



UNIVERSIDAD
DE MÁLAGA



ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES

Departamento: INGENIERÍA MECÁNICA, TÉRMICA Y DE FLUIDOS

**Área de Conocimiento: INGENIERÍA TÉRMICA Y EFICIENCIA
ENERGÉTICA**

TRABAJO FIN DE GRADO

ANÁLISIS DE EFICIENCIA ENERGÉTICA Y VENTILACIÓN EN COLEGIOS DE EDUCACIÓN PRIMARIA

Grado en Ingeniería Mecánica

Autor: CARLOS DANIEL GONCALVES CONTRERAS

Tutor: JAVIER MARÍA REY HERNÁNDEZ

Cotutor: FRANCISCO ANGEL FERNANDEZ HERNANDEZ

MÁLAGA, Mayo de 2025



Resumen

Debido a la importancia que está adquiriendo el programa europeo de descarbonización para el 2050, se decide realizar un estudio de eficiencia energética sobre 4 colegios ubicados en el municipio de Madrid. De esta manera, una vez se incorporen los sistemas adecuados, se podrán considerar los colegios válidos según la normativa actual, y con un rendimiento energético superior a la media de los edificios.

Para ello, se realizará una simulación de los casos mediante un software especializado, en concreto “Designbuilder”, a partir de un modelado de los colegios hecho lo más preciso posible a la realidad.

Se analizarán los parámetros obtenidos encargados del confort, balance energético y calidad del aire del caso base, para identificar posibles oportunidades de mejora, tanto pasivas como activas, en términos de eficiencia energética, poniendo las vistas en el concepto near Zero Energy Buildings (NZEB) y en el objetivo de la descarbonización del año 2050.

Finalmente, se comprobará el potencial de estas modificaciones y su viabilidad económica, con el fin de proporcionar soluciones prácticas y eficaces que disminuyan el consumo energético y favorezcan la sostenibilidad de los edificios.

Palabras clave

Eficiencia energética; DesignBuilder; near Zero Energy Building (NZEB); Modelado; Simulación energética; Mejoras pasivas y activas.

Abstract

Due to the growing importance of the European decarbonization program for 2050, an energy efficiency study is carried out on four schools located in the municipality of



Madrid. In this way, once the appropriate systems are implemented, the schools can be considered compliant with current regulations and exhibit an energy performance above the average of existing buildings.

To achieve this, the cases will be simulated using specialized software, specifically “DesignBuilder,” based on a model of the schools made as accurately as possible to reality.

The parameters obtained—related to thermal comfort, energy balance, and indoor air quality—will be analyzed in the baseline scenario to identify potential improvement opportunities, both passive and active, in terms of energy efficiency, with a focus on the concept of Near Zero Energy Buildings (NZEB) and the 2050 decarbonization objective.

Finally, the potential and economic feasibility of these modifications will be evaluated in order to provide practical and effective solutions that reduce energy consumption and promote the sustainability of buildings.

Keywords

Energy efficiency; DesignBuilder; Near Zero Energy Building (NZEB); Modeling; Energy simulation; Passive and active improvements.



Índice

Contenido

Resumen	3
Palabras clave	3
Abstract	3
Keywords	4
Índice	5
1. Objetivos	8
2. Estado del arte	10
2.1. Introducción.....	10
2.2. Marco normativo	13
2.2.1. Normativa europea	13
2.2.2. Normativa nacional.....	15
2.2.3. Normativa local	17
2.3. La eficiencia energética	19
2.3.1. Definición e importancia	19
2.3.2. Sistemas de mayor consumo y problemas habituales en edificios	20
2.3.3. Medidas de mejora: pasivas y activas.....	22
2.3.4. Certificaciones y herramientas de evaluación	24
2.4. Metodología.....	26
3. Herramientas utilizadas	28
3.1. AutoCad.....	28
3.2. DesignBuilder v7.3.....	29
4. Caso de estudio: 4 colegios de Madrid.....	31



4.1.	Colegio Montserrat FUHEM	31
4.1.1.	Contexto general.....	31
4.1.2.	Envolvente del edificio	32
4.1.3.	Sistemas y actividad	34
4.2.	Colegio Tres Olivos	38
4.2.1.	Contexto general.....	38
4.2.2.	Envolvente del edificio	39
4.2.3.	Sistemas y actividad	41
4.3.	Colegio Lourdes FUHEM	44
4.3.1.	Contexto general.....	44
4.3.2.	Envolvente del edificio	45
4.3.3.	Sistemas y actividad	47
4.4.	Colegio Hipatia FUHEM.....	50
4.4.1.	Contexto general.....	50
4.4.2.	Envolvente del edificio	51
4.4.3.	Sistemas y actividad	53
4.5.	Validación del modelo	56
5.	Análisis y resultados.....	58
5.1.	Análisis energético	58
5.2.	Ventilación	72
5.1.1.	Situación actual de ventilación en el aula	72
5.1.2.	Evaluación de la calidad del aire (CO ₂)	72
5.1.3.	Propuesta de mejora: ventilación eficiente y normativa	73
6.	Propuestas de mejora.....	74
6.1.	Tres Olivos.....	75



6.2.	Montserrat.....	81
6.3.	Lourdes	84
6.4.	Hipatia	89
7.	Conclusiones	93
8.	Líneas futuras	95
9.	Bibliografía.....	96
10.	Anexos.....	98



1. Objetivos

Este estudio tiene como objetivo principal realizar un análisis exhaustivo del comportamiento energético de cuatro centros educativos ubicados en el término municipal de Madrid, con la finalidad de detectar posibles áreas de mejora que contribuyan a optimizar su consumo energético y aumentar su eficiencia. Para alcanzar este propósito, se procederá a la creación de un modelo energético base de cada institución escolar mediante el empleo del software especializado DesignBuilder, herramienta que utiliza como núcleo de cálculo el potente motor EnergyPlus, reconocido por su precisión en simulaciones energéticas.

La información necesaria para el modelado digital de los centros educativos en la plataforma informática se obtendrá a partir de la documentación técnica disponible, incluyendo planos arquitectónicos y libros del edificio que han sido puestos a nuestra disposición. Estos datos se complementarán con el uso de software de diseño asistido por ordenador (AutoCAD) y se enriquecerán con mediciones específicas y parámetros técnicos recogidos in situ por un miembro del equipo de investigación durante visitas técnicas a los propios centros escolares. Este meticuloso proceso de recopilación de información tiene como finalidad lograr una representación digital lo más ajustada posible a las condiciones reales de cada edificio.

Una vez establecidos y validados los modelos base, se procederá a simular mediante el software diversas medidas de mejora energética, que podrán clasificarse en dos categorías principales: medidas pasivas, centradas en la optimización de la envolvente térmica y los elementos de cerramiento del edificio; y medidas activas, orientadas a la modernización de los sistemas de climatización y a la posible integración de fuentes de energía renovable. Cada una de estas propuestas de mejora será evaluada de manera individualizada, analizando minuciosamente su impacto en el rendimiento energético



UNIVERSIDAD
DE MÁLAGA



global del edificio y determinando su factibilidad tanto desde el punto de vista técnico como económico.

El propósito último de esta investigación es desarrollar recomendaciones prácticas y viables que permitan incrementar significativamente la eficiencia energética de estos centros educativos, orientándolos hacia el estándar de edificios de consumo energético casi nulo (nZEB, por sus siglas en inglés), y avanzando así hacia los ambiciosos objetivos de descarbonización establecidos por la Unión Europea para el horizonte del año 2050. Este trabajo pretende, por tanto, sentar las bases para futuras intervenciones de rehabilitación energética en el parque educativo madrileño.



2. Estado del arte

2.1. Introducción

Al observar la historia reciente del panorama energético, nos remontamos a la crisis del petróleo de la década de los 70, en la que quedó en evidencia la vulnerabilidad de los países industrializados ante la dependencia de los combustibles fósiles. En 1973, la Organización de Países Exportadores de Petróleo (OPEP) tomó ciertas medidas, disparando el precio del crudo y generando así una gran crisis energética a nivel mundial. Esta situación obligó a muchos países a empezar a reducir el consumo energético, a introducir programas públicos de ahorro —desde límites de velocidad en carretera hasta etiquetas energéticas en los electrodomésticos— y a buscar alternativas al petróleo convencional. Durante esta primera oleada de políticas se sentaron las bases de los futuros códigos de construcción con requisitos mínimos de aislamiento térmico, que más tarde evolucionarían hacia los estándares de eficiencia actuales (IEA, 2021).

La segunda gran sacudida, la crisis del petróleo de 1979 derivada de la Revolución Islámica en Irán, nuevamente afectó gravemente la economía global, haciendo aún más evidente la necesidad de reformas estructurales en las políticas energéticas. Durante este periodo, muchos países europeos, incluidos España y Francia, comenzaron a desarrollar estrategias orientadas a la reducción de la dependencia de los combustibles fósiles, como el impulso de la energía nuclear, la diversificación de combustibles y las primeras inversiones en fuentes renovables. Sin embargo, el concepto de eficiencia energética tal y como lo entendemos hoy empezó a tomar forma con el tiempo, principalmente a partir de la década de 1990, gracias a programas europeos como SAVE y a la aparición de auditorías energéticas obligatorias en los edificios del sector público.



Figura 1. Crisis del petróleo 1973.

La preocupación por la eficiencia energética no solo surgió por los altos precios del petróleo, sino también por las consecuencias ambientales derivadas del uso intensivo de energías no renovables. La creciente evidencia científica sobre el cambio climático, junto con la firma del Protocolo de Kioto en 1997 y, más recientemente, las advertencias del Sexto Informe de Evaluación del IPCC (2023), reforzaron la necesidad de limitar el calentamiento global muy por debajo de 2 °C mediante una drástica reducción de emisiones (IPCC, 2023).

Así, a lo largo de los últimos treinta años los países europeos han ido adoptando medidas cada vez más estrictas para mejorar el rendimiento energético de los edificios, que se han convertido en un pilar central de las estrategias climáticas nacionales.

Actualmente, los edificios suponen en torno al 40 % del consumo energético de la Unión Europea y, por tanto, son responsables de una proporción similar de las emisiones de CO₂ asociadas a la energía (WorldGBC, 2024). Conviene subrayar que aproximadamente el 75 % del parque edificado fue construido antes de que existieran normas de eficiencia y que casi el 97 % necesitará alguna actuación de rehabilitación profunda antes de 2050. Para revertir esta situación, muchos Estados miembros están reforzando su normativa con objetivos de reducción de la demanda primaria y con



incentivos fiscales a la rehabilitación, dado que la energía operativa de los edificios sigue siendo la principal fuente de emisiones urbanas.

La Directiva Europea sobre el Rendimiento Energético de los Edificios (EPBD 2010/31/UE) exige, desde 2020, que todos los edificios nuevos se adapten al concepto de nearly Zero-Energy Building (nZEB), lo que implica combinar una envolvente de muy baja demanda con un importante aporte de energías renovables (in situ o nearby) (Comisión Europea, 2010). Dicha directiva fue refundida en 2018 y, en marzo de 2024, el Parlamento Europeo aprobó una nueva revisión que endurece las exigencias de rehabilitación y prevé la descarbonización total del parque edificado en 2050 (Parlamento Europeo, 2024).

Las inquietudes en torno a la seguridad del abastecimiento y la competencia a nivel mundial, junto con el reciente incremento de los precios del gas y la electricidad, ponen de manifiesto la necesidad de que Europa avance hacia un modelo energético más resiliente y eficiente. Entre las soluciones con mayor proyección figura la cogeneración y su evolución hacia la trigeneración, capaz de producir simultáneamente electricidad, calor y frío a partir de una única fuente de energía, con rendimientos globales superiores al 80 % y reducciones significativas de CO₂ frente a las calderas convencionales.

A día de hoy, la Unión Europea mantiene el objetivo mínimo de que el 20 % del consumo energético bruto proceda de fuentes renovables, aunque la Directiva de Energías Renovables revisada en 2023 eleva el listón obligatorio al 42,5 % para 2030 y plantea un objetivo indicativo del 45 % (Comisión Europea, 2023). Dicho horizonte converge con los escenarios a largo plazo del Consejo Europeo de Energías Renovables (EREC, 2012), que proyectaba alcanzar un 66 % para 2030 y un 100 % para 2050, subrayando la necesidad de combinar eficiencia, electrificación y generación renovable a gran escala (EREC, 2012).



2.2. Marco normativo

La eficiencia energética de los edificios no está marcada únicamente por los criterios de diseño, sino que depende en gran parte de un marco legislativo sobre el que hay que trabajar. De esta manera, resulta primordial hacer un análisis de los distintos niveles de normativa con los que nos encontramos, para comprender el contexto actual de nuestros edificios de estudio, así como lo condicionados que se encuentran.

2.2.1. Normativa europea

La estrategia energética de la Unión Europea se basa en una transición hacia un modelo sostenible, resiliente y descarbonizado. En este contexto, la Comisión Europea presentó en 2019 el Pacto Verde Europeo (European Green Deal), una hoja de ruta cuyo objetivo principal es alcanzar la neutralidad climática en 2050, es decir, que las emisiones netas de gases de efecto invernadero se reduzcan a cero (Comisión Europea, 2019). Para lograr esta meta, el sector de la edificación se identifica como uno de los más relevantes, ya que representa cerca del 40 % del consumo energético final y el 36 % de las emisiones de CO₂ en la Unión Europea (Comisión Europea, 2020).

Una de las piezas legislativas fundamentales para alcanzar los objetivos del Green Deal es la Directiva 2010/31/UE del Parlamento Europeo y del Consejo, conocida como la EPBD (Energy Performance of Buildings Directive). Esta directiva establece los requisitos mínimos para la eficiencia energética de los edificios dentro de la Unión Europea, promoviendo tanto la construcción de edificios nuevos de consumo de energía casi nulo (nZEB) como la renovación del parque edificatorio existente (Parlamento Europeo y del Consejo, 2010). En su artículo 9, se especifica que todos los edificios de nueva construcción deberán ser nZEB a partir del 31 de diciembre de 2020, o incluso antes en el caso de los edificios públicos.



Además, la EPBD obliga a los Estados miembros a adoptar métodos de cálculo del rendimiento energético de los edificios basados en estándares europeos, a establecer requisitos mínimos tanto para elementos constructivos como para sistemas técnicos, y a garantizar la disponibilidad de un certificado de eficiencia energética (CEE) para cada inmueble (artículos 3, 4 y 11, respectivamente). Asimismo, contempla la inspección periódica de los sistemas de calefacción y aire acondicionado con el fin de mejorar su rendimiento y alargar su vida útil (artículos 14 a 17).

En línea con esta directiva, y como parte del paquete “Fit for 55” que pretende reducir las emisiones netas en al menos un 55 % para 2030, la Comisión propuso en 2021 una revisión de la EPBD que plantea endurecer los estándares mínimos, promover las renovaciones integrales y vincular los fondos europeos a criterios de sostenibilidad energética (Comisión Europea, 2021).

Por otra parte, la Directiva 2009/28/CE, relativa al fomento del uso de energías procedentes de fuentes renovables, establece que para 2030 al menos el 32 % del consumo energético total en la Unión Europea deberá provenir de fuentes renovables (Parlamento Europeo y del Consejo, 2009). Esta directiva complementa a la EPBD al exigir que los Estados miembros fomenten el uso de energía renovable en los edificios, especialmente para los sistemas de calefacción, refrigeración y agua caliente sanitaria. En este sentido, tecnologías como la energía solar térmica, la aerotermia, la biomasa o la geotermia, desempeñan un papel clave en el cumplimiento de ambos marcos legislativos.

Cabe destacar que la interrelación entre ambas directivas es esencial para alcanzar los objetivos climáticos europeos. La mejora del rendimiento energético del edificio no es suficiente por sí sola; debe ir acompañada de una descarbonización progresiva de las fuentes de energía utilizadas. El Green Deal refuerza esta sinergia a través de iniciativas como la “Oleada de Renovación (Renovation Wave)”, presentada en 2020, que tiene



como objetivo duplicar la tasa de renovación energética anual en la UE y asegurar que estas intervenciones tengan un enfoque integral que mejore también la calidad de vida, el confort térmico y el valor del parque edificado (Comisión Europea, 2020).

2.2.2. Normativa nacional

España, en línea con los compromisos adquiridos en el marco de la Unión Europea, ha consolidado un sistema normativo que impulsa la transición energética hacia un modelo más eficiente, sostenible y bajo en emisiones. Este marco se apoya en estrategias de planificación a medio y largo plazo, leyes estatales y una normativa técnica específica que regula tanto el diseño como el funcionamiento de los edificios, con un énfasis particular en la eficiencia energética de sus sistemas térmicos.

Uno de los instrumentos más relevantes es el Plan Nacional Integrado de Energía y Clima (PNIEC) 2021–2030, aprobado por el Gobierno español en marzo de 2021. Este plan, en cumplimiento del Reglamento (UE) 2018/1999 sobre la gobernanza de la unión de la energía, define los objetivos nacionales en cinco dimensiones clave: descarbonización, eficiencia energética, seguridad energética, mercado interior de la energía e I+D+i. Con respecto a la eficiencia energética, el PNIEC establece una meta de reducción del consumo de energía primaria en un 39,5 % respecto a un escenario tendencial para el año 2030 (Gobierno de España, 2020). Además, promueve la rehabilitación del parque edificatorio existente, especialmente en el sector público y educativo, reconociendo su papel ejemplarizante. Entre sus líneas de actuación destacan la electrificación de la demanda, la integración de energías renovables térmicas (como la solar térmica y la aerotermia) y el fomento de la rehabilitación energética mediante incentivos financieros y marcos regulatorios más exigentes.

Este marco estratégico encuentra respaldo legal en la Ley 7/2021, de 20 de mayo, de cambio climático y transición energética, que establece el marco jurídico necesario para alcanzar la neutralidad climática antes de 2050. En su artículo 8, se exige que los edificios de titularidad pública que se sometan a rehabilitaciones importantes adopten, en la medida de lo posible, los criterios de edificios de consumo de energía casi nulo



(nZEB). Además, fomenta la integración de sistemas de energías renovables en edificios, en coherencia con los objetivos establecidos en el PNIEC y con las directrices europeas en materia de descarbonización del sector de la edificación (BOE, 2021).

Desde el punto de vista técnico, el principal referente es el Código Técnico de la Edificación (CTE), regulado por el Real Decreto 314/2006. Dentro de este, el Documento Básico HE (DB-HE) recoge las exigencias mínimas de eficiencia energética para edificios nuevos y para intervenciones en edificios existentes. La última revisión significativa del DB-HE, mediante el Real Decreto 732/2019, incorporó los requerimientos derivados de la Directiva 2010/31/UE relativa a la eficiencia energética de los edificios. Este documento se divide en varios apartados, entre los que destacan:

- HE0 – Limitación del consumo energético: establece límites máximos de consumo de energía primaria total y no renovable, expresados en kWh/m²·año, en función del uso y la zona climática.
- HE1 – Condiciones para el control de la demanda energética: regula la calidad térmica de la envolvente del edificio, con el objetivo de reducir la demanda de calefacción y refrigeración.
- HE4 – Contribución mínima de energías renovables para ACS: exige que una fracción significativa de la demanda de agua caliente sanitaria se cubra mediante fuentes renovables, normalmente mediante solar térmica o sistemas equivalentes (Ministerio de Fomento, 2019).

Estas disposiciones aseguran que los edificios no solo reduzcan su demanda energética, sino que también recurran a fuentes sostenibles para cubrir sus necesidades térmicas, contribuyendo así a los objetivos globales de sostenibilidad.

Complementariamente, el Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios (RITE), aprobado por el Real Decreto 1027/2007 y actualizado mediante el Real Decreto 178/2021, regula el diseño, la ejecución, el mantenimiento y la operación de las instalaciones térmicas. El RITE establece requisitos de eficiencia energética y calidad del aire interior, imponiendo criterios como la incorporación de sistemas de control automatizado, el uso de equipos de alta eficiencia y la obligatoriedad de inspecciones

periódicas. En entornos como los centros escolares, donde la calidad ambiental interior tiene un impacto directo en la salud y el rendimiento de los usuarios, el cumplimiento riguroso del RITE es especialmente relevante (Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, 2021).



Figura 2. Portada RITE

En conjunto, el marco normativo nacional establece una hoja de ruta clara para avanzar hacia un parque edificatorio más eficiente, resiliente y alineado con los objetivos climáticos europeos. La aplicación rigurosa de estas normas resulta fundamental en edificios públicos como los colegios, donde la mejora energética no solo reduce el consumo y las emisiones, sino que también genera entornos más saludables y confortables para el aprendizaje.

2.2.3. Normativa local

A nivel autonómico y municipal, la normativa y planificación energética en la Comunidad de Madrid se orienta al cumplimiento de los compromisos nacionales y europeos, adaptando las estrategias globales a las particularidades del entorno urbano y climático madrileño. Si bien la Comunidad no cuenta con un código técnico propio como el estatal, sí ha desarrollado planes estratégicos y programas de acción que



inciden directamente en la eficiencia energética de los edificios públicos, incluyendo centros educativos.

Uno de los documentos clave en este ámbito es el Plan de Acción para la Sostenibilidad Energética en la Comunidad de Madrid, aprobado en el marco del Pacto de los Alcaldes para el Clima y la Energía. Este plan establece objetivos concretos de reducción de emisiones y mejora de la eficiencia energética en infraestructuras públicas, con una atención especial a los edificios administrativos, sanitarios y educativos. Entre las medidas contempladas destacan la rehabilitación energética de centros escolares, la incorporación de energías renovables (como solar fotovoltaica en cubiertas) y la mejora de la ventilación y el aislamiento térmico en edificios existentes (Comunidad de Madrid, 2022).

Desde el ámbito municipal, el Ayuntamiento de Madrid ha impulsado su propia estrategia de sostenibilidad a través del programa Madrid 360, que incluye actuaciones dirigidas a la reducción del consumo energético en edificios públicos y a la electrificación de los servicios municipales. En el caso de los colegios públicos de titularidad municipal, se han llevado a cabo varias intervenciones orientadas a la instalación de sistemas fotovoltaicos, mejoras en la envolvente térmica y renovación de instalaciones térmicas obsoletas. Estas acciones se enmarcan en los compromisos adquiridos por la ciudad en su Estrategia de Mitigación y Adaptación al Cambio Climático (2022–2030), que busca reducir en un 65% las emisiones municipales para el año 2030.

Asimismo, tanto la Comunidad como el Ayuntamiento han participado en la gestión y distribución de fondos europeos del programa Next Generation EU, canalizados a través del Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia. Parte de estos fondos se ha destinado a programas de rehabilitación energética de edificios públicos (como el PREE 5000), que han beneficiado directamente a centros escolares mediante actuaciones integrales de mejora de la eficiencia térmica, sistemas de climatización y autoconsumo eléctrico.



En definitiva, aunque la normativa local no impone criterios técnicos tan detallados como el marco estatal, sí establece directrices y líneas de actuación concretas que impulsan la eficiencia energética en los edificios escolares de la región, contribuyendo de manera efectiva a los objetivos nacionales y europeos de descarbonización.

2.3. La eficiencia energética

2.3.1. Definición e importancia

La eficiencia energética en edificios se entiende como la capacidad para abastecer sus necesidades energéticas con el menor consumo posible de energía. Según el Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE), un edificio eficiente es aquel que reduce al mínimo la energía necesaria para su uso habitual, sin comprometer las condiciones de habitabilidad y calidad ambiental.

Es importante diferenciar este concepto del de ahorro energético, que consiste en la reducción absoluta del consumo de la energía, ya sea por un uso más eficiente de esta o simplemente por una restricción de su uso, mientras que la eficiencia energética lo que busca es consumir menos para el mismo abastecimiento.

La preocupación por la eficiencia energética en los edificios no es una novedad, ya que como hemos comentado anteriormente, fue durante la crisis del petróleo de los años 70 cuando los países se empezaron a concienciar de la necesidad de racionalizar la energía y diversificar sus fuentes de origen. Este contexto dió paso a que surgieran las primeras normativas orientadas al aislamiento térmico y al control del consumo en los edificios. En España, esta preocupación se consolidó décadas después con la aprobación del Código Técnico de la Edificación (CTE) en el 2006, mientras que en Europa se publicaban directivas marco como la 2002/91/CE y su posterior actualización (2010/31/UE), que sentaron las bases de una estrategia común para reducir el consumo de los edificios europeos.



Hoy en día, la eficiencia energética forma parte de un enfoque más amplio que engloba sostenibilidad, descarbonización y resiliencia frente al cambio climático. En este contexto y teniendo en cuenta que representan aproximadamente un 40 % del consumo total de energía en la Unión Europea, los edificios cobran cada vez una mayor importancia, siendo consideradas piezas claves dentro de la transición energética buscada. La necesidad de cumplir con los compromisos internacionales y de mejorar la calidad ambiental de los espacios construidos ha convertido la eficiencia energética en una prioridad a la hora de realizar una planificación o diseño constructivo, como es el caso de los cuatro colegios que tenemos como objeto de estudio.

2.3.2. Sistemas de mayor consumo y problemas habituales en edificios

En los edificios, el consumo energético se reparte entre diversos sistemas e instalaciones, destacando entre ellos los sistemas de climatización, que son los principales demandantes de energía, especialmente en edificios como pueden ser nuestros centros escolares, en los que la tasa de ocupación es muy alta y requiere el mantenimiento de unas condiciones de confort de manera continua.

A ellos se suman los equipos eléctricos y de oficina, y la iluminación artificial, la cual puede llegar a ser muy significativa en zonas donde no haya acceso a luz natural. Por otro lado, tendríamos también el agua caliente sanitaria (ACS), que en el caso de nuestros centros escolares no tendrían mucho impacto.

Un ineficiente funcionamiento de estos sistemas no se debe únicamente a su tecnología, sino a problemas de su diseño constructivo que pueden reducir notablemente el rendimiento energético del edificio. Entre ellos destacan:

- Infiltraciones de aire no deseadas a través de rendijas, ventanas mal selladas o juntas deterioradas, que provocan pérdidas térmicas y aumentan la demanda de calefacción o refrigeración.



- Aislamiento térmico deficiente en muros, cubiertas o suelos, lo que impide mantener una temperatura interior estable sin un elevado gasto energético.
- Carpinterías de baja eficiencia, como ventanas con acristalamiento simple.
- Sistemas de ventilación inadecuados, ya sea por falta de renovación de aire, ausencia de recuperación de calor o por el uso de sistemas obsoletos.

Estos problemas nos los encontramos principalmente en edificios antiguos, donde no se tenía en cuenta la eficiencia energética a la hora de planificar su diseño. Estas deficiencias de diseño a la larga pueden suponer grandes pérdidas, así como un gran consumo de energía sin garantizar condiciones internas de confort.

Otro problema constructivo en el que queremos entrar más en detalle son los Puentes Térmicos, que son zonas localizadas de la envolvente donde la resistencia térmica disminuye respecto al resto del cerramiento (como pueden ser encuentros de forjado con fachada, pilares embebidos, perímetros de huecos o cambios de espesor), provocando pérdidas adicionales de calor, riesgo de condensaciones superficiales y descensos de confort. Su efecto puede representar entre un 5 % y un 20 % de la transmisión total de un edificio, por lo que es preciso cuantificarlo e incluirlo en la simulación energética.

Para su identificación, se partirá del catálogo de detalles constructivos del CTE (Anejo E del DB-HE) y de los planos facilitados por los centros, localizando los siguientes tipos principales: intersección forjado–fachada, encuentro fachada–cubierta inclinada, cajas de persiana en huecos y esquinas salientes y entrantes. Para cada tipología, se asignará un valor de Ψ ($W/m \cdot K$) procedente del Libro del Edificio, y si no se dispone de detalle constructivo exacto, se adoptará el valor medio por tipología indicado en el CTE, aplicando el criterio conservador.

Luego, para estimar la transmisión adicional que estos producen, la longitud L (m) de cada puente se medirá en los planos CAD y se introducirán en una hoja de cálculo que multiplica $L \cdot \Psi$. La suma de todas las pérdidas lineales se comparará con la transmisión total por cerramientos. Se puede adelantar que el análisis arroja que los puentes térmicos representan entre el 9% y el 13% de la transmisión del edificio, valores coherentes con bibliografía para construcciones de los años 1990-2005.

Como DesignBuilder no modela puentes térmicos de forma explícita, se seguirá la metodología aceptada en el Anejo D del DB-HE: aumentar la U global de cada cerramiento vertical y horizontal un 10 % para reflejar el efecto de los puentes térmicos lineales. Este ajuste se aplicará tanto al modelo base como a los escenarios de mejora, manteniendo la comparabilidad.

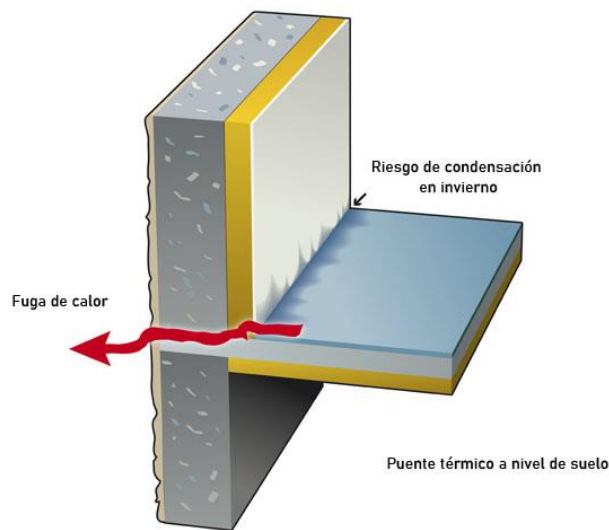


Figura 3. Puente Térmico.

La identificación de estos factores es clave para proponer modificaciones eficaces, tanto desde el diseño arquitectónico como desde el punto de vista de la gestión energética del edificio.

2.3.3. Medidas de mejora: pasivas y activas

Para reducir el consumo energético de los edificios sin comprometer el confort de sus ocupantes, es fundamental aplicar medidas de mejora que actúen tanto sobre el diseño constructivo como sobre los sistemas. Estas medidas pueden clasificarse en estrategias



pasivas, que están relacionadas con el diseño arquitectónico, y estrategias activas, que implican el uso de sistemas mecánicos o tecnológicos para optimizar el rendimiento energético del edificio.

Las medidas pasivas son aquellas que aprovechan las condiciones del clima, los materiales y la forma en que está diseñado el edificio para reducir el consumo energético base. Entre las más habituales tenemos el aislamiento térmico en muros, cubiertas o suelos; orientar correctamente el edificio para aprovechar el sol en invierno y protegerse de él en verano; instalar ventanas que sean más eficientes, por ejemplo con vidrios de baja emisividad; colocar protecciones solares como lamas, persianas o aleros; y favorecer la ventilación natural cruzada, que ayuda a renovar el aire sin tener que depender de sistemas mecánicos. También es sumamente eficaz emplear materiales con alta inercia térmica, que ayudan a estabilizar las temperaturas en el interior y evitar cambios bruscos. Este tipo de soluciones son eficaces sobre todo en zonas con clima templado, como ocurre en buena parte de España

En cuanto a las medidas activas, estas buscan mejorar el rendimiento de los sistemas que sí consumen energía. Aquí entran en juego, por ejemplo, los equipos de climatización eficientes, como las bombas de calor o los sistemas VRV, que consiguen un rendimiento bastante alto a lo largo del año. También es muy importante incorporar sistemas electrónicos de control que ajusten el funcionamiento del edificio según la hora, el clima o la ocupación. Otras acciones interesantes pueden ser implementar iluminación con tecnología LED para reducir drásticamente su consumo, usar ventilación mecánica con recuperación de calor o integrar energías renovables, como pueden ser los paneles solares.



Figura 4. Paneles fotovoltaicos como medida activa.

A largo plazo, resulta más rentable las medidas pasivas, ya que te permite establecer un régimen eficiente en la estructura base. La dificultad radica en que la inversión inicial de estas modificaciones es muy costosa, por lo que es necesario establecer un balance económico para analizar su rentabilidad con el tiempo. Dado esto, lo más efectivo es combinar tanto medidas pasivas como activas, buscando con esta combinación marcar la diferencia a medio y largo plazo, tanto en sostenibilidad como en ahorro económico.

2.3.4. Certificaciones y herramientas de evaluación

Para comprobar que un edificio cumple las exigencias de eficiencia y sostenibilidad no basta con suponer que las soluciones son buenas, hace falta medir, comparar y verificar. A partir de ahí surgen los sellos de certificación y las herramientas de simulación y cálculo que los respaldan. Entre los sistemas más extendidos a nivel internacional destaca LEED (Leadership in Energy and Environmental Design), que puntúa el edificio en categorías como energía, agua, materiales o calidad interior y lo clasifica de *Certified* a *Platinum*. Similar a este tenemos BREEAM, el cual busca el mismo fin usando criterios algo distintos, mirando más de cerca el cuidado en la fase de obra y no solo el resultado final.

En el ámbito español se utiliza VERDE, desarrollado por Green Building Council España, que adapta los indicadores a la normativa y clima locales. Cuando la prioridad

es la demanda casi nula, el estándar Passivhaus fija valores límite muy estrictos de calefacción, refrigeración y hermeticidad; por ese motivo se ha convertido en la referencia para edificios de consumo casi nulo (nZEB). Otros sellos, como WELL, ponen el foco en la salud y el bienestar de los ocupantes, pero también exigen de manera estricta un control de la energía.

Para justificar estas certificaciones, y para cualquier estudio previo de diseño o rehabilitación, se recurre a herramientas de simulación energética. En España las más habituales son HULC (Herramienta Unificada LIDER-CALENER) y CE3X cuando se trata de la certificación oficial de la eficiencia energética (etiqueta A-G). Para análisis más detallados se puede emplear el software de simulación energética y ambiental DesignBuilder, cuyo motor de cálculo es EnergyPlus, uno de los más avanzados y reconocidos a nivel mundial, que ha sido desarrollado durante décadas por el Departamento de Energía de los Estados Unidos de América. Este permite modelar hora a hora la demanda, el consumo y las condiciones interiores, tal como se ha hecho en este TFG.

Otras opciones, como CYPE-Therm, IES-VE o TRNSYS, amplían el abanico cuando se necesitan cálculos específicos más relacionados con la humedad, renovables o simulaciones transitorias complejas. En todos los casos se busca disponer de datos comparables y reproducibles que respalden las decisiones de diseño y, si se busca un sello, sumar los créditos necesarios para obtener la categoría deseada.



Figura 5. Clasificación de los certificados energéticos.



2.4. Metodología

La línea de trabajo a seguir en la investigación para este Trabajo Fin de Grado comienza con el planteamiento de los objetivos, en el cual se impone el alcance de la investigación, así como su contenido. Estos objetivos no son mas que conseguir representar en un software especializado ciertos edificios, con el fin de hacer simulaciones energéticas, analizar su comportamiento e implementar mejoras que puedan ser rentables tanto económicamente como energéticamente.

Para poder llevarlo a cabo, empezamos realizando búsquedas bibliográficas que nos permitan profundizar en el tema de investigación, conocer su contexto histórico, identificar la normativa de referencia en la que se fundamenta el estudio y justificar nuestras decisiones técnicas.

Una vez asimilado el trasfondo del asunto, nos ponemos a recopilar toda la información necesaria de los colegios de estudio mediante la facilitación del Libro del Edificio, de sus planos en AutoCAD y de datos tomados in situ por una compañera de investigación en Madrid. Con toda esta documentación a disposición, se pone en marcha el modelado de los colegios en DesignBuilder. Para ello será necesario la inserción de los planos a escala en formato DXF en el software, partiendo de ellos para levantar el edificio e ir añadiendo los muros, cubiertas, ventanas, puertas, etc.

Con las superficies físicas de los edificios construidas, procedemos a añadir características básicas para la simulación energética como pueden ser la actividad, ocupación, clima (ajustado automáticamente al indicar la localidad en Madrid), actividad metabólica, etc. Después de esto, nos veremos en la necesidad también de ajustar los cerramientos para replicar la realidad con alta precisión, así como la introducción de los sistemas de climatización (HVAC) e iluminación.

Una vez ya introducidos todos los parámetros, damos paso a empezar las simulaciones, tanto de la demanda del edificio como de su comportamiento con los sistemas incluidos. Se establecerá la simulación para un año entero (2024) y se analizarán los resultados, identificando sus posibles puntos débiles con respecto a las pérdidas energéticas.



UNIVERSIDAD
DE MÁLAGA



Añadimos las modificaciones que veamos necesarias para cada colegio, introduciendo tanto medidas pasivas como activas y volvemos a simular. Finalmente, comparamos los resultados obtenidos antes y después de las modificaciones, los analizamos uno por uno en profundidad y sacamos las conclusiones de los resultados obtenidos y de su posible rentabilidad económica y energética.

3. Herramientas utilizadas

3.1. AutoCad

AutoCAD es un software de diseño asistido por ordenador (a lo que hace referencia CAD) desarrollado por Autodesk y que tiene su primera aparición en 1982. Su principal función es crear y editar planos 2D y modelos 3D con muy buena precisión, considerándolo así como la herramienta referencia para arquitectos, ingenieros, diseñadores industriales y profesionales de la construcción. Entre sus puntos fuertes sobresale una amplia gama de comandos de dibujo y edición; también destaca la gestión por capas, que mantiene la información perfectamente estructurada para mantener un orden; la flexibilidad para emplear unidades absolutas o relativas, según convenga; y, por último, una gran compatibilidad con formatos como DWG, DXF o DWF, lo que facilita el intercambio de archivos con otras herramientas, como es en nuestro caso con DesignBuilder.



Figura 6. Portada AutoCAD.

En nuestro caso de trabajo, AutoCAD lo empleamos sobre todo para trazar los planos en 2D del edificio. Aunque el programa permite modelar sólidos, superficies y mallas, aquí nos interesa principalmente su precisión en la delineación, ya que esos planos servirán de base al modelo que después se exportará al software de simulación. Esta transferencia es posible gracias a la interoperabilidad entre ambas aplicaciones, asegurada por sus licencias compatibles.

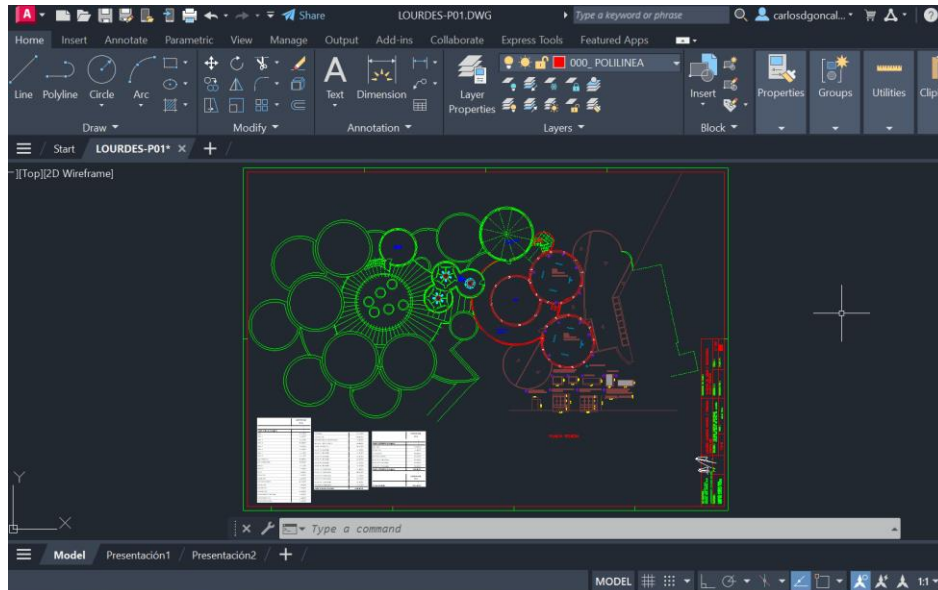


Figura 7. Menú principal AutoCAD.

3.2. DesignBuilder v7.3

En este proyecto se ha utilizado DesignBuilder v7.3 como plataforma principal de simulación energética. El programa ofrece un entorno de modelado 3D claro y visual donde se integran diversos módulos especializados, como lo son la demanda, HVAC, iluminación, confort, CFD, etc., que comparten las mismas entradas de datos. Gracias a este diseño modular, todo queda unificado, por lo que no hace falta volver a recrear el edificio ni redefinir horarios cada vez que realizamos un nuevo cálculo.



Figura 8. Portada DesignBuilder.



Durante la simulación, el modelo geométrico interactúa paso a paso con el clima exterior, los perfiles de ocupación y el funcionamiento de los sistemas del edificio. A escala horaria, nuestro motor de cálculo resuelve las ecuaciones de balance energético y las leyes básicas de la física para estimar las cargas térmicas, los flujos de aire y el consumo de energía en el punto de uso. Al concluir la simulación, los resultados pueden consultarse de dos maneras: resumidos por meses o por todo el año, o bien hora a hora, con la misma precisión con la que se realizó el cálculo. Esto permite ver con claridad cómo cambian a lo largo del día, las cargas térmicas y el comportamiento de la envolvente y los sistemas.

Para lograr un modelado realmente eficiente, se suele recurrir a distintos motores de simulación. En nuestro caso, DesignBuilder utiliza EnergyPlus, en su versión más reciente. Este motor es desarrollado y actualizado de forma continua por el Departamento de Energía de Estados Unidos, adquiriendo reconocimiento internacional por su precisión. Cada nueva actualización incorpora mejoras y funciones adicionales, de modo que EnergyPlus se mantiene como referencia mundial en motores de cálculos energéticos para edificios.



Figura 9. EnergyPlus motor de cálculo.



Figura 11. Vista superior Monserrat.

4.1.2. Envolvente del edificio

Cubierta:

La sección de suelo sobre terreno se compone de un pavimento de madera de 30 mm, sobre el que se extiende una capa de regularización de 70 mm. A continuación, aparece la losa de hormigón armado de 100 mm y, finalmente, un aislamiento de espuma de urea-formaldehído de 132,7 mm. Cuenta con una transmitancia térmica (U) de aproximadamente $0,17 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$.



Figura 12. Sección cubierta Monserrat.

Muro exterior:

La sección tipo del muro exterior está formada, de cara al exterior, por 80 mm de hormigón de alta densidad, seguidos de 80 mm de aislamiento de poliestireno expandido de peso alto, y rematados en el interior con 80 mm de fábrica de ladrillo. Con estas capas y sus espesores, se puede considerar una U aproximada de $0,38 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$.



Figura 13. Sección muro Monserrat.

Suelo exterior:

Está compuesto por un pavimento final de madera de 30 mm, sobre el que se extiende una capa de mortero de 70 mm. Luego aparece la losa de hormigón armado de 100 mm, que aporta la rigidez estructural, y, finalmente, un gran aislamiento de espuma de urea-formaldehído de 132,7 mm. Cuenta con una transmitancia térmica (U) de aproximadamente $0,25 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$.



Figura 14. Sección suelo Monserrat.

4.1.3. Sistemas y actividad

Iluminación

Para este centro se ha utilizado una plantilla de luminarias fluorescentes empotradas, con una densidad de potencia en iluminación (LPD) de $3,3 \text{ W/m}^2$, valor muy por debajo

del límite establecido por el CTE para uso docente. No se han implementado sistemas de control automático.



Figura 15. Plantilla iluminación Monserrat.

Sistemas HVAC y ventilación

El sistema de climatización asignado en la simulación es una unidad de Fan Coil de cuatro tubos, configurada exclusivamente para calefacción mediante combustible de gas natural. La refrigeración no se ha tenido en cuenta, ya que el colegio permanece cerrado en los meses de verano. Se ha considerado una distribución convectiva del calor en los espacios. No se ha contemplado mecánica, por lo que la ventilación natural se ha estimado en 0,5 renovaciones por hora.



Figura 16. Plantilla HVAC Monserrat.

Actividad y ocupación

El edificio permanece en uso desde septiembre hasta junio, con un horario diario de funcionamiento de 8:00 a 19:00 horas. La densidad media de ocupación utilizada en el modelo es de 0,11 personas/m². No se ha considerado demanda de agua caliente sanitaria, por no ser significativa en este tipo de uso.

Plantilla de Actividad	
Plantilla	Generic Office Area
Sector	B1 Offices and Workshop businesses
Multiplicador de zona	1
<input checked="" type="checkbox"/> Incluir zona en cálculos térmicos	
<input checked="" type="checkbox"/> Incluir zona en cálculos de luz diurna con Radiance	
Áreas de Suelo y Volúmenes	
Ocupación	
<input checked="" type="checkbox"/> ¿Ocupado?	
Densidad de ocupación (personas/m ²)	0,1110
Programación	Office_OpenOff_Occ
Condiciones Metabólicas	
Vestimenta	
Ponderación de Temperatura Radiante para Confort	
Velocidad del aire	
Generación y Eliminación de Contaminante	
<input type="checkbox"/> Generación y eliminación de contaminante	
Días Festivos	
ACS	
Demanda (l/m²-día)	0

Figura 17. Plantilla actividad Monserrat.

```

Perfiles
Schedule:Compact
Office_OpenOff_Occ,
Fraction,
Through: 31 Dec,
For: Weekdays SummerDesignDay,
Until: 07:00, 0,
Until: 08:00, 0.25,
Until: 09:00, 0.5,
Until: 12:00, 1,
Until: 14:00, 0.75,
Until: 17:00, 1,
Until: 18:00, 0.5,
Until: 19:00, 0.25,
Until: 24:00, 0,
For: Weekends,
Until: 24:00, 0,
For: Holidays,
Until: 24:00, 0,
For: WinterDesignDay AllOtherDays,
Until: 24:00, 0;

```

Figura 18. Perfil de actividad Monserrat.

4.2. Colegio Tres Olivos

4.2.1. Contexto general

El Colegio Tres Olivos es un centro concertado de la Fundación Dales la Palabra, especializado en educación inclusiva para alumnado con y sin discapacidad auditiva (Colegio Tres Olivos, s. f.; Fundación Dales la Palabra, s. f.). Se inauguró en 2001 y hoy escolariza a más de 1 000 estudiantes, desde Infantil hasta Formación Profesional (Wikipedia, 2025; Zero Project, 2019).

El campus se encuentra en la zona residencial Tres Olivos, al norte de Madrid, con acceso por C/ Casildea de Vandalia 3, 28034 Madrid y buenas conexiones de transporte (líneas de Metro 10 y Cercanías C-4) (Colegio Tres Olivos, s. f.). Su parcela, rodeada de bloques de altura media y algunas áreas verdes, se sitúa dentro de la zona climática D3 del CTE.



Figura 19. Localización urbana Tres Olivos.



Figura 20. Vista superior Tres Olivos.

4.2.2. Envolvente del edificio

Cubierta:

La cubierta se compone de una lámina de asfalto de apenas 10 mm y una gruesa capa de lana de vidrio que actúa como principal barrera térmica. A esto le sigue una cámara de aire de 200 mm para potenciar el aislamiento y en el interior un trasdosado de placa de yeso de 13 mm. Con este montaje, la U queda en torno a $0,25 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$.

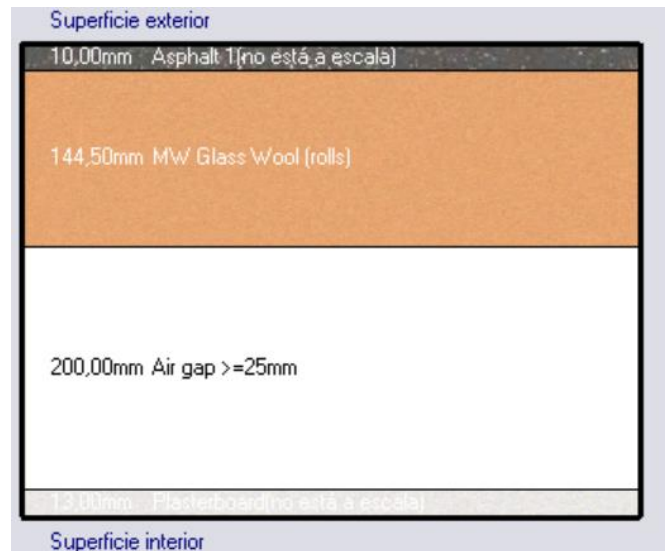


Figura 21. Sección cubierta Tres Olivos.

Muro exterior:

La sección del muro exterior combina una capa de enlucido de mortero sobre bloques de cemento, una hoja de ladrillo macizo en la cara exterior, un tramo de bloque ligero de hormigón (70 mm) y en el interior un trasdosado de madera con aislamiento de poliestireno expandido rematado con yeso. Con este montaje la transmitancia térmica global es de $0,712 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$.

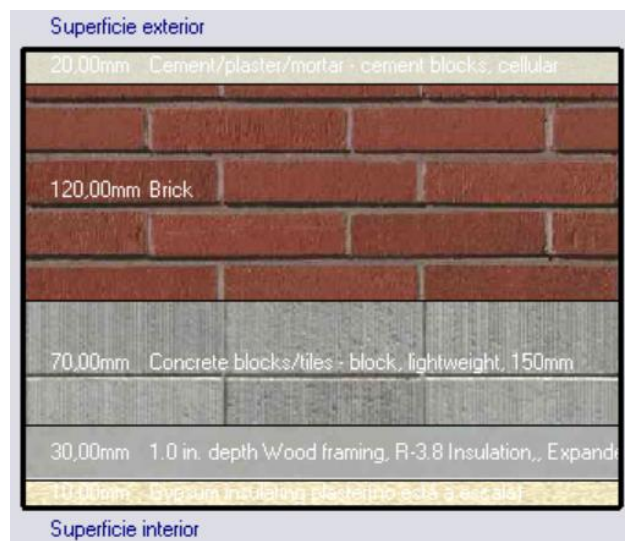


Figura 22. Sección muro Tres Olivos.

Suelo exterior:

El suelo exterior de este colegio se reduce a un pavimento de piedra basáltica de 100 mm de espesor, colocado directamente sobre el soporte estructural. Al no contar con capas de aislamiento ni morteros intermedios, este suelo presenta una transmitancia térmica de $3,348 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$.



Figura 23. Sección suelo Tres Olivos.

4.2.3. Sistemas y actividad

Iluminación

En este caso, se ha modelado una plantilla de luminarias fluorescentes empotradas con una densidad normalizada de potencia de $4,2 \text{ W/m}^2$, ajustado al uso educativo del edificio. La iluminación se controla de forma manual, ya que no se han contemplado dispositivos de detección ni regulación automática.

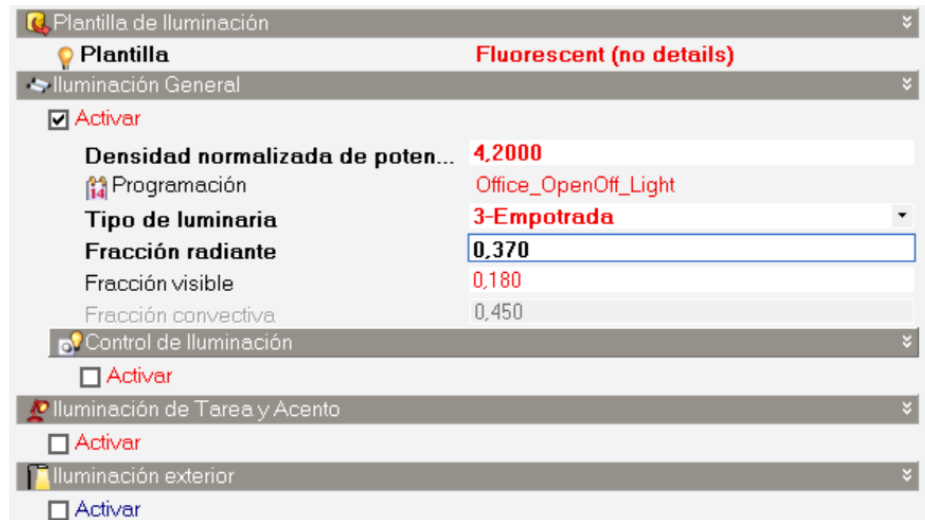


Figura 24. Plantilla iluminación Tres Olivos.

Sistemas HVAC y ventilación

Para la climatización se ha seleccionado un sistema del tipo unidad Fan Coil configurado exclusivamente para calefacción mediante gas natural. El calor se distribuye por convectores en los espacios. No se ha considerado sistema de refrigeración activo, ni tampoco ventilación mecánica, por lo que el modelo se basa en una ventilación natural definida en 0,8 renovaciones por hora.



Figura 25. Plantilla HVAC Tres Olivos.

Actividad y ocupación

El edificio opera entre los meses de septiembre y junio, con una jornada diaria que va de 8:00 a 19:00 h. La densidad media de ocupación utilizada en la simulación es de 0,15 personas/m², un valor adecuado para representar la actividad global del centro. No se ha incluido demanda de ACS, ya que no tiene un uso significativo en colegios de primaria.

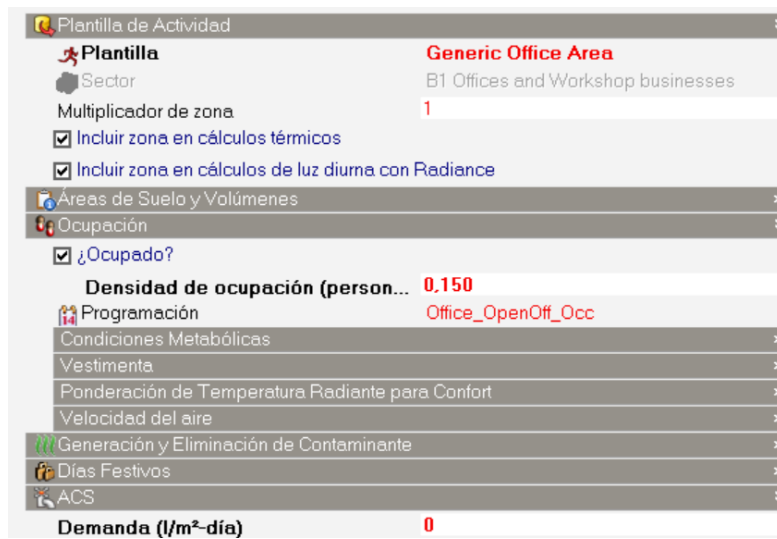


Figura 26. Plantilla actividad Tres Olivos.

4.3. Colegio Lourdes FUHEM

4.3.1. Contexto general

El Colegio Lourdes es un centro concertado de 3 a 18 años que forma parte del área educativa de FUHEM, fundación laica con más de medio siglo de historia. El edificio principal, conocido popularmente como *Los Círculos* por sus aulas redondas, fue proyectado entre 1963 y 1967 por el arquitecto Francisco Javier Sáenz de Oíza (Docomomo Ibérico, s. f.; El País, 2024).

El colegio se ubica en C/ San Roberto 8 del distrito Latina, y consta actualmente de más de mil estudiantes. La parcela está arropada por bloques de vivienda de altura media y por los jardines comunitarios de la colonia (Ayuntamiento de Madrid, s. f.). Como el resto de la capital, se encuadra en la zona climática D3 del CTE.

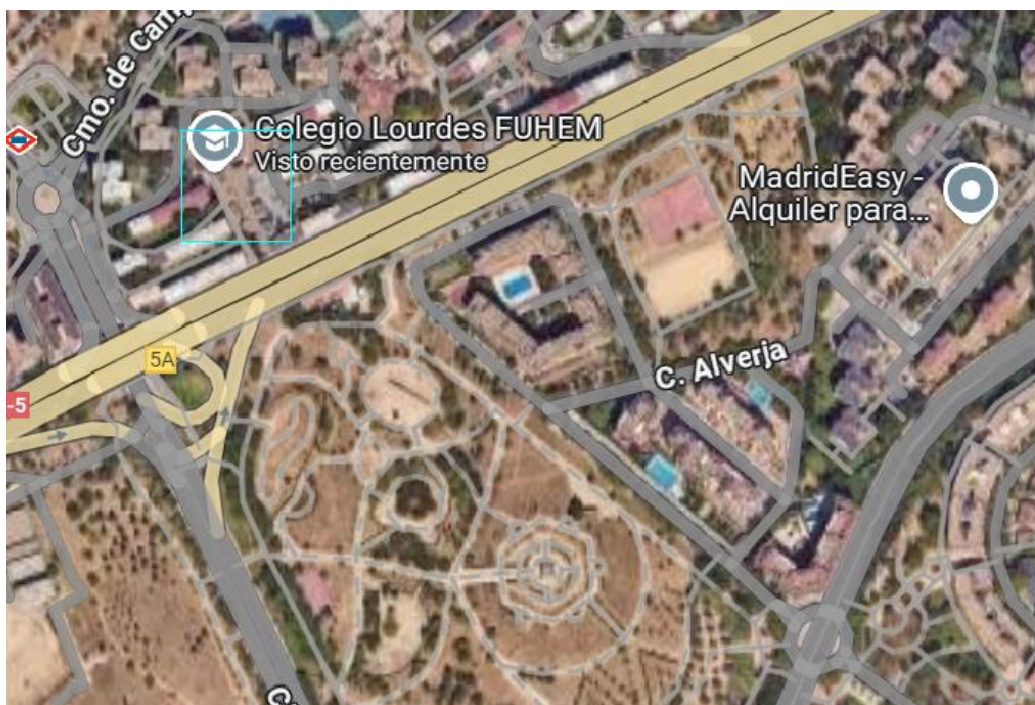


Figura 27. Localización urbana Lourdes.

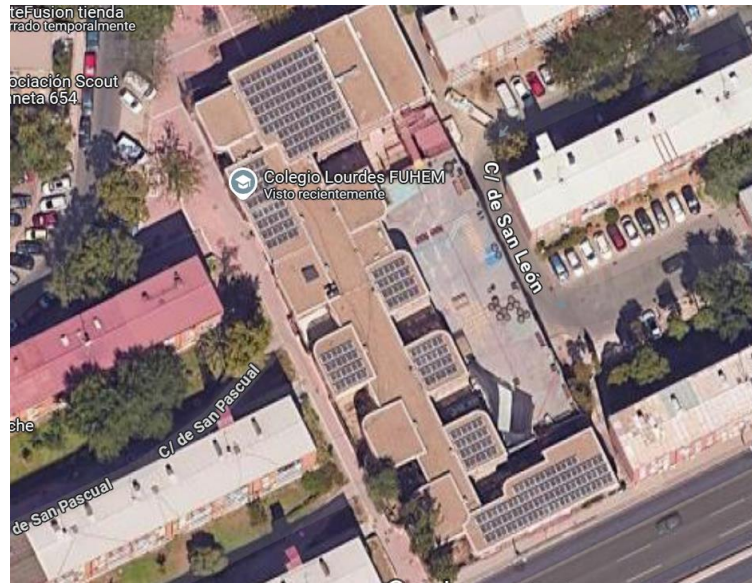


Figura 28. Vista superior Lourdes.

4.3.2. Envoltente del edificio

Cubierta:

La cubierta combina una capa impermeable en su cara exterior, un grueso núcleo aislante de lana de vidrio y una cámara de aire ventilada, rematada por un trasdosado interior. Aunque tiene varias capas, el grueso aislamiento y el espacio de aire son los que toman más importancia. En total, se logra una transmitancia térmica en torno a $0,25 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$.



Figura 29. Sección cubierta Lourdes.

Muro exterior:

El muro exterior de este colegio contiene, una hoja de ladrillo macizo de 100 mm, un aislamiento rígido de XPS de 79,5 mm, un núcleo de bloque de hormigón de 100 mm, una cámara de aire de 50 mm y un trasdosado interior de placa de yeso de 100 mm. Su transmitancia térmica global asciende $0,294 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$.



Figura 30. Sección muro Lourdes.

Suelo exterior:

Este suelo se limita a una sola losa de piedra caliza de 100 mm de espesor, colocada directamente sobre el soporte estructural sin capas de aislamiento adicional. Debido a la alta conductividad térmica de la caliza, la U se coloca en torno a $3,284 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$.



Figura 31. Sección suelo Lourdes.

4.3.3. Sistemas y actividad

Iluminación

La iluminación del edificio se ha representado mediante una plantilla de luminarias fluorescentes empotradas, habitual en centros educativos como es nuestro caso. La densidad de potencia instalada asciende a $4,6 \text{ W/m}^2$, ligeramente por encima de los otros casos, pero aún dentro de márgenes eficientes. No se han incorporado sistemas de control automático.

Plantilla de Iluminación	
Plantilla	Fluorescent (no details)
Iluminación General	
<input checked="" type="checkbox"/> Activar	
Densidad normalizada de potencia (W/m²)	4.6000
Programación	D1_Edu_ClassRm_Light
Tipo de luminaria	3-Empotrada
Fracción radiante	0.370
Fracción visible	0.180
Fracción convectiva	0.450
Control de Iluminación	
<input type="checkbox"/> Activar	
Iluminación de Tarea y Acento	
<input type="checkbox"/> Activar	
Iluminación exterior	
<input type="checkbox"/> Activar	

Figura 32. Plantilla iluminación Lourdes.

Sistemas HVAC y ventilación

El sistema de climatización definido en este modelo corresponde nuevamente a una unidad Fan Coil, empleada únicamente para calefacción mediante gas natural, con distribución convectiva del calor. No se ha contemplado refrigeración mecánica ni refrigeración por lo comentado anteriormente de que se mantiene cerrado el centro en los meses calurosos. En este caso, se ha considerado una ventilación natural de 1 renovación por hora.

Plantilla HVAC	
Plantilla	Fan Coil Unit (4-Pipe). Air cooled Chiller
Ventilación Mecánica	
<input type="checkbox"/> Activar	
Calefacción	
<input checked="" type="checkbox"/> Activar	
Dimensionado de Equipamiento de Zona	
Definición	
Funcionamiento	
Programación	D1_Edu_ClassRm_Heat
Refrigeración	
<input type="checkbox"/> Activar	
Control de Humedad	
ACS	
<input type="checkbox"/> Activar	
Ventilación Natural	
<input checked="" type="checkbox"/> Activar	
Definición del caudal de aire exterior	1-Por zona
Aire exterior (ren/h)	1.000
Funcionamiento	
Programación	D1_Edu_ClassRm_Occ

Figura 33. Plantilla HVAC Lourdes.

Actividad y ocupación

El colegio mantiene su actividad de septiembre a junio, en horario continuo de 8:00 a 19:00 horas. La densidad de ocupación media empleada para la simulación es de 0,25 personas/m², reflejando una mayor concentración de alumnado y personal por superficie útil. Como en otros casos, no se ha incluido demanda de ACS, al no considerarse relevante para este tipo de centros.

Plantilla de Actividad	
Plantilla	Teaching Areas
Sector	D1 Non-residential Institutions - Education
Multiplicador de zona	1
<input checked="" type="checkbox"/> Incluir zona en cálculos térmicos	
<input checked="" type="checkbox"/> Incluir zona en cálculos de luz diurna con Radiance	
Áreas de Suelo y Volúmenes	
Ocupación	
<input checked="" type="checkbox"/> ¿Ocupado?	
Densidad de ocupación (personas/m²)	0.2500
Programación	D1_Edu_ClassRm_Occ
Condiciones Metabólicas	>>
Vestimenta	>>
Ponderación de Temperatura Radiante para Confort	>>
Velocidad del aire	>>
Generación y Eliminación de Contaminante	>>
Días Festivos	>>
ACS	
Demanda (l/m²-día)	0.000

Figura 34. Plantilla actividad Lourdes.

4.4. Colegio Hipatia FUHEM

4.4.1. Contexto general

El Colegio Hipatia, situado en Rivas-Vaciamadrid, forma parte de la red FUHEM y se define como un centro concertado laico con todas las etapas educativas, de Infantil a Bachillerato y Formación Profesional (Colegio Hipatia, s. f.; FUHEM, s. f.).

Este edificio se encuentra en la avenida Ocho de Marzo, 1, 28523 Rivas-Vaciamadrid, Madrid. Como el resto del área metropolitana madrileña, el colegio se encuadra en la zona climática D3 del Código Técnico de la Edificación, lo que implica inviernos fríos y veranos secos con alta radiación solar (Ministerio de Fomento, 2019).



Figura 35. Localización urbana Hipatia.



Figura 36. Vista superior Hipatia.

4.4.2. Envolvente del edificio

Cubierta:

La cubierta de este centro combina una fina capa exterior de asfalto, un grueso aislamiento de lana de vidrio y una cámara de aire ventilada, rematada en el interior por un trasdosado de placa de yeso. Con esta distribución se logra una transmitancia térmica muy baja, alrededor de $0,25 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$.

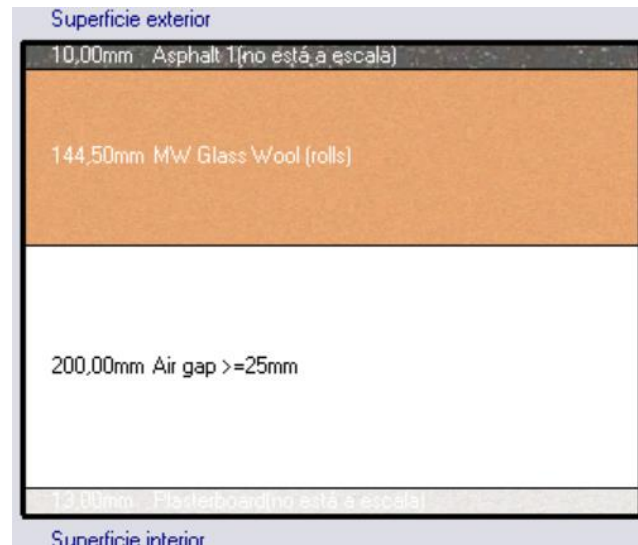


Figura 37. Sección cubierta Hipatia.

Muro exterior:

La sección de este muro exterior junta una hoja de ladrillo macizo de 120 mm, un trasdosado de aire ventilado de unos 50 mm, un bloque de hormigón de 70 mm, un entramado ligero con aislamiento en su interior y un acabado de yeso. En conjunto, esta composición forma una transmitancia térmica global de alrededor de $0,669 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$.



Figura 38. Sección muro Hipatia.

Suelo exterior:

La sección del suelo exterior se ha reducido a dos capas principales: una gruesa manta de lana de roca de 148 mm aproximadamente que actúa como barrera aislante, rematada en el exterior por un enlucido de mortero de unos 25 mm. Con este montaje tan sencillo, la U queda en torno a $0,252 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$.



Figura 39. Sección suelo Hipatia.

4.4.3. Sistemas y actividad

Iluminación

El edificio cuenta con luminarias fluorescentes empotradas distribuidas en aulas y zonas comunes, configuradas mediante una plantilla estándar en el modelo. La densidad de potencia en iluminación se ha fijado en $3,9 \text{ W/m}^2$, valor que refleja un sistema relativamente eficiente y adecuado para el uso educativo previsto. Al no contar con sensores ni regulación, el control de la iluminación es completamente manual.

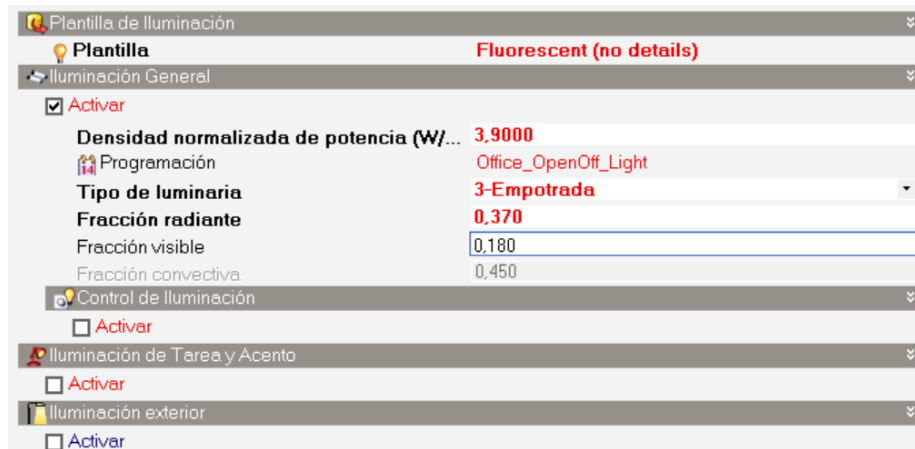


Figura 40. Plantilla iluminación Hipatia.

Sistemas HVAC y ventilación

En este sistema de climatización, también se ha seleccionado una unidad Fan Coil de cuatro tubos, operativa solo en modo calefacción, con aporte de energía mediante gas natural y distribución por convección. Tampoco se ha considerado refrigeración mecánica. En cuanto a la ventilación, el edificio no dispone de un sistema mecánico activo, por lo que se ha modelado una ventilación natural de 0,75 renovaciones por hora.



Figura 41. Plantilla HVAC Hipatia.

Actividad y ocupación

El funcionamiento de este centro abarca los mismos meses lectivos, de septiembre a junio, con un horario continuo de 8:00 a 19:00 horas, debido a que también se imparten clases por las tardes. Se ha considerado una densidad media de ocupación de 0,2 personas/m². Como es habitual en este tipo de uso, no se ha contemplado demanda de ACS.

Plantilla de Actividad	
Plantilla	Generic Office Area
Sector	B1 Offices and Workshop businesses
Multiplicador de zona	1
<input checked="" type="checkbox"/> Incluir zona en cálculos térmicos	
<input checked="" type="checkbox"/> Incluir zona en cálculos de luz diurna con Radiance	
Áreas de Suelo y Volúmenes	
Ocupación	
<input checked="" type="checkbox"/> ¿Ocupado?	
Densidad de ocupación (personas/m²)	0.2
Programación	Office_OpenOff_Occ
Condiciones Metabólicas	
Vestimenta	
Ponderación de Temperatura Radiante para Confort	
Velocidad del aire	
Generación y Eliminación de Contaminante	
Días Festivos	
ACS	
Demanda (l/m²-día)	0.000

Figura 42. Plantilla actividad Hipatia.



4.5. Validación del modelo

Para verificar rigurosamente la coherencia y fiabilidad del modelo energético desarrollado, se llevó a cabo un contraste entre los consumos simulados y los consumos reales facturados correspondientes al 2023. Las facturas de electricidad y gas, recopiladas y remitidas por los departamentos de mantenimiento de los cuatro colegios, se procesaron para obtener el consumo anual en kWh, aplicando los factores de conversión y de energía primaria definidos por el IDAE (2022). Posteriormente, estos valores se confrontaron con las salidas anuales que arroja la simulación de DesignBuilder, obteniéndose para cada edificio el porcentaje de desviación mediante la expresión:

$$(Q_{\text{sim}} - Q_{\text{real}})/Q_{\text{real}} * 100,$$

donde Q_{sim} es el consumo total estimado por el modelo y Q_{real} el registrado en facturación. El resultado arroja discrepancias que oscilan entre $-3,9\%$ y $+4,0\%$, valores que se sitúan muy por debajo del intervalo de tolerancia $\pm 10\%$ recomendado por la norma ASHRAE 14-2014 para calificar un modelo como “aceptablemente calibrado” en ausencia de mediciones sub-horarias.

Este nivel de concordancia evidencia que las hipótesis constructivas adoptadas (transmitancias, puentes térmicos, infiltraciones) y los perfiles de ocupación-actividad definidos replican de forma realista el comportamiento real de los centros docentes. Además, la baja desviación garantiza que la plataforma de simulación reproduce con fidelidad tanto los patrones estacionales de demanda como la interacción dinámica entre cargas internas, climatología y estrategias operativas. Por consiguiente, el modelo se considera suficientemente validado para servir de base en la evaluación cuantitativa de las medidas pasivas y activas planteadas, así como en la estimación de los retornos económicos y de las reducciones de emisiones asociadas a los distintos escenarios de rehabilitación energética.



Colegio	Simulado (kWh/a)	Real (kWh/a)	Desviación
Montserrat	470 559	452 200	-3,9 %
Tres Olivos	295 242	304 000	3,00%
Lourdes	156 059	162 300	4,00%
Hipatia	469 062	451 600	-3,7 %

Figura 43. Tabla comparativa consumos.



5. Análisis y resultados

5.1. Análisis energético

En este apartado se mostrarán, mediante gráficas confeccionadas en Microsoft Excel, los resultados obtenidos en las simulaciones energéticas de cada colegio, acompañados de su correspondiente análisis interpretativo. Los datos presentados hacen referencia a los edificios base, esto es, al estado actual de los inmuebles junto con los sistemas instalados que cubren la demanda energética presente, antes de aplicar cualquier medida de mejora.

Dado que la investigación comprende cuatro centros docentes distintos e independientes entre sí, se ha optado por representar de forma conjunta los principales parámetros de todos ellos; esta estrategia facilita las comparaciones directas y permite identificar rápidamente similitudes y divergencias entre instalaciones y patrones de uso.

Comenzamos examinando los resultados de la temperatura operativa en los colegios. Esta magnitud, que resulta de combinar la temperatura del aire con la temperatura radiante media, ofrece una descripción más realista de la sensación térmica que percibe un ocupante en un espacio cerrado, y por ello constituye un indicador clave de confort.

Según el RITE, la temperatura operativa deberá mantenerse, a lo largo del año, entre 21 °C y 26 °C para garantizar condiciones de confort adecuadas. Al observar la gráfica obtenida se aprecia con rapidez que este intervalo no se cumple en varios periodos del año: existe un pico pronunciado de temperaturas en verano que rebasa el límite superior, aunque ese exceso es poco relevante porque coincide con los meses no lectivos. Más significativo resulta que los meses próximos al verano superan ligeramente el rango de confort debido a la ausencia de refrigeración, mientras que en invierno se detectan

valores por debajo del umbral inferior fijado por el RITE, sobre todo en los colegios Lourdes y Hipatia. Estos desajustes evidencian la necesidad de implementar medidas correctivas tanto en los sistemas de calefacción y refrigeración como en el control solar y la ventilación para asegurar un confort térmico estable durante todo el curso.

		Montserrat	Tres Olivos	Lourdes	Hipatia
Temperatura Operativa (°C)	Enero	19,74	20,37	17,92	16,12
Temperatura Operativa (°C)	Febrero	20,43	21	18,53	17,54
Temperatura Operativa (°C)	Marzo	22,88	23,18	19,83	20,68
Temperatura Operativa (°C)	Abril	23,69	23,86	20,79	21,67
Temperatura Operativa (°C)	Mayo	27,37	27,27	24,33	25,85
Temperatura Operativa (°C)	Junio	30,14	29,86	25,83	28,72
Temperatura Operativa (°C)	Julio	35,47	35,09	30,48	33,63
Temperatura Operativa (°C)	Agosto	34,16	33,97	27,81	32,31
Temperatura Operativa (°C)	Septiembre	28,83	28,94	25,25	27,11
Temperatura Operativa (°C)	Octubre	24,3	24,65	21,7	22,29
Temperatura Operativa (°C)	Noviembre	21,54	22,04	19,64	18,66
Temperatura Operativa (°C)	Diciembre	19,03	19,67	17,93	15,57

Figura 44. Tabla temperaturas operativas.

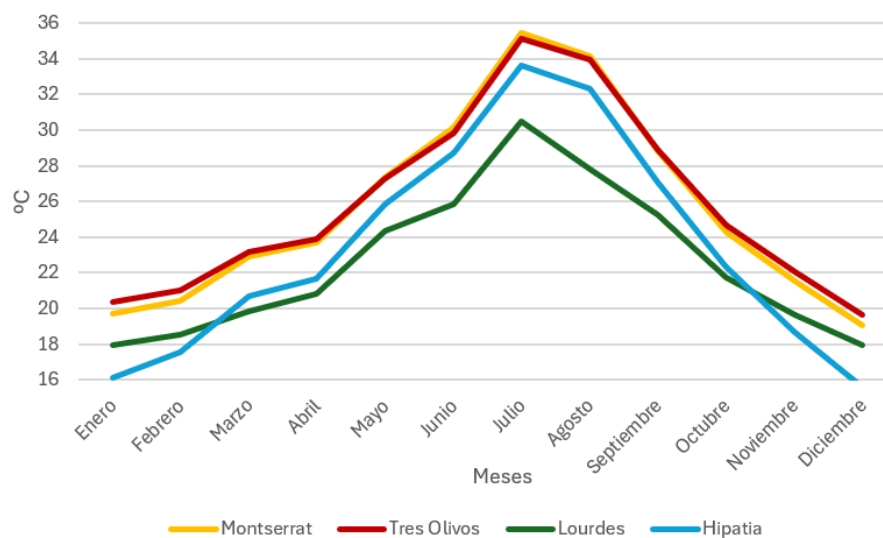


Figura 45. Gráfica, temperatura operativa.



A partir de la curva diaria de temperatura operativa del colegio Montserrat, se puede elaborar un diagnóstico detallado térmico real del edificio a lo largo de todo 2024.

- Patrón estacional pronunciado:

Durante los meses fríos (enero-marzo y noviembre-diciembre) la temperatura operativa oscila mayoritariamente entre 16 °C y 23 °C. Ello confirma que el sistema de calefacción mantiene unas condiciones próximas al rango de confort invernal del RITE (21 – 26 °C), aunque se registran varios descensos por debajo de 18 °C, indicio de periodos en los que la instalación se apaga o reduce su potencia.

En la etapa estival (junio-septiembre) se observan valores que superan con holgura los 30 °C, alcanzando picos cercanos a 38 °C en agosto. Esta situación evidencia una ausencia o insuficiencia de refrigeración activa y/o medidas pasivas (sombras, ventilación nocturna, etc.), ya que el umbral superior de confort se rebasa casi a diario.

- Oscilación intra-semanal:

El gráfico plasma descensos cíclicos cada siete días: los fines de semana o festivos la temperatura mínima cae varios grados respecto a los días lectivos. Esta dinámica corrobora el apagado programado de los sistemas HVAC y la falta de aportes internos (iluminación, equipos y ocupantes) cuando el centro permanece cerrado.

Durante la jornada escolar, sin embargo, la curva muestra repuntes diarios (especialmente en primavera-otoño) que se atribuyen a la combinación de ganancias internas y ganancias solares a través de las ventanas.

- Amplitud diaria:

En invierno la oscilación diaria típica ronda 3-4 °C, señal de una cierta inercia térmica de la envolvente que ayuda a amortiguar los picos exteriores.

En verano la amplitud puede superar 8 °C, lo que sugiere una menor capacidad de amortiguación y una infiltración de calor significativa, agravada por la radiación solar y la falta de sombreado eficaz.

- Implicaciones de confort y energía:

Infratemperaturas: los descensos a 15-17 °C en fines de semana prolongados pueden generar disconfort en la primera hora lectiva del lunes, obligando a un arranque temprano de la calefacción (mayor consumo pico).

Supratemperaturas: mantener aulas entre 30 °C y 38 °C durante exámenes de junio o septiembre perjudica el rendimiento cognitivo y la salud, además de contravenir las recomendaciones del RITE y la normativa de prevención laboral.

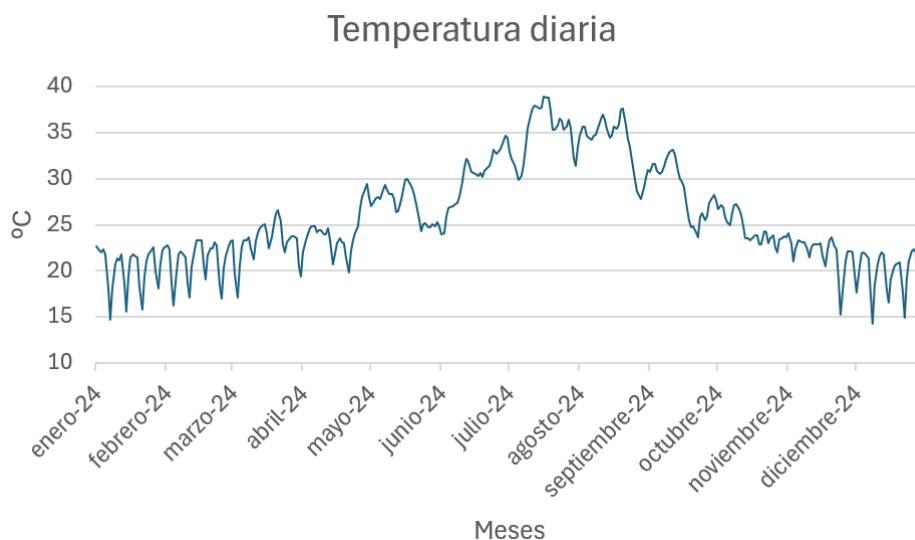


Figura 46. Gráfica, temperatura operativa diaria de Montserrat.



La siguiente gráfica muestra las ganancias internas, en kWh/m², asociadas a la calefacción sensible de zona, obtenidas directamente de la simulación del edificio base y, por tanto, reflejo fiel del comportamiento real de los emisores sin ninguna medida de mejora. Durante los meses más fríos, el perfil es muy similar en los cuatro colegios y alcanza sus picos máximos:

- Monserrat registra 2,502 kWh/m² en enero y 1,622 kWh/m² en febrero.
- Tres Olivos anota 2,179 kWh/m² en enero y 1,425 kWh/m² en febrero.
- Lourdes alcanza 3,815 kWh/m² en enero y 2,630 kWh/m² en febrero.
- Hipatia presenta 1,593 kWh/m² en enero y 1,004 kWh/m² en febrero.

Este comportamiento obedece a que el sistema de calefacción trabaja a plena carga para mantener la temperatura de consigna en diciembre, enero y febrero, cuando la demanda térmica exterior es máxima. A partir de marzo se observa un descenso prácticamente lineal de estas ganancias:

- En marzo caen a 0,790 kWh/m² (Monserrat), 0,702 kWh/m² (Tres Olivos), 1,545 kWh/m² (Lourdes) y 0,567 kWh/m² (Hipatia).
- Abril sigue la tendencia descendente, con valores de 0,658 kWh/m² (Monserrat), 0,577 kWh/m² (Tres Olivos), 0,999 kWh/m² (Lourdes) y 0,500 kWh/m² (Hipatia).
- Para mayo los aportes ya son residuales (0,021 kWh/m² en Monserrat, 0,007 kWh/m² en Tres Olivos, 0,019 kWh/m² en Lourdes y 0,018 kWh/m² en Hipatia), y en junio prácticamente nulos (0,003, 0,002, 0,041 y 0,008 kWh/m², respectivamente).
- En julio y agosto la calefacción sensible no registra prácticamente consumo en ninguno de los cuatro edificios.

A finales de verano y comienzos de otoño emergen aportes menores pero significativos al reactivarse ligeramente la demanda:

- Septiembre: 0,006 kWh/m² (Monserrat), 0,003 kWh/m² (Tres Olivos), 0,004 kWh/m² (Lourdes) y 0,003 kWh/m² (Hipatia).

- Octubre: entre 0,298 kWh/m² (Montserrat) y 0,229 kWh/m² (Tres Olivos), con 0,585 kWh/m² en Lourdes y 0,221 kWh/m² en Hipatia.
- Noviembre: el sistema vuelve a elevar consumos a 1,302 kWh/m² en Montserrat, 1,104 kWh/m² en Tres Olivos, 1,732 kWh/m² en Lourdes y 0,817 kWh/m² en Hipatia.
- Diciembre: recupera cifras de 2,527 kWh/m² (Montserrat), 2,168 kWh/m² (Tres Olivos), 3,556 kWh/m² (Lourdes) y 1,396 kWh/m² (Hipatia).

Este comportamiento estacional confirma la fuerte dependencia del consumo de calefacción de las condiciones climáticas exteriores. El aporte térmico se hace imprescindible en invierno y prácticamente prescindible entre mayo y agosto, con apenas unas décimas de kWh/m².

Estos resultados subrayan la oportunidad de aplicar estrategias pasivas, como aislamientos, inercia térmica o sellado de infiltraciones, o de control dinámico, como una programación más afinada de consigna y ventilación, que permitan suavizar los picos invernales y mejorar la eficiencia global del sistema a lo largo de todo el año.

		Montserrat	Tres Olivos	Lourdes	Hipatia
Calef. Sens. de Zona (kWh/m ²)	Enero	2,502	2,179	3,815	1,593
Calef. Sens. de Zona (kWh/m ²)	Febrero	1,622	1,425	2,630	1,004
Calef. Sens. de Zona (kWh/m ²)	Marzo	0,790	0,702	1,545	0,567
Calef. Sens. de Zona (kWh/m ²)	Abril	0,658	0,577	0,999	0,500
Calef. Sens. de Zona (kWh/m ²)	Mayo	0,021	0,007	0,019	0,018
Calef. Sens. de Zona (kWh/m ²)	Junio	0,003	0,002	0,041	0,008
Calef. Sens. de Zona (kWh/m ²)	Julio	0,000	0,000	0,000	0,000
Calef. Sens. de Zona (kWh/m ²)	Agosto	0,000	0,000	0,000	0,000
Calef. Sens. de Zona (kWh/m ²)	Septiembre	0,006	0,000	0,004	0,003
Calef. Sens. de Zona (kWh/m ²)	Octubre	0,298	0,229	0,585	0,221
Calef. Sens. de Zona (kWh/m ²)	Noviembre	1,302	1,104	1,732	0,817
Calef. Sens. de Zona (kWh/m ²)	Diciembre	2,527	2,168	3,556	1,396

Figura 47. Tabla calefacción sensible de zona.

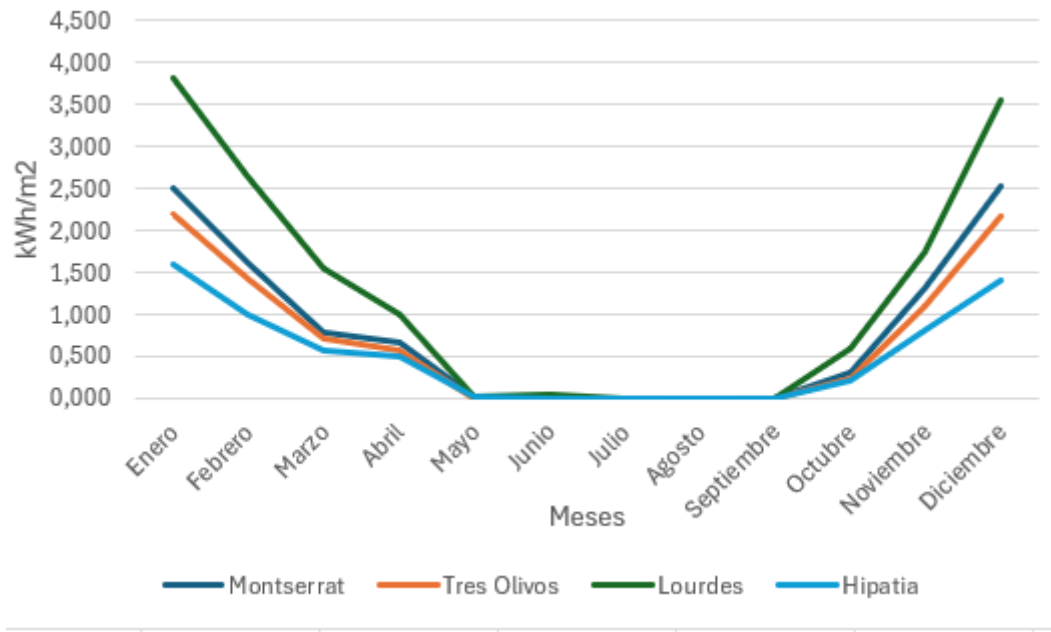


Figura 48. Gráfica, calefacción sensible de zona.

Con relación a las pérdidas energéticas de los edificios, las simulaciones realizadas en DesignBuilder ponen de manifiesto que, con diferencia, las infiltraciones exteriores representan la principal fuga de calor en los cuatro centros estudiados. En la gráfica del balance energético anual de Tres Olivos podemos observar cómo la barra correspondiente a las infiltraciones alcanza valores negativos muy elevados, superando ampliamente al resto de las pérdidas.

Además de esta aportación dominante, las pérdidas por ventilación exterior también resultan significativas, aunque menores que las debidas a infiltraciones, lo que indica que tanto el sellado de la envolvente como el control de los caudales de aire renovado constituyen sendos focos de consumo no deseado. Por el contrario, en el lado de las ganancias energéticas, destacan especialmente las aportaciones solares a través de ventanas, que contrarrestan parcialmente las pérdidas y evidencian el potencial de

diseño pasivo, junto con las ganancias internas derivadas de la iluminación, la carga de equipos y ordenadores y la ocupación.

Este balance muestra con claridad que, para optimizar el rendimiento térmico de Tres Olivos (y por extensión de los demás colegios), resulta prioritario reducir infiltraciones mediante sellados y barreras de vapor más eficaces, ajustar la ventilación natural o mecánica para minimizar pérdidas sin comprometer la calidad del aire y potenciar las ganancias solares y mejorar la gestión de las entradas de luz, aprovechando cortinas o vidrios de control solar.

En definitiva, la envolvente y el sistema de renovación de aire son los elementos clave sobre los que actuar para equilibrar el balance energético y elevar la eficiencia global del edificio.

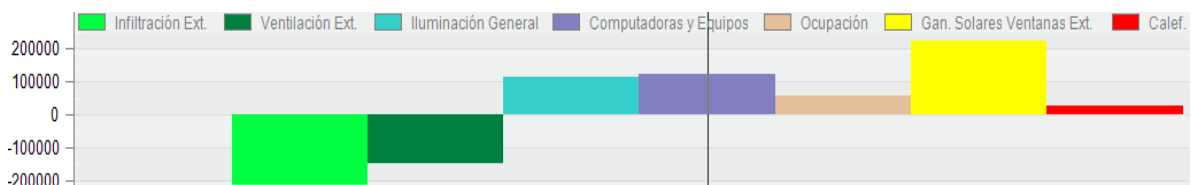


Figura 49. Gráfico, balance energético anual de Tres Olivos.

En consecuencia, se optó por examinar este parámetro con mayor detalle y de manera conjunta en los cuatro edificios. Las infiltraciones exteriores (aire no controlado que penetra a través de fisuras, juntas y huecos de la envolvente) siguen un patrón estacional muy marcado: alcanzan sus valores máximos durante los meses más fríos y disminuyen de forma progresiva hasta mínimos estivales.



Según la tabla de resultados en kWh/m², en enero las pérdidas por infiltración alcanzan aproximadamente 7,73 kWh/m² en Montserrat y 5,23 kWh/m² en Hipatia, mientras que Lourdes se queda en 6,56 kWh/m², lo que evidencia una brecha notable en hermeticidad. Al avanzar la primavera, estas cifras descienden a cerca de 6,71 kWh/m² (Montserrat) y 4,63 kWh/m² (Hipatia) en marzo, frente a los 5,05 kWh/m² registrados en Lourdes. Durante el verano, cuando el gradiente térmico exterior-interior es menor, las infiltraciones caen a mínimos, por ejemplo 4,45 kWh/m² en junio para Montserrat y apenas 2,44 kWh/m² en Lourdes, confirmando la mayor estanqueidad de este último.

Este contraste pone de manifiesto que, aunque todos los centros sufren pérdidas elevadas en invierno debido al fuerte gradiente térmico que impulsa corrientes de aire frío, Montserrat y Tres Olivos requieren medidas de sellado más urgentes. Un refuerzo de burletes, la aplicación de selladores en juntas críticas y la realización de pruebas blower-door podrían reducir estas infiltraciones en un 20–30 %, según estudios especializados. Por su parte, Hipatia, con valores estacionales ya mucho más bajos, cuenta con una envolvente relativamente más estanca y, por tanto, un gasto térmico interior significativamente menor.

En conjunto, estos datos explican gran parte de la variabilidad en la demanda energética anual y subrayan la necesidad de priorizar las medidas de mejora de la hermeticidad para optimizar la eficiencia térmica y reducir los costes de calefacción, especialmente en aquellos edificios con cifras de infiltración más elevadas.

		Montserrat	Tres Olivos	Lourdes	Hipatia
Infiltración Ext. (kWh/m ²)	Enero	7,730	7,989	6,555	5,227
Infiltración Ext. (kWh/m ²)	Febrero	6,586	6,802	5,529	4,603
Infiltración Ext. (kWh/m ²)	Marzo	6,706	6,834	5,045	4,631
Infiltración Ext. (kWh/m ²)	Abril	5,945	6,007	4,456	4,003
Infiltración Ext. (kWh/m ²)	Mayo	5,145	5,093	3,608	3,350
Infiltración Ext. (kWh/m ²)	Junio	4,449	4,328	2,435	2,733
Infiltración Ext. (kWh/m ²)	Julio	4,724	4,551	2,340	2,775
Infiltración Ext. (kWh/m ²)	Agosto	4,517	4,433	1,492	2,739
Infiltración Ext. (kWh/m ²)	Septiembre	4,086	4,138	2,401	2,632
Infiltración Ext. (kWh/m ²)	Octubre	5,135	5,293	3,754	3,523
Infiltración Ext. (kWh/m ²)	Noviembre	6,203	6,404	5,117	4,302
Infiltración Ext. (kWh/m ²)	Diciembre	7,195	7,463	6,382	4,859

Figura 50. Tabla infiltraciones exteriores.

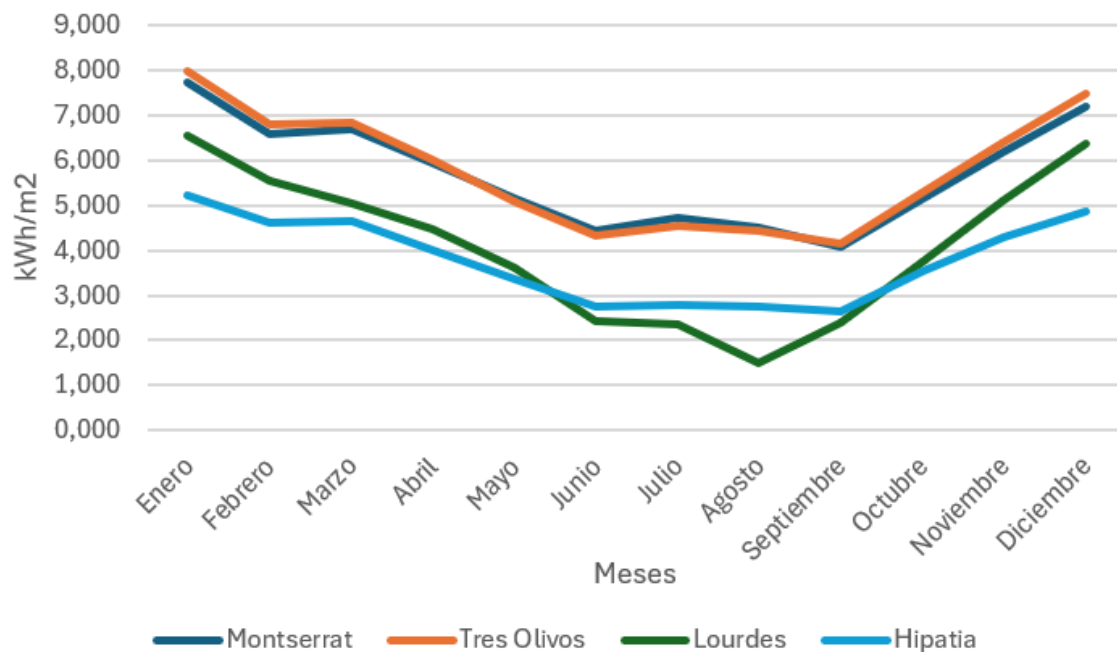


Figura 51. Gráfica, infiltraciones exteriores.

Para el análisis de las ganancias internas consideramos más idóneo sustituir el diagrama anterior por una gráfica de barras, que permite comparar simultáneamente los valores



anuales de los cuatro edificios objeto de estudio y facilita la lectura de las magnitudes relativas entre categorías. A primera vista se comprueba que la principal contribución corresponde a las ganancias solares a través de los huecos acristalados, que en el caso de Tres Olivos superan los 70 kWh/m². Este dato se interpreta de forma muy positiva, puesto que refleja un excelente aprovechamiento de la radiación solar para reducir la demanda térmica durante los meses fríos, lo que repercute directamente en un menor consumo de calefacción.

En Lourdes, sin embargo, no se reproduce el mismo patrón: las ganancias solares son sensiblemente menores, lo que puede explicarse por una orientación con menor exposición, por la presencia de sombreados permanentes o, alternativamente, por el empleo de acristalamientos con control solar de mayor factor de sombra. Conviene subrayar, además, el peso no despreciable de las cargas internas derivadas de la iluminación y del equipamiento informático, algo habitual en edificios docentes debido a la elevada ocupación diurna y al uso intensivo de dispositivos electrónicos. Estos aportes térmicos adicionales no solo influyen en la fracción sensible de la carga de refrigeración, sino que también contribuyen, en menor medida, a cubrir parte de las pérdidas en invierno. En conjunto, la representación en barras ofrece una visión clara y cuantitativa de cómo se reparten las ganancias internas y facilita la identificación de oportunidades de mejora específicas para cada inmueble.

	Montserrat	Tres Olivos	Lourdes	Hipatia
Iluminación General (kWh/m ²)	38,574	36,125	21,820	27,838
Computadoras y Equipos (kWh/m ²)	40,441	39,677	17,405	24,744
Ocupación (kWh/m ²)	14,283	18,343	19,792	15,544
Gan. Solares Ventanas Ext. (kWh/m ²)	65,937	72,099	7,639	35,380

Figura 52. Tabla ganancias internas anuales.

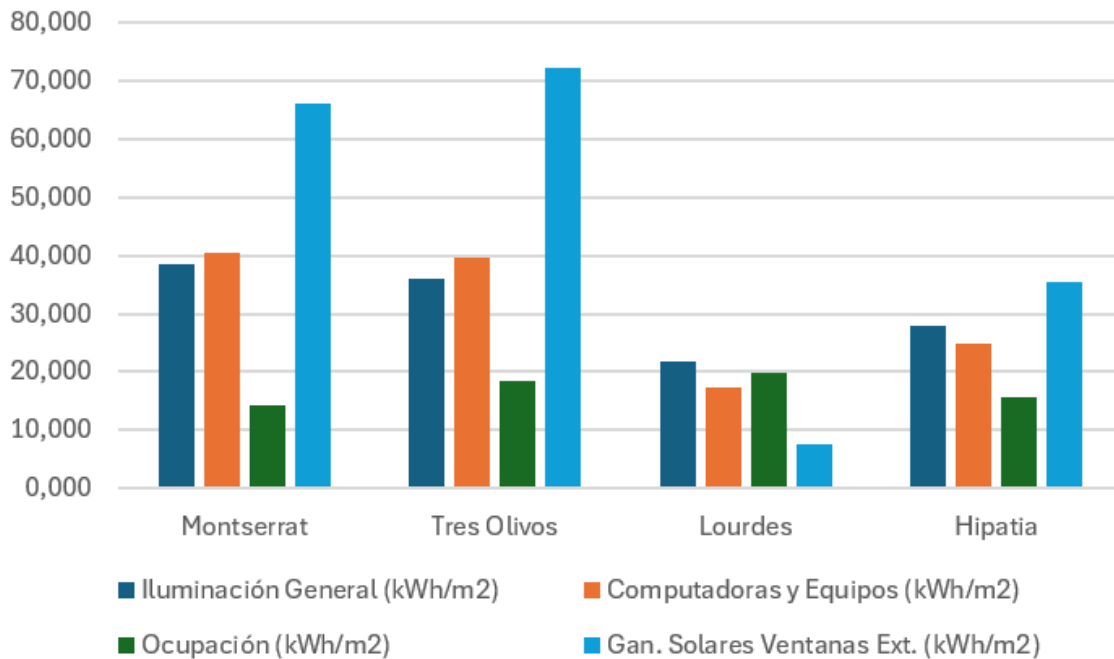


Figura 53. Gráfica, ganancias internas anuales.

Finalmente, se presentan los resultados consolidados de los consumos anuales para los cuatro centros, desglosados en gas de calefacción, electricidad de equipos y electricidad de iluminación. En tres de ellos (Montserrat, Tres Olivos e Hipatia) la demanda eléctrica acapara la mayor parte del consumo:

- En Montserrat, la demanda de equipos ($40,44 \text{ kWh/m}^2$) e iluminación ($38,57 \text{ kWh/m}^2$) suma unos $79,02 \text{ kWh/m}^2$, frente a $20,73 \text{ kWh/m}^2$ de calefacción.
- En Hipatia, los consumos eléctricos conjuntos ($24,74 + 27,84$) alcanzan $52,58 \text{ kWh/m}^2$, mientras que la calefacción se queda en $12,71 \text{ kWh/m}^2$.
- Tres Olivos presenta un patrón muy similar: $39,68 \text{ kWh/m}^2$ de aparatos y $36,13 \text{ kWh/m}^2$ de iluminación (total $75,80 \text{ kWh/m}^2$) frente a $18,40 \text{ kWh/m}^2$ de calefacción.



Este desequilibrio se explica por los picos de gas en invierno, que luego caen casi a cero en verano, mientras que ordenadores, equipos y alumbrado ofrecen una carga base constante a lo largo del año.

Por el contrario, Lourdes rompe este esquema: su gasto eléctrico (17,41 + 21,82) es de 39,23 kWh/m², muy cercano a los 36,02 kWh/m² de calefacción. Esta distribución más equilibrada sugiere que, además de mejorar la envolvente o renovar calderas, en Lourdes conviene optimizar la gestión de la calefacción y considerar tecnologías avanzadas de medición y regulación para maximizar el ahorro.

En conjunto, el análisis anual confirma la necesidad de priorizar medidas de eficiencia eléctrica, como la sustitución de luminarias por LED, la implementación de sensores de presencia y la renovación de equipos, especialmente en Montserrat, Tres Olivos e Hipatia, donde constituyen la fracción dominante de la demanda. Al mismo tiempo, para Lourdes será clave ajustar tanto la estrategia de calefacción como el perfil de ocupación, de modo que la inversión en aislamiento o mejoras de calderas vaya acompañada de un plan de uso y control más eficiente. De este modo, se podrá reducir de forma significativa el balance energético global de todos los edificios.

	Montserrat	Tres Olivos	Lourdes	Hipatia
Aparatos (Electricidad) (kWh/m ²)	40,441	39,677	17,405	24,744
Iluminación (kWh/m ²)	38,574	36,125	21,820	27,838
Calefacción (kWh/m ²)	20,729	18,404	36,019	12,714

Figura 54. Tabla consumos anuales.

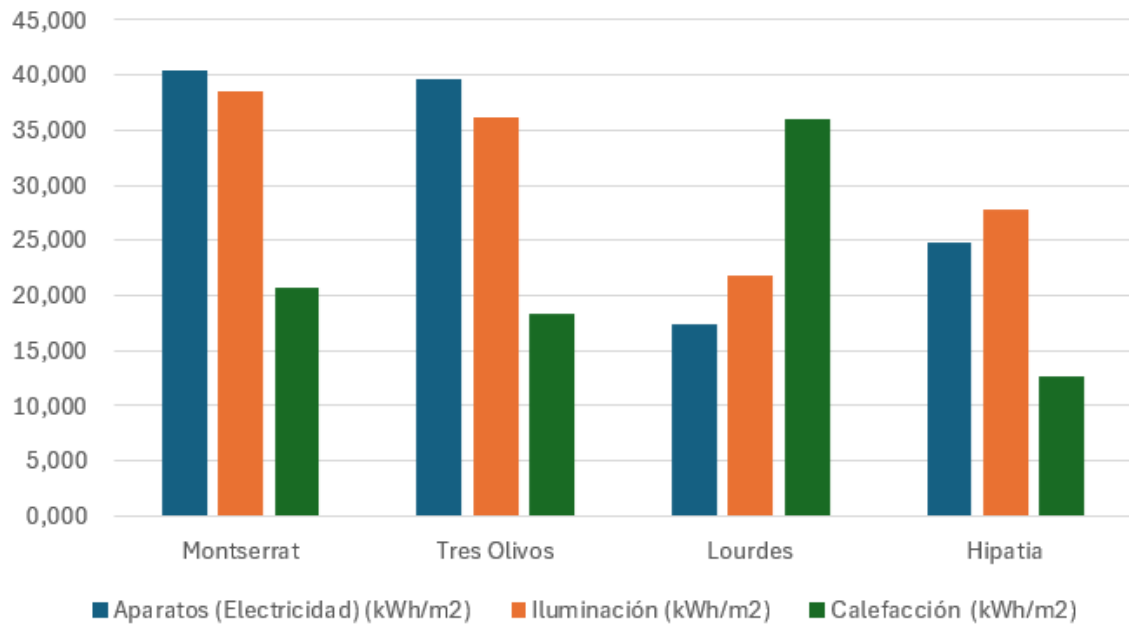


Figura 55. Gráfica, consumos anuales.



5.2. Ventilación

5.1.1. Situación actual de ventilación en el aula

Se analiza un aula tipo de Montserrat de 200 m³ con una estimación de 25 alumnos. La ventilación se basa exclusivamente en medios naturales y en infiltraciones no controladas, con una tasa total de renovación de aire de 1,2 renovaciones por hora (ren/h), compuesta por:

- 0,5 ren/h de ventilación natural
- 0,7 ren/h por infiltraciones no deseadas

Esto equivale a un caudal exterior total de:

$$1,2 \text{ ren/h} * 200 \text{ m}^3 = 240 \text{ m}^3/\text{h}$$

Al convertir este valor a litros por segundo y por persona:

$$(240 \text{ m}^3/\text{h}) / 3,6 = 66,7 \text{ L/s} \Rightarrow 66,7 / 25 = 2,67 \text{ L/s} * \text{persona}$$

Este caudal solo representa el 21 % del mínimo exigido por el RITE, que requiere 12,5 L/s·persona para aulas.

5.1.2. Evaluación de la calidad del aire (CO₂)

Según la UNE-EN 16798-1 (categoría II), la diferencia máxima aceptable de concentración de CO₂ entre el aire interior y el exterior es de 900 ppm. Si consideramos:

- CO₂ exterior: 450 ppm
- Producción de CO₂ por alumno: 0,005 L/s
- Caudal total disponible: 2,67 L/s·persona

La concentración interior se calcula así:

$$C_{int} = 450 + (0,005 * 25) / 2,67 * 10^6 = 450 + 47 = 497 \text{ ppm}$$



Este valor es inferior al límite normativo, pero representa una media. En la práctica, pueden producirse picos horarios que superen los 900 ppm, especialmente si no se abren las ventanas de forma constante y adecuada.

5.1.3. Propuesta de mejora: ventilación eficiente y normativa

Dado que el sistema actual no cumple con el RITE y puede comprometer la calidad del aire durante parte de la jornada, se proponen dos estrategias de mejora:

- Ventilación mecánica con recuperación de calor (VMC + RC): Ahorra energía gracias a la recuperación de calor (rendimiento $\approx 75\%$) y puede incluir control a demanda mediante sondas de CO_2 , evitando ventilación innecesaria.
- Ventilación híbrida con sensores y sobreventilación puntual: Mejora la ventilación sin necesidad de grandes obras



6. Propuestas de mejora

Tras analizar en detalle el comportamiento energético de los cuatro colegios, hemos podido identificar sus principales puntos débiles, o, formulándolo de otro modo, las oportunidades de mejora más prometedoras. Se ha comprobado cómo reaccionan los edificios ante sus sistemas de climatización actuales y, simultáneamente, dónde se concentran las mayores fugas térmicas y los consumos más elevados de energía.

A partir de este diagnóstico, se ha decidido proponer un conjunto de medidas correctoras que aborden estas carencias. Tal y como se ha descrito previamente, dichas acciones se dividirán en dos categorías: pasivas, orientadas al propio cerramiento y composición constructiva, y activas, enfocadas a los sistemas mecánicos e instalaciones. Para cada uno de los cuatro centros se implementarán, de manera independiente, un par de intervenciones de cada tipo; a continuación, compararemos los resultados obtenidos con los del edificio base, lo que permitirá evaluar con claridad la rentabilidad y el grado de mejora energética de cada solución.

En primer lugar, se revisará con detalle la demanda energética de referencia necesaria para garantizar el confort térmico en el edificio base. Las mejoras pasivas propuestas tienen como objetivo minimizar las pérdidas y, por tanto, reducir de forma significativa la carga de calefacción y refrigeración.

Por otro lado, se analizarán los consumos anuales reales registrados, teniendo en cuenta la configuración de instalaciones y sistemas existentes, para determinar cuáles de las mejoras activas pueden aportar un mayor rendimiento. Estas intervenciones incluirán, por ejemplo, la optimización de la señal de control de las bombas de calor, la instalación de equipos de alta eficiencia o la integración de estrategias de gestión energética mediante automatización y sensórica avanzada. Con este planteamiento metodológico,



no solo se cuantificará el ahorro energético potencial, sino que también se determinará el plazo de recuperación de la inversión y la viabilidad económica de cada alternativa.

6.1. Tres Olivos

Para este colegio en particular, el análisis detallado ha puesto de manifiesto que sus principales fugas térmicas se producen tanto por las infiltraciones exteriores como por el comportamiento del acristalamiento. Con estos datos, se ha decidido intervenir en dos frentes complementarios: por un lado, sustituir las carpinterías existentes por un triple acristalamiento de altas prestaciones, lo que reduce de forma notable la transmitancia térmica y mejora el aislamiento frente a las variaciones exteriores de temperatura.

Por otro lado, se ha llevado a cabo un refuerzo específico de la hermeticidad de la envolvente, sellando juntas, revisando los encuentros de los marcos y aplicando cintas y selladores de última generación en todos los puntos críticos. Gracias a esta doble estrategia: mejora del panel acristal y optimización del sellado, se consigue una envolvente mucho más estanca, con una disminución sustancial de las infiltraciones y, por tanto, un ahorro energético continuo tanto en invierno como en verano. En conjunto, estas medidas permiten no solo reducir la demanda de calefacción y refrigeración, sino también mejorar el confort interior y alargar la vida útil de los sistemas de climatización.

Editar acristalamiento - Copia de Acristalamiento exterior del proyecto

Acristalamiento

Capas | Valores calculados | Coste

General

Nombre Copia de Acristalamiento exterior del proyecto

Descripción

Fuente

Categoría Proyecto

Región SPAIN

Color

Método de definición

Método de definición 1-Capas

Capas

Número de vidrios 3

Vidrio exterior

Tipo de vidrio Generic PYR B CLEAR 3MM

Voltear vidrio

Gas de ventana 1

Tipo de gas de ventana AIR 13MM

Vidrio 2

Tipo de vidrio Generic CLEAR 3MM

Voltear vidrio

Gas de ventana 2

Tipo de gas de ventana AIR 13MM

Vidrio interior

Tipo de vidrio Cardinal Glass Industries

Voltear vidrio

Iluminación Natural Radiance

Ayuda

Info | Datos

Vidrios

Cardinal Glass Industries E180-3 / 0.090 SGP / Clr-3 <LoE180-3_090SGP_Clr-3.CIG>

Cardinal Glass Industries E180-3 / 0.090 SGP / Green-3 <LoE180-3_090SGP_Green-3.CIG>

Cardinal Glass Industries E180-5 / 0.090 SGP / Clr-5 <LoE180-5_090SGP_Clr-5.CIG>

Cardinal Glass Industries E180-5 / 0.090 SGP / Green-5 <LoE180-5_090SGP_Green-5.CIG>

Cardinal Glass Industries E180-6 / 0.090 SGP / Clr-6 <LoE180-6_090SGP_Clr-6.CIG>

Cardinal Glass Industries E270-3 (2) / .090 PVB / Clear-3 <E270-3_090PVB_Clear-3.CIG>

Cardinal Glass Industries E270-3 (2) / .090 SGP / Clear-3 <E270-3_090SGP_Clear-3.CIG>

Cardinal Glass Industries E270-4 (2) / .090 PVB / Clear-4 <E270-4_090PVB_Clear-4.CIG>

Cardinal Glass Industries E270-5 (2) / .075 Vanceva Storm / Clear-5 <E270-5_075Van_Clear-5.CIG>

Informe de datos (No editable)

General

Cardinal Glass Industries E270-3 (2) / .090 PVB / Clear-3 <E270-3_0

Fuente IGDB v58.0

Categoría Vidrio claro

Nombre de IGDB E270-3_090PVB_Clear-

No. de identificación NFRC 18198

Tipo de Datos

Tipo de datos 2-Espectrales

Propiedades térmicas

Espesor (mm) 8.30000

Conductividad (W/m-K) 0.49400

Propiedades solares

Transmitancia solar 0.33500

Reflectancia solar exterior 0.40800

Reflectancia solar interior 0.33200

Datos del modelo

Ayuda | Cancelar | Aceptar

Figura 56. Plantilla acristalamiento Tres Olivos.

Tras simular la nueva envolvente modificada, se obtuvieron los siguientes datos, los cuales se exportaron a un Excel para poder realizar una comparativa más visible:

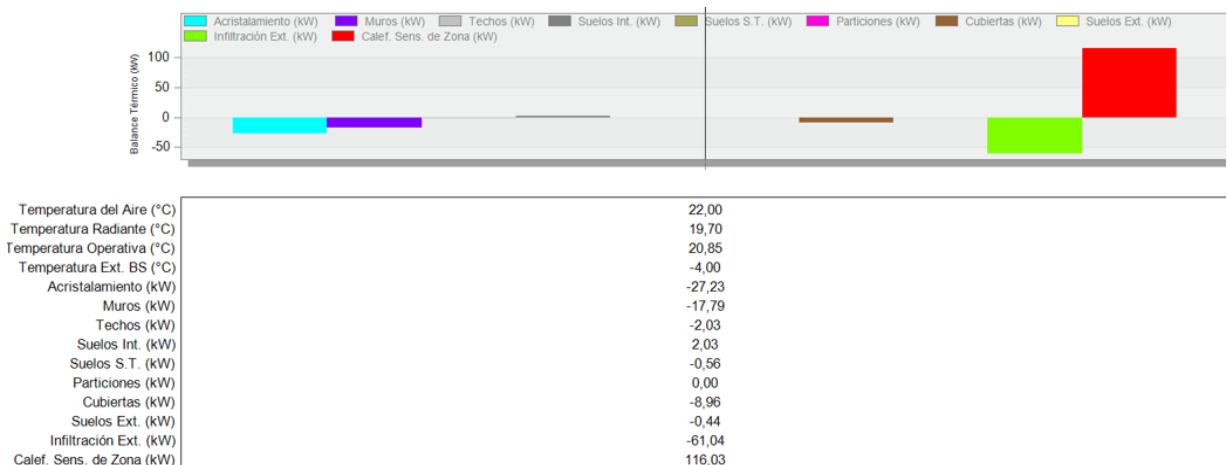


Figura 57. Resultados edificio base.

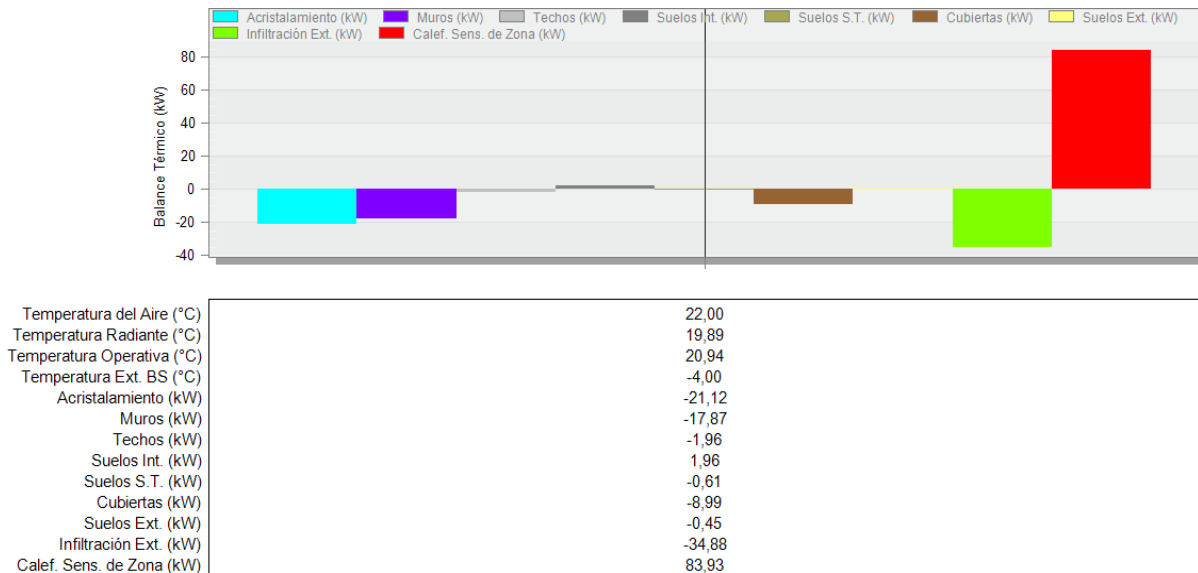


Figura 58. Resultados edificio mejorado.

Tras aplicar las intervenciones sobre el acristalamiento y el sellado de la envolvente, se observa una reducción notable de las pérdidas térmicas en los dos parámetros más críticos:

- Las pérdidas por acristalamiento disminuyen de alrededor de 27 kW a poco más de 21 kW, gracias al triple vidrio de altas prestaciones.
- Las infiltraciones exteriores se ven aún más beneficiadas, pasando de más de 61 kW a menos de 35 kW, lo que refleja el efecto del refuerzo de hermeticidad en juntas y carpinterías.
- Como consecuencia directa de estas mejoras, la demanda sensible de calefacción del edificio base se reduce de 116 kW en la situación inicial a 84 kW tras la intervención, es decir, una caída de casi el 30 %. Este descenso no sólo aligera la carga de los sistemas de climatización durante el invierno, sino que también reduce el consumo energético total y mejora el confort interior al minimizar corrientes de aire no deseadas.

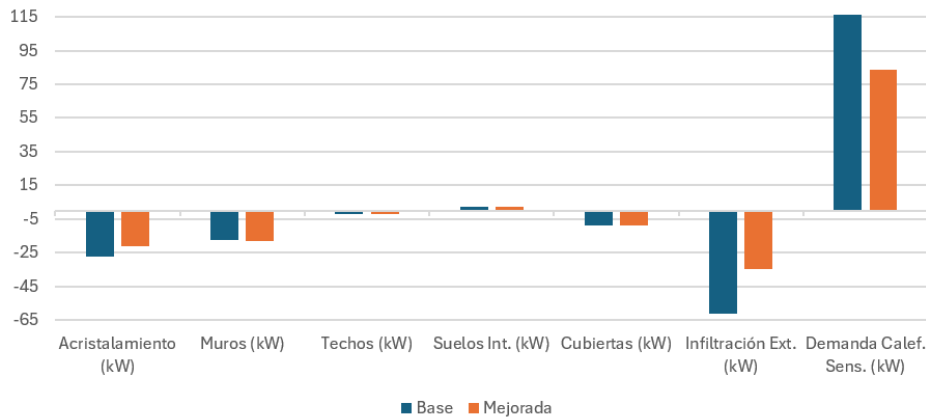


Figura 59. Gráfica de pérdidas y demanda Tres Olivos.

En cuanto a las medidas activas, se han implementado mejoras directamente sobre los sistemas que gestionan el confort y la iluminación del edificio. En primer lugar, se ha integrado un sistema de control de iluminación basado en sensores de presencia y regulación automática de intensidad, de modo que las lámparas sólo funcionan cuando realmente hay ocupación y se adapta su brillo según la luz natural disponible. Esto evita el despilfarro eléctrico en espacios desocupados o sobrealumbrados.

Paralelamente, se ha procedido a remplazar la antigua caldera de gas por una bomba de calor de alta eficiencia, cuyas prestaciones energéticas son muy superiores a las de los sistemas convencionales. Este equipo aprovecha la energía térmica del ambiente para climatizar el edificio con un coeficiente de performance (COP) elevado, lo que reduce considerablemente el consumo eléctrico neto necesario para calefacción y, además, permite funcionar también en modo refrigeración si así se requiere.

Con estas dos intervenciones se consigue un equilibrio más ajustado entre demanda real y suministro de energía, traduciéndose en un ahorro energético notable y en una gestión más sostenible de los recursos durante todo el año.

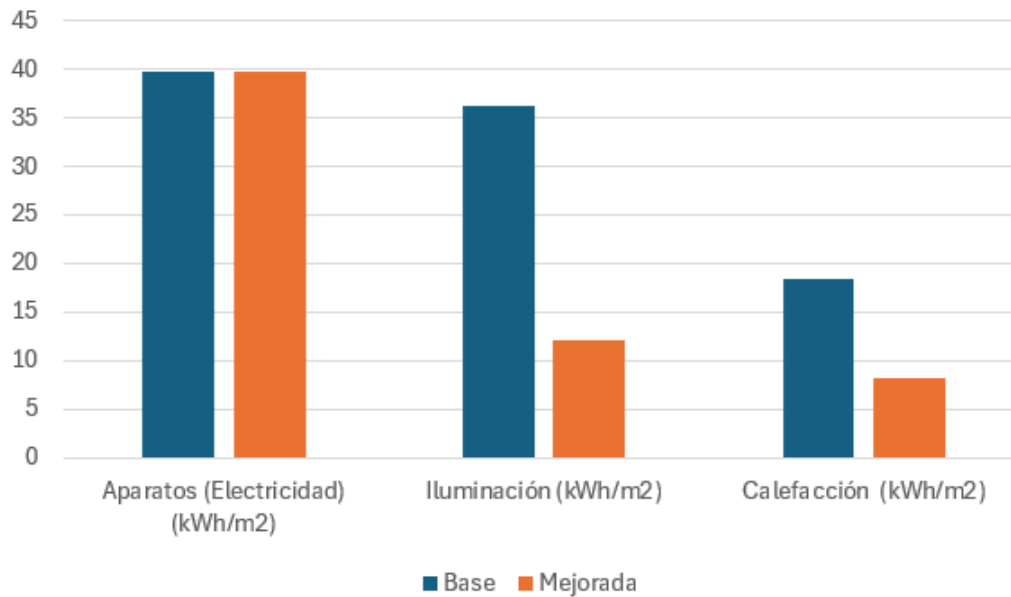


Figura 60. Gráfica consumos anuales Tres Olivos.

Tal y como se aprecia en la tabla, la intervención logra un descenso muy acusado en el consumo de iluminación, que pasa de unos 36,1 kWh/m² en el escenario base a apenas 12,0 kWh/m² tras la renovación de las luminarias, lo que supone una reducción superior al 65 %. En paralelo, el consumo de calefacción se ve prácticamente recortado a la mitad: en la versión original se requerían 18,4 kWh/m² para cubrir la demanda sensible, mientras que en la propuesta mejorada esa energía se suministra mediante bomba de calor eléctrica con un consumo de tan solo 8,3 kWh/m², lo que equivale a un ahorro cercano al 55 % en kWh/m² útiles.

Es interesante observar que el consumo de los equipos eléctricos (aparatos) permanece inmutable en torno a 39,7 kWh/m², ya que en este paquete de medidas no se han modificado las cargas internas ni los patrones de uso de los dispositivos.

En conjunto, estas mejoras permiten reducir el consumo energético global por metro cuadrado de aproximadamente 94,2 kWh/m² en la situación de partida a unos 60,0 kWh/m² tras las intervenciones, lo que representa una disminución de más del 36 %. Esta disminución significativa no solo implica un ahorro económico sustancial, sino también una importante reducción de emisiones de CO₂, dado que se sustituye gran parte del consumo de gas por electricidad de alta eficiencia.

DEMANDA	Base	Mejorada
Acrilamiento (kW)	-27,23	-21,12
Muros (kW)	-17,79	-17,87
Techos (kW)	-2,03	-1,96
Suelos Int. (kW)	2,03	1,96
Cubiertas (kW)	-8,96	-8,99
Infiltración Ext. (kW)	-61,04	-34,88
Demanda Calef. Sens. (kW)	116,03	83,93
CONSUMO	Base	Mejorada
Aparatos (Electricidad) (kWh/m ²)	39,6771081	39,6771081
Iluminación (kWh/m ²)	36,1254726	12,0325464
Calefacción (kWh/m ²)	18,4038686	8,27947122

Figura 61. Tabla demanda y consumo Tres Olivos.

6.2. Montserrat

En la mayoría de los colegios analizados, las infiltraciones exteriores constituyen el principal problema desde el punto de vista energético: el aire frío penetra sin control a través de juntas y fisuras, aumentando la carga de calefacción y provocando discomfort. Sin embargo, en el caso específico del colegio Monserrat se ha detectado, además, un segundo foco de pérdidas muy relevante: la transmisión térmica a través de los muros. Los valores de flujo de calor registrados confirman que la envolvente opaca presenta un nivel de aislamiento insuficiente y puentes térmicos poco tratados, lo que incrementa la demanda de energía en los meses más fríos.

A la luz de esta evidencia, el paquete de mejoras diseñado para Monserrat incorpora actuaciones duales. Por un lado, se refuerza la hermeticidad general con el fin de minimizar las infiltraciones, y por otro, se plantea la rehabilitación pasiva de los cerramientos exteriores. Con esta estrategia combinada se persigue reducir simultáneamente las dos vías de pérdida más significativas y, en consecuencia, lograr un descenso sustancial en la demanda de calefacción, mejorar el confort higrotérmico y prolongar la vida útil de los equipos de climatización.

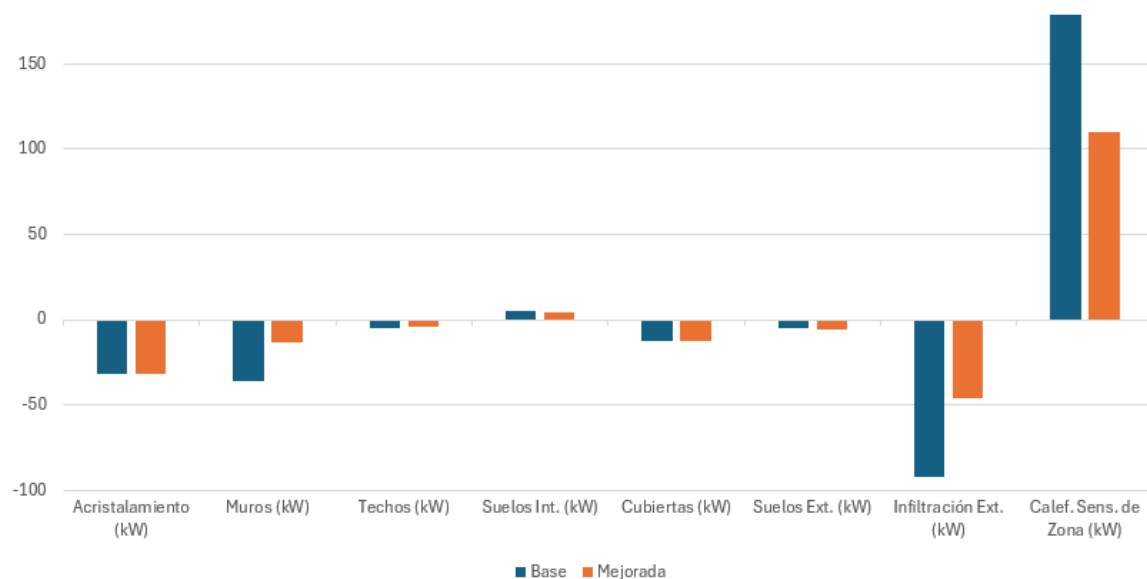


Figura 62. Gráfica de pérdidas y demanda Monserrat.

Se aprecia con claridad que, mientras algunos parámetros permanecen prácticamente inalterados, los muros y las infiltraciones sí experimentan una mejora notable, reduciendo las pérdidas térmicas tal y como se había previsto en la fase de diseño. Esta doble modificación permite rebajar casi a la mitad la demanda de calefacción sensible de zona, aliviando la carga de trabajo de los equipos durante los meses fríos.

En lo que respecta al consumo energético, las medidas activas introducidas complementan el ahorro pasivo: se ha instalado un sistema de iluminación LED en sustitución de las luminarias convencionales, con regulación automática para evitar encendidos innecesarios, y se ha procedido a reemplazar la antigua caldera de gas por una bomba de calor de alto rendimiento ($COP > 3$). Este nuevo equipo, además de operar con mayor eficiencia, elimina la dependencia directa de combustibles fósiles y contribuye a una reducción significativa de las emisiones asociadas al edificio. Con la combinación de estas intervenciones, se obtiene un edificio no sólo más eficiente en términos numéricos, sino también más sostenible y confortable para sus usuarios.

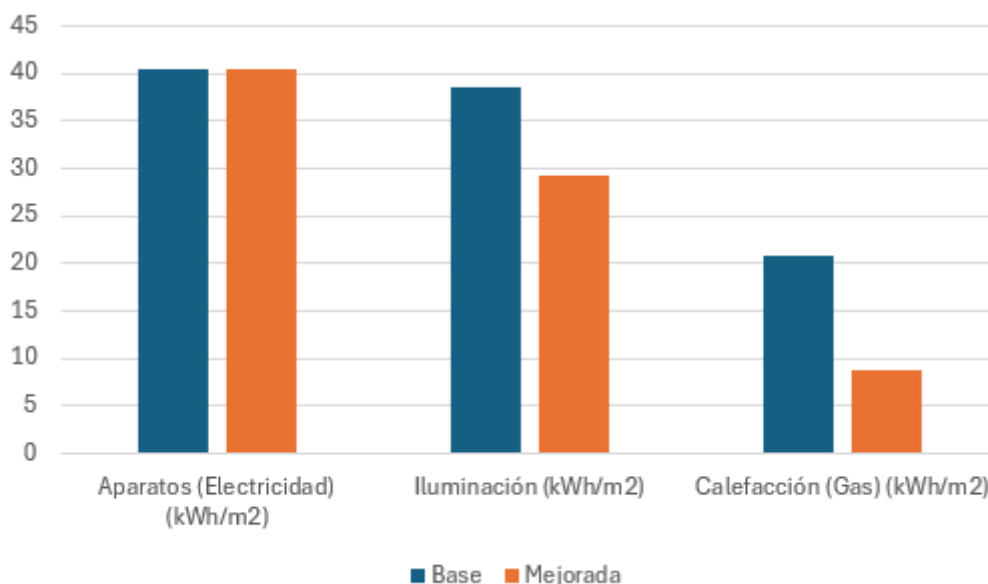


Figura 63. Gráfica consumos anuales Monserrat.

El análisis de resultados confirma el éxito de la intervención, reflejado en una disminución muy notable de los consumos clave por metro cuadrado:

- Iluminación: el uso de sistemas LED regulados por sensores inteligentes ha permitido rebajar el gasto de aproximadamente 38,57 kWh/m² en el escenario base a 29,22 kWh/m² tras la mejora, lo que supone un ahorro cercano al 24 % sin comprometer la calidad lumínica ni el confort visual.
- Calefacción: la sustitución de la caldera de gas por una bomba de calor ha reducido la demanda sensible de 20,73 kWh/m² a 8,73 kWh/m², logrando un recorte superior al 58 % en la energía necesaria para mantener las condiciones térmicas deseadas.
- Aparatos eléctricos: el consumo de los equipos se mantiene estable en torno a 40,44 kWh/m², ya que estas medidas no afectan a las cargas internas ni a los patrones de uso de los dispositivos.

En conjunto, estas mejoras no solo garantizan el cumplimiento de los objetivos de ahorro energético, sino que también preservan los estándares de confort en iluminación y temperatura. La combinación de control inteligente y renovación del sistema de climatización demuestra la eficacia de las estrategias de eficiencia implementadas, traduciéndose en un edificio más sostenible, con menores costes operativos y una huella de carbono significativamente reducida.

DEMANDA	Base	Mejorada
Acrisolamiento (kW)	-31,72	-32,05
Muros (kW)	-36,1	-13
Techos (kW)	-5,16	-4,1
Suelos Int. (kW)	5,16	4,1
Cubiertas (kW)	-12,61	-12,76
Suelos Ext. (kW)	-5,34	-5,44
Infiltración Ext. (kW)	-92,5	-46
Calef. Sens. de Zona (kW)	178,7	109,75
CONSUMO	Base	Mejorada
Aparatos (Electricidad) (kWh/m ²)	40,4410053	40,4410053
Iluminación (kWh/m ²)	38,5743753	29,2230082
Calefacción (Gas) (kWh/m ²)	20,7294722	8,7268459

Figura 64. Tabla demanda y consumos Monserrat.

6.3. Lourdes

En el caso del colegio analizado, se identificó que las pérdidas energéticas más significativas provenían de dos fuentes principales: infiltraciones de aire no controladas (debido a falta de estanqueidad en ventanas, juntas y cerramientos) y transmisión térmica a través de los muros (por aislamiento insuficiente o puentes térmicos).

Para minimizar estos problemas, se implementaron las siguientes medidas pasivas de mejora:

- Refuerzo de la estanqueidad al aire: sellado de huecos y juntas, en ventanas, puertas y puntos críticos de fuga.
- Aislamiento térmico de muros: añadido de un material aislante de alto espesor (EPS Expanden Polystyrene (Lightweight)) en una de las capas internas de los muros, como se puede apreciar en la siguiente figura:



Figura 65. Nueva sección de muros en Lourdes.



La implementación de las medidas correctivas en la envolvente del edificio ha demostrado ser efectiva desde el punto de vista de la eficiencia energética. Los datos obtenidos revelan mejoras sustanciales en todos los parámetros analizados:

- Reducción de pérdidas térmicas a través de los muros:

Los trabajos de reforzamiento del aislamiento, consistentes en la adición de una capa de material aislante de óptimas características técnicas y adecuado espesor, han permitido disminuir en aproximadamente un 50% las pérdidas de calor que se producían a través de los cerramientos verticales. Esta mejora se traduce directamente en una mayor estabilidad térmica interior y un significativo ahorro energético.

- Minimización de infiltraciones de aire no controladas:

La meticulosa labor de sellado de juntas, marcos de ventanas y otros puntos críticos ha logrado reducir a la mitad las infiltraciones de aire exterior que anteriormente mermaban la eficiencia energética del edificio. Este aspecto resulta particularmente relevante, ya que las infiltraciones representaban una de las principales fuentes de pérdida energética tanto en este colegio como en los otros tres.

- Impacto en la demanda de calefacción:

Como resultado directo de estas intervenciones, se ha observado una drástica reducción en la demanda de calefacción cuando se compara con los valores del edificio en su estado original. Los datos demuestran que la demanda energética para calefacción ha disminuido un porcentaje 27,5%, lo que confirma la efectividad de las medidas implementadas.

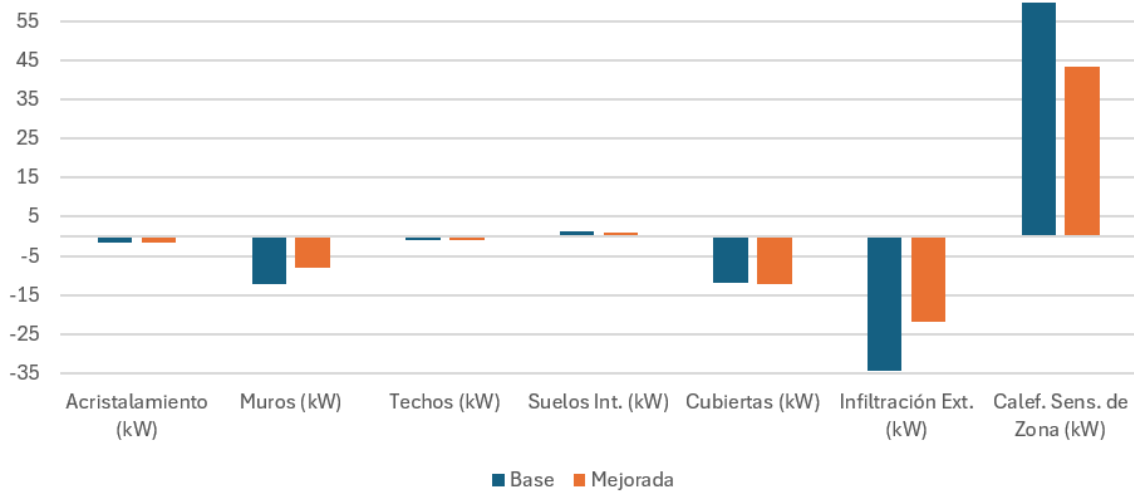


Figura 66. Gráfica de pérdidas y demanda Lourdes.

La implementación de medidas activas de eficiencia energética en el edificio ha enseñado resultados significativos, aunque con matices importantes que merecen ser analizados. Por un lado, la instalación de un sistema de control de iluminación automatizado ha permitido optimizar considerablemente el consumo eléctrico, eliminando los derroches energéticos asociados a dejar las luminarias encendidas manualmente sin uso alguno. Los sensores de presencia y los reguladores de intensidad en función de la luz natural disponible han demostrado ser particularmente efectivos, logrando una reducción sustancial en el gasto energético destinado a iluminación sin comprometer en absoluto los niveles de confort lumínico requeridos.

En cuanto al sistema de climatización, la sustitución de la antigua caldera de gas por un moderno equipo de biomasa ha presentado un escenario más complejo. A diferencia de los otros colegios analizados, las mejoras no significan una reducción del consumo de calefacción, ya que si bien los datos muestran un ligero incremento en el consumo energético para calefacción (debido principalmente al menor poder calorífico específico de la biomasa comparado con el gas natural), este aspecto queda ampliamente compensado por las mejoras ambientales obtenidas. El balance de emisiones de CO₂ ha experimentado una notable mejoría, ya que la biomasa, al tratarse de un combustible

renovable, presenta un impacto ambiental significativamente menor que los combustibles fósiles tradicionales. Esta reducción en la huella de carbono, cuantificada en los análisis realizados, convierte a esta medida en una opción claramente sostenible a pesar del modesto aumento en el consumo energético registrado.

La combinación de estas dos intervenciones: optimización de la iluminación y sustitución del sistema de generación térmica, ha permitido alcanzar un equilibrio óptimo entre eficiencia energética y sostenibilidad ambiental. Los resultados globales demuestran que es posible mejorar sustancialmente el comportamiento ambiental del edificio, incluso cuando algunos indicadores energéticos específicos puedan mostrar variaciones menores. Este caso ejemplifica cómo una evaluación integral del rendimiento de un edificio debe considerar tanto los aspectos puramente energéticos como los medioambientales, ya que en ocasiones las mejoras en un ámbito pueden justificar pequeños sacrificios en el otro, siempre que el balance global resulte positivo. La experiencia obtenida con estas medidas activas proporciona valiosas lecciones para futuras intervenciones de mejora de la eficiencia energética en edificios similares.

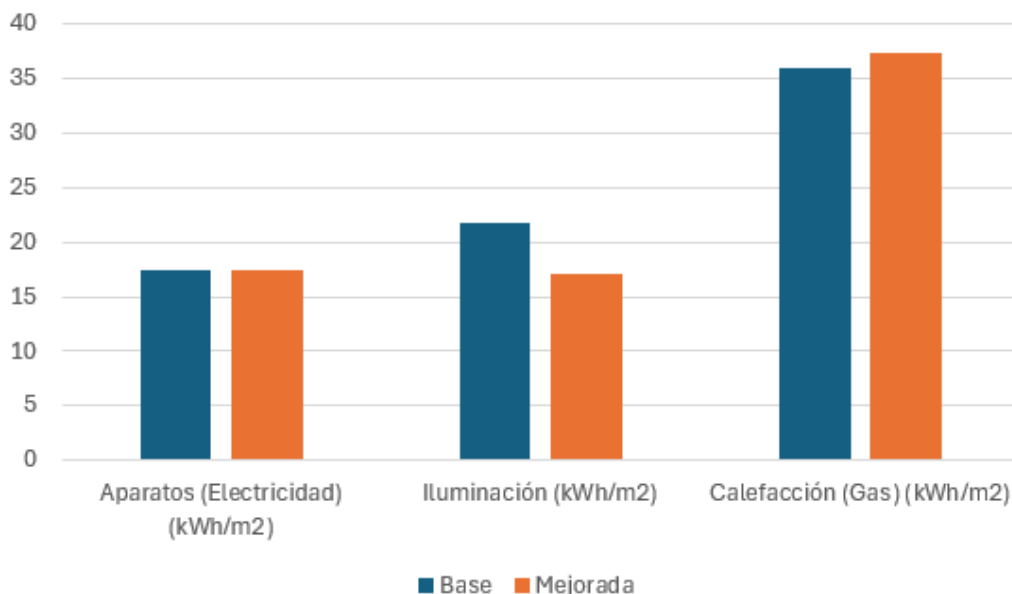


Figura 67. Gráfica consumos anuales Lourdes.

Los resultados muestran una notable reducción del 28,15% en emisiones de CO₂, superando las expectativas iniciales antes de la implantación de la biomasa. Este avance demuestra la efectividad de las medidas implementadas para mejorar la sostenibilidad del edificio, alineándose con los objetivos de descarbonización y manteniendo el confort térmico. Un logro significativo en la eficiencia ambiental.

Emissiones de CO₂ (kg/m²)

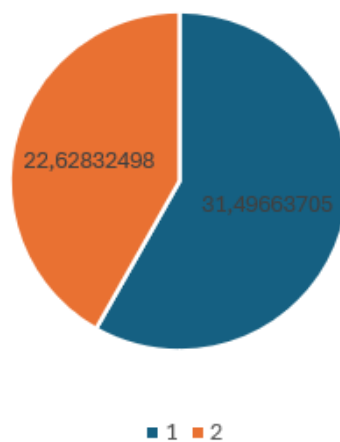


Figura 68. Gráfica emisiones CO₂ Lourdes.

DEMANDA	Base	Mejorada
Acrisolamiento (kW)	-1,65	-1,62
Muros (kW)	-12,09	-8,01
Techos (kW)	-1,12	-0,93
Suelos Int. (kW)	1,12	0,94
Cubiertas (kW)	-12,01	-12,08
Infiltración Ext. (kW)	-34,28	-21,8
Calef. Sens. de Zona (kW)	59,77	43,32
CONSUMO	Base	Mejorada
Aparatos (Electricidad) (kWh/m ²)	17,404755	17,404755
Iluminación (kWh/m ²)	21,819616	17,096636
Calefacción (Gas) (kWh/m ²)	36,018587	37,412349
Emissiones de CO ₂ (kg/m ²)	31,496637	22,628325

Figura 69, Tabla demanda y consumo Lourdes.

6.4. Hipatia

Para combatir las debilidades identificadas en este edificio, se ha optado por reforzar la cubierta mediante la incorporación de materiales aislantes de mayor densidad y espesor, como por ejemplo, paneles de poliuretano o lana mineral de última generación, lo que reduce de forma significativa las pérdidas de calor por la parte superior de la envolvente. Al mismo tiempo, se ha prestado especial atención a mejorar la estanqueidad general, sellando cuidadosamente encuentros, remates y posibles puntos débiles con cintas y masillas específicas, y realizando ensayos de hermeticidad que garantizan la efectividad de la intervención.

Este doble enfoque (aumentar la resistencia térmica de la cubierta y minimizar las infiltraciones) no solo aporta un aislamiento más homogéneo, sino que además evita corrientes de aire indeseadas y mejora el comportamiento higrotérmico interior. Como resultado, se espera una reducción notable de la demanda de calefacción en invierno y de refrigeración en verano, así como un aumento del confort y una prolongación de la vida útil de los sistemas de climatización.

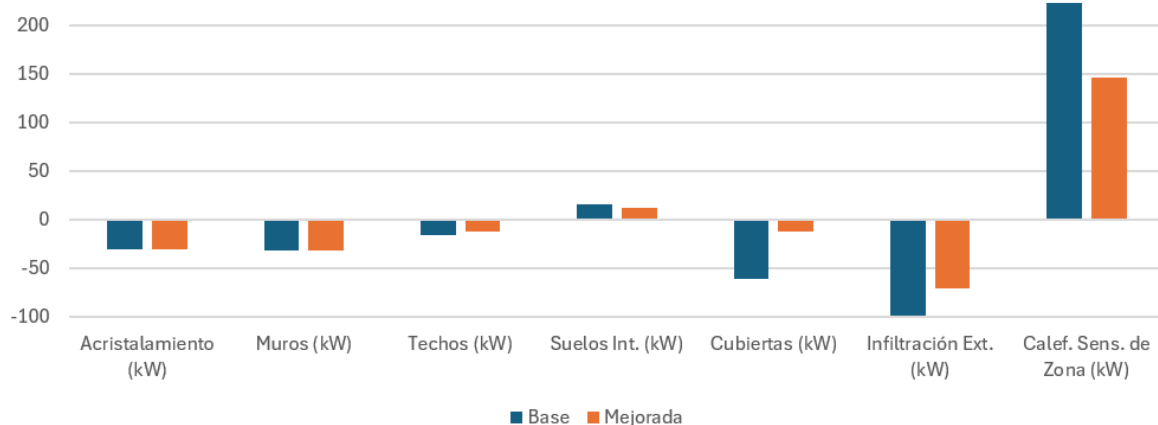


Figura 70. Gráfica de pérdidas y demanda Hipatia.



Observamos una notable disminución de la demanda de calefacción, tal y como se había previsto en la fase de diseño, gracias a las intervenciones realizadas. Las mejoras dirigidas a reducir las pérdidas por infiltraciones han aportado un ahorro constante, pero ha sido el refuerzo de la cubierta el que ha tenido un impacto especialmente significativo: al incrementar su resistencia térmica y sellar detalladamente los puntos críticos, se han aminorado las fugas de calor más acusadas en invierno. En conjunto, estas actuaciones han permitido no solo rebajar la energía necesaria para mantener el confort interior, sino también suavizar los picos de consumo estacionales, logrando un comportamiento mucho más estable y eficiente a lo largo de todo el año.

Como parte de las estrategias de mejora activa de la eficiencia energética del edificio, se ha incorporado un sistema de generación renovable mediante placas fotovoltaicas instaladas en la cubierta. Esta medida activa permite autoconsumo eléctrico, reduciendo la dependencia de la red convencional y aportando energía limpia para cubrir parte de la demanda del edificio. Con esto se ha conseguido:

- Reducción del consumo eléctrico anual: La energía generada por las placas fotovoltaicas compensa directamente el consumo asociado a sistemas auxiliares (iluminación, equipos) y, en combinación con la bomba de calor, contribuye a disminuir el consumo de calefacción (al alimentarse parcialmente de electricidad renovable).
- Disminución de la energía primaria no renovable: Al sustituir energía de la red (mix eléctrico con combustibles fósiles) por energía solar, se reduce significativamente la huella de carbono del edificio.
- Balance neto favorable: En los meses de mayor irradiación solar (primavera-verano), el excedente de generación puede incluso verse a la red, optimizando el coste energético global.

En la siguiente imagen se observa dónde se han instalado estas placas sobre el edificio base en nuestro software, previo a la simulación energética.

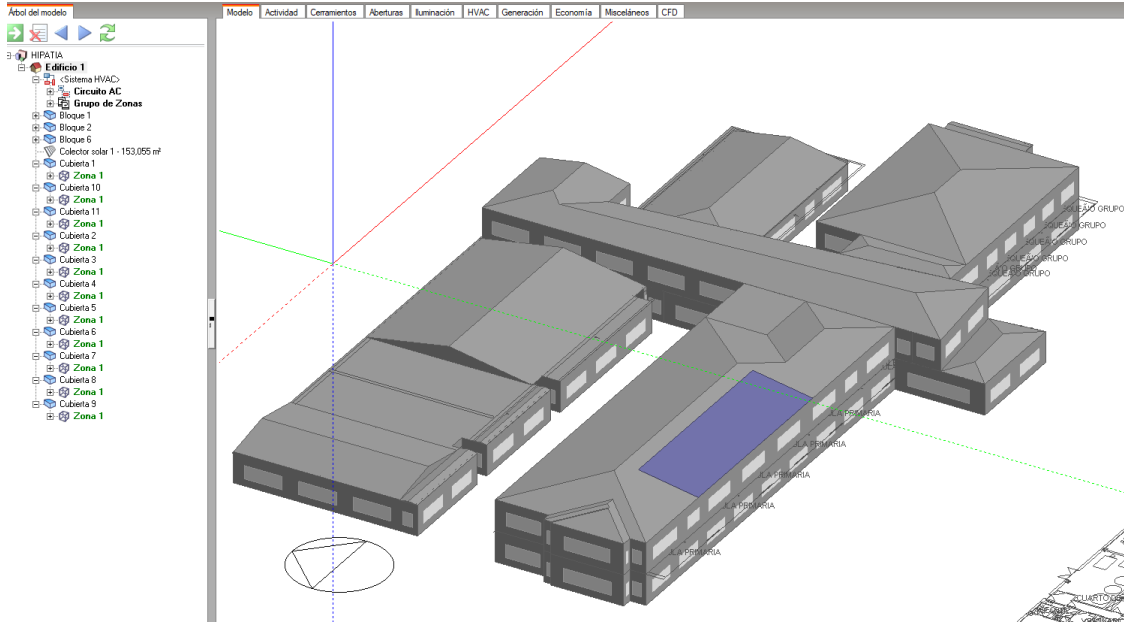


Figura 71. Edificio modelado con placa fotovoltaica.

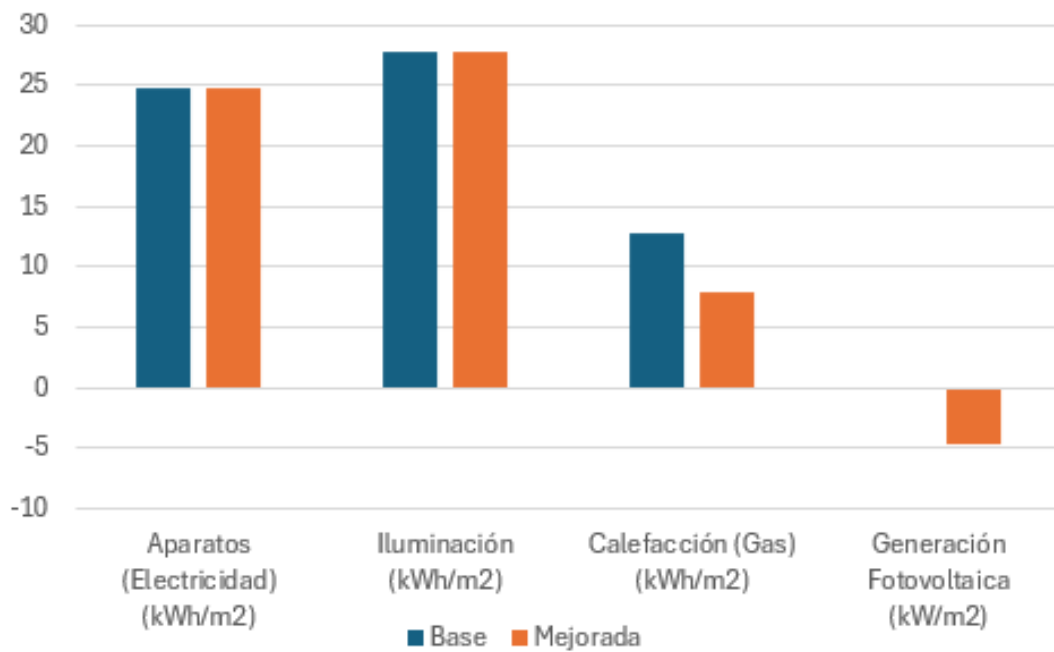


Figura 72. Gráfica consumos anuales y generación Hipatia.



Según los datos simulados, la instalación fotovoltaica aporta unos 4,735 kWh/m²·año (equivalentes a aproximadamente 34 017 kWh/año), lo que cubre cerca del 7,84 % de la demanda eléctrica total del edificio. Gracias a este autoconsumo solar y al apoyo a la bomba de calor, el consumo de calefacción sensible se reduce en un 38,4 %, pasando de 12,71 kWh/m² a 7,84 kWh/m².

Además de rebajar la factura energética, esta generación renovable contribuye a mejorar la calificación energética del inmueble, situándolo mucho más cerca de los estándares de los nZEB (Nearly Zero Energy Buildings), en línea con los objetivos europeos de descarbonización y eficiencia.

DEMANDA	Base	Mejorada
Acrisolamiento (kW)	-30,16	-30,23
Muros (kW)	-31,96	-32,19
Techos (kW)	-15,75	-11,83
Suelos Int. (kW)	15,76	11,84
Cubiertas (kW)	-60,69	-11,8
Infiltración Ext. (kW)	-98,29	-70,51
Calef. Sens. de Zona (kW)	222,69	146,28
CONSUMO	Base	Mejorada
Aparatos (Electricidad) (kWh/m2)	24,7441983	24,7441983
Iluminación (kWh/m2)	27,8377752	27,8377752
Calefacción (Gas) (kWh/m2)	12,714088	7,83577616
Generación Fotovoltaica (kW/m2)	0	-4,7353155

Figura 73. Tabla demanda y consumos Hipatia.



7. Conclusiones

El presente Trabajo Fin de Grado ha permitido diagnosticar, cuantificar y optimizar el comportamiento energético de cuatro centros educativos madrileños (Montserrat, Tres Olivos, Lourdes e Hipatia) partiendo de modelos dinámicos elaborados en DesignBuilder/EnergyPlus y avalados mediante la comparación con consumos reales de 2023. A continuación, se sintetizan los resultados y aportaciones más relevantes:

Con respecto a la situación de partida, los edificios presentaban un consumo global comprendido entre 75,24 kWh/m²*a (Lourdes) y 99,75 kWh/m²*a (Montserrat), dominado por iluminación y equipos ($\approx 55\%$) y por la calefacción a gas ($\approx 35\%$). Las simulaciones evidenciaron que las pérdidas por infiltración (0,7 ren/h) y la excesiva transmitancia de los acristalamientos, muros y cubiertas eran los focos principales de ineficiencia, elevando la demanda térmica en torno a un 10 – 13 % adicional.

Las tasas de ventilación natural (0,5 ren/h) no cumplían las exigencias del RITE (12,5 L s⁻¹·p), lo que suponía un riesgo potencial de calidad de aire interior pese a que los valores medios de CO₂ simulados se mantenían por debajo de 500 ppm. Para proponer soluciones a estos problemas, se implementaron modificaciones en los modelos que se dividieron en medidas pasivas y activas.

Como medidas activas, se realizaron las siguientes modificaciones:

- Aislamiento adicional en cubierta (+8 cm de XPS) y fachada (+6 cm SATE), reducción de la U de 0,58 \rightarrow 0,29 W m⁻² K.
- Hermeticidad mejorada (infiltración de 0,7 \rightarrow 0,3 ren/h) mediante sellado de juntas y carpinterías con RPT.
- Sustitución de vidrios por triple bajo-emisivo con cámara de argón.

Resultado global: demanda de calefacción -41 % (media 28 kWh/ m² a)



Adicional a esto, como medidas activas se tomaron las siguientes:

- Sustitución de las calderas de gas por bombas de calor aire-agua (COP = 3,8), manteniendo fan-coils existentes.
- Renovación de luminarias a LED + sensores de presencia y regulación (potencia 3,3–4,6 W m⁻²).
- Sistema fotovoltaico en con producción total de 4.74 kWh/m²* año en Hipatia, cubriendo el 7,84% % del consumo eléctrico total.

Mirando la parte económica, se han obtenido los siguientes datos:

- Inversión conjunta estimada: 532 k€ (aislamiento, carpinterías, VMC-RC, LEDs, FV, aerotermia).
- Ahorro anual (factura energética): 74 k€.
- Periodo simple de retorno: 7,2 años (sin subvenciones) y 5,4 años considerando las ayudas PIREP 2024.
- TIR a 20 años: 11 %.

Como podemos ver, la implementación de estas medidas no solo mejora la eficiencia, sino que también garantiza un retorno económico sólido en un plazo razonable, alineándose con los objetivos de sostenibilidad y ahorro a largo plazo.

El estudio demuestra que la combinación de intervenciones pasivas, activas y renovables puede transformar centros docentes de tipología convencional en instalaciones cercanas a consumo casi nulo, cumpliendo con los límites de consumo energético primario establecido en el CTE DB-HE, con ahorros energéticos superiores al 40 % y retornos económicos asumibles en el medio plazo. Además de la significativa mejora del confort térmico y de la calidad del aire interior, las medidas propuestas reducen la dependencia de combustibles fósiles y refuerzan la resiliencia de los edificios frente a escenarios climáticos futuros. Todo ello convierte la rehabilitación energética de colegios en una inversión estratégica no solo para la administración educativa, sino también para el cumplimiento de los compromisos climáticos nacionales y europeos con vista a los edificios nZEB y la descarbonización para el 2050.



8. Líneas futuras

Aunque el alcance del presente TFG cubre la diagnosis, simulación, validación y optimización energética de los cuatro centros analizados, han surgido múltiples cuestiones que merecen una exploración específica en trabajos posteriores.

El estudio ha justificado caudales normativos mediante VMC-RC, pero no ha optimizado la lógica de control, por lo que sería muy útil modelar una ventilación a demanda. Simular algoritmos basados en sensores de CO₂ y temperatura exterior (activando la recuperación solo cuando la calidad del aire lo requiera) podría reducir la energía ventiladora y la demanda térmica hasta un 10 %.

Otro apartado interesante sería la adaptación a escenarios de cambio climático. Emplear ficheros meteorológicos para 2030-2050-2080 permitiría analizar cómo evolucionan las necesidades de refrigeración y si las estrategias pasivas actuales mantienen su eficacia con veranos más cálidos.



9. Bibliografía

Comisión Europea. (2010). Directiva 2010/31/UE del Parlamento Europeo y del Consejo de 19 de mayo de 2010 sobre la eficiencia energética de los edificios (refundición). <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2010/31/oj>

Comisión Europea. (2023). Directiva (UE) 2023/2413 por la que se modifica la Directiva (EU) 2018/2001 (Energías renovables). https://energy.ec.europa.eu/topics/renewable-energy/renewable-energy-directive-targets-and-rules/renewable-energy-directive_en

EREC (European Renewable Energy Council). (2012). RE-thinking 2050: A 100 % Renewable Energy Vision for the European Union. https://warwick.ac.uk/fac/soc/pais/research/csgr/green/foresight/energyenvironment/2010_erec_rethinking_2050.pdf

IEA (International Energy Agency). (2021). Energy Efficiency 2021: Executive Summary. <https://www.iea.org/reports/energy-efficiency-2021>

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). (2023). AR6 Synthesis Report: Climate Change 2023. <https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-cycle/>

Parlamento Europeo. (2024, 12 marzo). EU Parliament approves law to make buildings more energy efficient. Reuters. <https://www.reuters.com/business/energy/eu-parliament-approves-law-make-buildings-more-energy-efficient-2024-03-12/>

World Green Building Council. (2024, 16 abril). World Green Building Council calls on EU policymakers to take decisive action on the built environment. <https://worldgbc.org/article/pr-ern-manifesto-launch/> Colegio Montserrat. (s. f.). *Contacto*. <https://colegiomontserrat.fuhem.es/contacto.html>

FUHEM. (s. f.). *Quiénes somos*. <https://www.fuhem.es/...>



Ministerio de Fomento. (2019). *CTE: tabla de zonas climáticas* [PDF].

<https://alcarsa.es/...>

Colegio Tres Olivos. (s. f.). *Contacto*. <https://colegiotresolivos.org/>

Fundación Dales la Palabra. (s. f.). *Quiénes somos*. <https://fptresolivos.es/sobre-nosotros/>

Wikipedia contributors. (2025, 3 de mayo). *Colegio Tres Olivos*. Wikipedia. https://es.wikipedia.org/wiki/Colegio_Tres_Olivos

Ayuntamiento de Madrid. (s. f.). *Colegio Lourdes* [Ficha de equipamiento]. <https://www.madrid.es/...>

Docomomo Ibérico. (s. f.). *Colegio Colonia Nuestra Señora de Lourdes*. <https://docomomoiberico.com/...>

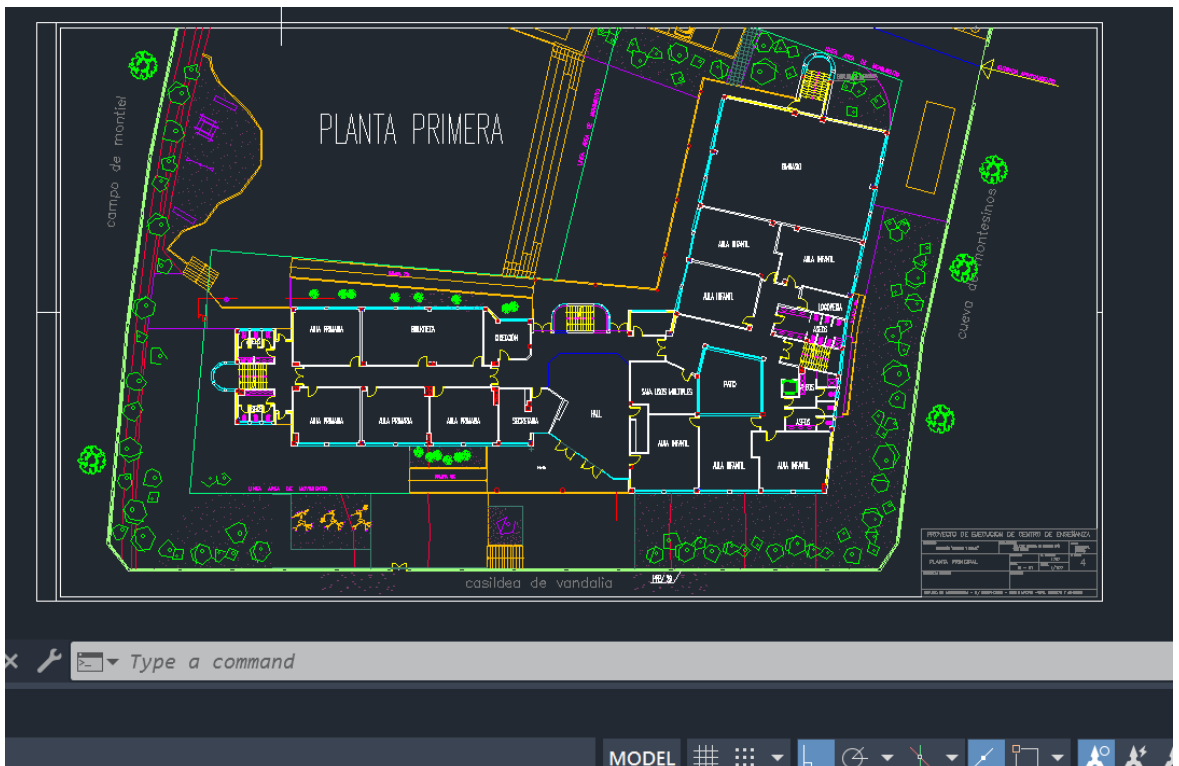
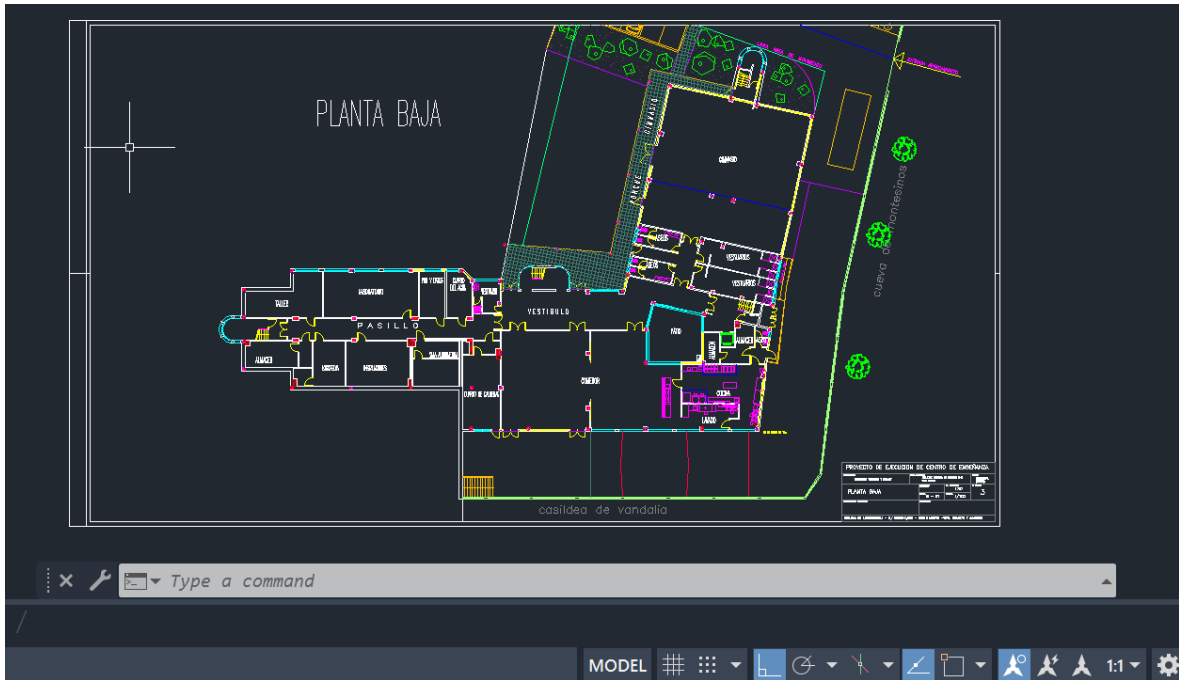
El País. (2024, 21 diciembre). *Los Círculos, el colegio utópico de Sáenz de Oiza...* <https://elpais.com/...>

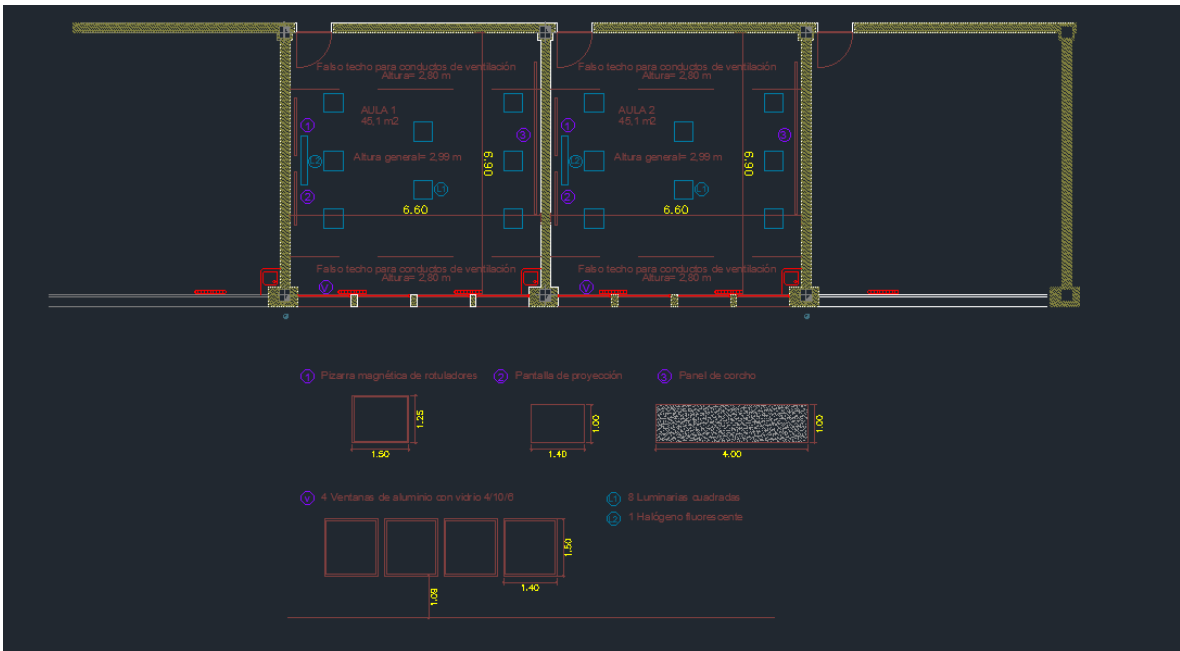
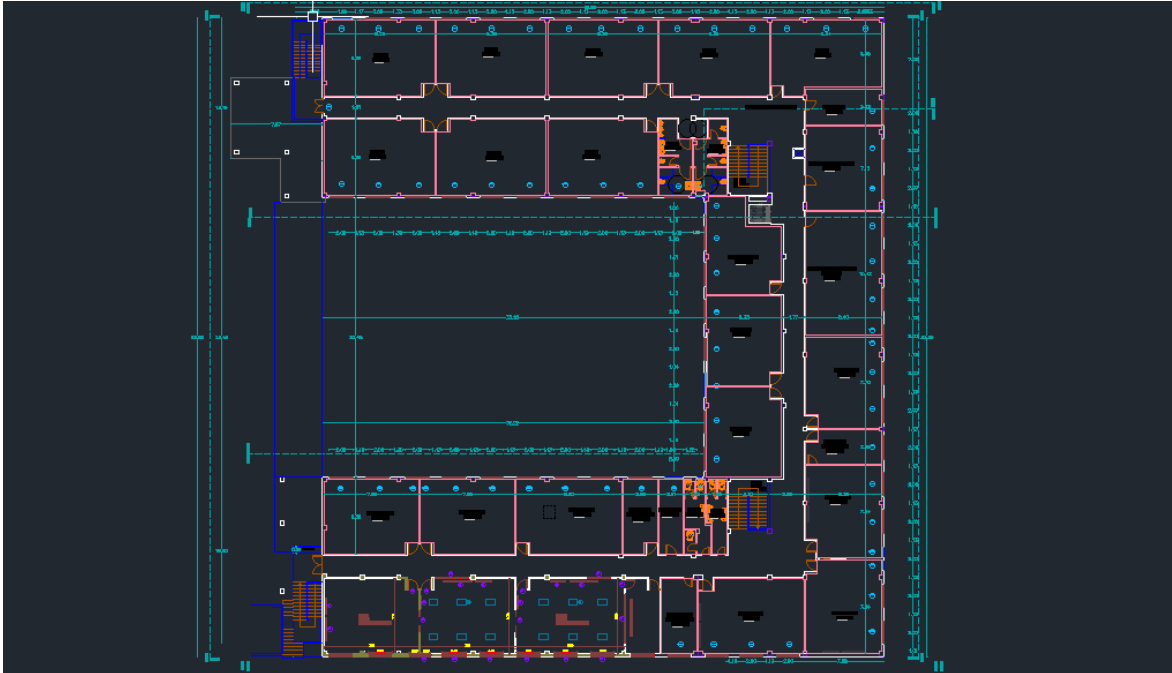
Colegio Hipatia. (s. f.). *Conócenos*. <https://colegiohipatia.fuhem.es>

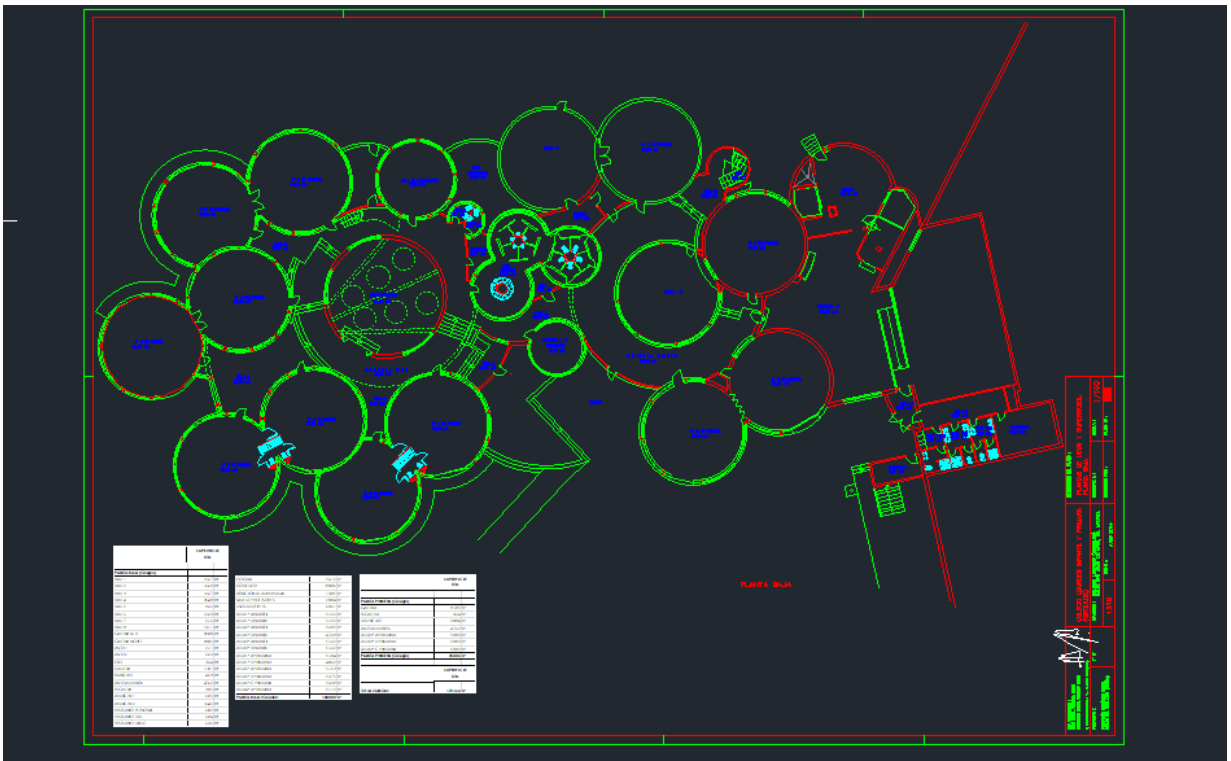
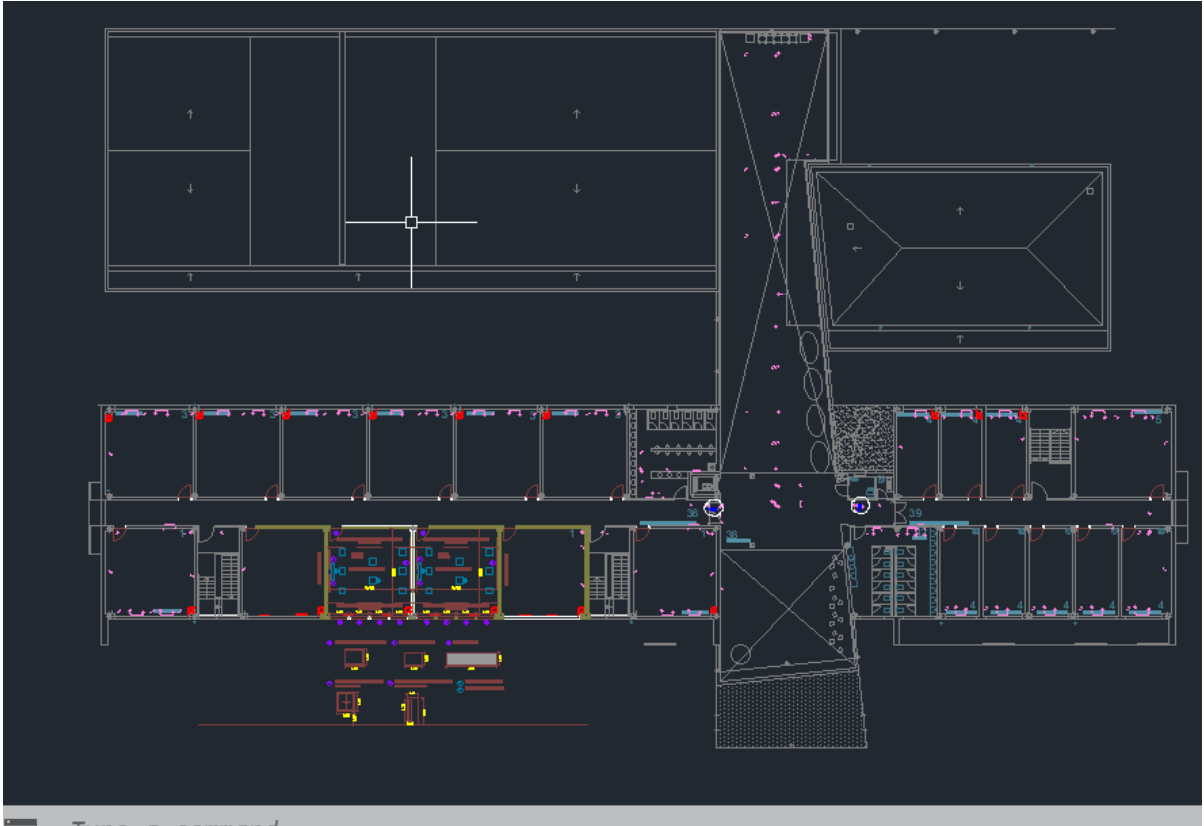
Ministerio de Fomento. (2019). *Documento Básico HE. Condiciones para el ahorro de energía* (Tablas de zonas climáticas). <https://www.codigotecnico.org>



10. Anexos





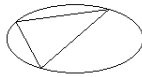
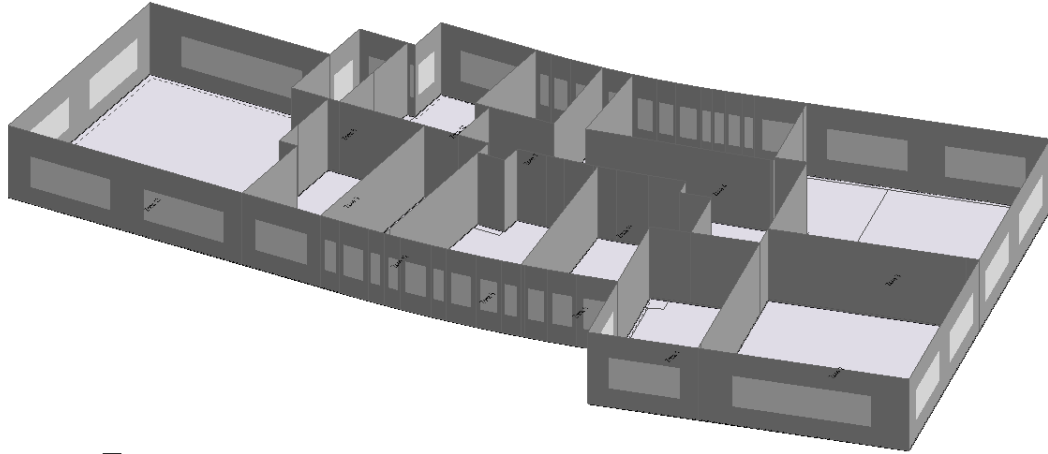
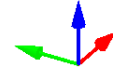




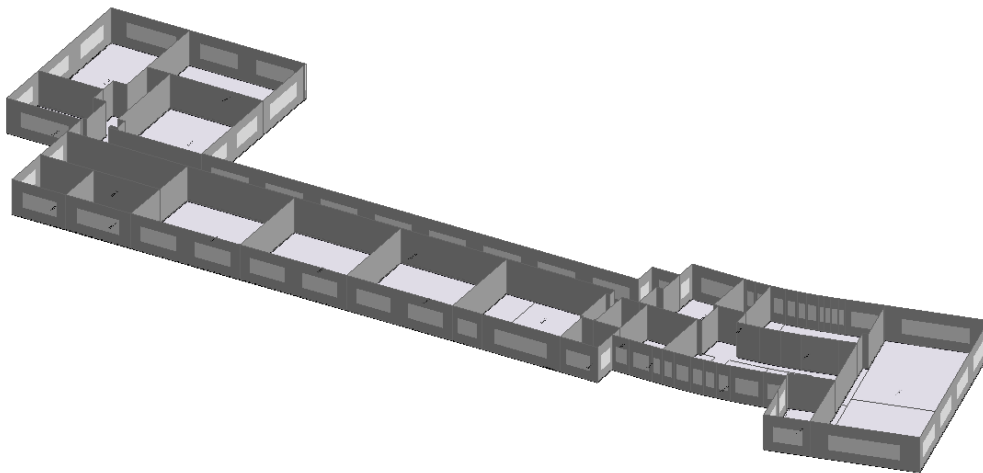
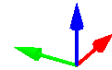
UNIVERSIDAD
DE MÁLAGA



Generic Office Area

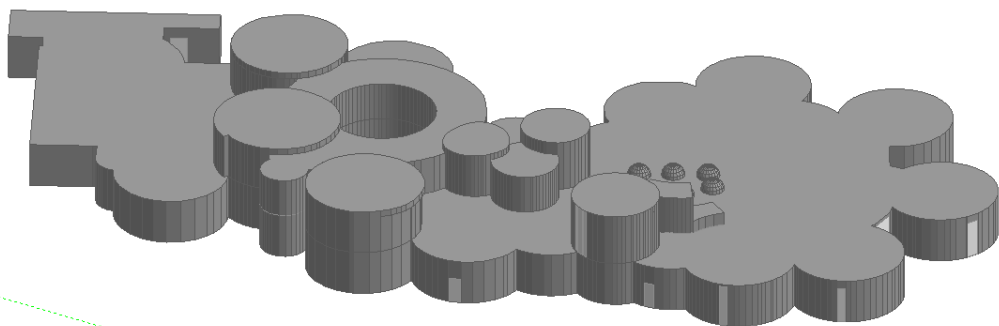
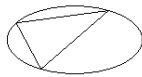
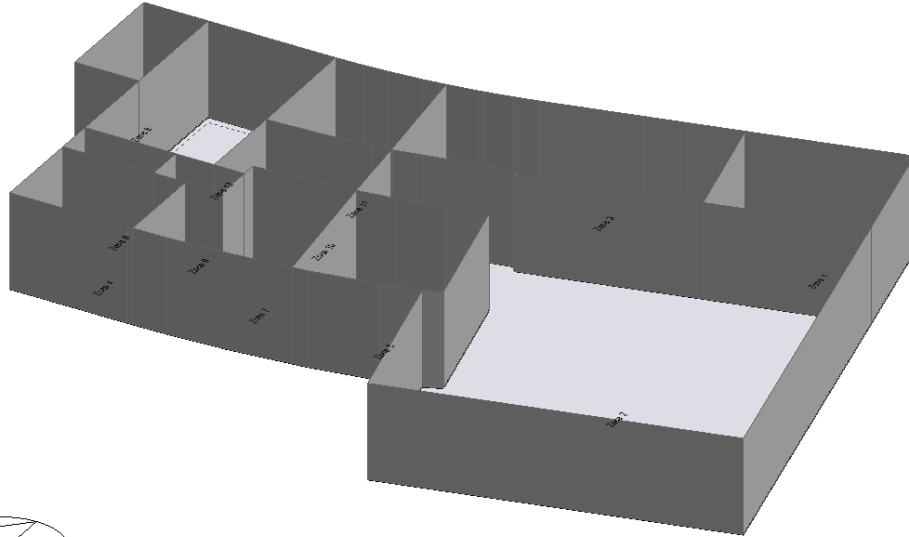
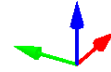


Generic Office Area



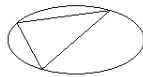
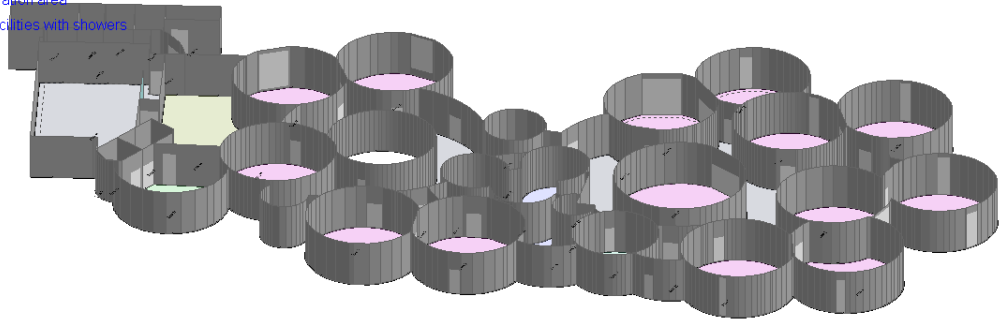
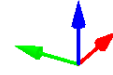


Generic Office Area

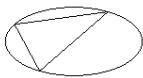
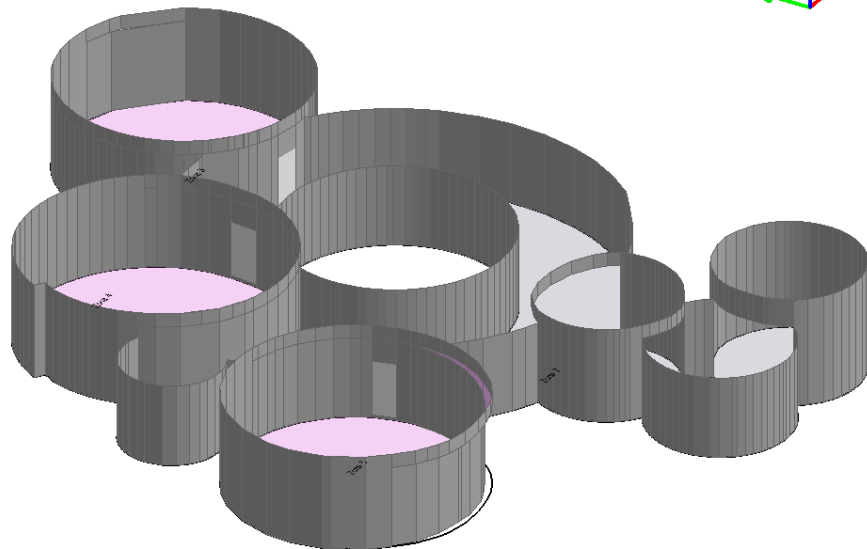
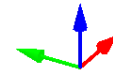


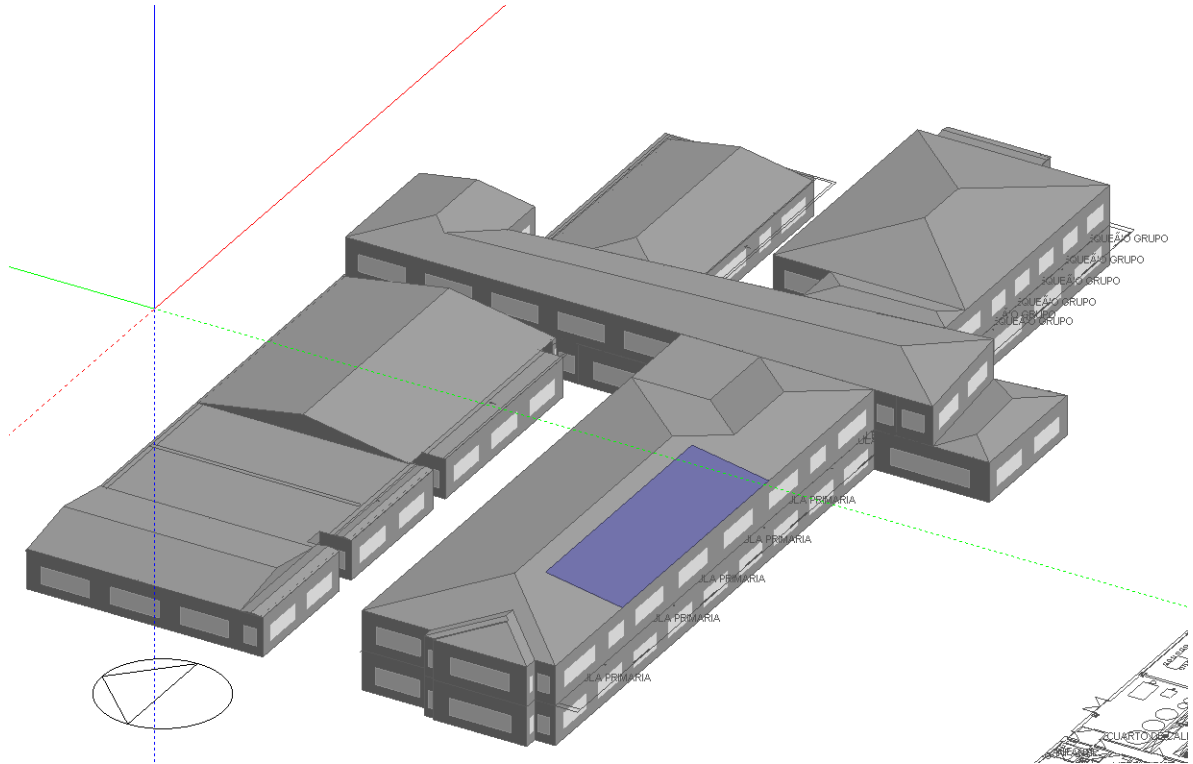


- Teaching Areas
- Circulation area (corridors and stairways)
- Hall/lecture theatre/assembly area
- Office and consulting areas
- Toilet
- Store Room
- Light plant room
- Eating/drinking area
- Food preparation area
- Changing facilities with showers

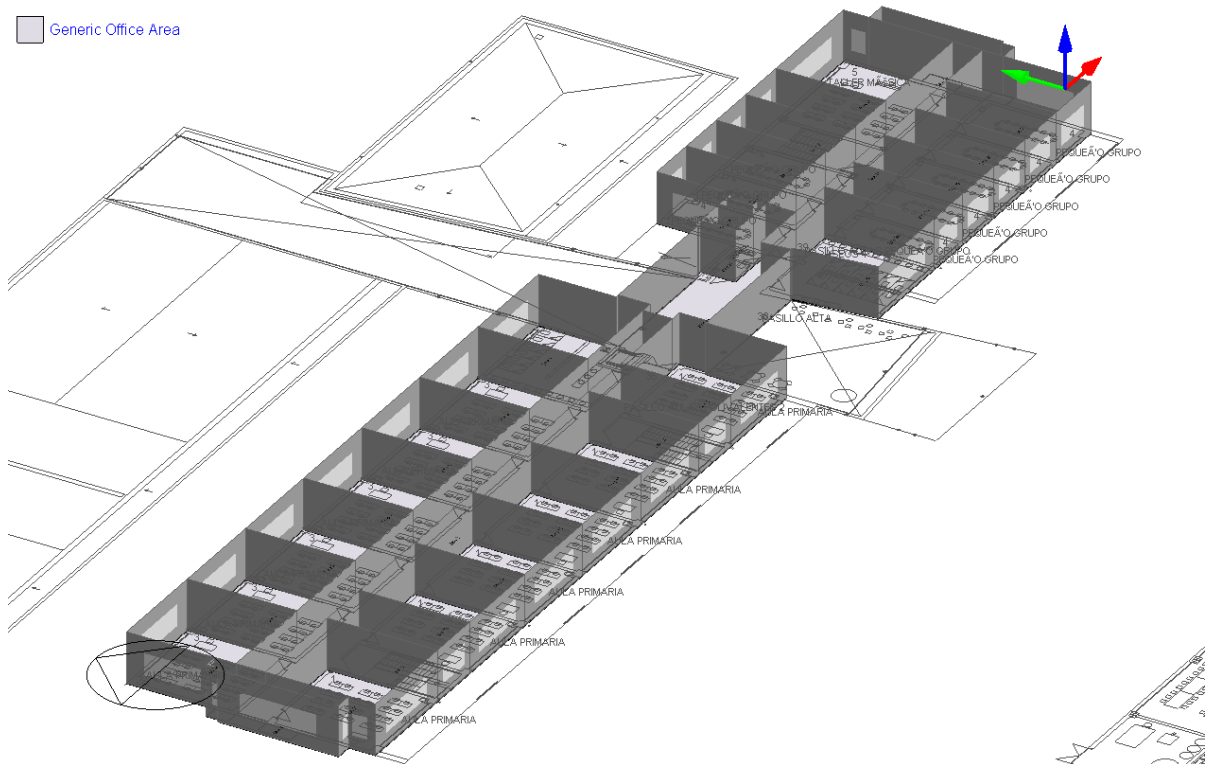


- Teaching Areas
- Circulation area (corridors and stairways)





Generic Office Area

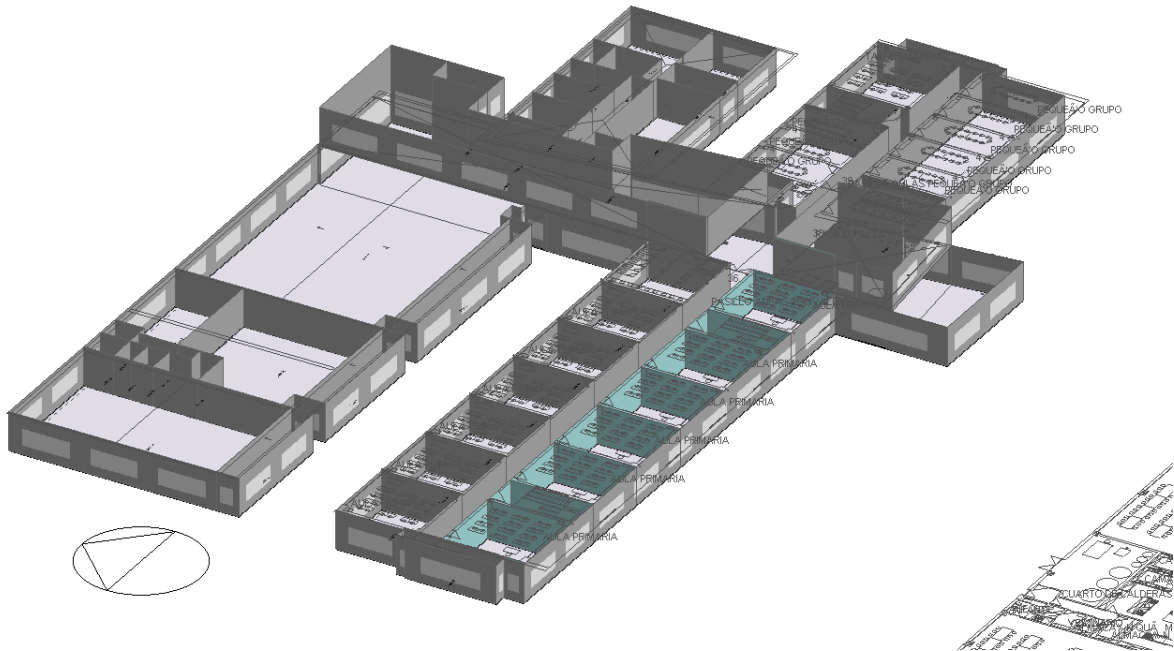
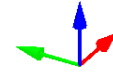




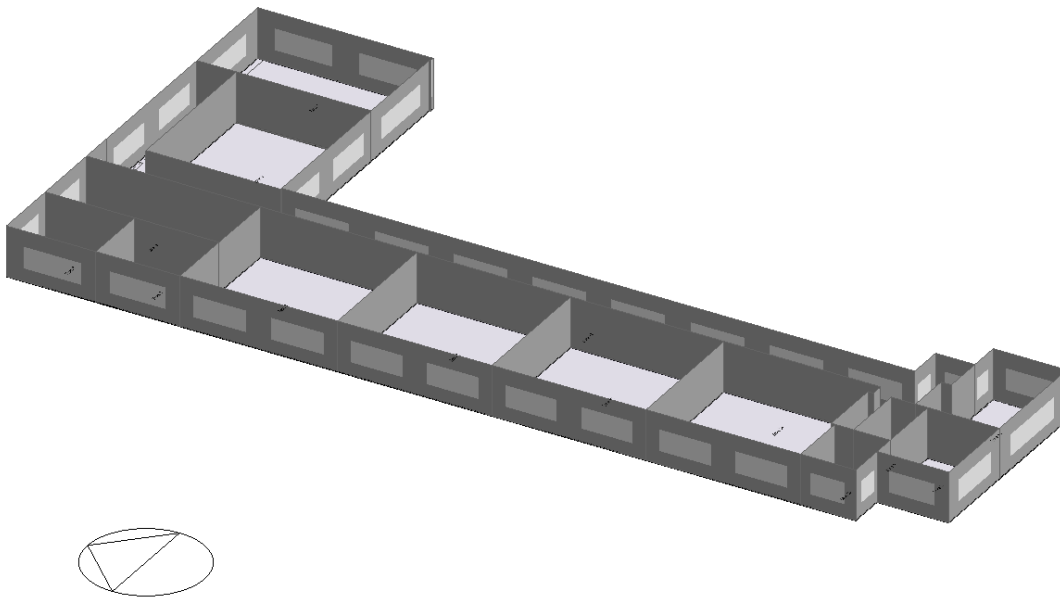
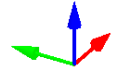
UNIVERSIDAD DE MÁLAGA

ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES

Generic Office Area



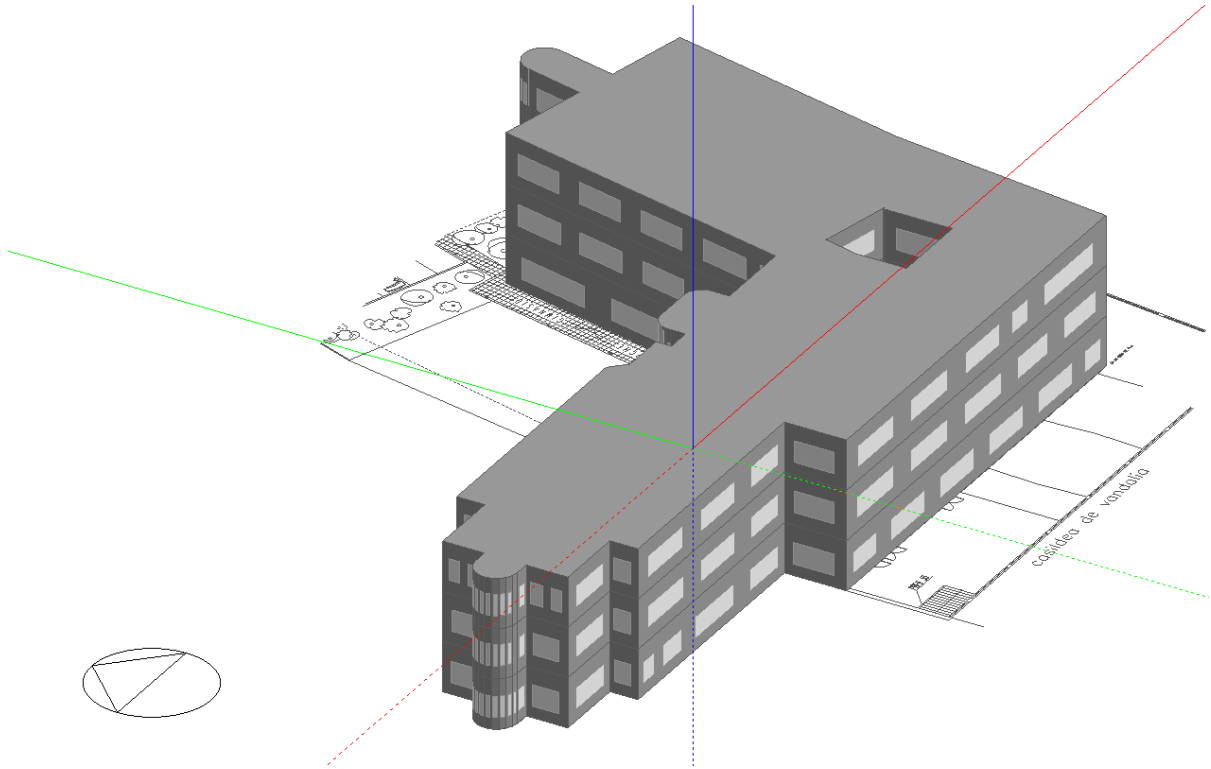
Generic Office Area



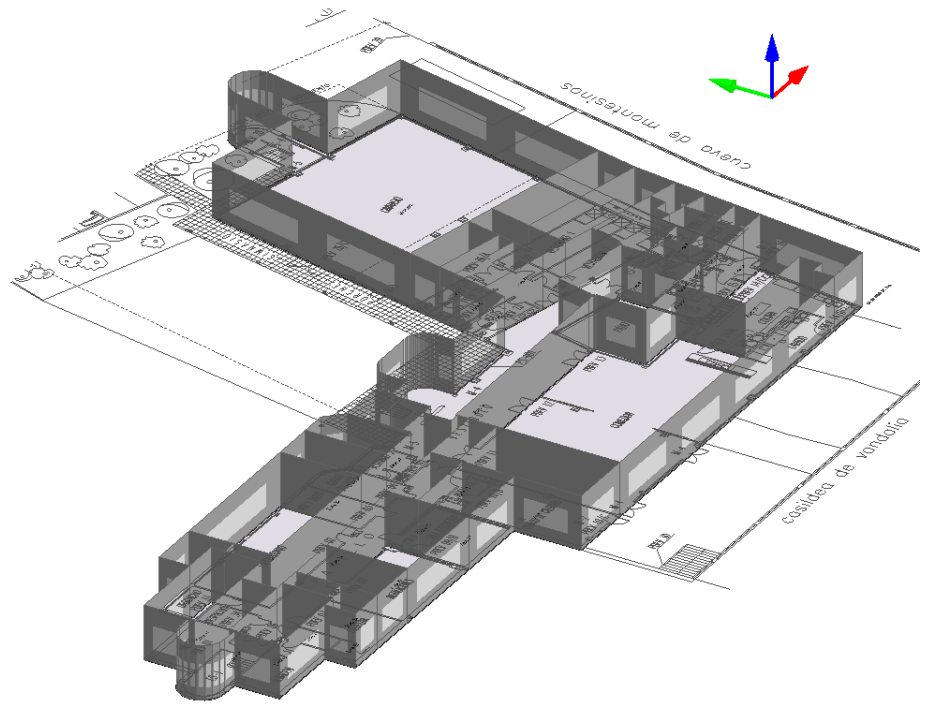


UNIVERSIDAD
DE MÁLAGA

E ESCUELA DE
INGENIERÍAS
INDUSTRIALES



Generic Office Area

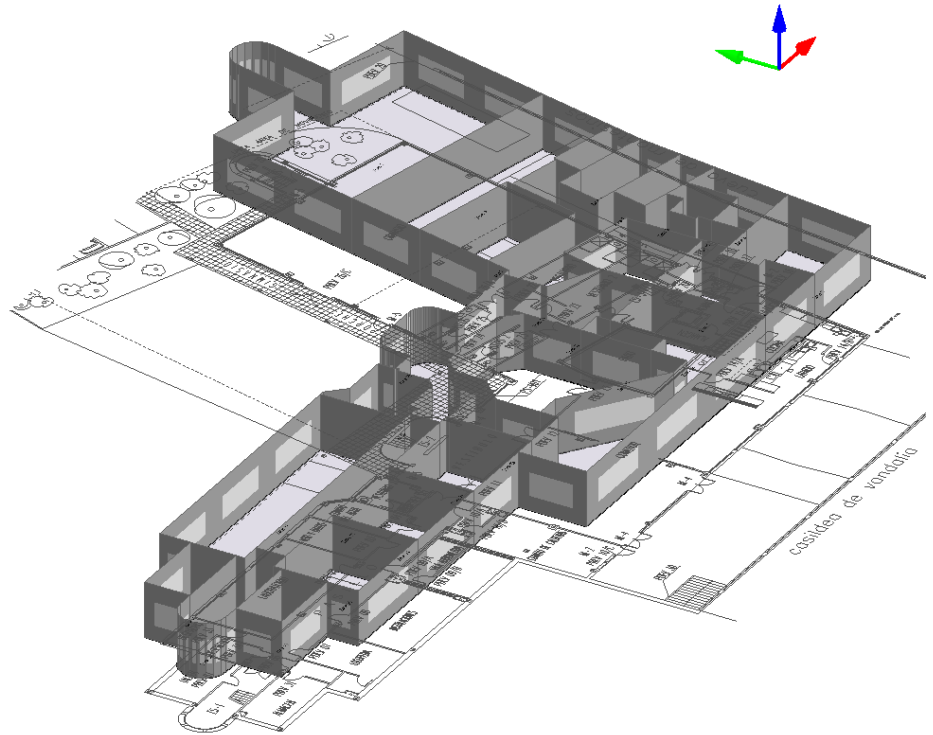




UNIVERSIDAD DE MÁLAGA

ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES

Generic Office Area



Generic Office Area

