



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

*Optimización energética del edificio Isaac Peral: simulación y
propuestas de mejora*

Grado en Ingeniería Mecánica

ALUMNO: Álvaro Sánchez-Ferragut Guitart

DIRECTORES: Lara Febrero Garrido
Francisco Manuel Troncoso Pastoriza

CURSO ACADÉMICO: 2018-2019

Universida_{de}Vigo



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

*Optimización energética del edificio Isaac Peral: simulación y
propuestas de mejora*

Grado en Ingeniería Mecánica
Intensificación en Tecnología Naval
Cuerpo General

UniversidadeVigo

RESUMEN

El presente trabajo tiene como finalidad proponer medidas que mejoren el rendimiento energético-térmico del edificio Isaac Peral, situado en la Escuela Naval Militar en Marín. Estas medidas están directamente asociadas a un ahorro en el gasto de combustible para calefacción, colaborando con los esfuerzos del Ministerio de Defensa en materia de desarrollo sostenible.

Para ello, primero se ha empleado el software libre SketchUp, con el *plugin* de OpenStudio, en la fase de diseño estructural del edificio en cuestión. Posteriormente se realizó el diseño energético en el software BCORE (desarrollado por la Uvigo), que trabaja con TRNSYS como motor de cálculo. En primera instancia se realizaron varias simulaciones, con el objetivo de obtener la demanda energética y temperaturas a lo largo de un periodo de un año de duración. Posteriormente, gracias a las posibilidades de este software, se realizó una calibración del modelo para que la simulación adquiriese mayor precisión y semejanza con la situación real de demanda de calefacción.

Finalmente se proponen tres medidas de conservación de energía diferentes, enfocadas en aumentar la eficiencia de la envolvente, y se evalúa el impacto que tendrían en el consumo energético, mediante nuevas simulaciones, concluyendo cuál de ellas sería más viable.

PALABRAS CLAVE

Eficiencia energética, Medidas de ahorro, Modelado energético, Edificación, Transmitancia.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, me gustaría agradecer a los directores del trabajo, Francisco Manuel Troncoso Pastoriza y especialmente a Lara Febrero Garrido, por su dedicación desde el primer momento, su consejo y su apoyo.

A todos los profesores militares y civiles que a lo largo de estos cinco años han hecho todo lo posible para hacer de mí un buen oficial de marina.

Finalmente, agradecer a mi familia por todo su apoyo incondicional, sin ellos no sería quien he llegado a ser hoy.

CONTENIDO

Contenido	1
Índice de Figuras	3
Índice de Tablas.....	5
1 Introducción y objetivos	6
1.1 Introducción	6
1.2 Marco legal	7
1.3 Objetivos	8
2 Estado del arte	9
2.1 La eficiencia energética y su aplicación en Defensa.....	9
2.1.1 Contexto histórico.....	9
2.1.2 Actuaciones del Ministerio de Defensa	10
2.2 Eficiencia energética en edificación	11
2.2.1 Medidas de eficiencia energética.....	11
2.2.2 Edificios de consumo casi nulo (ECCN).....	12
2.3 Herramientas informáticas como ayuda a la eficiencia energética	13
2.3.1 Software de simulación de rendimiento energético	13
2.3.2 TRNSYS-BCORE	13
2.3.3 GenOpt.....	15
2.3.4 SketchUp y OpenStudio	16
3 Desarrollo del TFG.....	17
3.1 Metodología propuesta para la mejora energética	17
3.2 Descripción del edificio Isaac Peral.....	19
3.2.1 Ubicación.....	19
3.2.2 Descripción	19
3.3 Modelado energético del edificio.....	21
3.3.1 Geometría	21
3.3.2 Diseño completo del modelo energético.....	24
3.4 Simulación y calibración energética del modelo	29
3.4.1 Primeras simulaciones	29
3.4.2 Calibración del modelo.....	30
3.5 Propuesta de medidas de ahorro y su simulación	32
3.5.1 Acristalamiento doble estándar (ECM-1).....	32
3.5.2 Acristalamiento doble Bajo Emisivo (ECM-2)	34
3.5.3 Aislamiento térmico exterior (ECM-3)	35

3.5.4 Simulación de las medidas de ahorro energético.....	38
4 Resultados	39
4.1 Resultados de la simulación energética	39
4.2 Resultados de la calibración y simulación calibrada	40
4.3 Resultados de las medidas de conservación de energía propuestas	43
4.3.1 Resultados ECM-1.....	43
4.3.2 Resultados ECM-2.....	44
4.3.3 Resultados ECM-3.....	45
4.4 Comparación de las medidas de ahorro	46
4.4.1 Reducción de la demanda energética.....	46
4.4.2 Relación coste inicial-ahorro económico.....	47
4.4.3 Otros factores.....	47
4.4.4 Evaluación	48
5 Conclusiones y líneas futuras	49
5.1 Conclusiones	49
5.2 Líneas futuras	49
6 Bibliografía.....	51
Anexo I: Tabla metabólica para diferentes actividades.....	54
Anexo II: relación entre la transmitancia con el ancho de cámara para distintas unidades de vidrio aislante (uva).....	55
Anexo III: Condiciones ambientales de los lugares de trabajo	56
Anexo IV: Resultados primera simulación BCORE	57
Anexo V: Resultados simulación calibrada.....	63
Anexo VI: Planos edificio Isaac Peral.....	65

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-I 1 Porcentaje consumo energía primaria UE (Eurostat)	7
Figura 2-I Fotografía de la jornada “Eficiencia energética y medio ambiente en la Armada del S. XXI”	10
Figura 2-II Ejemplo de diseño de un ECCN	12
Figura 2-III Ejemplo interfaz BCORE	14
Figura 2-IV Diagrama funcionamiento BCORE	15
Figura 2-V Ejemplo de Optimización en Genopt (Web de GenOpt [21])	16
Figura 2-VI Interfaz SketchUp con <i>plugin</i> de OpenStudio	16
Figura 3-I Esquema diseño geométrico	18
Figura 3-II Esquema modelado energético.....	18
Figura 3-III Esquema Calibración	19
Figura 3-IV Esquema aplicación Energy Conservation Measure	19
Figura 3-V Ubicación de la Escuela Naval Militar (Google Maps).....	20
Figura 3-VI Fotografía exterior edificio Isaac Peral	20
Figura 3-VII Fotografía puerta principal edificio Isaac Peral	21
Figura 3-VIII Activar <i>plugin</i> OpenStudio	21
Figura 3-IX, Vista superior planta baja edificio sin proyectar	22
Figura 3-X Planta baja.....	22
Figura 3-XI Edificio completo sin huecos.....	23
Figura 3-XII Edificio completo, en SketchUp + OpenStudio	23
Figura 3-XIII Parámetros generales BCORE	24
Figura 3-XIV Sección materiales BCORE.....	25
Figura 3-XV Sección Muros BCORE	26
Figura 3-XVI Captura de pantalla menú software BCORE	26
Figura 3-XVII Ejemplo de Horario de Ocupación de un aula en BCORE	27
Figura 3-XVIII Ejemplo de Horario de iluminación de un aula en BCORE	27
Figura 3-XIX Ejemplo potencia y horario de equipos (BCORE)	28
Figura 3-XX Temperaturas diarias máxima y mínima, según archivo EPW, presentado por BCORE	29
Figura 3-XXI Radiación en Pontevedra, según archivo EPW, presentado por BCORE	29
Figura 3-XXII Parámetros simulación BCORE	30
Figura 3-XXIII Factura consumo 2018	31
Figura 3-XXIV (Proceso Iteraciones BCORE)	32
Figura 3-XXV (Esquema primera propuesta de ECM).....	33
Figura 3-XXVI Esquema segunda propuesta ECM	35

Figura 3-XXVII Detalle por capas Aislamiento Térmico Exterior (CYPE)	36
Figura 3-XXVIII Esquema tercera propuesta ECM	36
Figura 3-XXIX Ejemplo simulación ECM en BCORE	38
Figura 4-I Consumo total por meses	40
Figura 4-II Resultados calibración (BCORE)	41
Figura 4-III Demanda energética calibrada, por meses (BCORE).....	42
Figura 4-IV Comparativa Consumo real, simulación y calibración.....	42
Figura 4-V Efecto ECM-1 en la demanda.....	43
Figura 4-VI Ahorro mensual al aplicar ECM-1	43
Figura 4-VII Efecto ECM-2 en la demanda	44
Figura 4-VIII Ahorro al aplicar ECM-2	44
Figura 4-IX Efecto ECM-3 en la demanda	45
Figura 4-X Ahorro al aplicar ECM-3	45
Figura 4-XI Comparativa demanda por meses	46
Figura 4-XII Comparación reducción anual demanda	46
Figura 4-XIII Comparación coste instalación - ahorro en 10 años	47
Figura 4-XIV Comparación temperaturas al implementar ECM	48
Figura A2-I Comparación transmitancia UVA's (Guía Técnica para la Rehabilitación de la Envoltura Térmica de los Edificios).....	55
Figura A4-I Demanda energética total por meses (BCORE)	57
Figura A4-II Porcentaje demanda energética por zonas (BCORE).....	59
Figura A4-III Demanda energética por zonas planta baja (BCORE).....	60
Figura A4--IV Demanda energética por zonas planta 1ª (BCORE).....	60
Figura A4-V (Demanda energética por zonas planta baja)	61
Figura A4-VI Demanda energética por zonas, 1ª planta (BCORE)	62
Figura A5-I Demanda global mensual calibrada (BCORE).....	63
Figura A5-II Temperatura media mensual calibrada.....	63
Figura A5-III Temperaturas instantáneas Aula 41 (16 Nov al 21 Nov).....	64
Figura A5-IV temperaturas instantáneas Aula 41 (21 Nov).....	64
Figura A6--I Plano edificio Isaac Peral	65

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3-1 Muros y transmitancias	25
Tabla 3-2 Presupuesto ECM-1 (Generador de precio CYPE).....	34
Tabla 3-3 Presupuesto ECM-2 (Generador de precio CYPE).....	35
Tabla 3-4 Presupuesto ECM-3 (Generador de precios CYPE)	38
Tabla 4-1 Resumen comparación ECM	48
Tabla A1-1 Tasas metabólicas (ISO 8996)	54
Tabla A4-2 Asignación Zonas Térmicas – Aulas	58

1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1 Introducción

Es un hecho que en los últimos años han aumentado las consecuencias del cambio climático, algunos de estos efectos son el aumento del nivel del mar, la acidificación de los océanos por absorción de carbono generado por el hombre, o el aumento de sequías a nivel global [1]. El calentamiento global es la consecuencia más clara del cambio climático, y consiste en el aumento paulatino de la temperatura del planeta, causado por la emisión de gases de efecto invernadero procedentes de la actividad humana. En concreto, las emisiones mundiales de dióxido de carbono (CO₂) han aumentado casi un 50 % desde 1990 hasta la actualidad [2].

En consecuencia la sociedad es cada vez más consciente de la necesidad de un desarrollo sostenible. Pero esta concienciación no está solo presente en el pensamiento social, también ha cogido mucha fuerza en las instituciones, que desde el nivel más global hasta el más concreto, vienen desarrollando legislación y planes para reducir al mínimo posible esta grave pero no irremediable situación.

Existen diversas formas de actuar contra el cambio climático, y entre ellas, una de las más relevantes es la reducción del consumo energético global. Como se puede leer en la web de la ONU sobre desarrollo sostenible: “la energía es el factor que contribuye principalmente al cambio climático y representa alrededor del 60 % de todas las emisiones mundiales de gases de efecto invernadero” [2]. No cabe duda entonces, de que la eficiencia energética tiene un papel de gran importancia para conseguir los objetivos de mitigación de cambio climático.

La eficiencia energética, en términos generales, se define como la reducción del consumo de energía, manteniendo los mismos servicios, confort y calidad de vida, y protegiendo el medio ambiente. Existen diferentes formas de mejorar en este aspecto, como por ejemplo fomentar el uso de energías renovables, que disminuyen el uso de combustibles fósiles. Pero además del desarrollo de nuevos sistemas de producción energética menos contaminantes, la aplicación de medidas que reduzcan el consumo energético es clave.

Trasladando lo anterior a las Fuerzas Armadas, la política del Ministerio de Defensa en materia de conservación y protección del medio ambiente se fundamenta en el concepto de desarrollo sostenible, es decir, hacer compatible el desarrollo tecnológico con el respeto a la naturaleza. Como se puede leer en la Memoria de Responsabilidad Social MINISDEF 2010 [3]: “El Ministerio adoptó estos cambios asumiendo una apuesta clara y decidida por el medio ambiente como una de las bases de su gestión, promoviendo planteamientos de ahorro, eficiencia y ejemplaridad en la actuación propia.” Por lo tanto, el esfuerzo de las Fuerzas Armadas en la lucha contra el cambio climático es patente.

Existen muchos datos y estadísticas que permiten analizar el consumo de energía a distintos niveles. En concreto en la Figura 1-I, se muestran los porcentajes de consumo energético de los principales sectores a nivel europeo. Los edificios representan un 40 % del consumo energético en la Unión Europea, de ahí que estén aumentando los requerimientos en este sector, relativos a la eficiencia energética.

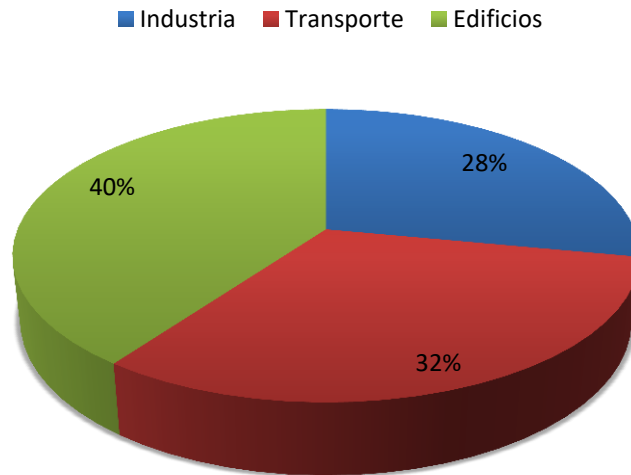


Figura 1-I 1 Porcentaje consumo energía primaria UE (Eurostat)

Este trabajo pretende particularizar las ventajas de la eficiencia energética en el sector de la edificación, para un edificio perteneciente al Ministerio de Defensa, y en concreto a la Armada Española, ubicado en la Escuela Naval Militar. Se puede anticipar que el beneficio tiene un doble enfoque, ya que a la vez que se contribuye a la protección del medio ambiente, la reducción de consumo energético lleva asociada la disminución de gasto económico, en una situación de limitación de presupuesto. Más concretamente, se trabajará con la intención de disminuir el gasto en calefacción. En este campo suele existir gran margen de mejora, ya que la mayoría de edificios antiguos cuentan con un rendimiento muy bajo.

1.2 Marco legal

Para la realización del presente trabajo, se han tenido en cuenta las siguientes normativas, reglamentos y leyes:

- El Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios (RITE), cuya versión más reciente data de 2013.
- Código Técnico de Edificación (CTE), en concreto el apartado HE-2 del DB HE, Documento Básico de Ahorro de Energía, actualizado en Junio de 2017.
- Plan De Acción de Ahorro y Eficiencia Energética.
- Instrucción 8/2009, de 9 de marzo, del Secretario de Estado de Defensa, por el que se aprueba el Programa Permanente de Eficiencia y Economía de Gasto del Ministerio de Defensa.
- Instrucción 56/2011, de 3 de agosto, del Secretario de Estado de Defensa sobre sostenibilidad ambiental y eficiencia energética en el ámbito del Ministerio de Defensa.
- Real Decreto 486/1997, de 24 de octubre, modificado por última vez en 2004, por el que se establecen las disposiciones mínimas de seguridad y salud en las obras de construcción.
- UNE-EN ISO 7730:2006 Ergonomía del ambiente térmico. Determinación analítica e interpretación del bienestar térmico mediante el cálculo de los índices PMV y PPD y los criterios de bienestar térmico local.

1.3 Objetivos

El objetivo principal del presente trabajo es la propuesta de medidas que reduzcan la demanda energética de calefacción del Edificio Isaac Peral, convirtiéndolo en un edificio más eficiente y respetuoso con el medio ambiente. Estas medidas estarán en concordancia con la actuación institucional del Ministerio de Defensa, en favor del desarrollo sostenible.

Para la consecución final del objetivo del trabajo, se requiere alcanzar los siguientes objetivos específicos, expuestos en orden cronológico a continuación:

1. Recopilación de toda la información posible sobre el edificio Isaac Peral: se requiere el conocimiento de datos geométricos, constructivos, así como la distribución de cargas térmicas causadas por equipos eléctricos, iluminación y ocupación física.
2. Realización de un modelo energético BEM (*Building Energy Model*): trasladar la información del punto anterior a un modelo informático mediante el uso de software apropiado. Este modelo deberá ser un gemelo virtual a nivel energético.
3. Simulación energética: partiendo del modelo, realizar una simulación que refleje el funcionamiento térmico del edificio a lo largo del año 2018, esta simulación obtendrá los *outputs* de temperatura y demanda energética, detallado por zonas y en conjunto.
4. Calibración del modelo energético: utilizar datos reales de consumo, para hacer que el modelo energético adquiera gran exactitud, reduciendo los posibles errores iniciales, y analizar los resultados de esta calibración.
5. Propuesta de medidas de ahorro: este objetivo consiste en seleccionar una serie de medidas de eficiencia energética, conocidas como ECM (*Energy Conservation Measures*). Seleccionadas las ECM deseadas, se realizará una nueva simulación, que tendrá en cuenta estas medidas de ahorro, y permitirá comparar los resultados.
6. Evaluación de los resultados: la fase final del trabajo consiste en el análisis objetivo de las diferentes propuestas de ECM, evaluando el ahorro energético y económico que supondría la implementación de cada una de ellas y obteniendo conclusiones definitivas que puedan ser tenidas en cuenta para mejorar el rendimiento del edificio.

2 ESTADO DEL ARTE

En esta sección se describirá el concepto de eficiencia energética y como se ha desarrollado en los últimos años, concretando después las actuaciones realizadas por el Ministerio de Defensa. Después se detallarán algunos aspectos de la eficiencia energética aplicada a edificación y se finalizará resumiendo las herramientas informáticas útiles para este tipo de proyectos. Todo lo anterior, enfocado a la comprensión del trabajo.

2.1 La eficiencia energética y su aplicación en Defensa

2.1.1 Contexto histórico

El concepto de eficiencia energética comenzó a acuñarse en la década de 1970, a raíz de una subida drástica de los precios de la energía, en esta época no existía la monitorización de los consumos realizados por el cliente. Con la aparición de los ordenadores aumentaron las posibilidades en términos de gestión de la eficiencia energética, y surgieron las primeras empresas dedicadas a este campo.

Pero no fue hasta la primera década del siglo XXI, cuando la sociedad se concienció de la urgente necesidad de reducir el consumo de combustibles fósiles, y por tanto reducir las emisiones a la atmósfera. Es en este contexto cuando se firma el protocolo de Kyoto, con el objetivo de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero.

Es lógico, que por tanto, haya surgido gran cantidad de legislación en este campo, desde el nivel europeo hasta llegar al Ministerio de Defensa. A nivel europeo, la legislación en vigor en la materia que trata este trabajo es la Directiva 2012/27/UE, que fija para 2020 un ambicioso objetivo de reducir el consumo de energía primaria un 20 %. Para adaptarse a estos requerimientos, España cuenta con el Plan nacional de acción de eficiencia energética 2017-2020, que fija un objetivo de ahorro del 24,7 % y que además, establece medidas específicas para instalaciones del Ministerio de Defensa [4]. Este objetivo de ahorro equivale a 571 ktep/año, (ktep: miles de toneladas equivalentes de petróleo), supuesta una distribución lineal del mismo durante todo el periodo de compromiso 2017-2020.

Para el cumplimiento de estos objetivos, la normativa de aplicación es el Código Técnico de edificación (CTE), en concreto el DB HE, Documento Básico de Ahorro de Energía [5]. Esta normativa se complementa con el Reglamento de Instalaciones Térmicas de los Edificios (RITE) [6]. Este reglamento, cuya última versión data de 2013, establece las condiciones que deben cumplir las instalaciones destinadas al bienestar térmico, para conseguir un uso racional de la energía y su ámbito de aplicación queda reflejado en la siguiente cita “El RITE se aplicará a las instalaciones térmicas en los edificios de nueva construcción y a las instalaciones térmicas que se reformen en los edificios existentes, exclusivamente en lo que a la parte reformada se refiere, así como en lo relativo al

mantenimiento, uso e inspección de todas las instalaciones térmicas, con las limitaciones que en el mismo se determinan.”

2.1.2 Actuaciones del Ministerio de Defensa

El Ministerio de Defensa no se ha quedado atrás en esta evolución hacia la eficiencia energética, y ha mostrado en los últimos años que su compromiso con el medio ambiente está a un nivel muy alto. De hecho afirma que “casi uno de cada diez euros que invertimos en infraestructuras se destina directamente a conservar el medioambiente” [3].

El principal objetivo planteado por dicha institución consiste en la reducción de consumo energético y de emisiones de gases de efecto invernadero [3]. En línea con este objetivo, el ministerio se adhirió al Plan de Acción de Ahorro y Eficiencia Energética en los edificios de la Administración General del Estado. A fecha de 2011, había un total de 70 bases o unidades ya adheridas al plan, 13 de ellas pertenecientes a la Armada Española. Este plan implica que dichas instalaciones deben reducir su demanda energética reducida un 20 %. Según la Memoria de Responsabilidad Social, del Ministerio de Defensa [3], esta medida supone un ahorro de 40 millones de euros a medio plazo. De esta manera, la eficiencia energética además colabora con el Programa Permanente de Eficiencia y Economía del Gasto, que trata entre otros temas, la reducción de consumo de agua, energía eléctrica y combustible.

Un claro ejemplo de esta línea de acción fue la creación de la Subdirección General de Planificación y Medio Ambiente, integrada en la Dirección de Infraestructuras. Este departamento, que entre otras, tiene como función “desarrollar la política medioambiental del Departamento y dirigir y supervisar el plan de ahorro y eficiencia energética” [7], es la principal herramienta del ministerio para dirigir los avances en esta materia.

Otra medida en línea con el compromiso de la reducción de gases de efecto invernadero en la Armada, es objetivo de crear un “Buque de Contaminación Cero” [3], investigando campos como la pila de combustible o el concepto de buque eléctrico.

En cuanto a proyectos ya realizados cabe destacar la sustitución de dos calderas de gasóleo para calefacción por un sistema de geotermia de baja entalpía, en la Estación de Radio de Bermeja (Madrid), donde se ha conseguido reducir las emisiones de CO₂ por calefacción a cero [8].

En 2013, tuvieron lugar en La Jefatura de Apoyo Logístico las primeras jornadas “Eficiencia energética y medio ambiente en la Armada del S. XXI” [9], donde durante tres días se estudió cómo incorporar las últimas tecnologías en materia de ahorro energético, ver Figura 2-I. Los ponentes presentaron entre otros temas, las nuevas tendencias en climatización de edificios.



Figura 2-I Fotografía de la jornada “Eficiencia energética y medio ambiente en la Armada del S. XXI”

Más recientemente, en el IV congreso nacional de I+D+I en Defensa y Seguridad, se presentó el informe *Eficiencia energética en buques de guerra: un caso práctico* [10]. En este trabajo, se estudia de manera estadística el caso real de consumo energético de un buque (en concreto, de una fragata clase F-100) y se proponen posibles mejoras.

Expuestos estos casos, es innegable la alta disposición del Ministerio de Defensa y de la Armada Española para reducir su impacto medioambiental mediante la reducción de consumo energético, abordando el tema con jornadas divulgativas, planes y proyectos.

2.2 Eficiencia energética en edificación

El sector de la edificación representa el mayor porcentaje de consumo energético, tal y como se muestra en la Figura 1-I, también es el sector que genera más riqueza, aproximadamente un 10 % del Producto Interior Bruto a nivel europeo. Pero a pesar del enorme mercado de este sector y de que hasta el 97 % de los edificios necesita renovación en términos energéticos, las tasas de renovación se mantienen bastante bajas, en torno al 1,2 % cada año [11].

Uno de los fundamentos de la eficiencia energética en edificación es el concepto de la envolvente térmica. La envolvente es el conjunto de cerramientos y huecos que definen un edificio, es decir fachadas, tejados, paredes interiores o ventanas entre otros, que afectan en gran medida a la demanda energética. En el CTE, se especifica que los edificios deben tener una envolvente que limite la demanda energética, cumpliendo los requisitos de bienestar térmico.

En este mismo centro en el año 2016, Rubén Magadán Tomás llevó a cabo su Trabajo de Fin de Grado en torno al estudio de la envolvente: “Análisis de la influencia de la envolvente en la demanda térmica y propuestas de mejora del Cuartel Francisco Moreno mediante simulación con TRNSYS.” En el trabajo se profundiza en la importancia de la envolvente de los edificios, y en concreto se analiza la del cuartel de alumnos Almirante Francisco Moreno, proponiendo algunas posibles mejoras que disminuirían costes y consumo de energía en forma de calefacción [12].

2.2.1 Medidas de eficiencia energética

Las medidas de conservación de energía o *Energy Conservation Measures* (ECM), son cualquier tipo de proyecto o tecnología cuyo objetivo es reducir el consumo energético de un edificio. Estos proyectos principalmente están enfocados a reducir el gasto de agua, electricidad o gas.

El mercado de este tipo de proyectos ha aumentado significativamente, como afirmó la Directora de la Agencia Internacional de la Energía (IEA): “La eficiencia energética es la central eléctrica que trabaja silenciosamente para mejorar la seguridad de la energía, reducir nuestras facturas y acercarnos a los objetivos climáticos” [13].

En la mayoría de estos proyectos, el objetivo es que el ahorro que supongan, sea capaz de igualar el coste inicial de la instalación. Existen muchas empresas especializadas en este campo desde la década de 1970.

A continuación se exponen los principales tipos de medidas de conservación energéticas que existen en la actualidad, la mayoría de ellas tratan de mejorar la envolvente del edificio:

- Insuflación de materiales aislantes en cámaras de aire: esta técnica consiste en insuflar un material como puede ser celulosa o lana, materiales que aportan mayor aislamiento térmico, a la fachada de un edificio, además, como extra aportan aislamiento contra ruido. Es un sistema con una obra relativamente sencilla y rápida.
- Sistema de aislamiento térmico exterior (SATE): consiste en añadir una capa extra a la fachada del edificio, de material aislante y cubierta por un mortero. Este sistema ofrece un aislamiento térmico óptimo y además elimina los puentes térmicos que producen grandes infiltraciones. Este sistema aumenta el grosor de la fachada sin disminuir el espacio interior útil del edificio.

- Mejora de los cristales: gran parte de las pérdidas de calor en edificación se producen a través de los acristalamientos. Es por esto que recientemente está aumentando el uso de cristales dobles o triples que intercalan aire o gases nobles (menos conductores del calor), entre las capas de vidrio. Gran parte del parque edificatorio a nivel nacional utiliza los llamados cristales monolíticos (compuestos por una sola lámina de vidrio), por ello suele existir mucho margen de mejora. Este tipo de reformas reduce notablemente las pérdidas de calor, se puede conseguir porcentajes altos de reducción de pérdidas con respecto a los cristales tradicionales de una sola lámina [14]. Una investigación relevante es la Tesis Doctoral “Alternativas para la mejora de la eficiencia energética de los acristalamientos: los vidrios dinámicos” [15], en la que se demuestra que el vidrio con cámara de agua circulante se comporta como un buen captador de energía solar aumentando significativamente la eficiencia de la envolvente. Cuantitativamente, se calcula que se podría dar un ahorro del 47 % con respecto a un vidrio doble convencional.
- Aislamiento de puentes térmicos: los puentes térmicos son partes del cerramiento donde éste pierde su inercia térmica. Este caso se da por ejemplo en cajones de persiana, uniones de cubiertas con fachadas, o pilares integrados en la fachada.
- Calefacción mediante suelo radiante: este tipo de distribución de calor puede sustituir los tradicionales radiadores. El grado de confort que ofrece es mayor ya que distribuye la temperatura más uniformemente. Pero este elemento destaca en su eficiencia energética, ya que el agua que distribuye por tuberías debajo del suelo, no tiene que alcanzar temperaturas excesivamente altas, entre 35°C y 45°C comparado con los 80°C habituales de los radiadores. Se cuantifican ahorros de en torno a un 20 % comparando este sistema con los radiadores tradicionales, con el único inconveniente de tener un coste inicial más elevado.

2.2.2 Edificios de consumo casi nulo (ECCN)

Entre los avances desarrollados en el campo de la eficiencia energética, uno de los más actuales es la creación de los edificios de consumo casi nulo, o *Net Zero Energy Building*, cuyo principio es que en su balance de funcionamiento, la emisión de CO₂ sea nula y la energía consumida sea igual a la producida. Esto se consigue minimizando la demanda energética y maximizando la producción de energías renovables. Para minimizar la demanda se basa en principios como el diseño de una envolvente eficiente, es decir una estructura lo más aislante posible. Este será uno de los grandes retos en el sector de la construcción durante los próximos años, un ejemplo de diseño es la Figura 2-II.



Figura 2-II Ejemplo de diseño de un ECCN

Actualmente existen pocos edificios que cumplan los requisitos para considerarse de consumo casi nulo, pero en los existentes se ha demostrado que la eficiencia energética en la fase de diseño reduce el coste de proyectos de energía renovable necesarios [16].

2.3 Herramientas informáticas como ayuda a la eficiencia energética

Al igual que en el resto de campos de ingeniería, el desarrollo de la eficiencia energética no sería actualmente lo que es, si no fuese por la existencia de herramientas informáticas que automatizan labores de cálculo realmente complejas. El denominador común de estas herramientas es la generación de escenarios virtuales que son capaces de representar de manera fiel el comportamiento de un edificio.

2.3.1 Software de simulación de rendimiento energético

En las últimas décadas, cientos de programas de mejora energética para edificios han surgido y están en uso, como se puede comprobar en el informe del Departamento de Energía de Estados Unidos: “*Contrasting the capabilities of building energy performance simulation programs*” [17]. En este informe se comparan 20 herramientas de software diferentes, entre ellas TRNSYS, sobre la que se darán más detalles. Algunas de las más populares a día de hoy son EnergyExpress, EnergyPlus, OpenStudio, o ECOTECT entre muchas otras.

Dos términos que se repiten continuamente en este ámbito son BIM y BEM, las siglas en inglés de *Building Information Modelling* y *Building Energy Modeling* que, como se verá, son dos conceptos de gran actualidad. La metodología BIM consiste en generar un gemelo virtual del edificio, que sea útil desde la fase de diseño hasta la gestión del propio edificio. Si a los datos exclusivamente geométricos, se le añaden todos los parámetros energéticos, como tipos de aislamiento o datos climáticos entre muchos otros, se consigue llegar a un modelo energético del edificio (BEM). Existen herramientas que sirven para utilizar los datos de un modelo BIM y aprovecharlas para desarrollar un modelo BEM de manera semi-automática. Esta transformación se refleja en “*Transforming BIM to BEM: Generation of Building Geometry for the NASA Ames Sustainability Base BIM*” [18].

De todo este amplio espectro de herramientas, algunas han sido útiles como parte clave en el desarrollo de este trabajo, así como otros softwares de diseño no energético. Estas herramientas son BCORE, TRNSYS, OpenStudio, SketchUp y GenOpt que serán explicadas en mayor profundidad en los apartados 2.3.2, 2.3.3 y 2.3.4.

2.3.2 TRNSYS-BCORE

En este apartado se darán detalles técnicos sobre dos programas enfocados en eficiencia energética, que han sido utilizados para el desarrollo de este trabajo

TRNSYS [19] es una herramienta de software diseñada por la Universidad de Wisconsin, muy flexible y gráfica, para la simulación de sistemas transitorios. Su primera versión data de 1975, y estaba enfocada en el estudio de energía solar. Mientras que la mayoría de herramientas de este tipo están enfocadas únicamente en sistemas térmicos y eléctricos, este software también puede aplicarse para modelar incluso flujos de tráfico o procesos biológicos.

El programa está compuesto por un potente motor que lee y procesa los datos de entrada para resolver el sistema de forma iterativa. Además, ofrece una biblioteca de elementos, como equipos de calefacción, datos meteorológicos entre muchos otros. Aunque incluye una amplia biblioteca, también es posible modificar componentes existentes o diseñar sus elementos propios.

TRNSYS es el motor de cálculo que utiliza el software BCORE, que ha sido una de las herramientas principales para la realización de este trabajo.

BCORE es un software diseñado por la Universidad de Vigo, al amparo del proyecto europeo Enginergy financiado por Horizonte 2020, el programa de innovación e investigación de la Unión

Europea. Este software, desarrollado entre 2016 y 2018, permite la simulación energética de edificios, utilizando TRNSYS como motor de cálculo. Integra en una sola herramienta diversas funciones, modelado, simulación, calibración e implementación de ECM en edificios. Además, se trabaja con una interfaz sencilla e intuitiva, como se observa en la Figura 2-III. [20] El software además incluye una amplia biblioteca de materiales y cerramientos predefinidos, así como la posibilidad de crear materiales nuevos asignándoles las propiedades deseadas.

Este software es una aplicación web que está ubicada en la nube, por lo tanto, solo se requiere un navegador web para poder hacer uso de ella. Para poder realizar un modelado energético se necesita partir de un modelo geométrico en formato OpenStudio Model (OSM).

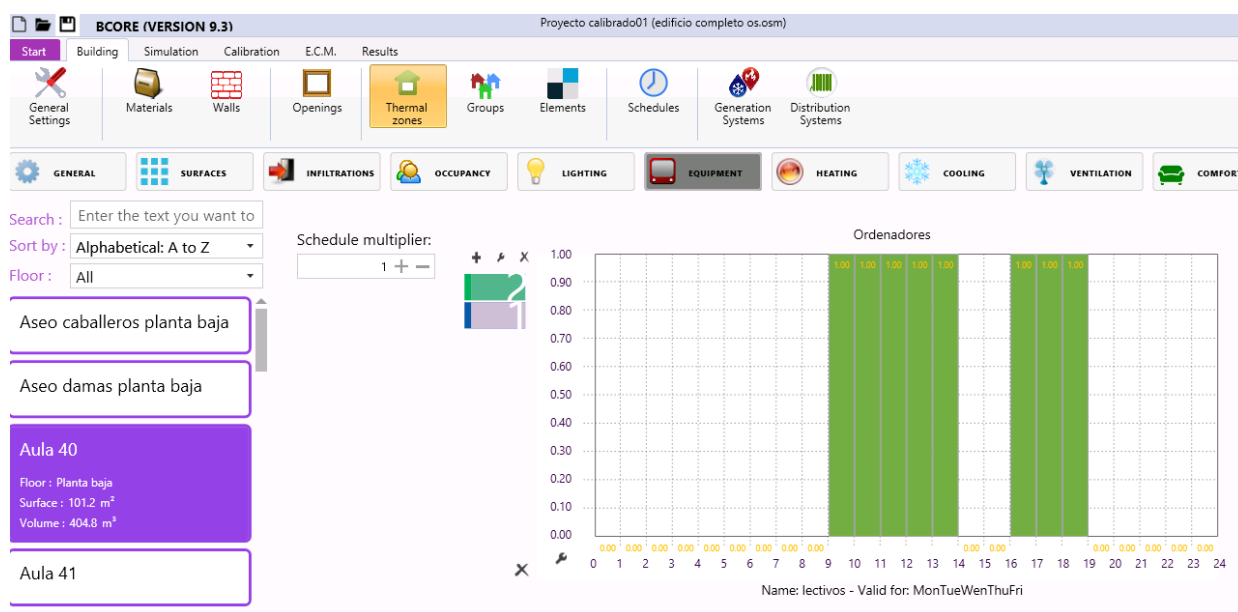


Figura 2-III Ejemplo interfaz BCORE

Una de las grandes ventajas como se verá más adelante, y que lo diferencia de la mayoría de herramientas existentes es la posibilidad de calibrar la simulación para obtener resultados altamente realistas. Cuando el funcionamiento de un edificio es simulado, pero los resultados no concuerdan con la realidad, el modelo es inservible para un análisis de eficiencia energética. La calibración que ofrece BCORE aproxima el resultado partiendo de datos reales conocidos del edificio (temperaturas o consumos). Este proceso se realiza de forma automática utilizando la herramienta de optimización GenOpt, que, a través de un algoritmo de búsqueda, genera la opción de calibración óptima.

En la Figura 2-IV se resume el proceso de mejora energética de un edificio a través de la aplicación BCORE.

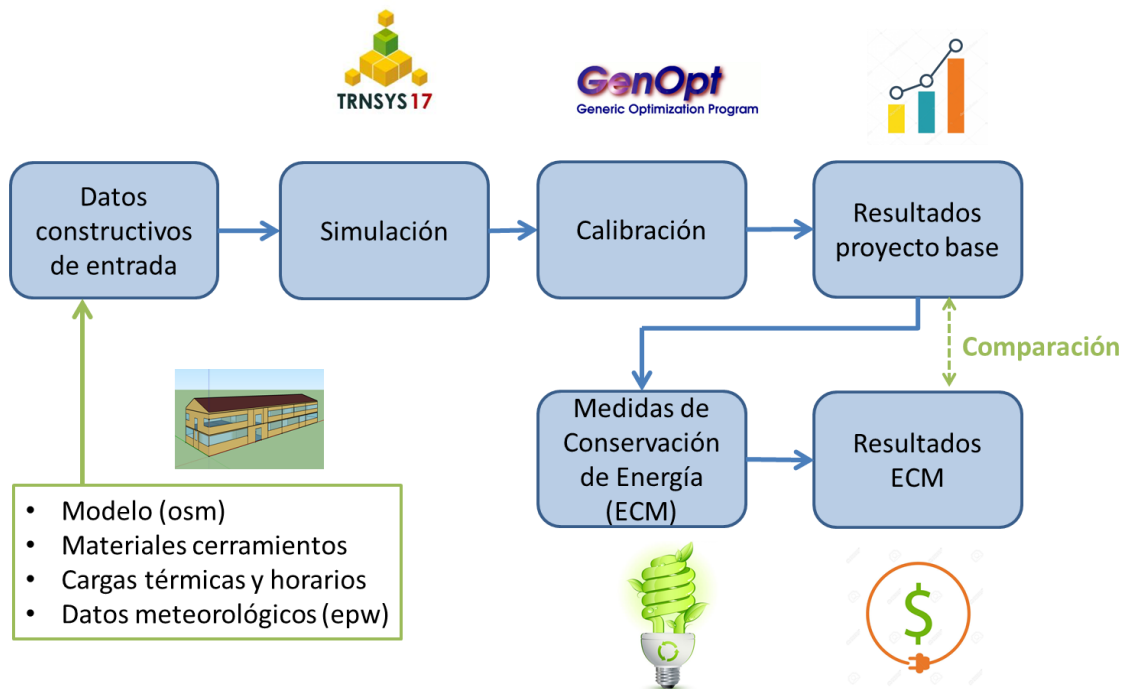


Figura 2-IV Diagrama funcionamiento BCORE

2.3.3 GenOpt

Calibrar los resultados de una simulación manualmente es un proceso complejo, costoso, y que requiere mucho tiempo, variando los datos de entrada y comparando varios resultados. Sin embargo, existen formas para hacerlo de forma automática con gran sencillez.

Como se ha visto en el apartado anterior, GenOpt [21] es un programa de optimización, para funciones de coste que se utiliza dentro de la herramienta BCORE. El programa contiene una librería de algoritmos de optimización y también permite la creación de nuevos. Es posible calibrar cualquier simulación realizada con programas que utilicen ficheros de texto como datos de entrada y datos de salida, en cualquier sistema operativo con soporte para Java.

Para realizar la optimización, GenOpt automáticamente crea los datos de entrada para el programa de simulación; después, comienza la simulación y comprueba posibles errores; al finalizar la simulación comprueba el valor de la variable que se desea optimizar y determina nuevos valores de entrada para otra simulación. Este proceso se repite iterativamente hasta llegar al mínimo de la función de coste y durante el proceso la interfaz muestra los resultados intermedios.

En la Figura 2-V se muestra un ejemplo de la interfaz que muestra GenOpt durante una optimización, en la parte derecha se muestra el progreso de la optimización y a la izquierda las series de datos de entrada.

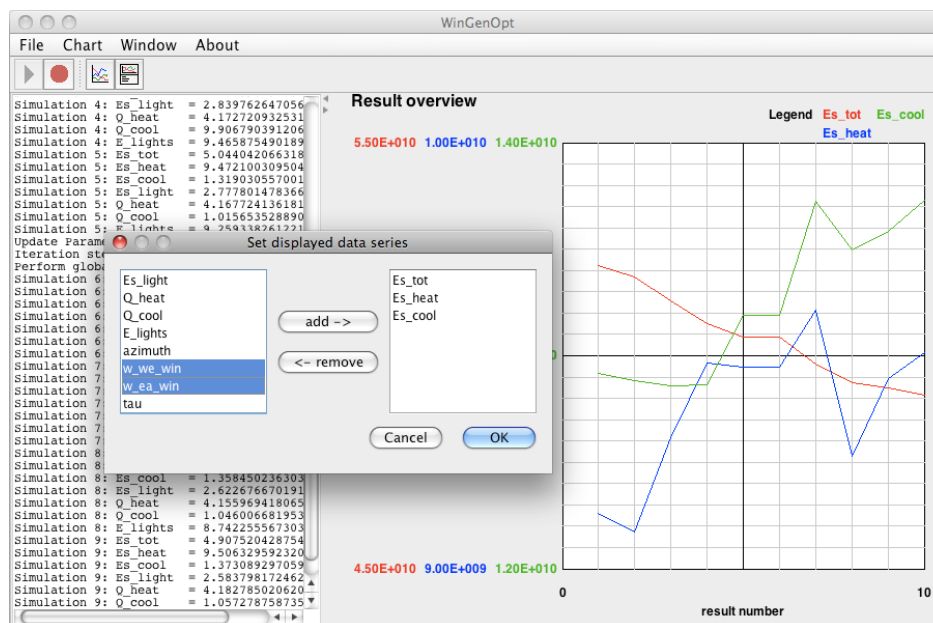


Figura 2-V Ejemplo de Optimización en Genopt (Web de GenOpt [21])

2.3.4 SketchUp y OpenStudio

SketchUp es una herramienta de diseño gráfico en tres dimensiones para entornos de edificación. La característica principal de este software es la sencillez y eficiencia para el diseño. Además se trata de un software libre y que incluye una biblioteca de elementos predefinidos. [22]

Pero este no es un programa de eficiencia energética, sino de diseño estructural. Sin embargo, si se utiliza SketchUp con el *plugin* de OpenStudio [23], es posible definir una geometría que incluye información de zonas térmicas. Esta herramienta complementaria, desarrollada por el Laboratorio Nacional de Energías renovables de EEUU, es un software también libre. Este *plugin* nos permite la creación de zonas térmicas dentro del propio entorno de SketchUp, al finalizar se obtiene un fichero en formato OSM, con el que es posible trabajar con la herramienta BCORE.

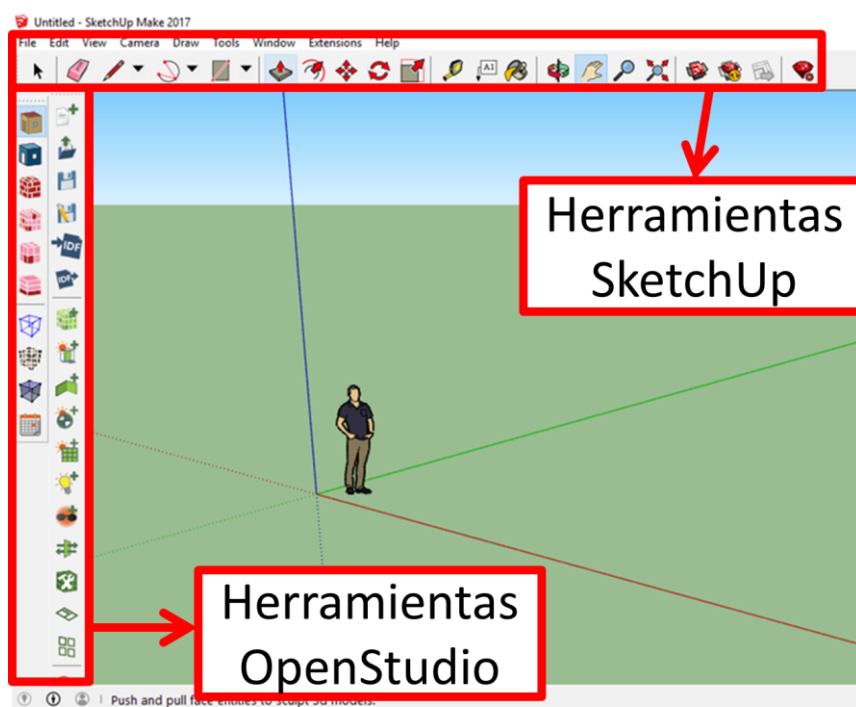


Figura 2-VI Interfaz SketchUp con *plugin* de OpenStudio

3 DESARROLLO DEL TFG

El apartado de desarrollo comprende la descripción detallada de todos los pasos realizados con la meta de cumplir los objetivos establecidos. Se comenzará por definir la metodología propuesta, desarrollando esta con ayuda de esquemas explicativos. Más adelante se detallará el proceso de modelado energético y simulación hasta la obtención de resultados.

3.1 Metodología propuesta para la mejora energética

En este sub-apartado se describe de manera genérica el proceso seguido para la consecución de los objetivos planteados en el apartado 1.3, para ser desarrollado detalladamente entre los sub-apartados 3.2 y 3.5.

El proceso de mejora del rendimiento energético comienza por reunir toda la información necesaria, que será usada como datos de entrada en el software. Por consiguiente, hubo que reunir los siguientes datos:

- Geometría del edificio: a través de planos formato AutoCAD, y para el grosor de paredes y ventanas comprobado físicamente.
- Detalles constructivos: en concreto materiales de los cerramientos¹ y huecos².
- Datos meteorológicos: se hizo uso de un fichero meteorológico en formato específico.
- Datos de cargas térmicas: es preciso conocer datos de ocupación, equipos eléctricos, e iluminación; tanto cantidad de cada uno de estos parámetros a lo largo del tiempo, e intensidad de calor que aportan.

Habiendo reunido todos estos datos, se puede pasar al modelado del edificio. Se ha de comenzar por un diseño únicamente geométrico, que no incluye información energética. Para esta primera fase se utiliza el programa informático SketchUp Make con el *plugin* de OpenStudio, obteniendo finalmente un modelo en formato OSM.

¹ Cerramientos: En construcción y arquitectura, son el conjunto de paredes, techos y suelos de un edificio, y que conforman su estructura.

² Huecos: Los huecos son el conjunto de puertas y ventanas de un cerramiento.

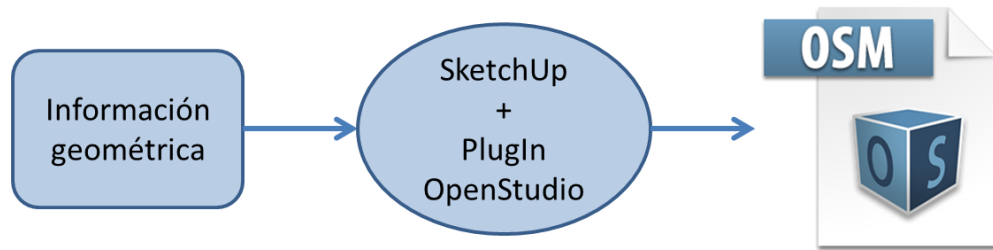


Figura 3-I Esquema diseño geométrico

El siguiente paso en el proceso es realizar el modelado, a partir de este punto se trabajará exclusivamente con la aplicación BCORE donde se utilizarán como datos de entrada los siguientes:

- Fichero OSM.
- Fichero meteorológico.
- Materiales y grosores de cerramientos y huecos.
- Horarios y cargas térmicas correspondientes a ocupación, iluminación y equipos.

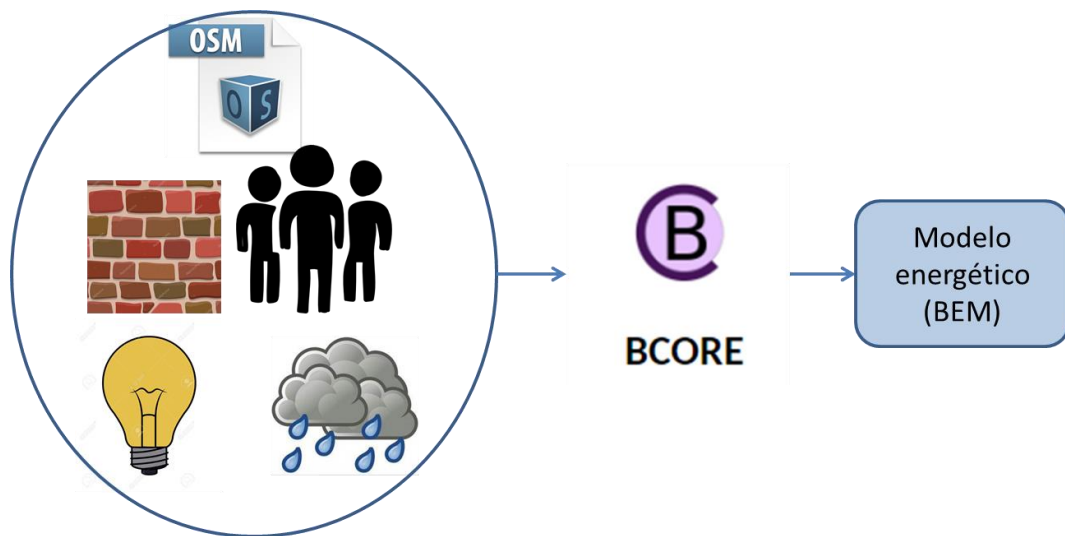


Figura 3-II Esquema modelado energético

Seleccionados todos los parámetros del modelo energético, se procede a la calibración en la propia aplicación de BCORE, apoyándose en TRNSYS como motor de cálculo para la simulación y en GenOpt como motor de optimización, para obtener un modelo energético más preciso a través de la calibración.

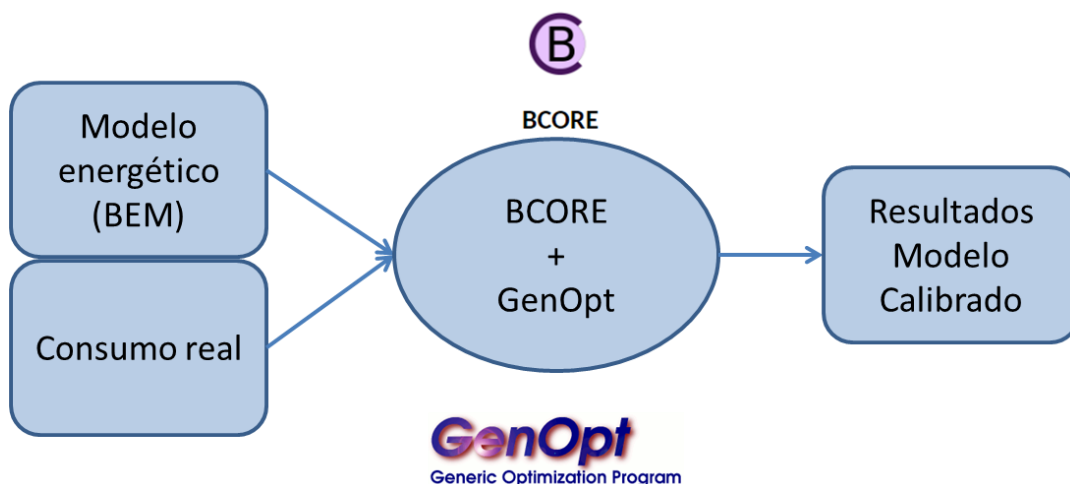


Figura 3-III Esquema Calibración

Una vez realizada la calibración se pueden analizar los resultados de consumos y temperaturas. Además, se puede proceder al siguiente paso, que consiste en crear diferentes ECM y realizar una simulación del modelo con las mejoras incorporadas.

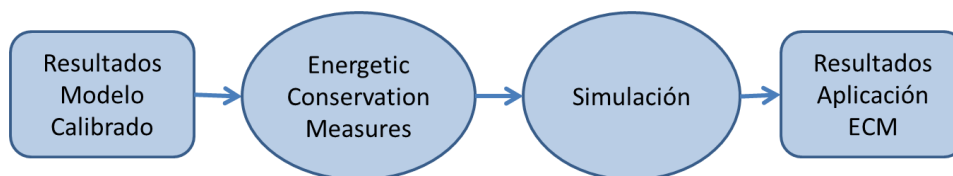


Figura 3-IV Esquema aplicación Energy Conservation Measure

Llegados a este punto ya se dispone de todos los resultados necesarios, es posible comparar las distintas ECM, estimar el coste que suponen y evaluar cuál de ellas aporta más beneficio energético y económico. Cada uno de estos pasos será descrito con detalle en los sub-apartados 3.2 al 3.5

3.2 Descripción del edificio Isaac Peral

3.2.1 Ubicación

El edificio Isaac Peral, está ubicado en el interior de la Escuela Naval Militar en Marín, en la provincia de Pontevedra. La Escuela Naval Militar (ENM), es el centro de formación para los futuros oficiales de la armada española.

Es necesario destacar la proximidad al mar, y la elevación por encima de este, prácticamente nula como factores importantes para el estudio. Además tiene una orientación Norte-Sur. En la Figura 3-V se muestra la ubicación de la Escuela Naval, y el emplazamiento del Isaac Peral dentro de la misma.

3.2.2 Descripción

En su día a día, los alumnos de la Escuela Naval Militar tienen una intensa jornada en la que asisten a diversas actividades. Entre ellas, las clases ocupan gran parte de la rutina. El edificio Isaac Peral acoge muchas de las aulas y laboratorios de este centro de formación.



Figura 3-V Ubicación de la Escuela Naval Militar (Google Maps)

Este edificio fue construido en 1959, y originalmente contenía “Talleres y Aulas para Monturas de Máquinas y Motores” según planos originales [24] consultados en la realización del trabajo. Más tarde, en 1979 el edificio fue reformado, convirtiéndose en el edificio que es hoy, y que se muestra en la Figura 3-VI.



Figura 3-VI Fotografía exterior edificio Isaac Peral

El edificio consta de dos plantas y un bajo cubierta a dos aguas, aloja 12 aulas, 2 aseos en cada planta, 5 laboratorios y una zona de despachos. Tiene una entrada principal y varias puertas secundarias. Cuenta con numerosas ventanas en todos sus espacios.

Las paredes exteriores tienen un grosor de 45cm, y están compuestas de ladrillo simple y hormigón, mientras que las interiores tienen un grosor de 22cm. Las ventanas y puertas exteriores están conformadas por cristal monolítico, es decir, de una sola lámina de vidrio.



Figura 3-VII Fotografía puerta principal edificio Isaac Peral

En cuanto al sistema de calefacción, el edificio cuenta con un sistema de caldera simple y distribución mediante radiadores ubicados en los diferentes espacios. En concreto una caldera FERROLI modelo Prextherm de 400 kW. Para la impulsión de calefacción existe una bomba Wilo S-65 y una Wilo S-35. Además el edificio cuenta con un sistema de contaje de energía. No posee sistema de refrigeración ya que no es necesario debido a su ubicación.

3.3 Modelado energético del edificio

En este sub-apartado se explica el proceso seguido para obtener el modelo energético del edificio, primero definiendo la geometría en SketchUp y después las cargas térmicas en BCORE.

3.3.1 Geometría

Para la posterior simulación, era necesario partir de un modelo de diseño CAD, para ello se utilizó el software libre SketchUp Make, en su versión de 2017, añadiendo el *plugin* de Open Studio para el diseño de zonas térmicas, compatibles con BCORE.

Para el diseño con SketchUp, se ha utilizado como referencia un plano en formato AutoCAD, ver Anexo VI. A continuación se explican los pasos seguidos.

Para comenzar se abre el programa SketchUp Make y en el menú superior, haciendo click en “*Extensions*” se activa el “*OpenStudio plugin*” (Figura 3-VIII). De esta manera, se podrá guardar el diseño con formato OSM, y será compatible con BCORE.

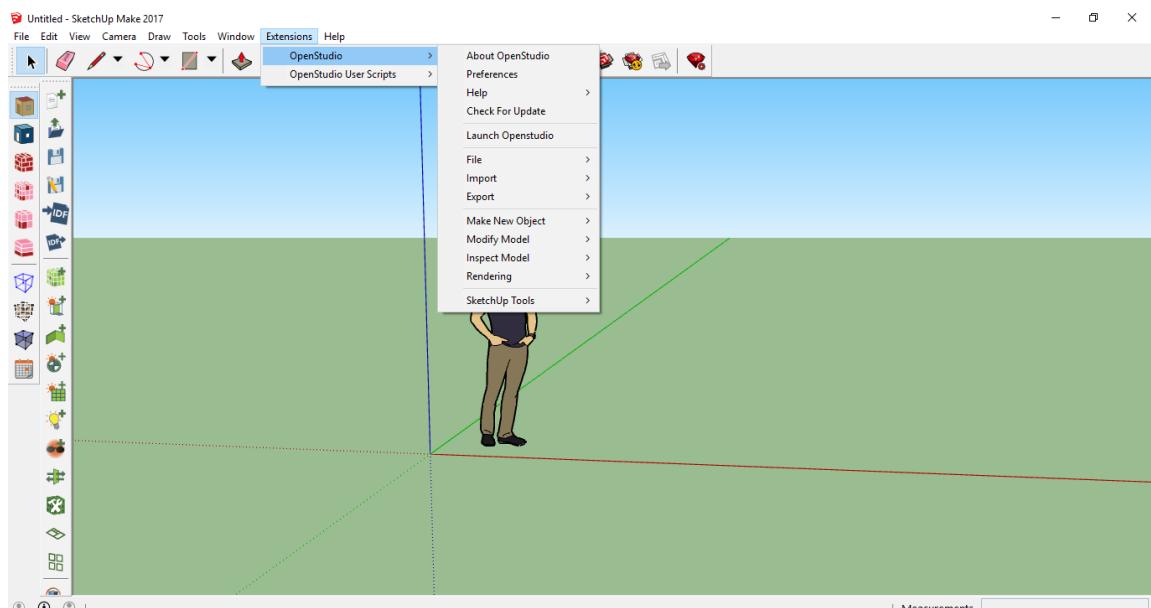


Figura 3-VIII Activar *plugin* OpenStudio

Se comienza a trazar el diseño de la planta, utilizando la herramienta “*Lines*”, cuando 4 líneas se cierran, forman una superficie. Así teniendo en cuenta las dimensiones se dibuja la vista superior de la planta baja, la cual se muestra en la Figura 3-IX.

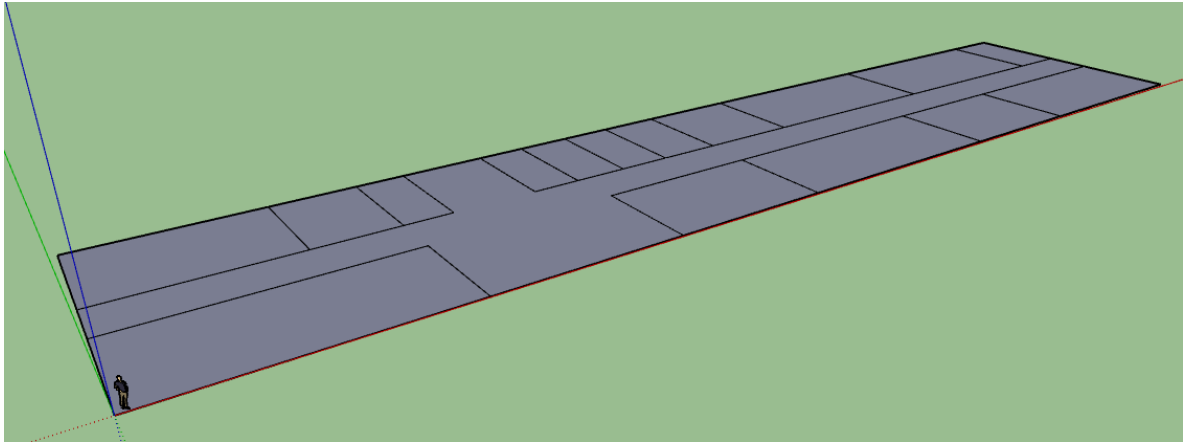


Figura 3-IX, Vista superior planta baja edificio sin proyectar

Continuando con el modelado, la siguiente acción a tomar es utilizar una de las herramientas de la barra de herramientas del *plugin* de OpenStudio, en concreto: “*Create Spaces from Diagram*”. Seleccionando la geometría diseñada en el paso anterior, esta herramienta se utiliza para proyectar las líneas en el eje vertical. El programa solicita como entrada la altura que se desea proyectar, en este caso 4 metros, y de esta manera queda diseñada la planta baja (Figura 3-X).

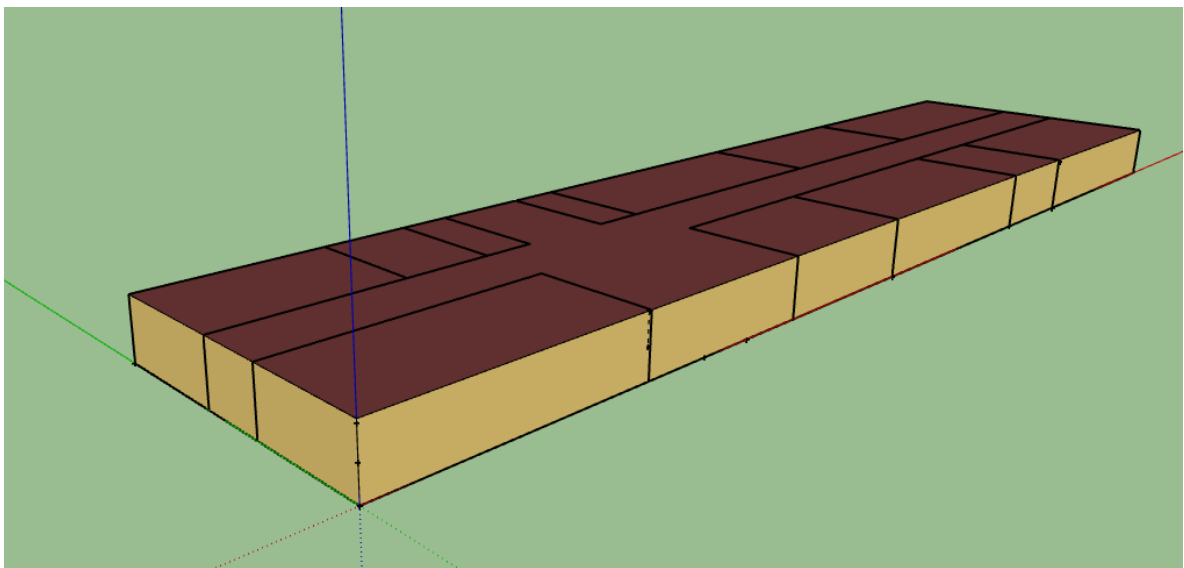


Figura 3-X Planta baja

Para modelar la primera planta se procede de igual manera, primero trazando las líneas que serán las futuras paredes y a continuación, proyectándolas con la herramienta “*Create Space from Diagram*”. Finalmente, para crear el conjunto del tejado, basta con trazar una línea media en plano longitudinal de la segunda planta y volver a ejecutar la herramienta “*Create Space from Diagram*”. Este resultado queda plasmado en la Figura 3-XI.

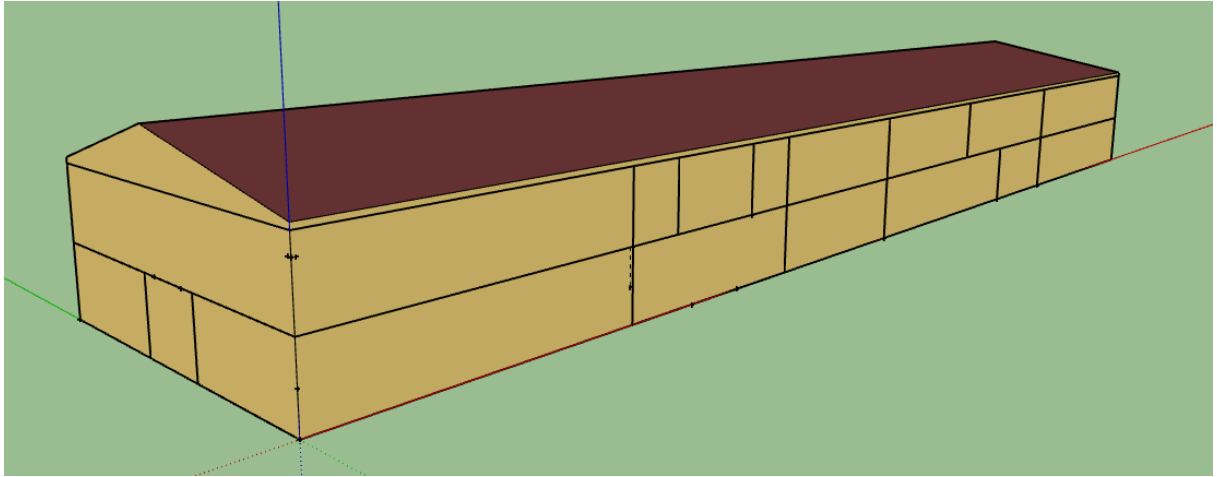


Figura 3-XI Edificio completo sin huecos

A continuación se han de introducir los huecos (ventanas y puertas), para completar el modelo geométrico. Para esto, de nuevo haciendo uso de la herramienta “*Lines*”, simplemente dibujando la geometría de los huecos en las superficies de las paredes ya quedan definidos como ventanas (Figura 3-XII).

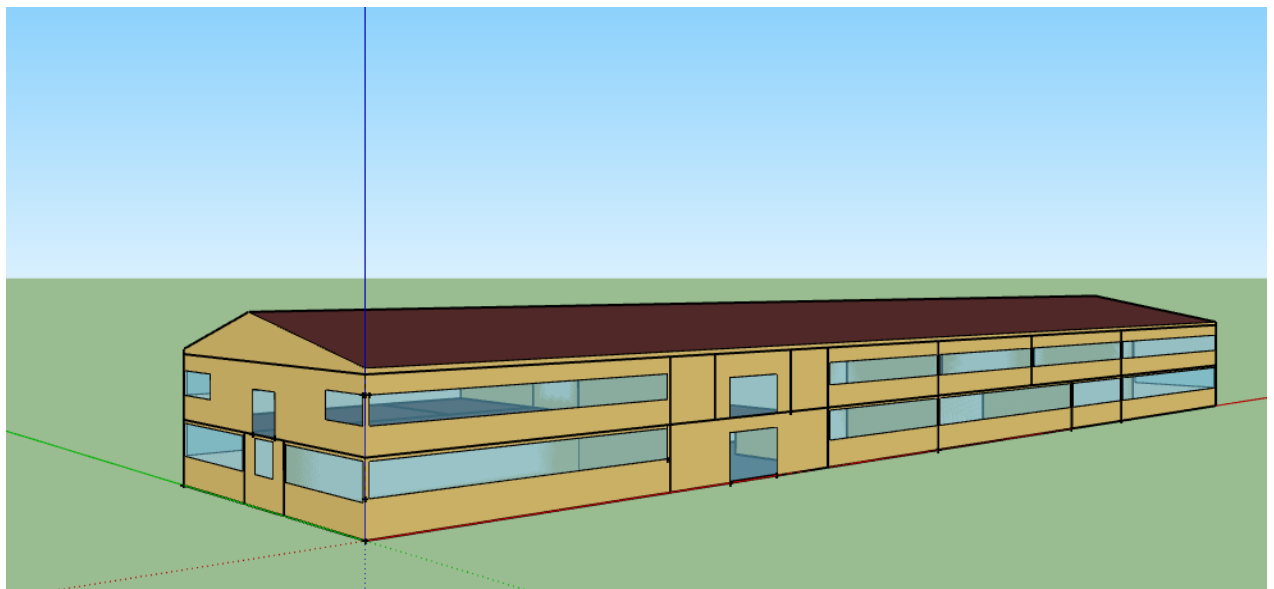


Figura 3-XII Edificio completo, en SketchUp + OpenStudio

El último paso consiste en utilizar las herramientas “*Intersect*” y “*Match*”, seleccionando todo el edificio, para unir las superficies adyacentes y que se comporten como una única superficie. Por ejemplo para que el suelo de la primera planta y el techo de la planta baja sean vistos por el programa como un único elemento y no dos. Este es el último paso a realizar en este programa, solo queda guardar el modelo con formato OpenStudio Model (.OSM).

El hecho de haber utilizado el *plugin* de OpenStudio implica que los diferentes espacios ahora son zonas térmicas diferenciadas. Las zonas térmicas son la unidad básica en el modelado de edificios. Es una habitación o conjunto de habitaciones con las mismas condiciones energéticas.

En el diseño se realizan ciertas simplificaciones que no afectan significativamente al rendimiento térmico del edificio:

- Introducir todos los despachos en una sola zona térmica, reduciendo el número de zonas térmicas para el posterior estudio, lo cual simplifica los cálculos de simulación y permitirá que los resultados se presenten más claramente.

- Unificar las ventanas en hilera como una única ventana longitudinal, apenas no tiene efecto sobre el resultado pero simplifica el diseño y la simulación.

3.3.2 Diseño completo del modelo energético

BCORE es un software que permite llevar a cabo simulaciones energéticas de edificios, trabaja con TRNSYS como motor de cálculo. Integra múltiples utilidades: modelado, simulación, calibración e implementación de medidas de ahorro de energía ECM (*Energy Conservation Measures*). Todo lo anterior, con una interfaz sencilla e intuitiva.

El software BCORE, nos permite elegir todos los parámetros que se requieren para la simulación:

- Materiales y grosor de los muros y huecos (ventanas y puertas)
- Horarios y cargas térmicas correspondientes a ocupación, iluminación y utilización de equipos.
- Tipo de infiltraciones.³
- Tipo de sistema de calefacción y sistema de distribución.
- Orientación angular del edificio.

Parámetros generales

Para comenzar con el diseño, se establecen los “Parámetros generales”. En esta sección se debe elegir la orientación del edificio y determinar las plantas existentes. Se establece que existen tres plantas, incluyendo el tejado como la tercera, y se establece el “Ángulo de giro” a 270°, ya que en SketchUp el edificio no tenía la orientación Norte-Sur que el edificio tiene realmente.

BCORE (VERSION 9.3) Proyecto calibrado01 (edificio completo os.osm)

Inicio Edificio Simulación Calibración M.C.E. Resultados

Parámetros generales Materiales Muros Huecos Zonas Grupos Elementos Horarios Sistemas de producción Sistemas de distribución

Plantas

Introduzca las plantas del edificio :

Planta	Altura media de la planta sobre el terreno (m)
Planta baja	2
Planta primera	6
Tejado	8

+

-

Orientación

Ángulo de Giro:

270 °

Figura 3-XIII Parámetros generales BCORE

³ Infiltraciones: Pérdidas de calor en un edificio, mediante la entrada de aire exterior no deseadas a través de juntas de cierre de huecos y rendijas.

Parámetros constructivos

En la siguiente sección, “Materiales”, el software permite seleccionar materiales estandarizados de su biblioteca o crear nuevos materiales. Aunque el edificio contiene muchos más materiales, por sus cantidades se determina que se puede simplificar con los siguientes:

- Ladrillo simple
- Hormigón
- Losa
- Aislamiento de tejado

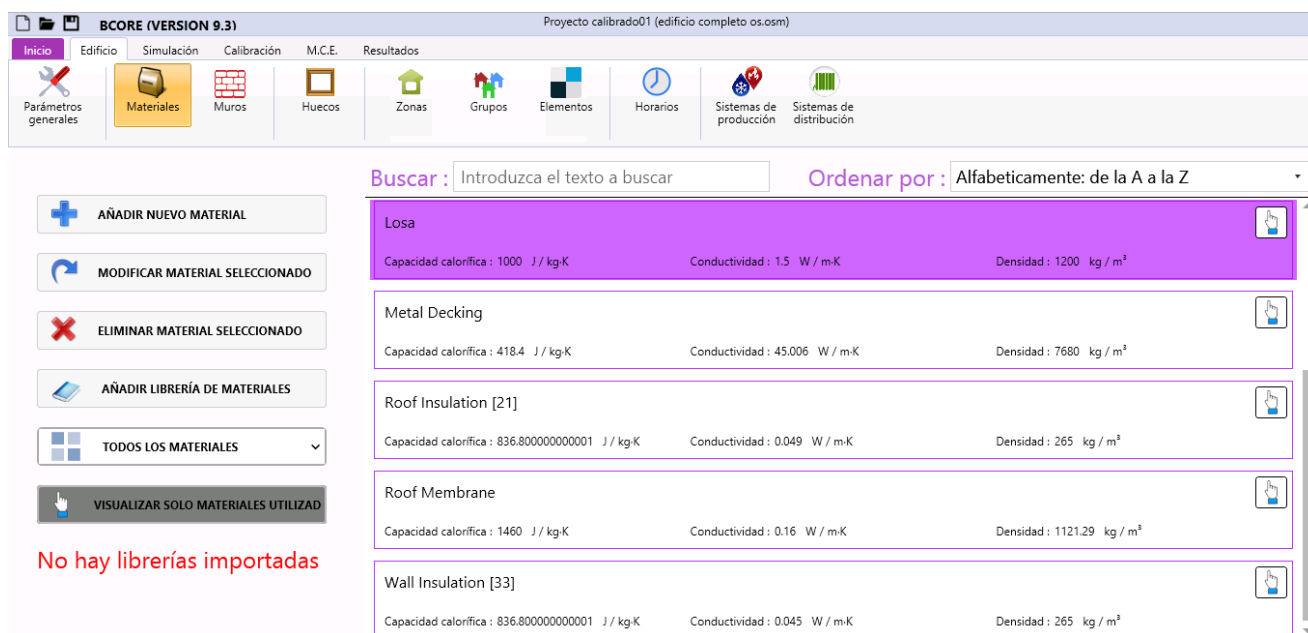


Figura 3-XIV Sección materiales BCORE

La siguiente ventana es “Muros”, en ella se deben especificar las características de todas las paredes, suelos y techos que conforman el edificio, estableciendo los grosores, y materiales. A cada pared se le asigna el grosor correspondiente, que fue consultado en el Pliego de Condiciones y comprobado in situ, además se le asignan los materiales. Para corroborar estos materiales, se consulta el Pliego de condiciones técnicas para obras de edificación, del entonces ministerio de marina [25].

Una vez establecidos estos parámetros, se mostrará la transmitancia⁴ de cada muro (denominado U-Value en el programa). En la Tabla 3-1 se muestran las transmitancias de las distintas superficies.

Muro	Transmitancia W/(m²K)
Pared exterior/fachada	1,363
Pared interior	2,455
Suelo en contacto con el terreno	2,393
Suelo interior	1,096
Tejado	1,558

Tabla 3-1 Muros y transmitancias

⁴ Transmitancia: La transmitancia térmica en la envolvente constructiva, es la medida de calor que fluye por superficie y unidad de tiempo a través de un sistema constructivo formado por una o varias capas, cuando existe diferencia de temperatura entre los espacios que separa, se mide en W/(m²K).

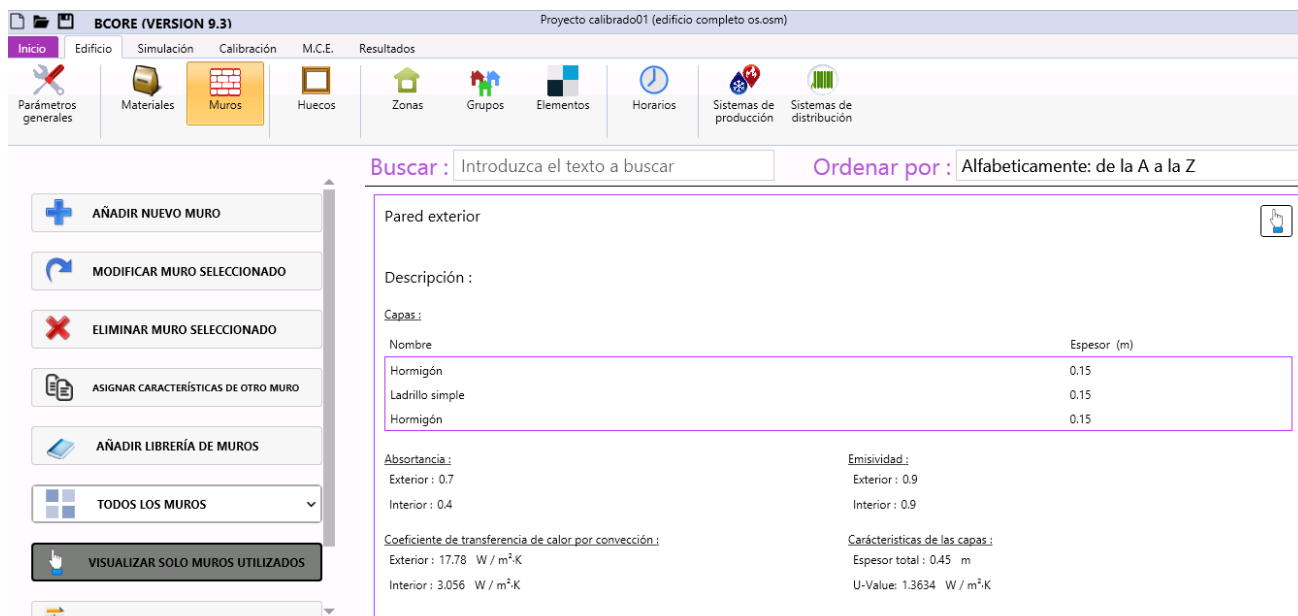


Figura 3-XV Sección Muros BCORE

Posteriormente se debe especificar el tipo de acristalamientos. En el caso de nuestro edificio todos los huecos están conformados por vidrio monolítico de 6 mm, por lo que se selecciona el tipo de cristal correspondiente de la librería: “6001 planilux 6 mm”. Este vidrio posee una transmitancia de 5,96 W/m² K.

Cargas térmicas

Seleccionados los parámetros constructivos, el siguiente paso es establecer las cargas térmicas en la sección “Zonas” donde aparecen diferentes ventanas: infiltraciones, ocupación, iluminación, equipos y calefacción como se puede ver en la Figura 3-XVI.



Figura 3-XVI Captura de pantalla menú software BCORE

Para cada zona térmica, se deben determinar la potencia y los horarios de todos estos parámetros:

- **Ocupación:** dada la complejidad y en parte, aleatoriedad de la ocupación real de cada aula, se establece una simplificación. Se supone que en cada aula o laboratorio hay una ocupación de 20 personas durante el periodo lectivo (de 09:00 a 14:00 y de 16:00 a 19:00), y que no hay ocupación el resto del tiempo. Se realiza una distinción entre las aulas en las que se realizan exámenes, y en las que no, ya que en las primeras, la ocupación es cuantitativamente más elevada en época de exámenes.

Los parámetros que determinan la energía calorífica que una persona aporta al ambiente son el calor sensible y el calor latente. Estos dos parámetros los definimos en base a la ISO 7730 [26] en función de la actividad específica que se realice en cada espacio térmico. Por ejemplo, en un laboratorio se emite más calor, ya que se realizan actividades que implican mayor metabolismo.

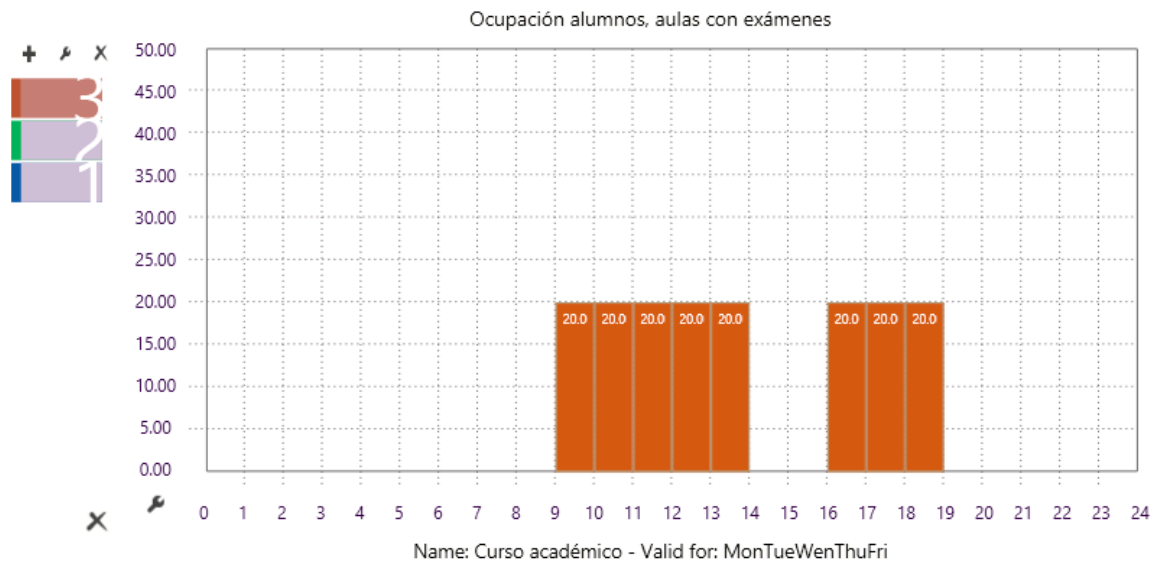


Figura 3-XVII Ejemplo de Horario de Ocupación de un aula en BCORE

- **Iluminación:** En todo el edificio se utilizan fluorescentes para la iluminación, tanto en aulas como en laboratorios. La potencia unitaria de estos fluorescentes es de 40 W. Los horarios que se fijan para la iluminación son los mismos que para la ocupación, con la diferencia de que se hacen unitarios, y a cada espacio se le añade un multiplicador que simula el número de focos lumínicos en cada zona. Este número varía entre 12 y 40 unidades, dependiendo del aula, en la Figura 3-XVIII, se muestra el ejemplo del Aula 41, donde existen 24 fluorescentes.

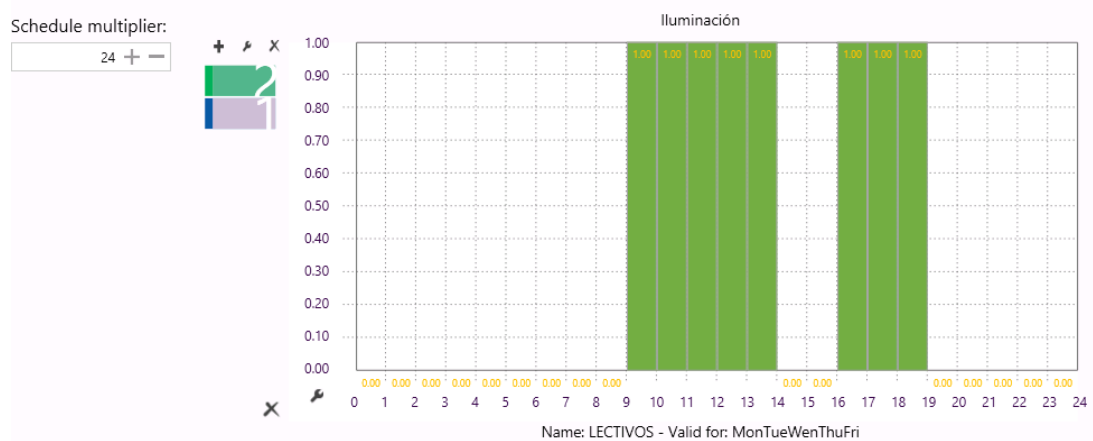


Figura 3-XVIII Ejemplo de Horario de iluminación de un aula en BCORE

- **Equipos:** Los equipos que consumen electricidad aportan gran cantidad de energía calorífica a las zonas térmicas, en el caso del edificio estudiado, los equipos que afectan notablemente a la temperatura del edificio son los ordenadores, especialmente en las aulas con gran número de estos. Para el cálculo energético se realiza la suposición de que el 100 % de los 250 W que consume cada ordenador, se convierten en energía calorífica convectiva. Como ejemplo, en la Figura 3-XIX se muestra la potencia total de los 17 ordenadores del aula 43, (4250 W) y su correspondiente horario.



Figura 3-XIX Ejemplo potencia y horario de equipos (BCORE)

- **Calefacción:** La simulación se realiza suponiendo un sistema de calefacción ideal, estableciendo un máximo de consumo de energía anual muy lejano del real, para que los resultados nos muestren el dato de demanda. Es decir, se deja el parámetro de consumo como incógnita. Esta demanda será calculada para alcanzar una temperatura de 23°C, acorde con el decreto 486/1997 modificado por última vez en 2004, Ver Anexo III.

Por último, es imprescindible escoger un archivo meteorológico en formato EnergyPlus Weather (EPW), el archivo se puede descargar de la página web de EnergyPlus, otro software de simulación energética. Este archivo es un fichero de texto, en el que cada fila corresponde a una hora concreta, y en cada columna se detalla un parámetro meteorológico. El archivo escogido es el de Pontevedra, esta ciudad se encuentra a solo 6 km de Marín, por lo que los datos meteorológicos son perfectamente válidos. En la ventana de “Resultados” se pueden comprobar los datos meteorológicos aportados por este archivo, como por ejemplo la temperatura máxima y mínima en la Figura 3-XX, o la radiación en la Figura 3-XXI.

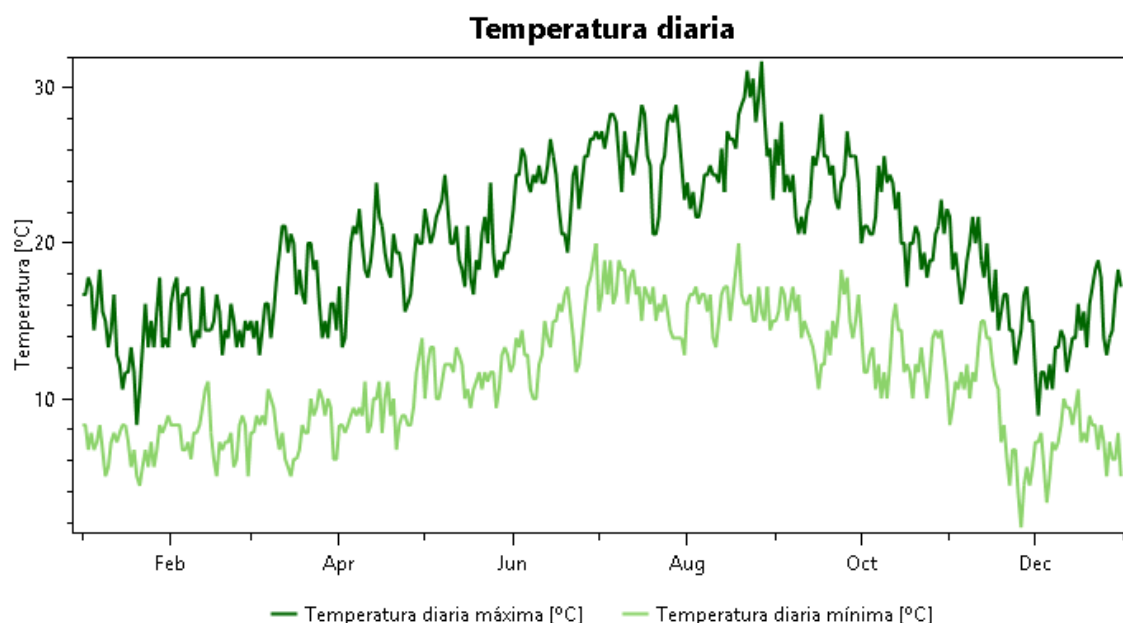


Figura 3-XX Temperaturas diarias máxima y mínima, según archivo EPW, presentado por BCORE

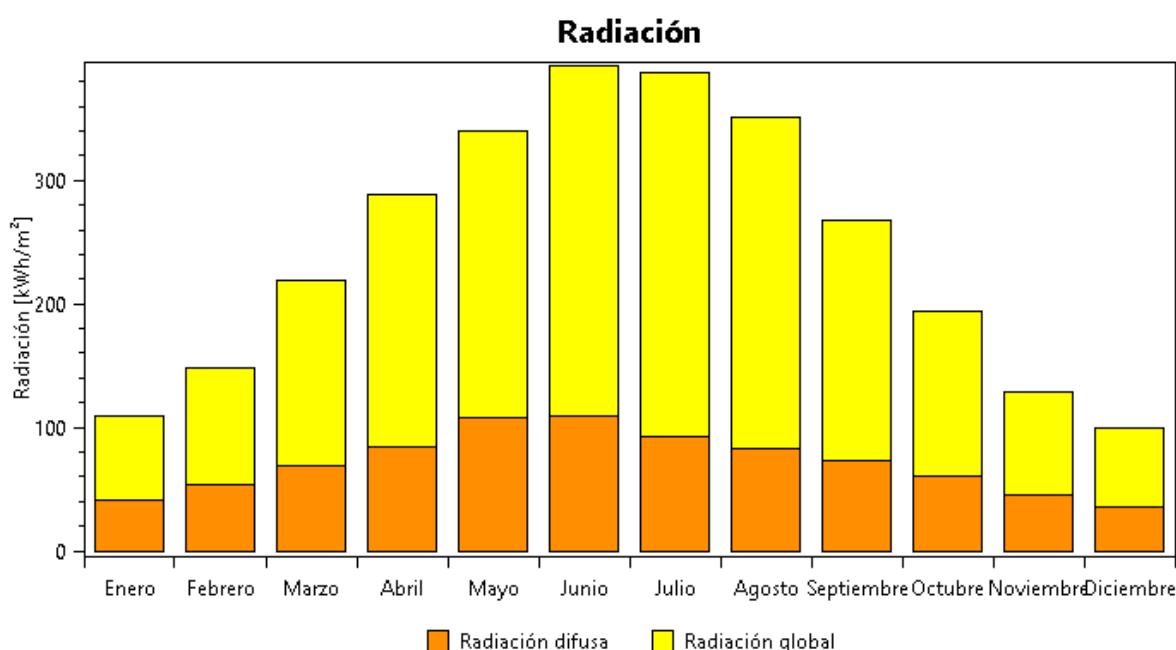


Figura 3-XXI Radiación en Pontevedra, según archivo EPW, presentado por BCORE

3.4 Simulación y calibración energética del modelo

En este apartado se define el proceso mediante el cual se realizaron las primeras simulaciones, y más tarde se calibró el modelo para finalmente, realizar la simulación del modelo calibrado.

3.4.1 Primeras simulaciones

Con el modelo energético ya definido, el siguiente paso es hacer las primeras simulaciones. Para ello se selecciona el periodo durante el que se desea simular, y los *outputs* o variables de salida que deseamos obtener, en este caso, temperaturas y balance energético. El periodo seleccionado para la simulación es desde el 1 de enero de 2018 hasta el 31 de diciembre de 2018, ya que, para la posterior calibración se dispone de datos de consumo reales detallados de este periodo. Además, se debe marcar

en el calendario los días festivos, consultando el calendario académico del año 2017-2018 y 2018-2019. Esto es importante ya que en los horarios de ocupación, iluminación y equipos se ha tenido en cuenta la existencia de días festivos.

Ubicación de los ficheros

Ubicación de los ficheros de salida:

Ubicación del archivo de datos meteorológicos:

Duración de la simulación

INICIO
 Día: Hora: + -

FIN
 Día: Hora: + -

TIME STEP
 Seleccione un valor en horas: + -

TIME BASE

Calendario de festivos

Enero de 2018

L	M	Mi	J	V	S	D
1	2	3	4	5	6	7
8	9	10	11	12	13	14
15	16	17	18	19	20	21
22	23	24	25	26	27	28

Figura 3-XXII Parámetros simulación BCORE

Con estos parámetros se ejecuta la simulación, obteniendo resultados de temperaturas y demanda energética, para el edificio completo y por zonas, que se mostrarán en el apartado 4.1.

Al haber escogido como sistema de producción un sistema de calefacción ideal, y haber establecido como temperatura objetivo 23°C, el software calculará la demanda energética necesaria en cada momento para alcanzar esta temperatura.

Los resultados de esta primera simulación son una buena aproximación pero todavía no ofrecen exactitud suficiente para tomarlos como un modelo preciso del comportamiento energético del edificio

3.4.2 Calibración del modelo

Como se ha visto en el apartado anterior, para que el modelo energético sea más realista, es necesario realizar una calibración. Esto es posible gracias a la calibración que nos ofrece BCORE, basándose en el programa de optimización GenOpt.

Para la calibración se requiere disponer de datos reales del edificio, en el caso del Edificio Isaac Peral, se dispone de los datos reales mensuales de consumo de gas natural en kWh del año 2018, que se muestra en la Figura 3-XXIII, proporcionada por la oficina de mantenimiento de la Escuela Naval Militar.

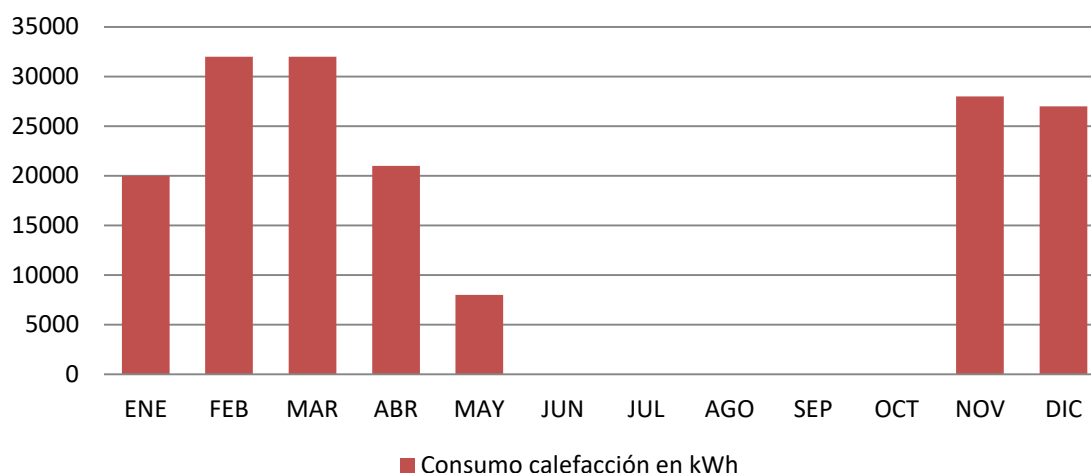


Figura 3-XXIII Factura consumo 2018

Seleccionado este dato, se procede a la calibración, para la que se deben elegir los parámetros que se desean calibrar. Se realizaron varias calibraciones de prueba, calibrando diferentes parámetros y analizando los resultados, en concreto probando los siguientes:

- Infiltraciones en todo el edificio.
- Ocupación en aulas ocupadas.
- Iluminación en todo el edificio.
- Combinación ocupación e iluminación.
- Equipos en aulas con ordenadores.
- Combinación infiltraciones, ocupación y equipos.

Se comprueba que calibrar los parámetros de equipos o iluminación tiene un efecto bajo sobre el cómputo de demanda energética. Calibrar el parámetro de ocupación tiene un efecto algo mayor sin llegar a ser significativo, y sin embargo calibrar las infiltraciones tiene un efecto mayor, lo que indica la poca estanqueidad del edificio, seguramente por su antigüedad y calidad de ventanas.

Analizando los diferentes resultados de las calibraciones se decide calibrar conjuntamente los parámetros de infiltraciones, ocupación y equipos. Las infiltraciones se calibran en todas las zonas; los equipos solamente en las aulas 43, 44, 50 y laboratorio de electricidad, por ser los espacios en los que los equipos son relevantes; finalmente, la ocupación se calibra para todos los espacios, a excepción de pasillos, aseos y despachos. La justificación de calibrar dichos parámetros es la siguiente:

- El horario de ocupación escogido ha sido una aproximación, ya que el horario real es sumamente complejo y está sujeto a cambios semanales.
- El horario escogido para los equipos contempla más horas de utilización que las reales, ya que se supone que están activos durante todo el horario de clases, pero esto no sucede de esta manera habitualmente.
- Las infiltraciones son difíciles de determinar, el único valor que se les dio al diseñar el edificio era elegir entre edificio muy estanco, edificio estanco o edificio poco estanco. La razón de esta generalización es la imposibilidad de determinar numéricamente el valor de pérdida de calor a través de las infiltraciones, sin realizar un estudio en profundidad.

De esta forma, al realizar la calibración se establecen unos valores máximos y mínimos para los coeficientes que multiplicarán a estos parámetros, y harán que la simulación se ajuste al valor real, estos coeficientes se establecen en 0,5 de mínimo y 2 de máximo.

Durante el proceso de calibración se muestra la Figura 3-XXIV, donde se puede seguir el proceso de iteración de simulaciones que el software realiza basándose en GenOpt para calcular los coeficientes que multiplican los parámetros.

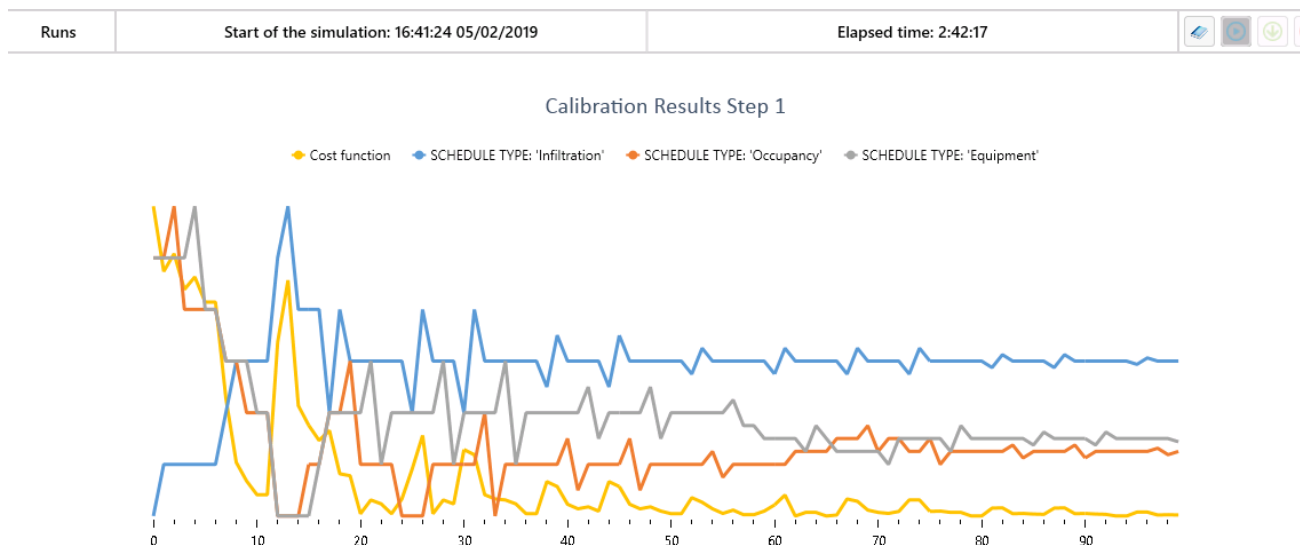


Figura 3-XXIV (Proceso Iteraciones BCORE)

Una vez finalizada la calibración, se pueden cargar los resultados de la misma, en forma de gráficas de temperaturas y demandas; estos resultados se encuentran en el sub-apartado 4.2.

3.5 Propuesta de medidas de ahorro y su simulación

Una vez calibrado el modelo energético, es posible simular el efecto que tendría aplicar medidas de conservación de energía (ECM). En este aspecto BCORE ofrece la posibilidad de simular múltiples tipos de mejoras:

- Orientación del edificio, que en este caso carece de sentido, pero para proyectos en fase de diseño es una opción viable.
- Cambiar materiales de los cerramientos o incluir nuevos muros con materiales nuevos.
- Cambiar los vidrios de los acristalamientos, esta medida suele tener una buena relación beneficio-coste.
- Modificar los horarios de ocupación, para el edificio en cuestión es relativamente complicado, ya que implicaría cambiar el horario en el que se imparten las clases, y existe poco margen de cambio.

Considerando estas alternativas ofrecidas por el software, en los siguientes apartados se proponen diferentes ECM.

Para calcular el coste que supondría implementar las medidas de ahorro energético, se ha recurrido a la herramienta *Generación de precios para la Construcción* [27]. Esta herramienta online de libre acceso está desarrollada por la empresa CYPE, especializada en el diseño de software para arquitectura, ingeniería y construcción.

En la web generadora de precios se introducen todos los datos correspondientes a cada proyecto de ECM, y se genera automáticamente un documento en formato XLSX, que incluye costes de materiales y mano de obra.

3.5.1 Acristalamiento doble estándar (ECM-1)

Como se vio en el apartado 2.2.1, la sustitución de cristales simples o monolíticos por cristales dobles con cámara interior de aire es una opción aconsejable para reducir las pérdidas a través de los

huecos. En este caso se trataría de sustituir las ventanas actuales, de cristal planilux único de 6 mm, por una ventana formada por dos cristales planilux de 4 mm con una cámara interior de 6 mm de aire.

Los cristales actuales contienen una única hoja de vidrio de 6 mm, éste es el cristal que suelen tener los edificios de cierta antigüedad por defecto. La principal característica que define el aislamiento térmico de un acristalamiento es la transmitancia térmica, y para este tipo de cristales, tiene un valor aproximado de $5,9 \text{ W/m}^2 \text{ K}$, véase en Anexo II.

La primera propuesta de mejora consiste en cambiar estos cristales monolíticos por doble acristalamiento con cámara interior de aire seco. El aire contenido en la cámara posee una baja conductividad térmica, por lo que la transmitancia térmica del conjunto se reduce a $3,3 \text{ W/m}^2 \text{ K}$, para el acristalamiento más básico, compuesto por dos hojas de cristal planilux de 4 mm y una cámara interior de 6 mm.

La Tabla 3-2 muestra el presupuesto en euros requerido por metro cuadrado de acristalamiento sustituido, no se han tenido en cuenta los mantenimientos posteriores a la instalación. El precio por metro cuadrado sería 38,27 €, que para el total de $601,83 \text{ m}^2$ de ventanas en el edificio supone un total de 23032,03 €.

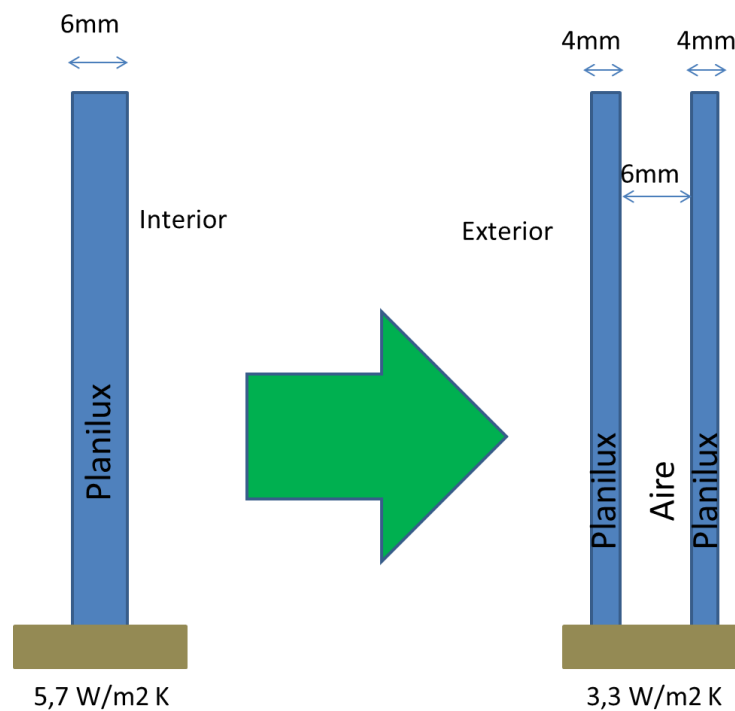


Figura 3-XXV (Esquema primera propuesta de ECM)

Unidad	Descripción	Rendimiento	Precio unitario	Importe
	Materiales			
m ²	Doble acristalamiento estándar, 4/6/4 conjunto formado por vidrio exterior Float incoloro de 4 mm, cámara de aire deshidratada con perfil separador de aluminio y doble sellado perimetral, de 6 mm, y vidrio interior Float incoloro de 4 mm de espesor; 14 mm de espesor total.	1,006	21,34	21,47
Ud	Cartucho de 310 ml de silicona sintética incolora (rendimiento aproximado de 12 m por cartucho).	0,580	3,73	2,16
Ud	Material auxiliar para la colocación de	1,000	1,26	1,26
		Subtotal materiales:		24,89
	Mano de obra			
h	Oficial 1ª cristalero.	0,344	18,94	6,52
h	Ayudante cristalero.	0,344	17,75	6,11
		Subtotal mano de obra:		12,63
	Costes directos complementarios			
%	Costes directos complementarios	2,000	37,52	0,75
		Costes directos (1+2+3):		38,27

Tabla 3-2 Presupuesto ECM-1 (Generador de precio CYPE)

3.5.2 Acristalamiento doble Bajo Emisivo (ECM-2)

La segunda propuesta de ECM, consiste en sustituir los cristales actuales, por acristalamiento doble con vidrios de baja emisividad. Este tipo de vidrios contiene una capa minúscula (del orden de nanómetros) de óxidos metálicos, que le confieren mayor aislamiento térmico. La transmitancia térmica de este tipo de acristalamientos está en el orden de 2 W/m²K. La comparación entre este acristalamiento y el doble estándar se muestra en el Anexo II.

La Tabla 3-3 muestra el presupuesto en euros requerido por metro cuadrado de acristalamiento sustituido, no se han tenido en cuenta los mantenimientos posteriores a la instalación. El precio por metro cuadrado sería 129,11 € que para el total de 601,83 m² de ventanas en el edificio supone un total de 77034,24 €.

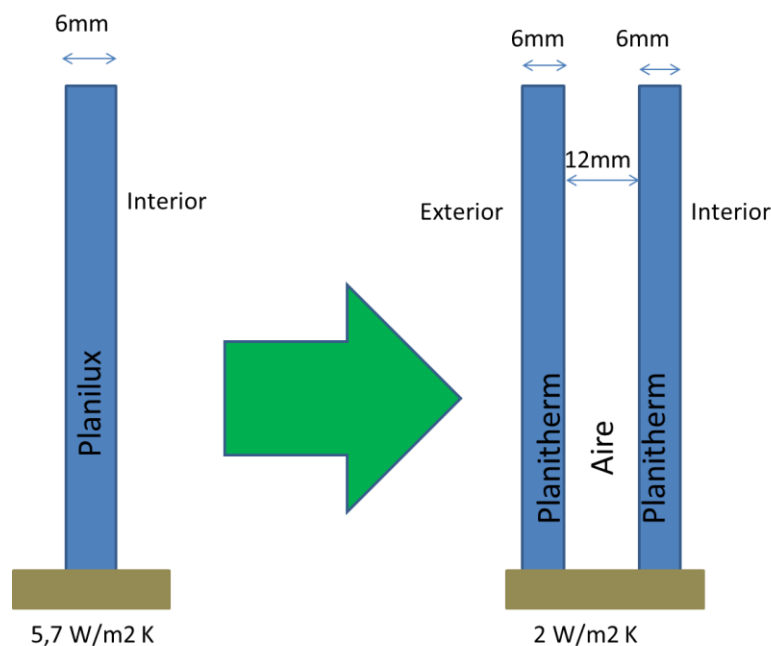


Figura 3-XXVI Esquema segunda propuesta ECM

Unidad	Descripción	Rendimiento	Precio unitario	Importe
Materiales				
m ²	Doble acristalamiento templado, de baja emisividad térmica, 4/12/6, conjunto formado por vidrio exterior de baja emisividad térmica de 4 mm, cámara de aire deshidratada con perfil separador de aluminio y doble sellado perimetral, de 12 mm, y vidrio interior templado de 6 mm de espesor; 22 mm de espesor total.	1,006	109,87	110,53
Ud	Cartucho de 310 ml de silicona sintética incolora (rendimiento aproximado de 12 m por cartucho).	0,580	3,73	2,16
Ud	Material auxiliar para la colocación de	1,000	1,26	1,26
Subtotal materiales:				113,95
Mano de obra				
h	Oficial 1ª cristalero.	0,344	18,94	6,52
h	Ayudante cristalero.	0,344	17,75	6,11
Subtotal mano de obra:				12,63
Costes directos complementarios				
%	Costes directos complementarios	2,000	126,58	2,53
Costes directos (1+2+3):				129,11

Tabla 3-3 Presupuesto ECM-2 (Generador de precio CYPE)

3.5.3 Aislamiento térmico exterior (ECM-3)

La tercera propuesta para mejorar el rendimiento energético del edificio consiste en la aplicación de un revestimiento aislante de varias capas protegido por un mortero en toda la fachada exterior a excepción de los huecos. Este método también reduce las infiltraciones y los puentes térmicos, además también ofrece cierto nivel de aislamiento acústico. Este sistema añade 12cm de grosor a las paredes del edificio y reduce la transmitancia térmica de 1,36 W/m²K a 0,28 W/m²K en todo el conjunto de paredes exteriores. En la Figura 3-XXVII se muestra el detalle por capas del aislamiento.

La Tabla 3-4 muestra el presupuesto de la instalación del aislamiento exterior, calculado por metro cuadrado de superficie. El precio por metro cuadrado es 62,8 €, que para el total de la superficie a cubrir supondría un presupuesto de 76603,21 €. También es importante destacar que este revestimiento exterior tendría un efecto visual en la fachada exterior y el aspecto del edificio cambiaría.

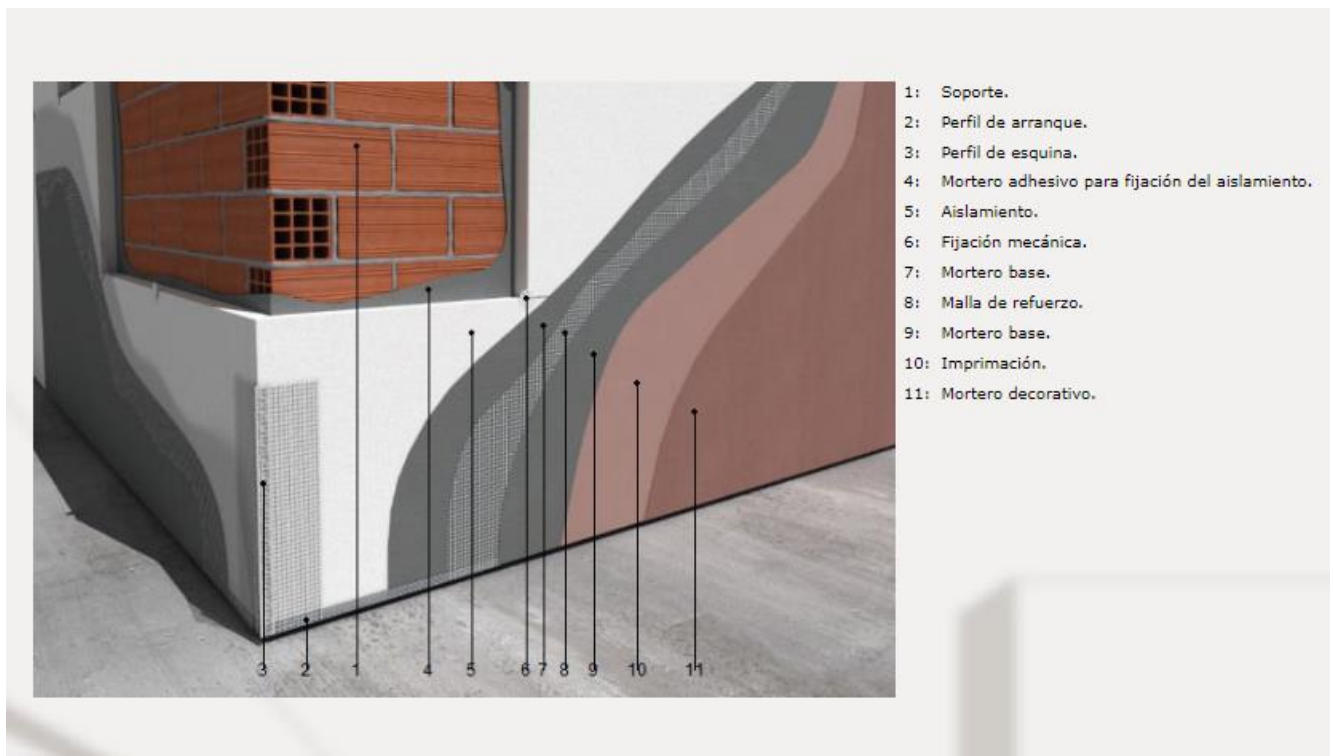


Figura 3-XXVII Detalle por capas Aislamiento Térmico Exterior (CYPE)

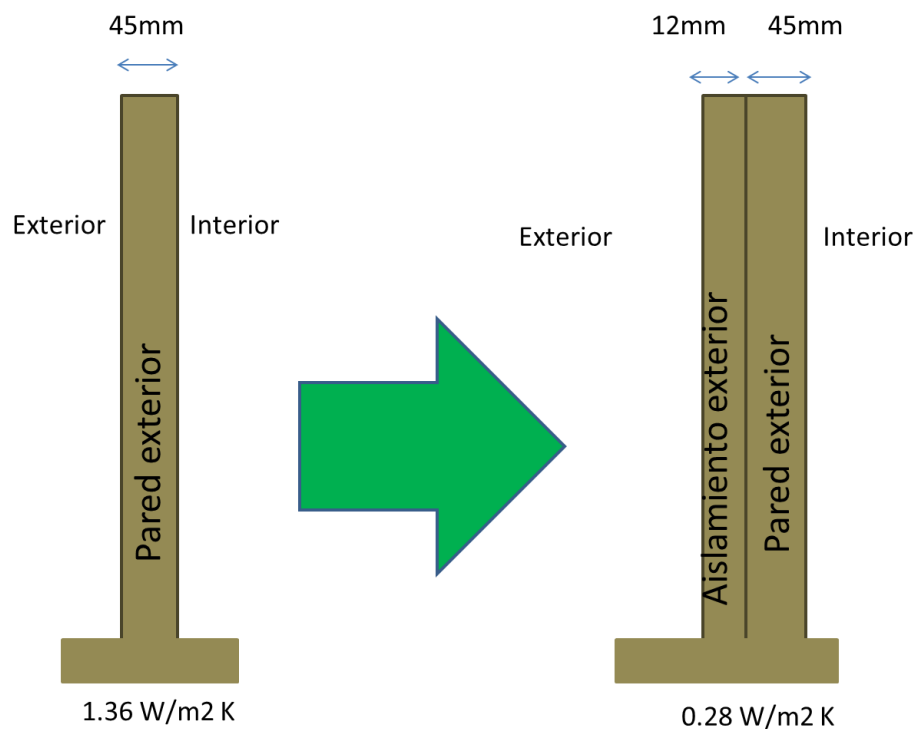


Figura 3-XXVIII Esquema tercera propuesta ECM

Unidad	Descripción	Rendimiento	Precio unitario	Importe
	Materiales			
m	Perfil de arranque Traditerm "GRUPO PUMA" de aluminio, de 60 mm de anchura, con goterón, para nivelación y soporte de los paneles aislantes de los sistemas de aislamiento térmico por el exterior sobre la línea de zócalo.	0,170	5,53	0,94
m	Perfil de cierre superior, Traditerm Coronación "GRUPO PUMA", de aluminio, de 60 mm de anchura, para coronación de los paneles aislantes.	0,170	16,03	2,73
kg	Mortero Traditerm "GRUPO PUMA", impermeable al agua de lluvia, permeable al vapor de agua y no propagador de la llama, para aplicar con llana, para adherir los paneles aislantes.	10,000	0,88	8,80
m ²	Panel rígido de poliestireno expandido, Traditerm Panel EPS "GRUPO PUMA", según UNE-EN 13163, de superficie lisa y mecanizado lateral recto, de color blanco, de 60 mm de espesor, con resistencia al envejecimiento y permeable al vapor de agua, resistencia térmica 1,58 m ² K/W, conductividad térmica 0,038 W/(mK).	1,050	10,50	11,03
Ud	Taco de expansión de polipropileno Traditerm "GRUPO PUMA", de 110 mm de longitud, para fijación de placas aislantes.	8,000	0,21	1,68
m ²	Malla de fibra de vidrio, antiálcalis, Traditerm "GRUPO PUMA", de 5x4 mm de luz de malla, de 0,6 mm de espesor, de 160 g/m ² de masa superficial y de 1x50 m, para armar morteros.	1,100	1,60	1,76
m	Perfil de esquina Traditerm "GRUPO PUMA" de PVC con malla, para refuerzo de cantos.	0,300	1,27	0,38
m	Perfil de cierre lateral, Traditerm "GRUPO PUMA", de aluminio, de 60 mm de anchura.	0,300	5,50	1,65
kg	Imprimación acrílica Fondo Morcemcrl "GRUPO PUMA", compuesta por resinas acrílicas, pigmentos minerales y aditivos orgánicos e inorgánicos, para regularizar la absorción e incrementar la adherencia de morteros acrílicos.	0,200	3,80	0,76
kg	Mortero acrílico Morcemcrl "GRUPO PUMA", color Blanco 100, antimoho y antivérdin, permeable al vapor de agua y con resistencia al envejecimiento, a la contaminación urbana y a los rayos UV, para revestimiento de paramentos exteriores.	2,000	3,84	7,68
m	Cordón de polietileno expandido de celdas cerradas, de sección circular de 6 mm de diámetro, para el relleno de fondo de junta.	0,170	0,06	0,01
Ud	Cartucho de masilla monocomponente a base de polímeros híbridos.	0,020	8,00	0,16
		Subtotal materiales:		37,58
	Mano de obra			
h	Oficial 1ª montador de aislamientos.	0,101	18,13	1,83

h	Ayudante montador de aislamientos.	0,101	16,43	1,66
h	Oficial 1ª revocador.	0,606	17,54	10,63
h	Ayudante revocador.	0,606	16,43	9,96
		Subtotal mano de obra:		24,08
	Costes directos complementarios			
%	Costes directos complementarios	2,000	61,66	1,23
		Costes directos (1+2+3):		62,89

Tabla 3-4 Presupuesto ECM-3 (Generador de precios CYPE)

3.5.4 Simulación de las medidas de ahorro energético

Quedan así expuestas las diferentes ECM, en términos de diseño y presupuesto. El siguiente paso es simularlas en el software BCORE, lo cual es sencillo simplemente seleccionando el cambio que se desea realizar, y ejecutando el comando “Run simulation”. Los resultados de esta simulación son las demandas energéticas y temperaturas que ocurrirían en el hipotético caso de implementar las ECM, estos resultados se encuentran en el sub-apartado 4.3 y constituyen el principal objetivo que se planteó al comenzar el trabajo.

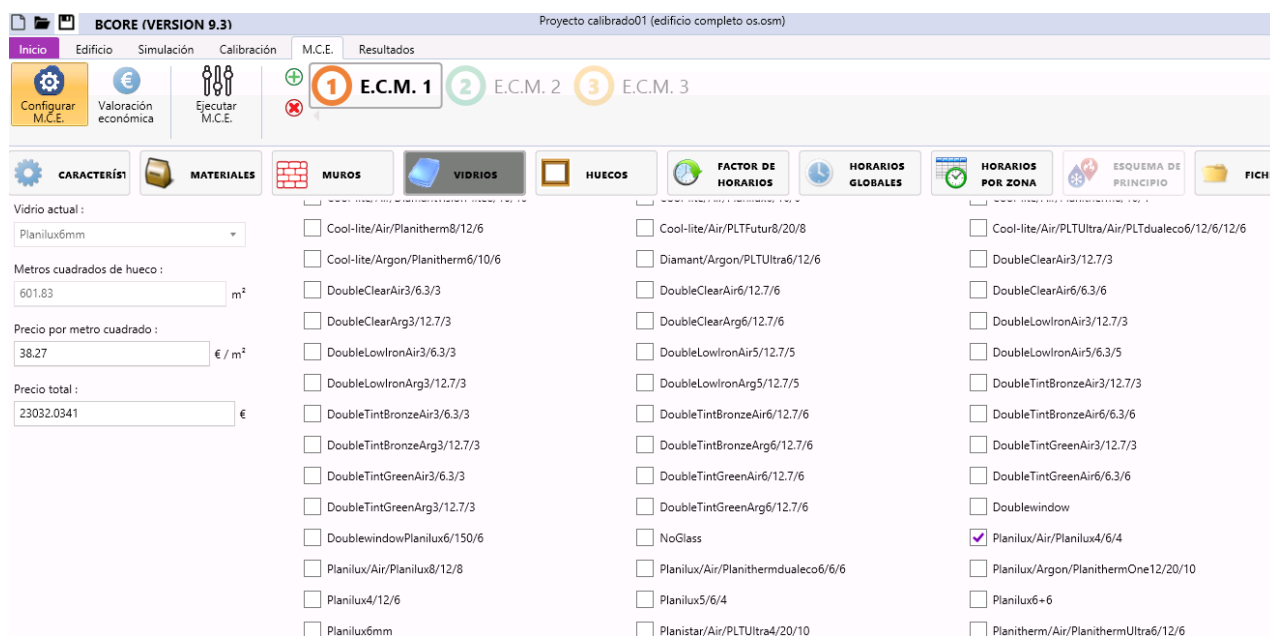


Figura 3-XXIX Ejemplo simulación ECM en BCORE

Llegado a este punto, concluye la fase de desarrollo del trabajo, en la siguiente sección se expondrán los principales resultados obtenidos.

4 RESULTADOS

En este apartado se exponen y evalúan los resultados que se han obtenido en el proceso de mejora, clasificados en tres grupos:

1. Resultados de la simulación energética sin calibrar.
2. Resultados de la calibración del modelo y de la simulación calibrada.
3. Resultados de las medidas de conservación de energía.

4.1 Resultados de la simulación energética

Este sub-apartado expone los resultados de la primera simulación que se realizó, previa a la calibración. BCORE presenta los resultados en forma de gráfica; además, permite descargar el contenido de las gráficas en formato XSLX. Los resultados incluyen demandas energéticas y temperaturas globales y por zonas, además permite comprobar la temperatura de cada zona para cada instante en el periodo de simulación. Entre todas las gráficas obtenidas, la más determinante es la demanda global del edificio por meses (Figura 4-I).

El resultado de esta primera simulación, es una buena aproximación al funcionamiento energético real del edificio, pero los datos no son exactos. Comparando el resultado de demanda total simulada con el real de la demanda de 2018 (Figura 3-XXIII) se obtienen 141720 kWh frente a los 168000 kWh reales. El error obtenido es de un 15,64 % esto se debe a que probablemente algún parámetro del modelado energético no ha sido correctamente definido. Es por esto que una de las mayores ventajas del software BCORE frente a otros, es la posibilidad de calibrar el resultado.

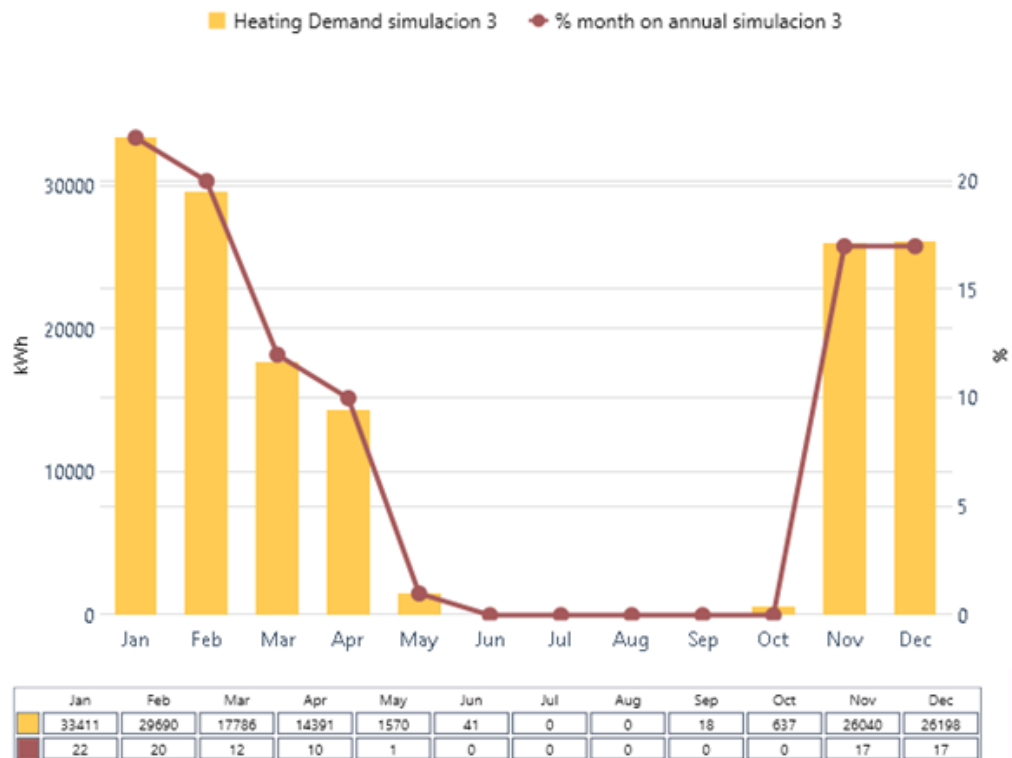


Figura 4-I Consumo total por meses

Otro resultado importante obtenido en esta primera simulación, es la temperatura por zonas térmicas, en el que se observa que se ajustan a los límites establecidos por la legislación, excepto en los pasillos y aseos, véase en el Anexo III: Condiciones ambientales de los lugares de trabajo.

El esto de gráficas destacables se muestran en el Anexo IV: Resultados primera simulación BCORE

4.2 Resultados de la calibración y simulación calibrada

En este sub-apartado se exponen los resultados del modelo tras realizar la calibración detallada en el punto 0 La calibración va a ofrecer principalmente dos resultados:

- El primer resultado son los coeficientes que van a multiplicar a los parámetros que se ha decidido calibrar en el modelo energético.
- El segundo resultado es la simulación calibrada, es decir, todas las gráficas de demanda de energía y temperatura, ajustadas a un valor realista, que suponen un modelo fiable del comportamiento del edificio.

En la Figura 4-II se muestran la representación que BCORE ofrece al ejecutar “*show results*”

Calibrations		Value	Calibrated Value
SCHEDULE MULTIPLIER TYPE: Infiltracion, ON ZONES: Aseo caballeros planta baja, Aseo damas planta baja, Aula 40, Aula 41, Aula 42, Aula 43, Aula 1			1.3
SCHEDULE MULTIPLIER TYPE: Ocupacion, ON ZONES: Aula 40, Aula 41, Aula 42, Aula 43, Aula 44, Aula 45, Aula 50, Aula 52, Aula 53, Aula 54, Aula 51			0.625
SCHEDULE MULTIPLIER TYPE: Equipos, ON ZONES: Aula 43, Aula 44, Aula 50, Laboratorio Electricidad, Laboratorio Química, Zona despachos		1	0.65

Obtained errors			
+QHEAT,-QCOOL		Initial value	Final value
	NMBE	0.156	0.000
	RMSE	9460000.000 ()	0.000 ()
	CV(RMSE)	0.156	0.000

Total Errors (Average of CV(RMSE))	
Initial Error :	15.642 %
Error after calibration :	0.000 %

Figura 4-II Resultados calibración (BCORE)

Se puede ver en la parte inferior que la media de error (*Total errors*) ha bajado desde 15,642 % a 0 %. Hay que tener en cuenta que esta reducción del error no quiere decir que la demanda simulada de cada mes coincida exactamente con el consumo real, lo que implica es que la demanda simulada total del año es igual al consumo real que se dio en ese periodo.

Además se muestran los valores finales de los parámetros calibrados en la parte superior derecha de la imagen. Las infiltraciones se multiplicarán por un factor 1,3, la ocupación se multiplica por 0,625 y los equipos por 0,65.

La interpretación que se le da a los coeficientes obtenidos es la siguiente:

- Cuando se modeló el edificio se eligió nivel de estanqueidad medio, refiriéndose a que no tenía grandes infiltraciones. Pero es posible que esa suposición no fuese correcta y de ahí que el valor de las infiltraciones aumente un 33 % con respecto al valor inicial.
- Tanto los horarios de ocupación como los de utilización de equipos se ven reducidos al ser multiplicados por coeficientes menores que la unidad. Este hecho es fiel a la situación real, en la que las aulas no están necesariamente ocupadas durante todo el horario de clases, y los equipos no siempre en uso.

El resultado obtenido es una simulación, en la que los resultados de temperaturas y demandas energéticas se pueden considerar como un modelo energético realista y fiable. De nuevo, el resultado más reseñable, es la demanda energética global del edificio por meses.

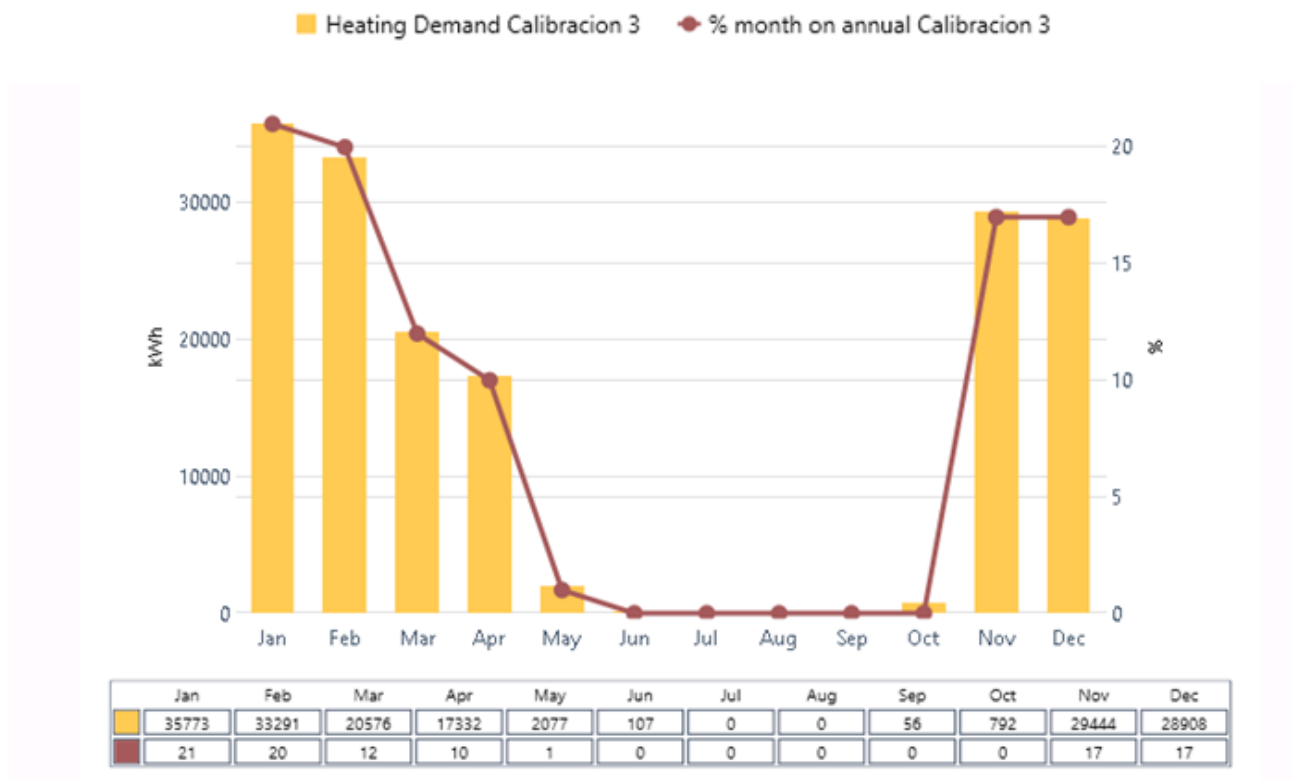


Figura 4-III Demanda energética calibrada, por meses (BCORE)

Se puede comprobar que la demanda de cada mes ha aumentado para ajustarse a los datos reales que se introdujeron en la calibración. En la Figura 4-IV se compara la demanda real con la demanda simulada inicialmente y con la demanda calibrada. Se observa que la primera simulación ya ofrecía resultados próximos a los reales y que, gracias a la calibración se reduce esta diferencia.

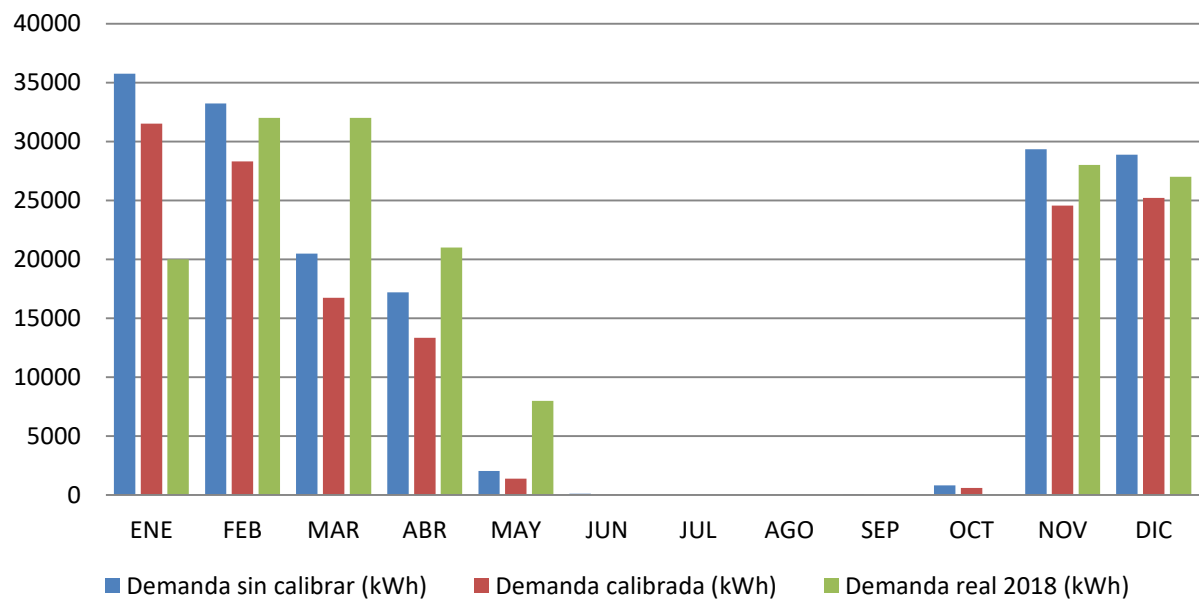


Figura 4-IV Comparativa Consumo real, simulación y calibración

4.3 Resultados de las medidas de conservación de energía propuestas

En este apartado se mostrarán los resultados de aplicar al modelo calibrado las tres ECM propuestas en el apartado 3.5, se realizará una valoración objetiva y se compararán los efectos en términos de ahorro energético y económico.

4.3.1 Resultados ECM-1

La primera ECM consistía en cambiar los acristalamientos actuales por ventanas de doble cristal simple, con cámara de aire intermedia, ver Figura 2-VI. El resultado más representativo se muestra a en la Figura 4-V y consiste en una comparación entre la simulación de demanda del modelo del edificio actual y el edificio si se aplicase la ECM-1.

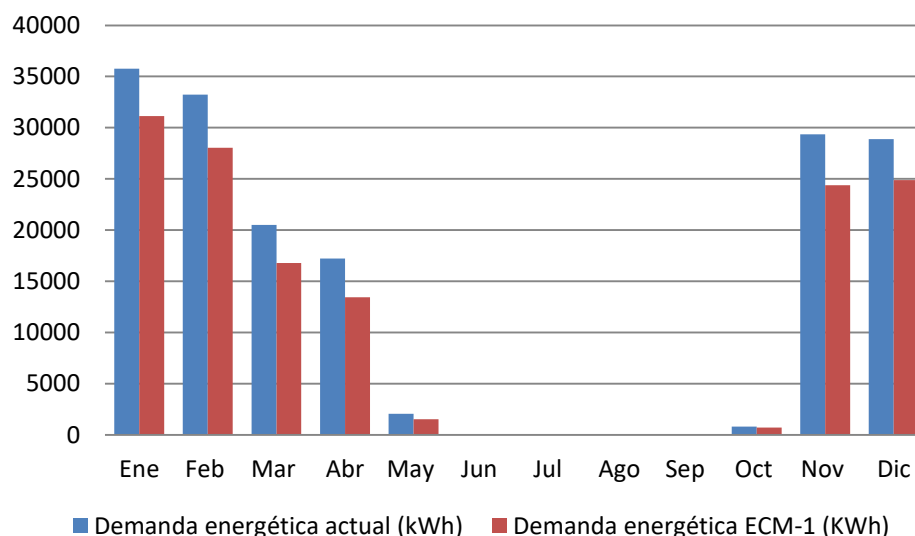


Figura 4-V Efecto ECM-1 en la demanda

Teniendo en cuenta que según la factura del año 2018, el precio unitario del MWh era de 47,15 €, se puede obtener fácilmente el ahorro teórico que se produciría si se aplica esta ECM. El resultado se muestra a continuación:

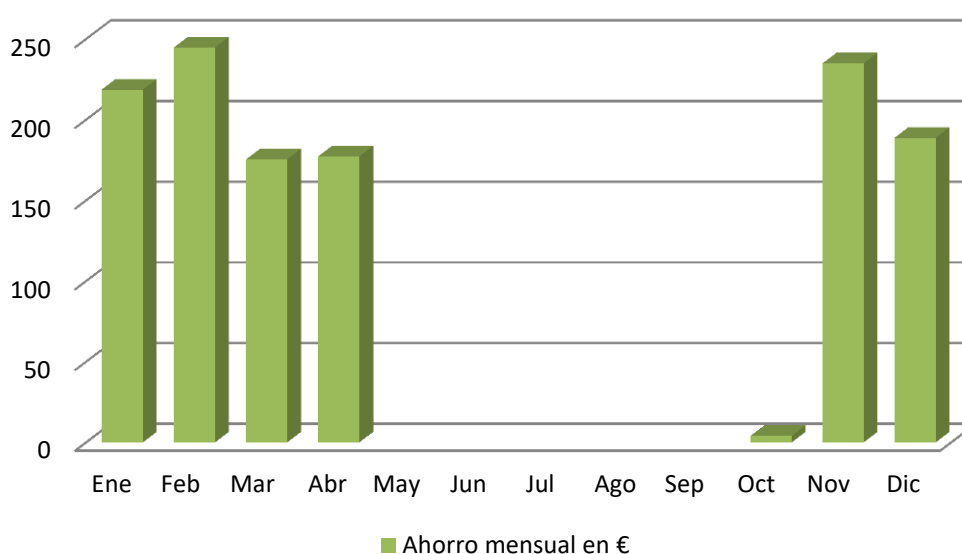


Figura 4-VI Ahorro mensual al aplicar ECM-1

Sumando todos los ahorros mensuales se obtiene un **ahorro total de 1243,67 € anuales**. Comparando este ahorro anual calculado, con el precio de la instalación de la ECM se puede concluir que se tardaría **18 años** aproximadamente en amortizar el coste completamente.

4.3.2 Resultados ECM-2

La segunda ECM, consiste en sustituir los cristales actuales de las ventanas, de vidrio monolítico, por cristales de doble vidrio bajo emisivo, véase en Figura 3-XXVI. Esta segunda ECM, ofrece un valor de transmitancia térmica mejor que la primera propuesta, pero requiere un presupuesto más elevado como se puede comprobar en la Tabla 3-3 Presupuesto ECM-2 (Generador de precio CYPE). Los resultados principales se muestran continuación en la Figura 4-VII y Figura 4-VIII.

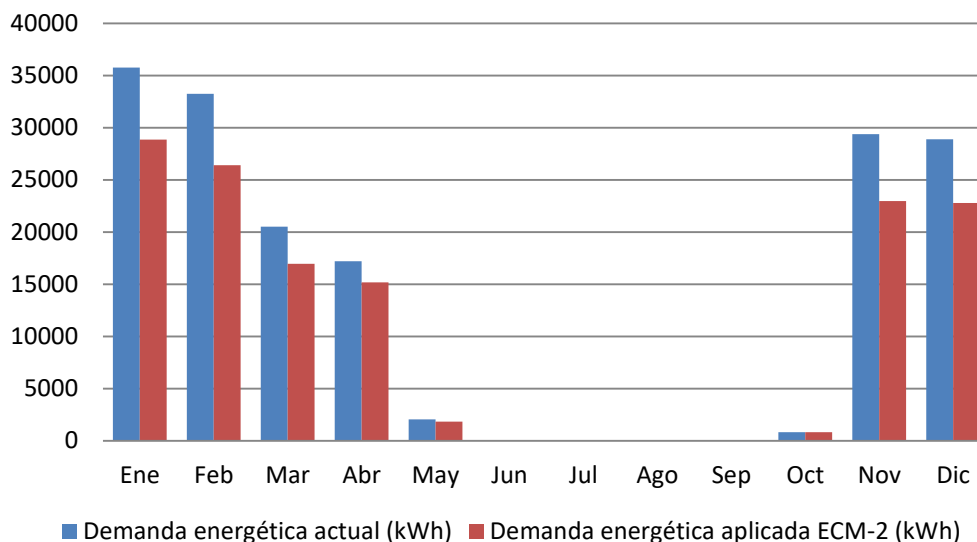


Figura 4-VII Efecto ECM-2 en la demanda

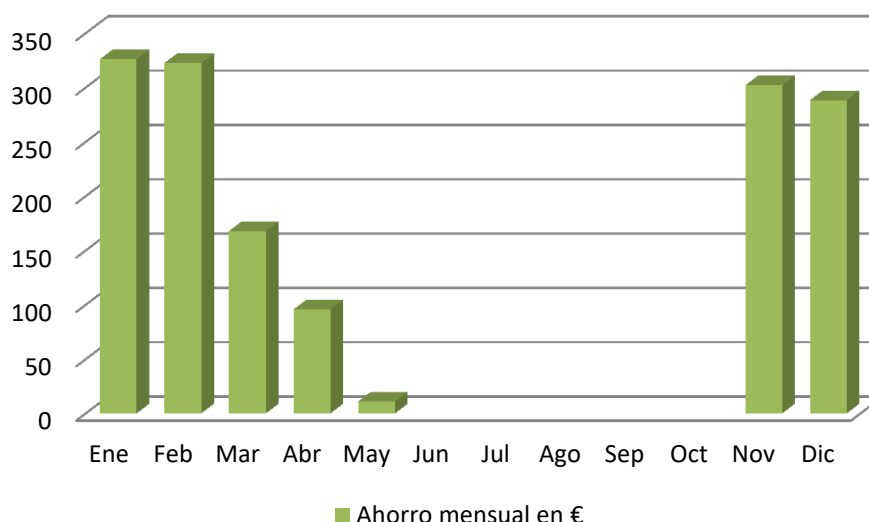


Figura 4-VIII Ahorro al aplicar ECM-2

Sumando todos los ahorros mensuales se obtiene un **ahorro total de 1512,94 € anuales**. Comparando este ahorro anual calculado, con el precio de la instalación de la ECM se puede concluir que se tardaría aproximadamente 50 años en amortizar el coste completamente.

4.3.3 Resultados ECM-3

La tercera ECM consiste en añadir un revestimiento aislante exterior a la fachada del edificio, ver Figura 4-IX. El presupuesto para esta obra es elevado, ver Tabla 3-4 Presupuesto ECM-3 (Generador de precios CYPE). El resultado principal se muestra a continuación en la Figura 4-IX y la Figura 4-X.

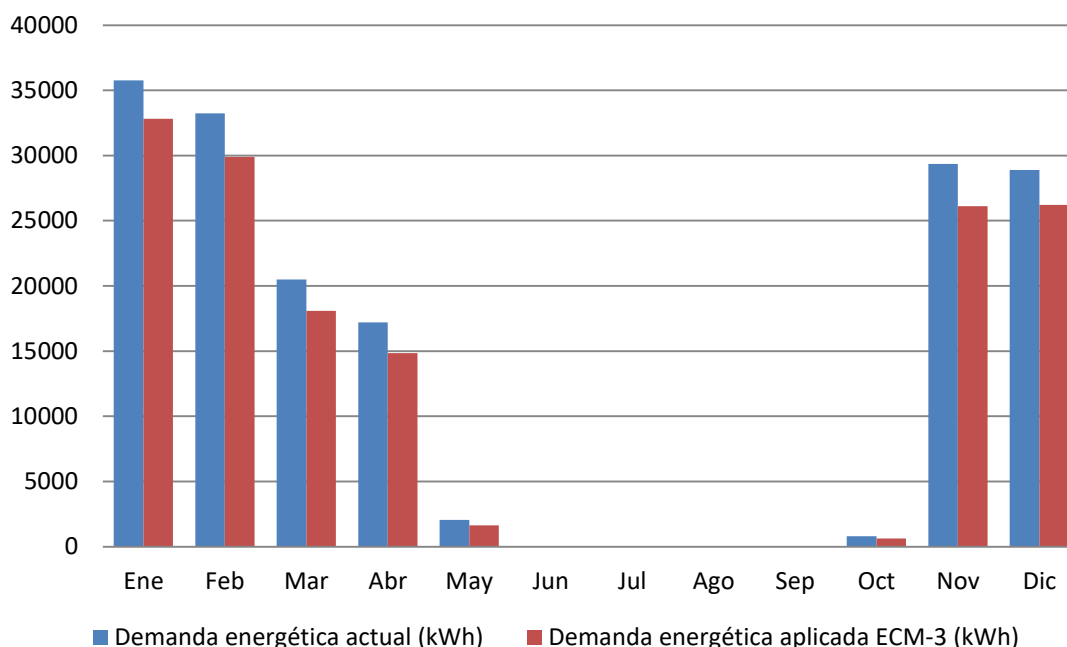


Figura 4-IX Efecto ECM-3 en la demanda

Es importante destacar que el programa solo ha calculado el efecto que tiene esta ECM sobre la transmisión de calor a través de la pared, sin tener en cuenta la probable reducción de las infiltraciones que este revestimiento hubiese provocado. Por tanto, es posible que el efecto en la demanda sea algo mayor que el calculado en este apartado, pero es muy difícil determinar numéricamente la reducción de infiltraciones.

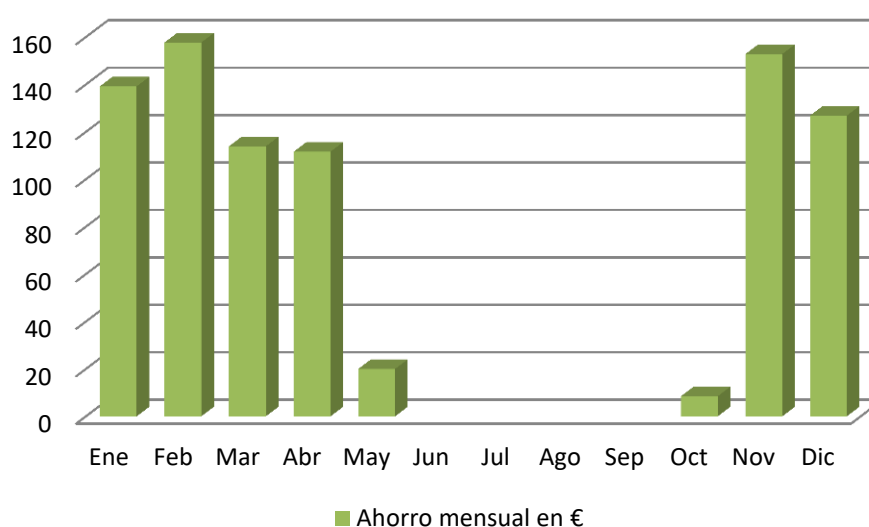


Figura 4-X Ahorro al aplicar ECM-3

En este caso, el ahorro total calculado para el periodo de un año sería 830,50 €, este ahorro es menor que en las ECM-1 y ECM-2. La razón de este hecho, entre otras es que el edificio cuenta con

una gran superficie de ventanas. En el siguiente apartado se analizarán y compararán los rendimientos de estas medidas de ahorro.

4.4 Comparación de las medidas de ahorro

En este apartado se realizará una comparación entre las diferentes ECM propuestas, teniendo en cuenta factores de coste, ahorro, impacto en el edificio y otros.

4.4.1 Reducción de la demanda energética

En la Figura 4-XI se muestra la demanda por meses que se obtendría con la instalación de cada medida, y en la Figura 4-XII se exponen con mayor detalle los resultados de reducción en la demanda.

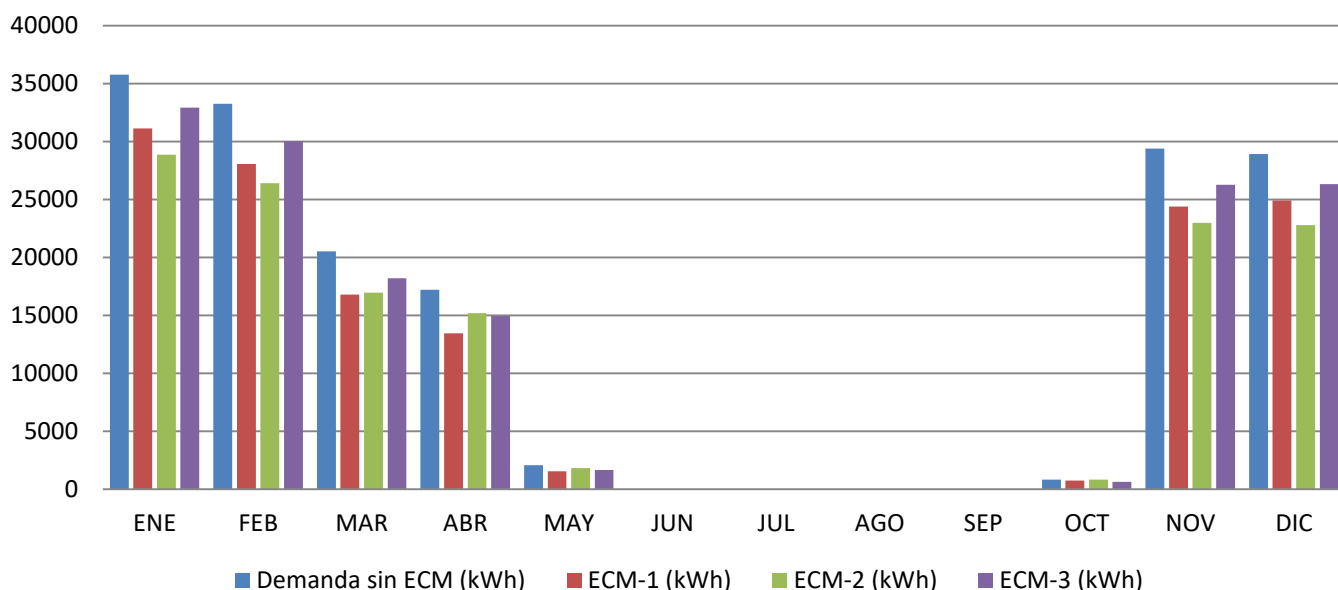


Figura 4-XI Comparativa demanda por meses

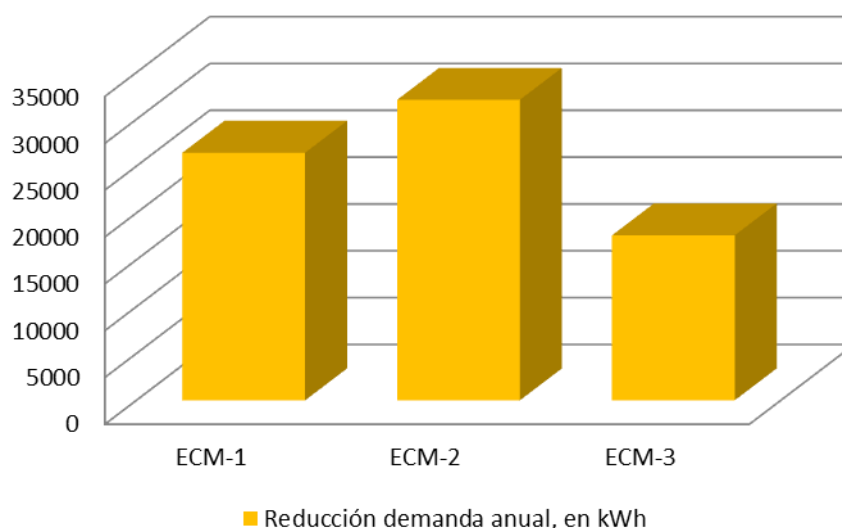


Figura 4-XII Comparación reducción anual demanda

Se aprecia que las dos ECM enfocadas en la sustitución de ventanas han obtenido mejores resultados que la ECM-3, enfocada en mejorar el aislamiento térmico de las paredes. Esto sucede porque las ventanas actuales tienen una transmitancia muy alta ($5,7 \text{ W/m}^2\text{K}$), y esto ofrece un gran margen de mejora. Además, el edificio cuenta con una superficie de ventanas muy grande, 600 metros

cuadrados en los que la conductancia se reduce a 3,3 W/m²K y 2 W/m²K en las ECM-1 y ECM-2 respectivamente.

La mejor ECM, en este aspecto es la ECM-2, con una reducción aproximada en la demanda de calefacción de 32 MWh anuales, que supone una reducción del 19,1 %. Según el *Estudio de distribución del consumo energético residencial para calefacción en España* [28], este ahorro calculado de 32 MWh, equivale a la demanda de seis viviendas medias a lo largo de un año.

4.4.2 Relación coste inicial-ahorro económico

Dada la situación actual de limitación económica, este factor es muy determinante. En el apartado anterior se ha analizado el ahorro de energía, para traducir ese ahorro energético a ahorro económico solo hay que tener en cuenta el precio que la Escuela Naval Militar paga en su tarifa por el gas natural. Según la factura del mes de noviembre de 2018, el precio del MWh es 47,15 €. Conociendo este dato se obtiene el ahorro anual que proporciona cada ECM.

Pero además del beneficio económico que aporta cada medida, hay que tener en cuenta el coste inicial de cada una. En la Figura 4-XIII se expone el gasto de la obra necesaria para implementar cada ECM, y el ahorro que aportaría en 10 años desde su instalación.

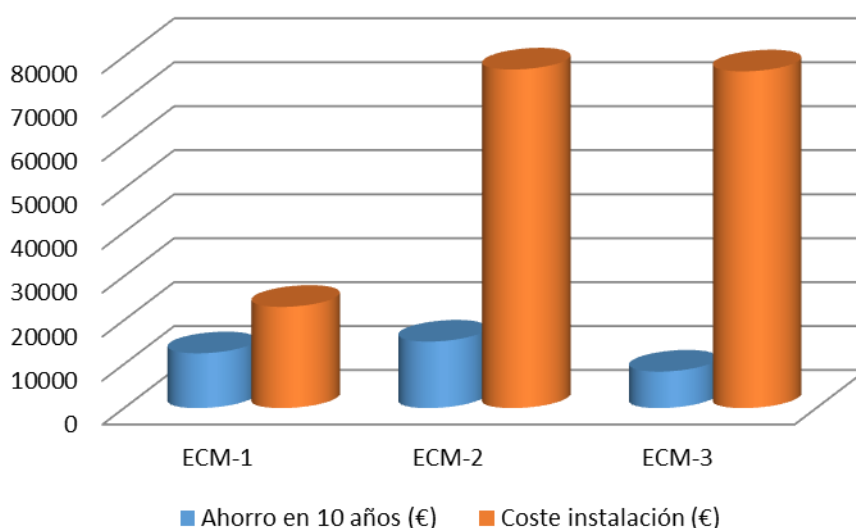


Figura 4-XIII Comparación coste instalación - ahorro en 10 años

Se observa claramente que la ECM de mayor rendimiento en este campo es la ECM-1, detallada en el apartado 3.5.1, sin embargo las ECM 2 y 3 suponen un coste mucho mayor que el ahorro que aportan.

4.4.3 Otros factores

Existen otros factores que no son tan relevantes pero que también influyen en la valoración de las propuestas de mejora:

- Puentes térmicos e infiltraciones: la única medida que reduce y prácticamente elimina estos fenómenos no deseados es la ECM-3, ya que aísla toda la superficie de la fachada, incluidos los puntos críticos como pueden ser los cajones de persianas. Esta es una gran ventaja del aislamiento térmico exterior.
- Efecto visual en el edificio: las dos primeras propuestas, tienen un efecto nulo en la apariencia del edificio ya que solo suponen cambios en las ventanas. De manera opuesta, la ECM-3 tendría cierto efecto en la apariencia del edificio, aunque no muy significativo. Este efecto se podría considerar positivo ya que renovaría el aspecto exterior del edificio.

- Aislamiento acústico: las tres medidas propuestas aumentan el aislamiento acústico, esto es un punto favorable que tienen en común.
- Estabilización temperaturas: según muestra la Figura 4-XIV, la ECM-2 además de ser la más eficaz, también es capaz de suavizar las temperaturas en las épocas de más calor, haciendo que por ejemplo en el mes de Junio, la temperatura media baje de 24,5 ° C a 23 ° C.

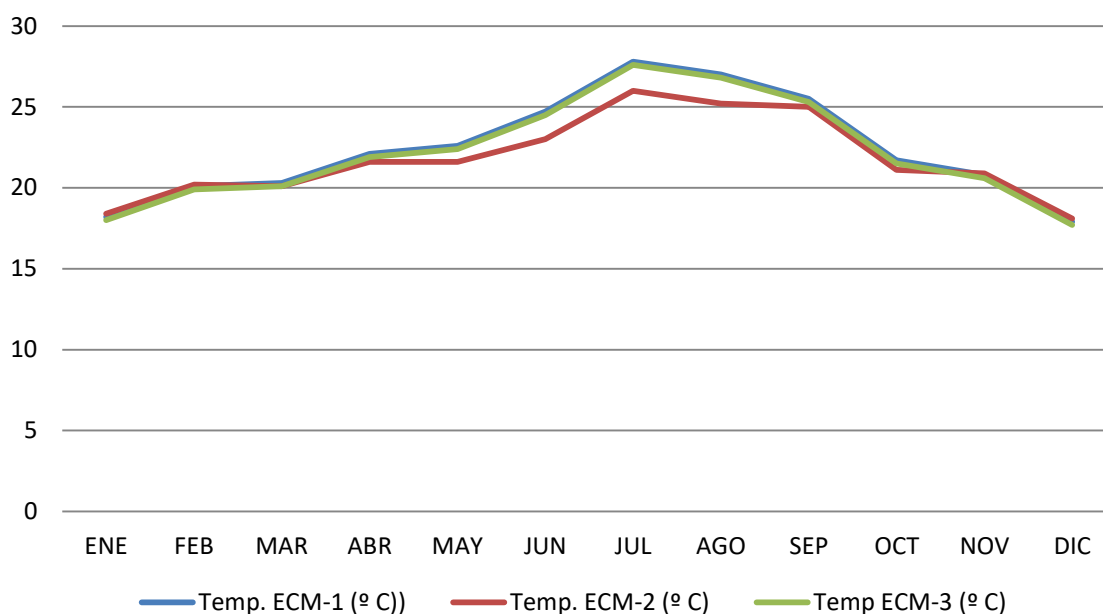


Figura 4-XIV Comparación temperaturas al implementar ECM

4.4.4 Evaluación

En la Tabla 4-1 se exponen los principales resultados que definen cada sistema de aislamiento:

	Coste Inicial €	Reducción Demanda (%)	Relación Coste - Ahorro	Nivel Insonorización	Eliminación puentes térmicos	Efecto Visual
ECM-1	23032,03	15,73	Buena	Bajo	No	Nulo
ECM-2	77034,24	19,10	Mala	Bajo	No	Nulo
ECM-3	76603,21	10,48	Muy mala	Medio	Sí	Alto

Tabla 4-1 Resumen comparación ECM

Los dos factores principales, el coste y el ahorro, determinan que la ECM-3 (Aislamiento exterior de la fachada), es la opción menos eficiente, aunque ofrece la ventaja de eliminar puentes térmicos.

Evaluando las diferencias entre la ECM-1 y la ECM-2, en términos de ahorro la segunda opción ofrece un 3,37 % más de ahorro, lo que la convierte en la mejora más respetuosa con el medio ambiente. Sin embargo si se tiene en cuenta además el coste inicial, la ECM-1 se ajusta a la situación actual de restricción de gasto, a la vez que aporta una reducción de gasto considerable.

5 CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

Este apartado expone una valoración objetiva sobre el alcance obtenido en el trabajo y se valora una posible extrapolación de los mismos a un ámbito más extenso.

5.1 Conclusiones

En una coyuntura actual, marcada por la aceleración en el proceso de calentamiento global y escasez de energías fósiles, las diferentes instituciones están tratando de reducir su huella ecológica. La Armada no se ha quedado atrás y trabaja en esta misma dirección.

A lo largo del trabajo se ha hecho evidente el amplio margen de mejora que tiene el edificio Isaac Peral, en términos de eficiencia energética. Se ha demostrado mediante las diferentes simulaciones que es posible la implementación de medidas que contribuyan a la mejora energética y al mismo tiempo sirvan para ahorrar dinero a la Armada Española.

Los objetivos del trabajo se han cumplido, ya que mediante el uso de diferentes aplicaciones, se han alcanzado estos hitos:

1. Realización, simulación, y análisis de un modelo energético calibrado del edificio.
2. Propuesta, simulación y análisis de los efectos que diferentes medidas de conservación de energía pueden alcanzar.

Se ha demostrado que la inversión en cristales más aislantes es más eficiente que la inversión en aislamiento exterior. Concretamente, instalando ventanas de doble vidrio simple, se obtendría una reducción del 15,73 % en el consumo de calefacción del edificio, y suponiendo una inversión relativamente asumible de 23032,03 €. Además si se deseara reducir la demanda en mayor medida, se podría implementar el uso de ventanas de doble vidrio bajo emisivo, con transmitancia menor que en el caso anterior y que supondría una reducción en el consumo de un 19,10 %, eso sí con una inversión de 77034,24 €.

5.2 Líneas futuras

Se ha hecho evidente que los beneficios que este tipo de medidas pueden aportar en el caso concreto del Isaac peral son importantes, pero, además son extrapolables: estas técnicas podrían aplicarse a gran escala en las unidades de la Armada, y aunque el gasto inicial fuese considerable, podría ser amortizado en cuestión de poco tiempo en la mayoría de los casos. Sería interesante realizar un cálculo preciso de cuantos recursos energéticos y económicos sería capaz de ahorrar el Ministerio de Defensa a través de la implantación de este tipo de medidas en la totalidad de sus instalaciones. De esta manera, además de alcanzar objetivos de desarrollo sostenible, se podría mejorar la imagen

corporativa de la institución, publicando los resultados y dando a conocer su compromiso con el medio ambiente.

Se ha demostrado la enorme utilidad del software como herramienta clave en el proceso de mejora energética, esta posibilidad debe ser tenida en cuenta en el futuro de cara a la progresiva mejora de rendimiento de los edificios del Ministerio de Defensa. Estas herramientas posibilitan el análisis previo de los beneficios que cada tipo de medida de conservación ofrece, y es aplicable tanto para edificios en fase de diseño como para edificios ya construidos, cuyo rendimiento se desee incrementar. Además se puede aplicar a edificios en cualquier parte del mundo, escogiendo el archivo meteorológico correspondiente.

Otro aspecto en el que no se ha profundizado en este trabajo y que puede aportar grandes beneficios es la monitorización térmica del edificio mediante sensores. Si se llevase a cabo se podría calibrar el modelo con una precisión altísima y comprobar en tiempo real que efectivamente, el modelado energético ha sido fiel a la realidad. Este concepto estaría relacionado con la “Maqueta digital” [29], en la cual la Armada ya ha mostrado su interés. Este tipo de avances tecnológicos marcan la dirección en la que la sociedad y en concreto la Armada deben seguir trabajando para ser cada vez más eficientes en la utilización de los recursos.

6 BIBLIOGRAFÍA

- [1] Cambio Climático .org, «Efectos del cambio climático,» [En línea]. Available: <http://www.cambioclimatico.org/tema/efectos-del-cambio-climatico>. [Último acceso: 15 Febrero 2018].
- [2] ONU, «Objetivos Desarrollo Sostenible,» [En línea]. Available: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/energy/>. [Último acceso: 2 Febrero 2018].
- [3] MINISDEF, «MEMORIA RESPONSABILIDAD SOCIAL,» 2010.
- [4] Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía, «Plan Nacional de Acción de Eficiencia Energética,» 2017.
- [5] «Código técnico edificación, DB HE (Ahorro energía),» 2015.
- [6] Ministerio de Industria Energía y Turismo, «Reglamento Instalaciones Térmicas para Edificios (RITE),» 2013.
- [7] MINISDEF, «Subdirección General de Planificación y Medio Ambiente,» [En línea]. Available: <http://www.defensa.gob.es/ministerio/organigrama/sedef/digenin/sdgplanificacion/>.
- [8] Armada, «Plan de Eficiencia Energética: Energías renovables,» [En línea]. Available: <http://www.armada.mde.es/ArmadaPortal/page/Portal/ArmadaEspañola/conocenosmedioambiente/prefLang-es/03CambioClimatico>. [Último acceso: 10 Febrero 2018].
- [9] Armada, «Noticias de la Armada,» Abril 2013. [En línea]. Available: http://armada.mde.es/ArmadaPortal/page/Portal/ArmadaEspañola/conocenosnoticias/prefLang-es/00noticias--2013--04--NT-059-Jornadas-MA-JAL-es?_selectedNodeID=1162057&_pageAction=selectItem. [Último acceso: 22 Enero 2018].
- [10] P. J. A. F. M. E. M. T. J. G. F. R. Carrasco Pena, «Eficiencia energética en buques de guerra: un caso práctico.,» 2016.
- [11] Comité de Industria, investigación y energía (ITRE) del parlamento de la Unión Europea, «Boosting Buildig Renovation: What potential and value for Europe?,» Committee on Industry, Research and Energy (ITRE) of the European Paliament,, 2016.
- [12] R. M. Tomás, «Análisis de la influencia de la envolvente en la demanda térmica y propuestas de mejora del Cuartel Francisco Moreno mediante simulación con Trnsys,» 2016.

- [13] International Energy Agency, «Energy efficiency market report,» 2014.
- [14] Instituto para Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE), «Guía Técnica para la Rehabilitación de la Envolvente Térmica de los Edificios,» 2007.
- [15] C. Gimenez, «Alternativas para la mejora de la eficiencia energética de los acristalamientos: los vidrios dinámicos,» 2011.
- [16] Green Group, energy Consulting, «Net Zero Energy Buildings,» [En línea]. Available: <https://www.greengroup.com.ar/detalle.php?a=net-zero-energy-buildings&t=1&d=112>. [Último acceso: 17 Febrero 2018].
- [17] U.S. DEPARTMENT OF ENERGY, «CONTRASTING THE CAPABILITIES OF BUILDING ENERGY PERFORMANCE,» 2005.
- [18] Lawrence Berkeley National Laboratory, «Transforming BIM to BEM,» 2013.
- [19] TRNSYS, «TRNSYS,» [En línea]. Available: <http://www.trnsys.com/>. [Último acceso: 20 Enero 2018].
- [20] J. V. V. Lara Febrero Garrido, «User's manual of the software BCORE,» 2018.
- [21] Berkeley Lab, «GenOpt,» 2016. [En línea]. Available: <https://simulationresearch.lbl.gov/GO/>. [Último acceso: 20 Febrero 2018].
- [22] SketchUp, «SketchUp,» 2017. [En línea]. Available: <https://www.sketchup.com/es>. [Último acceso: 13 Enero 2018].
- [23] OpenStudio, «OpenStudio,» 2018. [En línea]. Available: <https://www.openstudio.net/>. [Último acceso: 15 Enero 2018].
- [24] Empresa Nacional BAZÁN, Construcciones Navales Militares S.A., PLANO R-122-A Escuela Naval Militar De Marín. Talleres y aulas de para monturas de máquinas y motores., Ferrol, 1959.
- [25] Jefatura de Apoyo Logístico, Pliego de condiciones técnicas para obras de edificación, 1980.
- [26] Organización Internacional de Normalización, ISO 7730, 2006.
- [27] CYPE Ingenieros, «Generador de Precios CYPE,» [En línea]. Available: <http://www.generadordeprecios.info/>. [Último acceso: 5 Febrero 2018].
- [28] Escuela de Arquitectura de la Universidad Politécnica de Cataluña., «Estudio de distribución del consumo energético residencial para calefacción en España,» 2017.
- [29] C. G. Vicente, «La Maqueta Digital,» 2018.
- [30] Ferroli, «Ficha técnica caldera prextherm 400».
- [31] WILO, «Ficha técnica bomba s-60».
- [32] Centro Nacional Nuevas Tecnologías, «Evaluación del bienestar térmico en locales de trabajo».
- [33] Ecoticias, «Ecoticias,» 5 Enero 2017. [En línea]. Available: <https://www.ecoticias.com/especial-eficiencia-energetica-2016/129822/Breve-historia-eficiencia-energetica>. [Último acceso: 15 Febrero 2018].
- [34] P. S. Yuste, «Certificados Energéticos,» [En línea]. Available:

<https://www.certificadosenergeticos.com/edificio-consumo-energia-casi-nulo>. [Último acceso: 13 Febrero 2018].

[35] V. C. Gamboa, «La Maqueta Digital,» 2018.

ANEXO I: TABLA METABÓLICA PARA DIFERENTES ACTIVIDADES

Anexo extraído de la norma ISO 7730, Ergonomía del ambiente térmico. En esta tabla en concreto, se muestran los W/m² que emite una persona en función de la actividad que se encuentra realizando.

TASA METABÓLICA PARA DIFERENTES ACTIVIDADES

En la Norma ISO 8996, se incluye información adicional acerca de las tasas metabólicas. Ha de tenerse en cuenta que las personas ancianas tienen, a menudo, unas actividades medias inferiores a las de los jóvenes.

Tabla B.1 – Tasas metabólicas

Actividad	Tasa metabólica	
	W/m ²	met
Reposo, tendido	46	0,8
Reposo, sentado	58	1,0
Actividad sedentaria (oficina, domicilio, escuela, laboratorio)	70	1,2
Actividad ligera, de pie (de compras, laboratorio, industria ligera)	93	1,6
Actividad media, de pie (dependiente de comercio, tareas domésticas, trabajo con máquinas)	116	2,0
Caminar en llano		
2 km/h	110	1,9
3 km/h	140	2,4
4 km/h	165	2,8
5 km/h	200	3,4

Tabla A1-1 Tasas metabólicas (ISO 8996)

ANEXO II: RELACIÓN ENTRE LA TRANSMITANCIA CON EL ANCHO DE CÁMARA PARA DISTINTAS UNIDADES DE VIDRIO AISLANTE (UVA)

La Figura A2-I está extraída de la *Guía Técnica para la Rehabilitación de la Envolvente Térmica de los Edificios / Soluciones de Aislamiento con Vidrios y Cerramientos* [14]. En ella se muestra en el eje vertical la transmitancia (U), en $\text{W/m}^2\text{K}$. En el eje horizontal se encuentran diferentes anchuras de cámara de aire. Las diferentes líneas se corresponden con cuatro tipos distintos de acristalamientos para ventanas. Se observa que los vidrios bajo emisivos alcanzan aislamientos mayores que los cristales tradicionales, también que los vidrios monolíticos obtienen aislamientos muy pobres.

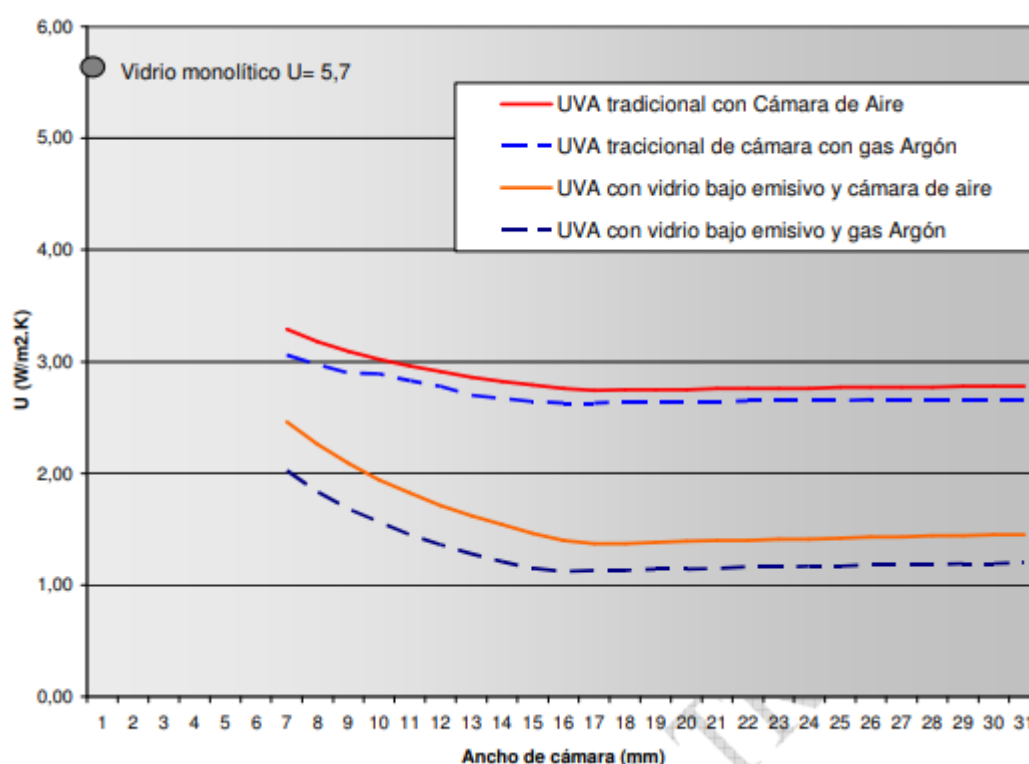


Figura A2-I Comparación transmitancia UVA's (Guía Técnica para la Rehabilitación de la Envolvente Térmica de los Edificios)

ANEXO III: CONDICIONES AMBIENTALES DE LOS LUGARES DE TRABAJO

El siguiente texto está extraído del decreto 486/1997, que regula las condiciones que deben reunir los lugares de trabajo.

1 Condiciones ambientales de los lugares de trabajo

1. La exposición a las condiciones ambientales de los lugares de trabajo no debe suponer un riesgo para la seguridad y la salud de los trabajadores.

2. Asimismo, y en la medida de lo posible, las condiciones ambientales de los lugares de trabajo no deben constituir una fuente de incomodidad o molestia para los trabajadores. A tal efecto, deberán evitarse las temperaturas y las humedades extremas, los cambios bruscos de temperatura, las corrientes de aire molestas, los olores desagradables, la irradiación excesiva y, en particular, la radiación solar a través de ventanas, luces o tabiques acristalados.

3. En los locales de trabajo cerrados deberán cumplirse, en particular, las siguientes condiciones:

a) La temperatura de los locales donde se realicen trabajos sedentarios propios de oficinas o similares estará comprendida entre 17 y 27 °C.

La temperatura de los locales donde se realicen trabajos ligeros estará comprendida entre 14 y 25 °C.

b) La humedad relativa estará comprendida entre el 30 y el 70 por 100, excepto en los locales donde existan riesgos por electricidad estática en los que el límite inferior será el 50 por 100.

ANEXO IV: RESULTADOS PRIMERA SIMULACIÓN BCORE

En este anexo se presentan los resultados de la primera simulación realizada, extraídos directamente del software BCORE mediante capturas de pantalla.

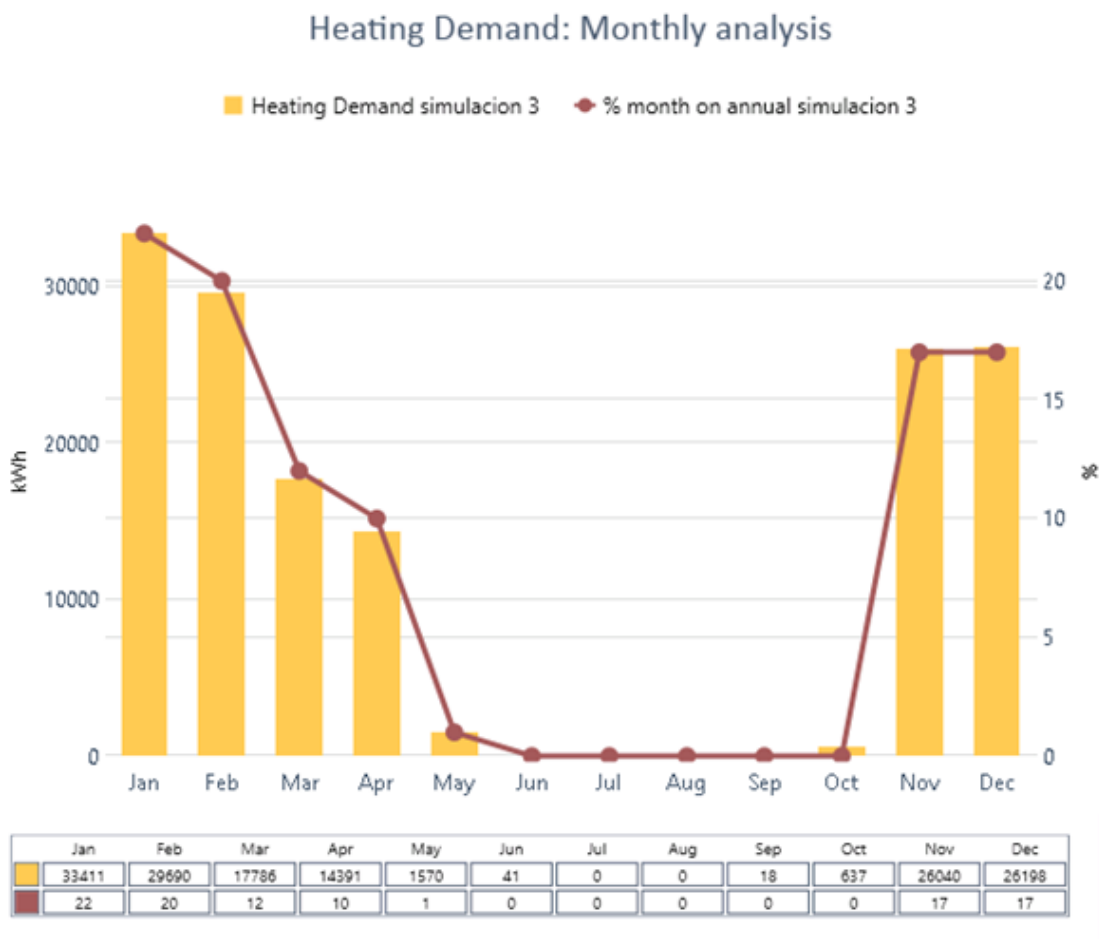


Figura A4-I Demanda energética total por meses (BCORE)

La Tabla A4-1 presenta la asignación de espacios con las zonas térmicas correspondientes dentro del software, es necesaria para comprender la Figura A4-II.

Zona térmica	Espacio
Z-1	Aula 41
Z-2	Pasillo planta baja
Z-3	Laboratorio Química
Z-4	Aula 57
Z-5	Aula 42
Z-6	Laboratorio aparatos auxiliares
Z-7	Aula 40

Z-8	Aula 43
Z-9	Aula 44
Z-10	Aula 54
Z-11	Laboratorio turbinas
Z-12	Aseo damas planta baja
Z-13	Aseo caballeros planta baja
Z-14	Aula 45
Z-15	Laboratorio materiales
Z-16	Zona despachos
Z-17	Aula 56
Z-18	Seminario
Z-19	Pasillo 1ª planta
Z-20	Seminario 2
Z-21	Aula 50
Z-22	Aula 52
Z-23	Aseo damas primera planta
Z-24	Aseo caballeros primera planta
Z-25	Laboratorio electricidad
Z-26	Aula 53
Z-27	Aula 55
Z-28	Tejado

Tabla A4-1 Asignación Zonas Térmicas – Aulas

La Figura A4-II muestra el porcentaje que cada zona térmica supone en la demanda total, en ella se puede comprobar que las Z-2 y Z-19, suponen los porcentajes más altos, estas dos zonas son los pasillos de cada planta, como se muestra en la Tabla A4-1.

Heating Demand: Analysis by zone

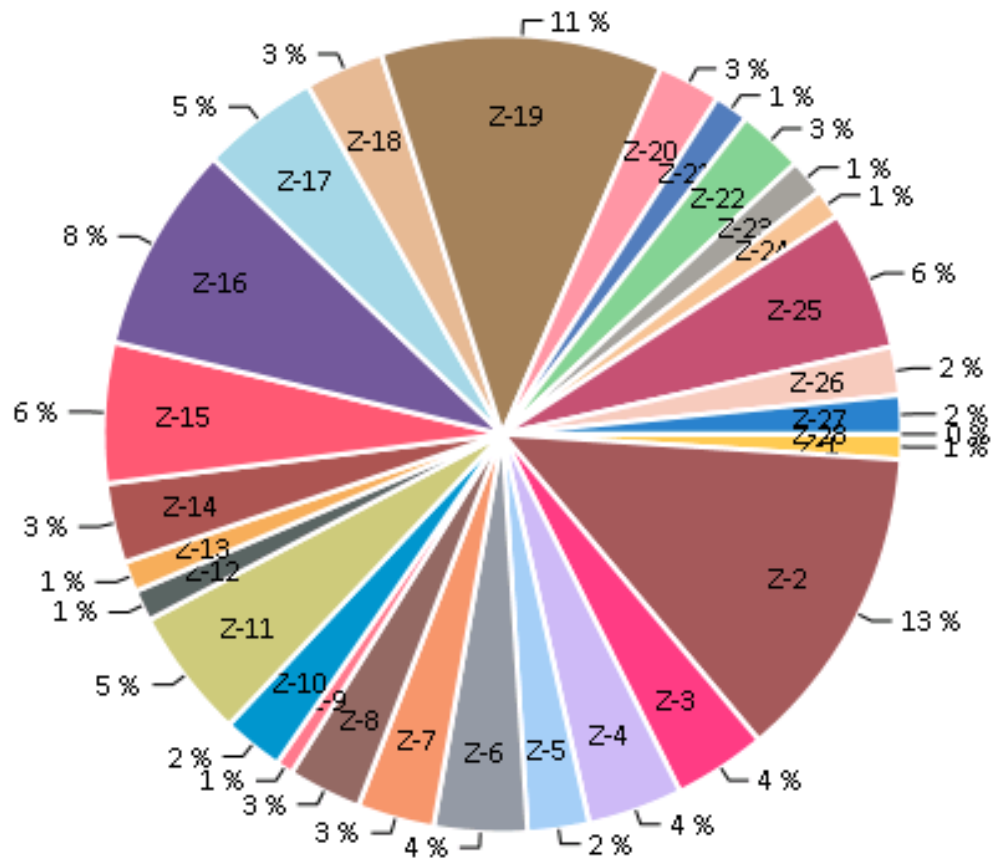


Figura A4-II Porcentaje demanda energética por zonas (BCORE)

A continuación se presentan las gráficas de demanda de cada mes por zonas térmicas, para ambas plantas del edificio.

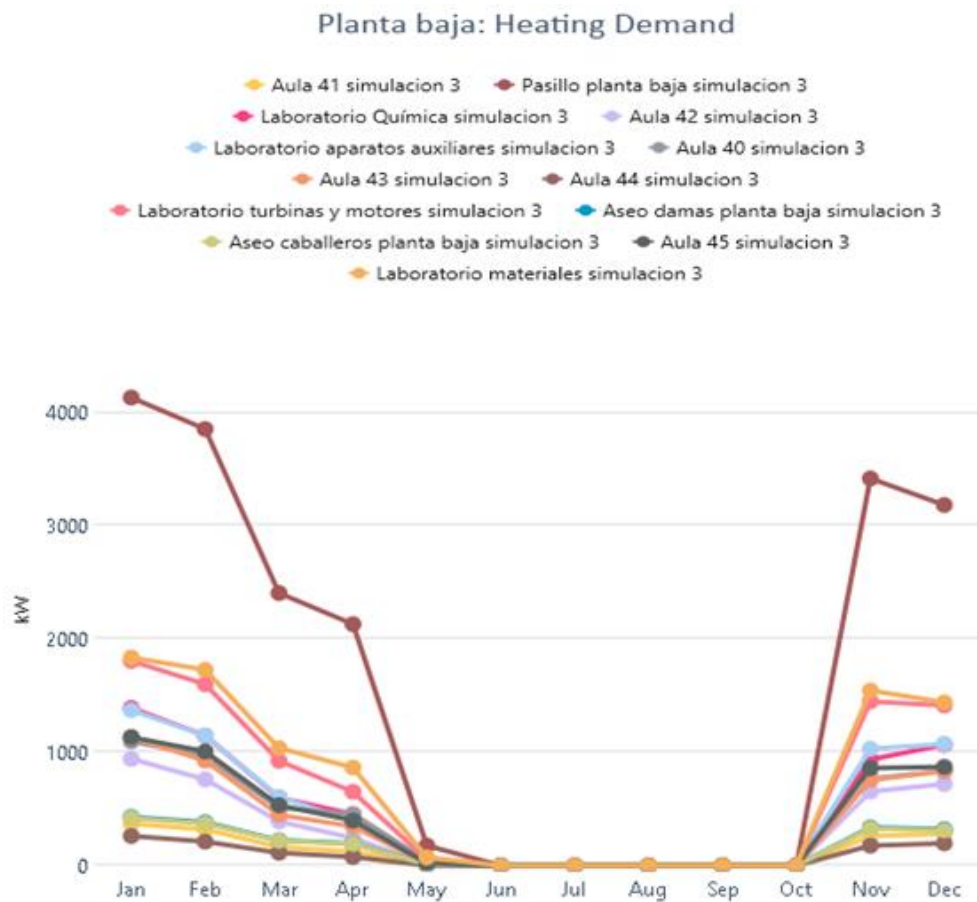


Figura A4-III Demanda energética por zonas planta baja (BCORE)

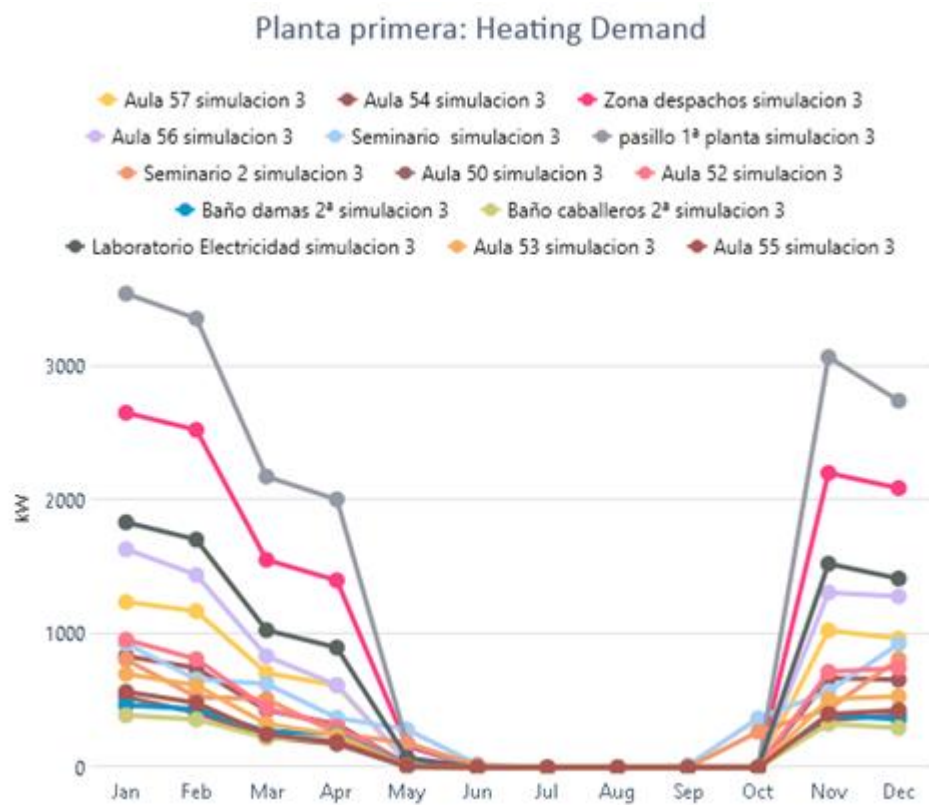


Figura A4--IV Demanda energética por zonas planta 1ª (BCORE)

La Figura A4-V y Figura A4-VI presentan las temperaturas medias mensuales, por zonas simuladas para la planta baja y primera planta respectivamente. Se comprueba que existe un pico de temperatura en el Aula 44 en el mes de Septiembre, superando los 30°C de media, esto es debido a la alta presencia de ordenadores en dicha aula.

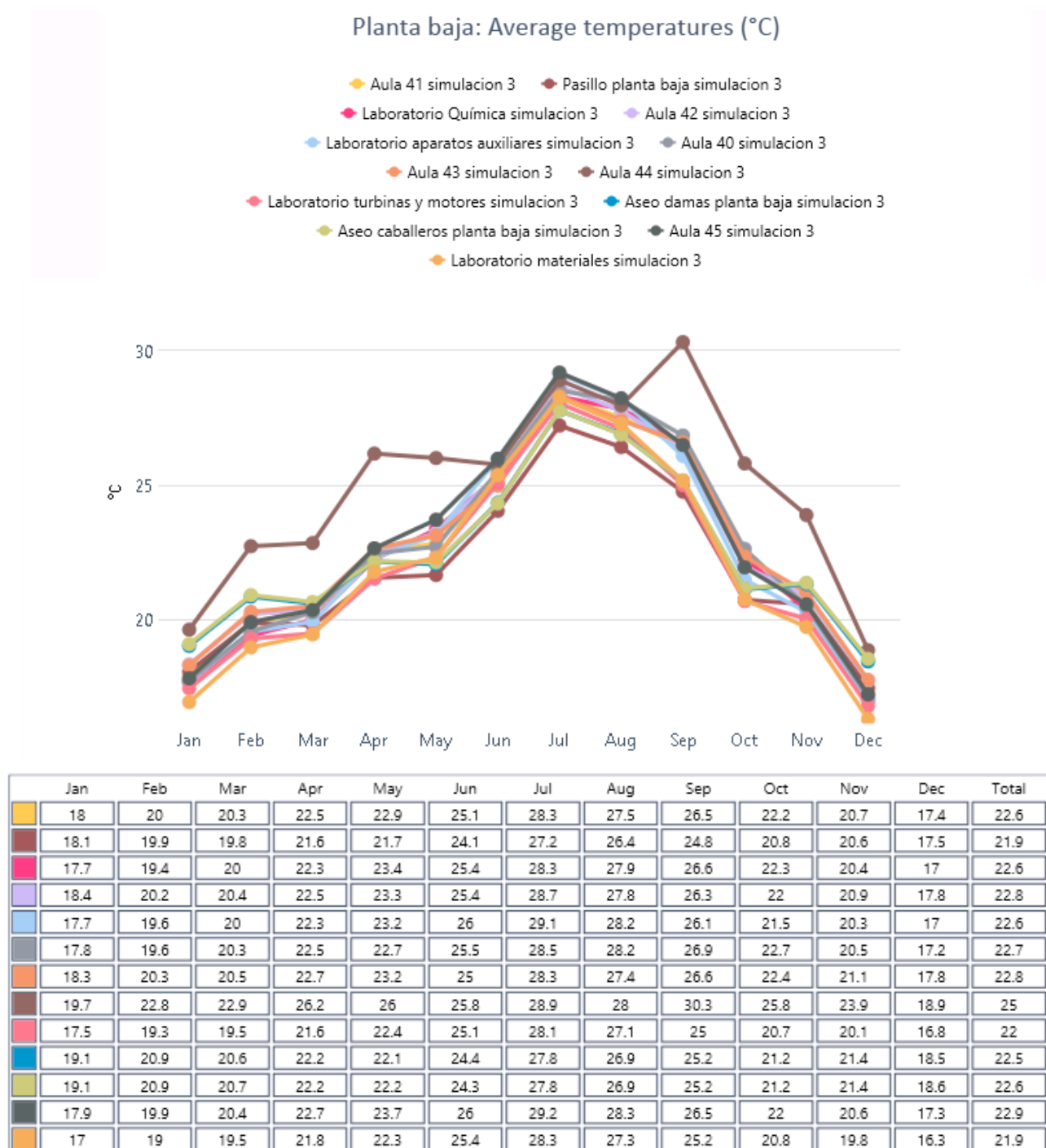
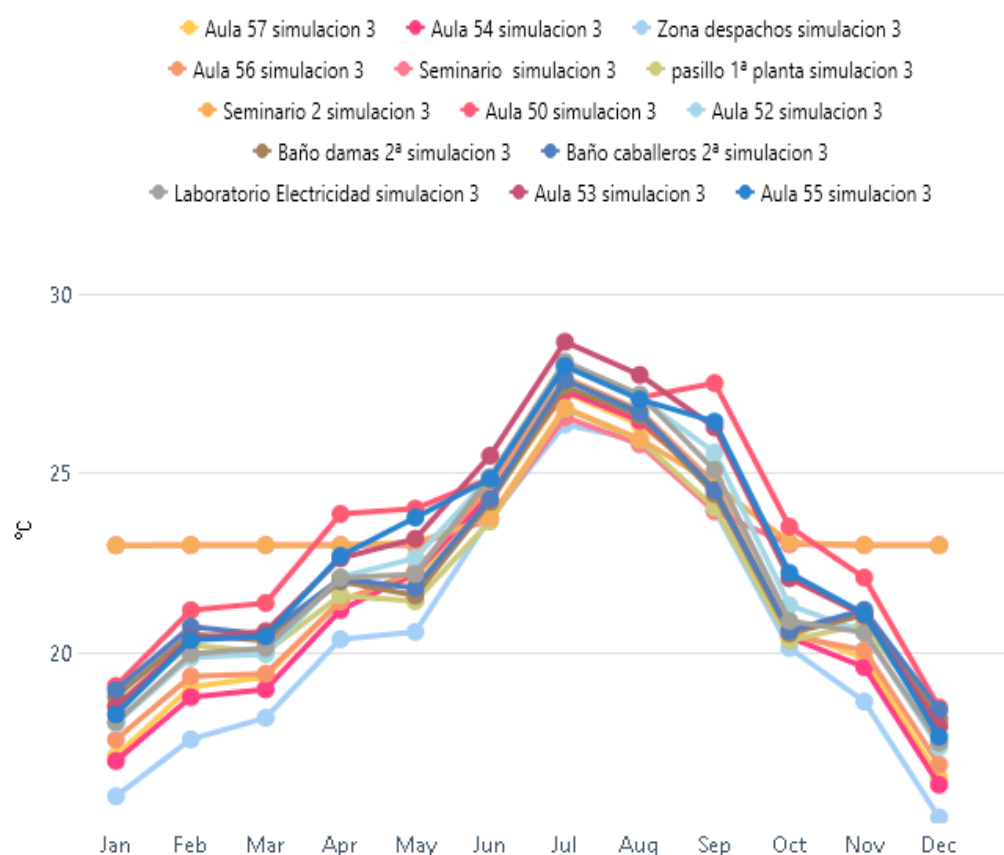


Figura A4-V (Demanda energética por zonas planta baja)

Planta primera: Average temperatures (°C)



	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	
	17.1	19	19.3	21.5	22.1	24.2	27.3	26.4	24.8	20.6	19.8	16.5	21.6
	17	18.8	19	21.2	22.2	24.4	27.3	26.5	24.6	20.4	19.6	16.3	21.5
	16	17.6	18.2	20.4	20.6	23.8	26.4	25.9	24	20.1	18.6	15.4	20.6
	17.6	19.3	19.4	21.4	22.3	24.7	27.7	26.8	24.7	20.5	20.1	16.9	21.8
	23	23	23	23	23	23.7	26.6	25.8	23.9	23	23	23	23.7
	18.6	20.2	20	21.6	21.4	23.7	26.8	25.9	24	20.3	20.8	18	21.8
	23	23	23	23	23.1	23.8	26.8	26	24.7	23.1	23	23	23.8
	19.1	21.2	21.4	23.9	24	24.9	28	27.1	27.5	23.5	22.1	18.5	23.4
	18	19.9	20	22.1	22.6	24.9	28	27.1	25.6	21.3	20.6	17.4	22.3
	18.8	20.5	20.3	22	21.6	24.2	27.4	26.6	24.4	20.5	21.1	18.2	22.2
	19	20.7	20.5	22.1	21.8	24.3	27.6	26.7	24.5	20.6	21.2	18.4	22.3
	18.1	20	20.1	22.1	22.2	24.9	28.1	27.2	25.1	20.9	20.6	17.5	22.2
	18.5	20.4	20.6	22.6	23.2	25.5	28.7	27.8	26.3	22.1	21	17.9	22.9
	18.3	20.4	20.5	22.7	23.8	24.9	28	27.1	26.4	22.2	21.1	17.7	22.8

Figura A4-VI Demanda energética por zonas, 1ª planta (BCORE)

ANEXO V: RESULTADOS SIMULACIÓN CALIBRADA

Tras la calibración del modelo, se obtuvieron nuevos resultados, más precisos que reflejan con mayor fidelidad el comportamiento energético del edificio, los más reseñables se adjuntan a continuación.

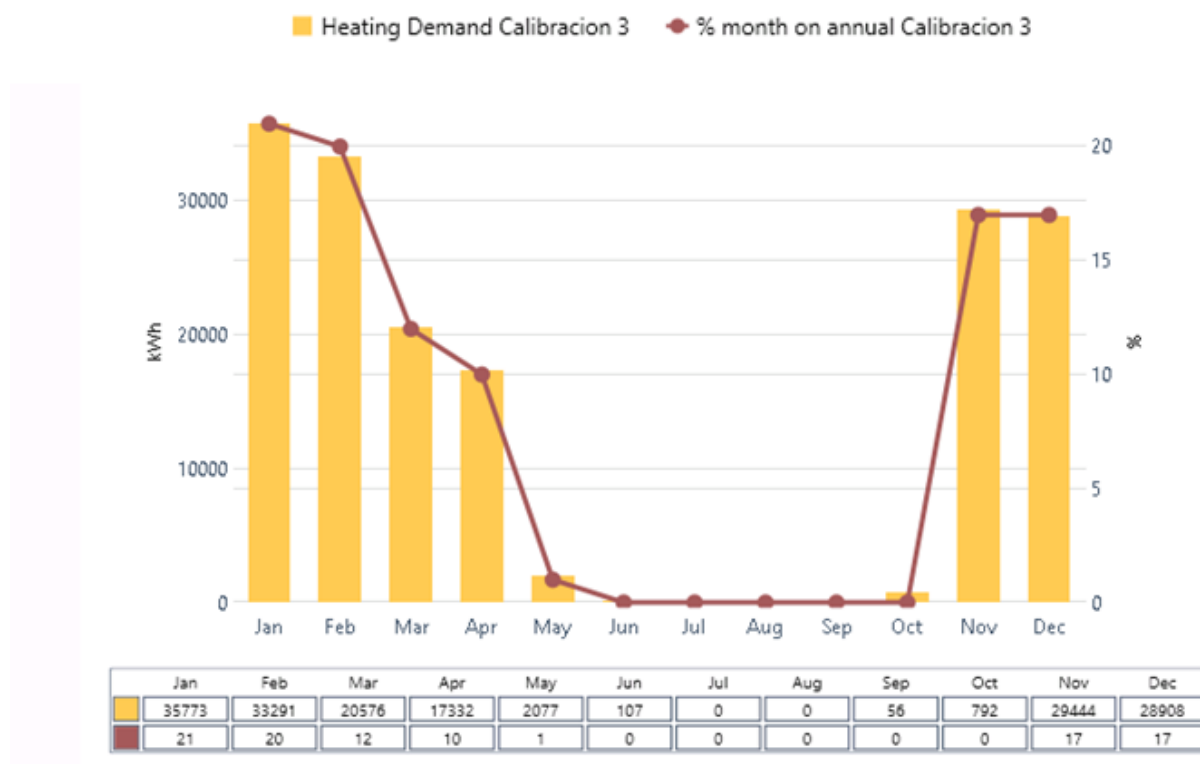


Figura A5-I Demanda global mensual calibrada (BCORE)

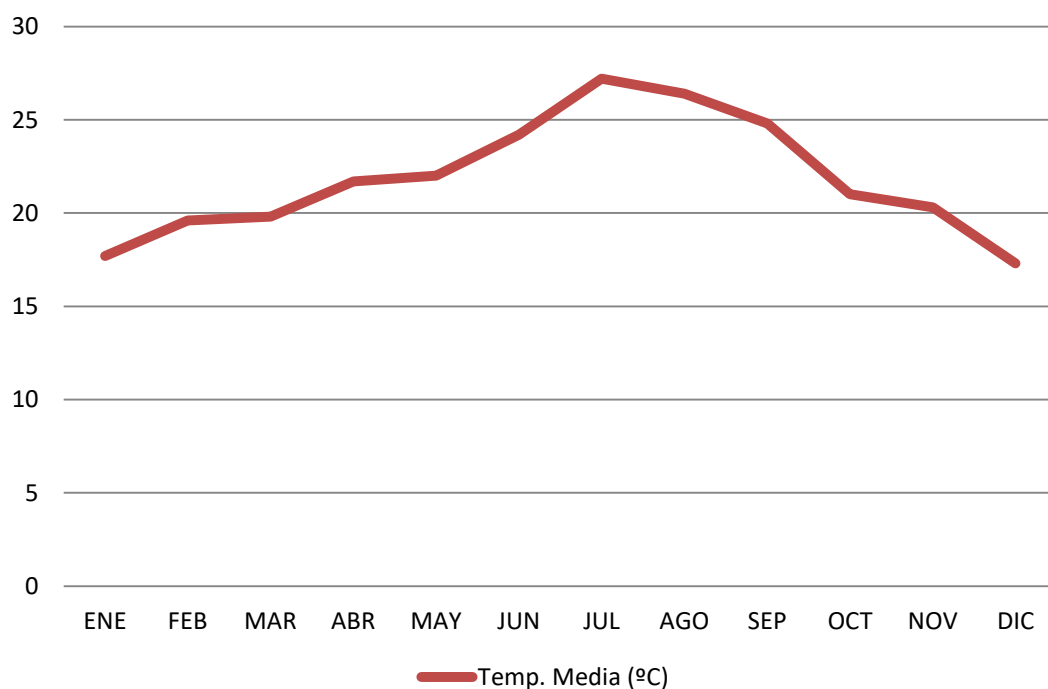


Figura A5-II Temperatura media mensual calibrada

El software BCORE, además de presentar las temperaturas medias también permite obtener información concreta de la temperatura instantánea por cada hora durante todo el periodo de simulación. A continuación se muestra las temperaturas de 4 días (Figura A5-III Temperaturas instantáneas Aula 41 (16 Nov al 21 Nov) y la temperatura de un día en concreto en la Figura A5-IV.

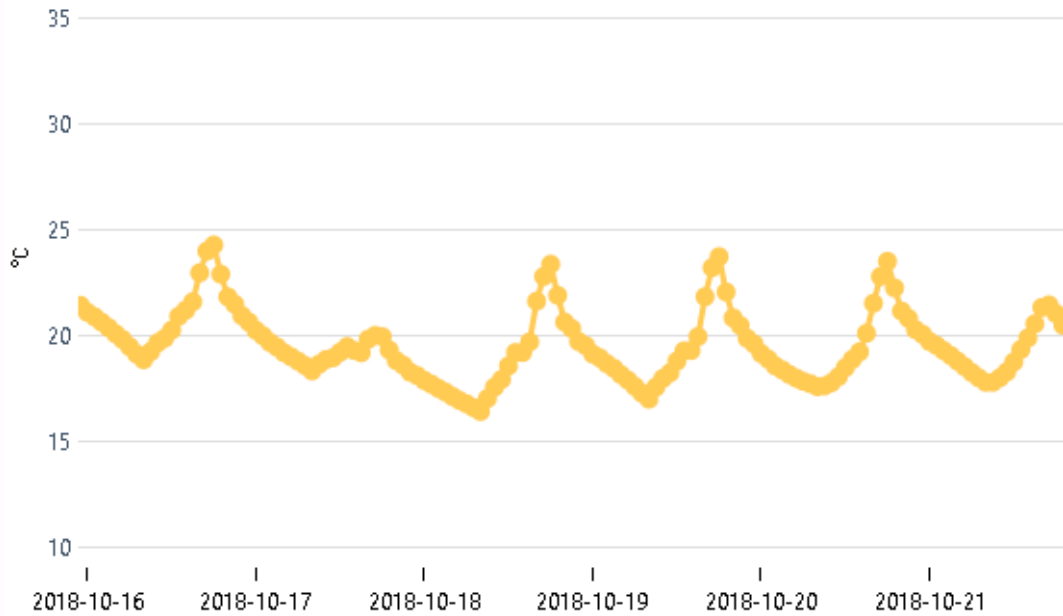


Figura A5-III Temperaturas instantáneas Aula 41 (16 Nov al 21 Nov)

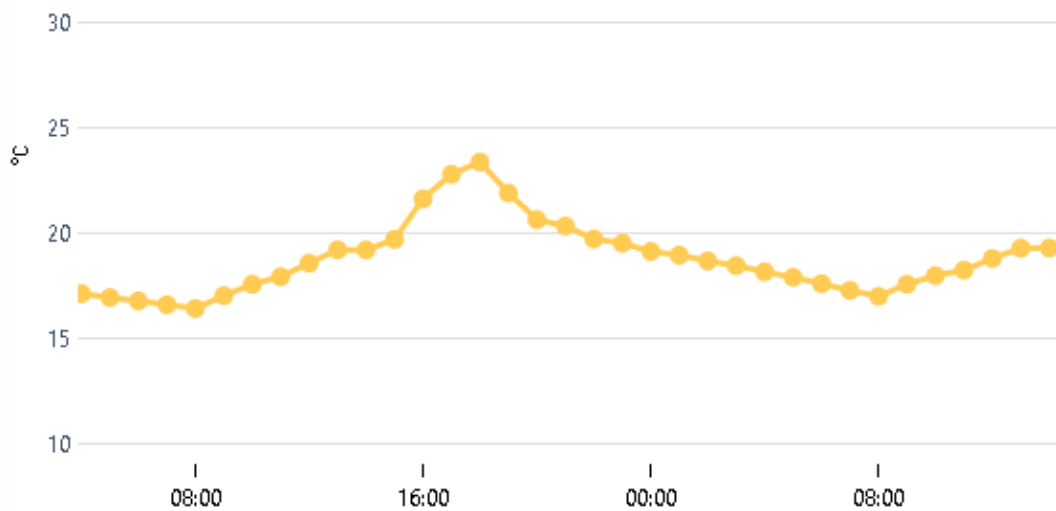
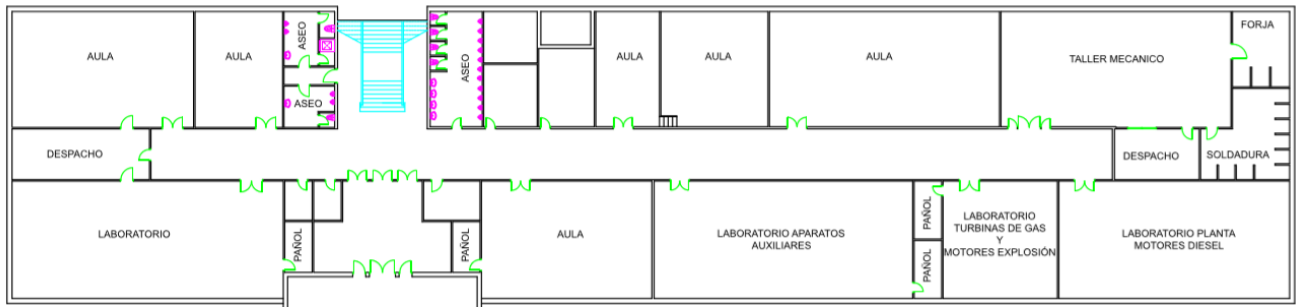
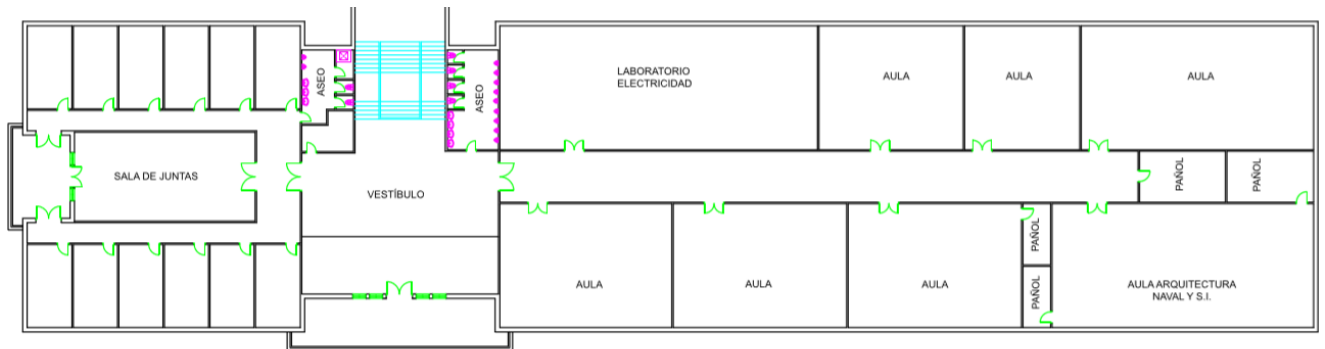


Figura A5-IV temperaturas instantáneas Aula 41 (21 Nov)

ANEXO VI: PLANOS EDIFICIO ISAAC PERAL



Edificio de Aulas "Isaac Peral" Planta Baja



Edificio de Aulas "Isaac Peral" Planta Alta

Figura A6--I Plano edificio Isaac Peral