



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

*Calibración de un modelo térmico del gimnasio de la ENM
empleando datos reales de monitorización*

Grado en Ingeniería Mecánica

ALUMNO: Gonzalo Rivas Corrales

DIRECTORES: Lara Febrero Garrido
Ana Ogando Martínez

CURSO ACADÉMICO: 2023-2024

Universida_{de}Vigo



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

*Calibración de un modelo térmico del gimnasio de la ENM
empleando datos reales de monitorización*

Grado en Ingeniería Mecánica
Intensificación en Tecnología Naval
Infantería de Marina

UniversidadeVigo

RESUMEN

Ante el incesante crecimiento del consumo de energía provocando mayores emisiones de gases de efecto invernadero y los serios impactos a nivel mundial en el medio ambiente que esto conlleva, surge la necesidad de promover la búsqueda de una mayor eficiencia energética; especialmente, en el ámbito de la construcción, debido a la cantidad de recursos naturales y energéticos que lleva asociado.

Con el objetivo de contribuir al desarrollo de la eficiencia energética, el presente Trabajo de Fin de Grado desarrolla una calibración de un modelo térmico que se lleva a cabo en tres etapas; en primer lugar, la monitorización de datos térmicos del edificio gimnasio-piscina “Guardiamarina Barrutia” de la Escuela Naval Militar en Marín a través de sensores; en segundo lugar, se realiza el modelado y simulación del edificio a través de la herramienta OpenStudio®; y, por último, se calibra el modelo empleando el software de optimización GenOpt. Se aprueban varias estrategias de calibración con el objetivo de minimizar lo máximo posible el error entre la simulación y la realidad. Como resultado de esta calibración, se obtiene un modelo optimizado y realista que se aproxima de manera eficaz a la realidad de funcionamiento del edificio.

PALABRAS CLAVE

Simulación térmica, Calibración, OpenStudio®, GenOpt, Gimnasio.

AGRADECIMIENTOS

Me gustaría agradecerles a mis tutoras, Lara Febrero Garrido y Ana Ogando Martínez, su continua dedicación y el apoyo recibido a lo largo de estos meses. Muchas gracias por ayudarme a poder orientar y desarrollar correctamente este trabajo, ha sido un placer poder trabajar con ustedes.

CONTENIDO

Contenido	1
Índice de Figuras	3
Índice de Tablas.....	6
1 Introducción y objetivos	7
1.1 Introducción	7
1.2 Objetivos	9
1.3 Estructura de la memoria	9
2 Estado del arte	11
2.1 Crisis energética mundial.....	11
2.2 Eficiencia energética	13
2.2.1 Eficiencia energética en edificación	14
2.2.2 Plan REPowerEU.....	15
2.3 Calificación energética de edificios	17
2.3.1 Edificación	17
2.3.1.1 Edificación sostenible	17
2.3.2 Green Building Council (GBC)	18
2.3.3 Código Técnico de la Edificación (CTE)	19
2.4 Modelado energético en edificación	20
2.4.1 SketchUp.....	20
2.4.2 EnergyPlus™	21
2.4.3 OpenStudio®	21
2.4.4 GenOpt.....	22
3 Desarrollo del TFG.....	24
3.1 Metodología	24
3.2 Descripción del edificio	25
3.2.1 Localización.....	25
3.2.2 Antecedentes.....	25
3.2.3 Zona climática	28
3.2.4 Descripción constructiva del edificio	29
3.2.5 Información sobre el uso del edificio	31
3.2.6 Estancias del edificio	32
3.2.7 Condiciones de confort	32
3.3 Factores operacionales y cargas internas del edificio	33
3.3.1 Ocupación y actividad	33

3.3.2 Iluminación	34
3.4 Monitorización del edificio	35
3.4.1 Sensor Zecamin	36
3.4.2 Sensor AirThings	37
3.4.3 Emplazamiento de los dispositivos.....	38
3.5 Modelado del edificio	39
3.5.1 Modelado 3D del edificio con SketchUp.....	40
3.5.2 Modelado en OpenStudio®	44
3.5.2.1 Desarrollo de la información constructiva del edificio.....	45
3.5.2.2 Cargas internas.....	47
3.5.2.3 Datos climáticos.....	49
3.6 Simulación	50
3.7 Calibración del modelo	51
3.7.1 Función Objetivo (F.O.)	52
3.7.2 Funcionamiento de GenOpt.....	53
3.7.2.1 Algoritmo Hooke-Jeeves	56
3.7.3 Proceso de calibración	57
4 Simulación y calibración del modelo	62
4.1 Monitorización	62
4.2 Calibración	63
4.2.1 Calibración de una variable independiente	63
4.2.1.1 Calibración “Espesor de la lana de vidrio”	64
4.2.2 Calibración sucesiva	70
4.2.3 Calibración conjunta	72
5 Conclusiones y líneas futuras	76
5.1 Conclusiones	76
5.2 Líneas futuras	77
6 Bibliografía.....	78
Anexo I: Implicaciones Sociales, y/o Económicas, y/o Ambientales	82
Anexo II: Reflexiones Éticas y Sociales	83
Anexo III: Fachadas Este y Oeste del edificio	84
Anexo IV: Gimnasio Planta Baja	85
Anexo V: Gimnasio Planta Graderíos	86
Anexo VI: Tabla de Tasas Metabólicas por Actividad	87

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1 Evolución de los principales precios regionales del gas natural [6]	11
Figura 2-2 Hoja de Ruta de la Energía 2050 [10]	14
Figura 2-3 Etiqueta de eficiencia energética [14].....	15
Figura 2-4 Plan REPowerEU [15].....	16
Figura 2-5 Documento Básico: HE [21].....	19
Figura 2-6 Diseño con SketchUp [25].....	21
Figura 2-7 Herramienta OpenStudio® [28]	22
Figura 2-8 Herramienta de optimización GenOpt [29]	22
Figura 3-1 Esquema general del desarrollo del TFG [Autoría propia]	24
Figura 3-2 Localización del edificio gimnasio “Guardiamarina Barrutia” de la ENM [31].....	25
Figura 3-3 Construcción del edificio gimnasio-piscina “Guardiamarina Barrutia” de la ENM [32]	26
Figura 3-4 Vista de las fachadas Norte y Oeste del gimnasio [Autoría propia].....	26
Figura 3-5 Vista del lucernario desde el exterior y el interior [32]	27
Figura 3-6 Vista general vidriera [32].....	27
Figura 3-7 Zonas climáticas de España [33]	28
Figura 3-8 Tabla A del Anejo B del CTE. Zonas climáticas de las provincias de España [21].....	28
Figura 3-9 Fachada de la cara Norte del edificio [Autoría propia]	29
Figura 3-10 Introducción del valor máximo de la tasa metabólica [Autoría propia]	33
Figura 3-11 Iluminación del edificio gimnasio-piscina de la ENM [Autoría propia].....	35
Figura 3-12 Proyector LED Sevilla 3 Disano [38].....	35
Figura 3-13 Sensor de temperatura de la marca Zecamin [40].....	36
Figura 3-14 Aplicación para dispositivos móviles <i>SmartLife</i> [Autoría propia]	37
Figura 3-15 Sensor <i>Wave Plus</i> de la marca <i>AirThings</i> [42]	38
Figura 3-16 Emplazamiento de los sensores en el edificio [Autoría propia]	38
Figura 3-17 Sensor <i>Wave Plus</i> situado en el pabellón [Autoría propia]	39
Figura 3-18 Proceso de simulación y calibración del edificio [Autoría propia]	40
Figura 3-19 Edificio gimnasio-piscina “Guardiamarina Barrutia” [Autoría propia]	40
Figura 3-20 Creación de un archivo OSM en SketchUp [Autoría propia].....	41
Figura 3-21 Diseño de la planta del edificio [Autoría propia]	41
Figura 3-22 Introducción de la altura del edificio [Autoría propia].....	42
Figura 3-23 Introducción de las puertas y ventanas del edificio. [Autoría propia].....	42
Figura 3-24 Surface matching [Autoría propia]	43
Figura 3-25 Zonas térmicas del modelo [Autoría propia]	43

Figura 3-26 Función “OpenStudio Inspector” [Autoría propia].....	44
Figura 3-27 Modelo final en SketchUp [Autoría propia].....	44
Figura 3-28 Desarrollo de los materiales en OpenStudio® [Autoría propia]	45
Figura 3-29 Creación de los elementos que componen la envolvente térmica [Autoría propia]	46
Figura 3-30 Desarrollo del Construction Set “Construcciones Gimnasio-Piscina GM Barrutia” [Autoría propia].....	46
Figura 3-31 Introducción de las cargas internas del edificio [Autoría propia].....	47
Figura 3-32 Introducción de las infiltraciones del edificio [Autoría propia]	48
Figura 3-33 Desarrollo de los horarios de Actividad [Autoría propia]	48
Figura 3-34 Desarrollo de los horarios de Actividad [Autoría propia]	49
Figura 3-35 Cargas internas del modelo [Autoría propia].....	49
Figura 3-36 Definición de los datos climáticos del modelo [Autoría propia].....	50
Figura 3-37 Simulación del modelo en OpenStudio® [Autoría propia]	50
Figura 3-38 Temperatura del aire en la Zona Térmica 1 (Pabellón) del modelo [Autoría propia] ..	51
Figura 3-39 Funcionamiento GenOpt [46]	52
Figura 3-40 Fórmula del CV(RMSE) [47]	52
Figura 3-41 Archivos de calibración en GenOpt [Autoría propia].....	53
Figura 3-42 Archivos de la simulación en GenOpt [Autoría propia]	54
Figura 3-43 Archivos generados por OpenStudio® en la simulación [Autoría propia].....	54
Figura 3-44 Archivos usados por GenOpt para calibrar [Autoría propia].....	55
Figura 3-45 Cálculo del error mediante el CV(RMSE) [Autoría propia]	56
Figura 3-46 Ficheros de salida en GenOpt [Autoría propia]	57
Figura 3-47 Introducción de datos en el archivo “comandos.txt” [Autoría propia]	58
Figura 3-48 Ajustes de optimización [Autoría propia].....	59
Figura 3-49 Ajustes del algoritmo Hooke-Jeeves [Autoría propia]	59
Figura 3-50 Definición del parámetro a calibrar en “Plantilla_modelo.idf” [Autoría propia]	60
Figura 3-51 Ejecución de la calibración mediante “IniciarCalibracion.bat” [Autoría propia].....	60
Figura 3-52 Calibración espesor de la lana de vidrio [Autoría propia].....	61
Figura 3-53 Resultados de la calibración del espesor de la lana de vidrio [Autoría propia].....	61
Figura 4-1 Resultados de monitorización en cada zona térmica [Autoría propia]	63
Figura 4-2 Resultados de la calibración del espesor de la lana de vidrio [Autoría propia].....	64
Figura 4-3 Parámetros para la calibración de las infiltraciones [Autoría propia]	64
Figura 4-4 Parámetros para la calibración de las infiltraciones [Autoría propia]	65
Figura 4-5 Calibración del flujo de las infiltraciones [Autoría propia].....	66
Figura 4-6 Resultados de la calibración del flujo de las infiltraciones [Autoría propia]	66
Figura 4-7 Parámetros para la calibración de la actividad fraccional [Autoría propia]	67

Figura 4-8 Parámetros para la calibración de la actividad fraccional [Autoría propia]	67
Figura 4-9 Calibración de la actividad [Autoría propia]	67
Figura 4-10 Resultados de la calibración de la actividad [Autoría propia]	68
Figura 4-11 Parámetros para la calibración del espesor del enlucido de yeso [Autoría propia]	68
Figura 4-12 Parámetros para la calibración del espesor del enlucido de yeso [Autoría propia]	68
Figura 4-13 Calibración del enlucido de yeso [Autoría propia]	69
Figura 4-14 Resultados de la calibración del enlucido de yeso [Autoría propia]	69
Figura 4-15 Introducción de los resultados de la Calibración 1 en la Calibración 2 [Autoría propia]	71
Figura 4-16 Resultados de la calibración sucesiva [Autoría propia]	71
Figura 4-17 Parámetros para la calibración conjunta [Autoría propia]	72
Figura 4-18 Calibración conjunta [Autoría propia]	73
Figura 4-19 Resultados de la calibración conjunta [Autoría propia]	73
Figura 4-20 Resultados de la calibración conjunta sobre la Zona Térmica 1 [Autoría propia]	74
Figura 4-21 Resultados de la calibración conjunta sobre la Zona Térmica 2 [Autoría propia]	74
Figura 4-22 Resultados de la calibración conjunta sobre la Zona Térmica 3 [Autoría propia]	75
Figura A3-1 Fachadas Este y Oeste del edificio gimnasio-piscina	84
Figura A4-1 Plano Gimnasio Planta Baja	85
Figura A5-1 Plano Gimnasio Planta Graderíos	86
Figura A6-1 Tabla A1 del ANSI/ASHRAE Standard 55	87

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3-1 Características constructivas de la cubierta [Autoría propia]	30
Tabla 3-2 Características constructivas de los muros exteriores [Autoría propia].....	30
Tabla 3-3 Características constructivas de los muros interiores [Autoría propia]	30
Tabla 3-4 Características constructivas del suelo [Autoría propia].....	31
Tabla 3-5 Características constructivas de las puertas exteriores [Autoría propia]	31
Tabla 3-6 Características constructivas de las ventanas exteriores [Autoría propia]	31
Tabla 3-7 Zonas térmicas del edificio piscina-gimnasio “Guardiamarina Barrutia” [Autoría propia]	32
Tabla 3-8 Tasa metabólica por actividad física [Autoría propia en base a [37]]	32
Tabla 3-9 Horario de ocupación personal entre semana [Autoría propia]	33
Tabla 3-10 Horario de ocupación personal fin de semana [Autoría propia]	34
Tabla 3-11 Características de los proyectores LED Sevilla 3 Disano [Autoría propia en basen a [38]]	34
Tabla 3-12 Horarios de encendido y apagado de los proyectores LED Sevilla 3 Disano [Autoría propia]	35
Tabla 3-13 Criterios de calibración del ASHRAE Guideline 14 [Autoría propia en base a [48]] ...	53
Tabla 4-1 Resultados totales de las calibraciones individuales [Autoría propia].....	70

1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1 Introducción

Nos encontramos ante uno de los mayores desafíos de nuestro tiempo: el cambio climático. Cada día el planeta nos manda señales desde diferentes localizaciones geográficas sobre las diferentes transformaciones que está sufriendo; desde los cambios meteorológicos que tendrán un impacto severo sobre la producción de alimentos hasta el crecimiento del nivel del mar. El cambio climático surge como fruto del cambio en las temperaturas y patrones meteorológicos a lo largo de un periodo de tiempo prolongado. Los cambios pueden ser producidos por dos agentes: naturales o humanos. El avance tecnológico, productivo e industrial han hecho que alcancemos un nivel de vida hasta nunca antes conocido, pero no hemos sido capaces de encontrar un equilibrio, puesto que las emisiones derivadas de toda esta maquinaria han hecho que nuestro planeta se degrade exponencialmente desde mediados del siglo XIX.

Son tres los hechos que, según los científicos, son unos fuertes indicadores de la magnitud del problema ante el que nos encontramos. En primer lugar, la concentración de GEI (Gases de Efecto Invernadero) está estrechamente relacionada con la temperatura media de la Tierra. En segundo lugar, se ha experimentado un crecimiento exponencial desde la Revolución Industrial tanto en la concentración de GEI como, consecuentemente, en la temperatura del globo terráqueo. Por último y, en tercer lugar, el GEI más abundante, aproximadamente dos tercios del total, es el dióxido de carbono (CO_2), que resulta de la quema de combustibles fósiles.

Ante esta situación, en 1979 se llevó a cabo la Primera Conferencia Mundial sobre el Clima donde se calificó al cambio climático como un problema global de urgencia haciendo un llamamiento a todos los países del mundo para encontrar una solución. Desde entonces, hubo un gran número de conferencias para analizar la situación y buscar modos de actuación sostenible. En 1990, el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, *Intergovernmental Panel on Climate Change*) publicó por primera vez un informe donde se recogía el estado climático global. Este primer Informe de Evaluación se convirtió en la principal referencia de las negociaciones llevadas a cabo por la Asamblea General de las Naciones Unidas para el establecimiento de una convención sobre el cambio climático.

Por todo ello, en 1992 en Río de Janeiro se celebró la Cumbre de la Tierra donde surgió la Convención Marco de Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), la cual cuenta con una participación prácticamente total de 198 partes (cuenta con la aprobación de 198 países y una organización de integración regional, la UE, Unión Europea). La CMNUCC es el organismo principal de la ONU donde se negocia sobre el cambio climático. Fue adoptada en mayo de 1992 y entró en vigor en marzo de 1994. En específico, España la firmó en junio de 1992, y la ratificó en diciembre de 1993.

Tres años después de que se adoptase el CMNUCC, se desarrolló un segundo Informe de Evaluación en 1995 donde se concluía que el clima ya había comenzado a cambiar debido a las emisiones mundiales. Era necesario tomar medidas ya no solo tecnológicas y administrativas, si no también jurídicas. Por ello, después de aproximadamente dos años y medio de intensas negociaciones se desarrolló el Protocolo Kioto en 1997. Un instrumento bajo el paraguas de la Convención que cuenta con medidas más enérgicas de lucha contra el cambio climático, en particular, compromisos jurídicamente vinculantes de reducción o limitación de emisiones para los países desarrollados o en procesos de desarrollo. El Protocolo de Kioto se dividió en dos etapas: primer periodo de compromiso (2008-2012) y segundo periodo de compromiso (2013-2020) [1].

En cuanto a España, para la primera etapa, la estrategia española se plasmó en el Real Decreto 1370/2006 [2], de 24 de noviembre, por el que se aprueba el Plan Nacional de Asignación de derechos de emisión de gases de efecto invernadero, 2008-2012. En este plan se establecía un límite para las emisiones producidas el cual no podía superar el 37% respecto a las del año base. Finalmente, las emisiones en este periodo fueron de un 23,7% por encima de las del año base, cumpliendo así con las expectativas.

En cuanto al segundo periodo, se concretó que se debía reducir las emisiones a un límite no superior al 20% con respecto al año base. En concreto, a España le correspondía alcanzar una reducción del 10%.

Numerosos países como Estados Unidos y organizaciones de integración regional como la Unión Europea han dejado claramente visible en sus líneas de acción que la búsqueda de la eficiencia energética en edificios es uno de los pilares fundamentales para poder alcanzar los objetivos tanto energéticos como climáticos de una forma equilibrada y sostenible. En el caso de España, dentro del Ministerio de Defensa, la Armada ha adquirido y desarrollado diversas políticas para formar parte de los objetivos comunes de la nación y alcanzar las expectativas de eficiencia energética en materia de defensa. Por todo ello, se elaboró la Directiva 107/1997 de 2 de junio de Ministerio de Defensa sobre la protección del Medio Ambiente [3] donde se establece que la política medioambiental de Defensa estará basada en el desarrollo sostenible y dirigida a alcanzar los objetivos de la legislación siempre y cuando sean compatibles con la labor de las Fuerzas Armadas (FAS). Por lo tanto, contribuir en la búsqueda de la eficiencia energética en las bases y acuartelamientos de la Armada es un medio que puede contribuir al cumplimiento de los objetivos establecidos.

Los edificios consumen aproximadamente un 40% del consumo energético total a nivel mundial y, consecuentemente, son por tanto responsables de las emisiones de dióxido de carbono a la atmósfera [4]. Científicos de todo el mundo están trabajando en el modelado energético con el objetivo de desarrollar estrategias que supondrían una reducción en el consumo energético de un edificio.

En los edificios, para tener en cuenta el confort térmico de los ocupantes y según la funcionalidad (fabricación, etc.) los sistemas de climatización, iluminación y motores eléctricos son los principales consumidores de energía en el sector de la edificación. Los cuatro usos más generales, y, por tanto, más costosos en el consumo energético de edificios son: calefacción, refrigeración, agua caliente sanitaria e iluminación.

Es importante destacar que la conservación energética, que va de la mano de un uso eficiente de la energía sin reducir los niveles de confort, no significa racionamiento energético, reducción o recorte de la carga, es más bien una forma de identificar aquellas áreas donde existe un derroche energético y buscar soluciones para reducir las pérdidas. Hay una gran variedad de oportunidades para conseguir la eficiencia energética dentro de edificios que cumpla con las expectativas de confort, además de reducir el consumo. Se estima que los nuevos edificios pueden reducir el consumo energético entre un 20% y un 50% desarrollando un edificio que cumpla con los parámetros de calefacción, ventilación, aire acondicionado (lo que se conoce como HVAC: *heating, ventilation and air conditioning*), iluminación, calentamiento de agua, refrigeración, equipamiento eléctrico y electrónico y otros [5].

Por todo lo expuesto anteriormente, el desarrollo de un modelado energético aporta grandes beneficios en la labor de búsqueda de un consumo de energía eficiente. Esta técnica permite el estudio y planteamiento de numerosos escenarios que pueden ser objeto de estudio para así posteriormente obtener las conclusiones necesarias. Gracias a ello, se puede juzgar con objetividad y fundamento la eficacia y rentabilidad de un determinado proyecto de construcción o remodelación antes de que este se lleve a cabo y sea demasiado tarde para poder encontrar una solución, o dicha solución sea demasiado costosa. Es una responsabilidad de todos, el afán por la búsqueda de sistemas óptimos que permitan contribuir a cumplir con los intereses de la Armada y, por tanto, de la nación.

En el presente Trabajo de Fin de Grado se lleva a cabo un estudio del comportamiento térmico del edificio gimnasio-piscina “Guardiamarina Barrutia” de la Escuela Naval Militar mediante su modelado, posterior simulación y la calibración final que nos aportará los datos suficientes para poder obtener las conclusiones acerca del gasto energético del edificio.

1.2 Objetivos

Los tres principales objetivos del presente trabajo son:

- En primer lugar, la monitorización de datos térmicos del edificio gimnasio-piscina de la Escuela Naval Militar situada en Marín (Pontevedra), la cual, se llevará a cabo mediante el uso de los sensores de medición de temperatura proporcionados por el Centro Universitario de la Defensa (CUD).
- En segundo lugar, el modelado y la simulación del edificio mediante el uso de las herramientas SketchUp y OpenStudio®.
- En tercer lugar, la calibración del modelo con los datos obtenidos en la monitorización, haciendo uso de la herramienta de calibración GenOpt. Para ello, se calculará el error obtenido antes y después de la calibración, buscando conseguir un modelo que se ajuste lo más fielmente posible a la realidad.

1.3 Estructura de la memoria

Este Trabajo de Fin de Grado está estructurado en cinco apartados seguidos de la bibliografía utilizada como herramienta de apoyo en el desarrollo del trabajo y los correspondientes anexos que complementan la información expuesta. La estructura es la siguiente:

- Introducción y objetivos: este apartado está orientado a contextualizar el Trabajo de Fin de Grado, así como explicar la motivación que ha llevado a desarrollar el proyecto. En esta sección se explica el “por qué” del trabajo, además de poner de manifiesto los diferentes objetivos que se pretenden alcanzar tanto en el desarrollo como al finalizar dicho proyecto.
- Estado del arte: este apartado pretende desarrollar brevemente cada uno de los fundamentos teóricos de las diferentes áreas que influyen de manera directa en el tema principal del trabajo, en este caso la eficiencia energética. Es por todo esto que se tratarán aspectos como la economía y los compromisos legales, medioambientales y sociales.
- Desarrollo: en esta sección se desarrolla extensamente el procedimiento utilizado mediante la elaboración del proyecto. Este apartado se divide en siete bloques, de entre los que cabe destacar los cuatro últimos donde se desarrolla cada proceso. Los apartados son: metodología, descripción del edificio, factores ocupacionales y cargas internas, monitorización, modelado del edificio, simulación y calibración.
- Simulación y calibración del modelo: en esta sección se procede a la simulación del modelado obtenido en el apartado anterior. La calibración consiste en una primera fase de comparación con las mediciones reales obtenidas a partir de los sensores, para llegar finalmente a la validación del modelo calibrado.

- Conclusiones y líneas futuras: en este apartado, partiendo de las propuestas expuestas en la anterior sección, se pretende llegar a las mejores conclusiones posibles acerca de la situación energética del edificio que ha sido objeto de estudio en este trabajo.

2 ESTADO DEL ARTE

2.1 Crisis energética mundial

La situación de pandemia mundial vivida a lo largo del año 2019 producida por la Covid-19 fue el principal desencadenante para la rapidez asociada al repunte económico que se produjo en aquel año. Esta situación unida al agravamiento de las condiciones energéticas mundiales tras la invasión de Rusia sobre Ucrania en febrero de 2022, fueron los principales desencadenantes para constatar la existencia de una grave crisis energética a escala mundial. El precio del gas natural, y consecuentemente, el de la electricidad en algunos mercados alcanzaron máximos históricos. Por todo ello, el pasado año 2023 los mercados energéticos han estado marcados por las tensiones políticas y sociales a nivel mundial, dejando sobre la mesa la necesidad y el desafío de búsqueda de soluciones para el año 2024, el cual estará marcado por los retos en el sector energético.

Se puede constatar que lo que tenemos por la proa no se trata únicamente de un reto energético, sino también social. La rápida subida de los precios de la energía ha contribuido en gran medida a que la inflación sea alarmantemente elevada, algunas familias se hayan visto abocadas a la pobreza, numerosas fábricas hayan tenido que recortar su producción o incluso se han visto obligadas al cierre temporal o, en el peor de los casos, definitivo; y el crecimiento económico se haya ralentizado hasta el punto de que algunos países van camino de sufrir una recesión sin precedentes en su historia reciente, tal y como refleja la Figura 2-1.

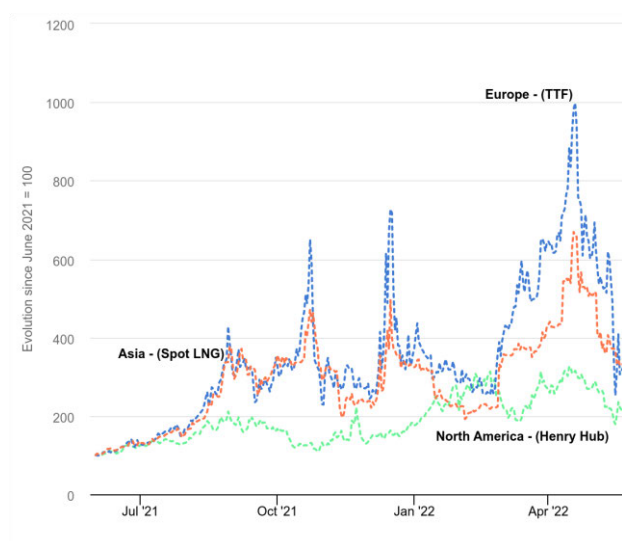


Figura 2-1 Evolución de los principales precios regionales del gas natural [6]

El efecto global de esta crisis energética es producto de las numerosas interconexiones existentes a nivel mundial tanto a nivel de infraestructuras como a nivel administrativo y económico. Esta crisis afecta a todos los combustibles fósiles y se puede decir, por tanto, que nos encontramos ante la primera crisis energética verdaderamente mundial.

Se ha podido observar como en el continente europeo algunas fábricas altamente dependientes del consumo de gas han recortado la producción porque no se pueden permitir cumplir con los parámetros de producción estipulados. Asimismo, en Asia algunas fábricas chinas han sufrido directamente cortes en el suministro eléctrico. Sin embargo, la situación más preocupante la han protagonizado aquellos países en vías de desarrollo o aquellos que salen de una crisis económica y de un largo periodo recesivo, en estos casos las economías son emergentes y, por tanto, el presupuesto familiar destinado a la energía y los alimentos es elevado, provocando así situaciones de extrema pobreza. Incluso en las economías avanzadas, la subida de los precios ha afectado a numerosos hogares provocando tensiones políticas, económicas y sociales.

Las principales causas de esta crisis energética mundial son variadas entre las que destacan: la rápida recuperación económica tras la pandemia vivida por la Covid-19, las condiciones meteorológicas registradas en varias partes del mundo, la reducción de las inversiones en las infraestructuras destinadas al consumo energético provocadas por diferentes causas, entre otras, la pandemia y; por último, la corte de suministro de gas a Europa por parte de Rusia antes de invadir Ucrania en 2022.

En cuanto a esta última cuestión, el ataque de Rusia a Ucrania agravó enormemente la situación energética mundial. Los Estados Unidos junto con Europa sometieron a Rusia a numerosas sanciones económicas y, gradualmente, se ha dejado de importar el gas ruso. En este intento por sustituir el gas proveniente de Rusia, la Unión Europea ha buscado la solución en otros países como por ejemplo Estados Unidos, Australia y Qatar, los cuales, ofrecen Gas Natural Licuado (GNL). Aparejados a los precios del gas, también se encuentra el coste de la electricidad puesto que el gas suele fijar el precio al que se vende esta. Por ello, los precios de la electricidad se han disparado. Los productores de GNL se están apresurando en conseguir atender al aumento de la demanda que han experimentado en este último año. Por ello se han puesto en marcha numerosas construcciones para desarrollar nuevas infraestructuras para la obtención de gas. Sin embargo, son proyectos con un alto coste de producción y requieren de tiempo para poder desarrollarlos. Las medidas que se están adoptando para paliar la crisis son diversas, algunos países están tratando de amortiguar el golpe a consumidores y empresas mediante ayudas directas o pagando la diferencia que se cobra a los consumidores por parte de los proveedores. Sin embargo, con la inflación reciente y el gasto de los fondos públicos destinado a paliar la crisis vivida durante la pandemia de Covid-19, las posibilidades de amortiguar el impacto son más limitadas de lo que supondrían a principios de 2020. Entre las soluciones, encontramos en algunos países la vuelta al carbón para producir electricidad o el aplazamiento del cierre de algunas centrales nucleares para poder atender a la demanda energética durante este periodo recesivo.

La Unión Europea ha introducido en sus objetivos para 2024 diversos planes relacionados con la normativa de almacenamiento de gas y se ha acordado recortar la demanda de gas y electricidad aplicando medidas de consumo eficiente, basadas en el uso de energías renovables y promoviendo programas de desarrollo de mejoras en la eficiencia energética. Asimismo, la AIE (Agencia Internacional de la Energía) ha desarrollado y publicado una serie de planes destinados a recortar el consumo de petróleo. Estos planes contienen recomendaciones para que Europa reduzca su dependencia del gas ruso además de que los ciudadanos de a pie disminuyan su consumo energético. La invasión rusa ha puesto sobre la mesa asuntos que hasta antes no se habían visto y ha provocado una revisión de las prioridades y políticas existentes en materia de energía, poniendo en cuestión la viabilidad de décadas de decisiones sobre infraestructuras e inversiones, provocando el mayor desafío que se ha planteado Europa, en materia de energía, en décadas: la profunda reorientación del comercio internacional de energía [6].

Esta crisis podría acelerar de forma indirecta el despegue definitivo de las energías renovables sostenibles más limpias como es la energía solar o la eólica, al igual que la crisis del petróleo vivida en

la década de los setenta trajo consigo importantes avances en materia de eficiencia energética. La crisis actual también ha puesto de relieve la importancia de disponer de unas infraestructuras de red eléctrica y gasística robustas con el objetivo de integrar los mercados regionales.

2.2 Eficiencia energética

La eficiencia energética se refiere a la utilización de tecnologías que requieren una menor cantidad de energía para conseguir el mismo rendimiento o realizar la misma función. Los tres principales aspectos en los que se sustenta la eficiencia energética son: la tecnología, el equipamiento o la maquinaria usada.

El aspecto fundamental que abarca la eficiencia energética es el ahorro de energía que se basa en el modo de actuar de las personas con el fin de utilizar menos energía. Este ahorro de energía abarca numerosas áreas, dentro de las cuales podemos encontrar el consumo responsable que se ve reflejado en diversas situaciones de la vida cotidiana, como por ejemplo el uso de la luz natural en vez de la luz artificial.

La eficiencia energética es importante debido a cuatro aspectos de gran relevancia: el crecimiento del consumo de energía a nivel mundial, el incremento de los costes de la energía, la elevada dependencia energética del exterior y el cambio climático [7].

Según el Tratado de Lisboa [8], firmado el 13 de diciembre de 2007 durante el Consejo Europeo de Lisboa y ratificado por todos los estados miembros, se sitúa a la energía como el centro de la actividad económica de la Unión Europea. En el artículo 194 del tratado se ponen de manifiesto diversos de los objetivos que marcan la política energética de la Unión Europea para los años venideros, entre estos objetivos destacan: asegurar el funcionamiento del mercado de energía, proporcionar seguridad de suministro a los países miembros, promover la eficiencia energética y el ahorro de energía, así como el desarrollo de fuentes de energía renovables, y por último, potenciar la interconexión energética.

La Directiva para la Eficiencia Energética (2012/27/EU) [9] estableció los objetivos de eficiencia energética para el año 2020, y la implementación de estas medidas para alcanzar los objetivos previstos por parte de los Estados Miembros estaba prevista para el año 2014. Esta directiva contenía un marco común de medidas para la promoción de la eficiencia energética y la utilización de las energías más eficientes en todas las etapas de la cadena energética. Dentro de las medidas incluidas se encuentran: establecer un objetivo indicativo nacional de eficiencia energética, facilitar el acceso gratuito a los datos de consumo en tiempo real y a los datos históricos de consumo, la renovación de la edificación que afecta tanto a los edificios ya construidos buscando mejoras en su consumo energético, como a los procesos de construcción para las nuevas técnicas de edificación eficiente, y la eficiencia en la generación de energía.

Para el año 2030 los objetivos se centran en buscar una reducción de las emisiones de GEI, los cuales, se pueden estructurar en dos grupos: medidas para aquellos sectores con derechos de emisión, y para aquellos sectores que no están sujetos al comercio de emisiones. En cuanto a los primeros, se establece un límite máximo de emisiones, así como de una cantidad de reserva para la estabilidad del mercado; y, además, se fijan una serie de medidas de protección contra las fugas de carbono. En cuanto al segundo grupo, se espera llevar a cabo esfuerzos compartidos a través de objetivos nacionales vinculantes y la estandarización de diferentes medidas de apoyo.

El conjunto de medidas englobado desde el Tratado de Lisboa pretende, de alguna forma, allanar el camino hasta el año 2050, donde se fijan los objetivos para la reducción de las emisiones de GEI y, por tanto, el alcance de los niveles de eficiencia energética esperados, tal y como refleja la Figura 2-2.

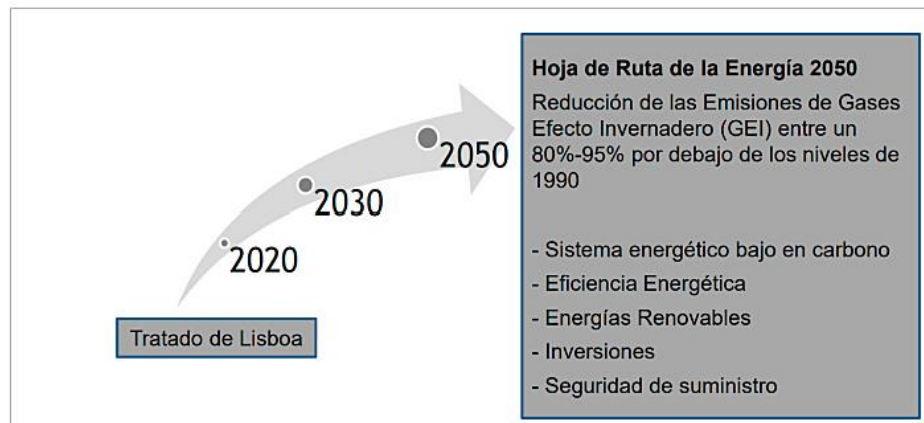


Figura 2-2 Hoja de Ruta de la Energía 2050 [10]

Como se ha mencionado anteriormente, la eficiencia energética es una de las prioridades estratégicas de la Unión Europea, que se basa en el principio de la primacía de la eficiencia energética. Las medidas de eficiencia energética son consideradas como un medio para conseguir un abastecimiento de energía sostenible, reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, mejorar la seguridad del suministro, rebajar los gastos de importación y fomentar la competitividad europea. En los últimos quince años la legislación de la Unión en materia de eficiencia energética ha evolucionado en gran medida. La nueva directiva (UE) 2023/1791 relativa a la eficiencia energética, en vigor desde el 10 de octubre de 2023, fija una reducción del consumo de energía del 11,7% para 2030. Asimismo, se establece para cada Estado miembro la libertad de fijar una contribución orientativa nacional de eficiencia energética basada en el consumo de energía con el fin de cumplir con los parámetros estipulados por la Unión. Los Estados miembros deben lograr un ahorro acumulado de uso final de la energía de aquí a 2030 equivalente a un nuevo ahorro de al menos el 0,8% del consumo de energía final hasta el 31 de diciembre de 2023, del 1,3% a partir del 1 de enero de 2024, del 1,5% a partir del 1 de enero de 2026 y del 1,9% a partir del 1 de enero de 2028 [11].

En cuanto al sector público, la Directiva introduce una serie de objetivos para asegurar que los resultados de este sector sean ejemplares; los organismos públicos deben reducir su consumo total combinado de energía final en al menos un 1,9% anual en comparación con el 2021, y deben renovar al menos el 3% de la superficie total de sus edificios con calefacción o sistema de refrigeración cada año. También se establecen una serie de medidas únicas orientadas tanto a las pequeñas y medianas empresas como a los hogares, así como una serie de obligaciones para la planificación de la calefacción y refrigeración en los municipios con una población superior a 45.000 habitantes [12].

2.2.1 Eficiencia energética en edificación

Relativo a la eficiencia energética en edificios, la Directiva 2010/31/UE, modificada en 2018, tiene por objetivo garantizar que todos los Estados miembros cuenten de aquí a 2050 con un parque inmobiliario altamente eficiente, desde el punto de vista energético, y descarbonizado. La Directiva introduce diversas estrategias de renovación a largo plazo que son de carácter obligatorio para los Estados miembros, con el objetivo de fomentar la renovación de sus parques nacionales de edificios, tanto públicos como privados, transformándolos en parques inmobiliarios con alta eficiencia energética y descarbonizados antes de 2050. Asimismo, se busca un progreso de aceleración en la transformación de los edificios ya existentes en “edificios de consumo de energía casi nulos” para el año 2050, con la obligación de que todos los nuevos edificios edificadas a partir de 2021 sean de este tipo. Además, la Directiva establece medidas que fomentan la modernización de todos los edificios con la incorporación tecnologías inteligentes [12].

Debido a la crisis energética mundial y al cambio climático, el 15 de diciembre de 2021 la Comisión propuso una revisión de la Directiva relativa a la eficiencia energética de los edificios para adaptarla a su objetivo de neutralidad climática. Esta revisión supuso la entrada de las herramientas necesarias para

que los Estados miembros puedan lograr la existencia de un parque inmobiliario de cero emisiones de aquí a 2050. Asimismo, incluye una nueva definición de edificios de cero emisiones y perfecciona las ya existentes como la de “edificio de consumo de energía casi nulo” y “renovación profunda”. Debido a las necesidades actuales, la revisión sustituye las estrategias de renovación a largo plazo que se presentaban en la Directiva inicial, por planes nacionales de renovación de edificios, los cuales son más operativos y están sujetos a un mejor seguimiento. Dichos planes deben ser presentados no más tarde del 30 de junio de 2024. Asimismo, se incluyen una serie de medidas energéticas más restrictivas al exigir que todos los edificios de nueva construcción a partir de 2030 y todos los edificios públicos a partir de 2027 sean de cero emisiones, al igual que todos los edificios no residenciales de clase G de eficiencia energética sean incluidos en un plan de reducción constante del gasto energético hasta que alcancen al menos la clase F para el año 2027 y la clase E en el año 2030; así como todos los edificios residenciales alcancen al menos la clase F para el año 2030 y la clase E de aquí a 2033.

La etiqueta de eficiencia energética [13] es una herramienta que proporciona a los consumidores información relevante sobre el rendimiento energético de un determinado electrodoméstico, dispositivo electrónico o cualquier instalación que consume energía. Por lo general, estas etiquetas clasifican los productos en una escala con letras y colores que van desde la letra A con el color verde (más eficiente) hasta G con el color rojo (menos eficiente), indicando de esta forma su eficiencia en términos de consumo energético, tal y como refleja la Figura 2-3.

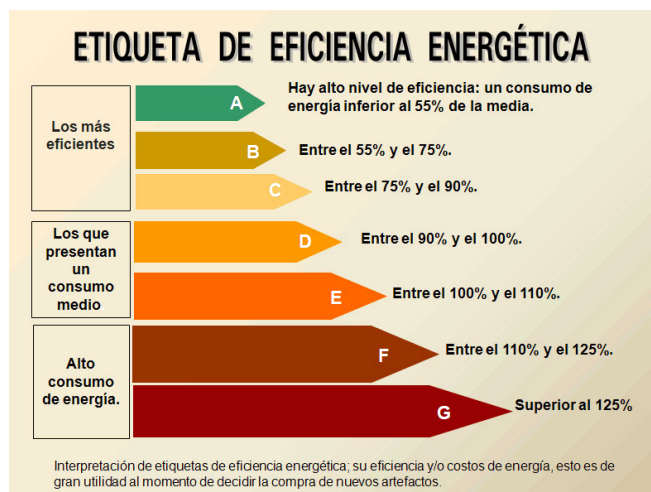


Figura 2-3 Etiqueta de eficiencia energética [14]

Sin embargo, no solo la crisis energética mundial y el cambio climático han sido factores que han alterado las necesidades energéticas actuales. El 18 de mayo de 2022, tras la invasión rusa de Ucrania y en consonancia con el plan REPowerEU, la Comisión lideró la modificación de la Directiva en varios aspectos relativos a la eficiencia energética en edificios. En específico, se busca reforzar la energía solar mediante la instalación obligatoria gradual de sistemas de energía solar en los tejados e introduciendo medidas de reducción de la demanda energética.

2.2.2 Plan REPowerEU

La invasión de Ucrania por Rusia ha generado una serie de dificultades y perturbaciones en el mercado de la energía mundial que han provocado la necesidad de crear un plan para poner fin a la dependencia de la UE con respecto a los combustibles fósiles rusos. Este plan se denomina REPowerEU y surge de la urgencia para transformar el sistema energético europeo debido a dos razones, fundamentalmente. En primer lugar, poner fin a la dependencia de la UE con respecto a los combustibles fósiles rusos y, en segundo lugar, hacer frente a la crisis climática. Para poder alcanzar los objetivos establecidos el plan contempla una serie de medidas como el ahorro de energía, la diversificación del suministro de energía y el despliegue acelerado de las energías renovables para sustituir a los combustibles fósiles en los hogares, la industria y la producción de electricidad.

El ahorro de energía es la forma más rápida y barata de hacer frente a la actual crisis energética. Como ya se ha visto anteriormente, la Comisión propone mejorar las medidas de eficiencia energética a largo plazo y para ello contempla la toma de una serie de objetivos a corto plazo, para poder cumplir con las expectativas cuanto antes. Entre estos objetivos destaca la reducción de la demanda de gas y de petróleo en un 5%. Las medidas adoptadas en la actualidad, incluidas en la estrategia exterior de la UE en materia de energía, facilitarán la diversificación energética y la creación de asociaciones a largo plazo con los proveedores. En el Mediterráneo y el mar del Norte se desarrollarán grandes corredores de hidrógeno; ante la agresión de Rusia sobre Ucrania, la UE apoyará a los ucranianos, a Moldavia, los países Balcanes Occidentales y de la Asociación Oriental, así como a aquellos socios que sean más vulnerables.

En cuanto a las energías renovables, una expansión y una aceleración del uso de energía renovable en la producción de electricidad, la industria, los edificios y el transporte supondrán numerosas ventajas como acelerar la independencia energética de las principales industrias, impulsar la transición ecológica y reducir los precios a largo plazo. Las iniciativas que se contemplan son las siguientes, tal y como refleja la Figura 2-4:

- Una estrategia de energía solar de la UE específica para duplicar la capacidad solar fotovoltaica en vistas al año 2025, así como instalar 600 GW para el año 2030. Siguiendo la iniciativa de mejora de la energía solar europea, se pretende instaurar la obligatoriedad de instalar paneles solares en aquellos edificios públicos y residenciales de nueva construcción.
- Duplicación de la instalación de bombas de calor y medidas destinadas a la integración de la energía geotérmica en los sistemas de calefacción urbana y comunitaria.
- Una recomendación de la Comisión para abordar con garantías de éxito la lentitud y complejidad de los permisos para grandes proyectos de energías renovables y una modificación específica de la Directiva sobre fuentes de energía renovables para reconocerlas como de interés público superior.
- Alcanzar una producción nacional de 10 millones de toneladas de hidrógeno renovable con el objetivo de sustituir el gas natural, el carbón y el petróleo en industrias y sectores de transporte difíciles de descarbonizar [15].

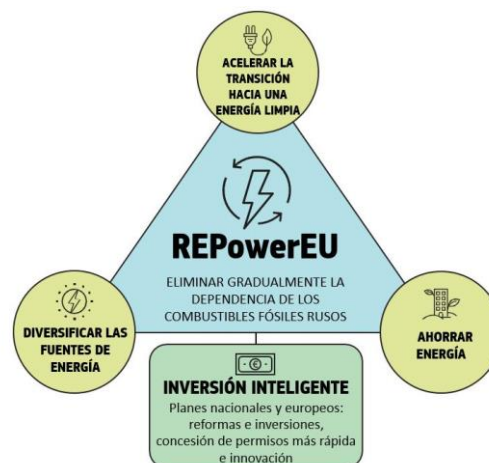


Figura 2-4 Plan REPowerEU [15]

2.3 Calificación energética de edificios

2.3.1 Edificación

Según la RAE la edificación es la acción y el efecto de edificar, es decir, de hacer un edificio. Asimismo, se contempla a la edificación como un edificio o conjunto de edificios [16].

La edificación es el término que se utiliza para definir toda construcción diseñada, planificada y ejecutada por el hombre, en un espacio determinado. Las edificaciones pueden tener distintos tamaños, espacios y formas, además de cumplir con múltiples propósitos. Las viviendas, consideradas como edificaciones de carácter habitacional, son las más comunes. Sin embargo, existen otros tipos como: templos, monumentos, comercios, centros deportivos, museos, colegios y aeropuertos. A la hora de realizar un proyecto de edificación es de vital importancia cumplir con los requisitos de construcción que han de atender estrictamente a las diferentes exigencias técnicas, civiles y legales. Estos requisitos básicos se clasifican según su funcionalidad, su seguridad y su habitabilidad [17].

En cuanto a la funcionalidad, la disposición y las dimensiones de la edificación, sus espacios e instalaciones han de facilitar el cumplimiento de sus funciones; ha de permitir un fácil acceso y una correcta circulación a aquellas personas con movilidad reducida; y ha de facilitar el acceso a servicios importantes como la telecomunicación.

En cuanto a la seguridad, los elementos estructurales que conforman las características físicas del edificio han de garantizar la resistencia y estabilidad necesarias. Entre estos elementos se encuentran: los cimientos, los soportes, las vigas, muros y demás materiales de construcción. Así mismo, la obra ha de contar con una planificación perfecta de desalojo del edificio en caso de emergencia.

En cuanto a la habitabilidad, los edificios de nueva construcción han de contar con una planificación para el ahorro energético y el aislamiento térmico, para la cual se han de cumplir con las exigencias de la edificación sostenible. Además de garantizar condiciones de higiene y salud y la protección del medio ambiente facilitando la gestión de residuos.

2.3.1.1 Edificación sostenible

Aquellas edificaciones que, debido a su diseño y construcción, minimizan el impacto ambiental y proporcionan un espacio seguro, saludable y eficiente para sus ocupantes, son calificadas como edificaciones sostenibles. Con este modelo de construcción se consiguen edificios que maximizan la eficiencia en el uso de la energía y el agua, reducen los residuos y las emisiones de gases de efecto invernadero, utilizan materiales y recursos renovables, y como consecuencia, minimizan los impactos negativos en el entorno natural. Así mismo, la edificación sostenible también contempla como uno de sus objetivos principales el bienestar y la salud de las personas que las habitan mediante técnicas de optimización de la calidad del aire interior, la maximización de luz natural, el correcto control y optimización de la temperatura y humedad y, por último, la selección de materiales y acabados saludables. La edificación sostenible surge como respuesta al desafío global de construir de una manera más responsable y consciente con el medio ambiente y la sociedad, asegurando una mejor calidad de vida para las personas que habitan en ellas.

Para poder cumplir con los objetivos de eficiencia energética en el sector de la edificación, se han impulsado diferentes proyectos, entre los que destacan la construcción de “edificios pasivos”, es decir, la construcción de edificaciones de consumo energético prácticamente nulo. Estos edificios se caracterizan por tener un alto nivel de aislamiento térmico, una estanqueidad al aire muy alta, ventanas y puertas de altas prestaciones, y un sistema de ventilación mecánica con recuperación de calor. El objetivo de estas edificaciones es reducir su demanda energética para calefacción y refrigeración mediante el uso de fuentes de energía pasivas como la luz solar. La edificación sostenible contribuye en gran medida a la reducción del consumo energético de los edificios, llegando en algunos casos a reducir hasta el 90% del consumo en comparación con las edificaciones convencionales. En definitiva, estas

construcciones, debido a la aplicación de nuevas técnicas constructivas, contribuyen a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y a proteger al medio ambiente [18].

Para casos de mejora de la eficiencia energética de un edificio ya existente, se requiere una planificación cuidadosa y una serie de cambios que pueden ir desde pequeñas mejoras, hasta una reforma completa del edificio. Los pasos que se deben seguir para la rehabilitación sostenible de un edificio son los siguientes:

- Realizar una auditoria energética. Para poder llevar a cabo una remodelación en términos de eficiencia energética es necesario conocer el estado actual del edificio en cuanto a consumo energético. Una auditoria energética puede ayudar a identificar los puntos débiles del edificio en cuestión y, por tanto, las posibles soluciones que mejor se adapten a la situación.
- Aislar la casa. Un correcto aislamiento de las paredes, el techo y los suelos de la casa es clave para reducir la pérdida de calor en invierno y mantener la frescura de la estancia en verano.
- Mejorar las ventanas y puertas. Las ventanas y puertas son unos elementos de gran importancia a la hora de establecer objetivos en materia de eficiencia energética en edificios. Pueden llegar a ser responsables de una gran pérdida de calor en invierno y ganancia de calor en verano.
- Utilizar sistemas de energía renovables. La instalación de paneles solares se ha convertido en una de las principales opciones para reducir la dependencia de la energía de la red eléctrica. Estos sistemas son una inversión a largo plazo, que pueden llegar a contribuir a reducir los costos de energía y la huella de carbono.
- Usar materiales sostenibles. La elección de materiales sostenibles como madera, piedra natural, ladrillos y pinturas no tóxicas pueden contribuir a mejorar la salud y bienestar de los ocupantes.

2.3.2 *Green Building Council (GBC)*

El Consejo de la Construcción Ecológica, o también conocido como Consejo para la Edificación Sostenible, nació en Estados Unidos, forma una red con presencia en más de 70 países y se trata de una herramienta clave no solo para certificar la sostenibilidad de los edificios, si no para impulsar un cambio de mentalidad en el sector de la edificación. El Consejo para la Edificación trabaja para la adopción de entornos contruidos de forma sostenible y descarbonizados. Este consejo trabaja con empresas, organizaciones y gobiernos para cumplir con las ambiciones del Acuerdo de París y los objetivos mundiales de Desarrollo Sostenible de las Naciones Unidas. Mediante un enfoque de cambio sistémico, el Consejo para la Edificación Sostenible desafía la forma habitual de hacer negocios, estimula el cambio de mercado y defiende la adopción de las mejores prácticas para cumplir con los objetivos de descarbonización y sostenibilidad para 2030 en el ámbito de la construcción.

Entre los objetivos del *Green Building Council* se encuentra la colaboración directa para apoyar el movimiento europeo de eficiencia energética. Para ello, el Consejo impulsará diversas hojas de ruta de carácter nacional y regional para la descarbonización, que abordarán el impacto medioambiental de todo el ciclo de vida del sector de la edificación y de la construcción. Para el Consejo, abordar estas emisiones es esencial para hacer frente al impacto total del entorno construido y avanzar hacia los objetivos de una Europa climáticamente neutra para el año 2050. Los Consejos para la Edificación Sostenible que encabezan este proyecto se encuentran en: Alemania, Croacia, España, Finlandia, Francia, Irlanda, Italia, Países Bajos, Polonia y Reino Unido.

El Green Building Council de España (GBCe), emite la certificación DGNB (*German Sustainable Building Council*), la cual, supone la adaptación de la certificación de sostenibilidad alemana adaptada al mercado español. Asimismo, ha desarrollado un sello propio llamado “VERDE”, que evalúa cinco aspectos fundamentales: la calidad ambiental interior (aire, luz, ruido y confort), la gestión de los recursos (energía, agua y materiales), la integración social (accesibilidad, formación y comunicación) y la calidad técnica (monitorización, documentación y mantenimiento) [19].

2.3.3 Código Técnico de la Edificación (CTE)

El CTE es el marco normativo que establece las exigencias básicas de calidad que deben cumplir los edificios en relación con los requisitos básicos de seguridad y habitabilidad establecidos en la Ley 38/1999 de 5 de noviembre de Ordenación de la Edificación (LOE). Estos requisitos básicos atienden a: seguridad estructural; seguridad en caso de incendio; seguridad de utilización; higiene, salud y protección del medio ambiente; protección contra el ruido y; ahorro de energía y aislamiento térmico [20].

El CTE constituye un instrumento esencial para la aplicación de las directivas europeas en materia de edificación. De esta forma, la Directiva 2010/31/UE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 19 de mayo de 2010 relativa a la eficiencia energética de los edificios ha sido adoptada por el ordenamiento jurídico español mediante las modificaciones del Documento Básico DB-HE incluidas en las ordenes FOM/1635/2013 del 10 de septiembre y FOM/588/2017 del 15 de junio.

El CTE está estructurado en dos partes bien diferenciadas: Parte I (Disposiciones y condiciones generales) y Parte II (Documentos Básicos, DB). Cada Documento Básico se divide en secciones y apartados que detallan los requisitos y las condiciones técnicas a cumplir, y abordan áreas específicas como:

- Documento Básico SE: seguridad estructural.
- Documento Básico HS: salubridad.
- Documento Básico SI: seguridad en caso de incendio.
- Documento Básico HE: habitabilidad y ahorro de energía.
- Documento Básico SUA: seguridad de utilización y accesibilidad.
- Documento Básico HR: protección frente al ruido.

Estos documentos básicos conforman las partes principales del CTE y cubren diferentes aspectos que deben tenerse en cuenta tanto en edificios de nueva construcción como en intervenciones en edificios ya existentes.

La relación entre el CTE y la eficiencia energética se evidencia en la sección HE: habitabilidad y ahorro de energía, que establece los requisitos y criterios para conseguir un uso eficiente de la energía en los edificios (véase Figura 2-5). Algunos aspectos relevantes incluyen:

- Limitación de la demanda energética: en el CTE se observan los límites máximos establecidos para la demanda energética de calefacción, refrigeración, iluminación y agua caliente sanitaria en función de la zona climática donde se ubique el edificio.
- Certificación energética: el CTE exige la obtención de un certificado de eficiencia energética para los edificios, que clasifica el rendimiento energético del edificio en una escala desde la letra A (más eficiente) hasta la letra G (menos eficiente).
- Aislamiento térmico: se establecen una serie de requisitos para el aislamiento térmico de cerramientos y cubiertas, contribuyendo a la reducción de pérdidas y ganancias de calor, contribuyendo de esta forma a la mejora de la eficiencia energética [21].



Figura 2-5 Documento Básico: HE [21]

En resumen, el CTE es una herramienta fundamental para la regulación de la construcción en España, que incorpora medidas específicas y requisitos técnicos para promover la eficiencia energética en la edificación, con el objetivo de reducir el consumo de energía y las emisiones de gases de efecto invernadero derivadas de los edificios.

2.4 Modelado energético en edificación

El modelado energético en edificación es una herramienta fundamental para evaluar y optimizar el rendimiento energético de los edificios. Se trata de un proceso que consta de una serie de pasos y a partir del cual se puede llegar a la obtención de edificios energéticamente eficientes y sostenibles. Algunas de las principales características que presenta el modelado energético en edificación son:

- Simulación energética: consiste en el uso de un software especializado para predecir el consumo de energía de un edificio en función de algunos factores como el clima, la orientación, la envolvente térmica del edificio, los sistemas HVAC y la iluminación.
- Geometría del edificio: es preciso que el modelo incluya detalles precisos sobre la geometría del edificio, incluyendo la forma, tamaño, orientación y las características constructivas de la envolvente (muros exteriores, muros interiores, suelo, ventanas, puertas, etc.)
- Datos climáticos: para realizar un modelado energético preciso es necesario contar con datos climáticos locales del emplazamiento. Estos datos incluyen: temperatura, humedad, radiación solar, etc.
- Propiedades de los materiales: se deben definir las propiedades térmicas de los materiales utilizados en la construcción del edificio, como la conductividad térmica.
- Ocupación y uso: la actividad ocupacional del edificio también afecta al consumo energético. Esto puede suponer la inclusión de horarios de ocupación, patrones de uso, etc.
- Análisis de resultados: una vez completada la simulación energética, es necesario analizar los resultados para identificar oportunidades de mejora en el edificio.
- Optimización: necesaria para encontrar la combinación óptima de estrategias de diseño y operación que minimicen el consumo energético y maximicen la eficiencia [22].

A continuación, se explicará brevemente cada uno de los programas empleados para llevar a cabo el modelado energético del edificio gimnasio-piscina de la ENM.

2.4.1 SketchUp

SketchUp (véase Figura 2-6) es un programa de diseño gráfico y modelado basado en tres dimensiones (3D) y se ha convertido en el principal software elegido para tareas de arquitectura debido, en gran medida, a su facilidad de uso. Fue creado por Last Software en 1999 e inicialmente se llamaba Google SketchUp. En el año 2006 Google adquirió el programa y más adelante, en 2012, la compañía americana Trimble Inc. se convirtió en el propietario de la herramienta de diseño gráfico. Este software presenta una característica fundamental que hace que sea posible su uso entre los profesionales de áreas de trabajo tan dispares como la construcción, el diseño de videojuegos o la decoración de interiores; todo ello posible debido a su gran versatilidad. Algunos de los aspectos más relevantes de esta herramienta son los siguientes:

- Interfaz sencilla: SketchUp destaca por disponer de una interfaz intuitiva diseñada para que los usuarios puedan comenzar a modelar estructuras complejas en un periodo de tiempo relativamente corto mediante el uso de herramientas simples y accesibles.
- Extensiones y plugins: una de las principales ventajas de esta herramienta es la capacidad para ser extendido mediante diversos plugins y extensiones. Estos complementos pueden agregar funcionalidades adicionales como la importación o exportación de archivos específicos o la incorporación de herramientas de renderizado avanzadas. Para el modelado del edificio del gimnasio se usará el plugin de OpenStudio® para crear un modelo osm.

- Incorporación de Google Earth: esta característica permite a los usuarios de SketchUp colocar modelos 3D en ubicaciones geográficas específicas.
- Comunidad activa: SketchUp cuenta con una comunidad en línea que permite acceder a los usuarios a diversos recursos que pueden servir de ayuda como tutoriales y proyectos, facilitando de esta forma el aprendizaje y el intercambio de información [23] [24].



Figura 2-6 Diseño con SketchUp [25]

2.4.2 EnergyPlus™

Tal y como se ha mencionado anteriormente, en un momento climatológicamente complejo como el que estamos viviendo el comportamiento energético de los edificios es un aspecto que resulta especialmente relevante para reducir el impacto climatológico de la sociedad actual. El programa EnergyPlus™ de simulación energética de edificios es un software que ayuda en gran medida a conseguir este propósito.

Para poder influir de forma positiva en la reducción del impacto negativo que tienen los edificios sobre el medioambiente, la simulación energética de edificios ha pasado a ser un campo de desarrollo que se pretende implementar en el sector de la edificación para conseguir los beneficios correspondientes y esperados de su implementación. La simulación energética de edificios consiste en la creación de una réplica virtual de un edificio con el fin de obtener resultados de su comportamiento energético a través de reportes o comparativas. Para poder desarrollarlo, es necesario que los componentes constructivos y técnicos sean expuestos a distintas condiciones climatológicas y geográficas, así como a diferentes situaciones de uso y ocupación. Esta simulación se lleva a cabo a través de este software [26].

2.4.3 OpenStudio®

OpenStudio® (véase Figura 2-7) se trata de una colección multiplataforma (*Windows, Mac, Linux*) de herramientas de software para el modelado energético de edificios completos que se apoya en diferentes herramientas, algunas ya mencionadas anteriormente, como EnergyPlus™, la cual es el motor de cálculo para OpenStudio® y permite la simulación energética de edificios de código abierto que ofrece una amplia gama de características, entre las que destacan las siguientes:

- Modelado de edificios detallado: esta herramienta permite crear modelos detallados de edificios utilizando una interfaz gráfica de usuario (GUI) intuitiva. Los usuarios pueden diseñar la geometría del edificio incluyendo pisos, paredes, techos, ventanas y puertas, así como detalles de zonas térmicas, sistemas HVAC o iluminación.
- Simulación energética avanzada: esta plataforma utiliza motores de simulación energética avanzados como EnergyPlus™, el cual permite calcular el rendimiento energético del edificio modelado. Este análisis incluye: evaluación de la carga térmica, la demanda energética, el consumo de energía, la calidad del aire interior y otros parámetros relevantes.

- Análisis de diseño y optimización: OpenStudio® facilita el análisis de diseño y la optimización de edificios para mejorar la eficiencia energética.
- Integración con otras herramientas: OpenStudio® permite integrarse con otras herramientas de análisis de energía y diseño de edificios. Mediante la instalación de los diferentes *plug-in*, esta herramienta puede conectarse con SketchUp para el modelado geométrico o con herramientas de optimización como GenOpt.

En definitiva, OpenStudio® es una herramienta dotada de una gran versatilidad y flexibilidad, características que hacen de ella una herramienta poderosa para el modelado y la simulación energética de edificios. Asimismo, ofrece una amplia gama de características para apoyar el diseño de edificios energéticamente eficientes y sostenibles, por lo que podemos concluir que OpenStudio® es una opción con un gran atractivo para profesionales del diseño y la ingeniería de la edificación [27].



Figura 2-7 Herramienta OpenStudio® [28]

2.4.4 GenOpt

GenOpt (véase Figura 2-8) es un programa genérico de optimización de funciones de coste, utilizado principalmente en el campo de la ingeniería para optimizar sistemas complejos. Se trata de una herramienta muy versátil que permite minimizar funciones de coste y que en el campo de la simulación ofrece una gran variedad de posibilidades, puesto que permite la integración de diversos tipos de algoritmos de optimización.



Figura 2-8 Herramienta de optimización GenOpt [29]

Algunas de sus características principales son las siguientes:

- Flexible y modular: GenOpt es una herramienta que permite a los usuarios definir sus propios modelos de optimización y configuraciones de algoritmos según sus necesidades específicas.
- Algoritmos de optimización: GenOpt ofrece una gran variedad de algoritmos de optimización, como algoritmos genéticos, algoritmos de búsqueda local, algoritmos de enjambre de partículas, etc.
- Integración con modelos de simulación: GenOpt puede integrarse fácilmente con diferentes modelos de simulación como EnergyPlus™. Esto permite a los usuarios optimizar sistemas complejos utilizando modelos de simulación precisos.

- Interfaz gráfica: la herramienta de optimización GenOpt ofrece una interfaz gráfica de usuario, permitiendo al usuario la utilización de una herramienta de fácil manejo y entendimiento.

GenOpt es una herramienta versátil y potente que proporciona a los usuarios las herramientas necesarias para optimizar sistemas complejos en una variedad de campos de aplicación. [30].

3 DESARROLLO DEL TFG

3.1 Metodología

El modelado y la simulación del comportamiento térmico del gimnasio “Guardiamarina Barrutia” de la Escuela Naval Militar (ENM) se desarrollará a lo largo de los apartados 3 y 4 de este trabajo. Asimismo, paralelamente al proceso de modelado es necesario llevar a cabo la monitorización de datos reales, la cual se realizará mediante el uso de sensores que tomarán datos reales de temperatura en diferentes emplazamientos del edificio.

En primer lugar, se lleva a cabo un estudio detallado del edificio y sus instalaciones. Seguidamente, se procede al modelado a través del software correspondiente (SketchUp y OpenStudio®). Una vez desarrollado el modelo, se ejecuta la simulación del mismo, en combinación con los datos climáticos correspondientes a la zona geográfica en la que se encuentra el edificio. A continuación, se lleva a cabo la validación, donde los resultados de la simulación son comparados con los datos de temperatura reales del edificio, de esta forma el modelo quedaría calibrado (véase Figura 3-1).

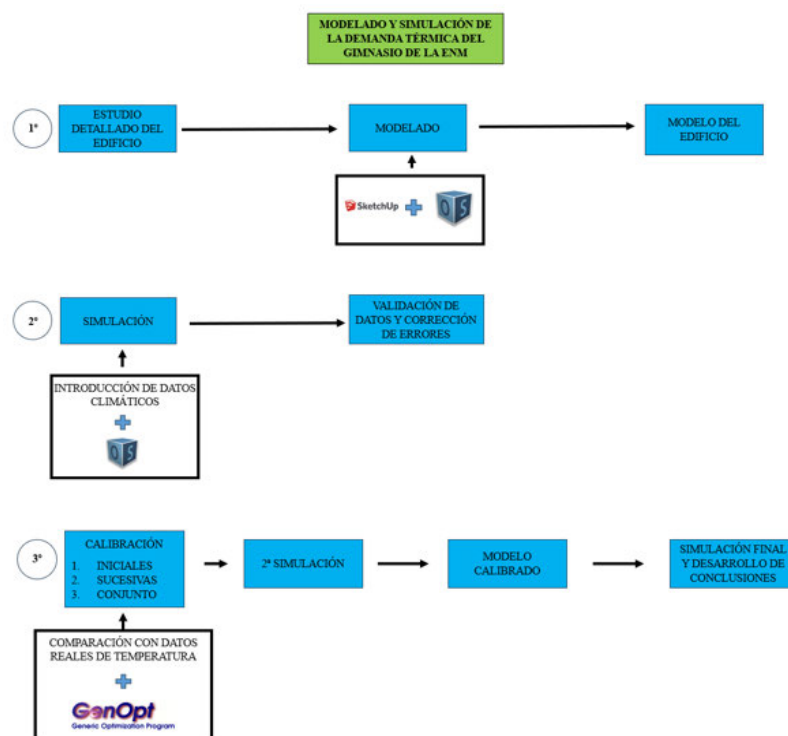


Figura 3-1 Esquema general del desarrollo del TFG [Autoría propia]

3.2 Descripción del edificio

3.2.1 Localización

El edificio gimnasio “Guardiamarina Barrutia” se encuentra en la localidad de Marín, perteneciente a la provincia de Pontevedra, España; tal y como refleja la Figura 3-2. El gimnasio está ubicado en el interior de la Escuela Naval Militar, complejo militar perteneciente a las Fuerzas Armadas españolas, donde se forman los futuros oficiales de la Armada.



Figura 3-2 Localización del edificio gimnasio “Guardiamarina Barrutia” de la ENM [31]

3.2.2 Antecedentes

El edificio gimnasio-piscina “Guardiamarina Barrutia” de la Escuela Naval Militar fue construido durante la década de 1940 (véase Figura 3-3). Se trata de un edificio de grandes dimensiones y de una arquitectura singular y de gran valor, formada por dos grandes naves construidas sobre el mismo eje longitudinal, a las cuales se les añaden varios módulos de menor volumen que rodean y conectan con las anteriores. El edificio fue construido en una zona de desnivel para lo cual se llevaron a cabo las operaciones de desmante y terraplén correspondientes, con el fin de compensar la edificación. Además, el edificio al estar ubicado en esta zona, se encuentra rodeado en sus fachadas Este y Sur por la carretera PO-551. Este edificio se encuentra situado en unos de los límites del recinto que encuadra la Escuela Naval Militar, por lo tanto, al ser un edificio de grandes dimensiones, la construcción es claramente visible desde el exterior, y se puede ver como destaca su particular vidriera situada en la cara Norte del edificio. Asimismo, la nave de la parte destinada al gimnasio es característica por la existencia de un lucernario central.

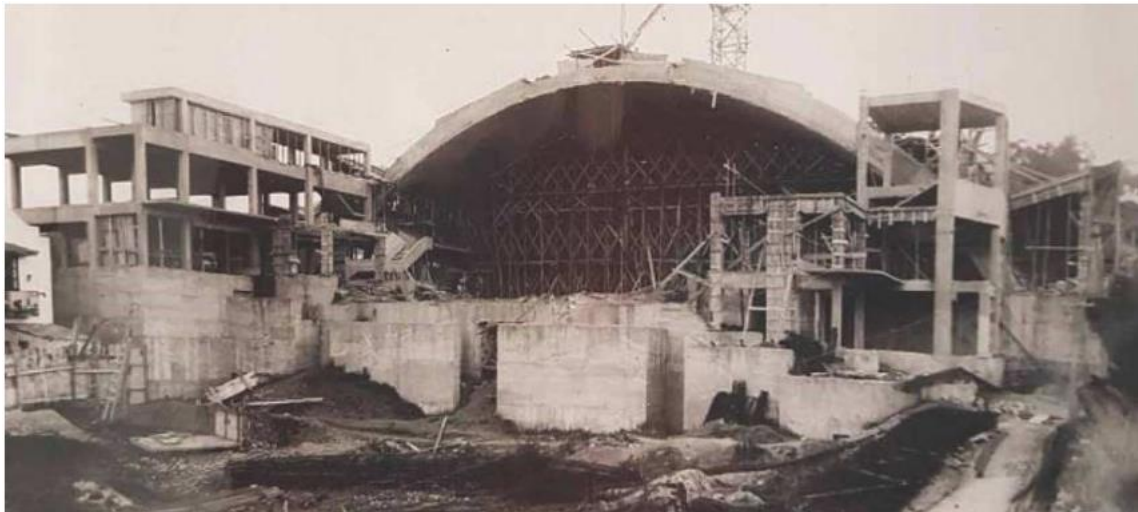


Figura 3-3 Construcción del edificio gimnasio-piscina “Guardiamarina Barrutia” de la ENM [32]

A lo largo del tiempo, este edificio ha sido sometido a diversas reformas y modificaciones para mejorar sus prestaciones, cumplir con los requisitos de seguridad de la edificación y el mantenimiento del propio edificio para alargar su vida operativa. A pesar de la gran variedad de reformas a las que ha sido sometido, son pocos los registros que se tienen de dichas obras, y la primera reforma de la que se tiene constancia y se mantiene documentación, data del año 1989-1990. En esta obra se llevó a cabo la renovación de los cerramientos exteriores de las fachadas y cubiertas del edificio, y desde esta fecha solo constan pequeñas intervenciones de conservación, mantenimiento y reparación puntual.

Sin embargo, en el año 2018 se mantiene documentación de un proyecto de reforma destinado a la adecuación de cubiertas y terrazas del edificio (véase Figura 3-4); un proyecto impulsado por la Jefatura de Apoyo Logístico y el arsenal militar de Ferrol. En el mismo documento del proyecto se establecen las bases de las reformas que se llevarán a cabo, las cuales consistirán en:

- Ejecución de una cubierta tipo *sandwich* de montaje in-situ sobre la existente, es decir, sin retirar las planchas de fibrocemento que ya existían previamente.
- Colocación de nuevos canalones y bajantes: consistió en la instalación de nuevos canalones interiores, realizando las embocaduras a las bajantes de modo que sean registrables en el futuro.
- Instalación de nuevos canalones y bajantes exteriores.
- Impermeabilización de terrazas transitables: consistió en la impermeabilización de terrazas y azoteas mediante un sistema adherido transitable con Documento de Idoneidad Técnica y una vida útil estimada de 25 años.
- Sustitución de un lucernario y varias carpinterías exteriores: esta reforma incluía la sustitución de la vidriera de la fachada Norte.
- Colocación de barandillas de seguridad y escalas de acceso a otras terrazas y cubiertas.



Figura 3-4 Vista de las fachadas Norte y Oeste del gimnasio [Autoría propia]

En el año 2018, el edificio presentaba una serie de deficiencias generalmente derivadas del deterioro provocado por el paso del tiempo y las inclemencias meteorológicas, de entre las que destacan:

- Humedades y goteras en diversos puntos, especialmente bajo terrazas y en encuentros entre cubiertas.
- Filtraciones en canalones y bajantes interiores.
- Deterioro de canalones y bajantes exteriores.
- Desprendimiento ocasional de placas de polycarbonato en el lucernario, en situaciones de fuertes temporales.
- Fuerte deterioro de los revestimientos impermeabilizantes de varias de las terrazas.
- La gran vidriera de la fachada Norte no fue sustituida al tiempo que las restantes carpinterías del edificio, aquejando un desgaste considerable y ofreciendo una pobre imagen de la cara más visible y representativa del edificio.

Por todo lo expuesto anteriormente, se redactó un programa de necesidades para la elaboración del proyecto [32], este programa incluía las medidas o condiciones necesarias a tomar para desarrollar la reforma del edificio, entre las que se incluían:

- Renovación completa de cubiertas y canalones, aportando además aislamiento térmico al edificio.
- Impermeabilización de terrazas, mediante sistema contrastado y con garantías de durabilidad.
- Sustitución de lucernario (véase Figura 3-5), vidriera de fachada Norte (véase Figura 3-6) y otras carpinterías necesarias.
- Colocación de barandillas de protección en terrazas y escalas de acceso a cubiertas y azoteas.
- Cumplimiento estricto de la normativa de seguridad laboral que fuese de aplicación.



Figura 3-5 Vista del lucernario desde el exterior y el interior [32]



Figura 3-6 Vista general vidriera [32]

3.2.3 Zona climática

El CTE establece en su documento básico de ahorro de energía DB H1 de Condiciones para el control de la demanda energética de los edificios en función de su situación geográfica. Por todo ello, las diversas zonas climáticas en las que se divide España son identificadas mediante una letra correspondiente a la severidad climática de invierno y un número correspondiente a la severidad climática de verano (véase Figura 3-7) [33].



Figura 3-7 Zonas climáticas de España [33]

Según el CTE (Código Técnico de Edificación), en la Tabla A, Anejo B, podemos ver que la zona climática correspondiente a Pontevedra y a altitudes bajas es C1, tal y como refleja la Figura 3-8.

Tabla a-Anejo B. Zonas climáticas

Provincia	Altitud sobre el nivel del mar (h)																
	≤ 50 m	51-100 m	101-150 m	151-200 m	201-250 m	251-300 m	301-350 m	351-400 m	401-450 m	451-500 m	501-550 m	551-600 m	601-650 m	651-700 m	701-750 m	751-800 m	801-850 m
Albacete																	
Alicante/Alacant																	
Almería																	
Araba/Alava																	
Asturias																	
Ávila																	
Badajoz																	
Baleares, Illes																	
Barcelona																	
Bizkaia																	
Burgos																	
Cáceres																	
Cádiz																	
Cantabria																	
Castellón/Castelló																	
Ceuta																	
Ciudad Real																	
Córdoba																	
Coruña, A																	
Cuenca																	
Gipuzkoa																	
Girona																	
Granada																	
Guadalajara																	
Huelva																	
Huesca																	
Jaén																	
León																	
Lleida																	
Lugo																	
Madrid																	
Málaga																	
Meiella																	
Murcia																	
Navarra																	
Ourense																	
Palencia																	
Palencia, La																	
Pontevedra																	
Proja, La																	
Salamanca																	
Santa Cruz de Tenerife																	
Segovia																	
Sevilla																	
Soria																	
Tarragona																	
Tenuef																	
Toledo																	
Valencia/València																	
Valladolid																	
Zamora																	
Zaragoza																	

Figura 3-8 Tabla A del Anejo B del CTE. Zonas climáticas de las provincias de España [21]

3.2.4 Descripción constructiva del edificio

Para llevar a cabo la descripción constructiva del edificio es necesario comprender previamente el concepto de la envolvente térmica de un edificio (véase Figura 3-9). Este término es habitual utilizarlo cuando se habla de eficiencia energética o de la búsqueda de soluciones para la renovación de edificios. La envolvente térmica es un conjunto de sistemas y elementos que engloba todos los cerramientos opacos de un edificio, más los huecos que presente, a lo que hay que sumar los puentes térmicos.



Figura 3-9 Fachada de la cara Norte del edificio [Autoría propia]

Los huecos hacen referencia a los marcos de puertas y ventanas y a las propias superficies acristaladas. Asimismo, los puentes térmicos son aquellas zonas de la envolvente térmica que permiten el intercambio de calor entre el interior y el exterior del edificio.

Le envolvente térmica es un elemento esencial para conseguir el aislamiento térmico necesario y alcanzar los niveles de confort requeridos para un edificio. Por todo ello, es de gran importancia los materiales empleados y la ejecución de dicha instalación de la forma correcta y más idónea posible [34].

En este apartado se lleva a cabo una descripción de las características constructivas que componen el edificio a estudiar. La envolvente térmica está compuesta por los siguientes elementos:

- Cubierta
- Muros exteriores
- Muros interiores
- Suelo
- Puertas exteriores
- Ventanas exteriores

Es importante mencionar la escasa documentación existente acerca del edificio y los materiales que se utilizaron durante su construcción. Por ello, para poder determinar los materiales se hará uso de los planos del edificio proporcionados por la Oficina de Mantenimiento de la Escuela Naval Militar y se especificarán los materiales en base al “Catálogo de Elementos Constructivos del Código Técnico de la Edificación”. Asimismo, conviene destacar que para la especificación de los materiales constructivos de la envolvente del edificio además de hacer uso del CTE, también se contrastará la información utilizando como apoyo y referencia el Trabajo de Fin de Grado realizado en el curso 2022-2023 por el AN Vélez Peinado “Modelado y simulación de la demanda térmica de la piscina cubierta de la ENM” [35].

Cubierta

La cubierta del edificio está principalmente compuesta por una bóveda de hormigón armado y una cubierta de panel tipo sándwich que la recubre. En total consta de 6 capas de diferentes materiales, tal y como se refleja en la siguiente Tabla 3-1:

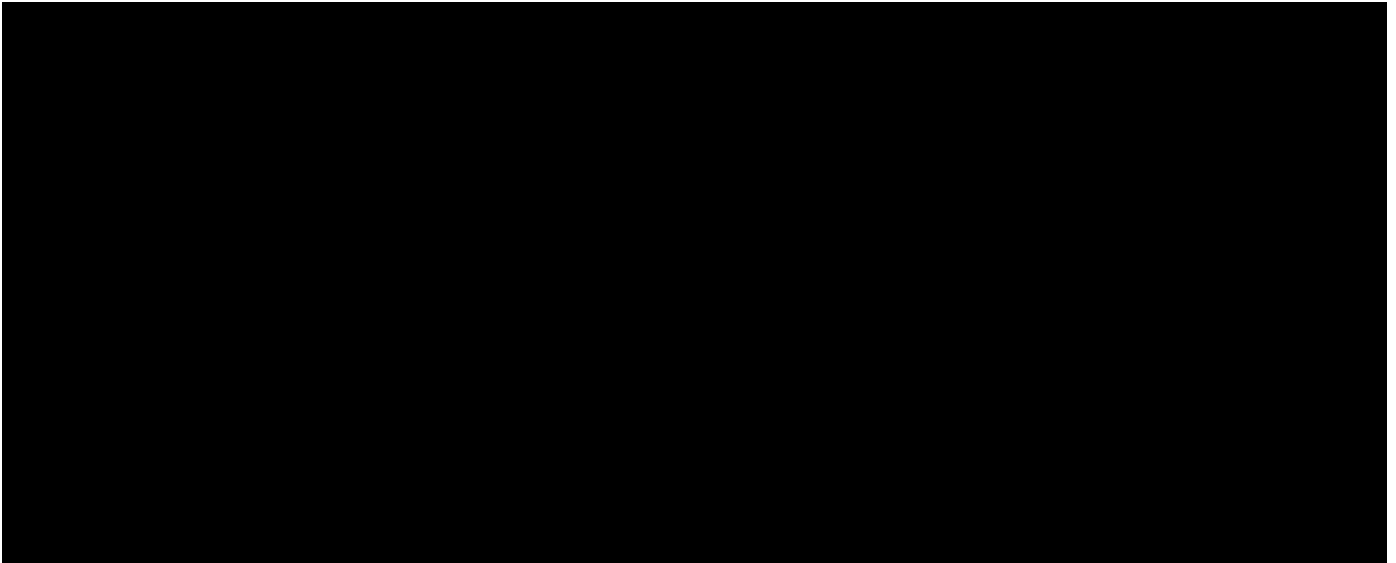
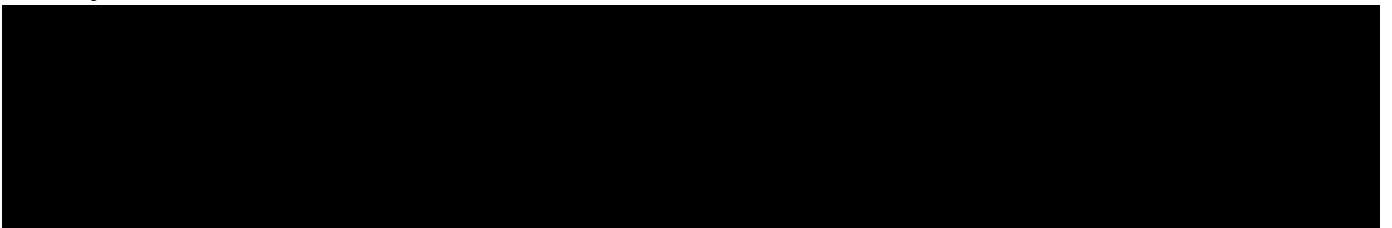
A large black rectangular box redacting the content of Table 3-1.

Tabla 3-1 Características constructivas de la cubierta [Autoría propia]

Muros exteriores

Los muros exteriores del edificio están compuestos por una capa (de interior a exterior), tal y como refleja la Tabla 3-2:

A large black rectangular box redacting the content of Table 3-2.

Muros interiores

Los muros interiores están compuestos por tres capas tal y como refleja la Tabla 3-3:

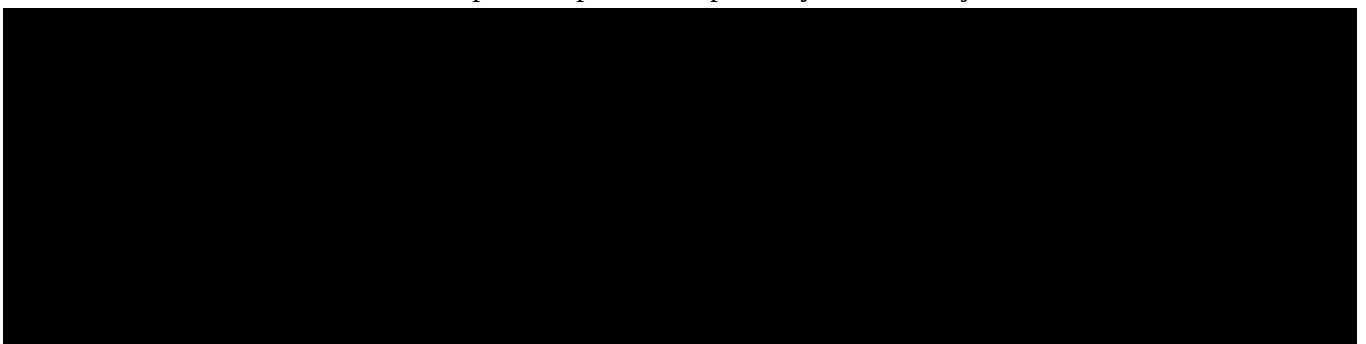
A large black rectangular box redacting the content of Table 3-3.

Tabla 3-3 Características constructivas de los muros interiores [Autoría propia]

Suelo

El suelo del edificio está compuesto por un material, expuesto en la Tabla 3-4:

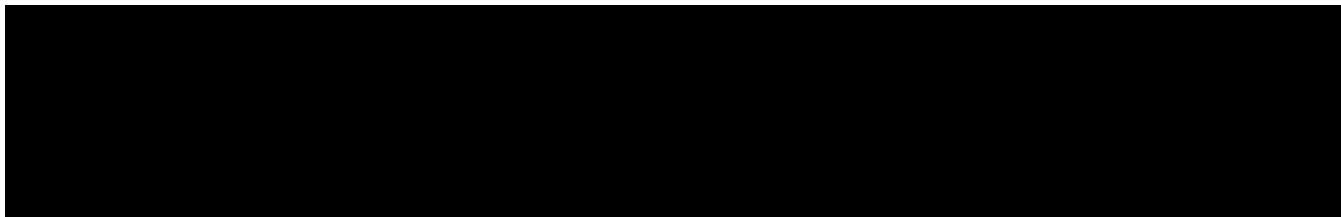


Tabla 3-4 Características constructivas del suelo [Autoría propia]

Puertas exteriores

Las puertas exteriores están fabricadas con acero tal y como refleja la Tabla 3-5:

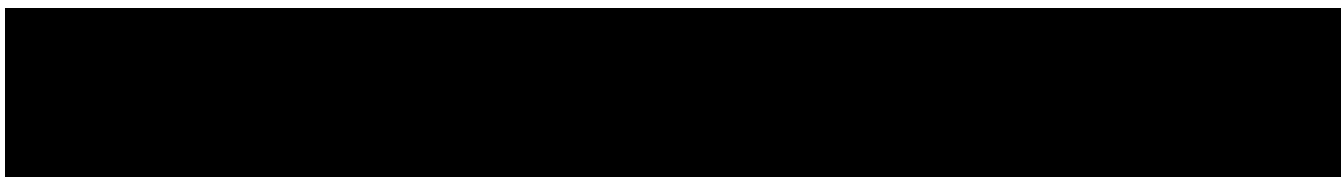


Tabla 3-5 Características constructivas de las puertas exteriores [Autoría propia]

Ventanas exteriores

En cuanto a ventanas exteriores, podemos agruparlas en tres grupos cuando nos referimos al edificio en cuestión. En primer lugar, las ventanas exteriores que conforman la vidriera de la fachada Norte tan característica del gimnasio-piscina. En segundo lugar, las ventanas no practicables del edificio que recubren gran parte de las fachas Este y Oeste. En tercer lugar, las ventanas que se pueden observar en algunas zonas de las fachadas laterales (Este y Oeste), las cuales sí son practicables. Véase la Tabla 3-6:

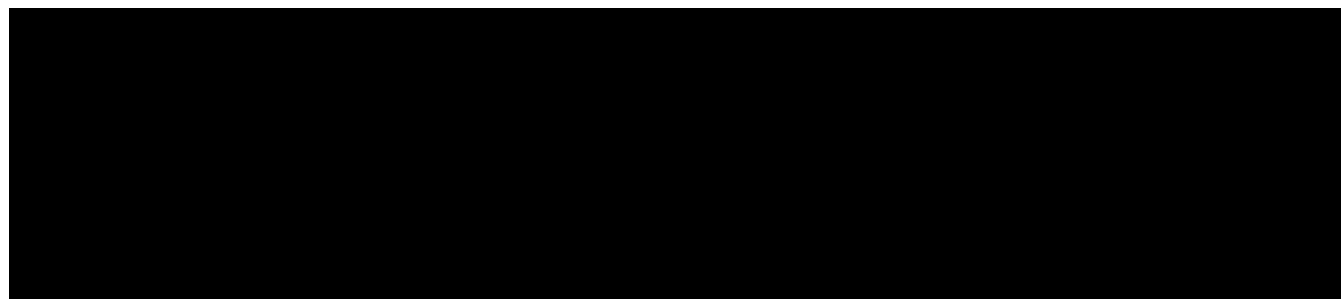


Tabla 3-6 Características constructivas de las ventanas exteriores [Autoría propia]

3.2.5 Información sobre el uso del edificio

El edificio gimnasio-piscina “Guardiamarina Barrutia” es utilizado para una amplia variedad de actividades, de entre las que destaca el uso por parte de los alumnos de la Escuela Naval Militar, los cuales, desarrollan actividades deportivas que influyen de manera directa en su formación física. Además, cabe destacar que el edificio es utilizado en las actividades de tiempo de libre de los alumnos. En especial, la sala gimnasio que está equipada con el material y la maquinaria propios de una sala de musculación, permitiendo así al alumnado y personal de la Escuela Naval mejorar sus capacidades físicas en su tiempo libre. Las actividades desarrolladas en el edificio son las siguientes:

- Entrenamientos del plan de formación física para el alumnado de la Escuela Naval Militar.
- Entrenamientos de los equipos de baloncesto y voleibol compuestos por alumnos de la Escuela Naval Militar.
- Pruebas de Aptitud Psico-física para el Combate (APCs) realizadas por alumnos del cuerpo de Infantería de Marina de la Escuela Naval Militar.
- Pruebas físicas desarrolladas por el departamento para la evaluación de la condición física del alumnado.

- Uso de la sala de musculación o gimnasio en el tiempo libre del alumnado o personal de la Escuela Naval Militar.
- Uso de los vestuarios disponibles para los usuarios del gimnasio.

3.2.6 Estancias del edificio

El edificio está compuesto por cuatro estancias claramente diferenciadas, a las cuales, se las denominará zonas térmicas, y cuyas dimensiones se especifican en la Tabla 3-7. Asimismo, se considera conveniente destacar que la Zona 4 (Piscina) no será objeto de estudio en este Trabajo de Fin de Grado.

Estancia	Descripción	Superficie (m ²)
Z1	Pabellón	1890,75
Z2	Gimnasio	328
Z3	Vestuario	348,50
Z4	Piscina	2162,75
	Superficie total	4730

Tabla 3-7 Zonas térmicas del edificio piscina-gimnasio “Guardiamarina Barrutia” [Autoría propia]

3.2.7 Condiciones de confort

Por el Real Decreto 178/2021, de 23 de marzo, por el que se modifica el Real Decreto 1027/2007 de 20 de julio, se aprueba el Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios, donde se establece que la exigencia de calidad térmica del ambiente se considera satisfecha en el diseño y dimensionado de la instalación térmica, si los parámetros que definen el bienestar térmico, como la temperatura operativa, humedad relativa, velocidad media del aire e intensidad de la turbulencia, asimetrías radiantes, gradiente vertical de temperatura y temperatura del suelo se mantienen en la zona ocupada dentro de los valores establecidos. Según este Real Decreto, las condiciones interiores de diseño de la temperatura operativa y la humedad relativa se fijarán con base en la actividad metabólica de las personas, su grado de vestimenta y el porcentaje estimado de insatisfechos (PPD) según diferentes casos posibles [36].

Asimismo, para las condiciones de confort es necesario tener en cuenta el tipo de actividad desarrollada en el edificio objeto de estudio. Dado que el modelo del edificio gimnasio-piscina de la ENM cuenta con tres zonas: pabellón, gimnasio y vestuario; se considerarán los valores de tasa metabólica comprendidos en el apartado *Miscellaneous Leisure Activities* (actividades de ocio diversas) del Anexo VI: Tabla de Tasas Metabólicas por Actividad y reflejados en la Tabla 3-8:

Actividad	W/m ²
Calistenia/ejercicio	175-235
Baloncesto	290-440
Lucha	410-505

Tabla 3-8 Tasa metabólica por actividad física [Autoría propia en base a [37]]

Por todo ello, a la hora de introducir los datos en OpenStudio® (véase Figura 3-10) y teniendo en cuenta las tres zonas existentes en el modelo, se ha decidido fijar la tasa metabólica máxima asociada a cada persona en un valor de 240 W/m².

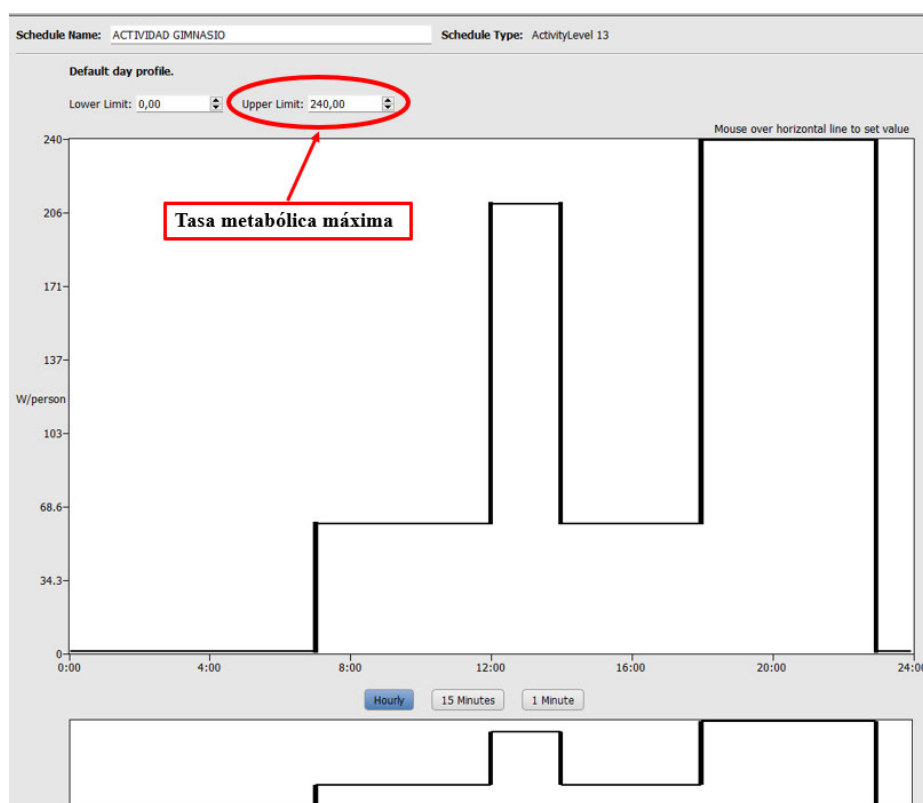


Figura 3-10 Introducción del valor máximo de la tasa metabólica [Autoría propia]

3.3 Factores operacionales y cargas internas del edificio

3.3.1 Ocupación y actividad

La ocupación del edificio gimnasio-piscina “Guardiamarina Barrutia” se ha dividido en tres bloques asignados en función de las zonas térmicas en las que se ha dividido el edificio. Asimismo, se han establecido dos tipos de horarios para cada semana, puesto que el nivel de uso de las instalaciones varía sustancialmente en cuanto a los periodos de formación física efectuados en el horario de deporte del alumnado entre semana, y el uso que hacen tanto alumnos como personal destinado en la ENM en sus ratos libres en el fin de semana. El horario entre semana está estructurado en 5 bloques de franjas horarias que se dividen de la siguiente forma: 23:00-07:00, 07:00-12:00, 12:00-14:00, 14:00-18:00 y 18:00-23:00. La ocupación personal en cada una de estas franjas horarias varía en función de la asistencia. En el fin de semana, encontramos de la misma forma, cuatro bloques de franjas horarias que se estructuran de la siguiente manera: 23:00-10:00, 10:00-14:00, 14:00-18:00 y 18:00-23:00. Tal y como reflejan la Tabla 3-9 y la Tabla 3-10, se pueden observar diferentes porcentajes de ocupación respecto al aforo máximo que se indica entre paréntesis, en función de las zonas térmicas detalladas.

Horario	Pabellón (35 pax)	Gimnasio (25 pax)	Vestuario (15 pax)
23:00-07:00	0%	0%	0%
07:00-12:00	5%	20%	15%
12:00-14:00	70%	70%	20%
14:00-18:00	5%	20%	10%
18:00-23:00	30%	80%	5%

Tabla 3-9 Horario de ocupación personal entre semana [Autoría propia]

Horario	Pabellón (35 pax)	Gimnasio (25 pax)
23:00-10:00	0%	0%
10:00-14:00	25%	50%
14:00-18:00	10%	25%
18:00-23:00	25%	50%

Tabla 3-10 Horario de ocupación personal fin de semana [Autoría propia]

En cuanto a la “Zona Térmica 1”, donde se encuentra el pabellón, la actividad existente en esta zona está relacionada con los entrenamientos llevados a cabo por parte de los alumnos de la ENM incluidos en su plan de formación física. Siendo el pico de asistencia en la franja de 12:00 a 14:00, la cual coincide con las clases de deporte de los alumnos de la ENM.

En cuanto a la “Zona Térmica 2”, donde se encuentra el gimnasio, la actividad varía ligeramente con respecto al pabellón. En este caso, el gimnasio es frecuentemente utilizado entre semana por alumnos de la 5ª Brigada, la cual, tras haber superado sus últimas pruebas físicas queda exenta de las sesiones de deporte planificadas pudiendo a estar a su disposición las instalaciones deportivas de la ENM para realizar sus actividades de “deporte libre”.

En cuanto a la “Zona Térmica 3”, donde se encuentra el vestuario, el nivel de ocupación personal decrece en gran medida dado que los vestuarios son únicamente utilizados por personal destinado en la ENM, mientras que el alumnado dispone de sus propios vestuarios en los edificios cuarteles donde llevan a cabo sus actividades cotidianas.

3.3.2 Iluminación

La iluminación del edificio gimnasio-piscina (véase Figura 3-11) esta proporcionada por 12 proyectores LED de la marca Disano (véase Figura 3-12) cuyas características vienen recogidas en la Tabla 3-11:

Características	Proyectores LED Sevilla 3 Disano
Cantidad	12
Potencia unitaria	90 W
Protección hermética	IP66
Color	4000K
Flujo luminoso	9900 lm

Tabla 3-11 Características de los proyectores LED Sevilla 3 Disano [Autoría propia en basen a [38]]



Figura 3-11 Iluminación del edificio gimnasio-piscina de la ENM [Autoría propia]



Figura 3-12 Proyector LED Sevilla 3 Disano [38]

De acuerdo con la información proporcionada por el destino de electricidad de la ENM, el encendido y apagado de los proyectores se lleva a cabo de forma automática (véase Tabla 3-12). Asimismo, tal y como se ha visto en la Tabla 3-9 y Tabla 3-10, el horario de encendido y apagado influye de forma directa en el uso de las instalaciones.

Días	Todos los días
Mañana	06:30-10:00
Tarde	18:00-23:00

Tabla 3-12 Horarios de encendido y apagado de los proyectores LED Sevilla 3 Disano [Autoría propia]

3.4 Monitorización del edificio

La monitorización del edificio se lleva a cabo mediante el uso de sensores que son colocados en diferentes partes del edificio. Existen tres aspectos de importancia a la hora de monitorizar:

- En primer lugar, se debe tener presente que cuanto mayor sea el número de datos obtenidos, el programa encargado de la calibración, en este caso GenOpt, podrá optimizar el error con mayor exactitud.
- En segundo lugar, la variedad en la selección de las diferentes posiciones de los sensores permitirá obtener un espectro de datos fiel a la realidad de las circunstancias térmicas del edificio.
- En tercer lugar, el tipo de sensor utilizado influye en su capacidad de toma de datos y la calidad de estos.

El mercado actual ofrece una amplia gama de sensores para la obtención de datos de temperatura. Algunos de los más comunes son los siguientes:

- Termistores: son dispositivos sensibles a la temperatura que utilizan la resistencia eléctrica de materiales cerámicos o poliméricos para medir cambios de temperatura.
- Termopares: consisten en dos conductores metálicos diferentes unidos en un extremo. La diferencia de temperatura entre los extremos genera una pequeña corriente eléctrica, la cual es proporcional a la diferencia de temperatura.
- RTDs (Resistencias de Temperatura de Detección): son sensores de temperatura que utilizan la variación de la resistencia eléctrica de un material conductor en función de la temperatura.
- Termómetros infrarrojos (o pirómetros): utilizan la radiación infrarroja emitida por un objeto para determinar su temperatura sin contacto físico.
- Sensores de temperatura digital: estos sensores incorporan un convertidor analógico-digital (ADC) para proporcionar lecturas digitales de temperatura. Algunos ejemplos incluyen sensores de temperatura digital de un solo chip como el DS18B20, que se comunica a través del protocolo *OneWire* [39].

Para efectuar la monitorización del gimnasio-piscina de la ENM se han utilizado dos tipos de sensores digitales: sensor *Zecamin* de temperatura y sensor *Wave Plus* de la marca *AirThings*.

3.4.1 Sensor *Zecamin*

El sensor de temperatura y humedad de la marca *Zecamin* (véase Figura 3-13) es un sensor que se encarga de obtener datos reales en el lugar de la instalación y envía estos datos de medición a la aplicación *SmartLife* que se puede descargar en cualquier dispositivo móvil.



Figura 3-13 Sensor de temperatura de la marca *Zecamin* [40]

En cuanto a *SmartLife*, se trata de una aplicación móvil que se utiliza para controlar dispositivos domésticos inteligentes. Esta aplicación permite a los usuarios gestionar y controlar una amplia gama de dispositivos inteligentes, como luces, enchufes, cámaras de seguridad, termostatos, etc. Algunas de sus principales características son:

- Compatibilidad con dispositivos: *SmartLife* es compatible con una amplia variedad de dispositivos domésticos inteligentes de diferentes marcas.
- Control remoto: los usuarios pueden controlar sus dispositivos inteligentes desde cualquier lugar siempre y cuando tengan conexión a Internet.
- Programación y automatización: la aplicación *SmartLife* permite a los usuarios programar acciones y crear escenarios automatizados para sus dispositivos inteligentes.
- Interfaz intuitiva: la interfaz que presta *SmartLife* está diseñada para ser fácil de usar y navegar, lo que facilita a los usuarios la configuración y gestión de sus dispositivos inteligentes (véase Figura 3-14) [41].

Asimismo, conviene mencionar que este tipo de dispositivos necesitan acceso a una red Wi-Fi para poder registrar los datos obtenidos, por ello, para su uso fue necesario la instalación de un router 4G para proporcionar la red Wi-Fi y asegurar el funcionamiento de dichos sensores.

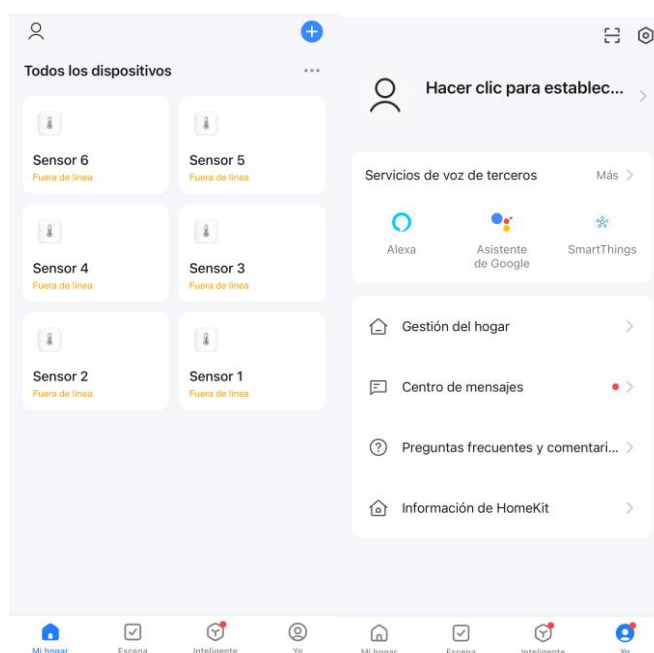


Figura 3-14 Aplicación para dispositivos móviles *SmartLife* [Autoría propia]

3.4.2 Sensor *AirThings*

El sensor *Wave Plus* (véase Figura 3-15) es un dispositivo desarrollado por la marca *AirThings*, especializada en la monitorización de la calidad del aire interior y otros factores ambientales. Este sensor es especialmente conocido por su capacidad para detectar y medir varios parámetros importantes relacionados con la calidad del aire en interiores. Algunas de sus principales características son:

- Medición de la calidad del aire: el sensor *Wave Plus* está equipado con varios sensores que permiten medir una variedad de parámetros como niveles de dióxido de carbono (CO₂), compuesto orgánicos volátiles (VOCs), temperatura, humedad, presión atmosférica y gas radón.
- Detección de radón: una de las características más destacadas del sensor *Wave Plus* es su capacidad para detectar niveles de radón en el aire interior. El radón es un gas radiactivo natural que puede filtrarse desde el suelo y acumularse en espacios interiores, representando un riesgo para la salud si se inhalan niveles altos durante periodos prolongados.
- Conectividad y visualización de datos: el sensor se conecta a través de *Bluetooth* a dispositivos móviles mediante la aplicación móvil *AirThings*, permitiendo a los usuarios visualizar los datos en tiempo real y acceder a información histórica recogida por el sensor.

- Alertas y notificaciones: la aplicación *AirThings* ofrece la posibilidad de enviar alertas cuando se detectan niveles anormales de CO₂, VOCs o radón, lo que les permite tomar medidas para mejorar la calidad del aire interior [42].



Figura 3-15 Sensor *Wave Plus* de la marca *AirThings* [42]

3.4.3 Emplazamiento de los dispositivos

El edificio gimnasio-piscina “Guardiamarina Barrutia” es un edificio de grandes dimensiones sobre el cual se ha decidido colocar tres sensores distintos: dos sensores de temperatura monitorizados a partir de la aplicación *SmartLife* y un tercer sensor (*Wave Plus*) de la marca *AirThings*. Tal y como se puede observar en la Figura 3-16, los sensores *Zecamin* estarán destinados a medir datos pertenecientes a las salas interiores del edificio y anexas al pabellón, es decir, al vestuario y al gimnasio, mientras que el sensor *Wave Plus* se posicionará en el pabellón debido a su gran capacidad de medición.

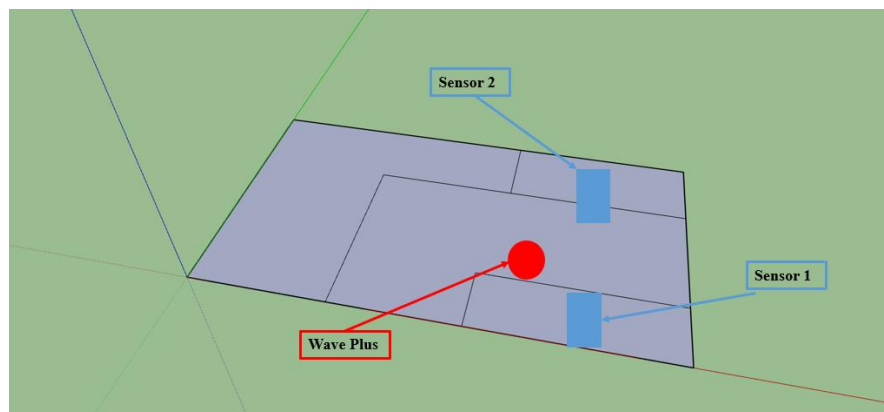


Figura 3-16 Emplazamiento de los sensores en el edificio [Autoría propia]

Conviene destacar que el posicionamiento del sensor *Wave Plus* se efectúa sobre la segunda planta “Graderíos” del edificio (véase Anexo V: Gimnasio Planta Graderíos), ofreciendo de esta forma un mayor alcance para la toma de datos, debido a su posicionamiento (véase Figura 3-17).



Figura 3-17 Sensor *Wave Plus* situado en el pabellón [Autoría propia]

3.5 Modelado del edificio

El modelado del edificio, tal y como refleja la Figura 3-18, se lleva a cabo mediante el uso de dos programas diferentes. En primer lugar, se hace uso del software SketchUp para realizar el modelado geométrico del edificio, de tal forma que este modelo será el utilizado para llevar a cabo la simulación y posterior calibración. Por todo ello, es de gran relevancia la elaboración de un modelo preciso y fiel a las características constructivas del edificio en la realidad. Este proceso finaliza con la exportación de un archivo con extensión OSM. En segundo lugar, se hace uso del programa OpenStudio® para el desarrollo de la parte constructiva del edificio, es decir, se incluyen y detallan las características constructivas del gimnasio mediante la creación de los materiales, las construcciones y los sets de construcción. Además, se añaden las cargas en lo relativo a ocupación personal e iluminación, las cuales, influenciarán al modelo y la temperatura del edificio. Asimismo, se tienen en cuenta las infiltraciones, es decir, los flujos de aire que pueden influenciar en las condiciones del edificio debido a la presencia de puertas y ventanas, y la posibilidad de que estas estén abiertas.

Una vez obtenida una primera aproximación al modelo energético del edificio, se simula con los datos climáticos de la zona. Los resultados de temperatura obtenidos se comparan con los datos adquiridos en la monitorización, tal y como se explica en el Apartado 4.1, y se obtiene el error del que se parte en la calibración.

Por último, se lleva a cabo la calibración, siendo este el proceso de mayor relevancia a lo largo del presente estudio. El objetivo consiste en calibrar mediante el programa GenOpt el modelo desarrollado en los pasos anteriores y someterlo a un estudio detallado mediante el software mencionado, que hace uso de los datos reales obtenidos mediante los sensores colocados en el edificio. Mediante la comparación entre la simulación del modelo y los datos reales, se obtiene una calibración del modelo que proporciona valores de mejora para determinados parámetros que hayan sido seleccionados como objeto de estudio en el proceso de calibrado. Estos parámetros pueden ser aspectos generales del edificio que se pueden calibrar, como los relacionados con los elementos constructivos o aquellos relacionados con la actividad del personal usuario del edificio.

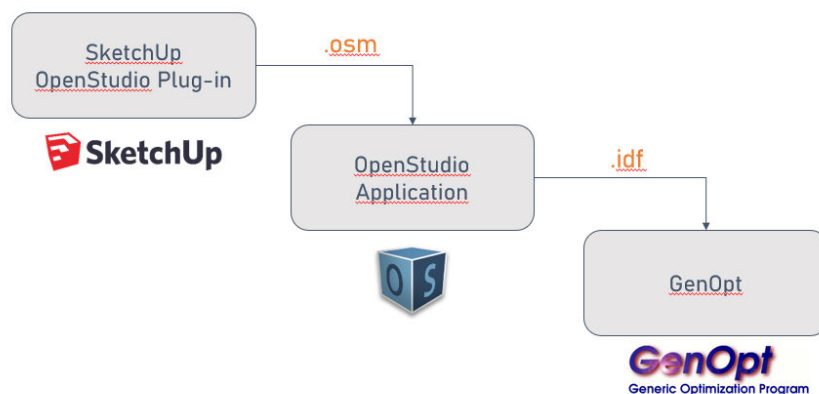


Figura 3-18 Proceso de simulación y calibración del edificio [Autoría propia]

3.5.1 Modelado 3D del edificio con SketchUp

El edificio gimnasio-piscina “Guardiamarina Barrutia” (véase Figura 3-19) es llamativo por su complejidad y morfología poco regular, la cual, contiene multitud de superficies y variedad de formas. Por todo ello, la elaboración de un modelo excesivamente preciso derivaría en una carga computacional innecesariamente elevada, donde aquellos detalles arquitectónicos que no son relevantes no deberían tener un peso significativo en el proceso de simulación. Es por esto que, se decide llevar a cabo el modelado del edificio de una forma simplificada, que permita un desarrollo eficaz y fiel a la realidad prestacional del edificio, influyendo positivamente en la simulación energética.



Figura 3-19 Edificio gimnasio-piscina “Guardiamarina Barrutia” [Autoría propia]

Para la realización del modelado del edificio haciendo uso de SketchUp, es necesario utilizar el OpenStudio® SketchUp Plug-in, el cual, permite la generación de archivos OpenStudio Model (OSM) en la interfaz del programa (véase Figura 3-20). Los archivos OSM son el formato principal utilizado por el software OpenStudio®.

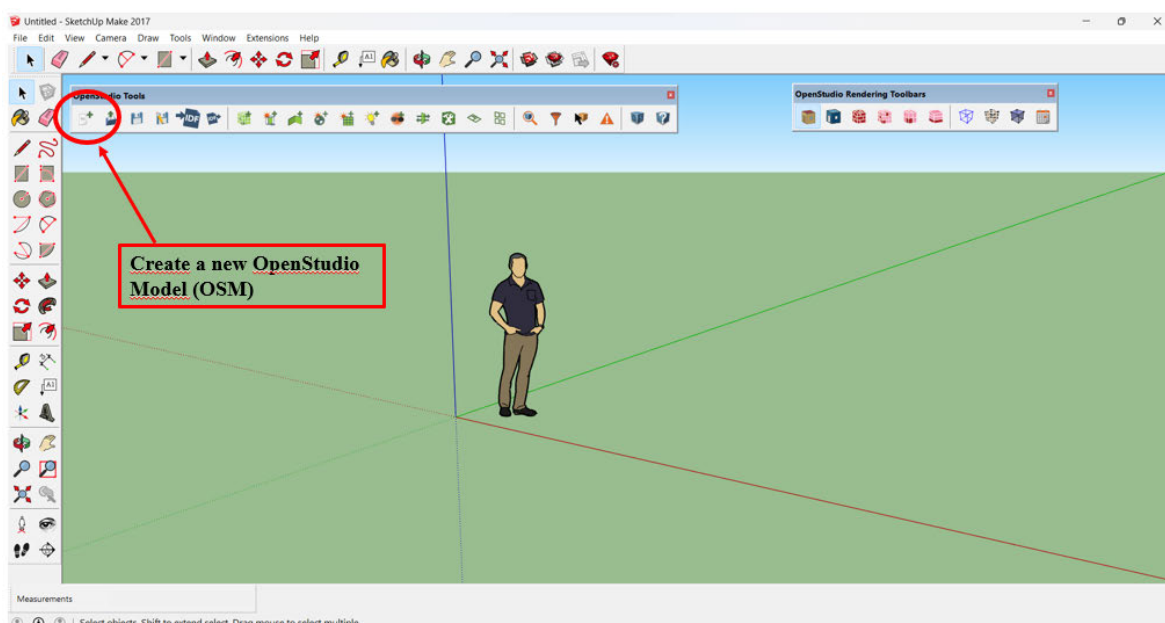


Figura 3-20 Creación de un archivo OSM en SketchUp [Autoría propia]

A continuación, se diseña la planta del edificio dibujando los diferentes espacios que determinarán las zonas térmicas: pabellón (zona térmica 1), gimnasio (zona térmica 2), vestuario (zona térmica 3) y piscina (zona térmica 4). Las dimensiones para el diseño de la planta del edificio han sido obtenidas a partir del plano del Anexo IV: Gimnasio Planta Baja, donde se refleja la planta baja del gimnasio, proporcionado por la Sección de Mantenimiento de la ENM. El proceso de obtención de las dimensiones consiste en la medición de cada una de las diferentes estancias, que serán objeto de estudio durante la simulación, con la correspondiente aplicación de la escala reflejada en el cajetín del plano. El cálculo de las dimensiones proporciona los resultados reflejados en la Figura 3-21.

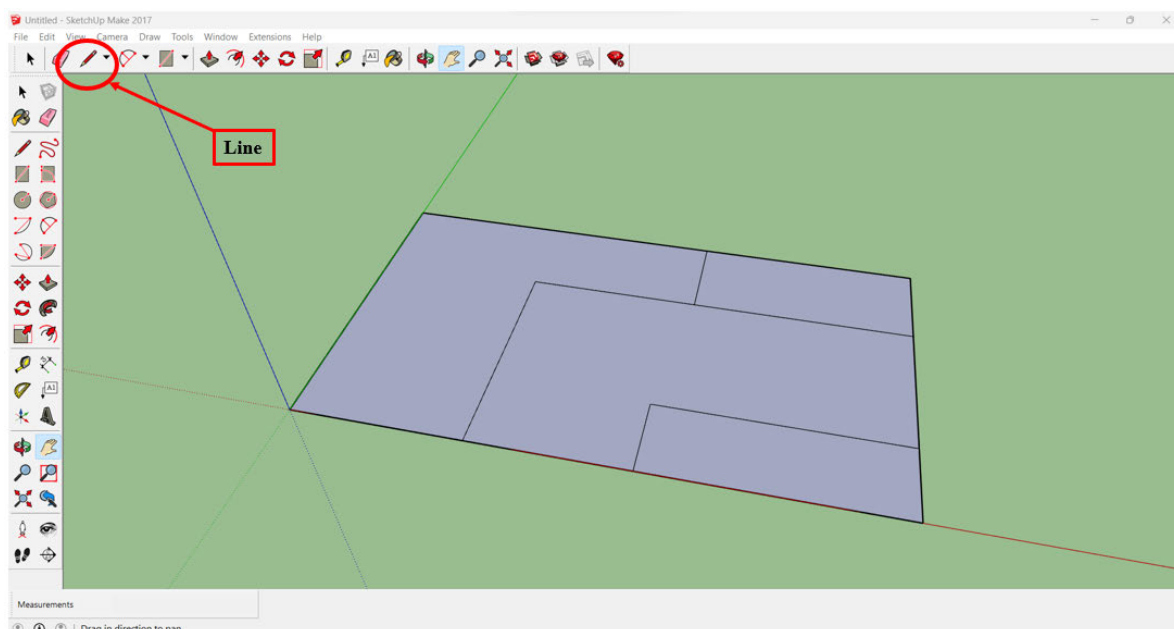


Figura 3-21 Diseño de la planta del edificio [Autoría propia]

El siguiente paso consiste en la introducción de la altura del edificio mediante el comando *Push/Pull* (véase Figura 3-22). Dicha altura se ha fijado a partir de los cálculos aplicados en el plano del Anexo III: Fachadas Este y Oeste del edificio, donde se pueden observar las fachadas Este y Oeste del edificio, teniendo en cuenta la escala de nuevo y obteniendo como resultado un valor de 13,5 metros.

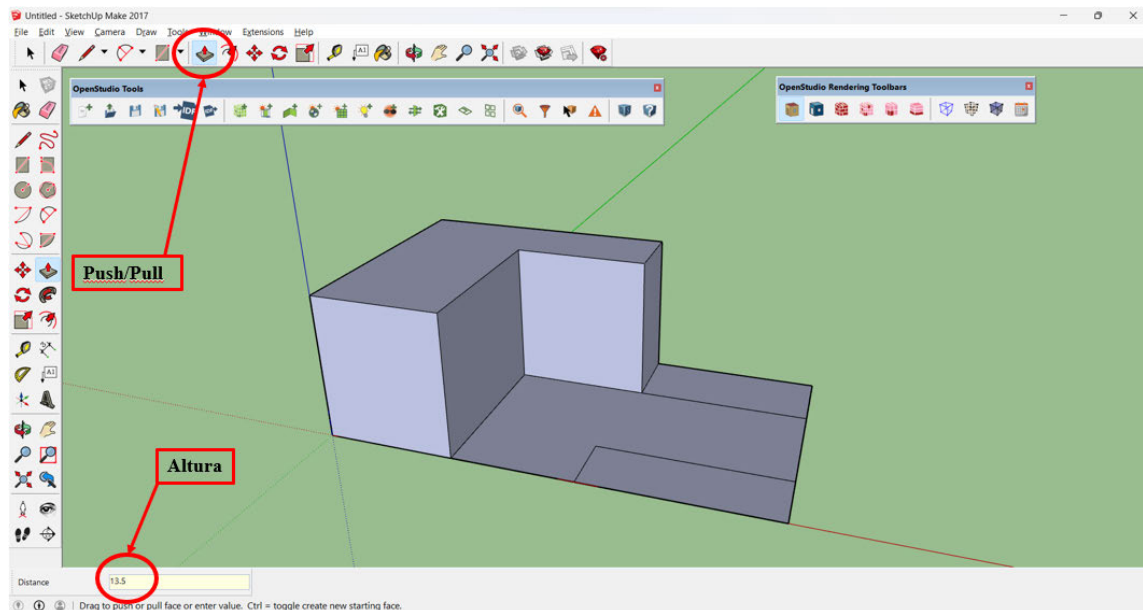


Figura 3-22 Introducción de la altura del edificio [Autoría propia]

Seguidamente, se ejecuta la introducción de todas las ventanas y puertas del edificio, tal y como se puede observar en la Figura 3-23. Conviene destacar que el edificio, como ya se ha mencionado anteriormente, es característico por su diseño arquitectónico irregular. Uno de los principales aspectos que se pueden reseñar del gimnasio, es al amplio número de ventanas que presenta, por lo que para una mayor eficacia en la simulación se decide agrupar aquellas que estén más próximas en una sola superficie acristalada. Asimismo, es importante reseñar que OpenStudio® no reconoce superficies de más de 4 vértices, por lo que se ha decidido simplificar el diseño del edificio manteniendo como máxima la precisión en la medición de las dimensiones generales de la planta, así como las características constructivas del edificio y de las diferentes zonas térmicas que se especifican.

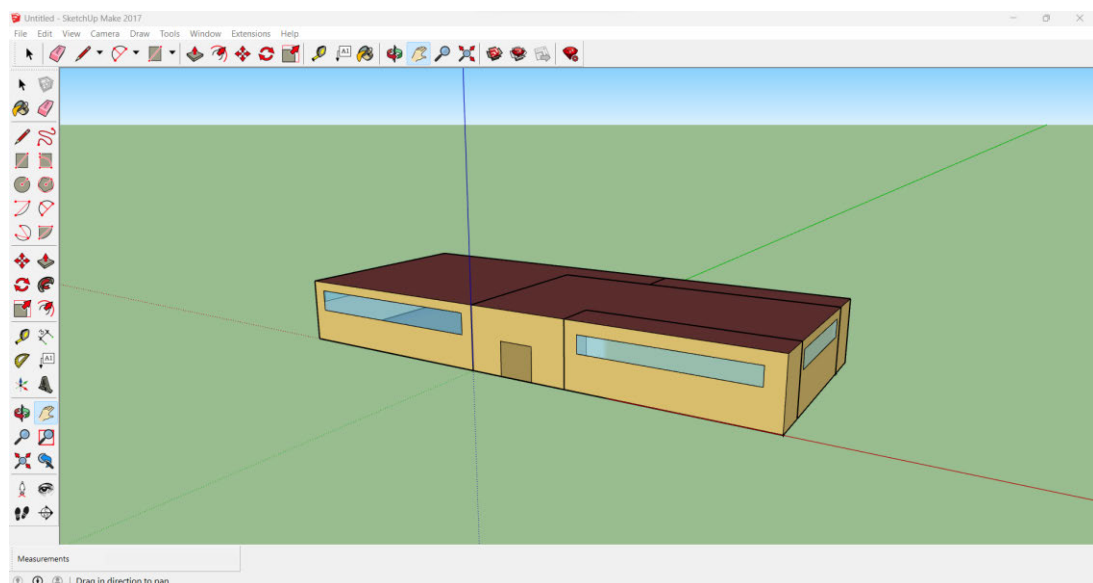


Figura 3-23 Introducción de las puertas y ventanas del edificio. [Autoría propia]

El último paso llevado a cabo con el programa SketchUp consiste en ejecutar la funcionalidad *Surface Matching* (coincidencia de superficies), incluida en el *plug-in* de OpenStudio®. Esta característica consiste en alinear una superficie con otra de manera precisa y resulta útil cuando se necesita unir dos superficies sin dejar espacios ni discontinuidades. Las superficies que se intersectarán en este caso, son las correspondientes a las paredes que separan las diferentes estancias del edificio

(pabellón, gimnasio, vestuarios y piscina) y forman parte de dos espacios diferentes. De esta forma, quedan definidos los muros interiores que corresponden a las diferentes zonas térmicas del edificio. Véase Figura 3-24.

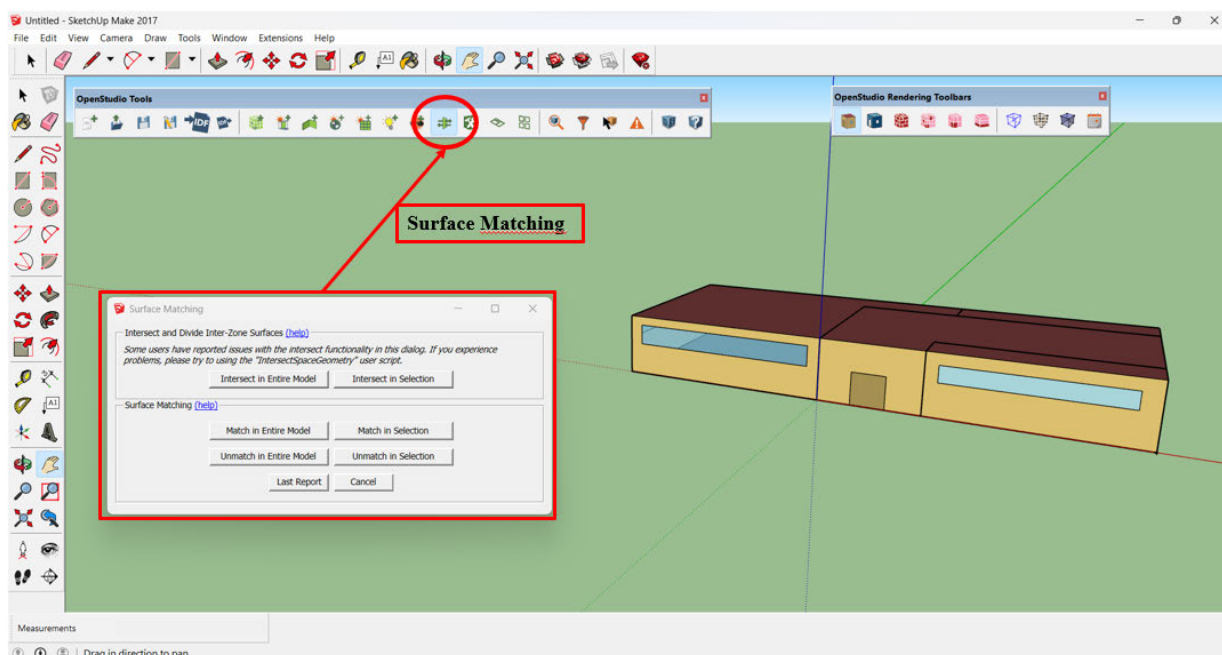


Figura 3-24 Surface matching [Autoría propia]

Las “zonas térmicas” en SketchUp son áreas del modelo que se han definido para análisis térmico y energético. La definición de estas zonas es importante a la hora de comprender cómo se distribuye la temperatura dentro de un edificio. Al igual que para la coincidencia de superficies, el software SketchUp no ofrece una herramienta capaz de definir una zona térmica, por ello es necesario el uso de *plug-ins* (extensiones) que añaden esta funcionalidad, como en este caso, OpenStudio® (Véase Figura 3-25). Asimismo, con la función *OpenStudio Inspector* se puede obtener información detallada de cada zona tal y como refleja la Figura 3-26.

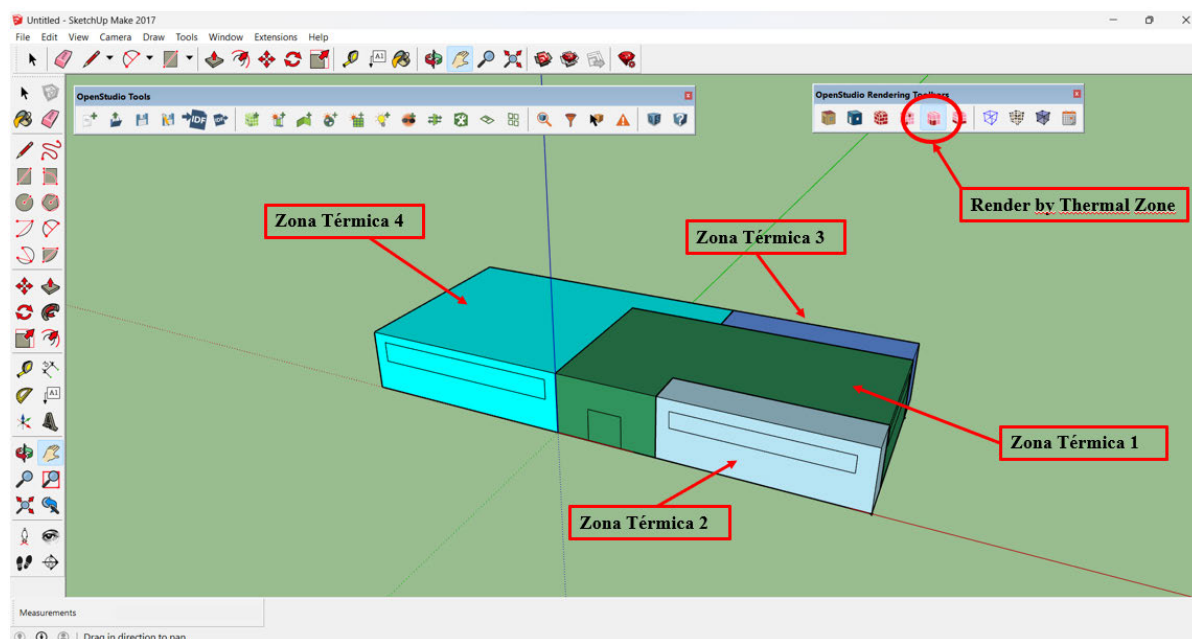


Figura 3-25 Zonas térmicas del modelo [Autoría propia]

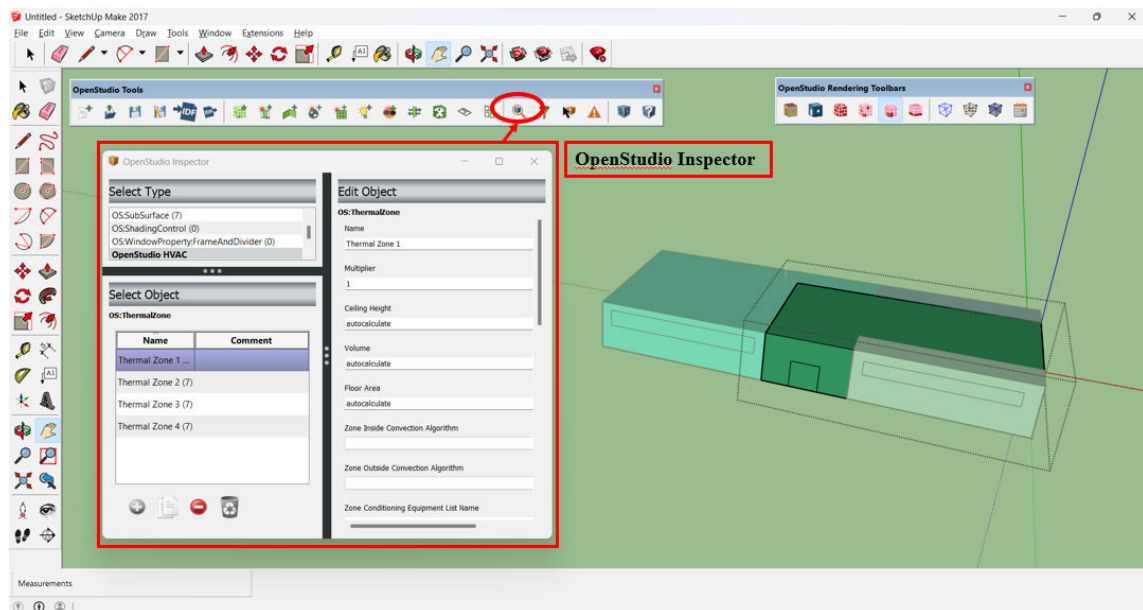


Figura 3-26 Función “OpenStudio Inspector” [Autoría propia]

Finalmente, el modelo del edificio gimnasio-piscina “Guardiamarina Barrutia” está listo para ser exportado a la plataforma OpenStudio® en formato OSM para continuar con su configuración, tal y como se puede ver en la Figura 3-27.

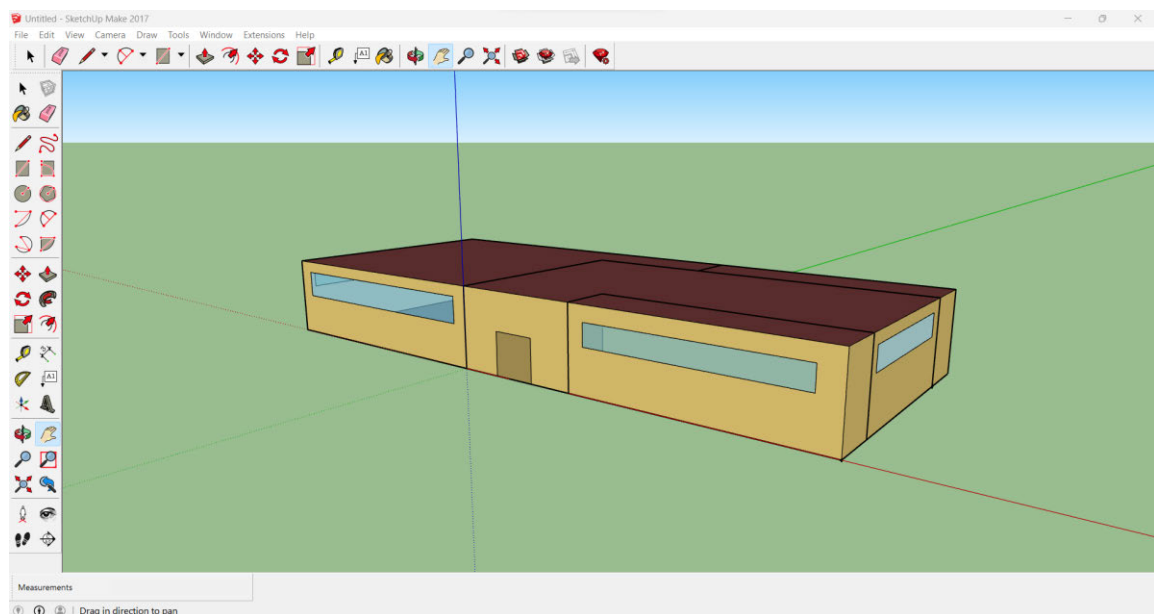


Figura 3-27 Modelo final en SketchUp [Autoría propia]

3.5.2 Modelado en OpenStudio®

Una vez diseñado el modelo geométrico es posible comenzar con el modelo constructivo, el cual se desarrolla mediante la interfaz OpenStudio®. Se trata de una plataforma de diseño y simulación energética que presenta, como una de sus principales ventajas, una interfaz intuitiva que facilita la creación de modelos de edificios, la configuración de simulaciones y la visualización de resultados. Consecuentemente, se decide utilizar esta interfaz frente a EnergyPlus™, la cual, es una opción que también ofrece grandes prestaciones y un rendimiento altamente efectivo. Asimismo, OpenStudio® es un proyecto de código abierto respaldado por el Departamento de Energía de los Estados Unidos; de esta forma, se pueden encontrar librerías con materiales y conjuntos de construcción predefinidos. Existe una biblioteca de materiales de construcción estándar (*Standard Construction Materials Library*), la cual

proporciona una amplia gama de materiales de construcción predefinidos, incluyendo materiales para paredes, techos, ventanas y puertas, entre otros. Sin embargo, para el edificio gimnasio-piscina, que ha sido objeto de estudio en este trabajo, se ha decidido configurar los materiales desde cero.

Tal y como se había mencionado en el Apartado 3.5.1, a partir del *plug-in* de OpenStudio®, se pueden crear archivos OSM en SketchUp. Conviene mencionar que algunas de las principales características que presentan los archivos de OpenStudio® son las siguientes:

- Formato basado en XML: el formato *Extensible Markup Language* (XML) facilita la comprensión y la manipulación de los datos del modelo.
- Representación de datos del edificio: los archivos contienen información detallada sobre la geometría del edificio, incluyendo paredes, ventanas, puertas, sistemas HVAC, etc. Además, también incluyen otro tipo de datos como ocupación e iluminación.
- Integración con EnergyPlus™: OpenStudio® utiliza EnergyPlus™ como su motor de simulación de energía subyacente. Los archivos OSM se pueden convertir directamente en archivos IDF (*Input Data File*) de EnergyPlus™ para realizar análisis de rendimiento energético detallados y precisos [43].

3.5.2.1 Desarrollo de la información constructiva del edificio

En primer lugar, se selecciona la pestaña *Construction* donde se despliegan tres opciones: sets de construcción (*constructions sets*), construcciones (*constructions*) y materiales (*materials*). Para definir los materiales será necesario introducir en la ventana *Materials* los datos específicos como el espesor (m), la conductividad térmica (W/m K), la densidad (kg/m³) y el calor específico (J/kg K), los cuales ya han sido especificados anteriormente en el Apartado 3.2.4. Véase la Figura 3-28.

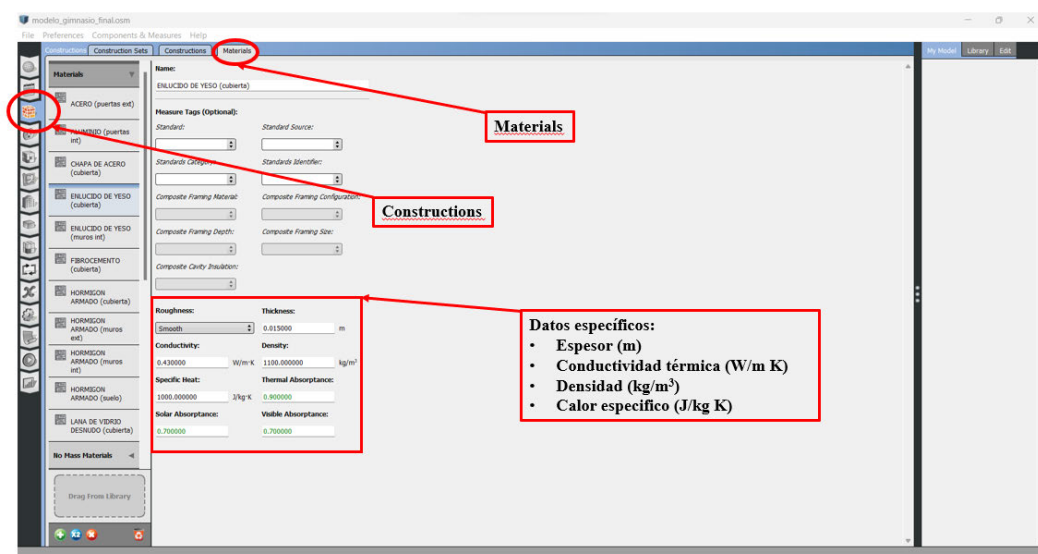


Figura 3-28 Desarrollo de los materiales en OpenStudio® [Autoría propia]

Seguidamente, se procede a confeccionar los elementos que componen la envolvente térmica del edificio. Se desarrollan, por tanto, 6 subapartados dentro de la ventana *Constructions* (véase Figura 3-29). Estos son: cubierta, muros exteriores, muros interiores, suelo, puertas exteriores y ventanas exteriores, tal y como se refleja en el Apartado 3.2.4. Para desarrollar un elemento se incluyen, de exterior a interior, cada una de las capas que forman dicho elemento y que han sido diseñadas en el apartado anterior.

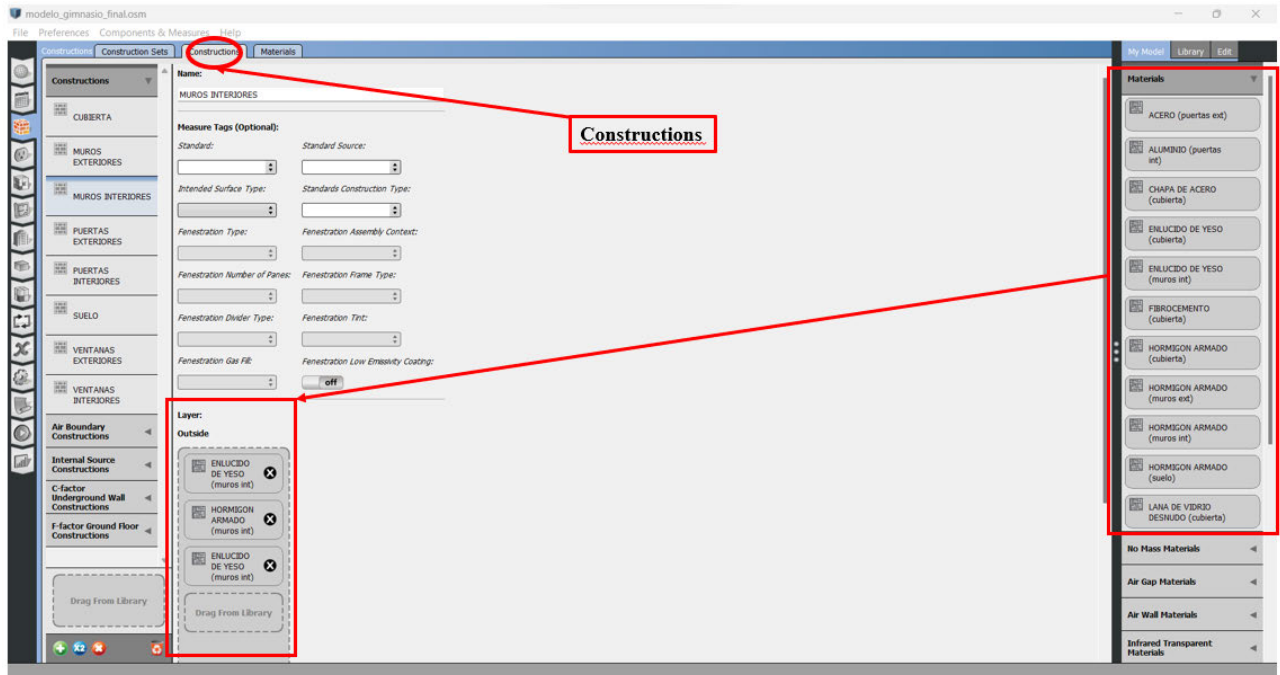


Figura 3-29 Creación de los elementos que componen la envolvente térmica [Autoría propia]

Finalmente, se desarrolla el set que será asignado al modelo y estará compuesto por los elementos que conforman la envolvente térmica del edificio. Para ello, en la ventana *Construction Sets* se van añadiendo las diferentes entidades constructivas que han sido desarrolladas en el apartado anterior. El set será denominado “Construcciones Gimnasio-Piscina GM Barrutia” (véase Figura 3-30). OpenStudio® por defecto estructura el set en: construcciones de la superficie exterior (*Exterior Surface Constructions*), construcciones de la superficie interior (*Interior Surface Constructions*), construcciones de la superficie de contacto con el suelo (*Ground Contact Surface Constructions*), construcciones sobre la superficie exterior (*Exterior Sub Surface Constructions*), construcciones sobre la superficie interior (*Interior Sub Surface Constructions*) y otras construcciones (*Other Constructions*).

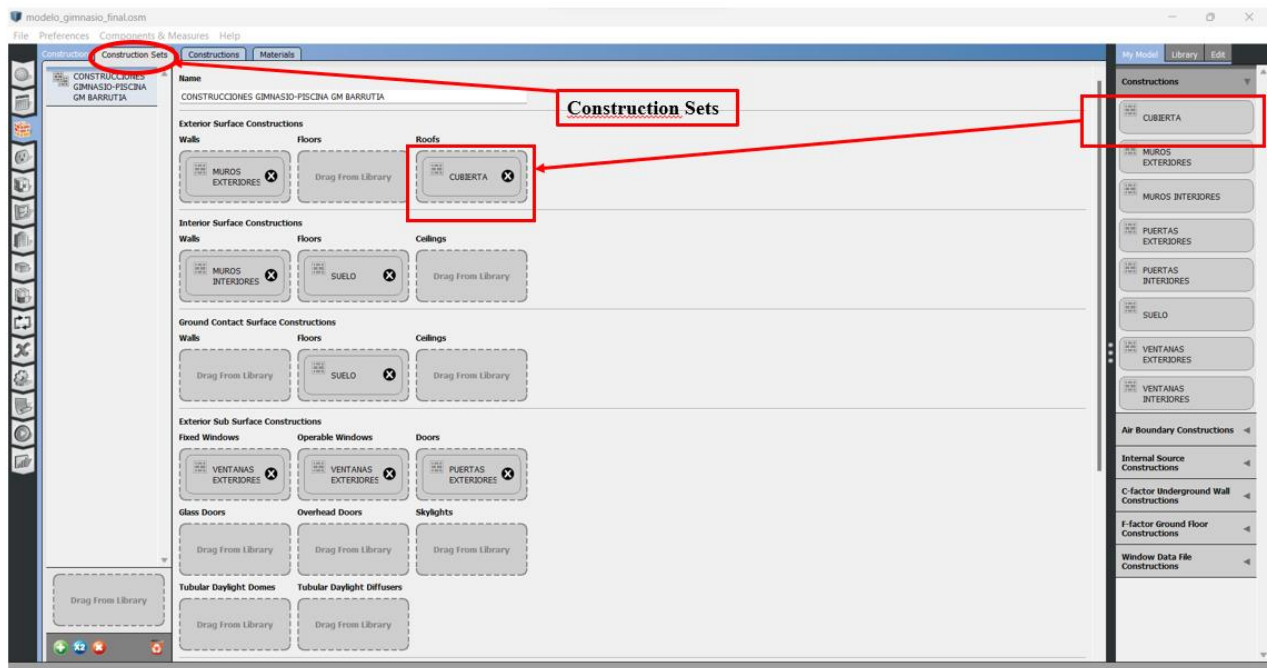


Figura 3-30 Desarrollo del Construction Set “Construcciones Gimnasio-Piscina GM Barrutia” [Autoría propia]

3.5.2.2 Cargas internas

OpenStudio® ofrece la posibilidad de confeccionar las cargas internas del edificio en la ventana *Loads* del menú. En este apartado, se encuentran las diferentes posibilidades en cuanto a tipos de carga que pueden tener influencia en el edificio modelado, las cuales son: ocupación personal (*People Definitions*), iluminación (*Lights Definitions*), luminaria (*Luminaire Definitions*), equipos eléctricos (*Electric Equipment Definitions*), equipos de gas (*Gas Equipment Definitions*), equipos de calefacción (*Steam Equipment Definitions*), otros equipos (*Other Equipment Definitions*), equipamiento interior (*Internal Mass Definitions*), y equipos de uso de agua (*Water Use Equipment Definitions*).

Para el modelado del edificio gimnasio-piscina “Guardiamarina Barrutia” de la ENM se tendrán en cuenta la ocupación personal y la iluminación. Dado que el edificio está dividido en tres espacios, cada uno para un uso distinto; por un lado, podemos encontrar el pabellón (utilizado para la práctica de deportes en equipo); por otro lado, el gimnasio (utilizado para el mantenimiento y desarrollo físico individual); y, por último, el vestuario utilizado únicamente por personal destinado en la ENM y para fines de aseo personal. De esta forma, el modelo queda dividido en tres zonas térmicas, que serán objeto de estudio y por ello se asignarán estas cargas en función de cada zona, tal y como se puede observar en la Figura 3-31.

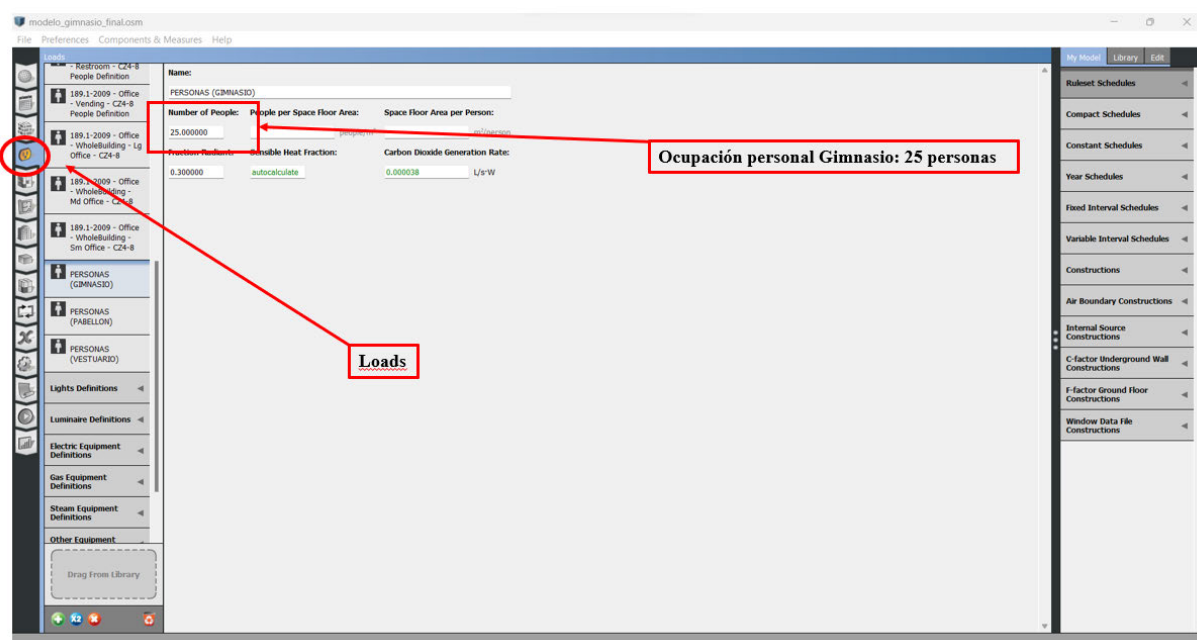


Figura 3-31 Introducción de las cargas internas del edificio [Autoría propia]

En la siguiente pestaña de *Space Types* se introducen las cargas internas de infiltraciones. Para ello, en la sección de *Loads* (cargas), se definen las infiltraciones existentes en cada zona térmica. Por ello, serán denominadas “Infiltraciones 1”, “Infiltraciones 2” y “Infiltraciones 3”; respectivamente. A cada parámetro le corresponde un dato de “Flujo” por cada superficie exterior (Véase Figura 3-32).

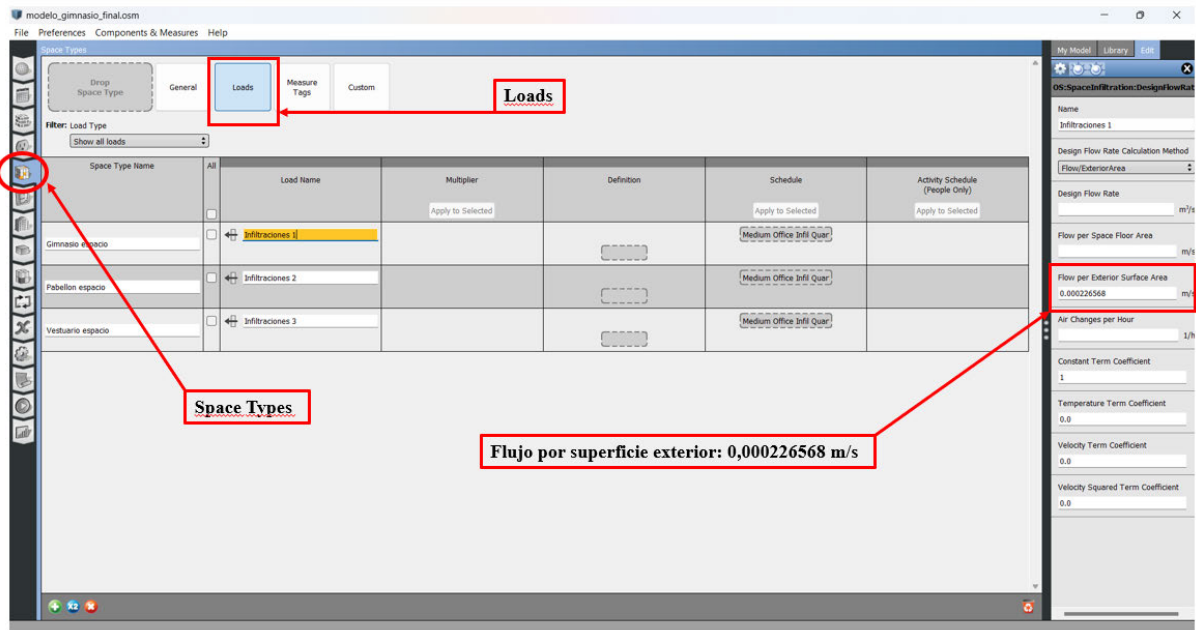


Figura 3-32 Introducción de las infiltraciones del edificio [Autoría propia]

Seguidamente, para poder definir de forma definitiva cada una de las cargas internas, se deben asignar los horarios de aplicación que tendrán cada una de ellas. Para ello, se accederá a la ventana *Schedules* (horarios), y de nuevo en la pestaña *Schedules* se selecciona la opción *Add new object* para definir cada una de las cargas, tal y como se puede ver en la Figura 3-33. En este caso, se desarrollarán cuatro apartados: Actividad Fraccional, Actividad Gimnasio, Actividad Pabellón, Actividad Vestuario e Iluminación, los cuales seguirán las características fijadas anteriormente en la Tabla 3-9 y Tabla 3-10, donde se encuentran los porcentajes de ocupación personal para cada carga, tanto en horario de entre semana como en horario de fin de semana.

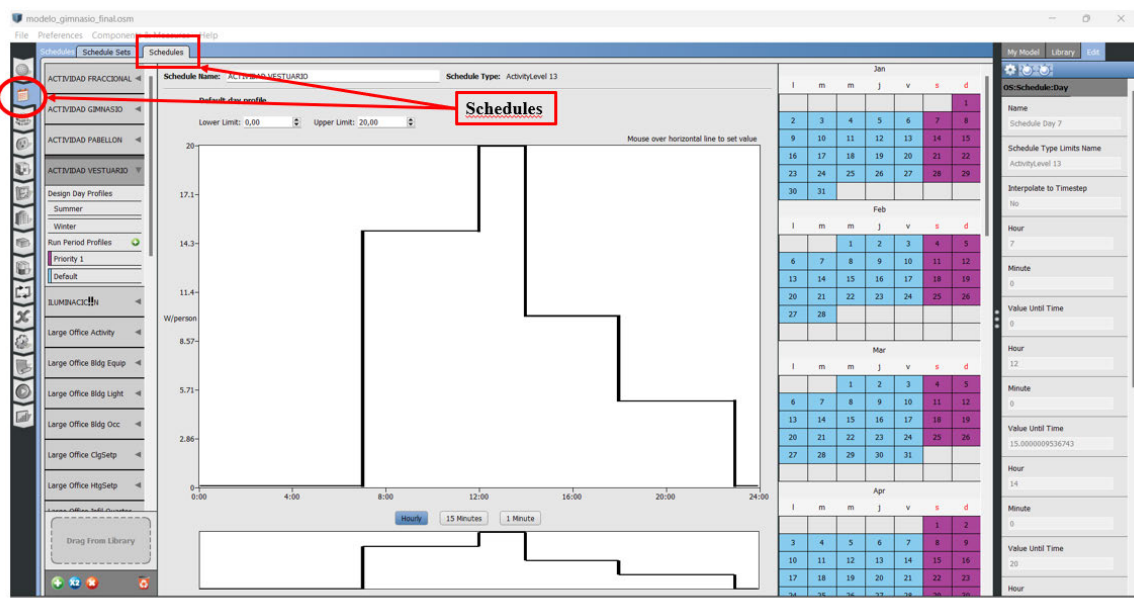


Figura 3-33 Desarrollo de los horarios de Actividad [Autoría propia]

Una vez ya han quedado definidos los horarios de cada espacio, es necesario acceder a la pestaña *Schedules Sets* para desarrollar los sets de horarios que serán de aplicación para el modelo. Por tanto, se crearán tres: Gimnasio Horarios, Pabellón Horarios y Vestuarios Horarios; tal y como se puede ver en la Figura 3-34.

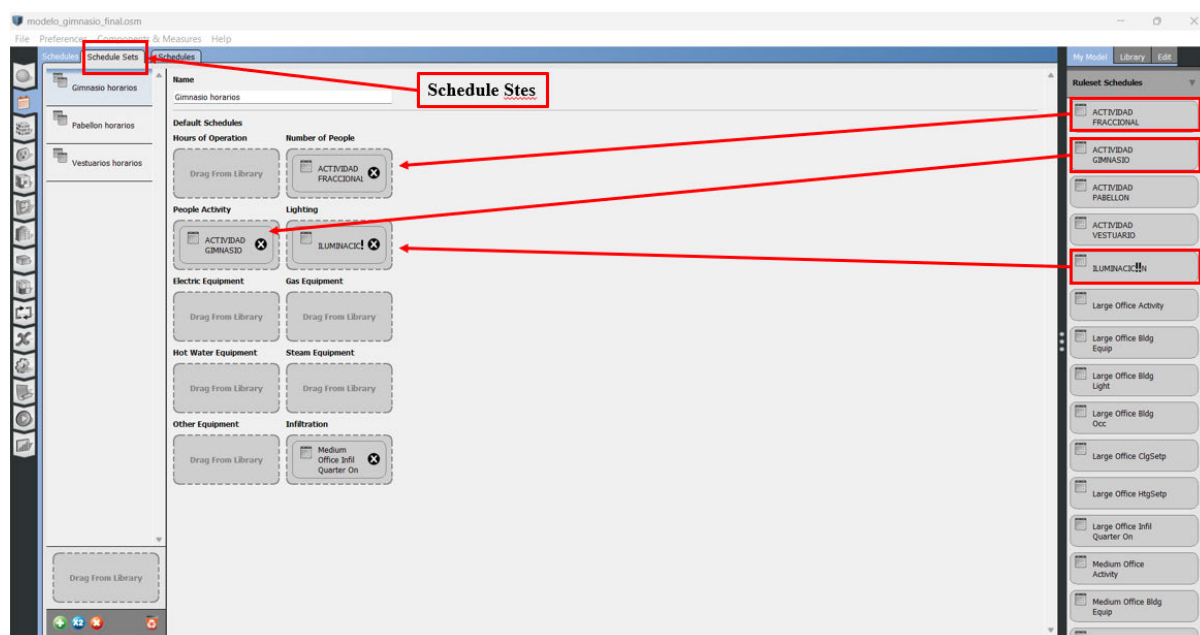


Figura 3-34 Desarrollo de los horarios de Actividad [Autoría propia]

Finalmente, en la ventana *Spaces* accediendo a la pestaña *Loads* se puede ver la situación general del modelo del edificio con las cargas internas que afectan a cada zona térmica, así como las propiedades constructivas del edificio si se accede a la pestaña *Properties* (véase la Figura 3-35).

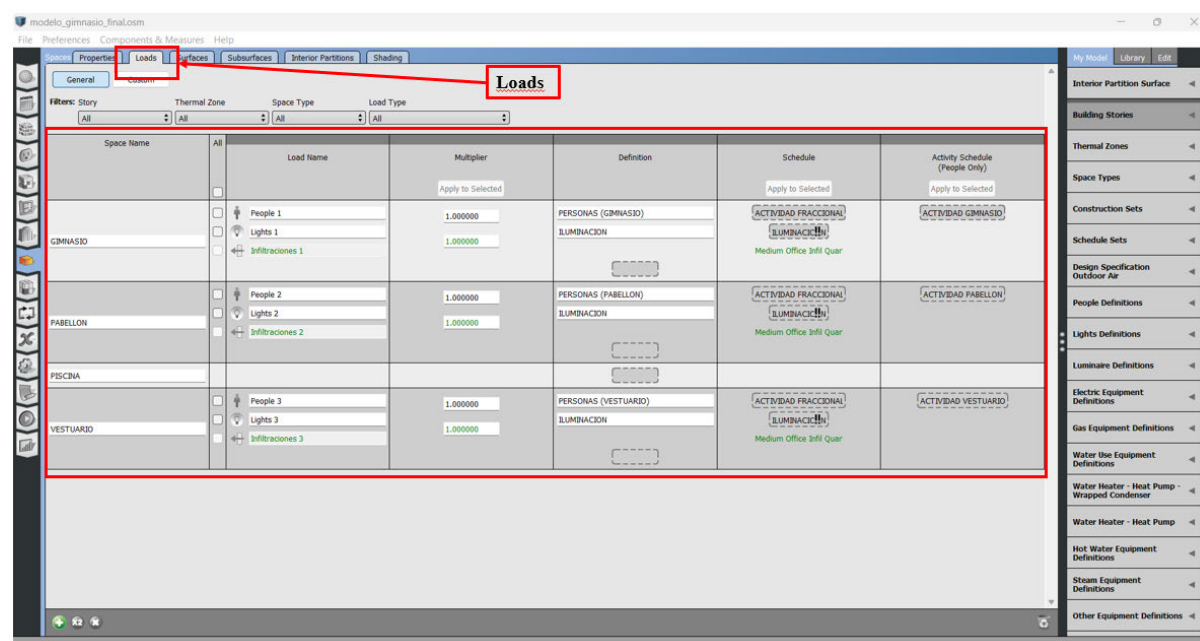


Figura 3-35 Cargas internas del modelo [Autoría propia]

3.5.2.3 Datos climáticos

En el desarrollo del modelo del edificio mediante OpenStudio® se hace uso del archivo climático con formato EPW (*EnergyPlus™ Weather*) correspondiente a Pontevedra y descargado en la página web www.energyplus.net/weather. Para ello, se accede a la ventana *Sites* y en la primera pestaña *Weather File & Design Days* se introduce el archivo en el buscador (véase Figura 3-36). Los archivos “.epw” son utilizados comúnmente en aplicaciones de modelado energético y contienen una amplia gama de datos climáticos recopilados de estaciones meteorológicas. Este tipo de archivos contienen: datos meteorológicos detallados, ubicación geográfica, formato estándar y calidad de datos; y contienen datos

de: temperatura, humedad relativa, velocidad del viento, dirección del viento, precipitación y radiación solar.

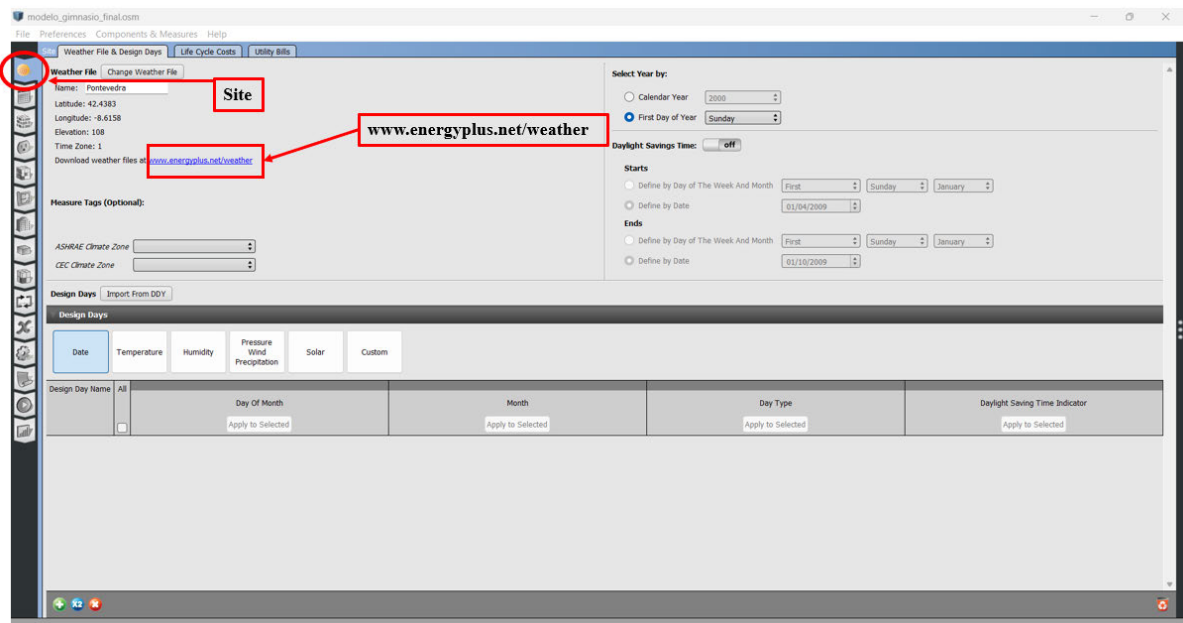


Figura 3-36 Definición de los datos climáticos del modelo [Autoría propia]

3.6 Simulación

Una vez el edificio gimnasio-piscina “Guardiamarina Barrutia” ha quedado modelado, se procede con la simulación del mismo. Para ello, se accede a la ventana *Run Simulation* de OpenStudio® y se procede a ejecutar la simulación, tal y como se puede observar en la Figura 3-37.

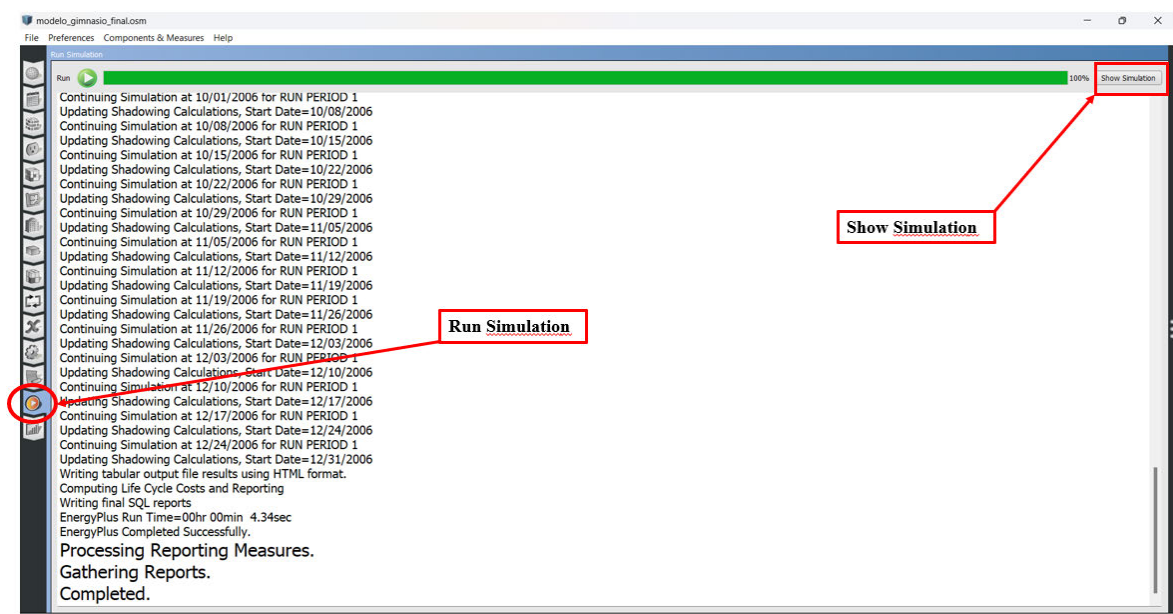


Figura 3-37 Simulación del modelo en OpenStudio® [Autoría propia]

Si se accede a la opción *Show Simulation* se puede observar cómo OpenStudio® genera una serie de ficheros en los que se reflejan los resultados de la simulación. En concreto, el fichero “.eso” se trata de un informe de las variables de salida que puede ser visualizado a través de la aplicación xEsoView y que ofrece datos de la simulación plasmados en graficas totales, mensuales, diarias y horarias de cada una de las variables de salida (temperatura) en cada una de las zonas térmicas del modelo (véase Figura 3-38).

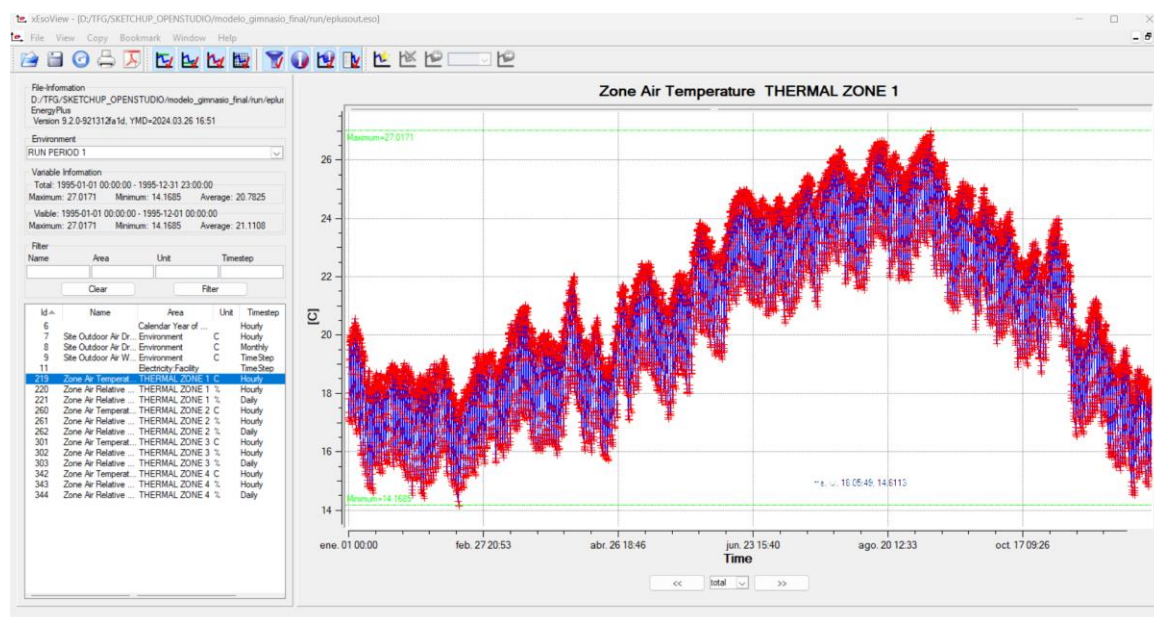


Figura 3-38 Temperatura del aire en la Zona Térmica 1 (Pabellón) del modelo [Autoría propia]

3.7 Calibración del modelo

Según el Vocabulario Internacional de Metrología, la calibración se define como “aquella operación que bajo condiciones especificadas establece, en una primera etapa, una relación entre los valores y sus incertidumbres de medida asociadas obtenidas a partir de los patrones de medida, y las correspondientes indicaciones con sus incertidumbres asociadas y, en una segunda etapa, utiliza esta información para establecer una relación que permita obtener un resultado de medida a partir de una indicación”. Además, también se dice que “una calibración puede expresarse mediante una declaración, una función de calibración, un diagrama de calibración, una curva de calibración o una tabla de calibración. En algunos casos puede consistir en una corrección aditiva o multiplicativa de la indicación con su incertidumbre correspondiente” [44].

En el presente Trabajo de Fin de Grado, la calibración que se llevará a cabo será un proceso que consistirá en la comparación de los valores obtenidos a partir de la simulación energética, mediante OpenStudio®, del edificio “Guardiamarina Barrutia” de la ENM con los valores medidos en la realidad sobre dicho edificio, para posteriormente realizar las correcciones necesarias para obtener resultados más precisos del proceso de simulación.

Para ello, en el campo de la simulación energética GenOpt (véase Figura 3-39) ofrece multitud de posibilidades. Tal y como se ha mencionado anteriormente, se trata de una herramienta de optimización de funciones de coste, haciendo de ella una herramienta de gran utilidad para la búsqueda de mejoras en el comportamiento térmico del edificio que sea objeto de estudio en ese momento. En este caso, GenOpt se empleará para el proceso de calibración del modelo, cuyo objetivo consiste en minimizar la diferencia existente entre los valores obtenidos al simular el edificio y los valores reales obtenidos a través de la monitorización. Para ello, se modificarán ciertos parámetros del modelo que tienen influencia en el comportamiento térmico del edificio, en un proceso iterativo y la función objetivo, pasará a ser la minimización del error cometido a la hora de simular el edificio con respecto a la realidad [45].

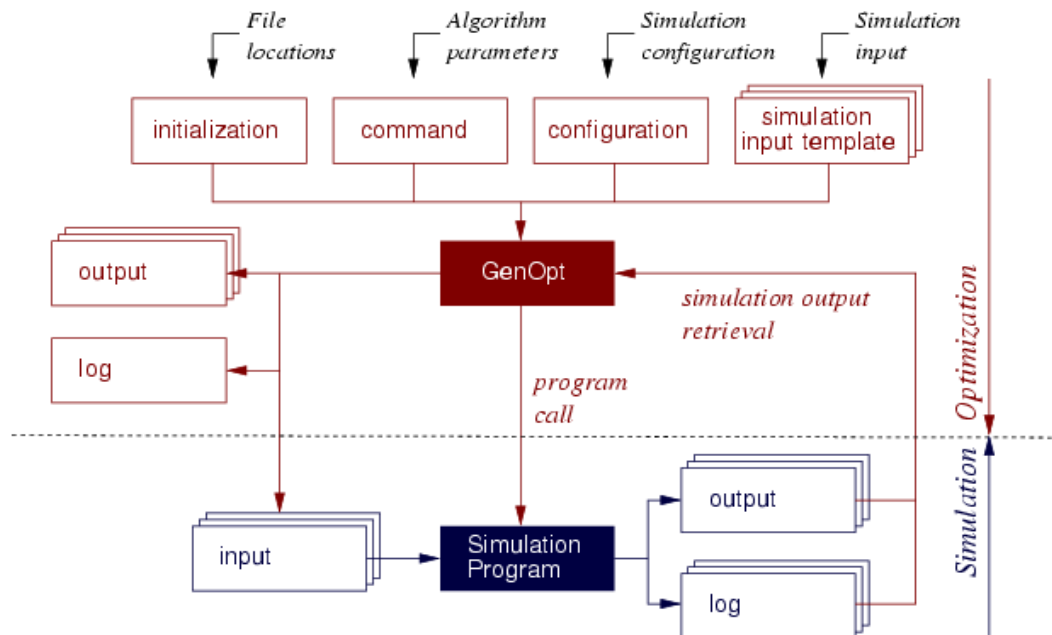


Figura 3-39 Funcionamiento GenOpt [46]

Cabe destacar que el proceso de calibración también ayudaría a mitigar el posible error existente fruto de las simplificaciones y suposiciones asumidas en el proceso de modelado del edificio. Dado que se trata de un edificio de características estructurales complejas, como se mencionó previamente, se decide simplificar su diseño con el fin de obtener un modelo simplificado que permita una mayor eficacia de trabajo tanto en simulación como en calibración.

3.7.1 Función Objetivo (F.O.)

La función objetivo supone la minimización del error cometido a la hora de simular el edificio con respecto a la realidad. Es decir, se trata de reducir la diferencia existente entre los valores obtenidos fruto de la simulación y los medidos en la realidad a través de los sensores. Por todo ello, mediante la F.O. se consiguen alcanzar los objetivos de reducción del error existente en la simulación con respecto a los datos reales obtenidos en la monitorización.

Para calcular el error se emplea el Coeficiente de Variación del error cuadrático medio, denominado CV (RMSE) (*Coefficient of Variation of the Root Mean Square Error*), el cual se encarga de medir la variabilidad de los errores entre los valores medidos y los simulados. Este coeficiente da una indicación de la capacidad del modelo para predecir la forma general de la carga que se refleja en los datos. Se trata de un valor que no está sujeto a errores de cancelación y por lo tanto algunas directrices, como ASHRAE (Sociedad Americana de Ingenieros de Calefacción, Refrigeración y Aire Acondicionado), lo utilizan con el NMBE (*Normalized Mean Bias Error*) para verificar la precisión de los modelos [47].

El CV(RMSE) se calcula de la siguiente forma (véase Figura 3-40):

$$CV(RMSE) = \frac{1}{\bar{m}} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (m_i - s_i)^2}{n - p}} \times 100 (\%)$$

Figura 3-40 Fórmula del CV(RMSE) [47]

Donde:

- $\bar{m}$: media de los valores reales.
- m_i : cada valor real.

- s_i : cada valor simulado.
- n : número total de valores que componen la muestra.
- p : número de parámetros ajustables del modelo (para lo cual se recomienda que el valor sea 1).

En el caso de la simulación llevada a cabo sobre el modelo desarrollado del gimnasio-piscina de la ENM, se obtiene una función objetivo cuyo valor es 20,6742 %.

Según la AHRAE Guideline 14 [48], el valor límite fijado para el CV(RMSE) en calibraciones horarias es el fijado en la Tabla 3-13:

Medidas	Índice	Valor límite
Horarias	CV(RMSE)	30%

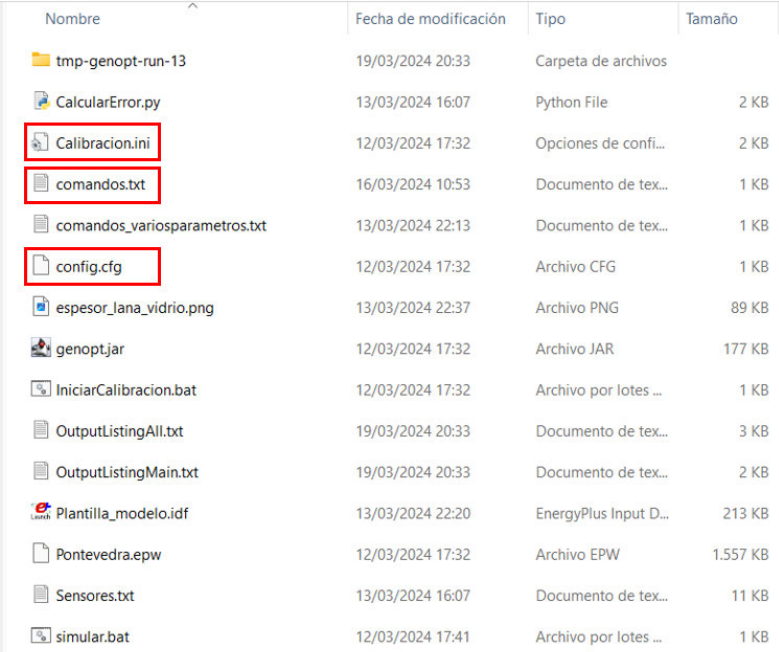
Tabla 3-13 Criterios de calibración del ASHRAE Guideline 14 [Autoría propia en base a [48]]

Tal y como se puede observar, podemos concluir que al tener la F.O. un valor inicial de 20,6742 %, el modelo ya está calibrado según las especificaciones de la ASHRAE Guideline 14. Sin embargo, se llevará a cabo el proceso de calibración para conseguir minimizar y, por tanto, optimizar al máximo el modelo desarrollado.

3.7.2 Funcionamiento de GenOpt

En primer lugar, para configurar GenOpt son tres las premisas que se deben cumplir (véase Figura 3-41):

- Se ha de identificar los archivos implicados en la calibración dentro de un fichero de inicialización que tendrá la extensión “.ini”. En este caso “Calibracion.ini”.
- La configuración de los parámetros del algoritmo empleado para la calibración quedará registrada en un archivo de comandos con extensión “.txt”. Por ejemplo, “comandos.txt”.
- La ruta que seguirá el aviso de GenOpt al software de simulación y el cálculo de la Función Objetivo (F.O.) a minimizar quedarán definidos en un archivo de configuración “.cfg”. En este caso “config.cfg” [45].



Nombre	Fecha de modificación	Tipo	Tamaño
tmp-genopt-run-13	19/03/2024 20:33	Carpeta de archivos	
CalcularError.py	13/03/2024 16:07	Python File	2 KB
Calibracion.ini	12/03/2024 17:32	Opciones de confi...	2 KB
comandos.txt	16/03/2024 10:53	Documento de tex...	1 KB
comandos_variosparametros.txt	13/03/2024 22:13	Documento de tex...	1 KB
config.cfg	12/03/2024 17:32	Archivo CFG	1 KB
espesor_lana_vidrio.png	13/03/2024 22:37	Archivo PNG	89 KB
genopt.jar	12/03/2024 17:32	Archivo JAR	177 KB
IniciarCalibracion.bat	12/03/2024 17:32	Archivo por lotes ...	1 KB
OutputListingAll.txt	19/03/2024 20:33	Documento de tex...	3 KB
OutputListingMain.txt	19/03/2024 20:33	Documento de tex...	2 KB
Plantilla_modelo.idf	13/03/2024 22:20	EnergyPlus Input D...	213 KB
Pontevedra.epw	12/03/2024 17:32	Archivo EPW	1.557 KB
Sensores.txt	13/03/2024 16:07	Documento de tex...	11 KB
simular.bat	12/03/2024 17:41	Archivo por lotes ...	1 KB

Figura 3-41 Archivos de calibración en GenOpt [Autoría propia]

Seguidamente, también se deben incluir en GenOpt los archivos de la simulación, los cuales son dos (véase Figura 3-42):

- En primer lugar, un archivo de información meteorológica. Tal y como se ha mencionado en el Apartado 3.5.2.3, se hará uso de un archivo “.epw”, el cual, engloba las variables climáticas más significativas del emplazamiento del edificio, en este caso, la localidad de Pontevedra.
- En segundo lugar, es necesario un archivo con extensión “.idf”. Para la calibración del modelo del gimnasio se nombrará el archivo “Plantilla_modelo.idf”, el cual contendrá toda la información del modelo para poder realizar la simulación del edificio, siendo este el formato reconocido por EnergyPlus™. Es decir, la información incluida en OpenStudio® al desarrollar el modelo del edificio aparecerá en este archivo, como información geométrica, información constructiva y todo tipo de datos que puedan afectar a la actividad del edificio, como la influencia de las cargas internas y los horarios de actividad del personal usuario del edificio. Asimismo, es en este archivo donde se identifica la variable del modelo que se va a modificar para tratar de minimizar la F.O.

Nombre	Fecha de modificación	Tipo	Tamaño
tmp-genopt-run-13	19/03/2024 20:33	Carpeta de archivos	
CalcularError.py	13/03/2024 16:07	Python File	2 KB
Calibracion.ini	12/03/2024 17:32	Opciones de confi...	2 KB
comandos.txt	16/03/2024 10:53	Documento de tex...	1 KB
comandos_variosparametros.txt	13/03/2024 22:13	Documento de tex...	1 KB
config.cfg	12/03/2024 17:32	Archivo CFG	1 KB
espesor_lana_vidrio.png	13/03/2024 22:37	Archivo PNG	89 KB
genopt.jar	12/03/2024 17:32	Archivo JAR	177 KB
IniciarCalibracion.bat	12/03/2024 17:32	Archivo por lotes ...	1 KB
OutputListingAll.txt	19/03/2024 20:33	Documento de tex...	3 KB
OutputListingMain.txt	19/03/2024 20:33	Documento de tex...	2 KB
Plantilla_modelo.idf	13/03/2024 22:20	EnergyPlus Input D...	213 KB
Pontevedra.epw	12/03/2024 17:32	Archivo EPW	1.557 KB
Sensores.txt	13/03/2024 16:07	Documento de tex...	11 KB
simular.bat	12/03/2024 17:41	Archivo por lotes ...	1 KB

Figura 3-42 Archivos de la simulación en GenOpt [Autoría propia]

Finalmente, conviene mencionar que, una vez ejecutada la simulación, tal y como se explicó en el Apartado 3.6 (véase Figura 3-37), OpenStudio® genera una carpeta que contiene diversas entradas, entre las cuales, interesará la carpeta *Run* (véase Figura 3-43).

Nombre	Fecha de modificación	Tipo	Tamaño
files	13/03/2024 22:15	Carpeta de archivos	
generated_files	13/03/2024 22:15	Carpeta de archivos	
measures	13/03/2024 22:15	Carpeta de archivos	
reports	13/03/2024 22:15	Carpeta de archivos	
run	13/03/2024 22:15	Carpeta de archivos	
out.osw	26/03/2024 16:51	Archivo OSW	7 KB
stderr	26/03/2024 16:51	Archivo	2 KB
stdout	26/03/2024 16:51	Archivo	0 KB
workflow.osw	26/03/2024 16:51	Archivo OSW	1 KB

Figura 3-43 Archivos generados por OpenStudio® en la simulación [Autoría propia]

Dentro de esta carpeta, se pueden encontrar dos tipos de archivos que serán utilizados por GenOpt (véase Figura 3-44):

- Fichero con extensión “`.err`”: este fichero incluye información de gran utilidad acerca de errores que han ocurrido durante la simulación.
- Fichero con extensión “`.eso`”: este fichero, sobre el cual ya se ha hablado previamente, permite observar todos los resultados de la simulación acerca de los parámetros calculados. En este caso, GenOpt lo empleará para determinar el valor de la Función Objetivo.

 eplusout.err	26/03/2024 16:51	Archivo ERR	6 KB
 eplusout.eso	26/03/2024 16:51	eso - Energy+ oup...	5.974 KB
 eplusout.mdd	26/03/2024 16:51	Archivo MDD	6 KB
 eplusout.mtd	26/03/2024 16:51	Archivo MTD	13 KB
 eplusout.rdd	26/03/2024 16:51	Archivo RDD	34 KB
 eplusout.shd	26/03/2024 16:51	Archivo SHD	8 KB
 eplusout.sql	26/03/2024 16:51	Archivo SQL	6.616 KB
 eplusout.html	26/03/2024 16:51	Chrome HTML Do...	307 KB
 finished.job	26/03/2024 16:51	Task Scheduler Tas...	1 KB
 in.idf	26/03/2024 16:51	EnergyPlus Input D...	213 KB
 in.osm	26/03/2024 16:51	OpenStudio Mode...	312 KB
 measure_attributes.json	26/03/2024 16:51	Archivo JSON	1 KB
 objectives.json	26/03/2024 16:51	Archivo JSON	1 KB
 pre-preprocess.idf	26/03/2024 16:51	EnergyPlus Input D...	195 KB
 results.json	26/03/2024 16:51	Archivo JSON	1 KB
 run.log	26/03/2024 16:51	Documento de tex...	0 KB

Figura 3-44 Archivos usados por GenOpt para calibrar [Autoría propia]

Tal y como se puede observar en la Figura 3-42, existen una serie de ficheros que influyen en la calibración y que son utilizados mediante un programa en Python para calcular el error. El archivo “CalcularError.py”, que aparece en la Figura 3-42, utiliza la fórmula del CV(RMSE) de la Figura 3-40 para llevar a cabo el cálculo del error (véase Figura 3-45).

```

import esoreader
import math

def ES0read(file, zone, freq):
    dd, data = esoreader.read(file)
    eso_file = esoreader.read_from_path(file)
    var = esoreader.EsoFile.find_variable(eso_file, search='Zone Air Temperature', key=zone, frequency=freq)[0]
    frequency, key, variable = var[0], var[1], var[2]
    idx = dd.index[frequency, key, variable]
    return data[idx]

def WriteError(valor):
    with open('error.txt', 'w') as f:
        f.write("error=" + str(valor))

def ErrorCalc(d1, d2):
    rmse = mae = 0
    mean = 0
    n = 0
    for a,b in zip(d1, d2):
        if math.isnan(a) == False and math.isnan(b) == False:
            rmse += (a-b)*(a-b)
            mean += b
            n += 1
    return math.sqrt(rmse/n)/(mean/n)*100

def DataSensorRead(sensor_file):
    data = []
    with open(sensor_file, 'r') as file:
        for line in file:
            for x in line.split():
                data.append(float(x))
    return data

PATH_TO_ES01 = r'epplusout.eso'
dataTZ1 = ES0read(PATH_TO_ES01, zone='THERMAL ZONE 1', freq='Hourly')
dataTZ2 = ES0read(PATH_TO_ES01, zone='THERMAL ZONE 2', freq='Hourly')
dataTZ3 = ES0read(PATH_TO_ES01, zone='THERMAL ZONE 3', freq='Hourly')

dataTZ = dataTZ1 + dataTZ2 + dataTZ3

PATH_TO_SENSORS = r'Sensores.txt'
dataS = DataSensorRead(PATH_TO_SENSORS)

error = ErrorCalc(dataTZ, dataS)

WriteError(error)

```

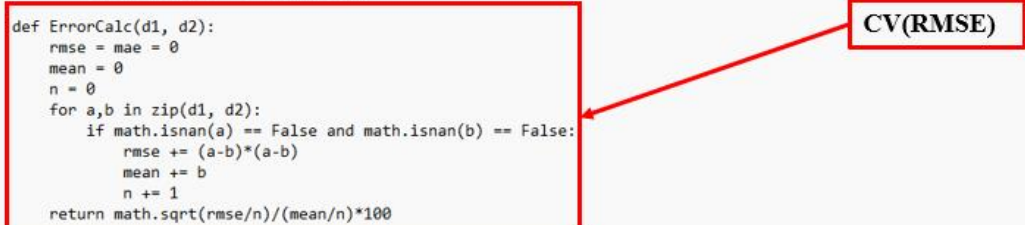


Figura 3-45 Cálculo del error mediante el CV(RMSE) [Autoría propia]

3.7.2.1 Algoritmo Hooke-Jeeves

GenOpt ofrece una serie de algoritmos para minimizar la Función Objetivo de forma sencilla hasta llegar al mínimo local. Para la calibración del modelo se utilizará el algoritmo de Hooke-Jeeves, el cual, es un algoritmo de búsqueda de patrones generalizados (GPS) ejecutado mediante múltiples puntos de partida. Se trata de un algoritmo híbrido para la optimización global. Para ello, el método de patrones de búsqueda crea un conjunto de direcciones de búsqueda de manera iterativa, combinando movimientos exploratorios con movimientos de patrones, y regulando dichas operaciones mediante reglas heurísticas.

Algunas de las características que presenta este algoritmo son las siguientes:

- Iterativo: el algoritmo realiza una serie de pasos para mejorar la estimación del mínimo local en cada iteración.
- Dos fases: el proceso de desarrollo del algoritmo consta de dos fases principales: exploración y búsqueda. Durante la exploración el algoritmo comienza la exploración en la dirección del vector de búsqueda, con una longitud de paso inicialmente grande. Si se encuentra un punto que mejora la Función Objetivo, el algoritmo se mueve en esa dirección. Si no, el algoritmo reduce la longitud de paso y continúa explorando.
- Actualización de la solución: en cada iteración, el algoritmo actualiza la solución actual.

En definitiva, el algoritmo de Hooke-Jeeves es una opción eficiente para la optimización no lineal cuando la Función Objetivo es costosa de evaluar, aunque se ha de atender con cuidado a la elección de los parámetros a estudiar y la estrategia de exploración y búsqueda utilizada [45].

3.7.3 Proceso de calibración

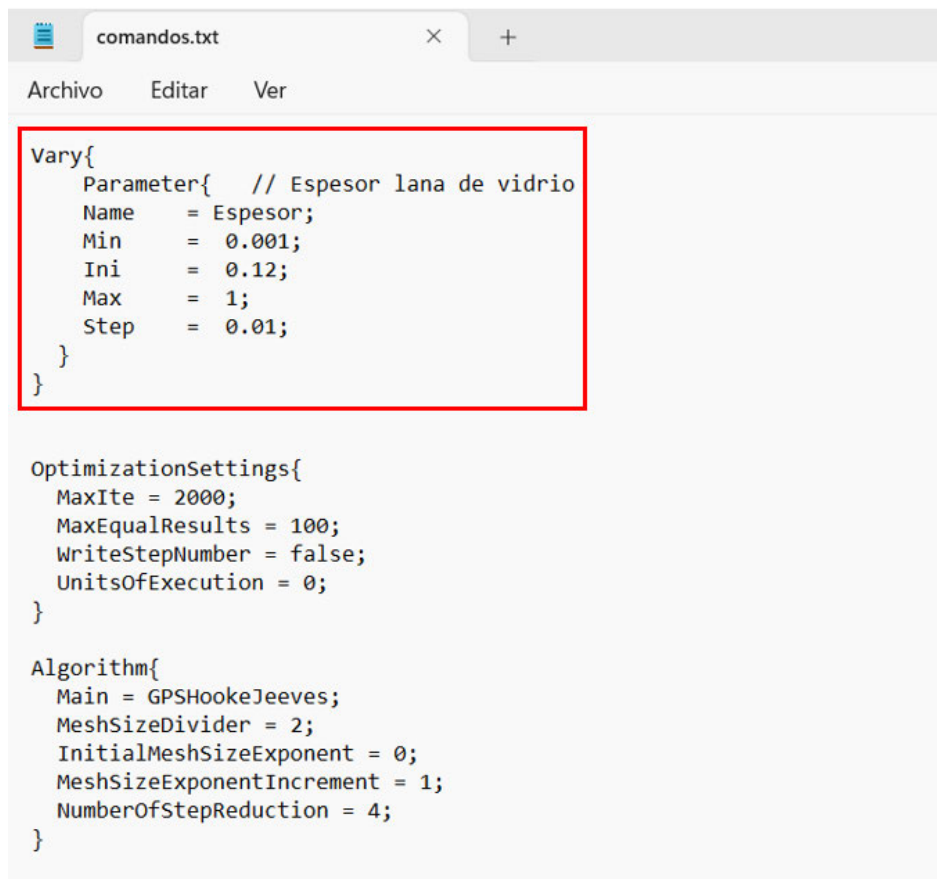
A continuación, se detalla cómo se lleva a cabo el proceso de calibración de un valor específico del modelo desarrollado que será el espesor de la lana de vidrio presenta en la cubierta del edificio. Como ya se ha visto previamente, se trata de un proceso que utiliza algoritmos de optimización para ajustar los parámetros determinados de un modelo específico. Asimismo, mediante la herramienta GenOpt se consigue encontrar la combinación óptima de parámetros que minimiza el error o discrepancia entre las predicciones del modelo y los datos reales obtenidos a partir de los sensores, obteniendo como resultado una mejora significativa en la precisión y la utilidad del modelo para su aplicación.

Tal y como se ha detallado en el Apartado 3.7, para calibrar, GenOpt hace uso de una serie de ficheros que contienen la información necesaria. Asimismo, de la calibración se obtienen una serie de ficheros de salida que contienen información de relevancia para el análisis de los resultados como, por ejemplo, el archivo “OutputListingMain.txt” (véase Figura 3-46).

tmp-genopt-run-13	19/03/2024 20:33	Carpeta de archivos	
CalcularError.py	13/03/2024 16:07	Python File	2 KB
Calibracion.ini	12/03/2024 17:32	Opciones de confi...	2 KB
comandos.txt	16/03/2024 10:53	Documento de tex...	1 KB
comandos_variosparametros.txt	13/03/2024 22:13	Documento de tex...	1 KB
config.cfg	12/03/2024 17:32	Archivo CFG	1 KB
espesor_lana_vidrio.png	13/03/2024 22:37	Archivo PNG	89 KB
genopt.jar	12/03/2024 17:32	Archivo JAR	177 KB
IniciarCalibracion.bat	12/03/2024 17:32	Archivo por lotes ...	1 KB
OutputListingAll.txt	19/03/2024 20:33	Documento de tex...	3 KB
OutputListingMain.txt	19/03/2024 20:33	Documento de tex...	2 KB
Plantilla_modelo.idf	13/03/2024 22:20	EnergyPlus Input D...	213 KB
Pontevedra.epw	12/03/2024 17:32	Archivo EPW	1.557 KB
Sensores.txt	13/03/2024 16:07	Documento de tex...	11 KB
simular.bat	12/03/2024 17:41	Archivo por lotes ...	1 KB

Figura 3-46 Ficheros de salida en GenOpt [Autoría propia]

En primer lugar, para la calibración de cualquier parámetro; en este caso, el espesor de la lana de vidrio; se debe acceder al archivo “comandos.txt” y en el apartado *Vary* se irán añadiendo los datos que GenOpt tendrá en cuenta en la calibración (véase Figura 3-47). Es decir, se establece cuál es la variable independiente y sus características principales. Los campos que se deben completar han de ser siempre los mismos y variarán en función del parámetro que es estudiado. Estos son: *Name* (nombre de la variable); *Min* (valor mínimo), *Ini* (valor inicial), *Max* (valor máximo), entre los que GenOpt ha de buscar la mejor solución; y *Step* (salto), este valor define la longitud de paso que el algoritmo emplea inicialmente en el proceso de exploración.



```

comandos.txt
Archivo  Editar  Ver

Vary{
  Parameter{  // Espesor lana de vidrio
    Name      = Espesor;
    Min       = 0.001;
    Ini       = 0.12;
    Max       = 1;
    Step      = 0.01;
  }
}

OptimizationSettings{
  MaxIte = 2000;
  MaxEqualResults = 100;
  WriteStepNumber = false;
  UnitsOfExecution = 0;
}

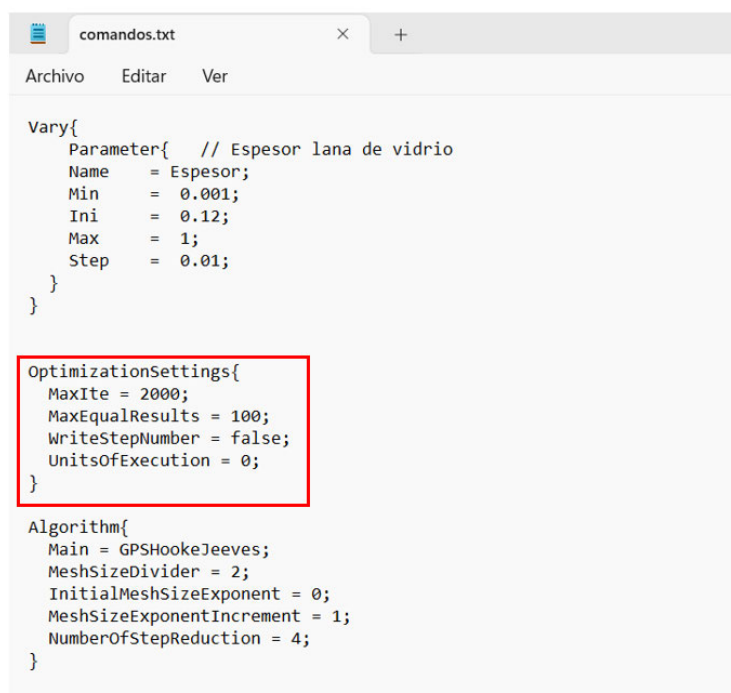
Algorithm{
  Main = GPSHookeJeeves;
  MeshSizeDivider = 2;
  InitialMeshSizeExponent = 0;
  MeshSizeExponentIncrement = 1;
  NumberOfStepReduction = 4;
}

```

Figura 3-47 Introducción de datos en el archivo “comandos.txt” [Autoría propia]

Seguidamente, se lleva a cabo la configuración de la optimización. Para ello se hace necesario especificar las siguientes características (véase Figura 3-48):

- *MaxIte*: número máximo de iteraciones.
- *MaxEqualResults*: este parámetro fija el número máximo de veces que se puede repetir el resultado de la nueva F.O. antes de que se por finalizada la calibración.
- *WriteStepNumber*: este parámetro se emplea para determinar aquellos casos en los que la variable independiente de alguna iteración anterior ha influido en la F.O. En aquellos casos en los que la F.O. sí que depende de este valor, la variable independiente se almacena en un contador.
- *UnitsOfExecution*: se trata de un parámetro que especifica el número máximo de simulaciones que se pueden llegar a ejecutar en paralelo. Si no se especifica o se establece en un valor de “0”, este valor se corresponderá con el número de procesadores del equipo que ejecuta GenOpt.



```
comandos.txt
Archivo  Editar  Ver

Vary{
  Parameter{ // Espesor lana de vidrio
    Name   = Espesor;
    Min    = 0.001;
    Ini    = 0.12;
    Max    = 1;
    Step   = 0.01;
  }
}

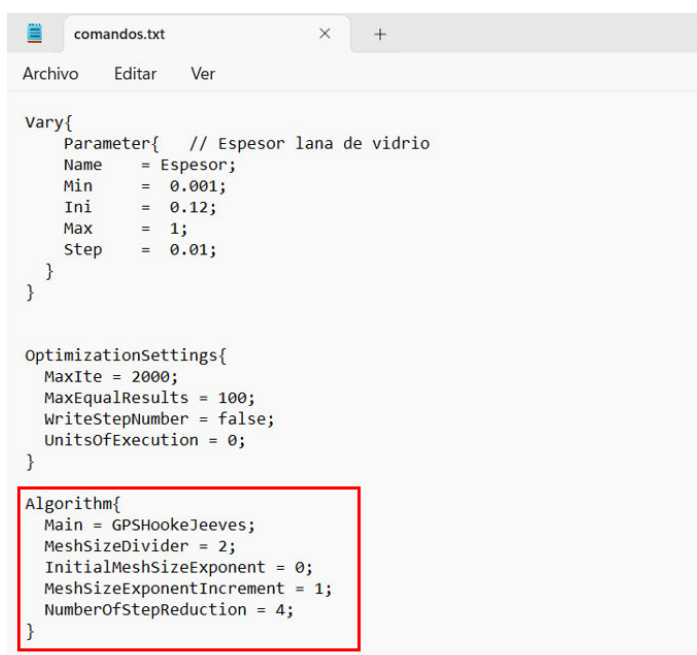
OptimizationSettings{
  MaxIte = 2000;
  MaxEqualResults = 100;
  WriteStepNumber = false;
  UnitsOfExecution = 0;
}

Algorithm{
  Main = GPSHookeJeeves;
  MeshSizeDivider = 2;
  InitialMeshSizeExponent = 0;
  MeshSizeExponentIncrement = 1;
  NumberOfStepReduction = 4;
}
```

Figura 3-48 Ajustes de optimización [Autoría propia]

Por último, es necesario definir el algoritmo de trabajo que lleva a cabo la ejecución de la calibración. Tal y como se ha especificado en el Apartado 3.7.2.1, se utiliza el algoritmo de Hooke-Jeeves. Los parámetros que se han de especificar son los siguientes (véase Figura 3-49):

- *Main*: en este apartado se determina el algoritmo que se utiliza.
- *MeshSizeDivider*: este parámetro determina el tamaño de la malla.
- *InitialMeshSizeExponent*: especifica el valor inicial para el tamaño de malla.
- *MeshSizeExponentIncrement*: en este apartado se determina el incremento del tamaño de malla.
- *NumberOfStepReduction*: se indica el número máximo de veces que se podrá reducir el parámetro “Step” antes de que finalice el algoritmo.



```
comandos.txt
Archivo  Editar  Ver

Vary{
  Parameter{ // Espesor lana de vidrio
    Name   = Espesor;
    Min    = 0.001;
    Ini    = 0.12;
    Max    = 1;
    Step   = 0.01;
  }
}

OptimizationSettings{
  MaxIte = 2000;
  MaxEqualResults = 100;
  WriteStepNumber = false;
  UnitsOfExecution = 0;
}

Algorithm{
  Main = GPSHookeJeeves;
  MeshSizeDivider = 2;
  InitialMeshSizeExponent = 0;
  MeshSizeExponentIncrement = 1;
  NumberOfStepReduction = 4;
}
```

Figura 3-49 Ajustes del algoritmo Hooke-Jeeves [Autoría propia]

En segundo lugar, se accede al archivo “Plantilla_modelo.idf”. Para ello, se puede acceder mediante cualquier editor de texto, en este caso se utiliza el propio Bloc de Notas de *Windows*. En este archivo, se recomienda hacer uso del comando “CTRL+B” para buscar de forma rápida el elemento cuyo parámetro se va a calibrar, en este caso “lana de vidrio”. Una vez encontrado el parámetro, se elimina el valor inicial y en su lugar se introduce entre los signos de porcentaje “%”, el nombre de la variable que se ha definido en el archivo “comandos.txt” en el apartado de nombre, en este caso ha de quedar de la siguiente forma %Espesor%, tal y como refleja la Figura 3-50.

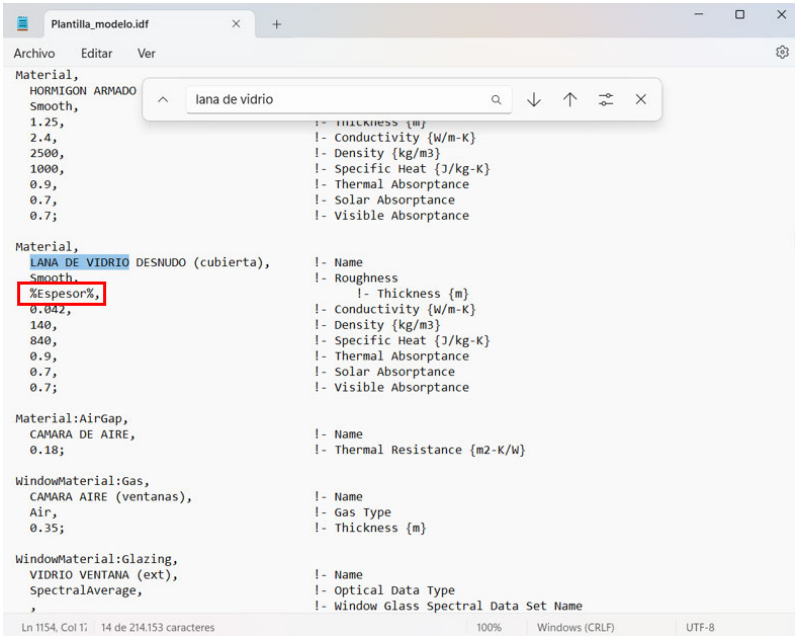


Figura 3-50 Definición del parámetro a calibrar en “Plantilla_modelo.idf” [Autoría propia]

En tercer lugar, se procede a calibrar el modelo mediante la ejecución del archivo “IniciarCalibracion.bat”, tal y como se puede observar en la Figura 3-51. La calibración da como resultado una reducción de la Función Objetivo, mediante la modificación del parámetro que se ha decidido variar (en este caso, espesor de la lana de vidrio).

tmp-genopt-run-13	19/03/2024 20:33	Carpeta de archivos	
CalcularError.py	13/03/2024 16:07	Python File	2 KB
Calibracion.ini	12/03/2024 17:32	Opciones de confi...	2 KB
comandos.txt	16/03/2024 10:53	Documento de tex...	1 KB
comandos_variosparametros.txt	13/03/2024 22:13	Documento de tex...	1 KB
config.cfg	12/03/2024 17:32	Archivo CFG	1 KB
espesor_lana_vidrio.png	13/03/2024 22:37	Archivo PNG	89 KB
genopt.jar	12/03/2024 17:32	Archivo JAR	177 KB
IniciarCalibracion.bat	12/03/2024 17:32	Archivo por lotes ...	1 KB
OutputListingAll.txt	19/03/2024 20:33	Documento de tex...	3 KB
OutputListingMain.txt	19/03/2024 20:33	Documento de tex...	2 KB
Plantilla_modelo.idf	13/03/2024 22:20	EnergyPlus Input D...	213 KB
Pontevedra.epw	12/03/2024 17:32	Archivo EPW	1.557 KB
Sensores.txt	13/03/2024 16:07	Documento de tex...	11 KB
simular.bat	12/03/2024 17:41	Archivo por lotes ...	1 KB

Figura 3-51 Ejecución de la calibración mediante “IniciarCalibracion.bat” [Autoría propia]

Tal y como se ha mencionado anteriormente en el Apartado 3.7.2.1, al ejecutar la calibración, el algoritmo de Hooke-Jeeves comienza mediante diferentes patrones la exploración y búsqueda de aquellos valores que mejoran la Función Objetivo en la dirección del vector de búsqueda que se le ha especificado. Dando como resultado una F.O. reducida y un nuevo valor para el parámetro especificado, en este caso el espesor de la lana de vidrio de la cubierta del edificio (véase la Figura 3-52).

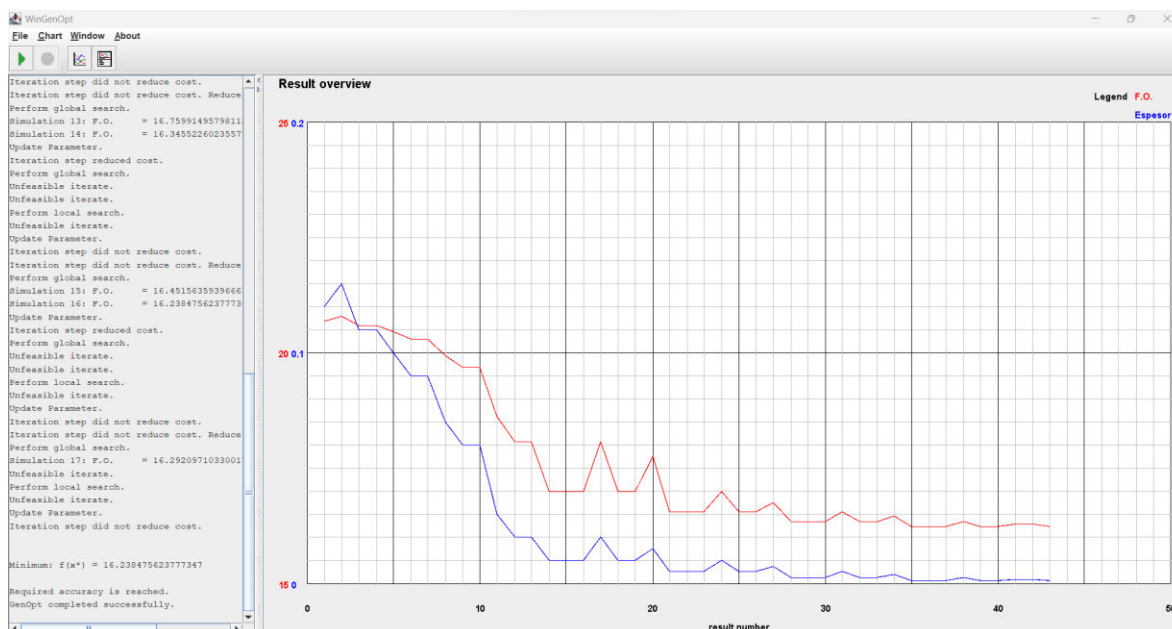


Figura 3-52 Calibración espesor de la lana de vidrio [Autoría propia]

Finalmente, si se accede al archivo “OutputListingMain.txt” se puede observar de forma resumida el resultado de la calibración. Siendo en este caso la calibración del espesor de la lana de vidrio un proceso que ha llevado un total de 16 simulaciones para conseguir el mínimo valor posible para la F.O. y dejando un valor de espesor de lana de vidrio necesario, para que se cumplan las expectativas, de 0.00125 m (véase Figura 3-53).

Simulation	Number	Main Iteration	Step Number	F.O.	Espesor
1	1	1	20.67423751497979	0.12	Initial point.
3	2	1	20.57641616374324	0.11	Global search reduced cost.
5	3	1	20.306122917924363	0.09	Global search reduced cost.
7	4	1	19.690834416214678	0.06	Global search reduced cost.
9	5	1	18.064891413441178	0.02	Global search reduced cost.
10	6	1	16.980613369748667	0.01	Local search reduced cost.
10	7	1	16.980613369748667	0.01	Iteration step did not reduce cost. Reduce step size to '0.5'.
12	8	1	16.55616634824075	0.005	Global search reduced cost.
12	9	1	16.55616634824075	0.005	Iteration step did not reduce cost. Reduce step size to '0.25'.
14	10	1	16.34552260235577	0.0025	Global search reduced cost.
14	11	1	16.34552260235577	0.0025	Iteration step did not reduce cost. Reduce step size to '0.125'.
16	12	1	16.238475623777347	0.00125	Global search reduced cost.
16	13	1	16.238475623777347	0.00125	Iteration step did not reduce cost. Reduce step size to '0.0625'.
16	14	1	16.238475623777347	0.00125	Iteration step did not reduce cost. Maximum number of step reductions reached.
16	14	1	16.238475623777347	0.00125	Minimum point.

Figura 3-53 Resultados de la calibración del espesor de la lana de vidrio [Autoría propia]

4 SIMULACIÓN Y CALIBRACIÓN DEL MODELO

En este apartado se pretende mostrar todos y cada uno de los resultados obtenidos en cada fase del proceso de calibrado del edificio gimnasio-piscina “Guardiamarina Barrutia” de la Escuela Naval Militar. Para ello, se organizan dos apartados donde se reflejarán los resultados obtenidos:

- Monitorización y simulación: dos procesos que van de la mano a la hora de reflejar resultados obtenidos, puesto que en la calibración se trata de minimizar al máximo el error existente entre los datos recogidos por los sensores y los valores producidos a partir de la simulación. En esta fase intervienen dos elementos principales: los sensores y el software OpenStudio®.
- Calibración: puesto que se trata del principal proceso del presente Trabajo de Fin de Grado, en esta sección se muestran los resultados obtenidos según la diferente estrategia de calibración utilizada. Una correcta lectura de estos resultados y la estrecha relación que guarde con el método de calibración que haya sido usada, son las claves para llegar a unas conclusiones correctas y proponer unas líneas futuras precisas.

4.1 Monitorización

A continuación, se muestran los datos de temperatura obtenidos mediante el proceso de monitorización, es decir, aquellos valores recogidos por los sensores emplazados en el edificio. Para ello, se decide exponer una gráfica que incluye los datos de cada zona térmica que ha sido estudiada en el desarrollo del trabajo (véase Figura 4-1):

- Zona térmica 1: es la zona que se corresponde con el pabellón, tal y como se puede observar en la Tabla 3-7, se trata de una zona espaciosa y de dos plantas: “Planta Baja” y “Planta de Graderíos”. El sensor utilizado para la toma de datos en esta zona es el modelo *Wave Plus* de la marca *Airthings*.
- Zona térmica 2: esta zona se corresponde con la sala de musculación o gimnasio existente en el interior del edificio “Guardiamarina Barrutia”. Tal y como se puede observar en la Tabla 3-8, se trata de una sala de tamaño pequeño y rectangular. En esta zona se ha decidido colocar el sensor 1 de la marca *Zecamin*, se trata de una zona con similares condiciones térmicas que su sala contigua (zona térmica 1: pabellón).
- Zona térmica 3: en ella se encuentra el vestuario que ofrece servicios de duchas y aseo a los usuarios del edificio. Se trata de una estancia de pequeño tamaño, en comparación con el resto de salas del edificio. Asimismo, como cabía de esperar, la humedad y condensación en una habitación como esta, destinada a funcionar como un vestuario, hace que los datos de temperatura puedan variar algo más con respecto al resto.

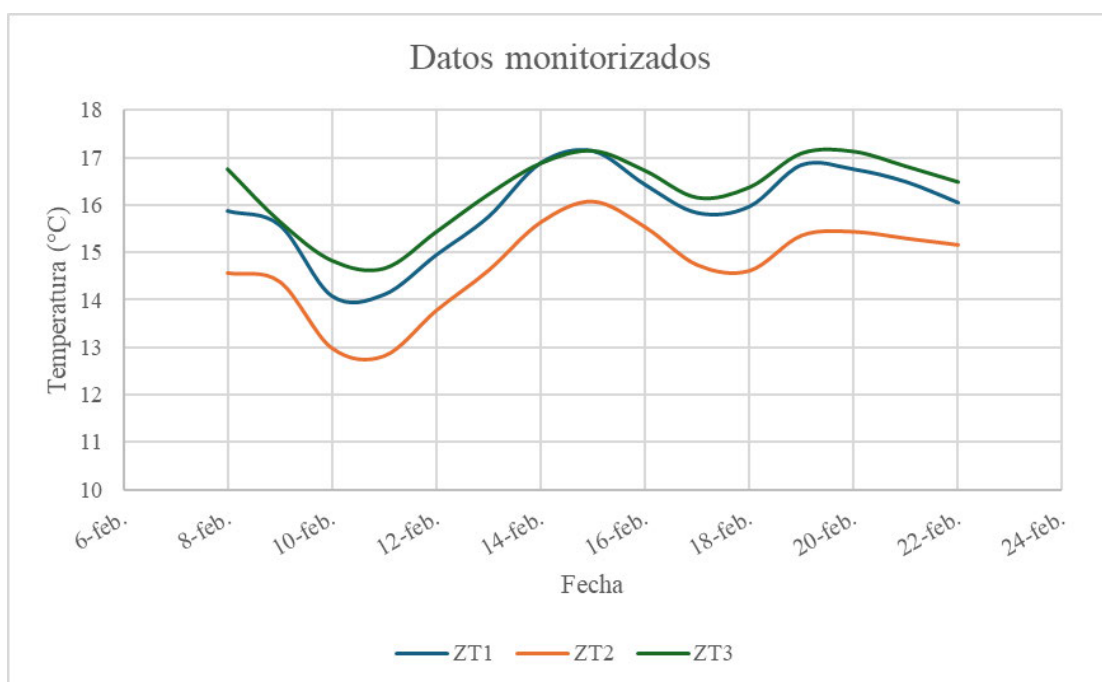


Figura 4-1 Resultados de monitorización en cada zona térmica [Autoría propia]

4.2 Calibración

Con el objetivo de optimizar el modelo del gimnasio-piscina de la ENM se realiza la calibración mediante tres tipos de estrategias:

- Calibración de variables independientes: este tipo de estrategia consiste en llevar a cabo de forma independiente la calibración de ocho parámetros escogidos con el fin de obtener diversos resultados de calibración que puedan aportar información valiosa para otro tipo de procesos como la calibración sucesiva o la calibración conjunta.
- Calibración sucesiva: consiste en efectuar una primera calibración individual, seleccionando como parámetro a optimizar aquel que obtenga mejores resultados de minimización de la función objetivo, para posteriormente incorporar los valores obtenidos de dicha calibración en las calibraciones que se sucedan.
- Calibración conjunta: estrategia que se base en ejecutar una única calibración, pero especificando en la herramienta GenOpt el número de parámetros que ha de calibrar de forma simultánea, para la cual, se llevan a cabo diferentes combinaciones y simulaciones hasta encontrar la mejor solución que cumpla con los requisitos de optimización.

4.2.1 Calibración de una variable independiente

La calibración de una variable es el método más simple a la hora de calibrar con GenOpt. Consiste en modificar una única variable y conseguir minimizar al máximo la Función Objetivo.

Para la calibración de variables independientes del modelo del gimnasio de la ENM se decide escoger ocho variables de diferente naturaleza con el objetivo de obtener una gran variedad de opciones para la mejora del modelo. Por todo ello, se ejecutan ocho calibraciones nombradas de la siguiente forma, siendo las cuatro primeras las que ofrecen los mejores resultados:

- Calibración 1 “Espesor de la lana de vidrio”
- Calibración 2 “Infiltraciones”
- Calibración 3 “Ocupación personal”
- Calibración 4 “Espesor del enlucido de yeso”
- Calibración 5 “Espesor de la chapa de acero”

- Calibración 6 “Espesor del vidrio de las ventanas”
- Calibración 7 “Espesor del hormigón armado”
- Calibración 8 “Conductividad del fibrocemento”

4.2.1.1 Calibración “Espesor de la lana de vidrio”

Tal y como se ha detallado en el Apartado 3.7.3, la calibración del espesor de la lana de vidrio da como resultado después de haber ejecutado 16 simulaciones una F.O. cuyo valor es: 16,2384%. Asimismo, se obtiene un valor final del espesor de la lana de vidrio de 0,0012 m (véase Figura 4-2).

Simulation Number		Main Iteration	Step Number	F.O.	Espesor
1	1	1	20.67423751497979	0.12	Initial point.
3	2	1	20.57641616374324	0.11	Global search reduced cost.
5	3	1	20.306122917924363	0.09	Global search reduced cost.
7	4	1	19.690834416214678	0.06	Global search reduced cost.
9	5	1	18.064891413441178	0.02	Global search reduced cost.
10	6	1	16.980613369748667	0.01	Local search reduced cost.
10	7	1	16.980613369748667	0.01	Iteration step did not reduce cost. Reduce step size to '0.5'.
12	8	1	16.55616634824075	0.005	Global search reduced cost.
12	9	1	16.55616634824075	0.005	Iteration step did not reduce cost. Reduce step size to '0.25'.
14	10	1	16.34552260235577	0.0025	Global search reduced cost.
14	11	1	16.34552260235577	0.0025	Iteration step did not reduce cost. Reduce step size to '0.125'.
16	12	1	16.238475623777347	0.00125	Global search reduced cost.
16	13	1	16.238475623777347	0.00125	Iteration step did not reduce cost. Reduce step size to '0.0625'.
16	14	1	16.238475623777347	0.00125	Iteration step did not reduce cost. Maximum number of step reductions reached.
16	14	1	16.238475623777347	0.00125	Minimum point.

Figura 4-2 Resultados de la calibración del espesor de la lana de vidrio [Autoría propia]

4.2.1.2 Calibración “Infiltraciones”

En este caso se ejecuta la calibración del modelo, fijando como variable independiente el flujo de las infiltraciones del edificio. El proceso de calibración es el mismo que el mencionado anteriormente en el Apartado 3.7.3. Sin embargo, para este y el resto de los parámetros, los valores que se deben fijar son aquellos incluidos en el apartado *Vary*, mientras que los ajustes de optimización y las características del algoritmo de Hooke-Jeeves siguen siendo los mismos. Por tanto, los nuevos datos de entrada son, tal y como se puede observar en la Figura 4-3:

- *Name*: Flujo.
- *Min*: 0 m/s.
- *Ini*: 0,0002 m/s.
- *Max*: 0,1 m/s.
- *Step*: 0,0001.

```
comandos.txt
Archivo  Editar  Ver

Vary{
  Parameter{ // Infiltraciones
    Name    = Flujo;
    Min     = 0;
    Ini     = 0.000226568;
    Max     = 0.1;
    Step    = 0.0001;
  }
}
```

Figura 4-3 Parámetros para la calibración de las infiltraciones [Autoría propia]

En cuanto al archivo “Plantilla_modelo.idf” se modifica siguiendo los mismos pasos que los especificados en el apartado 4.1.1, en este caso se pone la variable independiente %Flujo%. Conviene destacar que, en el caso de las infiltraciones, al haber tres zonas térmicas distintas, el comportamiento del flujo es distinto. Por ello, es necesario introducir el parámetro %Flujo% en cada una de las zonas, tal y como se puede observar en la Figura 4-4.

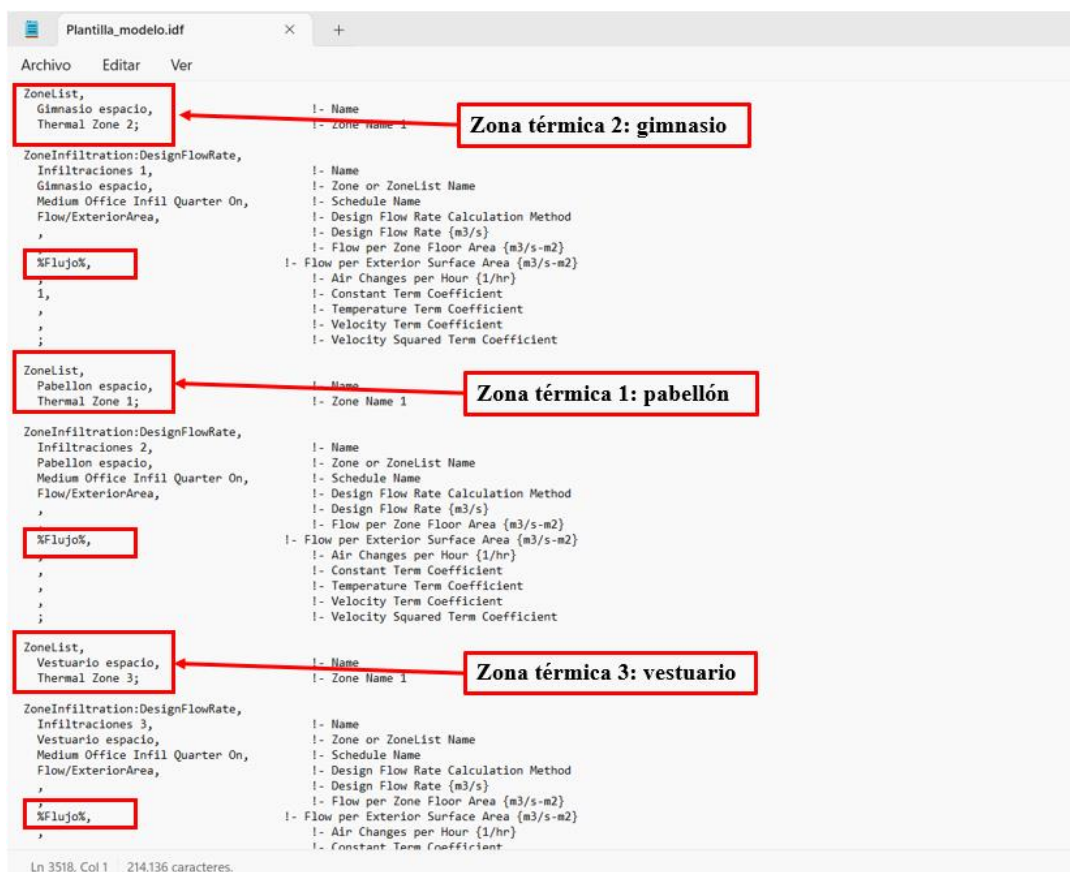


Figura 4-4 Parámetros para la calibración de las infiltraciones [Autoría propia]

Al ejecutar la calibración se puede observar cómo en un proceso de 18 simulaciones se obtiene como resultado una F.O. reducida a un valor de 17,2542%. Asimismo, el valor del flujo de las infiltraciones queda calibrado con un valor final de 0.001 m/s para poder cumplir con las expectativas estipuladas (véase Figura 4-5 y Figura 4-6).

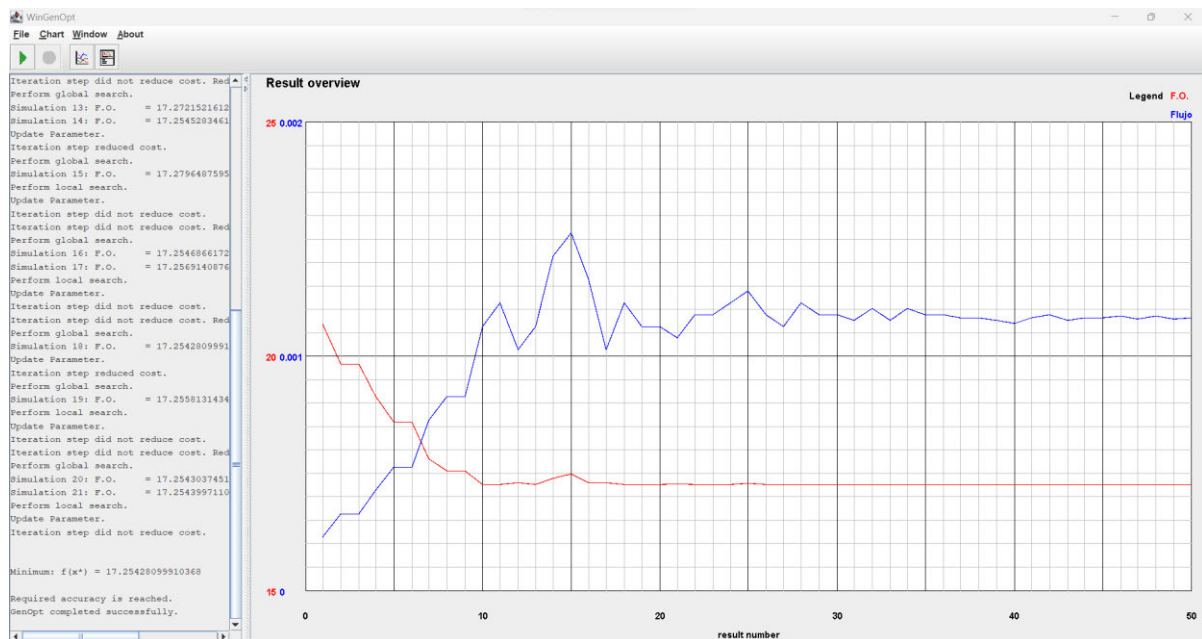


Figura 4-5 Calibración del flujo de las infiltraciones [Autoría propia]

Simulation Number	Main Iteration	Step Number	F.O.	Flujo
1	1	1	20.67423751497979	2.26568E-4
2	2	1	19.83056703026774	3.26568E-4
4	3	1	18.58039103099335	5.26568E-4
6	4	1	17.562035956789913	8.26568E-4
7	5	1	17.257577391049526	0.001126568
7	6	1	17.257577391049526	0.001126568
to '0.5'.				
14	7	1	17.25452834614258	0.001176568
14	8	1	17.25452834614258	0.001176568
to '0.25'.				
14	9	1	17.25452834614258	0.001176568
to '0.125'.				
18	10	1	17.25428099910368	0.001164068
18	11	1	17.25428099910368	0.001164068
to '0.0625'.				
18	12	1	17.25428099910368	0.001164068
step reductions reached.				
18	12	1	17.25428099910368	0.001164068
Minimum point.				

Figura 4-6 Resultados de la calibración del flujo de las infiltraciones [Autoría propia]

4.2.1.3 Calibración “Ocupación personal”

Para la calibración de la Ocupación personal, se fija como variable independiente la “Actividad” relativa a la actividad fraccional del personal usuario del edificio. Asimismo, se establecen los siguientes datos de entrada para la calibración:

- Name: Actividad.
- Min: 0.
- Ini: 1.
- Max: 1.
- Step: 0,1.

Conviene destacar que se establece como valor mínimo una actividad de 0. Siendo esta una situación poco habitual en el uso del edificio, pero que sí puede llegar a darse en periodos de inactividad como periodos de permisos vacacionales o cierre del gimnasio por reformas (véase Figura 4-7).

```
Vary{

    Parameter{    // Actividad fraccional
        Name      = Actividad;
        Min       = 0;
        Ini       = 1;
        Max       = 1;
        Step      = 0.1;
    }
}
```

Figura 4-7 Parámetros para la calibración de la actividad fraccional [Autoría propia]

Seguidamente, se introduce en el archivo “Plantilla_modelo.idf”, la variable independiente que se tiene en cuenta para optimizar la F.O. En este caso, se nombra como %Actividad%, tal y como se puede observar en la Figura 4-8.

```
Schedule:Day:Interval,
    Schedule Day 13,
    Fractional,
    No,
    24:00,
    %Actividad%;
```

!- Name
!- Schedule Type Limits Name
!- Interpolate to Timestep
!- Time 1 {hh:mm}
!- Value Until Time 1

Figura 4-8 Parámetros para la calibración de la actividad fraccional [Autoría propia]

Finalmente, se obtienen unos resultados fruto de la calibración que dejan una F.O. mínima de 19,5042% tras haber realizado 8 simulaciones. Como se había comentado antes, se alcanza el valor mínimo, que en este caso está fijado en 0, tal y como se puede observar en la Figura 4-9 y la Figura 4-10.

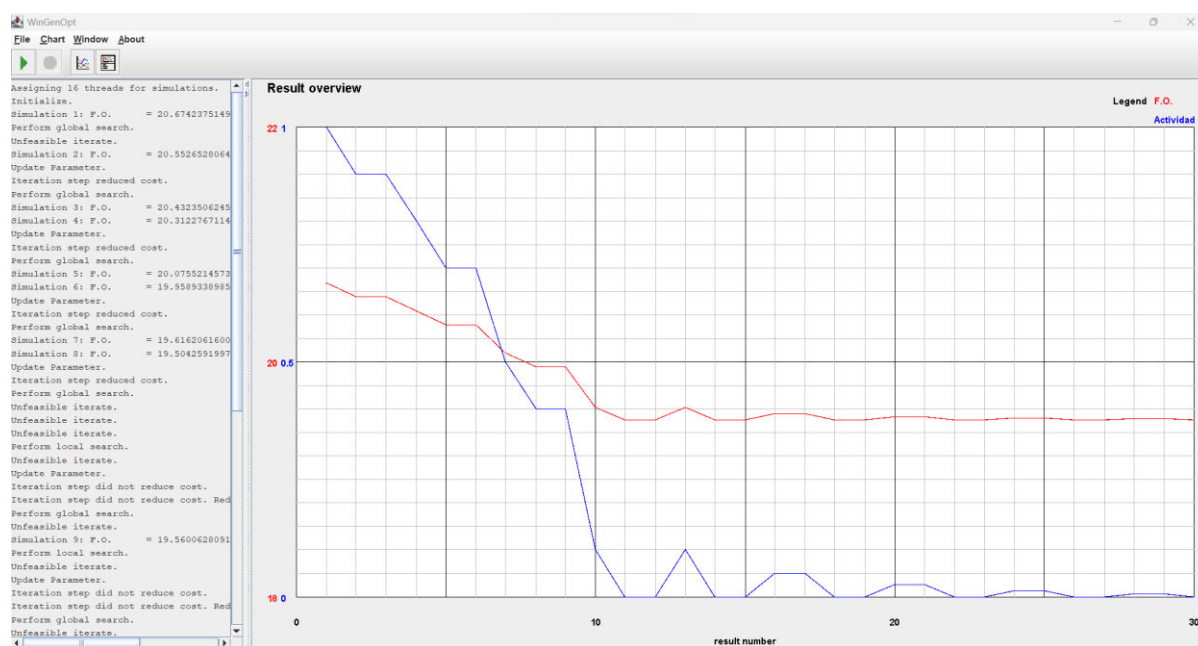


Figura 4-9 Calibración de la actividad [Autoría propia]

Simulation Number	Main Iteration	Step Number	F.O.	Actividad
1	1	1	20.67423751497979	1.0
2	2	1	20.552652806485042	0.9
4	3	1	20.312276711475114	0.7
6	4	1	19.958933898584224	0.4
8	5	1	19.504259199792457	0.0
8	6	1	19.504259199792457	0.0
Reduce step size to '0.5'.				Actividad
8	7	1	19.504259199792457	0.0
Reduce step size to '0.25'.				Iteration step did not reduce cost.
8	8	1	19.504259199792457	0.0
Reduce step size to '0.125'.				Iteration step did not reduce cost.
8	9	1	19.504259199792457	0.0
Reduce step size to '0.0625'.				Iteration step did not reduce cost.
8	10	1	19.504259199792457	0.0
Maximum number of step reduction reached.				Iteration step did not reduce cost.
8	10	1	19.504259199792457	0.0
				Minimum point.

Figura 4-10 Resultados de la calibración de la actividad [Autoría propia]

4.2.1.4 Calibración “Espesor del enlucido de yeso”

Para llevar a cabo la calibración del espesor del enlucido de yeso se siguen los mismos pasos que ya se han establecido previamente en el Apartado 3.7.3. Por ello, los resultados que se obtienen son los reflejados en las siguientes figuras: Figura 4-11, Figura 4-12, Figura 4-13 y Figura 4-14. Con una F.O. de valor final 20,3875% y un espesor del enlucido de yeso de valor 0,0025 m.

```
Vary{
    Parameter{ // Espesor enlucido yeso muros interiores
        Name    = Espesor;
        Min     = 0;
        Ini     = 0.015;
        Max     = 0.1;
        Step    = 0.1;
    }
}
```

Figura 4-11 Parámetros para la calibración del espesor del enlucido de yeso [Autoría propia]

```
Material,
    ENLUCIDO DE YESO (muros int),
    Smooth,
    %Espesor%,
    0.43,
    1100,
    1000,
    0.9,
    0.7,
    0.7;
    !- Name
    !- Roughness
    !- Thickness {m}
    !- Conductivity {W/m-K}
    !- Density {kg/m3}
    !- Specific Heat {J/kg-K}
    !- Thermal Absorptance
    !- Solar Absorptance
    !- Visible Absorptance
```

Figura 4-12 Parámetros para la calibración del espesor del enlucido de yeso [Autoría propia]

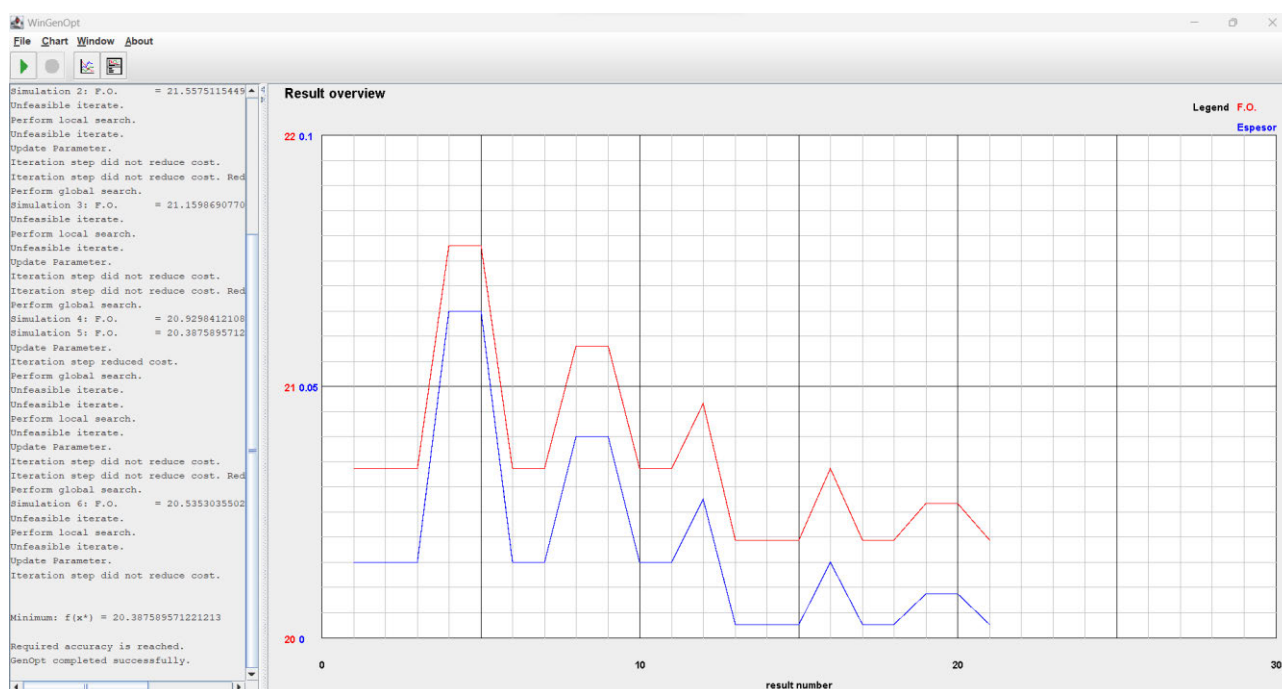


Figura 4-13 Calibración del enlucido de yeso [Autoría propia]

Simulation Number	Main Iteration	Step Number	F.O.	Espesor
1	1	1	20.67423751497979	0.015
1	2	1	20.67423751497979	0.015
Reduce step size to '0.5'.				
1	3	1	20.67423751497979	0.015
Reduce step size to '0.25'.				
1	4	1	20.67423751497979	0.015
Reduce step size to '0.125'.				
5	5	1	20.387589571221213	0.0025
5	6	1	20.387589571221213	0.0025
Reduce step size to '0.0625'.				
5	7	1	20.387589571221213	0.0025
Maximum number of step reductions reached.				
5	7	1	20.387589571221213	0.0025

Figura 4-14 Resultados de la calibración del enlucido de yeso [Autoría propia]

4.2.1.5 Otras calibraciones

Tal y como se ha mencionado en el Apartado 4.2.1, se realizan ocho calibraciones en total sobre el modelo del edificio. Cada una de ellas atendiendo de forma individual a una variable independiente distinta y buscando minimizar al máximo la F.O. con el objetivo de obtener un modelo calibrado y de mejores prestaciones. Los pasos a seguir son los mismos que se han detallado en los anteriores apartados y por tanto, tal y como se puede observar en la Tabla 4-1, los resultados obtenidos son los siguientes:

Calibraciones	F.O. Inicial	F.O. Final	Parámetro Valor Inicial	Parámetro Valor Final
Calibración 1 “Espesor de la lana de vidrio”	20,6742 %	16,2384 %	0.12 m	0.0012 m
Calibración 2 “Infiltraciones”	20,6742 %	17,2542 %	0,0002 m/s	0.0011m/s

Calibración 3 “Ocupación personal”	20,6742 %	19,5042 %	1.0	0.0
Calibración 4 “Espesor del enlucido de yeso”	20,6742 %	20,3875 %	0.015 m	0.0025 m
Calibración 5 “Espesor de la chapa de acero”	20,6742 %	20,6526 %	0.001 m	0.0172 m
Calibración 6 “Espesor del vidrio de las ventanas”	20,6742 %	20,6579 %	0.003 m	0,0005 m
Calibración 7 “Espesor del hormigón armado”	20,6742 %	20,6736 %	1.25 m	1.2502 m
Calibración 8 “Conductividad del fibrocemento”	20,6742 %	20,6738 %	0.3 W/m K	0.3107 W/m K

Tabla 4-1 Resultados totales de las calibraciones individuales [Autoría propia]

4.2.2 Calibración sucesiva

Tal y como se ha observado en el Apartado 4.2.1, la calibración individual ofrece un valor final para la variable independiente que permite minimizar la F.O., consiguiendo de esta forma un modelo calibrado que permite mejorar las prestaciones térmicas del edificio. Para llevar a cabo una calibración sucesiva, los pasos a seguir serán similares. En primer lugar, se llevará a cabo una calibración individual con el primer parámetro, cuyos resultados serán incluidos en los datos de partida de la segunda calibración que se llevará a cabo. De esta forma, se comienza con un ciclo sucesivo de calibraciones que parte de una versión mejorada del modelo en cada calibración. Mediante la calibración sucesiva se consigue reducir notablemente la F.O., puesto que a cada calibración le corresponde un modelo más eficiente.

En el caso del modelo del gimnasio-piscina “Guardiamarina Barrutia”, se llevan a cabo la primera calibración sobre el espesor de la lana de vidrio, puesto que fue la calibración que mejores resultados dio individualmente. Una vez ejecutada, tal y como se puede ver en el Apartado 4.2.1.1, se incluye el valor final del parámetro objeto de estudio calculado por GenOpt en las siguientes calibraciones.

En este caso, se obtiene un espesor final de 0,0012 m. Seguidamente, se introduce ese valor del espesor en el archivo “Plantilla_modelo.idf” correspondiente a la segunda calibración: infiltraciones (véase Figura 4-15) y se procede a ejecutar la segunda calibración.

Material,	
LANA DE VIDRIO DESNUDO (cubierta),	!- Name
Smooth,	!- Roughness
0.00125,	!- Thickness {m}
0.042,	!- Conductivity {W/m-K}
140,	!- Density {kg/m3}
840,	!- Specific Heat {J/kg-K}
0.9,	!- Thermal Absorptance
0.7,	!- Solar Absorptance
0.7;	!- Visible Absorptance

Figura 4-15 Introducción de los resultados de la Calibración 1 en la Calibración 2 [Autoría propia]

La segunda calibración se aplica sobre el flujo de las infiltraciones del edificio, dado que, de nuevo, se trataba de la calibración que proporcionaba los segundos mejores resultados individualmente. Al haber tenido en cuenta los resultados de la primera calibración, se parte de un modelo óptimo y se obtienen nuevos resultados que reducen considerablemente la F.O. y se obtendrá, en este caso, un nuevo valor para el flujo: 0,0004 m/s.

Seguidamente, se sigue el procedimiento incluyendo el valor final del flujo en el archivo “Plantilla_modelo.idf” correspondiente a la tercera calibración, que se aplica sobre la actividad fraccional de la ocupación personal del edificio. De nuevo, se vuelven a obtener resultados tanto de la F.O. como de, en este caso, el parámetro “Actividad”. Finalmente, se ejecuta una última calibración, esta vez sobre el espesor del enlucido de yeso perteneciente a los muros interiores, para dar como resultado definitivo una F.O. de valor final 15,3362%, tal y como se puede observar en la Figura 4-16.

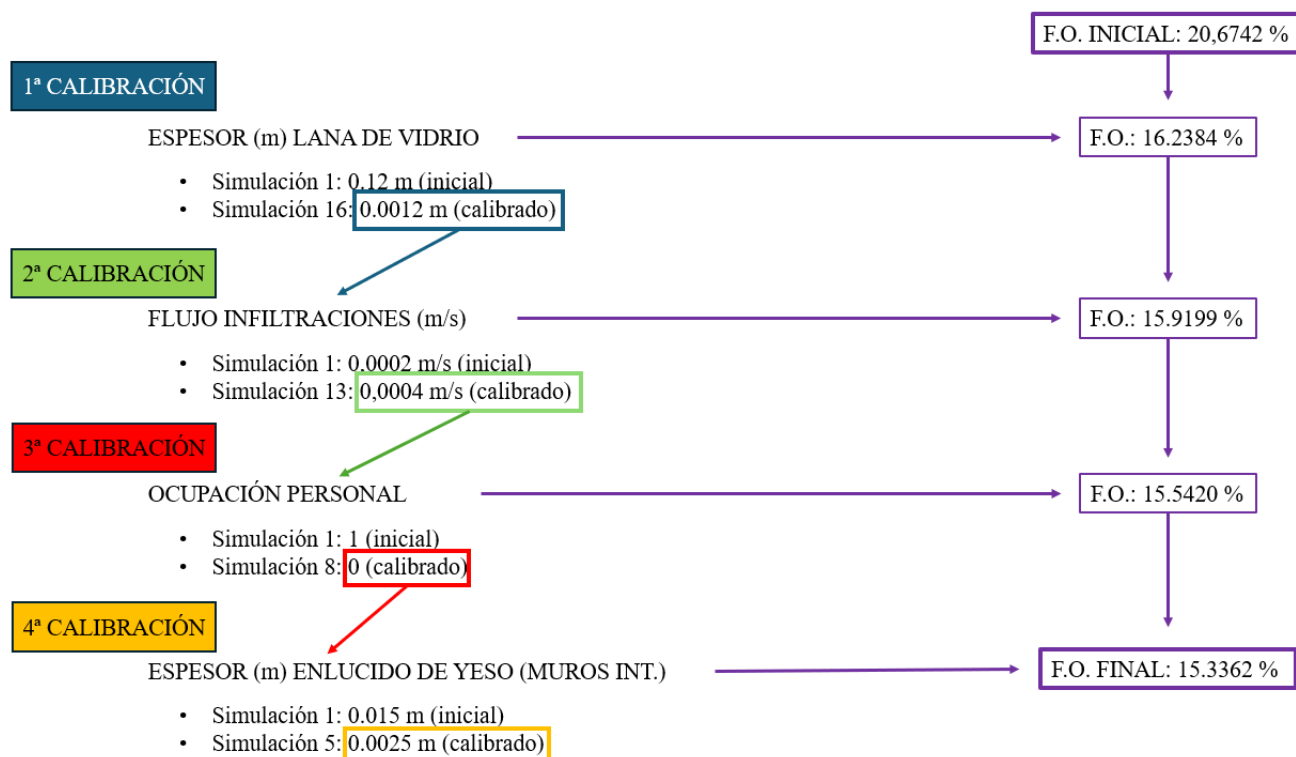


Figura 4-16 Resultados de la calibración sucesiva [Autoría propia]

Se puede concluir que la calibración sucesiva ofrece unas mejores prestaciones que las calibraciones individuales, permitiendo incluir las mejoras que surgen de la optimización del modelo y el comportamiento de dicho modelo al aplicar posibles combinaciones de mejoras.

4.2.3 Calibración conjunta

La calibración conjunta es un tipo de calibración que se ejecuta a partir de un número determinado de variables independientes. Para el modelo del gimnasio-piscina se tienen en cuenta cuatro variables independientes, que resultaron ser las que mejores comportamientos tuvieron en la calibración individual. Los parámetros escogidos son: espesor de la lana de vidrio, flujo de las infiltraciones, actividad fraccional de la ocupación personal y espesor del enlucido de yeso. Por ello, es necesario incluir todos los parámetros en el archivo “comandos.txt” (véase Figura 4-17) y de esta forma el programa identifica las variables de salida que tienen influencia sobre la función objetivo. Para llevar a cabo esta calibración, GenOpt tiene en cuenta los cuatro parámetros seleccionados de forma simultánea y mediante el algoritmo de Hooke-Jeeves se llevan a cabo las simulaciones necesarias buscando la mejor combinación de estos para minimizar la F.O. y optimizar al máximo posible el modelo.

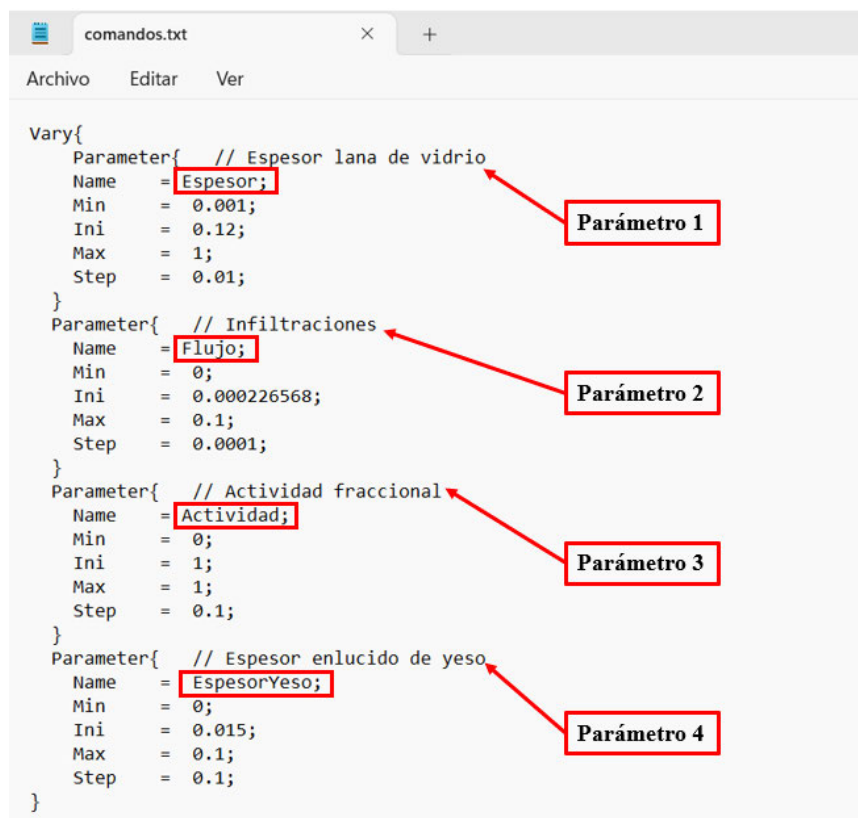


Figura 4-17 Parámetros para la calibración conjunta [Autoría propia]

Seguidamente se lleva a cabo la introducción de los cuatro parámetros que son estudiados en el archivo “Plantilla_modelo.idf” de la misma forma que se ha establecido en el Apartado 3.7.3, con la salvedad de que esta vez se deben incluir cuatro variables. Finalmente, tras la ejecución de la calibración, tal y como se puede observar en la Figura 4-18, GenOpt lleva a cabo 71 simulaciones y se obtiene una reducción de la función objetivo hasta un valor de 15,2496% y unos valores finales recomendados para cada uno de los parámetros que serán (véase Figura 4-19):

- Espesor de la lana de vidrio: 0,0012 m.
- Flujo de las infiltraciones: 0,0003 m/s.
- Actividad de la ocupación personal: 0.
- Espesor del enlucido de yeso: 0,0025 m.

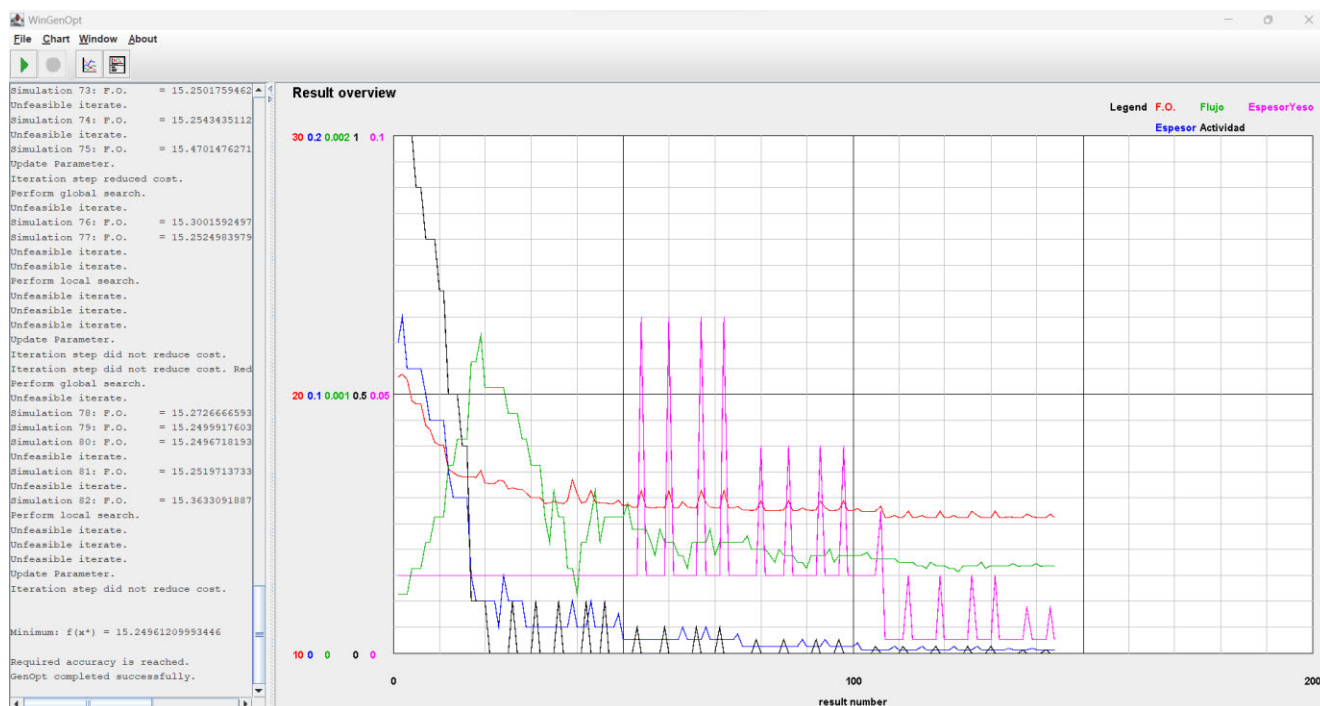


Figura 4-18 Calibración conjunta [Autoría propia]

Simulation Number	Main Iteration	Step Number	F.O.	Espesor	Flujo	Actividad	EspesorYeso
1	1	1	20.67423751497979	0.12	2.26568E-4	1.0	0.015
5	2	1	19.628804960610525	0.11	3.26568E-4	0.9	0.015
9	3	1	18.04824806823776	0.09	5.26568E-4	0.7	0.015
13	4	1	16.818313720676514	0.06	8.26568E-4	0.4	0.015
18	5	1	16.5558779062098	0.02	0.001026568	0.0	0.015
21	6	1	16.351036019264352	0.02	9.26568E-4	0.0	0.015
25	7	1	15.992448113308017	0.01	7.26568E-4	0.0	0.015
27	8	1	15.7830428371774	0.01	5.26568E-4	0.0	0.015
27	9	1	15.7830428371774	0.01	5.26568E-4	0.0	0.015
39	10	1	15.624778393257824	0.005	4.76568E-4	0.0	0.015
42	11	1	15.605058510785085	0.005	4.26568E-4	0.0	0.015
42	12	1	15.605058510785085	0.005	4.26568E-4	0.0	0.015
51	13	1	15.521127786209817	0.0025	4.01568E-4	0.0	0.015
54	14	1	15.516304199523063	0.0025	3.76568E-4	0.0	0.015
54	15	1	15.516304199523063	0.0025	3.76568E-4	0.0	0.015
66	16	1	15.253455137266778	0.00125	3.64068E-4	0.0	0.0025
68	17	1	15.25076709191433	0.00125	3.51568E-4	0.0	0.0025
71	18	1	15.24961209993446	0.00125	3.39068E-4	0.0	0.0025
71	19	1	15.24961209993446	0.00125	3.39068E-4	0.0	0.0025
71	20	1	15.24961209993446	0.00125	3.39068E-4	0.0	0.0025
71	20	1	15.24961209993446	0.00125	3.39068E-4	0.0	0.0025

Figura 4-19 Resultados de la calibración conjunta [Autoría propia]

4.2.3.1 Resultados

Tal y como se ha demostrado en el Apartado 4.2.3, la calibración conjunta proporciona unos valores finales óptimos que permiten minimizar el error y, consecuentemente, optimizar el modelo desarrollado. Asimismo, en comparación con las otras dos estrategias utilizadas, calibración individual o calibración sucesiva, se obtienen mejores resultados. Por todo ello, en función de cada zona, se decide comparar mediante una gráfica los valores finales obtenidos de la calibración con los valores iniciales y con las temperaturas obtenidas del proceso de simulación. Esta breve comparación permite ver de forma gráfica la influencia que tiene la calibración en la simulación, y su aproximación a los valores reales obtenidos.

4.2.3.1.1 Zona térmica 1

Esta zona, tal y como se indicó previamente en el Apartado 4.1, representa el pabellón del gimnasio, y, por tanto, se trata de una zona de amplias dimensiones. En la Figura 4-20, se puede observar cómo la influencia de la calibración permite asemejar los resultados obtenidos en el proceso de simulación a los valores de las temperaturas obtenidas durante la monitorización.

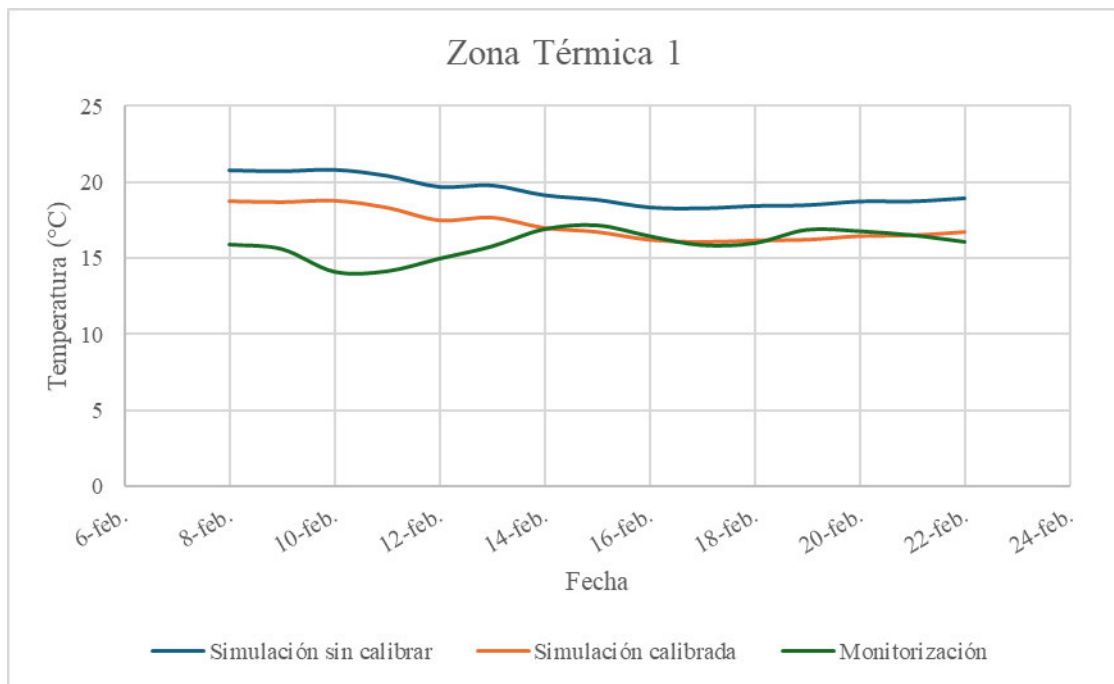


Figura 4-20 Resultados de la calibración conjunta sobre la Zona Térmica 1 [Autoría propia]

4.2.3.1.2 Zona térmica 2

La zona térmica 2 se corresponde con el gimnasio (véase Apartado 4.1), se trata de una zona de pequeñas dimensiones y donde tiene influencia la presencia de un ventanal de dimensiones alargadas, que ocupa gran parte de la fachada lateral de la cara Este del edificio. A pesar de ello, tal y como muestra la Figura 4-21, se puede observar como la calibración influye positivamente en la optimización del modelo al comparar los resultados de la simulación sin calibrar y la simulación calibrada.

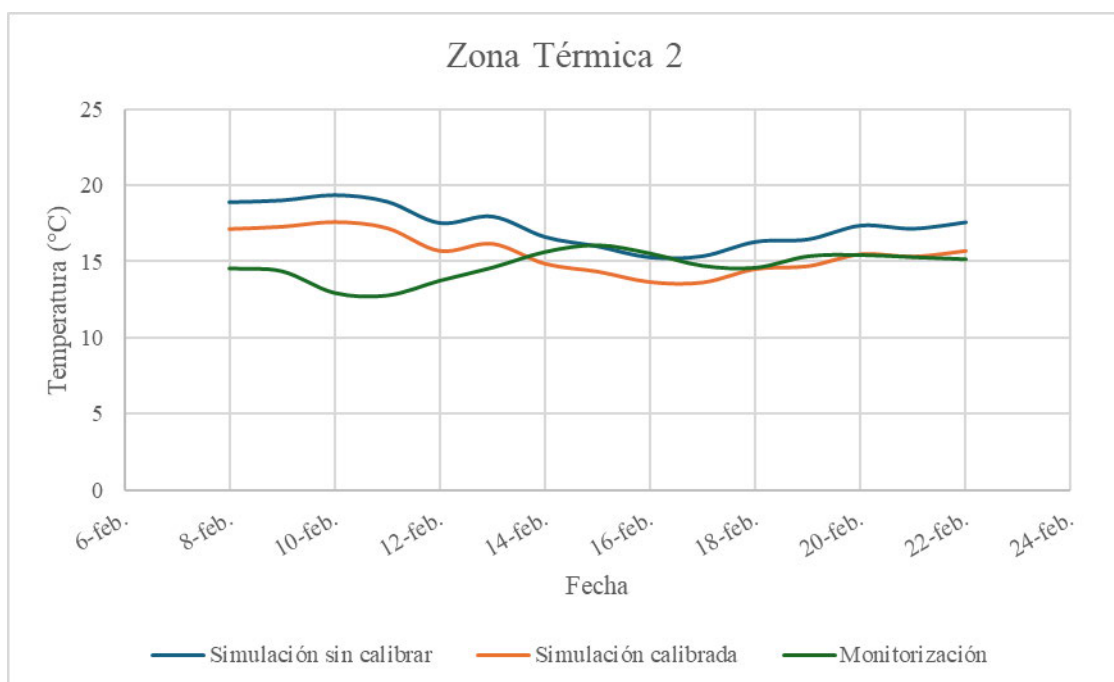


Figura 4-21 Resultados de la calibración conjunta sobre la Zona Térmica 2 [Autoría propia]

4.2.3.1.3 Zona térmica 3

El vestuario del gimnasio-piscina de la ENM se corresponde con la zona térmica 3 del modelo y se caracteriza por ser una zona de pequeñas dimensiones y presentar un alto porcentaje de humedad a lo

largo del día, especialmente en las horas de mayor uso por parte del personal de ENM, por ser una zona de aseo con servicio de duchas. Por ello, se puede ver como a pesar de la calibración (véase Figura 4-22), todavía se pueden conseguir mejores resultados de minimización del error y optimización del modelo para asemejarlo todavía más a la situación real del edificio.

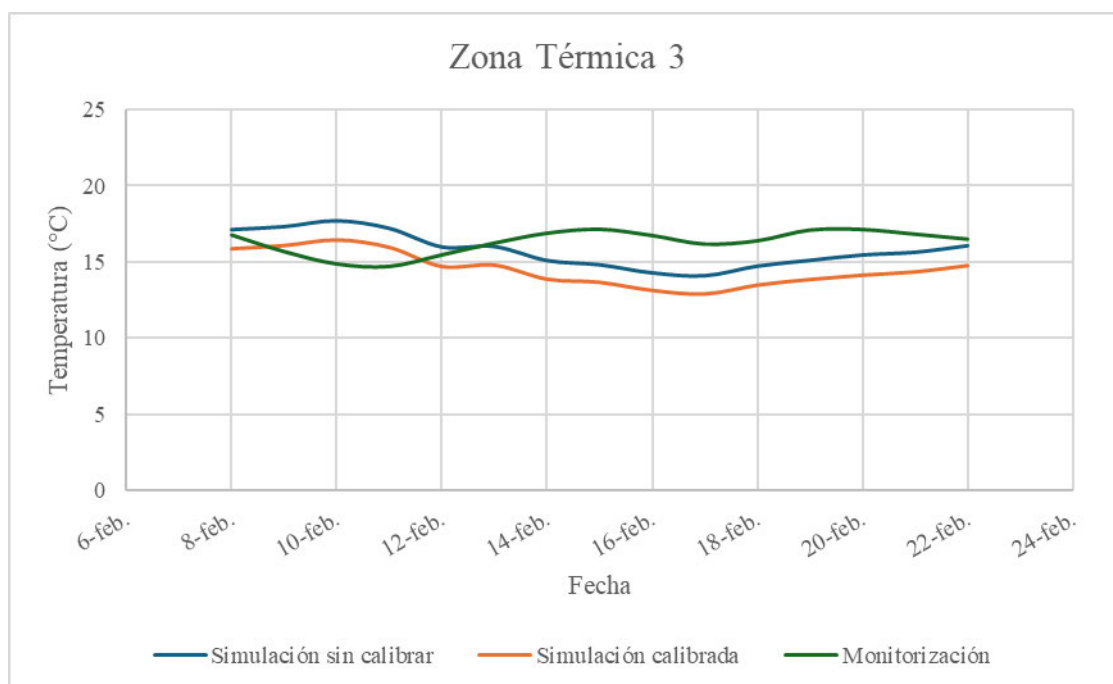


Figura 4-22 Resultados de la calibración conjunta sobre la Zona Térmica 3 [Autoría propia]

5 CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

5.1 Conclusiones

El objetivo del presente Trabajo de Fin de Grado reside en la búsqueda de diversas soluciones de rehabilitación aplicables a un edificio, para así poder determinar cuál o cuáles son las opciones cuya aplicación permita lograr reducir el consumo energético del edificio en cuestión.

Para poder llevar a cabo este estudio, se desarrolla un proceso de calibración, el cual, a la vista de los resultados obtenidos, resulta imprescindible en el ámbito de las simulaciones, puesto que permite trabajar con la mínima cantidad de errores posibles para llegar a conclusiones consistentes. Esta minimización de errores se aplica tanto al proceso de modelado como el proceso de simulación, de tal forma que, permite desarrollar una metodología de trabajo sencilla que consta de dos etapas: modelado del edificio mediante un software de diseño gráfico, como puede ser SketchUp, y simulación térmica del modelo mediante un motor de cálculo, como pueden ser OpenStudio® o EnergyPlus™. Finalmente, se procede a la calibración mediante el uso de un software de optimización de funciones de coste, como GenOpt.

La metodología de trabajo se fundamenta en un proceso iterativo en el que GenOpt desarrolla múltiples versiones del modelo, mediante la variación del valor de la variable independiente escogida en cada caso, mientras que OpenStudio® realiza las simulaciones con los valores dados. Es decir, se lleva a cabo un proceso cíclico, que tiene su finalización cuando se alcanza el mínimo valor posible para la Función Objetivo (F.O.) que es fijada en cada una de las iteraciones.

En el proceso de calibración, la función objetivo resulta un aspecto de gran relevancia, puesto que se corresponde con el error cometido en las previsiones del valor del parámetro que se desea estudiar, con respecto a los datos medidos directamente mediante los sensores colocados en el edificio. Por todo ello, se puede llegar a la conclusión de la necesidad de elaborar un trabajo que pueda aportar información sobre un asunto de especial relevancia a la hora de calibrar, como es el del número o cantidad de datos reales tomados. Mediante el desarrollo de este trabajo, se plantea la cuestión sobre si incrementando el número de mediciones y pasando desde un carácter diario o mensual hasta uno anual, donde claramente influyen las diferentes épocas del año (invernal o estival), se pueda llegar a conseguir mejores opciones de optimización, y de esta forma la herramienta GenOpt pueda ejecutar una calibración precisa y desarrollar un estudio adecuado.

También se ha podido demostrar que, dependiendo de la complejidad del modelo, el software trabajará con una mayor o menor eficiencia, pero aportando resultados de gran interés. Como se ha podido observar, los parámetros que se pueden estudiar son de diversa índole (espesor de la lana de vidrio, actividad de la ocupación fraccional, flujo de las infiltraciones, etc.), incluso llegando a ser posible un estudio simultáneo de cuatro parámetros juntos, dando como resultado una sistemática de trabajo de

calibración válida y con aportación de resultados de gran interés, que abren una gran ventana de posibilidades y combinación de parámetros para buscar la mejor solución posible para el consumo térmico del edificio.

La realidad actual a la que nos enfrentamos es compleja, puesto que a pesar de los nuevos avances en tecnología que han marcado el siglo XXI, es innegable que nos encontramos inmersos en una crisis energética que está provocando la necesidad de impulsar nuevas técnicas, tecnologías, estrategias y procedimientos que permitan satisfacer nuestras necesidades con los recursos disponibles y que se adapten a los objetivos establecidos para un desarrollo sostenible. Todos estos factores junto con la escasez de recursos energéticos hacen de la eficiencia energética un elemento esencial que se ha de buscar e impulsar. Por todo ello, y lo que se ha expuesto anteriormente, la principal conclusión que se puede obtener del presente Trabajo de Fin de Grado reside en la necesidad de desarrollar los proyectos necesarios para disponer de modelos calibrados, puesto que, los resultados que se obtienen de dichos trabajos pueden resultar determinantes en la rehabilitación de edificios, permitiendo realizar previsiones del comportamiento térmico del edificio estudiado después de haber aplicado diversas soluciones.

5.2 Líneas futuras

Una vez concluido el trabajo de calibración del modelo del edificio gimnasio-piscina de la ENM, se proponen las siguientes líneas futuras que permiten continuar el desarrollo del presente trabajo o implementar propuestas de mejoras:

- Cálculo de la demanda térmica del edificio en caso de necesidad de calefacción y/o climatización.
- Diseño de soluciones de rehabilitación y análisis del impacto de las medidas en el comportamiento térmico del edificio.
- Aplicación del procedimiento de calibración utilizado a otros edificios de la Escuela Naval Militar, como el cuartel Almirante Francisco Moreno o el cuartel recientemente rehabilitado Méndez Núñez.
- Trabajo de investigación sobre la influencia de la cantidad de datos en el proceso de calibración. Dado que se conoce que el incremento del error es directamente proporcional a un aumento en el número de datos obtenidos, se pone de manifiesto la necesidad de analizar la relación existente y deducir hasta qué punto conviene aumentar o reducir la muestra de datos sin alterar los resultados.
- Uso de GenOpt para identificar valores óptimos para las soluciones de rehabilitación para alcanzar un determinado objetivo.

Pese a que este trabajo está centrado en un edificio muy específico como es un gimnasio, resulta interesante la realización de estudios de índole similar en otros edificios existentes tanto en la Escuela Naval Militar, como en otras dependencias de la Armada.

6 BIBLIOGRAFÍA

- [1] «La Convención Marco de Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC)», Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. Accedido: 6 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.miteco.gob.es/es/cambio-climatico/temas/el-proceso-internacional-de-lucha-contra-el-cambio-climatico/naciones-unidas.html>
- [2] Ministerio de la Presidencia, *Real Decreto 1370/2006, de 24 de noviembre, por el que se aprueba el Plan Nacional de Asignación de derechos de emisión de gases de efecto invernadero, 2008-2012*, vol. BOE-A-2006-20530. 2006, pp. 41320-41440. Accedido: 6 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.boe.es/eli/es/rd/2006/11/24/1370>
- [3] «Política Medioambiental - Medio Ambiente». Accedido: 6 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.defensa.gob.es/medioambiente/sistemasgestion/legislacion/>
- [4] «In focus: Energy efficiency in buildings - Comisión Europea». Accedido: 10 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: https://commission.europa.eu/news/focus-energy-efficiency-buildings-2020-02-17_es
- [5] R. M. HVAC&R, «Modelado energético, herramienta que impulsa la sustentabilidad - Mundo HVAC&R». Accedido: 6 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.mundohvacr.com/2020/06/modelado-energetico-herramienta-que-impulsa-la-sustentabilidad/>, <https://www.mundohvacr.com/2020/06/modelado-energetico-herramienta-que-impulsa-la-sustentabilidad/>
- [6] «Crisis Energética Mundial – Topics - IEA». Accedido: 6 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.iea.org/topics/global-energy-crisis?language=es>
- [7] BBVA, «¿Qué es la eficiencia energética y cómo se calcula?», BBVA NOTICIAS. Accedido: 6 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.bbva.com/es/sostenibilidad/que-es-la-eficiencia-energetica-y-como-se-calcula/>
- [8] «El Tratado de Lisboa | Fichas temáticas sobre la Unión Europea | Parlamento Europeo». Accedido: 6 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.europarl.europa.eu/factsheets/es/sheet/5/el-tratado-de-lisboa>
- [9] «Directiva 2012/27/UE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 25 de octubre de 2012, relativa a la eficiencia energética, por la que se modifican las Directivas 2009/125/CE y 2010/30/UE, y por la que se derogan las Directivas 2004/8/CE y 2006/32/CE Texto pertinente a efectos del EEE».
- [10] «Eficiencia energética en Pamplona (Navarra)». Accedido: 6 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://eliceingenieria.com/eficiencia-energetica/>
- [11] «BOE.es - DOUE-L-2023-81299 Directiva (UE) 2023/1791 del Parlamento Europeo y del Consejo de 13 de septiembre de 2023 relativa a la eficiencia energética y por la que se modifica el

- Reglamento (UE) 2023/955 (versión refundida).» Accedido: 10 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=DOUE-L-2023-81299>
- [12] «La eficiencia energética | Fichas temáticas sobre la Unión Europea | Parlamento Europeo». Accedido: 23 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.europarl.europa.eu/factsheets/es/sheet/69/la-eficiencia-energetica>
- [13] I. CORPORATIVA, «Eficiencia energética: qué es y cómo funciona», Iberdrola. Accedido: 23 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.iberdrola.com/sostenibilidad/medio-ambiente/eficiencia-energetica>
- [14] P. por D. T. A. ARQUITECTOS, «Certificación Energética de Edificios Existentes: ¿En qué consiste?» Accedido: 6 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://blog.deltoroantunez.com/2012/11/certificacion-energetica-de-edificios.html>
- [15] COMUNICACIÓN DE LA COMISIÓN AL PARLAMENTO EUROPEO, AL CONSEJO EUROPEO, AL CONSEJO, AL COMITÉ ECONÓMICO Y SOCIAL EUROPEO Y AL COMITÉ EUROPEO DE LAS REGIONES *Plan REPowerEU*. 2022. Accedido: 23 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/?uri=COM%3A2022%3A230%3AFIN>
- [16] R.- ASALE y RAE, «edificación | Diccionario de la lengua española», «Diccionario de la lengua española» - Edición del Tricentenario. Accedido: 6 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://dle.rae.es/edificación>
- [17] «Qué es una edificación, requisitos básicos», Ferrovial. Accedido: 30 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.ferrovial.com/es/recursos/edificacion/>
- [18] R. MAPFRE, «Edificaciones sostenibles: diseños que reducen hasta en un 90 % la factura de energía», MAPFRE. Accedido: 30 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.mapfre.com/actualidad/sostenibilidad/edificaciones-sostenibles-disenos-que-reducen-factura-de-energia/>
- [19] BBVA, «¿Qué es el Green Building Council? El movimiento global por la edificación sostenible», BBVA NOTICIAS. Accedido: 5 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.bbva.com/es/sostenibilidad/que-es-el-green-building-council-el-movimiento-global-por-la-edificacion-sostenible/>
- [20] «Presentación». Accedido: 5 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.codigotecnico.org/QueEsCTE/Presentacion.html>
- [21] «DBHE.pdf». Accedido: 6 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.codigotecnico.org/pdf/Documentos/HE/DBHE.pdf>
- [22] V. S. K. V. Harish y A. Kumar, «A review on modeling and simulation of building energy systems», *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 56, pp. 1272-1292, abr. 2016, doi: 10.1016/j.rser.2015.12.040.
- [23] «¿Qué es SketchUp y cómo empezar a usarlo? | Blog», Domestika. Accedido: 6 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.domestika.org/es/blog/5619-que-es-sketchup-y-como-empezar-a-usarlo>
- [24] «SketchUp Pro - Íscar Software de Arquitectura». Accedido: 6 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://iscarnet.com/sketchup/>
- [25] «make sketchup 3d model architecture in high quality - Online Store». Accedido: 6 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: https://isralovevs.live/product_details/33042047.html
- [26] ECV, «EnergyPlus & Simulación Energética Edificios - Econova Institute», Econova Institute of Architecture & Engineering. Accedido: 6 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://econova-institute.com/energy-plus-software-simulacion-energetica-edificios/>
- [27] «OpenStudio». Accedido: 6 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://openstudio.net/>
- [28] «OpenStudio». Accedido: 6 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://digineb.eu/digital-toolkit/openstudio>
- [29] «Home». Accedido: 6 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://simulationresearch.lbl.gov/GO/>

- [30] «GenOpt® | Simulation Research». Accedido: 27 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://simulationresearch.lbl.gov/projects/genopt>
- [31] «Google Earth». Accedido: 6 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: https://earth.google.com/web/search/Escuela+Naval+Militar,+Plaza+Espa%c3%b1a,+Mar%c3%a2n/@42.39483274,-8.70498903,0.55032487a,1411.11028573d,35y,0h,0t,0r/data=CigiJgokCWRvn-5EM0VAEXAtw5UHMUVAGWtxtg9_WiHAIUzvnflEdSHAOGMKATA
- [32] «Proyecto gimnasio ENM corregido 17042018 - copia.pdf».
- [33] I. A. CALORYFRIO, «¿Cuáles son las zonas climáticas de España según el CTE? - caloryfrio.com». Accedido: 28 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.caloryfrio.com/calefaccion/zonas-climaticas-espana-segun-cte.html>
- [34] «Envolvente térmica: qué es y cómo mejorarla con buen aislamiento exterior», Weber ES. Accedido: 28 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.es.weber/blog/envolvente-termica>
- [35] «1 Vélez Peinado_memoria.pdf».
- [36] Ministerio de la Presidencia, Relaciones con las Cortes y Memoria Democrática, *Real Decreto 178/2021, de 23 de marzo, por el que se modifica el Real Decreto 1027/2007, de 20 de julio, por el que se aprueba el Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios*, vol. BOE-A-2021-4572. 2021, pp. 33748-33793. Accedido: 6 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.boe.es/eli/es/rd/2021/03/23/178>
- [37] «Standard 55 – Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy». Accedido: 8 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.ashrae.org/technical-resources/bookstore/standard-55-thermal-environmental-conditions-for-human-occupancy>
- [38] «Proyector LED 90W IP66 grafito 4000K 9900lm Sevilla 3 Disano», Qmadis. Accedido: 9 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://qmadis.com/proyectores-led/225641-proyector-led-90w-ip66-grafito-4000k-9900lm-sevilla-3-disano-8016535123369.html>
- [39] A. Saldias, «Tipos de SENSORES de Temperatura y sus diferencias», SRC - Sistemas de regulación y control. Accedido: 3 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://srcsl.com/tipos-sensores-temperatura/>
- [40] «WiFi Inteligente Termómetro Higrómetro, Mini Digital Temperatura Humedad interior, sensor de humedad ambiente aplicación mando a distancia para sótano de invernadero, compatible con Alexa Google Home : Amazon.es: Jardín». Accedido: 8 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: https://www.amazon.es/dp/B0C1S65DQM/ref=sspa_dk_detail_2?pd_rd_i=B0BG27912Z&pd_rd_w=oeVZH&content-id=amzn1.sym.9c67f205-18e7-4d34-beb2-37ec708092ed&pf_rd_p=9c67f205-18e7-4d34-beb2-&th=1
- [41] «Qué es Smart Life ▷ PERSONALIZA tus dispositivos de casa», UniversalBlue. Accedido: 6 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://universalblue.es/blog/que-es-smart-life/>
- [42] «Wave Plus», <https://www.airthings.com/es/>. Accedido: 4 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.airthings.com/es/wave-plus>
- [43] Á. R. Sanz, «Definición geométrica con OpenStudio». Accedido: 6 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://eiposgrados.com/blog-ingenieros/definicion-geometrica-con-openstudio/>
- [44] «vim-cem-2012web.pdf». Accedido: 27 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.cem.es/sites/default/files/vim-cem-2012web.pdf>
- [45] «Avances en investigacion sobre calibracion.pdf».
- [46] M. Wetter, «Simulation Research Group Building Technologies Department Environmental Energy Technologies Division Lawrence Berkeley National Laboratory Berkeley, CA 94720».
- [47] G. Ruiz y C. Bandera, «Validation of Calibrated Energy Models: Common Errors», *Energies*, vol. 10, n.º 10, p. 1587, oct. 2017, doi: 10.3390/en10101587.
- [48] D. R. Landsberg, J. A. Shonder, K. A. Barker, C. R. L. Hall, y D. T. Reindl, «or trans©miAsSsiHonRAinE e(iwthwewr.parsihnrtaoer.odrigg)it.aFl oforppmerissonnoatl upseermointtlye.dAwdidthitoiountaAl SreHpRrAoEd'uscptiroionr, dwirsitttrriebnutpioenrm, ission.

ASHRAE Guideline Project Committee 1 4 Cognizant TC: TC 7.6, Building Energy Performance
SPLS Liaison: Waller S. Clements».

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

El desarrollo del presente Trabajo de Fin de Grado lleva asociadas una serie de implicaciones sociales, económicas y ambientales.

La búsqueda de la optimización del modelo, diseñado sobre la base del edificio gimnasio-piscina “Guardiamarina Barrutia” de la ENM, mediante un proceso de calibración, tiene como resultado la obtención de un modelo térmico con un mayor porcentaje de similitud con la realidad, lo cual, permite que estudios futuros desarrollados sobre la base de dicho modelo tengan un impacto positivo. Tal y como se exponía en la introducción del presente TFG, el consumo energético de los edificios supone el 40% del consumo total a nivel mundial y, por tanto, estudios como el que se ha desarrollado, permiten asentar las bases de proyectos que puedan llegar a influir de forma eminentemente positiva la reducción del consumo energético y la contaminación producida por las emisiones que produce un edificio. Por todo ello, la reducción de las emisiones supone un beneficio para la protección y conservación de la salud, con el objeto de reducir el riesgo de desarrollar enfermedades debido a la exposición a un ambiente contaminado. Asimismo, la mejora de las condiciones del edificio puede fomentar positivamente el incremento en el uso de las instalaciones de este, y al ser un edificio destinado a la práctica deportiva, se fomenta el desarrollo de actividades saludables.

El incremento de la eficiencia energética del edificio a partir del desarrollo de un modelo térmico calibrado puede resultar en ahorros significativos en materia de coste de energía a largo plazo. Asimismo, un mejor entendimiento del comportamiento térmico del edificio puede optimizar estrategias de mantenimiento y operación, reduciendo costes asociados a estos procesos, mejorando las estrategias de decisión sobre rehabilitación y mejorando la vida útil de los sistemas del edificio.

En resumen, el desarrollo del calibrado del modelo térmico del gimnasio de la ENM no solo tiene implicaciones técnicas, si no también importantes consecuencias sociales, económicas y medioambientales, que pueden impactar significativamente en la calidad de vida de las personas, la eficiencia operativa de los edificios y la sostenibilidad del medio ambiente.

ANEXO II: REFLEXIONES ÉTICAS Y SOCIALES

El desarrollo del presente Trabajo de Fin de Grado surge de la necesidad de estudiar las posibilidades que ofrece el método de calibración de un modelo térmico de un edificio. Sin embargo, debajo de este estudio se esconde un proyecto de mayores magnitudes y significado, como es el de buscar y refinar aquellas herramientas, que tras horas de esfuerzo y de trabajo, permitan mejorar la eficiencia energética de un edificio, y por ende, aportar resultados positivos a la permanente búsqueda de la reducción de la contaminación y el impacto de los edificios en el medio ambiente, en pos de la mejora de la calidad de vida de las personas y del cuidado del planeta en el que vivimos.

Mediante los estudios desarrollados en este trabajo, donde se refleja de forma clara, coherente, concisa y explicativa la metodología que se ha de seguir para calibrar de forma óptima un modelo energético de un edificio, en este caso el edificio gimnasio-piscina “Guardiamarina Barrutia” de la Escuela Naval Militar, se consigue avanzar en la investigación y la búsqueda de mejoras en un proceso ya estandarizado como es la calibración. Asimismo, se avanza en la implementación de diferentes herramientas de trabajo, como SketchUp, EnergyPlus™, OpenStudio® o GenOpt, y su compatibilidad a la hora de elaborar trabajos en el ámbito del modelado energético. Asimismo, también se ponen de manifiesto algunas desventajas como la compatibilidad entre las diferentes versiones de trabajo, dejando de manifiesto la necesidad de elaborar un software potente que englobe todas y cada una de estas herramientas en una sola, permitiendo una mayor eficacia y rapidez de trabajo. Como se puede observar, son numerosos los frentes abiertos, dando lugar a un futuro lleno de expectativas y posibilidades de mejora que permitan influir positivamente en la metodología de calibración y la optimización energética de edificios, y consecuentemente, la contribución al estado de bienestar.

ANEXO III: FACHADAS ESTE Y OESTE DEL EDIFICIO

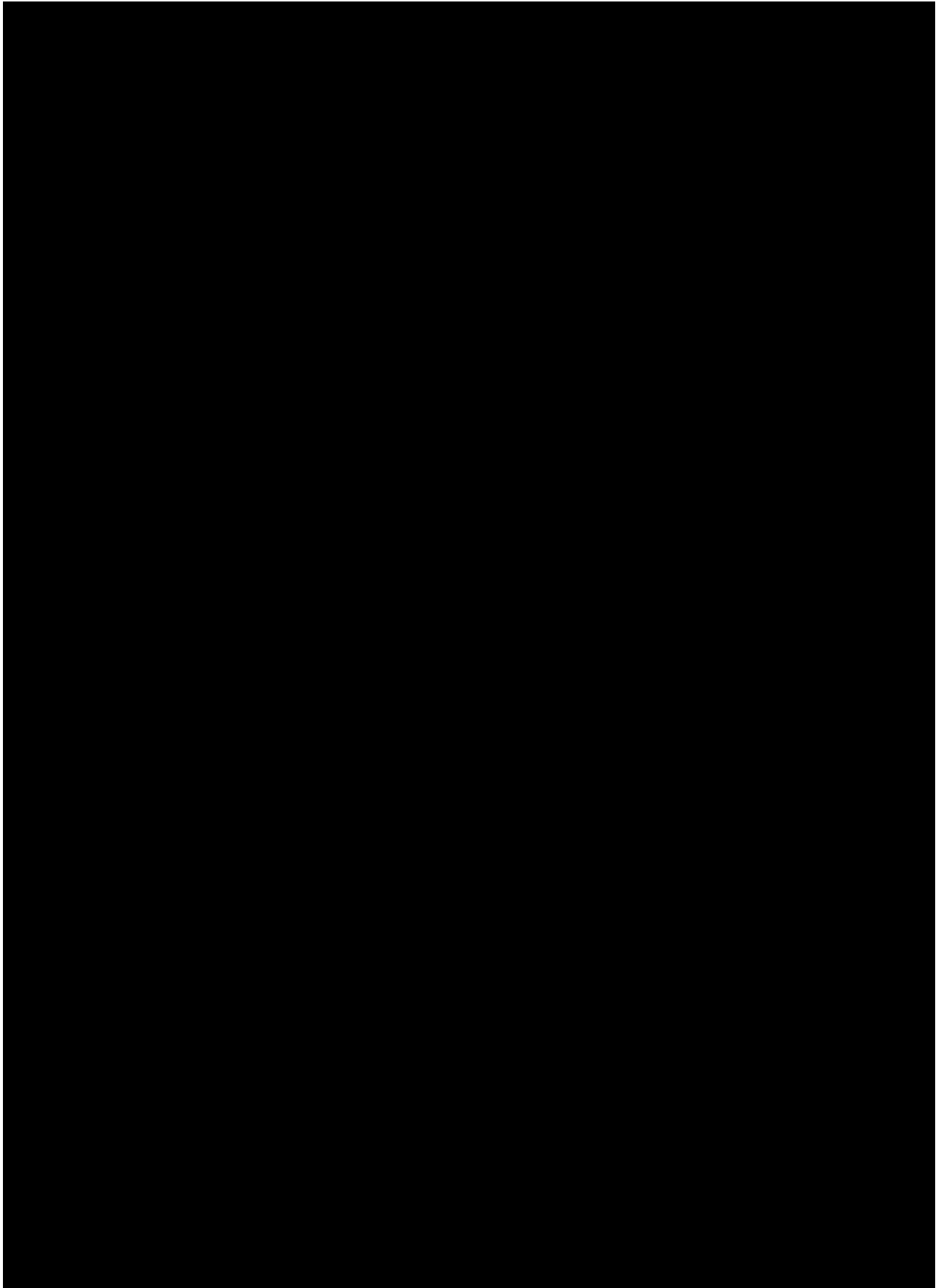


Figura A3-1 Fachadas Este y Oeste del edificio gimnasio-piscina

ANEXO IV: GIMNASIO PLANTA BAJA

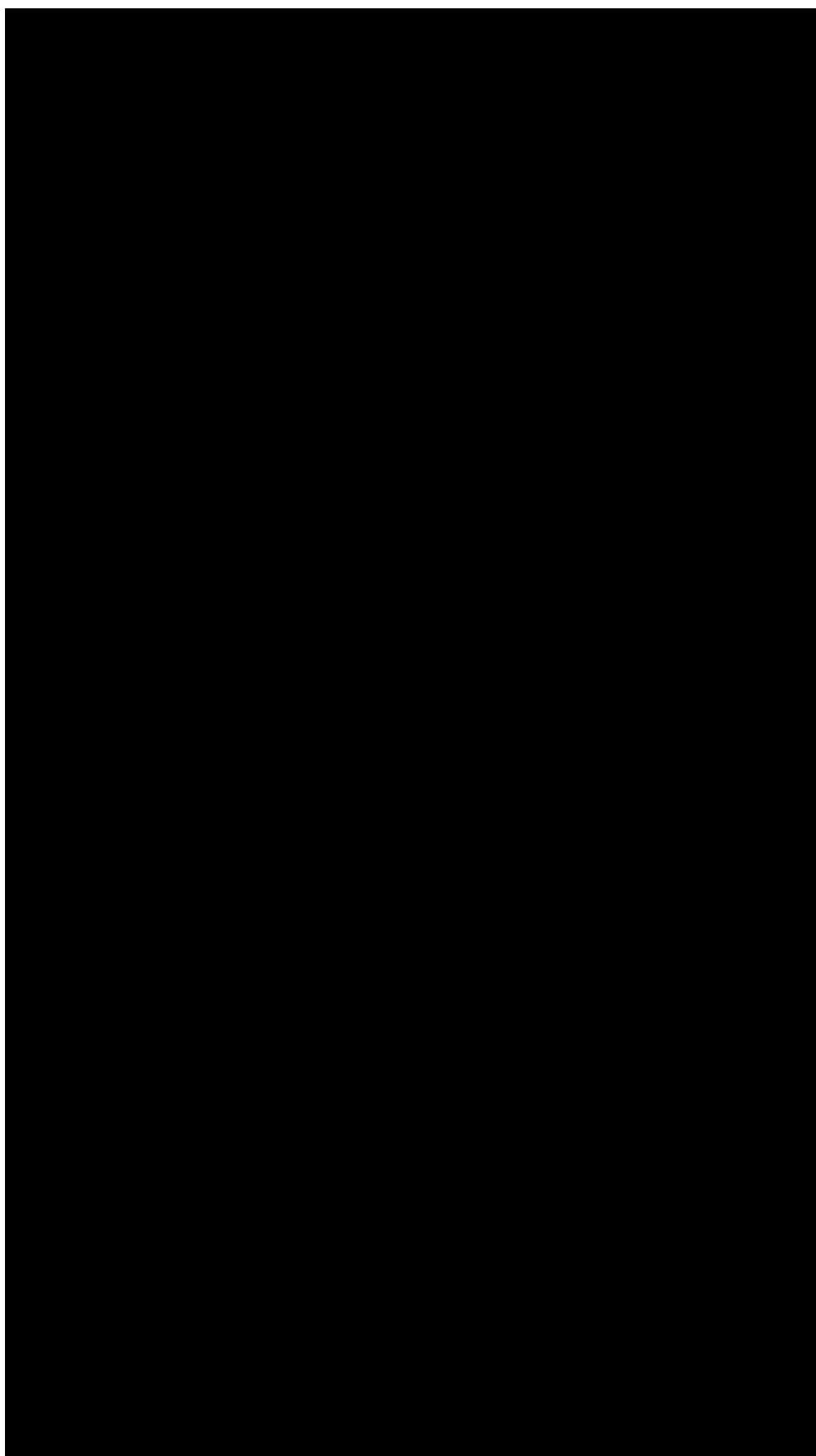


Figura A4-1 Plano Gimnasio Planta Baja

ANEXO V: GIMNASIO PLANTA GRADERÍOS

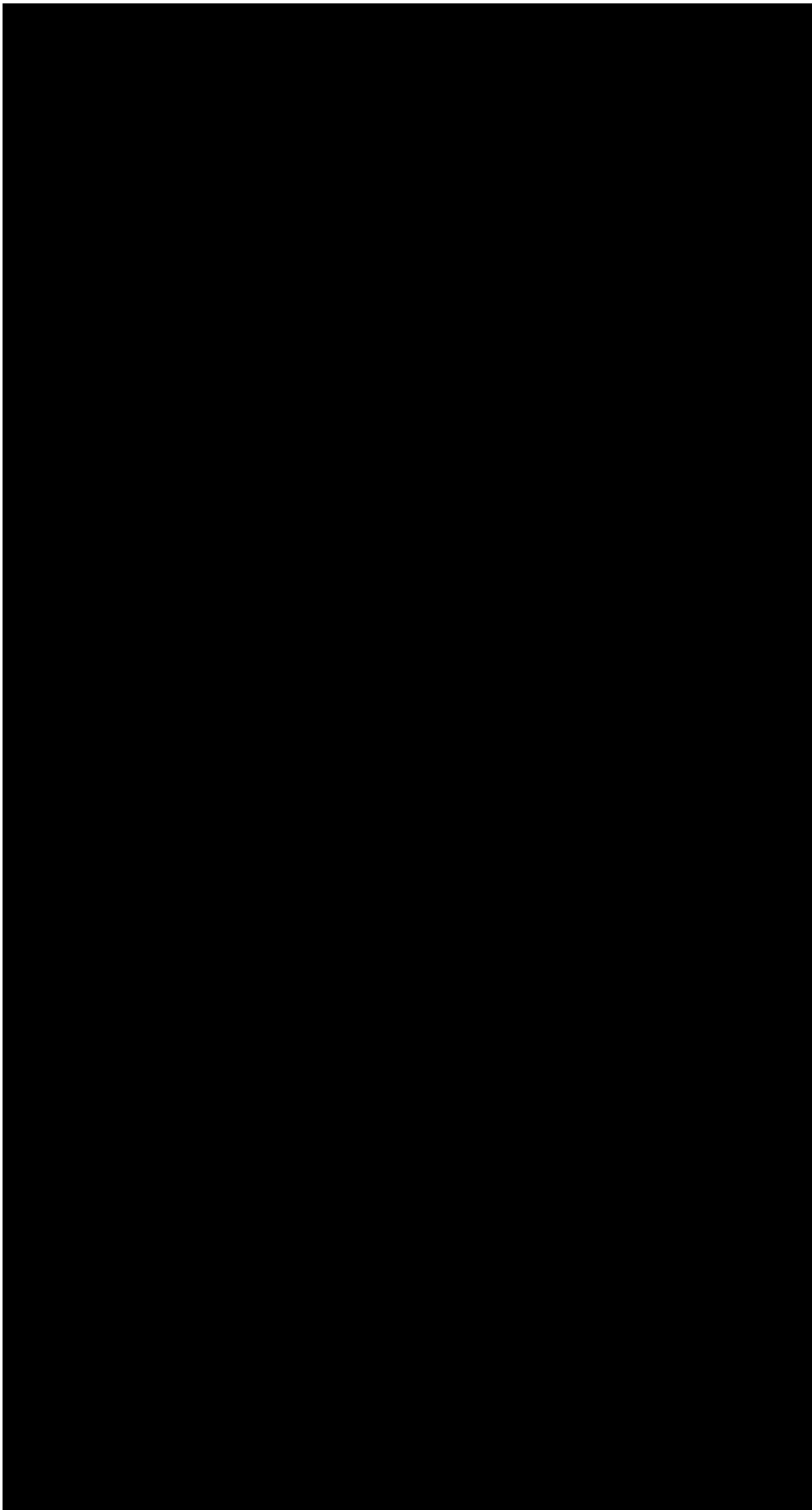


Figura A5-1 Plano Gimnasio Planta Graderíos

ANEXO VI: TABLA DE TASAS METABÓLICAS POR ACTIVIDAD

Activity	Metabolic Rate		
	Met Units	W/m ²	(Btu/h·ft ²)
Resting			
Sleeping	0.7	40	(13)
Reclining	0.8	45	(15)
Seated, quiet	1.0	60	(18)
Standing, relaxed	1.2	70	(22)
Walking (on level surface)			
0.9 m/s, 3.2 km/h, 2.0 mph	2.0	115	(37)
1.2 m/s, 4.3 km/h, 2.7 mph	2.6	150	(48)
1.8 m/s, 6.8 km/h, 4.2 mph	3.8	220	(70)
Office Activities			
Reading, seated	1.0	55	(18)
Writing	1.0	60	(18)
Typing	1.1	65	(20)
Filing, seated	1.2	70	(22)
Filing, standing	1.4	80	(26)
Walking about	1.7	100	(31)
Lifting/packing	2.1	120	(39)
Driving/Flying			
Automobile	1.0–2.0	60–115	(18–37)
Aircraft, routine	1.2	70	(22)
Aircraft, instrument landing	1.8	105	(33)
Aircraft, combat	2.4	140	(44)
Heavy vehicle	3.2	185	(59)
Miscellaneous Occupational Activities			
Cooking	1.6–2.0	95–115	(29–37)
House cleaning	2.0–3.4	115–200	(37–63)
Seated, heavy limb movement	2.2	130	(41)
Machine work			
sawing (table saw)	1.8	105	(33)
light (electrical industry)	2.0–2.4	115–140	(37–44)
heavy	4.0	235	(74)
Handling 50 kg (100 lb) bags	4.0	235	(74)
Pick and shovel work	4.0–4.8	235–280	(74–88)
Miscellaneous Leisure Activities			
Dancing, social	2.4–4.4	140–255	(44–81)
Calisthenics/exercise	3.0–4.0	175–235	(55–74)
Tennis, single	3.6–4.0	210–270	(66–74)
Basketball	5.0–7.6	290–440	(90–140)
Wrestling, competitive	7.0–8.7	410–505	(130–160)

Figura A6-1 Tabla A1 del ANSI/ASHRAE Standard 55