. Accedido: 11 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: https://cdn.fomento.gob.es/portal-web-drupal/33-po-4880/anejo_04._climatologia_e_hidrologia_33-po-4880ip.pdf
- [26] T. Parkinson, «Continuous indoor environmental quality monitoring with low-cost sensor networks», *Building and Environment*, vol. 142, pp. 228-236, 2019, doi: 10.1016/j.buildenv.2018.06.047.
- [27] JCGM, «Evaluation of measurement data — Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM)», Joint Committee for Guides in Metrology, Sèvres, Francia, sep. 2008.

- Accedido: 3 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: https://www.bipm.org/documents/20126/2071204/JCGM_100_2008_E.pdf
- [28] American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE), «ASHRAE Guideline 14-2014: Measurement of Energy, Demand, and Water Savings», ASHRAE, 2014. Accedido: 24 de febrero de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.conuee.gob.mx/transparencia/nuevaestrategia/docs/1.3.%20ASHRAE%20Guideline%2014-2014.pdf>
- [29] Ferdoush, S., «Wireless sensor network system design using Raspberry Pi and Arduino for environmental monitoring applications», *Procedia Computer Science*, vol. 34, pp. 103-110, 2014, doi: 10.1016/j.procs.2014.07.059.
- [30] Aosong Electronics Co., Ltd., «Digital-output relative humidity & temperature sensor/module DHT22 (AM2302) Datasheet». Aosong Electronics, 2015. Accedido: 3 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.sparkfun.com/datasheets/Sensors/Temperature/DHT22.pdf>
- [31] Tuya Global Inc., «Smart Life / Tuya Smart Temperature and Humidity Sensor Product Specifications». Tuya Developer Platform, 2021. Accedido: 3 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://developer.tuya.com/en/docs/iot/>
- [32] Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE), «Guía técnica: Soluciones de acristalamiento y cerramiento acristalado», Ministerio de Industria, Energía y Turismo, may 2008. Accedido: 3 de febrero de 2026. [En línea]. Disponible en: https://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_GUIA_TECNICA_Vidrios_y_cerramiento_v05_2dfc482b.pdf
- [33] Saint-Gobain Glass, «SGG PLANICLEAR: Clear Float Glass Product Data Sheet», Saint-Gobain Glass, jun. 2024. Accedido: 3 de febrero de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.saint-gobain-glass.co.uk/wp-content/uploads/2024/06/PLANICLEAR-2024.pdf>
- [34] «NTP 779: Bienestar térmico: criterios de diseño para ambientes térmicos confortables», Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo (INSHT, Madrid, 2007. Accedido: 16 de febrero de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://saludlaboralydiscapacidad.org/wp-content/uploads/2019/05/NTP-779-Bienestar-t%C3%A9rmico-criterios-de-dise%C3%B1o-para-ambientes-t%C3%A9rmicos-confortables.pdf>
- [35] American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE), «Chapter 18: Nonresidential Cooling and Heating Load Calculations», en *ASHRAE Handbook - Fundamentals*, 2001. Accedido: 4 de febrero de 2026. [En línea]. Disponible en: https://mech14.weebly.com/uploads/6/1/0/6/61069591/me_acv_2018_cooling_load_calculations.pdf
- [36] Epson Ibérica, «Epson EB-X12 - Especificaciones y datos técnicos», Epson Ibérica. Accedido: 4 de febrero de 2026. [En línea]. Disponible en: https://www.epson.es/es_ES/productos/projector/port%C3%A1til/epson-eb-x12-es/p/11119
- [37] J. M. Albares Bueno, «Real Decreto-ley 14/2022, de 1 de agosto, de medidas de sostenibilidad económica en el ámbito del transporte, en materia de becas y ayudas al estudio, así como de medidas de ahorro, eficiencia energética y de reducción de la dependencia energética del gas natural». Boletín Oficial del Estado (BOE), 2 de agosto de 2022. Accedido: 16 de febrero de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.boe.es/buscar/act.php?id=BOE-A-2022-12925>
- [38] U.S. Department of Energy (DOE), «EnergyPlusTM Version 23.2.0 Documentation: Engineering Reference», National Renewable Energy Laboratory (NREL), Golden, CO, 2023. Accedido: 12 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://energyplus.net/documentation>
- [39] Efficiency Valuation Organization (EVO), «International Performance Measurement and Verification Protocol (IPMVP)», Efficiency Valuation Organization, 2016. Accedido: 24 de febrero de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://evo-world.org/en/products-services-mainmenu-en/protocols/ipmvp>
- [40] Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE), «Guía práctica de la energía: Consumo eficiente y responsable», Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía, 2010.

- Accedido: 26 de febrero de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.idae.es/uploads/documentos/12826.pdf>
- [41] U.S. Department of Energy (DOE), «EnergyPlus™ Version 24.1.0 Documentation: Engineering Reference», National Renewable Energy Laboratory (NREL), Golden, CO, 2024. Accedido: 12 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: https://energyplus.net/assets/nrel_custom/pdfs/pdfs_v24.1.0/EngineeringReference.pdf
- [42] ASHRAE, «Estándar ASHRAE 55: Condiciones de Confort Térmico para Ocupación Humana», Seis Cubos. Accedido: 10 de febrero de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.seiscubos.com/conocimiento/estandar-ashrae-55>
- [43] SeviaLup, «Aislante térmico para ventanas: guía práctica», SeviaLup - Ventanas de PVC y Aluminio en Sevilla. Accedido: 16 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://seviaLup.com/mejor-aislante-termico-ventanas/>
- [44] 3M, «Boletín del producto: 3M™ Thinsulate™ Window Film Climate Control 75», División de Soluciones Comerciales, 3M Deutschland GmbH, Neuss, Alemania, abr. 2020. Accedido: 14 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://areaoffice.es/wp-content/uploads/2021/05/THINSULATE-CLIMATE-CONTROL-75.pdf>
- [45] Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (España), «Factores de emisión. Registro de huella de carbono, compensación y proyectos de absorción de dióxido de carbono», Oficina Española de Cambio Climático (OECC), Madrid, 2024. Accedido: 15 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: https://www.miteco.gob.es/content/dam/miteco/es/cambio-climatico/temas/mitigacion-politicas-y-medidas/factoresemision_tcm30-542746.xlsx
- [46] Oficina Española de Cambio Climático (OECC), «Guía para el cálculo de la huella de carbono y para la elaboración de un plan de mejora de una organización», Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (España), Madrid, 2022. Accedido: 15 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: https://www.miteco.gob.es/content/dam/miteco/es/cambio-climatico/temas/mitigacion-politicas-y-medidas/guiapa_tcm30-479094.pdf
- [47] Salvador Escoda S.A., «Catálogo de Termostatos y Sistemas de Regulación», Salvador Escoda S.A. - Suministros para Instalaciones. Accedido: 17 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.salvadorescoda.com/buscador/?Search%5BText%5D=termostato>
- [48] InnovaLED, «Paneles LED 60x60: Catálogo y especificaciones técnicas», InnovaLED - Especialistas en Iluminación LED. Accedido: 16 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.innova-led.es/panel-led/panel-led-60x60>
- [49] CYPE Ingenieros, S.A., «ZFF120: Sistema ETICS “WEBER” de aislamiento térmico por el exterior de fachada existente», Generador de precios de la construcción. Rehabilitación. España. Accedido: 16 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: https://weber.generadordeprecios.info/rehabilitacion/Rehabilitacion_energetica/ZF_Cerramientos_verticales__adici/ZFF_Sistemas_ETICS_de_aislamiento_/ZFF120_Sistema_ETICS__WEBER__de_aislamient.html

ANEXO I: IMPLICACIONES SOCIALES, Y/O ECONÓMICAS, Y/O AMBIENTALES

El eje principal del desarrollo del presente Trabajo de Fin de Grado ha tenido dos vertientes y así se ha manifestado a lo largo del mismo: eficiencia energética y optimización del bienestar, teniendo en todo momento como base la normativa vigente en el marco EUR-ACE. De este modo en todo momento se han tenido en consideración las implicaciones sociales, medioambientales y económicas que pudiera ocasionar el proyecto, las cuales se detallan a continuación:

Implicaciones ambientales

En la actualidad, el sector de la edificación es responsable de una parte considerable de la demanda energética mundial, así como de emisión de gases de efecto invernadero. No obstante, la evaluación y mitigación de este impacto se ve frecuentemente obstaculizada por la brecha de desempeño (*Performance Gap*), donde los modelos teóricos subestiman el consumo real de las infraestructuras debido a aproximaciones arquitectónicas erróneas o fallos en las medidas entre otras posibles causas.

El presente proyecto ha tenido conciencia medioambiental en todo momento, pudiéndose comprobar a lo largo de toda la memoria, resaltándose la importancia del medioambiente en la introducción y en el *capítulo 2. Estado del arte*. A lo largo de las mismas se presenta la elaboración de “Gemelos digitales” como una medida frente a la actual crisis energética. El disponer de un modelo calibrado es un gran avance hacia la consecución de la reducción de emisiones por parte de los edificios y mejorar su eficiencia energética, puesto que se pueden realizar un elevado número de ensayos a un coste económico prácticamente nulo. De este modo, la Escuela Naval Militar, y en consecuencia la Armada avanzan de acuerdo con el Pacto Verde Europeo y se integran dentro de la política de *Green Defence* promulgada por parte de la OTAN.

Implicaciones económicas

Del mismo modo que se ha respetado en todo momento el medioambiente, así también se ha velado por el máximo aprovechamiento de los recursos disponibles, cumpliendo así con una máxima de toda obra pública adscrita al Ministerio de Defensa, que es buscar en todo momento la máxima eficacia, con el fin de reducir costes manteniendo la mayor calidad posible. La materialización de esto se puede corroborar especialmente a lo largo del capítulo 3, en el cual se definen las variables con un alto grado de precisión, teniendo en cuenta los datos teóricos proporcionados por el constructor, así como información obtenida *in situ*, todo ello con el fin de evitar sobredimensionar los aparatos y que ello vaya en perjuicio del consumo energético y del coste de la posible reforma que sería necesaria si se decidiera tras realizar la simulación. El sistema de simulación diseñado, compuesto principalmente por *EnergyPlus*, *OpenStudio*, *GenOpt* y *Python*, permite la realización de ensayos virtuales con el fin de implementar mejoras de ahorro energético en el edificio CUD-ENM. Esto dota a la Armada de un posible modelo predictivo desarrollable para sus infraestructuras, el cual supondría un gran ahorro en muchas reformas/obras de nuevas construcciones, y más en la actualidad con el elevado número de infraestructuras en las que la Armada está trabajando. En consecuencia, se evita la ineficiencia en la asignación de recursos, permitiendo derivar el presupuesto disponible hacia una mejora en la calidad

Implicaciones sociales

Precisamente esa mejora en los materiales tiene como fin satisfacer las necesidades del usuario, que es el principal objetivo de todo edificio, el factor humano. Más allá de la eficiencia energética y económica, las cuales son aspectos clave, el factor primordial en toda obra pública de Ministerio de Defensa, es diseñar un entorno de trabajo seguro y cómodo para el usuario, con unas condiciones óptimas para el desarrollo de la actividad profesional, en este caso del personal del CUD, personal ajeno pero que colabora con el mismo u oficiales de la Armada destinados en esta sección entre otros. A lo largo

de la memoria se ha puesto de manifiesto la relevancia del bienestar del personal en las instalaciones, cumpliendo en todo momento con la normativa (ASHRAE y RITE principalmente) en todos los ámbitos, destacando el confort térmico, así como las infiltraciones de aire para renovación del mismo en el interior de cada zona térmica.

La monitorización de las condiciones climáticas interiores resulta también un aspecto crucial, y más en un entorno marítimo como en el que se encuentra el edificio del CUD-ENM, previniendo de este modo posibles efectos negativos para la salud del personal causados por la mala calidad del aire, manteniendo a lo largo del desarrollo un ambiente seguro y cómodo de trabajo, tanto para el profesorado como para el alumnado, que en su conjunto conforman la principal razón de ser de la Escuela Naval Militar junto con todo el personal destinados en esta.



Figura A1-0-1 Diagrama de la integración de los criterios EUR-ACE aplicados al desarrollo del Gemelo digital del edificio CUD-ENM. Fuente: Elaboración propia

ANEXO II: REFLEXIONES ÉTICAS Y SOCIALES

A lo largo del trabajo se ha desarrollado más la parte tecnológica y termodinámica, se ha reservado para este apartado detallar el código deontológico que todo ingeniero debe tener presente en cualquier proyecto realizado, independientemente del ámbito en el que se desarrolle. Dicho código se ha basado en los siguientes pilares en el presente Trabajo de Fin de Grado:

Integridad científica en el manejo de datos

El núcleo del presente proyecto, especialmente en la segunda parte de este, es llevar a cabo la calibración del modelo hasta obtener un CV(RMSE) inferior al 20 %, es por ello por lo que aparece el riesgo ético de alterar los resultados obtenidos en los sensores con el fin de facilitar llegar al objetivo especificado según normativa. Sin embargo, puesto que el ajuste es realizado de forma automática por el algoritmo de GPS Hooke-Jeeves el proceso será completamente imparcial y los resultados arrojados serán reales. Asimismo, debido a los márgenes establecidos a cada una de las variables se asegura que, dentro de esa objetividad, los datos obtenidos sean veraces, pero también científicamente viables.

Ética profesional y confidencialidad en instalaciones militares

A pesar de que la Escuela Naval Militar no es una base operativa, sino un centro docente, nunca se debe perder la conciencia de que se trata de una instalación militar, y como tal requiere de cierta confidencialidad en el tratamiento de sus datos. La creación de un Gemelo digital supone la necesidad de disponer de los planos, perfiles de ocupación y horarios del personal que se encuentra en el edificio CUD-ENM, y ello requiere de responsabilidad y privacidad puesto que se trata de una instalación militar y como tal hay datos que no pueden ser de conocimiento público. Asimismo, el tratamiento de esta información exige la máxima privacidad para garantizar la protección de datos y la intimidad del personal de las instalaciones. Por ello, como ingeniero se asume la responsabilidad deontológica de proteger la información proporcionada debido principalmente a estos dos motivos y utilizarla únicamente con el fin profesional del presente proyecto.

Transparencia y ciencia abierta

La ingeniería académica difiere de la ingeniería industrial en ciertos aspectos, entre los que se encuentra la transparencia en los procesos, puesto que el fin último de un proyecto docente no es obtener un beneficio económico. Por ello, se han empleado una serie de herramientas que toda la comunidad educativa nacional tiene a su disposición, teniendo como base programas informáticos como *GenOpt*, *OpenStudio* o *EnergyPlus* entre otros. De este modo, se asegura que el presente método de desarrollo de este modelo en concreto es reproducible para otras infraestructuras, puesto que los medios son accesibles a cualquier miembro de la comunidad educativa.

En síntesis, el rigor deontológico ha sido el eje vertebral de todo el trabajo, garantizando en todo momento honradez en los datos, transparencia en el proceso y confidencialidad con el uso de la información.

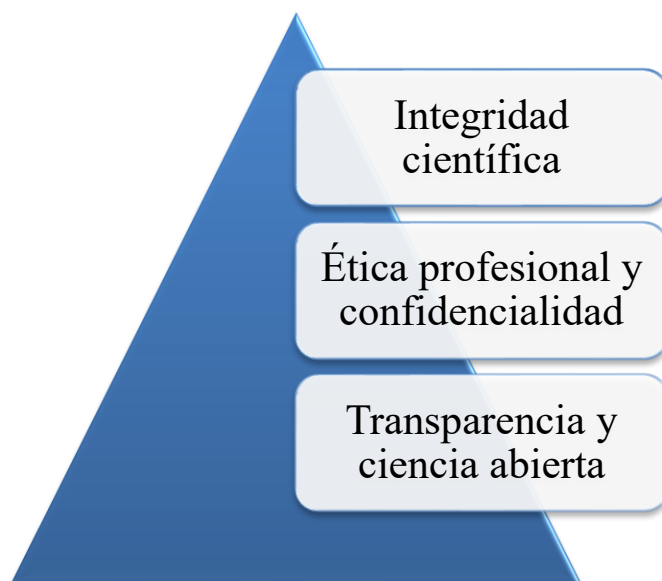


Figura A2-0-1 Esquema piramidal de los pilares éticos y sociales. Fuente: Elaboración propia

ANEXO III: FICHAS TÉCNICAS DE LOS INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN

El presente anexo tiene como objetivo detallar las especificaciones técnicas y metroológicas del hardware empleado durante la exhaustiva campaña de monitorización experimental llevada a cabo en el edificio del CUD-ENM. La selección de estos instrumentos de medición se ha fundamentado en la necesidad de obtener una base de datos rigurosa y fiable para acometer el posterior proceso iterativo de calibración del modelo térmico. En este sentido, se ha priorizado el uso de sensores con una reducida tolerancia de error y sistemas de adquisición de datos con capacidad de almacenamiento local, garantizando así la integridad de la información frente a posibles pérdidas de conexión.

Sensor de temperatura y humedad relativa (DHT22)

El dispositivo DHT22 consiste en un sensor digital ampliamente utilizado en proyectos de monitorización térmica. Este componente integra un termistor NTC para la cuantificación de la temperatura y un sensor capacitivo para la medición de la humedad relativa, ofreciendo una alta precisión y una destacada estabilidad a largo plazo. Sus reducidos márgenes de error lo convierten en una herramienta idónea para registrar las fluctuaciones térmicas reales de los distintos despachos monitorizados y validar el Gemelo digital. A continuación, en la Tabla A3-0-1 se detallan las especificaciones técnicas de este sensor:

Parámetro metroológico	Especificación
Rango de medición de temperatura	-40 °C – 80 °C
Precisión de medición de temperatura	$< \pm 0,5$ °C
Resolución de temperatura	0,1 °C
Rango de medición de humedad	0 % - 100 % RH
Resolución de humedad	0,1 % RH
Tiempo de sensado mínimo	2 s
Voltaje de operación	3 V – 6 V

Tabla A3-0-1. Especificaciones técnicas del sensor DHT22. Fuente: Elaboración propia

Sistema domótico de medición comercial (TH01)

De forma complementaria a la arquitectura principal de adquisición de datos, la campaña de mediciones ha integrado sensores domóticos comerciales operados bajo el ecosistema *SmartLife*. La inclusión de estos dispositivos secundarios ha tenido como propósito fundamental establecer una validación cruzada de las lecturas térmicas, corroborando empíricamente la precisión de las sondas DHT22.

Si bien estos equipos presentan una gran facilidad de despliegue y permiten una monitorización intuitiva en tiempo real a través de interfaces gráficas, su diseño presenta ciertas limitaciones para el rigor científico continuado. Su estricta dependencia de la red Wi-Fi y el almacenamiento del historial en servidores externos en la nube (*Cloud*) reducen su robustez frente a posibles incidencias de conectividad en las instalaciones, motivo por el cual han sido designados como un sistema de respaldo metroológico y no como la fuente primaria de datos para la calibración del modelo. A continuación, en la Tabla A3-0-2 se detallan las especificaciones técnicas de este sensor.

Parámetro metrológico	Especificación
Rango de medición de temperatura	-20 °C – 60 °C
Precisión de medición de temperatura	$< \pm 1,0$ °C
Resolución de temperatura	0,1 °C
Rango de medición de humedad	0 % - 100 % RH
Resolución de humedad	5 % RH
Tiempo de sensado mínimo	1 hora
Voltaje de operación	$< 3,4$ V

Tabla A3-0-2. Especificaciones técnicas del sensor TH01. Fuente: Elaboración propia