



Instituto Politécnico
de Bragança
**Escola Superior
de Tecnologia
e Gestão**



Escola Politécnica de Enxeñaría de Ferrol

UNIVERSIDADE DA CORUÑA

Aplicación de metodología BIM para la rehabilitación energética y descarbonización del edificio CITENI de laboratorios de investigación y talleres en el campus de Ferrol

David Zapater Bes

Dissertação de Mestrado apresentado à Escola de Tecnologia e Gestão do
Instituto Politécnico de Bragança para obtenção do grau de mester em Energías
Renováveis e Eficiência Energética no âmbito da dupla diplomação com a
Universidade da Coruña

Orientado por: Dr Orlando Manuel de Castro Ferreira Soares

Dr Antonio Couce Casanova

JUNIO 2026

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, deseo expresar mi más sincero agradecimiento a los docentes de la Universidade da Coruña. Su labor académica y calidad humana han sido fundamentales para facilitar mi adaptación durante este año académico lejos de mi hogar, proporcionándome las herramientas y las capacidades resolutorias necesarias para afrontar con garantías mi futuro profesional.

Quiero realizar una mención especial a mis directores de este Trabajo de Fin de Master, Antonio Couce Casanova y Juan de Dios Rodríguez García. Su tutela, experiencia y constante apoyo no solo han sido determinantes para la culminación de este proyecto, sino que han servido para consolidar mi vocación técnica en el ámbito de la rehabilitación y la certificación energética.

Asimismo, hago extensiva mi gratitud a todas las personas que han formado parte de mi estancia de movilidad en Bragança. A mi coordinadora en el Instituto Politécnico de Bragança, Ângela Ferreira, y a mi tutor, Orlando Soares, por su excelente acogida y guía estos meses. De igual modo, a mis compañeros de Erasmus, quienes con su apoyo y amistad hicieron que los meses alejado de mi entorno habitual resultaran sumamente enriquecedores.

Finalmente, mi más profundo agradecimiento a mis padres, Antonio y Montse, y a mi hermano Diego, así como a mis amigos de la infancia. Su respaldo incondicional y aliento han sido el pilar fundamental durante toda mi etapa de formación en ingeniería.

Con la entrega de este Trabajo de Fin de Máster, concluyo un ciclo formativo de gran crecimiento personal, en el que he tenido el privilegio de profundizar en las disciplinas que definen mi pasión profesional.

RESUMEN

El presente Trabajo de Fin de Máster tiene como objetivo reducir los indicadores de calificación energética del edificio objeto de estudio, estos indicadores son el consumo de energía primaria no renovable y las emisiones de dióxido de carbono (CO₂) derivadas del funcionamiento de los sistemas del edificio. El edificio se trata del Centro de Investigación en Tecnologías Navales e Industriales (CITENI) de la Universidad de Coruña en el campus de Ferrol.

Para ello, se empleó una metodología BIM, realizando el modelo arquitectónico mediante Revit, un análisis térmico utilizando el motor de cálculo CYPETHERM LOADS y la certificación energética del edificio a través de CYPETHERM HE Plus. A partir de los resultados obtenidos, se definieron diferentes medidas de mejora, tanto pasivas como activas con la finalidad de disminuir los valores de los indicadores anteriormente mencionados.

Posteriormente, se realizó un análisis de viabilidad de las distintas actuaciones propuestas con el fin de seleccionar aquellas que mejor se adaptaban a los criterios técnicos, energéticos y económicos establecidos. Una vez implementadas las medidas seleccionadas en el modelo, se procedió a una nueva evaluación energética del edificio.

Los resultados obtenidos muestran una mejora significativa de su comportamiento energético, alcanzándose una calificación energética favorable y una reducción considerable tanto del consumo de energía primaria no renovable como de las emisiones de CO₂. De este modo, se pone de manifiesto el potencial de la rehabilitación energética como herramienta para avanzar hacia un modelo edificatorio más sostenible y alineado con los objetivos actuales de descarbonización y desarrollo sostenible.

RESUMO

O presente Trabalho de Fim de Mestrado tem como objetivo reduzir os indicadores de classificação energética do edifício objeto de estudo. Estes indicadores compreendem o consumo de energia primária não renovável e as emissões de dióxido de carbono (CO_2) derivadas do funcionamento dos sistemas do edifício. O edifício em questão é o Centro de Investigação em Tecnologias Navais e Industriais (CITENI) da Universidade da Coruña, no campus de Ferrol.

Para isso, empregou-se uma metodologia BIM, realizando o modelo arquitetónico através do Revit, uma análise térmica utilizando o motor de cálculo CYPETHERM LOADS e a certificação energética do edifício através do CYPETHERM HE Plus. A partir dos resultados obtidos, definiram-se diferentes medidas de melhoria, tanto passivas como ativas, com a finalidade de diminuir os valores dos indicadores anteriormente mencionados.

Posteriormente, realizou-se uma análise de viabilidade das diferentes atuações propostas com o fim de seleccionar aquelas que melhor se adaptavam aos critérios técnicos, energéticos e económicos estabelecidos. Uma vez implementadas as medidas seleccionadas no modelo, procedeu-se a uma nova avaliação energética do edifício.

Os resultados obtidos mostram uma melhoria significativa do seu comportamento energético, alcançando-se uma classificação energética favorável e uma redução considerável tanto do consumo de energia primária não renovável como das emissões de CO_2 . Deste modo, põe-se em evidência o potencial da reabilitação energética como ferramenta para avançar em direção a um modelo de edificado mais sustentável e alinhado com os objetivos atuais de descarbonização e desenvolvimento sustentável.

ABSTRACT

The objective of this Master's Thesis is to reduce the energy performance indicators of the building under study. These indicators comprise the consumption of non-renewable primary energy and the carbon dioxide (CO_2) emissions derived from the operation of the building's systems. The object of study is the Center for Research in Naval and Industrial Technologies (CITENI) of the University of A Coruña, located at the Ferrol campus.

To achieve this, a BIM methodology was employed, developing the architectural model using Revit, performing a thermal analysis through the CYPETHERM LOADS calculation engine, and conducting the energy certification of the building via CYPETHERM HE Plus. Based on the results obtained, various passive and active improvement measures were defined with the aim of decreasing the values of the aforementioned indicators.

Subsequently, a feasibility analysis of the different proposed interventions was carried out to select those that best adapted to the established technical, energy, and economic criteria. Once the selected measures were implemented in the model, a new energy evaluation of the building was conducted.

The results obtained show a significant improvement in its energy performance, achieving a favorable energy rating and a considerable reduction in both non-renewable primary energy consumption and CO_2 emissions. Thus, the potential of energy retrofitting is highlighted as a key tool to advance toward a more sustainable building model aligned with current decarbonization and sustainable development goals.

Índice

1	INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS	1
1.1	Introducción	1
1.2	Objetivos	1
1.2.1	Alcance.....	2
1.2.2	Contexto	2
1.2.3	Legislación	3
2	CASO DE ESTUDIO, MATERIALES Y MÉTODOS	4
2.1	Edificio objeto de estudio.....	4
2.1.1	Descripción general del inmueble	4
2.1.2	Localización y emplazamiento.....	5
2.2	Materiales	6
2.2.1	Planos del edificio	6
2.2.2	Pliego de condiciones técnicas	6
2.2.3	Documentación técnica de los sistemas de generación térmica.....	6
2.3	Metodología	6
2.3.1	Campanas de inspección In Situ (Auditoría del edificio)	6
2.3.2	Creación del modelo del edificio	7
3	MODELADO ENERGÉTICO Y PROPUESTAS DE MEJORAS	9
3.1	Descripción de la envolvente térmica	9
3.2	Descripción de las instalaciones	12
3.2.1	Caldera de Gasoil	12
3.2.2	Climatizadoras.....	12
3.2.3	Radiadores	13
3.2.4	Aerotermos	13
3.2.5	Rejillas de impulsión y de retorno.....	14
3.3	Cargas térmicas internas	14
3.3.1	Ocupación.....	14
3.3.2	Iluminación.....	14
3.4	Simulación energética en CYPETHERM HE Plus.....	15
3.4.1	Criterios de sectorización y delimitación de espacios.....	15
3.4.2	Configuración de perfiles de operación y demanda interna.....	16
3.4.3	Caracterización de los sistemas de generación térmica y ACS.....	17
3.4.4	Vinculación espacial y matriz de distribución de recintos.....	18
3.4.5	Parametrización de unidades terminales	20

3.5	Calificación energética en el estado inicial.....	22
3.6	Propuesta de mejoras.....	23
3.6.1	Actuaciones en la envolvente térmica.....	23
3.6.1.1	Aislamiento térmico de fachada por el interior.....	23
3.6.1.2	Aislamiento de fachada por el exterior (SATE)	24
3.6.1.3	Aislamiento de cubierta	24
3.6.1.4	Sustitución de ventanas y carpintería.....	25
3.6.2	Actuaciones en las instalaciones	26
3.6.2.1	Caldera de biomasa densificada (pellets).....	26
3.6.2.2	Aeroterminia aire-agua	27
3.6.2.3	Aeroterminia aire-aire VRF.....	28
3.6.2.4	Integración de planta de generación solar fotovoltaica.....	28
4	ESTUDIO DE VIABILIDAD Y DISEÑO FINAL.....	30
4.1	Estudio de viabilidad técnica	30
4.2	Estudio de viabilidad económica	30
4.2.1	Determinación del coste operativo del escenario inicial.....	30
4.2.2	Determinación de los indicadores económicos de las propuestas.....	31
4.2.2.1	Valor Actual Neto (VAN)	31
4.2.2.2	Tasa Interna de Retorno (TIR).....	31
4.2.2.3	Índice de rentabilidad (IR).....	31
4.2.2.4	Periodo de retorno de la inversión (PB).....	31
4.2.3	Selección de actuaciones viables.....	32
4.3	Diseño de la instalación de climatización	33
4.3.1	Predimensionado de los equipos	34
4.3.2	Agrupación de recintos.....	35
4.3.3	Selección de equipos	36
4.3.4	Comprobación y diseño en Open BIM BOSCH	40
4.3.4.1	Importación del modelo sincronizado.....	40
4.3.4.2	Inserción de equipos	41
4.3.4.3	Distribución de unidades terminales interiores.....	42
4.3.4.4	Asignación de cargas térmicas.....	43
4.3.4.5	Trazado de red frigorífica	43
4.3.4.6	Simulación y obtención de resultados	44
4.4	Diseño de la instalación de fotovoltaica (PVSyst).....	46
4.4.1	Restricciones geométricas de diseño.....	46
4.4.1.1	Inclinación de los módulos	46
4.4.1.2	Orientación y Azimut	47
4.4.1.3	Superficie útil de captación disponible.....	48
4.4.1.4	Distancia entre filas y análisis de sombras propias.....	48
4.4.2	Compatibilidad técnica y criterios de acoplamiento al inversor	49

4.4.3	Simulación de escenarios	51
4.4.3.1	Definición del patrón de sombras externas.....	52
4.4.3.2	Selección de la configuración óptima	54
4.4.4	Resultados de simulación	55
5	PRESUPUESTO Y FINANCIACIÓN.....	57
5.1	Presupuesto.....	57
5.2	Marco de financiación e incentivos	59
6	CONCLUSIONES.....	61
	BIBLIOGRAFÍA.....	62
	ANEXO I: PLANOS Y DETALLES CONSTRUCTIVOS	63
	ANEXO II: DOCUMENTACIÓN GRÁFICA DE VISITAS	75
	ANEXO III: GENERACIÓN DEL MODELO 3D.....	79
	Definición de la infraestructura niveles	79
	Integración de cartografía y plantillas de referencia	80
	Modelado de Elementos Constructivos y Envolvente	80
	Consolidación del modelo global	81
	Interoperabilidad y exportación a formato IFC.....	82
	ANEXO IV: INTEROPERABILIDAD ENTRE ENTORNOS.....	83
	Interoperabilidad Revit - CYPE	83
	Sincronización en la plataforma BIMserver.center.....	83
	Auditoría de datos y control de calidad del modelo.....	84
	Zonificación espacial.....	85
	ANEXO V: SIMULACIÓN DE CARGAS TÉRMICAS.....	86
	Diagnóstico e interoperabilidad del modelo importado	86
	Caracterización termo física de las soluciones constructivas	86
	Tratamiento automatizado de puentes térmicos lineales.....	87
	Parametrización climática del emplazamiento	88
	Selección del método de cálculo	89
	Zonificación térmica.....	89
	Balances y obtención de resultados de diseño	90
	ANEXO VI: COMPARACIÓN DE FABRICANTES	94
	ANEXO VII: CÁLCULOS ESTUDIO DE VIABILIDAD.....	95
	Costes operativos de las mejoras propuestas.....	95
	Análisis de sensibilidad financiera.....	96

Metodología y objeto del análisis de sensibilidad	96
Escenarios de volatilidad del mercado eléctrico	97
Escenarios de volatilidad del mercado del petróleo.....	99

Índice de figuras

Figura 1- Vista oblicua del edificio CITENI.....	4
Figura 2- Vista lateral del CITENI.....	5
Figura 3- Vista aérea del CITENI	5
Figura 4- Esquema del flujo de trabajo del proyecto.....	8
Figura 5- Esquema de composición de muro de fachada	9
Figura 6- Esquema de composición de muro de sótano	9
Figura 7- Esquema de composición de cubierta.....	10
Figura 8- Esquema de composición de solera	10
Figura 9- Esquema de composición de forjado de terraza.....	10
Figura 10- Esquema de composición carpintería exterior	11
Figura 11- Caldera de gasoil del fabricante Baxi-Roca modelo NTD-260	12
Figura 12- Tipo de radiador de la instalación del CITENI.....	13
Figura 13- Tipo de aerotermo de la instalación del CITENI.....	13
Figura 14- Tipo de rejilla de impulsión de la instalación del CITENI.....	14
Figura 15- Creación de zonas térmicas del edificio	16
Figura 16- Parametrización de la caldera de gasoil.....	17
Figura 17- Parametrización de las climatizadoras.....	17
Figura 18- Parametrización del sistema de producción de ACS	18
Figura 19- Sectorización térmica del edificio.....	18
Figura 20- Definición de aerotermos.....	20
Figura 21- Definición de radiadores.....	20
Figura 22- Definición de terminales de impulsión	21
Figura 23- Calificación energética del edificio en el estado inicial	22
Figura 24- Calificación energética tras añadir únicamente aislamiento térmico por el interior	23
Figura 25- Calificación energética tras añadir únicamente aislamiento térmico por el exterior.....	24
Figura 26- Calificación energética tras añadir únicamente aislamiento de cubierta.	25
Figura 27- Calificación energética tras sustituir únicamente ventanas y carpintería. ...	26

Figura 28- Calificación energética tras instalar únicamente caldera de biomasa.....	27
Figura 29- Calificación energética tras instalar únicamente aerotermia aire-agua	27
Figura 30- Calificación energética tras instalar únicamente el sistema VRF.....	28
Figura 31- Calificación energética tras instalar únicamente módulos fotovoltaicos.....	29
Figura 32- Unidad exterior VRF	38
Figura 33- Unidad interior.....	39
Figura 34- Rejilla de impulsión	39
Figura 35- Rejilla de retorno	40
Figura 36- Importación del modelo arquitectónico y de cargas térmicas.....	40
Figura 37- Modelo arquitectónico importado.....	41
Figura 38- Ubicación de la unidad exterior.	41
Figura 39- Disposición en planta de unidades interiores.....	42
Figura 40- Diseño de conductos y elementos de difusión	42
Figura 41- Asignación de cargas térmicas.....	43
Figura 42- Trazado de las líneas frigoríficas	44
Figura 43- Diseño de la instalación de climatización.....	46
Figura 44- Soporte inclinado de módulos fotovoltaicos.....	47
Figura 45- Azimut del edificio CITENI.	47
Figura 46- Superficie disponible de instalación de módulos fotovoltaicos.....	48
Figura 47- Datos de altura y azimut solar para el CITENI.....	48
Figura 48- Expresión de cálculo de distancia entre filas	49
Figura 49- Módulo fotovoltaico AIKO Solar 685	51
Figura 50- Inversor trifásico HUAWEI SUN2000 20TKL M5	51
Figura 51- Proyección de sombras para el día 21 de diciembre a las 13.15h.....	53
Figura 52- Gráfico de pérdidas por sombreado para el día 21 de Diciembre.....	53
Figura 53- Diagrama iso-sombreado de la instalación	55
Figura 54- Informe de producción de la instalación.....	55
Figura 55- Calificación energética del conjunto final	56
Figura 56- Plano de Semisótano	63
Figura 57- Plano de planta baja	64

Figura 58- Plano de planta primera	65
Figura 59- Plano de planta segunda.....	66
Figura 60- Plano de planta tercera.....	67
Figura 61- Plano de planta tercera.....	68
Figura 62- Alzados principales.....	69
Figura 63- Alzados laterales	70
Figura 64- Secciones	71
Figura 65- Soluciones constructivas.....	72
Figura 66- Detalles de carpintería	73
Figura 67- Detalle constructivo	74
Figura 68- Vista exterior oblicua sureste del CITENI.....	75
Figura 69- Vista exterior oblicua noreste del CITENI	75
Figura 70- Vista detalle oblicua de la entrada principal del CITENI.....	76
Figura 71- Sala de Calderas.....	76
Figura 72- Justificante revisión diciembre 2025 caldera de gasóleo.....	77
Figura 73- Aerotermo de pared en canal de ensayos de planta semisótano.	77
Figura 74- Aerotermo de pared en taller de planta baja	78
Figura 75- Radiador en vestíbulo general en planta baja	78
Figura 76- Introducción de niveles.....	79
Figura 77- Vinculación de las plantillas .dwg	80
Figura 78- Introducción de los elementos constructivos sobre la plantilla	80
Figura 79- Resultado de la construcción de los diferentes elementos.....	81
Figura 80- Modelo tridimensional final del edificio	81
Figura 81- Importación del archivo IFC.....	82
Figura 82- Creación de un proyecto en BIMserver.center	83
Figura 83- Importación del archivo IFC generado en Revit.....	84
Figura 84- Modelo tridimensional importado correctamente.....	84
Figura 85- Generación de los recintos del edificio.....	85
Figura 86- Definición de los diferentes tipos de recintos y las condiciones de diseño ..	86
Figura 87- Definición de las características de los elementos constructivos	87

Figura 88- Procesamiento de aristas en puentes térmicos	87
Figura 89- Selección del emplazamiento del proyecto.....	88
Figura 90- Parámetros climáticos para la localidad de Ferrol	88
Figura 91- Valores de cálculo según norma UNE-EN 12831	89
Figura 92- Zonificación térmica del edificio	89
Figura 93- Representación del VAN frente a la variación de la tarifa eléctrica.....	97
Figura 94- Representación del TIR frente a la variación de la tarifa eléctrica.....	98
Figura 95- Representación del IR frente a la variación de la tarifa eléctrica	98
Figura 96- Representación del VAN frente a la variación del petróleo	99
Figura 97- Representación del TIR frente a la variación del petróleo.....	100
Figura 98- Representación del IR frente a la variación del petróleo	100

Índice de tablas

Tabla 1- Distribución de superficies por plantas	4
Tabla 2- Transmitancia térmica de los cerramientos exteriores	11
Tabla 3- Especificaciones de radiadores del edificio	13
Tabla 4- Perfiles de ocupación de zonas habitables del CITENI	14
Tabla 5- Perfiles de ocupación de zonas habitables del CITENI	15
Tabla 6- Perfiles de uso de zonas climatizables	16
Tabla 7- Distribución de recintos en las diferentes zonas térmicas.....	19
Tabla 8-Tabla resumen de los indicadores para las diferentes medidas de mejora.	29
Tabla 9- Coste operativo anual del edificio en el estado actual	30
Tabla 10- Tabla resumen análisis económico de las distintas propuestas de mejora	31
Tabla 11- Análisis económico tras la ejecución del conjunto de medidas seleccionado.	32
Tabla 12- Agrupación de recintos.	36
Tabla 13- Especificaciones de las unidades interiores.	37
Tabla 14- Especificaciones de las rejillas de impulsión y de retorno.....	37
Tabla 15- Especificaciones de la unidad exterior.	37
Tabla 16- Tabla resumen de equipos de la instalación de climatización.....	38
Tabla 17- Comprobaciones de diseño	44
Tabla 18- Componentes del sistema de climatización.....	45
Tabla 19- Distancia entre filas para los diferentes escenarios.....	49
Tabla 20- Parámetros de los equipos de la instalación fotovoltaica.....	52
Tabla 21- Resultados de simulación para los cuatro escenarios planteados.....	54
Tabla 22- Especificaciones de los módulos fotovoltaicos.....	54
Tabla 23- Especificaciones del inversor.....	54
Tabla 24. Tabla resumen de equipos en la instalación fotovoltaica.	54
Tabla 25- Presupuesto del conjunto de medidas de mejora	58
Tabla 26- Carga de refrigeración máxima simultánea en talleres y laboratorios	90
Tabla 27- Carga térmica de diseño de calefacción en talleres y laboratorios.....	90
Tabla 28- Carga de refrigeración máxima simultánea en aulas y zonas comunes	91
Tabla 29- Carga térmica de diseño de calefacción en aulas y zonas comunes.....	92

Tabla 30- Carga de refrigeración máxima simultánea en despachos y oficinas.....	92
Tabla 31- Carga térmica de diseño de calefacción en despachos y oficinas.	93
Tabla 32- Resultados para diferentes fabricantes aislamiento de fachada interior	94
Tabla 33- Resultados para diferentes fabricantes aislamiento de fachada exterior.....	94
Tabla 34- Resultados para diferentes fabricantes aislamiento de cubierta.....	94
Tabla 35- Resultados para diferentes fabricantes vidrios y carpintería.....	94
Tabla 36- Resultados para diferentes fabricantes calderas de biomasa.....	94
Tabla 37- Resultados para diferentes fabricantes aerotermia aire-agua	94
Tabla 38- Resultados para diferentes fabricantes aerotermia aire-aire VRF.....	94
Tabla 39- Resultados para diferentes fabricantes módulos fotovoltaicos	94
Tabla 40- Coste operativo anual en el estado actual.	95
Tabla 41- Coste operativo anual tras aplicar aislamiento de fachada por el interior.....	95
Tabla 42- Coste operativo anual tras aplicar aislamiento de fachada por el exterior.	95
Tabla 43- Coste operativo anual tras aplicar aislamiento de cubierta.	95
Tabla 44- Coste operativo anual tras aplicar sustitución de vidrios y carpintería.	95
Tabla 45- Coste operativo anual tras aplicar sustitución de caldera de biomasa.	96
Tabla 46- Coste operativo anual tras aplicar sustitución por aerotermia aire-agua.....	96
Tabla 47- Coste operativo anual tras aplicar sustitución por aerotermia aire-aire VRF.	96
Tabla 48- Coste operativo anual tras aplicar instalación fotovoltaica.	96
Tabla 49- Indicadores del análisis de sensibilidad a la tarifa eléctrica.....	97
Tabla 50- Indicadores del análisis de sensibilidad al precio del gasoil	99

Índice de siglas y acrónimos

CITENI: Centro de Investigación en Tecnologías Navales e Industriales

CO₂: Dióxido de carbono

EPEF: Escola Politécnica de Enxeñaría de Ferrol

BIM: Building Information Modeling

IFC: Industry Foundation Classes

MITECO: Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico

ACS: Agua Caliente Sanitaria

PB: Payback (periodo de retorno)

GEI: Gases de Efecto Invernadero

ODS: Objetivos de Desarrollo Sostenible

ONU: Organización de Naciones Unidas

CIT: Centro de Investigaciones Técnicas

UTA: Unidad de tratamiento de aire

VRF: Caudal de refrigerante variable

SCOP: Coeficiente de rendimiento estacional global

ASHRAE: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers

PIREP: Programa de Impulso a la Rehabilitación de Edificios Públicos

1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1 Introducción

El presente Trabajo de Fin de Máster tiene por objeto reducir el valor de los indicadores de calificación energética, emisiones de CO₂ y consumo de energía primaria no renovable del Centro de Investigación en Tecnologías Navales e Industriales (en adelante, CITENI) perteneciente la Universidad de la Coruña en el campus de Ferrol y obtener una calificación energética mediante el software CYPETHERM HE PLUS. EL desarrollo de este trabajo contempla el diseño, propuesta y evaluación de diversas medidas de mejora orientadas a la mitigación del consumo de energía primaria no renovable y de las emisiones de CO₂ contribuyendo a una mayor sostenibilidad ambiental.

La dirección académica del proyecto ha sido coordinada de forma conjunta por el Dr. Antonio Couce Casanova y el Dr. Juan de Diós Rodríguez García, en calidad de tutores por parte de la Universidad de Coruña, y por el Dr. Orlando Soares, como tutor por parte del Instituto Politécnico de Bragança.

Como meta fundamental se plantea la auditoría y certificación del edificio CITENI adscrito a la Escuela Politécnica de Ingeniería de Ferrol (EPEF) con el propósito de obtener una calificación energética de etiqueta verde (categoría A, B o C). Dichos propósitos se fundamentan en un análisis comparativo riguroso entre el estado de referencia del edificio y el escenario final derivado de la aplicación de las actuaciones seleccionadas.

Para la parametrización del modelo geométrico-constructivo, el análisis de la demanda térmica y la determinación de la eficiencia energética se ha utilizado un flujo de trabajo BIM (Building Information Modeling) basado en las herramientas Autodesk Revit, IFC Builder, CYPETHERM LOADS, Open Bim BOSCH y CYPETHERM HE Plus. Cabe destacar que esta última constituye un documento reconocido oficialmente por el Ministerio Para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO) para la certificación de eficiencia energética de edificios existentes en España.

1.2 Objetivos

El objetivo general de la investigación consiste en emitir la certificación energética del edificio CITENI mediante el motor de cálculo CYPETHERM HE PLUS, fundamentada en la integración de un conjunto de estrategias de mejora pasivas (envolvente térmica) y activas (sistemas e instalaciones térmicas).

Para la consecución de dicho fin, se estructuran los siguientes objetivos específicos:

- Caracterización analítica del estado actual de los cerramientos constructivos, puentes térmicos e instalaciones de climatización y producción de agua caliente sanitaria (ACS).
- Formulación de escenarios de intervención técnica orientados a la reducción de las emisiones de CO₂ y a la optimización del comportamiento energético del edificio
- Evaluación de la viabilidad técnica, periodo de retorno de la inversión (PB) y el impacto ambiental de las soluciones propuestas.
- Obtención del certificado energético del escenario óptimo del edificio tras la implementación de las actuaciones seleccionadas.

1.2.1 Alcance

El alcance del proyecto comprende el diagnóstico energético integral del edificio objeto de estudio. La investigación se acota a la identificación de las principales patologías de transferencia térmica e ineficiencias de los sistemas activos, la modelización de soluciones técnicas viables bajo estándares normativos actuales y la modelización de su impacto económico y ambiental. El resultado final proveerá una propuesta de rehabilitación energética fundamentada en criterios de sostenibilidad.

1.2.2 Contexto

La escalada de la demanda energética a nivel mundial y la necesidad de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) son factores que impulsan la adopción de políticas enfocadas en la eficiencia energética y el uso de fuentes de energías renovables. En este contexto, la rehabilitación energética del edificio representa una de las líneas estratégicas para alcanzar los objetivos de sostenibilidad marcados a nivel internacional.

En particular, este proyecto se enmarca en los principios establecidos en la Agenda 2030 para el desarrollo sostenible, adoptada por todos los Estados miembros de la Organización de Naciones Unidas (ONU) en el año 2015. Dicha agenda propone una hoja de ruta para abordar los principales desafíos globales.

Este trabajo se alinea con los siguientes Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS):

- Mejorar la eficiencia energética en edificios existentes.
- Reducir el impacto ambiental negativo.
- Lograr una gestión sostenible y eficiente usando recursos naturales.

1.2.3 Legislación

Con el fin de contextualizar la evolución de las exigencias técnicas, se expone un marco cronológico de las normativas de ámbito estatal y europeo reguladoras de la eficiencia energética en la edificación:

- 1979: NBE-CT-79: Norma Básica de Edificación sobre Condiciones Térmicas. Fue la primera normativa en España sobre exigencias mínimas para el aislamiento de las viviendas.
- 1980: RICCA: Reglamento de Instalaciones de Calefacción, Climatización y ACS. Primera normativa que regula las instalaciones térmicas en edificios.
- 1993: Directiva 93/76/CEE: Referida a la limitación de emisiones de dióxido de carbono mediante la mejora de la eficiencia energética.
- 1998: RITE: Reglamento de Instalaciones Térmicas en Edificios que derogó al RICCA.
- 2002: Directiva 2002/91/CE: Su objetivo es fomentar la eficiencia energética con el fin de reducir las emisiones de CO₂. En nuestro país se aplica mediante el CTE-DB-HE de 2006 y el RITE de 2007.
- 2006: CTE: Código Técnico Edificación. Dentro de este documento en el apartado DB-HE relativo al ahorro de energía quedan definidos los criterios y condiciones mínimas de ahorro de energía en edificios de nueva construcción.
- 2007: RD 1027/2007 RITE: Deroga el documento de 1998.
- 2010: Directiva 2010/31/UE: Su objetivo es fomentar la eficiencia energética en edificios, teniendo en cuenta los datos climáticos locales y las exigencias ambientales interiores.
- 2012: Directiva 2012/27/UE: Tiene como fin crear un marco común entorno a la eficiencia energética en edificios y establece un compromiso de aumentar un 20% la eficiencia energética y reducir un 20% las emisiones de CO₂ para el 2020.
- 2013: RD 235/2013: Certificación energética de edificios. Se adapta a la Directiva Europea 2010/31/UE. Establece la obligatoriedad a partir del 1 de Junio de 2013 de poseer un certificado energético para alquilar o vender todo tipo de edificios.
- 2022: RD 450/2022: Introduce en el CTE-DB-HE el apartado 6 que establece requisitos mínimos para la infraestructura de recarga de vehículos eléctricos nuevos y existentes.
- 2023: RD 36/2023: Creación del sistema de Certificados de Ahorro Energético (CAE) que permite acreditar y comercializar ahorros energéticos obtenidos mediante actuación de eficiencia energética.
- 2024: Orden TED/845/2023: Se aprueba y actualiza el Catálogo de Medidas Estandarizadas de Eficiencia Energética, que facilita la implementación y seguimiento de medidas de ahorro energético.

El análisis energético descriptivo y de diagnóstico de este proyecto se ha desarrollado en observancia de las especificaciones del CTE 2006 (DB-HE) y las directrices de la orden TED/845/2023 que actualiza el catálogo de medidas estandarizadas de eficiencia energética.

2 CASO DE ESTUDIO, MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Edificio objeto de estudio

2.1.1 Descripción general del inmueble

El edificio consta de cinco plantas y un bajo cubierta que albergan espacios de tipología diversa: talleres de gran escala, laboratorios de investigación, despachos departamentales y un canal de ensayos hidrodinámicos. La superficie útil del edificio es de 2774,45 m² mientras que la superficie habitable es de 2104,11 m². Esta diferencia reside en los espacios no habitables que no serán contabilizados en el análisis energético. La distribución de área por plantas se recoge en la *Tabla 1*.

Tabla 1- Distribución de superficies por plantas. Fuente: Elaboración propia.

Planta	Superficie útil (m2)	Superficie habitable (m2)
Semisotano	700,15	596,94
Baja	459,76	432,91
Primera	222,04	204,37
Segunda	459,93	424,14
Tercera	463,42	445,75
Bajo Cubierta	469,15	0
TOTAL	2774,45	2104,11



Figura 1- Vista oblicua del edificio CITENI. Fuente: Documentación técnica del edificio.



Figura 2- Vista lateral del CITENI. Fuente: citeni.udc.es

2.1.2 Localización y emplazamiento

El edificio se encuentra ubicado en el campus de Esteiro de la Universidad de Coruña en la Rúa Mendizábal, en la localidad de Ferrol, perteneciente a la provincia de A Coruña.

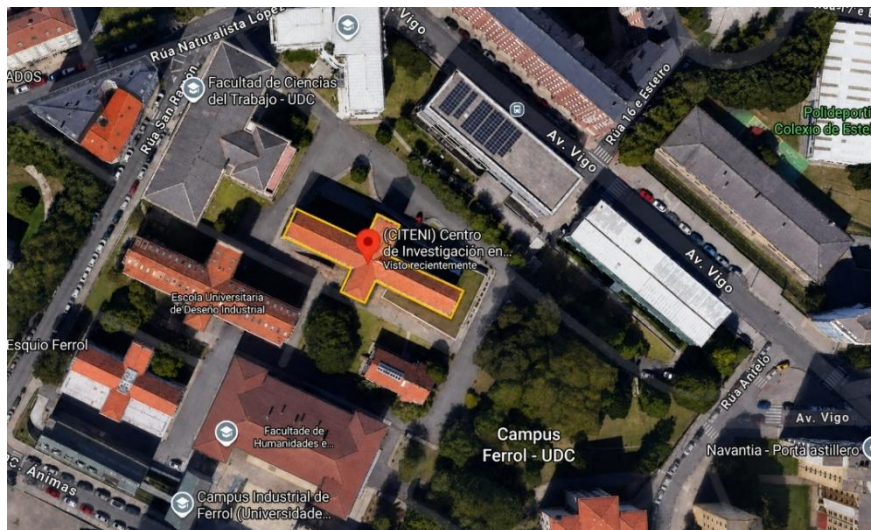


Figura 3- Vista aérea del CITENI. Fuente: Google Maps.

2.2 Materiales

2.2.1 Planos del edificio

La caracterización geométrica y constructiva del edificio se ha estructurado a partir de la documentación técnica disponible, constituida por los planos de proyecto y las memorias de calidades originales. Esta información permitió definir las soluciones constructivas y las propiedades termo físicas de la envolvente térmica, habiendo sido facilitada por el Vicerrectorado de Infraestructuras y Sostenibilidad de la Universidad de Coruña. El compendio cartográfico e infográfico de partida se integra en el *Anexo I*.

2.2.2 Pliego de condiciones técnicas

El edificio analizado se ejecutó a finales de la década de 1990 bajo la rúbrica original de Centro De Investigaciones Tecnológicas (CIT). El pliego de condiciones técnicas del proyecto ha operado como documento de contraste para auditar la configuración material de los cerramientos, aportando los datos de partida necesarios para la modelización del estado de referencia.

2.2.3 Documentación técnica de los sistemas de generación térmica

Debido al enfoque de la investigación, centrado en la optimización energética activa mediante la sustitución o mejora de las instalaciones térmicas, se consultaron las fichas técnicas de los sistemas de climatización existentes. Dicha documentación técnica ha posibilitado la caracterización de los equipos.

2.3 Metodología

2.3.1 Campañas de inspección In Situ (Auditoría del edificio)

Con el fin de contrastar la información facilitada por el vicerrectorado de Infraestructuras y Sostenibilidad de la Universidad de Coruña y, en cumplimiento del imperativo legal de inspección presencial determinado por el Real Decreto 390/2021, se programó una campaña inicial de reconocimiento en noviembre de 2025. Durante dicha sesión, se procedió al registro fotográfico y la verificación dimensional de la envolvente y los equipos de generación. Consecutivamente, se efectuaron dos visitas adicionales en febrero y marzo de 2026 orientas a auditar la red de distribución térmica y las unidades terminales en los espacios interiores. El dossier gráfico resultante se adjunta en el *Anexo II*.

2.3.2 Creación del modelo del edificio

La fase inicial de ingeniería se centró en la creación del modelo paramétrico tridimensional bajo la metodología BIM, lo que garantiza la integridad de los datos durante las fases de diseño, mantenimiento y ciclo de vida de la rehabilitación. El entorno de software seleccionado para el modelado arquitectónico fue Autodesk Revit 2026 [1]. La memoria metodológica del proceso de modelo se detalla en el *Anexo III*.

Consolidado el modelo nativo, se ejecutó la exportación e importación del modelo geométrico mediante formato de intercambio abierto IFC (Industry Foundation Classes) hacia la aplicación IFC Builder del entorno CYPE. Este procedimiento constituye el puente de interoperabilidad entre el ecosistema Autodesk y las herramientas especializadas de cálculo CYPE [2]. El protocolo detallado de transferencia se describe en el *Anexo IV*.

La siguiente fase consistió en la determinación de la demanda de calefacción y refrigeración del inmueble a través de la herramienta de cálculo CYPETHERM LOADS [3]. A partir del modelo IFC importado, se realizó una zonificación térmica del inmueble diferenciando los recintos que intervienen en el cálculo de cargas térmicas (climatizables) de los que no (no habitables) y se computaron los balances térmicos del edificio, fijando las bases analíticas del emplazamiento geográfico para la posterior simulación y calificación energética del estado actual. El procedimiento del cálculo se explica en el *Anexo V*.

Disponiendo de las cargas de diseño y del modelo arquitectónico, se procedió al modelado energético del CITENI en el estado actual en CYPETHERM HE Plus [4]. Durante esta fase se introdujeron las instalaciones de generación térmica existentes y se categorizó los recintos del edificio en tres subsistemas en función de la tipología de sus unidades terminales: radiadores, aerotermos y rejillas de difusión de aire. Finalmente se realizó la calificación energética del edificio en el estado actual.

Para conseguir el objetivo del proyecto se plantearon diferentes actuaciones sobre el edificio y se realizó un estudio de viabilidad con el fin de seleccionar las actuaciones que se proyectarán.

Tras seleccionar las medidas de mejora oportunas y diseñar las instalaciones, finalmente se realizó una calificación energética final que aseguró que se cumplieron los objetivos planteados al inicio de este proyecto.

En la *Figura 4* se detalla el flujo de trabajo llevado a cabo durante todo el proyecto.

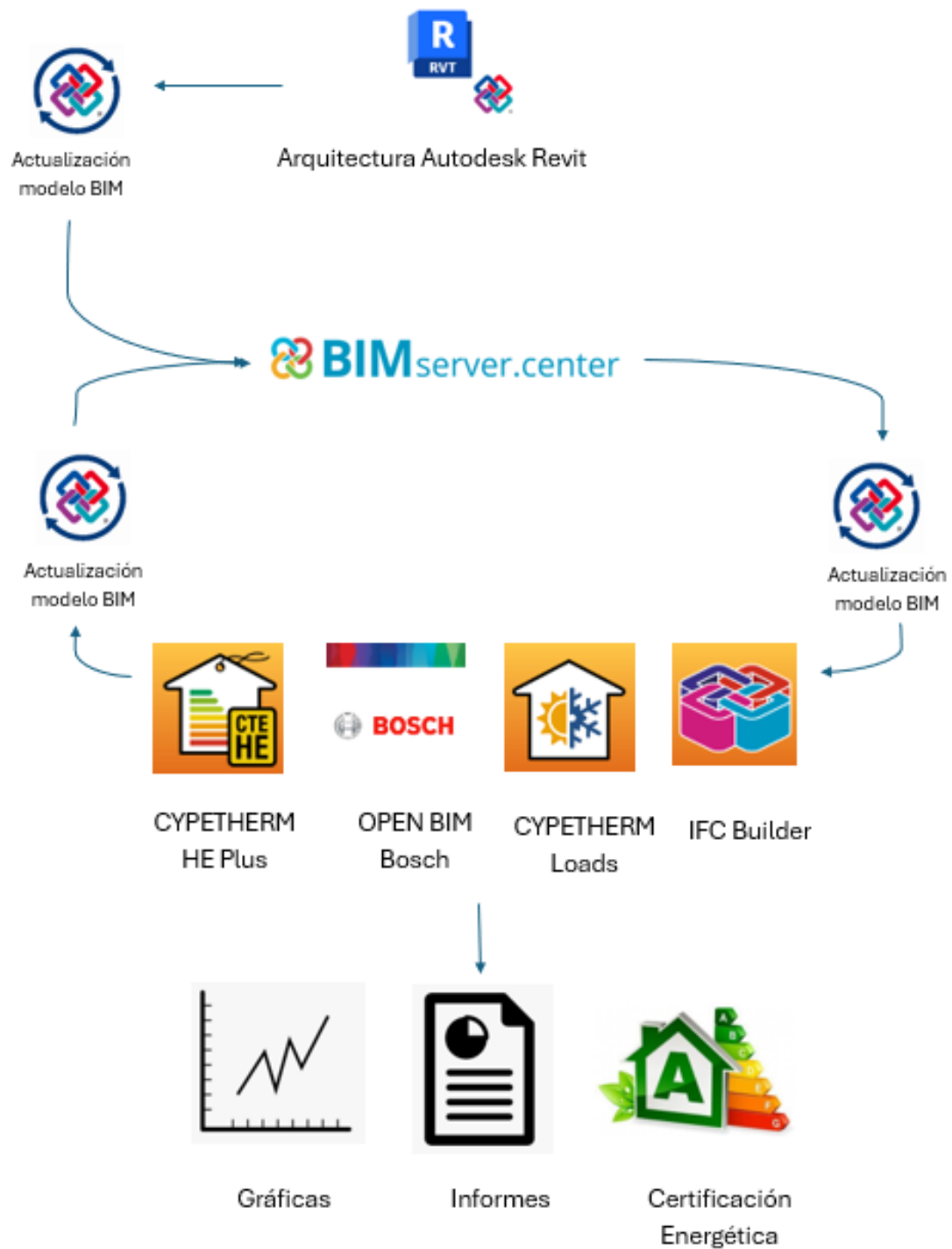


Figura 4- Esquema del flujo de trabajo del proyecto. Fuente: Elaboración propia.

3 MODELADO ENERGÉTICO Y PROPUESTAS DE MEJORAS

Para la caracterización de los elementos constructivos de la envolvente térmica se empleó la información facilitada por el Vicerrectorado de Infraestructuras de la Universidad de Coruña. Los materiales y espesores de las diferentes capas que componen las soluciones constructivas se introdujeron en CYPETHERM LOADS con el propósito de realizar un cálculo de cargas térmicas ajustado a la realidad. A continuación, se muestra la caracterización de los cerramientos de la envolvente térmica.

3.1 Descripción de la envolvente térmica

- **Muros de fachada:** Configurados por un revestimiento exterior de mortero de cemento de 2cm (1), mampostería de piedra de espesor variable (2), aislamiento de poliestireno expandido de 3cm (3), ladrillo hueco simple de 4cm (4) y enlucido interior de yeso de 2cm (5).

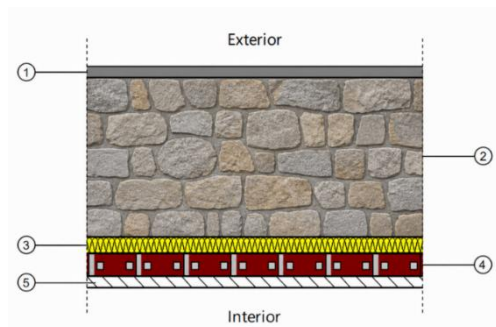


Figura 5- Esquema de composición de muro de fachada. Fuente: CYPETHERM HE Plus.

- **Muros de sótano:** Revestimiento exterior de mortero de 2cm (1), muro de hormigón armado de espesor variable (2), panel aislante de poliestireno expandido de 3cm (3), tabiquería de ladrillo hueco simple de 4cm (4) y enlucido de yeso de 1,5cm (5).

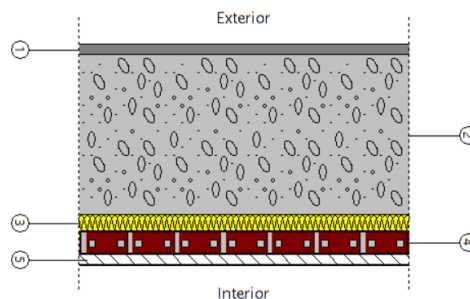


Figura 6- Esquema de composición de muro de sótano. Fuente: CYPETHERM HE Plus.

- **Cubierta:** La cubierta del edificio corresponde a una tipología de cubierta plana a ocho aguas resuelta mediante tabiquillos conejeros para la formación de pendientes y cámara de aire ventilada. El paquete constructivo integra teja cerámica exterior (1) sobre tablero de bardos (2), capa de regularización de mortero de 2cm (3), aislamiento de espuma rígida de poliuretano de 3cm (4) y barrera de vapor mediante lámina de PVC de 2cm (5).

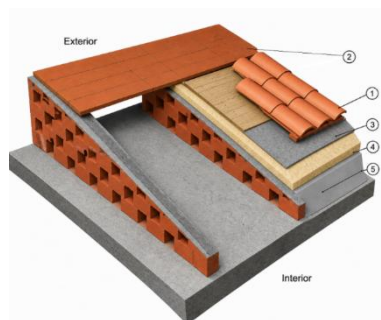


Figura 7- Esquema de composición de cubierta. Fuente: Elaboración propia.

- **Solera:** Pavimento en contacto con el terreno constituido por una losa de hormigón en masa de 50cm de espesor.

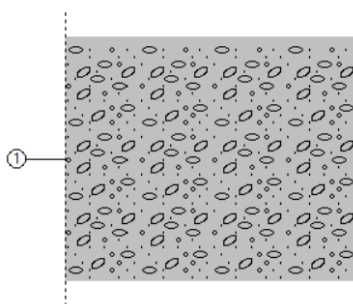


Figura 8- Esquema de composición de solera. Fuente: CYPETHERM LOADS.

- **Forjado de terraza:** Estructura de semiviguetas pretensadas (1) con bovedillas moldeadas de poliestireno (2), barrera de vapor de oxiasfalto (3), capa aislante de hormigón celular de 10cm (4), capa de regularización de cemento de 2cm (5), doble lámina bituminosa de oxiasfalto (6) y acabado superficial de baldosín catalán (7).

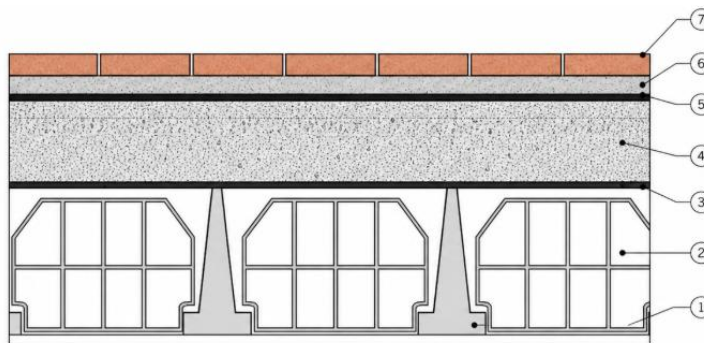


Figura 9- Esquema de composición de forjado de terraza. Fuente: Elaboración propia.

- **Carpintería exterior y acristalamientos:** En lo que respecta a la carpintería exterior, está ejecutada en aluminio lacado en color blanco, sin incorporación de rotura de puente térmico, factor que penaliza severamente la transmitancia térmica global del hueco. El acristalamiento consta de doble vidrio simétrico tipo Climalit 6/4/6. El perímetro de los huecos se encuentra resuelto mediante bloques de hormigón revestidos con mortero, lo que induce puentes térmicos lineales en las jambas, dinteles y alféizares.

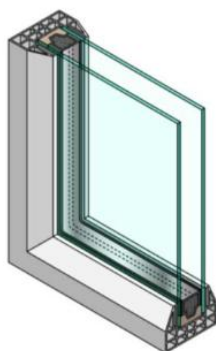


Figura 10- Esquema de composición carpintería exterior. Fuente: onventanas.com

La *Tabla 2* recoge los espesores y transmitancias de los diferentes elementos que constituyen la envolvente térmica del edificio.

Tabla 2- Transmitancia térmica de los cerramientos exteriores. Fuente: Elaboración propia.

Elemento	Espesor (cm)	Transmitancia térmica (W/m ² *°C)
Muro de Sótano	35	0,657
	75	0,470
	85	0,450
	95	0,430
Muro de Fachada	40	0,630
	75	0,590
	85	0,580
	95	0,570
	105	0,560
Solera	50	2,330
Forjado entre pisos	50	0,270
Forjado terraza	50	0,940
Carpintería Exterior (Ventanas)	7	2,791
Carpintería Exterior (Puertas)	7	2,500

3.2 Descripción de las instalaciones

Para evaluar el comportamiento energético del edificio objeto de estudio fue necesario la de parametrización característica del funcionamiento de las diferentes instalaciones existentes. Mediante la documentación técnica proporcionada por el personal de la Universidad se introdujeron los parámetros correspondientes a cada instalación en el software CYPETHERM HE Plus.

3.2.1 Caldera de Gasoil

El primer elemento generador del sistema de calefacción se trata de una caldera convencional de gasóleo tipo C, con una potencia nominal de **296,5 kW**, modelo NTD 260 del fabricante Baxi-Roca, emplazada en el sector del semisótano. Este equipo abastece la demanda de calefacción de laboratorios, talleres y aulas, así como la producción integral de ACS.



Figura 11- Caldera de gasoil del fabricante Baxi-Roca modelo NTD-260. Fuente: elaboración propia.

3.2.2 Climatizadoras

El acondicionamiento térmico de las áreas administrativas y despachos se produce mediante dos Unidades de Tratamiento de Aire (UTA) de 20kW de potencia térmica nominal cada una, configuradas a dos tubos con fluido caloportador agua y ventilación de velocidad constante.

3.2.3 Radiadores

Los espacios docentes y zonas de circulación se climatizan mediante una red de treinta y dos radiadores de agua alimentados por la caldera de gasoil. La tipología, dimensiones y desglose técnico de estas unidades terminales se recogen en la *Tabla 3*.

Tabla 3- Especificaciones de radiadores del edificio. Fuente: Elaboración propia.

Equipo	Dimensiones (mm)	Potencia (W)	Unidades
Radiadores	600x1500	2200	5
	600x1200	1760	3
	600x900	1320	9
	600x750	1100	8
	600x600	880	6
	600x300	440	1



Figura 12- Tipo de radiador de la instalación del CITENI. Fuente: elaboración propia.

3.2.4 Aerotermos

Para los talleres y laboratorios de gran volumen, el aporte de calor se realiza mediante diecinueve aerotermos murales agua-aire de 12,7 kW de potencia unitaria, capaces de desarrollar un caudal máximo de aire de 1300 m³/h mediante un ventilador de tipo axial acoplado a un motor de cuatro polos.



Figura 13- Tipo de aerotermo de la instalación del CITENI. Fuente: elaboración propia.

3.2.5 Rejillas de impulsión y de retorno

En las zonas de oficinas y despachos, el aire climatizado se distribuye a través de doce rejillas de impulsión, acabadas en color blanco, con geometría de doble deflexión, lamas móviles y compuerta de regulación de caudal integrada.

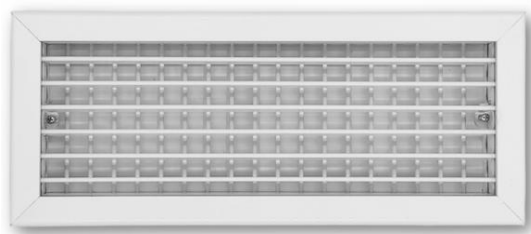


Figura 14- Tipo de rejilla de impulsión de la instalación del CITENI . Fuente: elaboración propia.

3.3 Cargas térmicas internas

3.3.1 Ocupación

La carga interna por ocupación en las áreas habitables se ha parametrizado en tres perfiles diferenciados: sector administrativo (oficinas y despachos), sector práctico (talleres y laboratorios) y sector docente y de zonas comunes. Para cada tipología espacial se definieron las curvas de demanda distinguiendo entre periodos lectivos y laborales y fines de semana. Los valores de densidad y los horarios de operación se detallan en la *Tabla 4*.

Tabla 4- Perfiles de ocupación de zonas habitables del CITENI. Fuente: Elaboración propia.

Tipo de recinto	Periodo de la semana	Porcentaje de ocupación	Horas de ocupación	Total de horas
Oficinas y despachos	Laboral (L-V)	100%	8.00 -16.00	8
	Fin de Semana (S-D)	0%	-	0
Talleres y laboratorios	Laboral (L-V)	100%	8.00 - 20.00	12
	Fin de Semana (S-D)	0%	-	0
Aulas y zonas comunes	Laboral (L-V)	100%	8.00 - 20.00	12
	Fin de Semana (S-D)	0%	-	0

3.3.2 Iluminación

La modelización de la carga interna por iluminación adopto una metodología análoga a la de ocupación, empleando perfiles horarios y porcentuales homólogos. La potencia de iluminación instalada por recinto se determinó de acuerdo con los estándares de la normativa ASHRAE, mientras que los valores de eficiencia energética del sistema se ajustaron a las exigencias del CTE DB-HE3. Las variables de cálculo asociadas se recogen en la *Tabla 5*.

Tabla 5- Perfiles de ocupación de zonas habitables del CITENI. Fuente: Elaboración propia.

Tipo de recinto	Periodo de la semana	Porcentaje de iluminación	Horas de iluminación	Total de horas	VEEI _{límite} (W/m ²)	VEEI _{proyecto} (W/m ²)	Potencia instalada (W/m ²)
Oficinas y despachos	Laboral (L-V)	100%	8.00 -16.00	8	3,00	2,50	8,80
	Fin de Semana (S-D)	0%	-	0			
Talleres y laboratorios	Laboral (L-V)	100%	8.00 - 20.00	12	3,50	3,00	12,80
	Fin de Semana (S-D)	0%	-	0			
Aulas y zonas comunes	Laboral (L-V)	100%	8.00 - 20.00	12	3,50	3,00	9,40
	Fin de Semana (S-D)	0%	-	0			

3.4 Simulación energética en CYPETHERM HE Plus

La evaluación del comportamiento energético se ha realizado mediante CYPETHERM HE Plus, motor que determina la calificación energética en base a dos indicadores fundamentales: las emisiones anuales de dióxido de carbono (kg CO₂/m²*año) y el consumo de energía primaria no renovables (kWh/m²*año). El algoritmo computa tanto las emisiones directas derivadas de la combustión como las emisiones indirectas ligadas al consumo de energía eléctrica de los sistemas auxiliares de iluminación y de climatización.

3.4.1 Criterios de sectorización y delimitación de espacios

Tomando como base el modelo arquitectónico y los balances obtenidos en la simulación de cargas térmicas, el proceso de auditoría en CYPETHERM HE PLUS se inició con la estructuración del edificio en cuatro tipologías de recintos térmicos.

En primera instancia, se aislaron los espacios no climatizables, categoría que engloba las salas de máquinas, almacenes, escaleras y huecos de ascensor. En segunda instancia, los recintos climatizados se segregaron en tres subzonas independientes, atendiendo estrictamente al principio de operación de sus unidades terminales de transferencia:

- **Zona práctica (talleres y laboratorios):** espacios de gran volumen donde la demanda de calefacción es cubierta mediante diecinueve aerotermos murales con intercambio de calor agua-aire.
- **Zona docente (aulas y espacios comunes):** áreas cuya emisión térmica se efectúa mediante una red de treinta y dos radiadores acoplados al circuito de agua de la caldera central.
- **Zona administrativa (oficinas y despachos):** recintos cuyo acondicionamiento se confía a dos unidades climatizadoras de tratamiento de aire de 20 kW de potencia nominal unitaria con distribución a través de doce rejillas de impulsión.

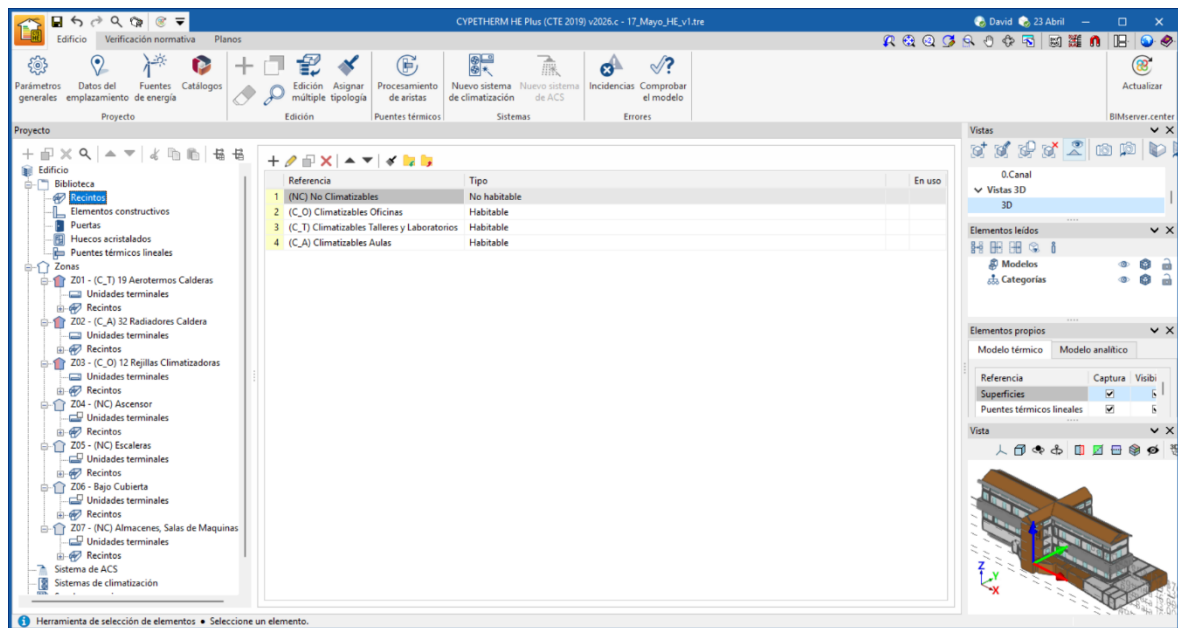


Figura 15- Creación de zonas térmicas del edificio. Fuente: CYPETHERM HE Plus.

3.4.2 Configuración de perfiles de operación y demanda interna

Para cada una de las tres zonas climatizadas se programó un perfil de uso específico. Estas directrices de funcionamiento permiten al motor de cálculo ponderar de forma correcta las cargas internas, estableciendo una distinción horaria y porcentual rígida entre las jornadas laborales y los periodos correspondientes a fines de semana. Los valores de consigna, tasas de ocupación e iluminación asociadas a estas plantillas de simulación quedan indexados en la *Tabla 6*.

Tabla 6- Perfiles de uso de zonas climatizables. Fuente: Elaboración propia.

Zona Térmica	Horas de ocupación (Lunes-Viernes)	Porcentaje de ocupación	Horas de ocupación fin de semana
Oficinas	8 horas (8 a.m- 16 p.m)	100%	0 horas
Talleres y Laboratorios	12 horas (8 a.m – 20 p.m)	100%	0 horas
Aulas	12 horas (8 a.m – 20 p.m)	100%	0 horas

3.4.3 Caracterización de los sistemas de generación térmica y ACS.

La fase de ingeniería de sistemas se centró en la parametrización de la planta de producción. Para el escenario de referencia, las condiciones de contorno introducidas en el software se limitaron a los servicios existentes de calefacción y producción de ACS al carecer el inmueble de sistemas de refrigeración. Se introdujeron los parámetros de la caldera de gasóleo de 296,5 kW de potencia nominal y las dos climatizadoras de 20 kW de potencia nominal unitaria.

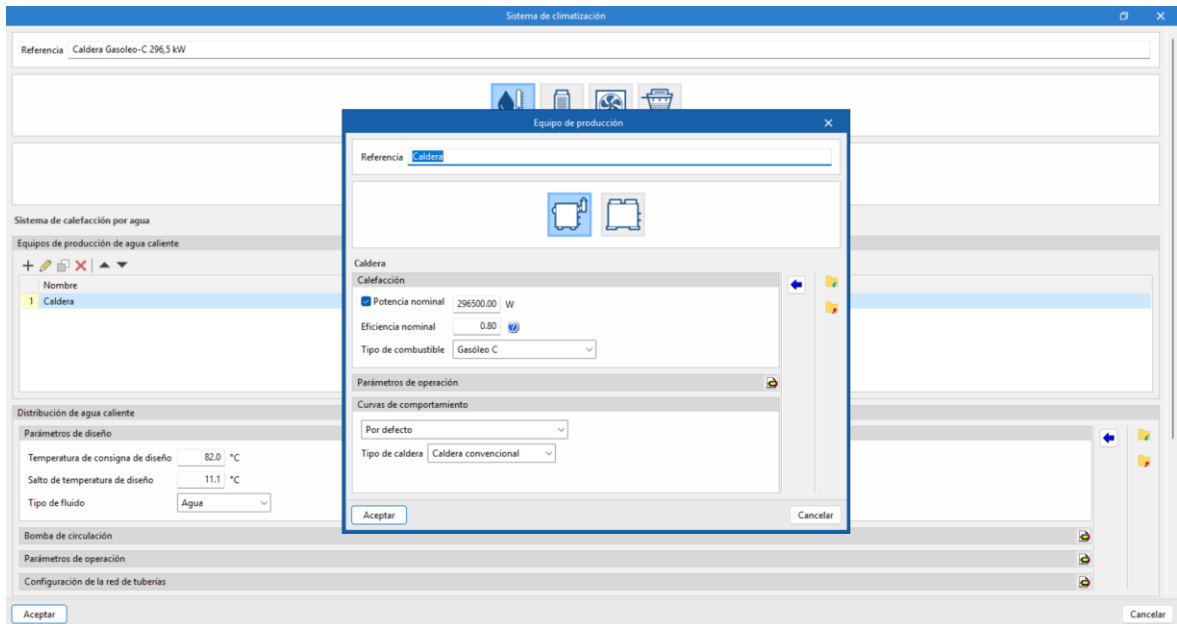


Figura 16- Parametrización de la caldera de gasoil. Fuente: CYPETHERM HE Plus.

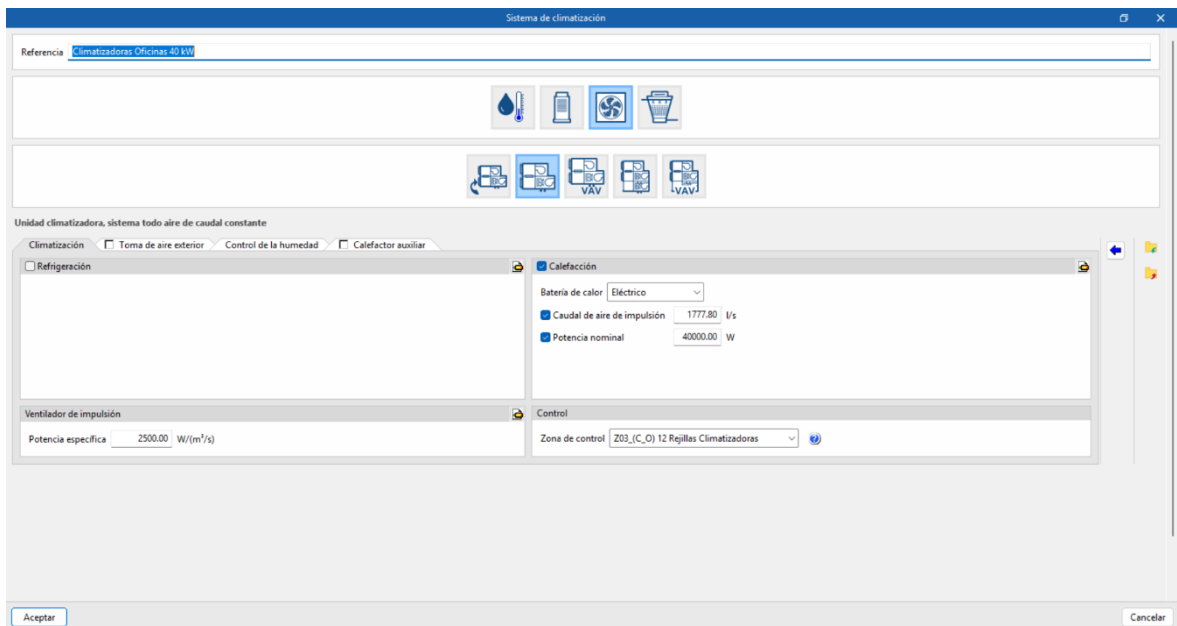


Figura 17- Parametrización de las climatizadoras. Fuente: CYPETHERM HE Plus.

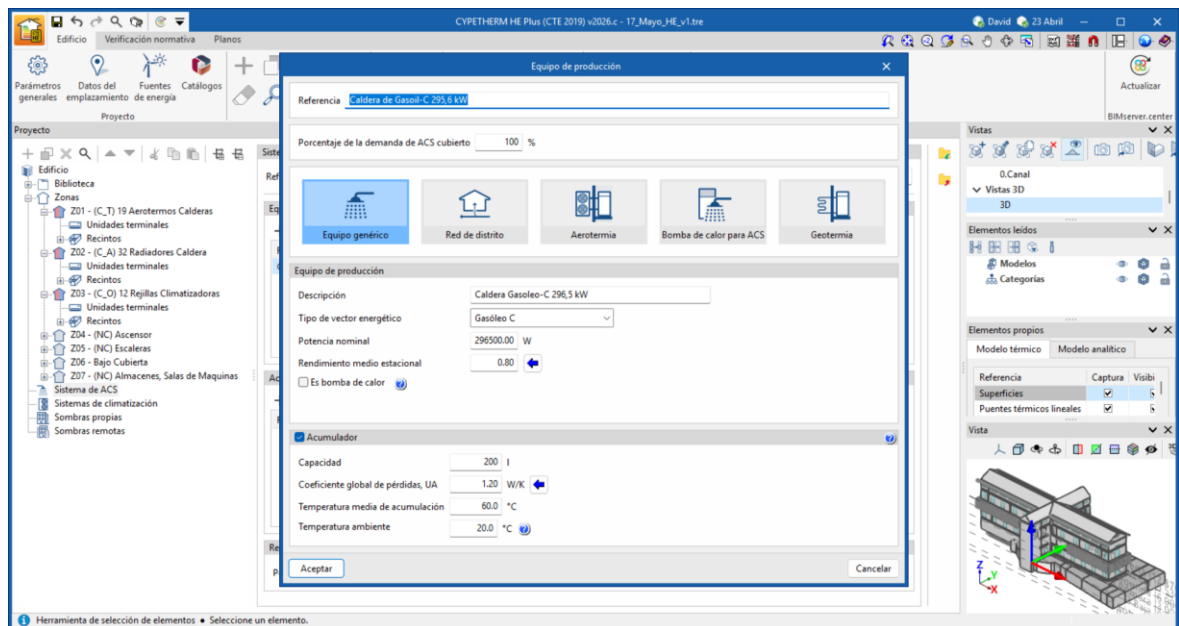


Figura 18- Parametrización del sistema de producción de ACS. Fuente: CYPETHERM HE Plus.

3.4.4 Vinculación espacial y matriz de distribución de recintos

Consolidadas las plantas de generación y los perfiles de uso, se procedió al acoplamiento de las zonas térmicas. Esta asignación espacial vincula cada recinto físico con su correspondiente régimen de climatización y perfil de demanda. La distribución de superficies y locales adscritos a cada zona se recoge en la *Tabla 8*. Esta sectorización rigurosa permite asignar las unidades terminales a cada recinto además de desglosar los consumos de manera segregada, facilitando la detección de las áreas con mayores pérdidas.

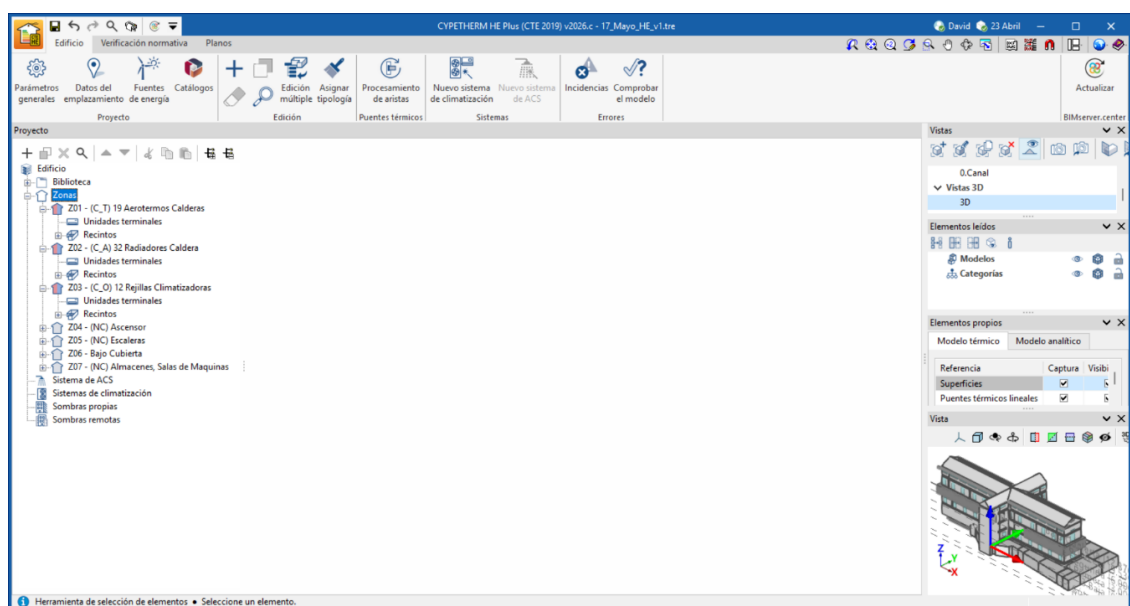


Figura 19- Sectorización térmica del edificio. Fuente: CYPETHERM HE Plus.

Tabla 7- Distribución de recintos en las diferentes zonas térmicas. Fuente: Elaboración propia.

Zona Térmica	Unidad Terminal	Recinto
Talleres y Laboratorios	Aerotermo	A -1.01
	Aerotermo	A -1.02
	Aerotermo	A -1.05
	Aerotermo	A -1.07
	Aerotermo	A -1.10
	Aerotermo	A -1.11
	Aerotermo	A -1.12
	Aerotermo	A -1.13
	Aerotermo	A -1.15
	Aerotermo	A -1.16
	Aerotermo	A -1.18
	Aerotermo	A -1.23
	Aerotermo	A -1.24
	Aerotermo	A -1.25
	Aerotermo	A +0.4
	Aerotermo	A +0.5
	Aerotermo	A +0.11
	Aerotermo	A +1.01
	Aerotermo	A +1.03
Aulas	Radiador	A -1.04
	Radiador	A -1.08
	Radiador	A -1.09
	Radiador	A -1.19
	Radiador	A -1.04
	Radiador	A -1.19
	Radiador	A +0.06
	Radiador	A +0.07
	Radiador	A +0.09
	Radiador	A +0.10
	Radiador	A +0.12
	Radiador	A +0.13
	Radiador	A +1.04
	Radiador	A +1.05
	Radiador	A +1.06
	Radiador	A +1.08
	Radiador	A +1.09
	Radiador	A +1.10
	Radiador	A +2.03
	Radiador	A +2.05
	Radiador	A +2.06
	Radiador	A +2.09
	Radiador	A +2.10
	Radiador	A +2.12
	Radiador	A +3.02
	Radiador	A +3.04
	Radiador	A +3.05
	Radiador	A +3.07
Despachos y Oficinas	Rejilla Impulsión	A +0.01
	Rejilla Impulsión	A +0.02
	Rejilla Impulsión	A +0.03
	Rejilla Impulsión	A +1.02
	Rejilla Impulsión	A +1.07
	Rejilla Impulsión	A +2.01
	Rejilla Impulsión	A +2.02
	Rejilla Impulsión	A +2.04
	Rejilla Impulsión	A +2.11
	Rejilla Impulsión	A +3.01
	Rejilla Impulsión	A +3.03
	Rejilla Impulsión	A +3.06

3.4.5 Parametrización de unidades terminales

La etapa previa al procesamiento de la calificación energética consistió en el posicionamiento e introducción de las unidades terminales descritas en la memoria técnica (radiadores, aerotermos y rejillas de difusión). Esta configuración final proporciona al software la información necesaria para modelar las pérdidas, la eficiencia de la emisión y el consumo eléctrico de los equipos auxiliares, completando los datos de partida requeridos por el motor de cálculo.

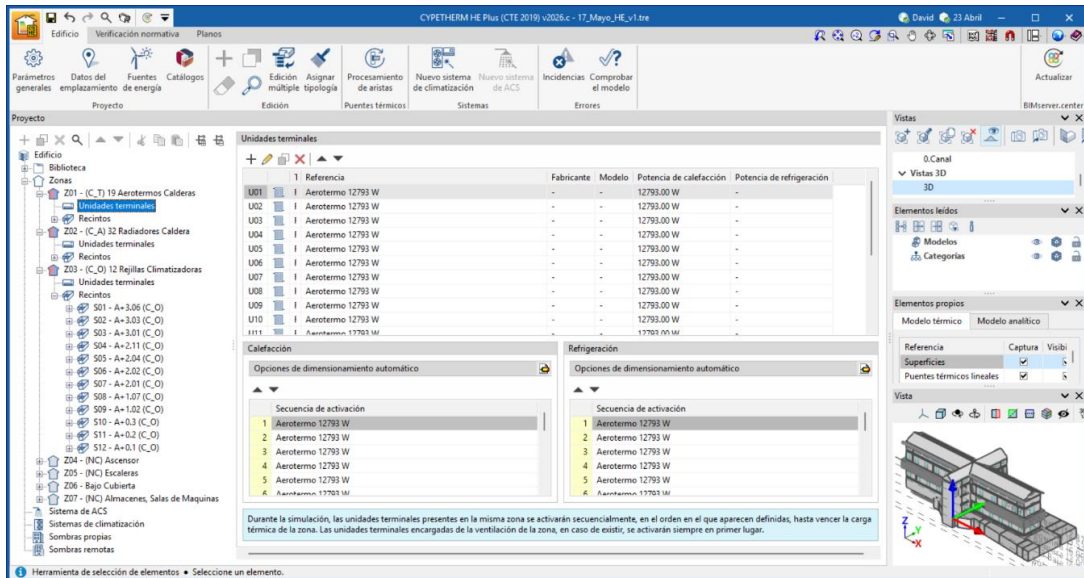


Figura 20- Definición de aerotermos. Fuente: CYPETHERM HE Plus.

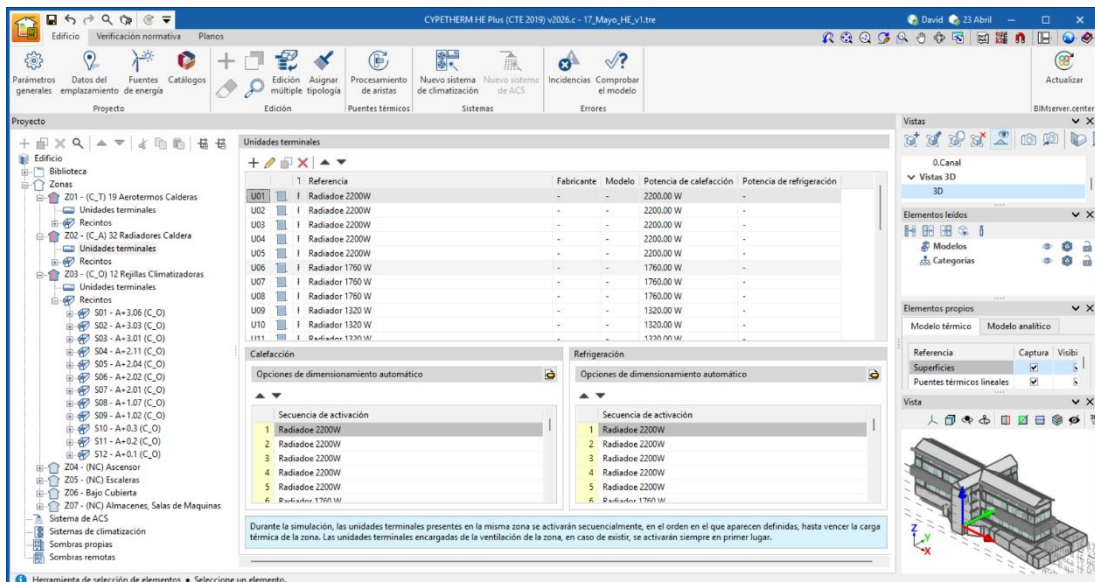


Figura 21- Definición de radiadores. Fuente: CYPETHERM HE Plus.

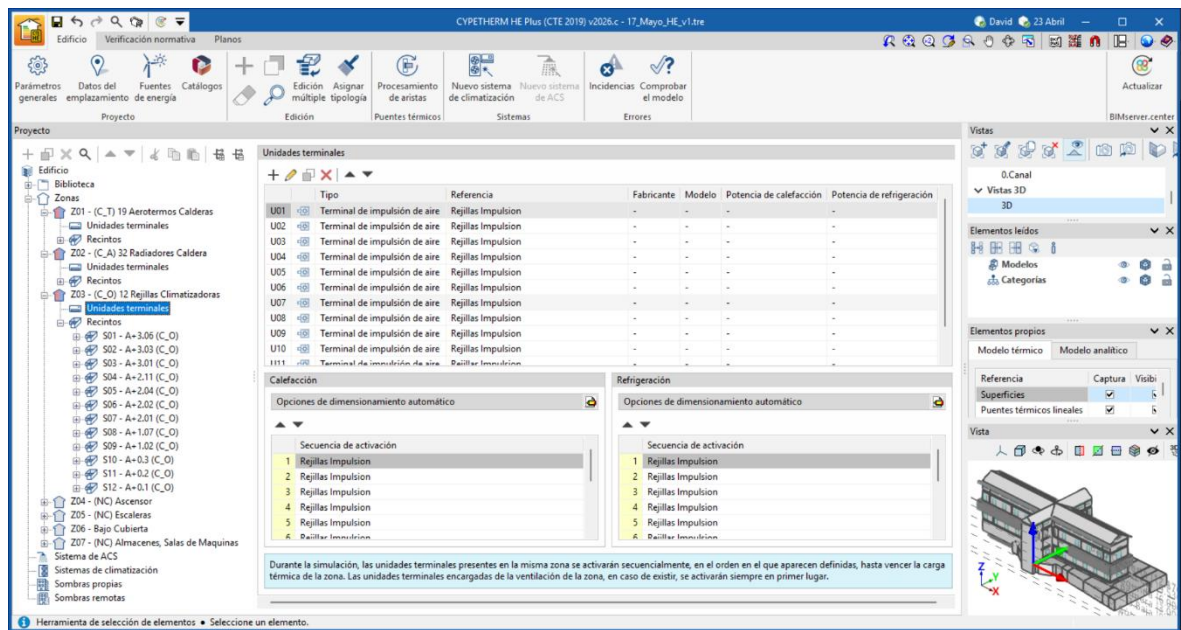


Figura 22- Definición de terminales de impulsión. Fuente: CYPETHERM HE Plus.

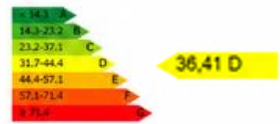
Finalmente se procedió a la calificación energética del edificio.

3.5 Calificación energética en el estado inicial

Calificación energética del edificio

Zona climática	C1	Uso	Otros usos
----------------	----	-----	------------

1. CALIFICACIÓN ENERGÉTICA DEL EDIFICIO EN EMISIONES

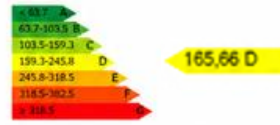
INDICADOR GLOBAL	INDICADORES PARCIALES		
	CALEFACCIÓN		ACS
	Emisiones calefacción [kgCO ₂ /m ² ·año]	D	Emisiones ACS [kgCO ₂ /m ² ·año]
	24.59		0.86
	REFRIGERACIÓN		ILUMINACIÓN
Emisiones globales[kgCO ₂ /m ² ·año] ¹	Emisiones refrigeración [kgCO ₂ /m ² ·año]	A	Emisiones iluminación [kgCO ₂ /m ² ·año]
	0		10.96

La calificación global del edificio se expresa en términos de dióxido de carbono liberado a la atmósfera como consecuencia del consumo energético del mismo.

	kgCO ₂ /m ² ·año	kgCO ₂ ·año
Emisiones CO2 por consumo eléctrico	13.08	27532.27
Emisiones CO2 por otros combustibles	23.32	49071.93

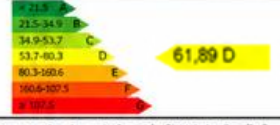
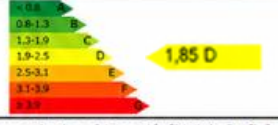
2. CALIFICACIÓN ENERGÉTICA DEL EDIFICIO EN CONSUMO DE ENERGÍA PRIMARIA NO RENOVABLE

Por energía primaria no renovable se entiende la energía consumida por el edificio procedente de fuentes no renovables que no ha sufrido ningún proceso de conversión o transformación.

INDICADOR GLOBAL	INDICADORES PARCIALES		
	CALEFACCIÓN		ACS
	Energía primaria calefacción [kWh/m ² ·año]	D	Energía primaria ACS [kWh/m ² ·año]
	97.71		3.25
	REFRIGERACIÓN		ILUMINACIÓN
Consumo global de energía primaria no renovable[kWh/m ² ·año]	Energía primaria refrigeración [kWh/m ² ·año]	A	Energía primaria iluminación [kWh/m ² ·año]
	0		64.7

3. CALIFICACIÓN PARCIAL DE LA DEMANDA ENERGÉTICA DE CALEFACCIÓN Y REFRIGERACIÓN

La demanda energética de calefacción y refrigeración es la energía necesaria para mantener las condiciones internas de confort del edificio.

DEMANDA DE CALEFACCIÓN	DEMANDA DE REFRIGERACIÓN
	
Demanda de calefacción[kWh/m ² ·año]	Demanda de refrigeración[kWh/m ² ·año]

¹ El indicador global es resultado de la suma de los indicadores parciales más el valor del indicador para consumos auxiliares, si los hubiera (sólo edificios terciarios, ventilación, bombeo, etc...). La energía eléctrica autoconsumida se descuenta únicamente del indicador global, no así de los valores parciales.

Figura 23- Calificación energética del edificio en el estado inicial. Fuente: CYP THERM HE Plus.

3.6 Propuesta de mejoras

Con el propósito de mejorar los indicadores globales de eficiencia energética e impulsar el cambio de letra en la escala de calificación energética, se evaluaron diversas medidas de mejora enfocadas tanto en soluciones pasivas como activas.

Para cada una de las propuestas planteadas se preseleccionaron tres fabricantes del mercado, comparando de forma paramétrica el impacto energético derivado de la implementación aislada de cada solución, manteniendo el resto de los elementos del edificio en su estado original (los resultados analíticos para los diferentes fabricantes se detallan en el *Anexo VI*). Tras realizar la calificación energética aplicando cada uno de los tres fabricantes de manera aislada, se seleccionó para el análisis de viabilidad aquel proveedor cuyo valor de los indicadores de calificación energética resultaron mejores.

3.6.1 Actuaciones en la envolvente térmica

3.6.1.1 Aislamiento térmico de fachada por el interior

Se evaluaron tres soluciones alternativas para el trasdosado interior de los cerramientos verticales: un aislamiento termo-reflectivo de doble capa sobre burbuja de polietileno, paneles rígidos de poliestireno extruido (XPS) y paneles de lana mineral de vidrio. Los mejores indicadores en la simulación energética correspondieron a la solución reflectiva de doble capa del fabricante Aislatermic.

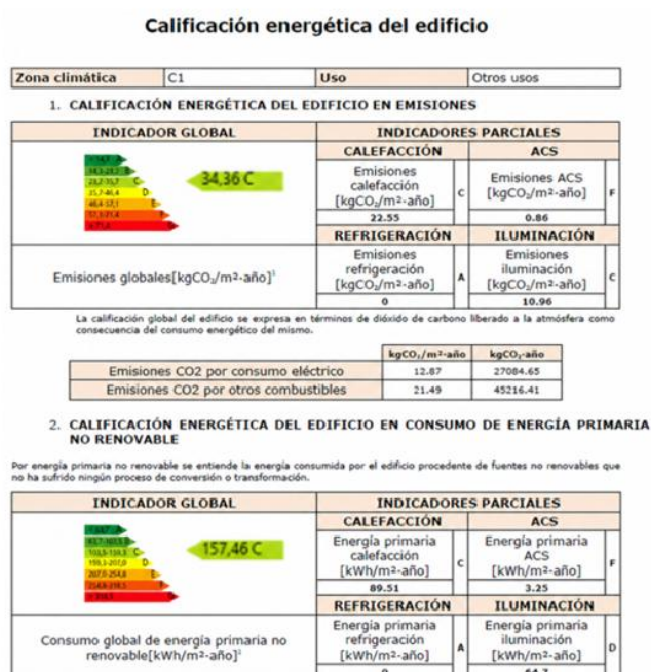


Figura 24- Calificación energética tras añadir únicamente aislamiento térmico por el interior. Fuente: CYP THERM HE Plus.

3.6.1.2 Aislamiento de fachada por el exterior (SATE)

Para la intervención de los muros de fachada por el exterior, se contrastaron tres tecnologías de aislamiento: paneles de XPS, planchas de XPS de alta densidad y paneles sándwich con núcleo aislante de polisocianurato. El comportamiento termo físico óptimo tras la simulación se obtuvo con la integración del panel sándwich con aislamiento de polisocianurato del fabricante Tecnozone.

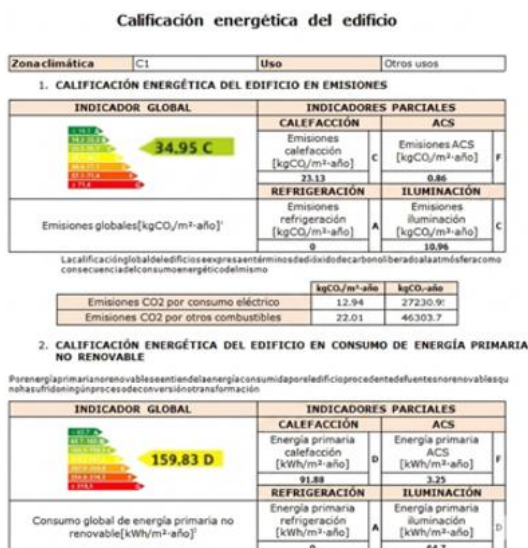


Figura 25- Calificación energética tras añadir únicamente aislamiento térmico por el exterior. Fuente: CYP THERM HE Plus.

3.6.1.3 Aislamiento de cubierta

En lo referente a la cubierta, se contrastaron tres tecnologías de aislamiento: paneles de XPS, planchas de XPS de alta densidad y paneles sándwich con núcleo aislante de polisocianurato. Para las tres simulaciones se observó que los resultados de los indicadores no sufrían variación ya que el espacio bajo cubierta se considera no habitable para el cálculo. En los resultados de consumo se apreció una ligera variación para la solución de panel sándwich de Tecnozone que ofreció los resultados de consumo más bajos de los tres fabricantes propuestos.

Calificación energética del edificio



Figura 26- Calificación energética tras añadir únicamente aislamiento de cubierta. Fuente: CYP THERM HE Plus.

3.6.1.4 Sustitución de ventanas y carpintería

Se proyectó la renovación integral de los huecos acristalados y sus elementos de carpintería, evaluando los catálogos de los fabricantes Kommerling, OnVentanas e Itesal. La solución elegida corresponde al modelo de altas prestaciones de Itesal, caracterizado por una transmitancia del vidrio de 0,60 W/m²*K, una transmitancia de marco de 1,1 W/m²*K y una permeabilidad del aire de clase 4 según norma UNE-EN-12207.

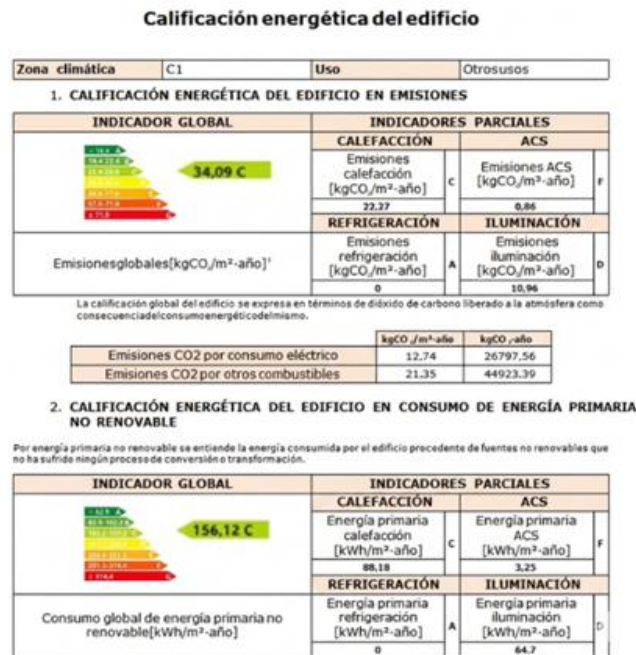


Figura 27- Calificación energética tras sustituir únicamente ventanas y carpintería. Fuente: CYP THERM HE Plus.

3.6.2 Actuaciones en las instalaciones

A continuación, se presentan las propuestas orientadas a mitigar el impacto ambiental derivado del funcionamiento de las instalaciones térmicas. Cada medida se ha evaluado de forma independiente sobre la base de la envolvente térmica original del edificio.

Puesto que el mayor porcentaje de emisiones de CO₂ del edificio procede de la combustión de gasóleo, la sustitución de la caldera actual se consideró una condición indispensable para lograr una mejora sustancial de la calificación energética.

Dado que uno de los objetivos del presente proyecto es la sustitución de combustibles fósiles se descartó analizar una alternativa de caldera de gas natural. Por ese motivo se analizó la implantación de una caldera de biomasa densificada (pellets) acoplada a la red de distribución hidráulica existente y, por otro lado, la transición hacia un sistema de climatización centralizado mediante aerotermia, donde se plantearon dos tecnologías: aire-agua y aire-aire.

3.6.2.1 Caldera de biomasa densificada (pellets)

La tecnología de biomasa se postuló como primera opción de sustitución debido al balance neutro de carbono asociado a su ciclo de vida. Asimismo, el empleo de pellets fomenta la gestión forestal sostenible y la valorización de subproductos de la industria maderera.

Para el estudio comparativo se seleccionaron calderas especializadas de los fabricantes Oekoffen, Bioclass y Hargassner. Tras la simulación de los escenarios, se seleccionó el modelo de caldera de condensación por ofrecer los indicadores energéticos más elevados.

Calificación energética del edificio

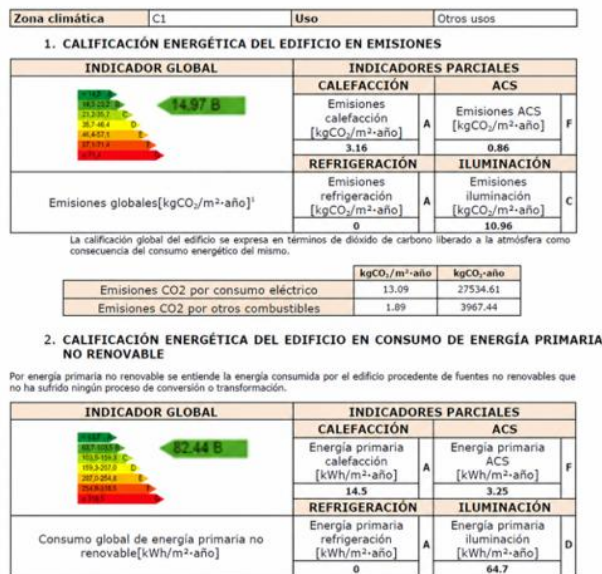


Figura 28- Calificación energética tras instalar únicamente caldera de biomasa. Fuente: CYP THERM HE Plus.

3.6.2.2 Aerotermia aire-agua

Como alternativa a la caldera, se modeló la sustitución de la caldera por una aerotermia aire-agua, manteniendo operativas las unidades climatizadoras de oficinas y despachos. Se analizaron los equipos de generación de Daikin, Mitshubishi y Baxi, seleccionando unidades terminales tipo fancoil del fabricante Valiant. El sistema de generación que ofrecía mejores prestaciones fue el propuesto por Baxi.

Calificación energética del edificio

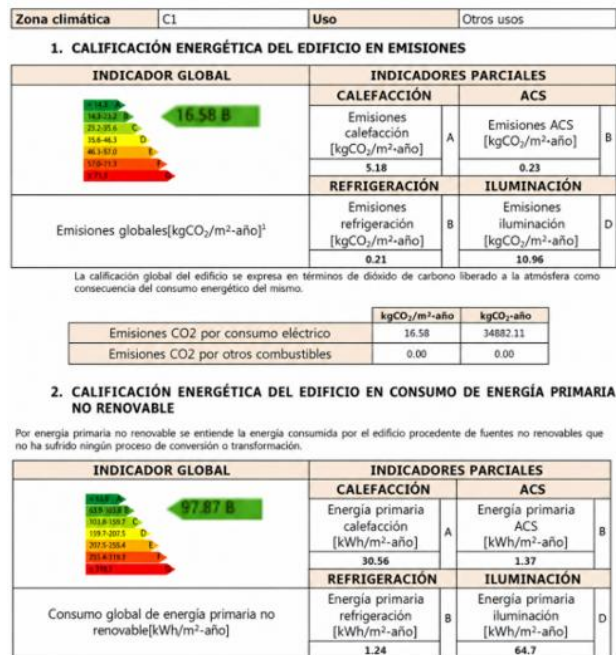


Figura 29- Calificación energética tras instalar únicamente aerotermia aire-agua. Fuente: CYP THERM HE Plus

3.6.2.3 Aerotermia aire-aire VRF.

La última de las propuestas en materia de sistemas de generación térmica consistió en la sustitución simultánea de la caldera y de las UTAs por un sistema de climatización por expansión directa VRF aire-aire. Esta solución implicó la sustitución de los radiadores, aerotermos y rejillas existentes por unidades terminales interiores. Se evaluaron equipos de Bosch, Daikin y Mitsubishi, seleccionando finalmente la gama AC5300A de Bosch.

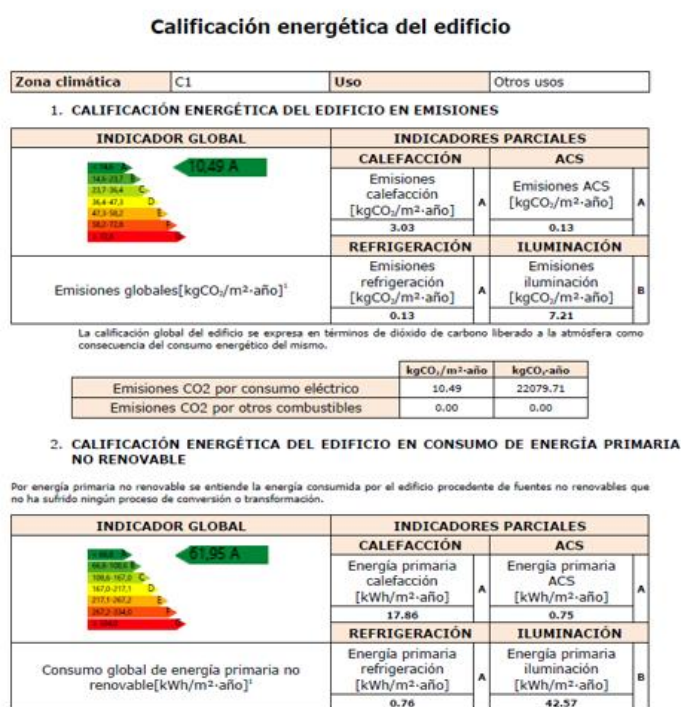


Figura 30- Calificación energética tras instalar únicamente el sistema VRF. Fuente: CYP THERM HE Plus.

3.6.2.4 Integración de planta de generación solar fotovoltaica

Para cumplir el objetivo de reducción de consumo de energía primaria no renovable y cubrir parte de la nueva demanda eléctrica de las aerotermias propuestas, se propuso una instalación solar fotovoltaica para autoconsumo sobre la cubierta del edificio.

El dimensionado, cálculo de radiación incidente y estimación de la producción eléctrica anual se ejecutaron mediante el software especializado PVSyst. La simulación se detalla en el *Apartado 8*.

Al igual que en las secciones precedentes, se evaluaron módulos de tres fabricantes del sector: Izar Solar, TCL Solar y Aiko Solar. Finalmente, se seleccionó la tecnología de Aiko Solar debido basándose únicamente en la mayor producción energética anual para las condiciones climáticas de Ferrol.

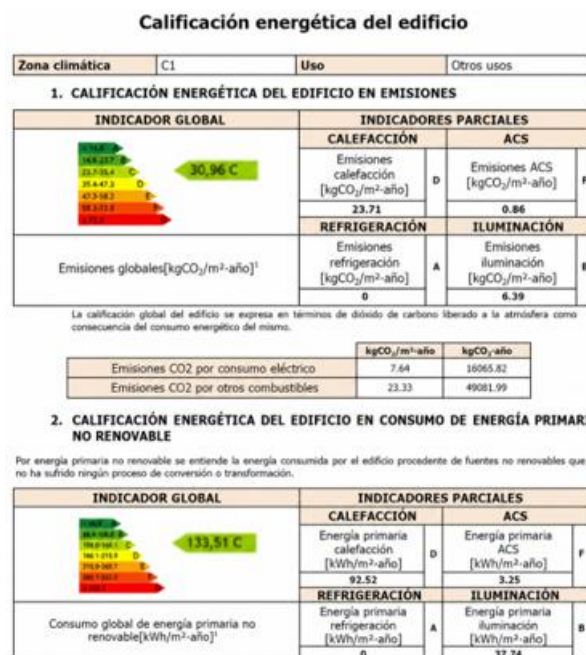


Figura 31- Calificación energética tras instalar únicamente módulos fotovoltaicos. Fuente: CYP THERM HE Plus.

La Tabla 8, muestra la variación de la categoría y del valor de los indicadores de calificación energética tras implantar de manera aislada cada una de las propuestas de mejora planteadas.

Tabla 8-Tabla resumen de los indicadores para las diferentes medidas de mejora. Fuente: Elaboración propia.

Mejora Aplicada	Emisiones globales CO2		Consumo energía primaria no renovable	
	Categoría	Valor (kgCO2/m2*año)	Categoría	Valor (kWh/m2*año)
Caso inicial	D	36,41	D	165,66
Aislamiento Fachada por el interior	C	34,36	C	157,46
Aislamiento de Fachada por el exterior	C	34,95	C	159,83
Aislamiento en cubierta	D	36,41	D	165,66
Sustitución de ventanas y vidrios	C	34,09	C	156,12
Caldera de biomasa	B	14,97	B	82,44
Aeroterminia aire-agua	B	16,58	B	97,87
Aeroterminia aire-aire VRF	A	10,64	A	62,80
Instalación fotovoltaica	C	30,96	C	133,51

4 ESTUDIO DE VIABILIDAD Y DISEÑO FINAL

4.1 Estudio de viabilidad técnica

En la fase de evaluación técnica se dictaminó la inviabilidad de la propuesta orientada a la sustitución de la caldera convencional por un sistema de combustión de biomasa. Esta desestimación se fundamenta en que la tecnología analizada requiere una gran superficie destinada al silo de almacenamiento del combustible y al mecanismo de alimentación automatizada; requerimientos espaciales que excedían la superficie útil disponible en la sala técnica del CITENI. Adicionalmente se planteó el traslado de la caldera al bajo cubierta del edificio, pero también se excedían las dimensiones de este.

4.2 Estudio de viabilidad económica

4.2.1 Determinación del coste operativo del escenario inicial

Al objeto de evaluar el impacto económico y PB de las distintas medidas de mejora, se procedió a calcular el coste operativo anual del edificio en su estado actual. A partir del balance de vectores energéticos provisto por el informe de resultados de CYPETHERM HE Plus, se determinó el coste anual operativo mediante la aplicación de las siguientes expresiones matemáticas:

$$Coste\ Gas\acute{o}leo_C = \frac{Consumo_{gasoleo\ C} * Coste_{gasoleo\ C}}{PC_{gasoleo\ C}} \quad (1)$$

$$PC_{gasoleo\ C} = 9.98 \frac{kWh}{l}$$

$$Coste\ Electricidad = Consumo_{electricidad} * Coste_{electricidad} \quad (2)$$

Tabla 9- Coste operativo anual del edificio en el estado actual. Fuente: Elaboración propia.

Coste operativo anual del edificio en el estado actual			
Instalación	Coste por unidad (€/l o €/kWh)	Consumo (kWh/año)	Coste anual (€/año)
Gasoil	1,10	157787,40	17.391,40 €
Electricidad	0,17	83179,00	14.140,43 €
Total			31.531,83 €

4.2.2 Determinación de los indicadores económicos de las propuestas

El presupuesto de inversión de cada solución técnica se cuantificó a través de la base de datos del generador de precios de CYPE [5], obteniendo una valoración que integra los costes de ejecución material y mano de obra. La memoria de costes detallados para cada escenario de intervención se estructura en el *Anexo VII*.

4.2.2.1 Valor Actual Neto (VAN)

Este indicador actualiza los ahorros futuros acumulados durante la vida útil de la medida planteada. Sirve como indicador principal para comparar el valor absoluto creado por diferentes soluciones de ahorro energético.

4.2.2.2 Tasa Interna de Retorno (TIR)

Tasa de descuento que hace que el valor actual neto de un proyecto sea igual a cero. Representa la rentabilidad anualizada que ofrece la medida de mejora por cada euro invertido en ella. El valor debe ser superior que la tasa de descuento que para el estudio de un proyecto de rehabilitación energética el IDAE lo estima en torno al 4%.

4.2.2.3 Índice de rentabilidad (IR)

También conocido como ratio coste-beneficio, mide el valor relativo creado por cada unidad monetaria invertida. Un índice de rentabilidad mayor que cero certifica la viabilidad de la medida de mejora.

4.2.2.4 Periodo de retorno de la inversión (PB)

Indicador económico estático que mide el tiempo necesario para que los ahorros operativos acumulados netos generados iguale la cantidad de inversión inicial. Ignora el valor del dinero y no contabiliza los ahorros que la medida planteada sigue generando una vez superado el punto de equilibrio.

Los indicadores financieros resultantes quedan reflejados de manera comparativa en la siguiente tabla.

Tabla 10- Tabla resumen análisis económico de las distintas propuestas de mejora. Fuente: Elaboración propia.

Mejora Aplicada	Coste de la mejora	Ahorro anual	Vida útil	VAN	TIR	IR	PB
Aislamiento Fachada por el interior	27.772,70 €	1.596,29 €	30	-169,53 €	3,95%	0,99 €	17,40
Aislamiento de Fachada por el exterior	23.050,85 €	1.135,99 €	30	-3.407,31 €	2,73%	0,85 €	20,29
Aislamiento en cubierta	16.658,04 €	285,99 €	30	-11.712,61 €	-3,84%	0,30 €	58,25
Sustitución de ventanas y vidrios	50.940,74 €	1.909,38 €	30	-17.923,69 €	0,77%	0,65 €	26,68
Caldera de biomasa	23.399,69 €	12.889,04 €	15	186.984,74 €	55,03%	8,99 €	1,82
Aerotermia aire-agua	121.265,75 €	13.842,88 €	15	53.361,10 €	7,91%	1,44 €	8,76
Aerotermia aire-aire VRF	140.660,26 €	14.509,62 €	15	35.140,99 €	6,29%	1,25 €	9,69
Instalación fotovoltaica	23.578,21 €	5.894,24 €	15	69.500,60 €	24,87%	3,95 €	4,00

4.2.3 Selección de actuaciones viables

Del análisis de los indicadores financieros se desprende que las soluciones pasivas planteadas sobre la envolvente térmica no resultan viables en términos de coste-eficiencia, al presentar valores de VAN negativos y TIR inferior a la tasa de descuento considerada por el IDAE para proyectos de esta envergadura.

Respecto a las alternativas de sustitución de los sistemas de generación térmica técnicamente viables, la tecnología aerotermia aire-agua presentaba valores ligeramente superiores al sistema aire-aire. No obstante, se decidió la implantación de un sistema aerotermia aire-aire VRF dado a sus ventajas operativas, mecánicas y funcionales:

- **Optimización de la transferencia de calor:** Menor número de etapas de intercambio térmico, incrementando el SCOP.
- **Zonificación y gestión dinámica:** Elevada capacidad de control por zonas debido a la baja inercia térmica del aire en comparación con la red de radiadores.
- **Flexibilidad térmica:** Capacidad intrínseca de abastecer demandas de calefacción y refrigeración.
- **Mitigación de riesgos operativos:** Eliminación de los riesgos de fuga de fluido caloportador y sobrepresiones asociadas a los circuitos hidráulicos.
- **Optimización de indicadores energéticos:** Mayor tasa de reducción de emisiones de CO₂ en el motor de cálculo de CYPETHERM HE Plus.

Simultáneamente, la planta solar fotovoltaica proyectada en la cubierta reportó una alta rentabilidad financiera, reflejada en una TIR de 24,87% y un IR de 3,95€, lo que justificó su inclusión en el paquete final de mejoras.

El escenario final de intervención seleccionado se consolidó mediante una solución híbrida: sustitución de planta térmica original (caldera y climatizadoras) por el sistema VRF y la implantación de la planta fotovoltaica. Esta combinación requiere una inversión de **164.238,47€** generando un ahorro neto anual de **20.264,75€** lo que establece el periodo de retorno de la inversión global en **8,10 años**.

Tabla 11- Análisis económico tras la ejecución del conjunto de medidas seleccionado. Fuente: Elaboración propia.

Coste por unidad (€/l o €/kWh)	Consumo (kWh/año)	Producción (kWh/año)	Coste operativo anual (€/año)	Ahorro anual (€)	Coste total mejora (€)	VAN	TIR	IR	PB
0,17	0,17	100948,9	11.267,07 €	20.264,75 €	164.238,47 €	102.576,31 €	9,49%	1,62 €	8,10

El análisis de sensibilidad desarrollado en el *Anexo VII* validó la resiliencia financiera del proyecto. Ante un escenario de volatilidad del mercado eléctrico con fluctuaciones de hasta $\pm 40\%$ en la tarifa de luz y un escenario de variaciones en el precio del gasóleo, en el peor de los escenarios, el VAN tendría un valor de 24.644,07€ , el TIR un 5,45% y el IR 1,15. Todos los indicadores cumplirían las condiciones de viabilidad económica y por tanto consolidan la hipótesis de viabilidad económica del proyecto ante incertidumbres macroeconómicas.

4.3 Diseño de la instalación de climatización

Una vez dictaminada la viabilidad técnica y financiera del escenario de actuaciones seleccionadas, se procedió a la ingeniería de detalle. La transición a una tecnología VRF requirió una nueva zonificación térmica del edificio. Este cambio se debe a que el aporte y distribución del aire tratado, se ejecuta de forma mediante unidades terminales interiores y rejillas de impulsión y retorno situadas operando de manera independiente en cada grupo de recintos seleccionado.

La hipótesis inicial contemplaba la ubicación del equipo de generación térmica en el interior de la antigua sala de calderas, sin embargo, al trasladar de forma virtual dicho componente, aparecieron dos restricciones de diseño:

- **Insuficiencia de caudal de ventilación:** el volumen de aire exterior necesario para disipar el calor del condensador y garantizar el correcto funcionamiento de la unidad exterior era muy superior a la capacidad de renovación de las rejillas de ventilación existentes en la sala de calderas.
- **Incompatibilidad volumétrica:** las dimensiones físicas de la unidad exterior VRF y los perímetros normativos de mantenimiento requeridos excedían la superficie útil disponible en dicha sala técnica.

Con el fin de subsanar estas problemáticas, se determinó trasladar el equipo de producción al bajo cubierta. Para validar este nuevo emplazamiento y asegurar las condiciones de operación establecidas por el fabricante, se comprobó en CYPETHERM HE Plus que la temperatura máxima alcanzada en dicho recinto no superaba la temperatura nominal de operación (-25°C en calefacción y 48°C en refrigeración).

Respecto a la red de distribución interior, tanto las unidades evaporadoras terminales como los elementos de difusión se proyectan integrados en los falsos techos de los recintos. Este espacio se aprovecha también para el trazado de las líneas frigoríficas.

4.3.1 Predimensionado de los equipos

El predimensionado de los diferentes componentes del sistema se estructuró conforme a los siguientes balance y restricciones físicas de diseño [7] [8]:

- **Suficiencia de potencia térmica nominal de unidades interiores:** La potencia térmica nominal de calefacción y refrigeración de la unidad interior seleccionada debe ser superior a la suma de las cargas térmicas de diseño de los recintos a los que da servicio.

$$P_{unidad\ interior} > \sum P_{necesaria\ recintos} \quad (3)$$

- **Suficiencia de caudal de aire:** el caudal volumétrico nominal de impulsión de la unidad interior debe ser capaz de desplazar un volumen de fluido superior a los caudales de climatización requeridos por los recintos asociados.

$$\dot{V}_{unidad\ interior} > \sum \dot{V}_{necesario\ recintos} \quad (4)$$

$$\dot{V} = \frac{Potencia_{recinto}}{C_{p\ aire} * \rho_{aire} * \Delta T} \quad (5)$$

$$\Delta T = T_{impulsion} - T_{diseño} \quad (6)$$

- **Dimensionamiento de los elementos de difusión:** la sección de las rejillas de impulsión y retorno se eligió de manera que el volumen que puede circular a través de estas sea mayor que el caudal de climatización del recinto al que pertenecen.

$$\dot{V}_{rejilla} > \dot{V}_{necesario\ recinto} \quad (7)$$

- **Suficiencia de potencia térmica nominal de la unidad exterior:** la potencia térmica nominal de la unidad exterior debe satisfacer la suma de las capacidades nominales de las unidades interiores instaladas.

$$P_{unidad\ exterior} > \sum P_{unidades\ interiores} \quad (8)$$

4.3.2 Agrupación de recintos

Mediante la aplicación sistemática de las expresiones analíticas de predimensionado y los balances térmicos por recinto, se cuantificó el caudal volumétrico de aire de impulsión requerido por cada recinto para absorber las cargas de diseño de invierno y verano. Con objeto de optimizar el trazado de las líneas de distribución de refrigerante y la red de conductos, los recintos se sectorizaron por plantas, consolidando grupos de demanda independientes. El criterio elegido para la agrupación de espacios fue la proximidad entre recintos y por consiguiente la reducción de costes en conductos de climatización.

Tabla 12- Agrupación de recintos. Fuente: Elaboración propia.

Planta	Recinto	Pot _{max} (W)	Superficie (m ²)	Ṽ (m ³ /h)	Ṽ (l/s)	Q _{unidad int} (l/s)	Unidad interior seleccionada	Rejilla Seleccionada
SOTANO	A -1.01	3480	65,30	692,54	192,371	324,876	AF-DM-140-1P	400x200
	A -1.02	616	10,90	122,59	34,052			125x125
	A -1.04	448	8,50	89,15	24,765			125x125
	A -1.05	543	7,40	108,06	30,017			125x125
	A -1.07	790	13,50	157,21	43,671			125x125
	A -1.08	257	6,80	51,14	14,207	231,564	AF-DM-80-1P	125x125
	A -1.09	182	4,80	36,22	10,061			125x125
	A -1.10	3750	81,40	746,27	207,297			400x200
	A -1.11	2341	50,60	465,87	129,409	283,085	AF-DM-80-1P	300x150
	A -1.12	1608	35,30	320,00	88,889			300x150
	A -1.13	1172	20,90	233,23	64,787			200x125
	A -1.15	666	14,60	132,54	36,816	938,419	(3x)AF-DM-112-1P	125x125
	A -1.16	16310	181,10	3245,77	901,603			(3x) 500x250
	A -1.18	1436	22,70	285,77	79,381			300x150
	A -1.19	649	13,20	129,15	35,876	115,257	AF-DM-80-1P	125x125
	A -1.23	1784	34,60	355,02	98,618			300x150
BAJA	A -1.24	597	12,40	118,81	33,002	172,471	AF-DM-80-1P	125x125
	A -1.25	739	13,20	147,06	40,851			125x125
	A +0.01	1642	18,20	326,77	90,768	214,704	AF-DM-80-1P	200x125
	A +0.02	1431	14,80	284,78	79,104			125x125
	A +0.03	51	10,40	10,15	2,819			125x125
	A +0.09	741	12,60	147,46	40,962			125x125
	A +0.10	19	10,40	3,78	1,050			125x125
	A +0.04	1583	33,70	315,02	87,507	332,559	AF-DM-112-1P	300x150
	A +0.05	2664	92,10	530,15	147,264			400x200
	A +0.06	1164	13,80	231,64	64,345			125x125
	A +0.07	467	18,90	92,94	25,815			125x125
	A +0.12	138	9,00	27,46	7,629			125x125
	A +0.13	537	28,90	106,87	29,685	372,195	AF-DM-140-1P	125x125
	A +0.11	6733	179,10	1339,90	372,195			500x250
PRIMERA	A +1.01	1270	54,10	252,74	70,205	183,748	AF-DM-80-1P	200X125
	A +1.02	383	24,80	76,22	21,172			125x125
	A +1.03	719	50,50	143,08	39,746			125x125
	A +1.04	32	7,50	6,37	1,769			125x125
	A +1.05	27	6,40	5,37	1,493			125x125
	A +1.06	31	7,10	6,17	1,714			125x125
	A +1.07	398	25,10	79,20	22,001			125x125
	A +1.08	11	3,20	2,19	0,608			125x125
	A +1.09	13	3,90	2,59	0,719			125x125
	A +1.10	440	21,90	87,56	24,323			125x125
SEGUNDA	A +2.01	409	5,70	81,39	22,609	158,596	AF-DM-80-1P	125x125
	A +2.02	491	5,40	97,71	27,142			125x125
	A +2.03	1969	66,30	391,84	108,845			300x150
	A +2.04	2645	21,80	526,37	146,213	291,874	AF-DM-90-1P	300x150
	A +2.05	2635	66,00	524,38	145,661			300x150
	A +2.09	1899	70,90	377,91	104,975	272,471	AF-DM-112-1P	300x150
	A +2.10	1676	66,00	333,53	92,648			300x150
	A +2.11	1354	21,10	269,45	74,848			300x150
	A +2.06	2041	73,30	406,17	112,825	149,751	AF-DM-80-1P	300x150
	A +2.12	668	29,60	132,94	36,926			125x125
TERCERA	A +3.01	974	16,40	193,83	53,842	265,506	AF-DM-80-1P	200x125
	A +3.02	1476	65,20	293,73	81,592			300x150
	A +3.07	980	29,90	195,02	54,174			200x150
	A +3.03	1373	22,70	273,23	75,898	367,441	AF-DM-140-1P	300x150
	A +3.04	5274	144,50	1049,55	291,542			500x250
	A +3.05	5220	144,50	1038,81	288,557			500x250
	A +3.06	1372	22,70	273,03	75,843	364,400	AF-DM-140-1P	300x150

4.3.3 Selección de equipos

Establecidos los requerimientos mecánicos e hidráulicos en la fase de predimensionado, se procedió a la selección definitiva de las unidades terminales y de producción a través de la herramienta Open BIM BOSCH.

Tabla 13- Especificaciones de las unidades interiores. Fuente: Elaboración propia.

Modelo	Potencia nominal de calefacción (W)	Potencia nominal de refrigeración (W)	Caudal máximo de aire (l/s)
AF-DM-80-1-P	9000	8000	283,3
AF-DM-90-1-P	9000	10000	283,3
AF-DM-112-1-P	12500	11200	358.30
AF-DM-140-1-P	15500	14000	461.10

Tabla 14- Especificaciones de las rejillas de impulsión y de retorno. Fuente: Elaboración propia.

Impulsion		Retorno	
Modelo	Caudal máximo de aire (l/s)	Modelo	Caudal máximo de aire (l/s)
125x125	25-46	125x125	25-46
200x125	41-73	200x125	41-73
300x150	73-132	300x150	73-132
400x200	130-234	400x200	130-234
500x250	203-366	500x250	203-366

Tabla 15- Especificaciones de la unidad exterior. Fuente: Elaboración propia.

Modelo	Potencia nominal de calefacción	COP nominal	Potencia nominal de refrigeración	EER nominal
AF5300A 166 C-3	168500 W	3,63	168500 W	3,05
AF5300A 175C-4	175000 W	3,59	175000 W	2,99
AF5300A 180 C-5	180000 W	3,5	180000 W	2,9
AF5300A 185 C-6	185000 W	3,91	185000 W	3,18
AF5300A 192 C-7	191500 W	3,89	191500 W	3,23
AF5300A 197 C-8	196500 W	3,89	196500 W	3,2

Tabla 16- Tabla resumen de equipos de la instalación de climatización. Fuente: Elaboración propia.

Equipo	Modelo	Cantidad
Unidad exterior	AF5300A 197 C-8	1
Unidad interior	AF-DM-80-1-P	8
	AF-DM-90-1-P	1
	AF-DM-112-1-P	6
	AF-DM-140-1-P	4
Rejilla impulsión	SG 125x125	30
	SG 200x125	5
	SG 300x150	15
	SG 400x200	2
	SG 500x250	5
Rejilla retorno	EG 125x125	30
	EG 200x125	5
	EG 300x150	15
	EG 400x200	2
	EG 500x250	5



Figura 32- Unidad exterior VRF. Fuente: bosch-industrial.com.

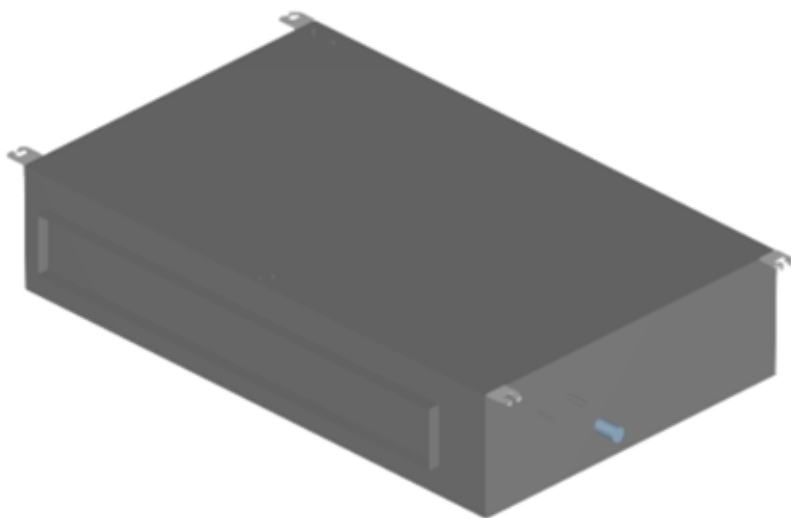


Figura 33- Unidad interior. Fuente: bosch-industrial.com.

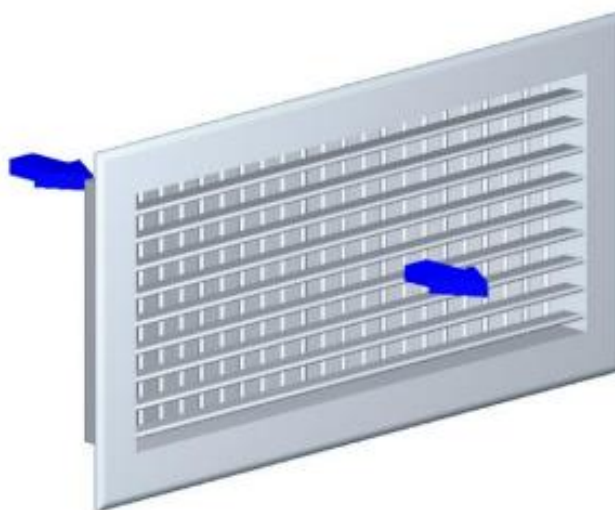


Figura 34- Rejilla de impulsión. Fuente: kventil.com

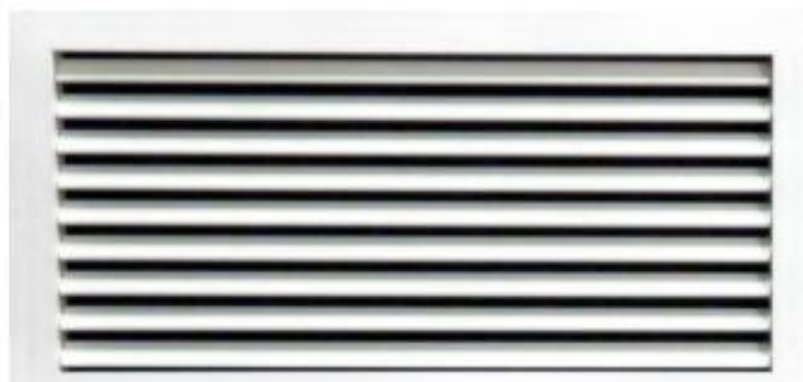


Figura 35- Rejilla de retorno. Fuente: kventil.com

4.3.4 Comprobación y diseño en Open BIM BOSCH

Consolidada la selección de las máquinas, se ejecutó el diseño tridimensional y el trazado de la instalación sobre el modelo BIM integrado en el ecosistema CYPE. Este proceso abarcó el posicionamiento espacial de las unidades, el dimensionamiento e interconexión de las líneas frigoríficas y la implantación de los sistemas de distribución de aire.

4.3.4.1 Importación del modelo sincronizado

Para la modelización de la instalación de climatización y la comprobación de su correcto funcionamiento se tomó como base geométrica el modelo arquitectónico realizado con IFC Builder y el modelo de cargas térmicas generado con CYPETHERM LOADS.

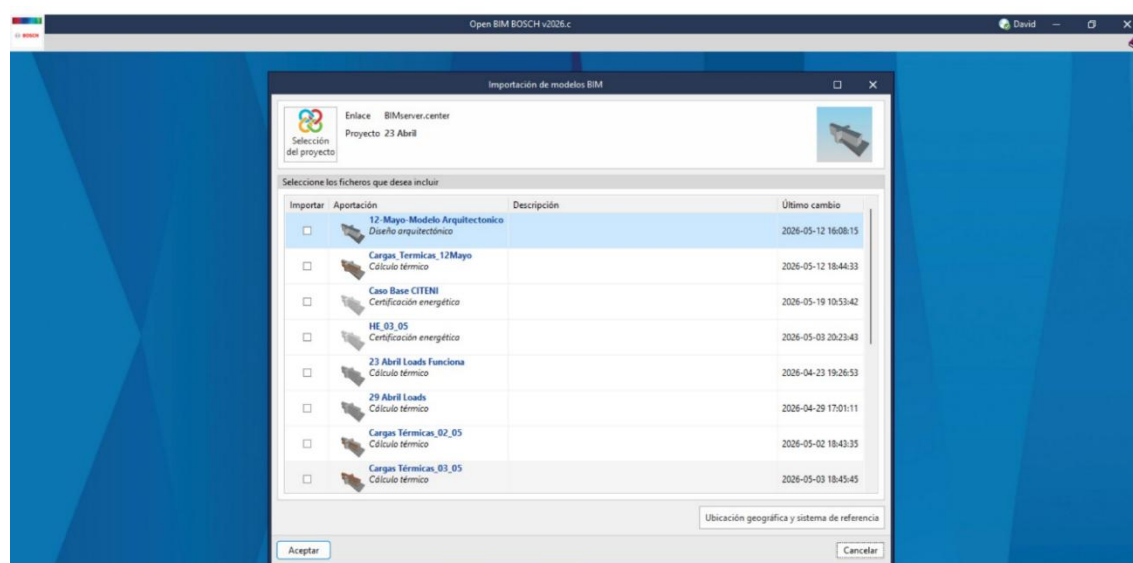


Figura 36- Importación del modelo arquitectónico y de cargas térmicas. Fuente: Open BIM BOSCH.

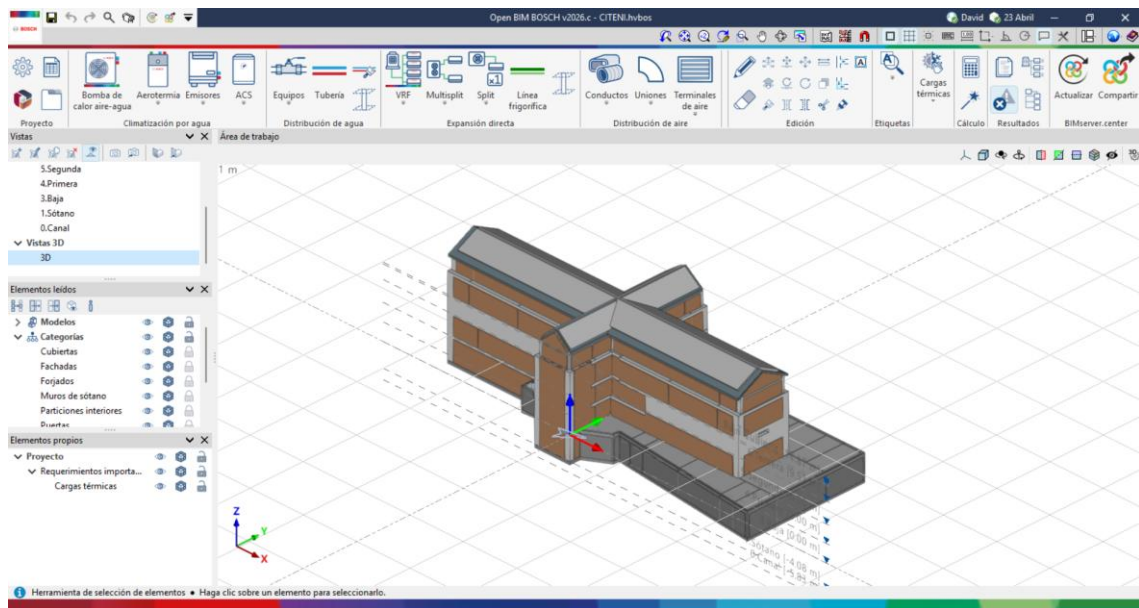


Figura 37- Modelo arquitectónico importado. Fuente: Open BIM BOSCH.

4.3.4.2 Inserción de equipos

Con el modelo arquitectónico importado se procedió a la implantación física de la unidad exterior en el bajo cubierta, resolviendo las restricciones volumétricas y de ventilación surgidas.

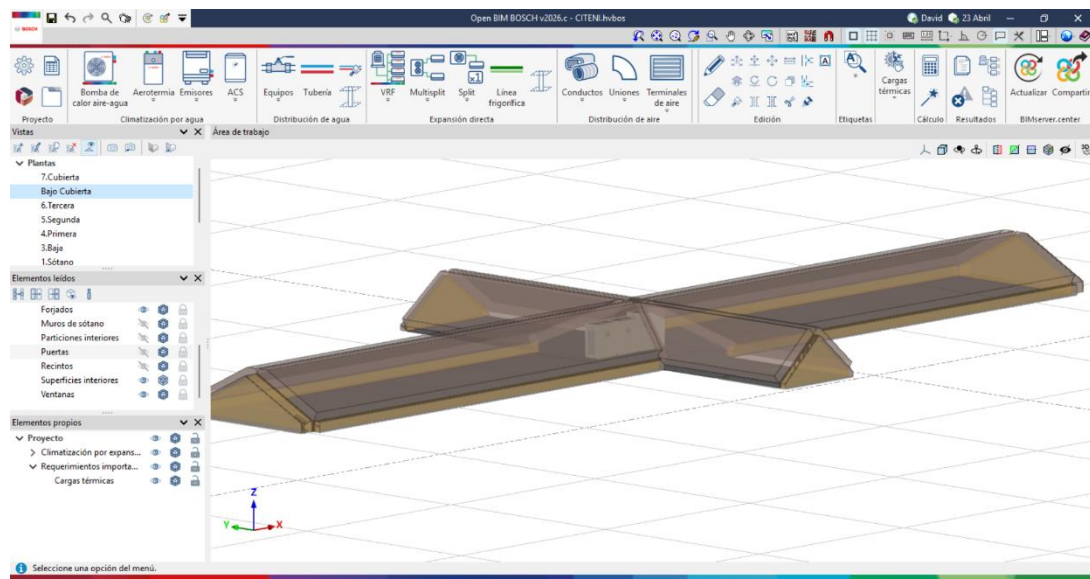


Figura 38- Ubicación de la unidad exterior. Fuente: Open BIM BOSCH.

4.3.4.3 Distribución de unidades terminales interiores

Consolidada la planta de generación, se introdujeron en el modelo las unidades interiores predimensionadas para grupo de recintos, así como las rejillas de impulsión y de retorno y los conductos de aire asociadas a estas.

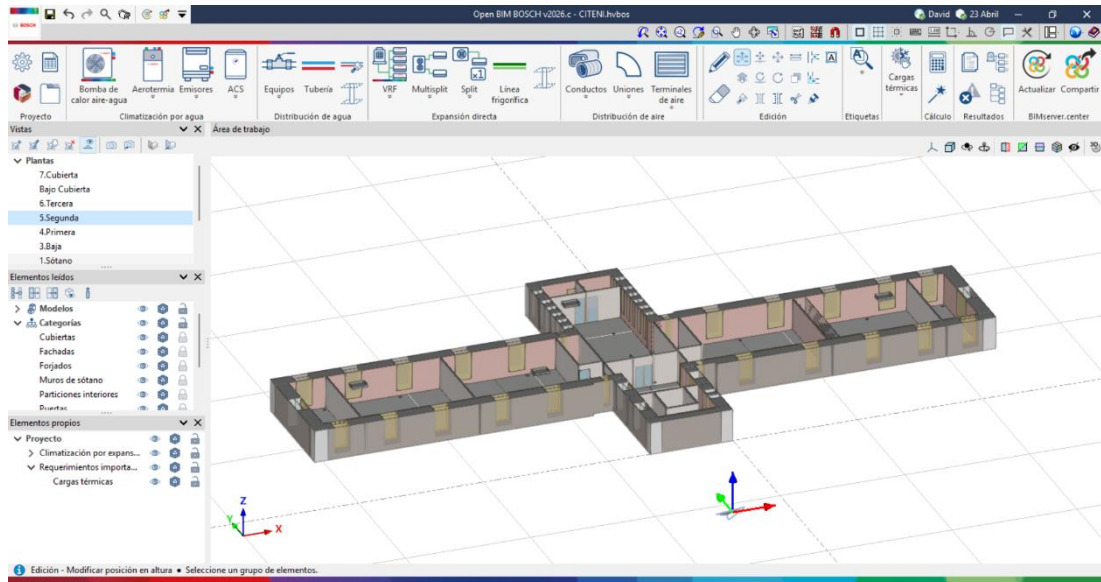


Figura 39- Disposición en planta de unidades interiores. Fuente: Open BIM BOSCH.

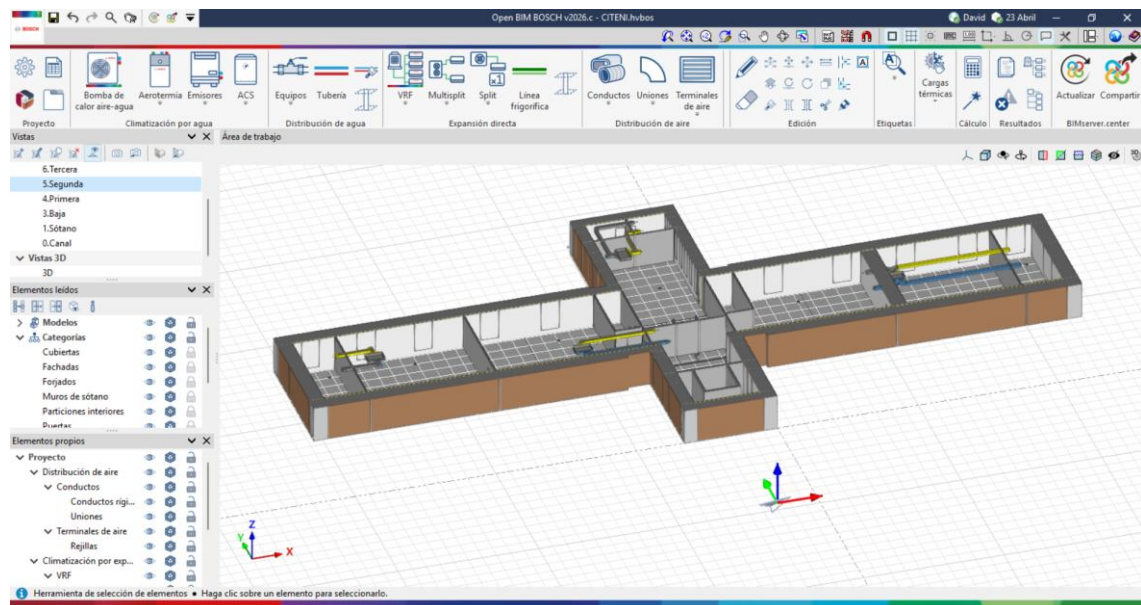


Figura 40- Diseño de conductos y elementos de difusión. Fuente: Open BIM BOSCH.

4.3.4.4 Asignación de cargas térmicas

Una vez posicionadas las unidades interiores y la red de distribución la siguiente fase consistió en el acoplamiento térmico entre locales y los equipos evaporadores. Es te procedimiento consiste en indexar la carga térmica de refrigeración y calefacción de cada recinto a la unidad interior encargada de su acondicionamiento, permitiendo al programa verificar que la potencia corregida de la máquina es superior a la suma de los recintos que abastece.

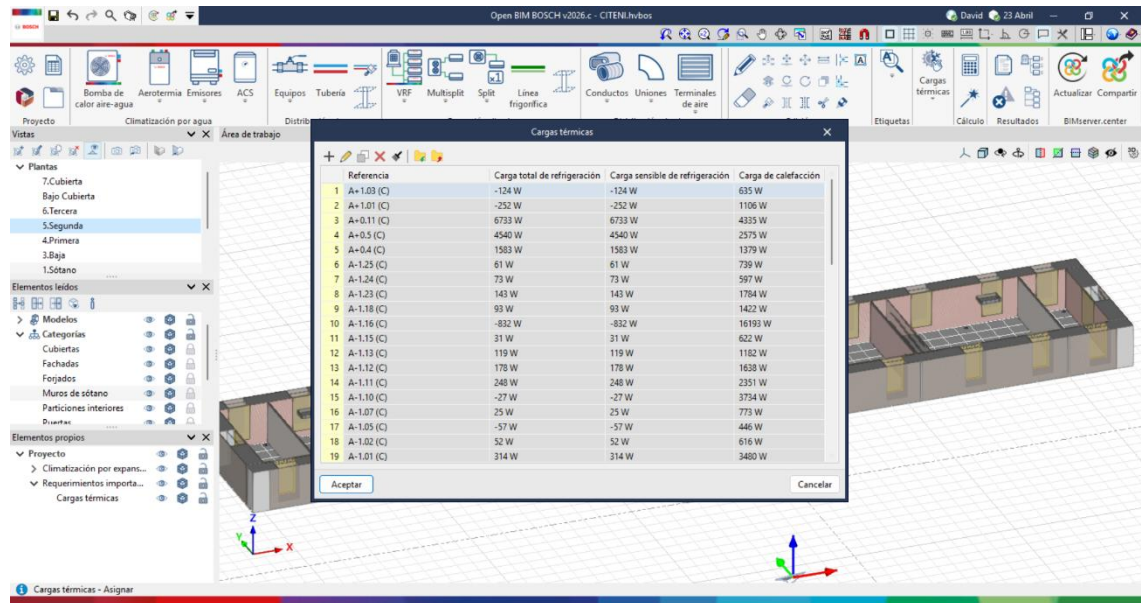


Figura 41- Asignación de cargas térmicas. Fuente: Open BIM BOSCH.

4.3.4.5 Trazado de red frigorífica

La fase final de la simulación consistió en el despliegue de las líneas frigoríficas encargadas de transportar el refrigerante R-410A en fase liquido-gas hacia los terminales interiores. Para garantizar la optimización del recorrido, los diámetros y las pérdidas de carga lineales, se utilizó la herramienta Trazado Automático VRF que proporciona el programa.

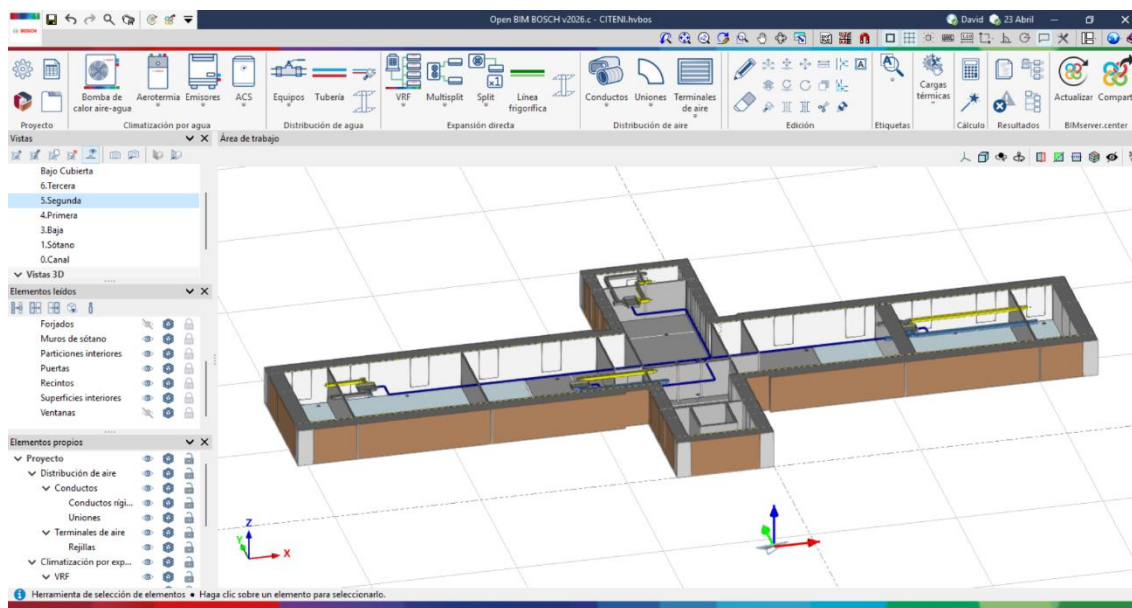


Figura 42- Trazado de las líneas frigoríficas. Fuente: Open BIM BOSCH.

4.3.4.6 Simulación y obtención de resultados

Completada la introducción de todos los sistemas, se ejecutó el motor de cálculo del software para realizar la validación final de este. El algoritmo verificó la ausencia de errores y mostró los resultados de cálculo. A continuación, se muestra el documento de resultados que ofrece el programa.

Tabla 17- Comprobaciones de diseño. Fuente: Elaboración propia.

Conformidad del proyecto

Comprobaciones	Diseño	Especificación	Cumple
Unidades interiores conectadas	19	1- 64	✓
Ratio de conexión en refrigeración	99.59 %	50 % - 130 %	✓
Ratio de conexión en calefacción	99.1 %	50 % - 130 %	✓
Longitud total de tubería	296.58 m	1000 m	✓
Longitud real de tubería a la unidad más alejada	46.35 m	175 m	✓
Longitud equivalente de tubería a la unidad más alejada	55.62 m	200 m	✓
Longitud real de tubería a la unidad más alejada, desde la primera derivación	45.75 m	90 m	✓
Diferencia de altura entre unidades interiores y exteriores	13.61 m	90 m	✓
Diferencia de altura entre unidades interiores	13.11 m	30 m	✓
Carga total de refrigerante	79.66 kg	23.9 kg	⚠

Tabla 18- Componentes del sistema de climatización. Fuente: Elaboración propia

VRF

Unidades exteriores, bomba de calor (2 tubos)

Descripción	Número de pieza	Cantidad	UD
AF5300A 56 C-3.AF5300AC	8733500308	2	Ud
AF5300A 85 C-3.AF5300AC	8733500313	1	Ud

Unidades interiores, con distribución por conductos

Descripción	Número de pieza	Cantidad	UD
AF-DM 112-1 P. AF-DM (Medium duct)	7733700945	6	Ud
AF-DM 140-1 P. AF-DM (Medium duct)	7733700946	4	Ud
AF-DM 80-1 P. AF-DM (Medium duct)	7733700943	8	Ud
AF-DM 90-1 P. AF-DM (Medium duct)	7733700944	1	Ud

Derivaciones

Descripción	Número de pieza	Cantidad	UD
AF-BJ01	8733500631	5	Ud
AF-BJ02	8733500632	2	Ud
AF-BJ03	8733500633	7	Ud
AF-BJ04	8733500634	2	Ud
AF-BJ05	8733500635	2	Ud
AF-BJO 03	8733500630	2	Ud

Rejillas

Código	Descripción	Cantidad	UD
EG-125x125mm	EG-125x125mm .ExhaustgrilleEG-125x125mm	30	Ud
EG-200x125mm	EG-200x125mm .ExhaustgrilleEG-200x125mm	5	Ud
EG-300x150mm	EG-300x150mm .ExhaustgrilleEG-300x150mm	15	Ud
EG-400x200mm	EG-400x200mm .ExhaustgrilleEG-400x200mm	3	Ud
EG-500x250mm	EG-500x250mm .ExhaustgrilleEG-500x250mm	6	Ud
SG-125x125mm	SG-125x125mm .DoubledefflectionSG-125x125mm	30	Ud
SG-200x125mm	SG-200x125mm .DoubledefflectionSG-200x125mm	5	Ud
SG-300x150mm	SG-300x150mm .DoubledefflectionSG-300x150mm	15	Ud
SG-400x200mm	SG-400x200mm .DoubledefflectionSG-400x200mm	3	Ud
SG-500x250mm	SG-500x250mm .DoubledefflectionSG-500x250mm	6	Ud

Líneas frigoríficas

Descripción	Cantidad	UD
9.5 mm. Líquido	265.37	m
12.7 mm. Líquido	11.13	m
15.9 mm. Gas	150.71	m
15.9 mm. Líquido	1.99	m
19.1 mm. Líquido	3.38	m
19.1 mm. Gas	113.71	m
22.2 mm. Gas	0.95	m
22.2 mm. Líquido	14.71	m
25.4 mm. Gas	6.16	m
28.6 mm. Gas	4.97	m
31.8 mm. Gas	5.37	m
34.9 mm. Gas	4.58	m
41.3 mm. Gas	6.00	m
44.5 mm. Gas	4.13	m

Refrigerante

Carga adicional

Descripción	Cantidad	UD
R-410A (EN378)	44.26	kg

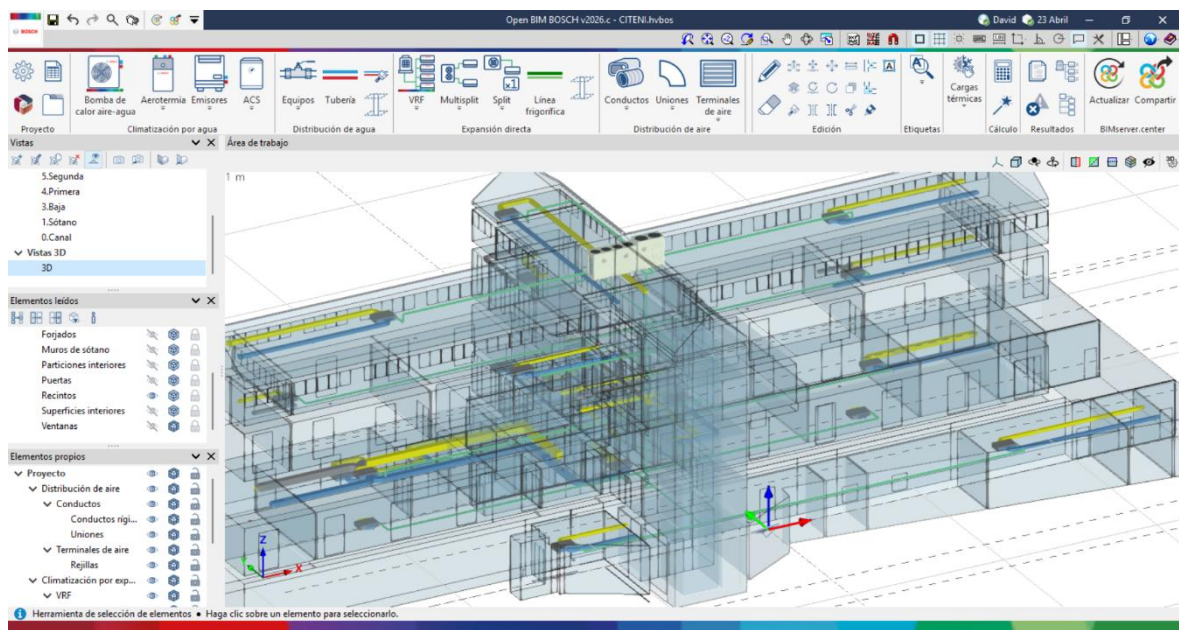


Figura 43- Diseño de la instalación de climatización. Fuente: Open BIM BOSCH.

4.4 Diseño de la instalación de fotovoltaica (PVsyst)

El diseño de la planta de generación fotovoltaica sobre la cubierta del CITENI responde a la necesidad estratégica de reducir el consumo de energía primaria no renovable y por consiguiente reducir las emisiones de CO₂. La instalación se proyecta sobre el alero de la cubierta que está orientado sureste- noroeste con el fin de maximizar la captación de radiación solar.

4.4.1 Restricciones geométricas de diseño

4.4.1.1 Inclinación de los módulos

La pendiente del faldón de cubierta impone una limitación física de 27°. Con el fin de adaptar el diseño a las soluciones estructurales y soportes estandarizados por los fabricantes, se evaluaron dos alternativas comerciales: inclinaciones fijas a 25° y 30°. El comportamiento y rendimiento de ambas configuraciones se validó mediante simulación en PVsyst para determinar el escenario de máxima eficiencia de producción.



Figura 44- Soporte inclinado de módulos fotovoltaicos. Fuente: dome-solar.com

4.4.1.2 Orientación y Azimut

El eje longitudinal del CITENI presenta una desviación de 24° respecto al Norte geográfico, motivo por el que los módulos se proyectarán con un ángulo de azimut homólogo al del edificio, permitiendo la integración paralela al plano de la cubierta y optimizando el uso del espacio disponible. El edificio del CITENI está orientado 24° respecto al Norte, por tanto, el azimut de los paneles tendrá el mismo.



Figura 45- Azimut del edificio CITENI. Fuente: Google maps.

4.4.1.3 Superficie útil de captación disponible

El área asignada para la implantación de los módulos consta de dos subestructuras rectangulares simétricas de 4,65 m de altura y 24 m de longitud. AL objetivo de garantizar los pasillos de mantenimiento, operación y perímetros de seguridad, se ha dispuesto una franja perimetral libre de 0,5m en los bordes de cada rectángulo. La superficie disponible para la captación fotovoltaica se consolida en 167,9 m²

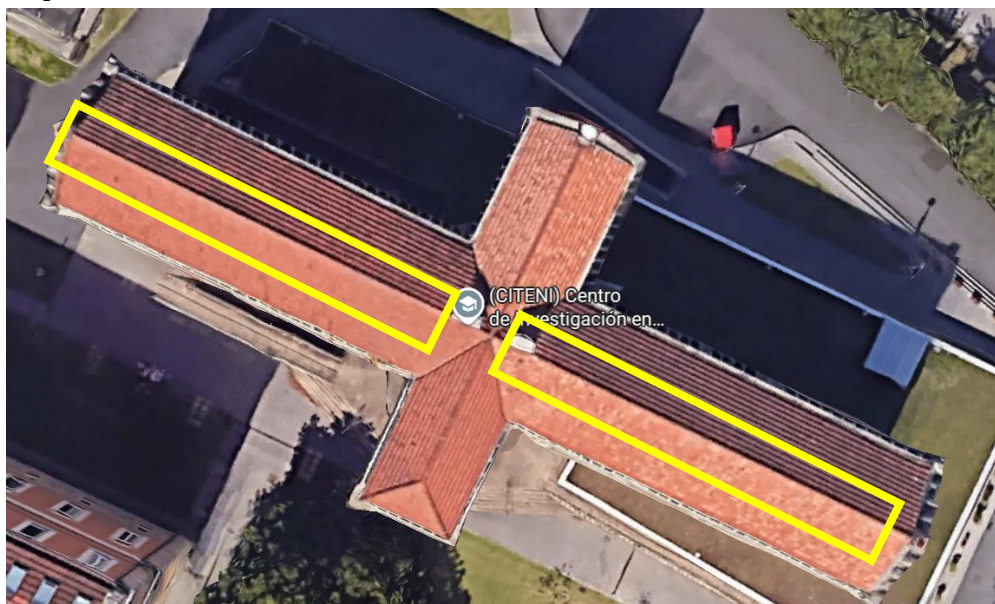


Figura 46- Superficie disponible de instalación de módulos fotovoltaicos. Fuente: Google maps.

4.4.1.4 Distancia entre filas y análisis de sombras propias

Para mitigar las pérdidas por sombreado de los módulos fotovoltaicos entre líneas de paneles, el cálculo de la distancia mínima entre filas se efectuó analizando las posiciones de los módulos (disposición vertical y apaisada) para los diferentes ángulos de inclinación planteados. El cálculo se realizó para el escenario más desfavorable para el hemisferio norte: el solsticio de invierno (21 de diciembre), evaluando un rango de ± 2 horas respecto al mediodía solar que ocurre a las 13.30 h.

Fecha	21/12/2026 GMT1	
Coordenar	43.4828037, -8.2231164	
Ubicación	43.48280370, -8.22311640	
hora	Elevación	Azmut
09:02:31	-0.833°	122.3°
9:30:00	3.26°	127.09°
10:00:00	7.44°	132.58°
10:30:00	11.25°	138.38°
11:00:00	14.64°	144.52°
11:30:00	17.55°	151.01°
12:00:00	19.89°	157.84°
12:30:00	21.63°	164.96°
13:00:00	22.7°	172.3°
13:30:00	23.08°	179.75°
14:00:00	22.75°	187.21°
14:30:00	21.72°	194.56°
15:00:00	20.03°	201.7°
15:30:00	17.72°	208.54°
16:00:00	14.85°	215.06°
16:30:00	11.49°	221.22°
17:00:00	7.7°	227.05°
17:30:00	3.55°	232.56°
17:59:27	-0.833°	237.7°

Figura 47- Datos de altura y azimut solar para el CITENI. Fuente: Google maps.

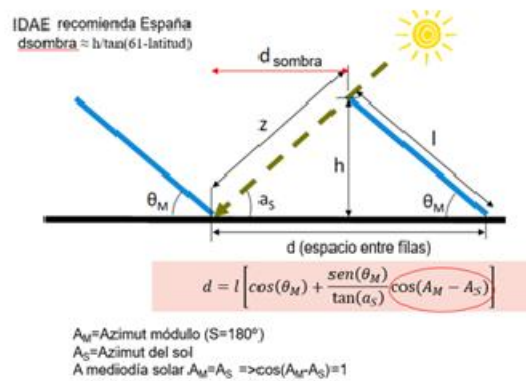


Figura 48- Expresión de cálculo de distancia entre filas. Fuente: Google maps.

Tabla 19- Distancia entre filas para los diferentes escenarios. Fuente: Elaboración propia.

Inclinación del panel	Distancia entre filas (m)	Nº filas (strings)	Nº módulos en paralelo	Nº total de módulos por superficie	Nº total módulos en cubierta
25° (vertical)	0,25	1	20	20	40
25° (apaisado)	0,12	2	9	18	36
30° (vertical)	0	1	20	20	40
30° (apaisado)	0	2	9	18	36

4.4.2 Compatibilidad técnica y criterios de acoplamiento al inversor

El dimensionamiento de la instalación fotovoltaica queda restringido por las ventanas operativas del inversor seleccionado, debiendo verificar las siguientes condiciones de contorno [6]:

- **Máximo número de módulos en un string:** Bajo condiciones extremas de temperatura, la tensión que entregue el generador fotovoltaico no puede superar la máxima tensión de entrada al inversor. En el caso de funcionamiento en vacío, se puede suponer que la temperatura del módulo es muy similar al ambiente.

$$N_{\text{módulos serie máx}} \leq \frac{\text{Min}(V_{\text{máx absoluto inverter}}, V_{\text{max module}})}{V_{OC}(T^{\text{module mín}})} \quad (9)$$

- **Número de módulos en un string para que el inversor funcione dentro del rango de V_{MPP}**

$$N_{\text{módulos serie max}} \leq \frac{V_{MPP\text{máx inverter}}}{V_{MPP\text{ module max}}} \quad (10)$$

$$\frac{V_{MPP\text{min inverter}}}{V_{MPP\text{ module min}}} \leq N_{\text{módulos serie min}} \quad (11)$$

- **Número máximo de strings en paralelo:** La corriente máxima del generador fotovoltaico debe ser menor que la máxima corriente que soporta el inversor.

$$N_{\text{strings max}} \leq \frac{I_{\text{max inverter}}}{I_{sc_string_max (Gmax)}} \quad (12)$$

Al aplicar las ecuaciones de compatibilidad del inversor con los parámetros técnicos de los equipos, se obtuvieron las siguientes restricciones operativas conjuntas:

$$N_{\text{modulos series max}} \leq \frac{1100}{63,97} = 17,20 \sim 17 \text{módulos} \quad (13)$$

$$N_{\text{modulos series max}} \leq \frac{1000}{53,84} = 18,57 \sim 18 \text{módulos} \quad (14)$$

$$\frac{200}{42,96} \leq N_{\text{modulos series min}} = 4,66 \sim 4 \text{módulos} \quad (15)$$

$$N_{\text{strings max}} \leq \frac{360}{14,56} = 24,73 \sim 24 \text{ strings} \quad (16)$$

Por tanto, la instalación en cubierta deberá tener entre 4 y 17 módulos en serie con un máximo de 24 strings en paralelo.

4.4.3 Simulación de escenarios

Para el campo de captación, se analizaron tres módulos comerciales de alta potencia y gran formato (2,4m x 1,14 m); los fabricantes seleccionados fueron IRM-600 de Irma Solar, HSM-BD72-660 de TCL solar y AIKO-680 de Aiko Solar. Finalmente se eligió el modelo de Aiko Solar **AIKO-680** ya que para la misma superficie de producción ofrecía el mayor voltaje pico.

El inversor seleccionado fue el modelo **SUN2000-20TKL-M5** del fabricante Huawei.



Figura 49- Módulo fotovoltaico AIKO Solar 685. Fuente: aikosolar.com



Figura 50- Inversor trifásico HUAWEI SUN2000 20TKL M5. Fuente: autosolar.es.

Tabla 20- Parámetros de los equipos de la instalación fotovoltaica. Fuente: Elaboración propia.

Datos meteorológicos		
Maximun Ambient Temperature (TaMax)	35	°C
Minimum Ambient Temperature (Tamin)	-10	°C
Maximun Irradiance (W/m2)	1000	W/m2
Minimun Irradiance (W/m2)	100	W/m2
Parámetros módulo (AIKO A680)		
STC CONDITIONS		
Peak Power (Wp)	680	W
Voc (Open Circuit Voltage)	59,04	V
Vmpp (Maximum Power Point Voltage)	48,91	V
Isc (Short Circuit Current)	14,56	A
Imp (Maximum Power Point Current)	13,91	A
αT° (Voc)	-0,26	%/K
NOCT CONDITIONS		
NOCT (Nominal Operation Cell Temperature)	43	°C
Parámetros corregidos módulo (AIKO A680)		
αT° (Voc) V/°K	-0,153504	V/°K
Maximum Module Temperature (Tm MAX)	63,75	°C
Minimum Module Temperature (Tm MIN)	-7,125	°C
Maximum Voc (Tm MIN)	63,971316	V
Minimum Voc (Tm MAX)	53,09172	V
Maximum Isc (Gm MAX)	14,56	A
Maximum Vmpp (Gmin, Tmin)	53,841316	V
Minimum Vmpp (Gmax, Tmax)	42,96172	V
Parámetros inversor (HUAWEI SUN2000 TKL-20 M5)		
Rated Power (kWn)	20	kW
Maximum input Voltage (Vdc)	1100	V
Maximum MPP Voltage (VMppt)	1000	V
Minimum MPP Voltage (Vmppt)	200	V
Maximum Input Current (Idc)	360	A

4.4.3.1 Definición del patrón de sombras externas

El estudio de sombras arrojadas por elementos externos a la instalación es muy importante para prevenir caídas de tensión y puntos calientes. Utilizando la cartografía tridimensional mediante Google Earth, se modelaron los volúmenes correspondientes a las edificaciones cercanas al CITENI. El análisis de trayectorias solares realizado en PVSyst por el propio software determinó que ningún elemento del entorno del campus proyecta sombras sobre el faldón de la cubierta en las horas en las que la radiación es útil para la generación.

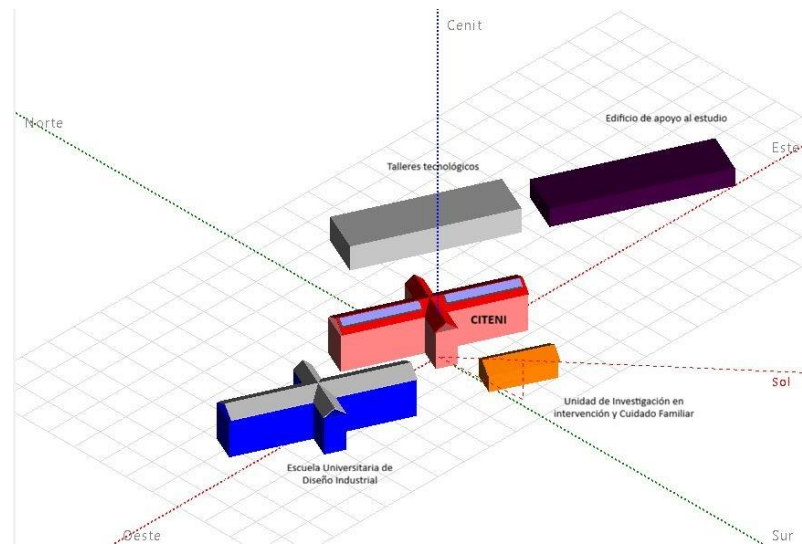


Figura 51- Proyección de sombras para el día 21 de diciembre a las 13.15h. Fuente: PVSyst.

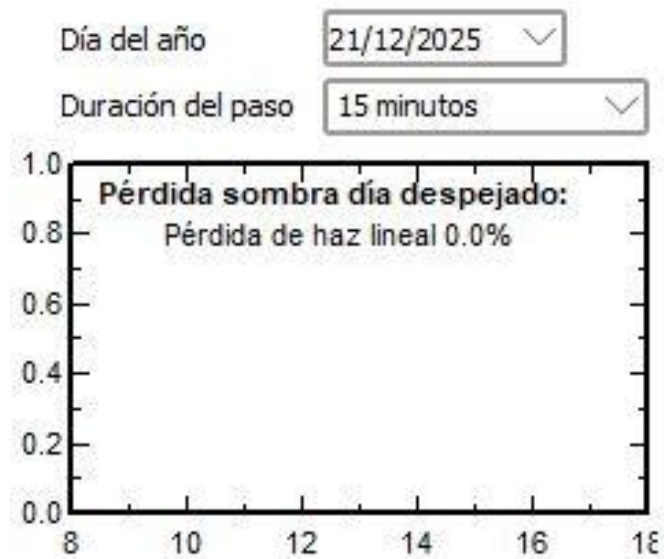


Figura 52- Gráfico de pérdidas por sombreado para el día 21 de Diciembre. Fuente: PVSyst.

4.4.3.2 Selección de la configuración óptima

A partir de las restricciones físicas y eléctricas consolidadas, se determinó la producción energética anualizada de los cuatro escenarios planteados. Los balances de energía resultantes se sintetizan en la *Tabla 20*.

Tabla 21- Resultados de simulación para los cuatro escenarios planteados. Fuente: Elaboración propia.

Inclinación del panel	N° strings	N° módulos por string	N° módulos totales	Producción (MWh/año)
25° (vertical)	3	13	39	34,5
25° (apaisado)	2	9	36	32,3
30° (vertical)	3	13	39	34,7
30° (apaisado)	2	9	36	32,5

El análisis comparativo dictaminó que el escenario óptimo correspondía a una configuración de soportes con 30° de inclinación y disposición de los módulos en vertical. Esta alternativa maximiza la captación de radiación para la ubicación de la instalación, alcanzando una producción anual de **34,7 MWh/año**.

Tabla 22- Especificaciones de los módulos fotovoltaicos. Fuente: Elaboración propia.

Modelo	Potencia pico (Wp)	Dimensiones (mm)	Tensión circuito abierto (V)	Corriente de cortocircuito (A)	Unidades
AIKO SOLAR 685	685	2465x1134	59	3,51	39

Tabla 23- Especificaciones del inversor. Fuente: Elaboración propia.

Modelo	Potencia nominal (kVA)	Voltaje máximo CC (V)	V _{MPP} máx	V _{MPP} mín	Corriente de cortocircuito (A)
HUAWEI SUN2000 20TKL M5	20	1100	1000	200	3,51

Tabla 24. Tabla resumen de equipos en la instalación fotovoltaica. Fuente: Elaboración propia.

Equipo	Modelo	Cantidad
Módulo fotovoltaico	AIKO Solar 685	39
Inversor	Huawei sun 2000 20TKL M5	1

4.4.4 Resultados de simulación

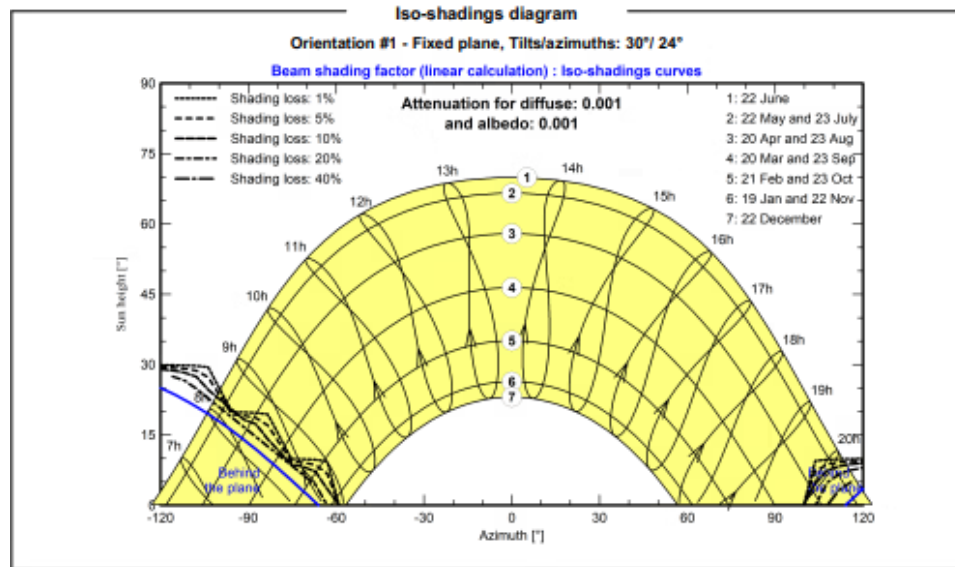


Figura 53- Diagrama iso-sombreado de la instalación. Fuente: PVSyst.

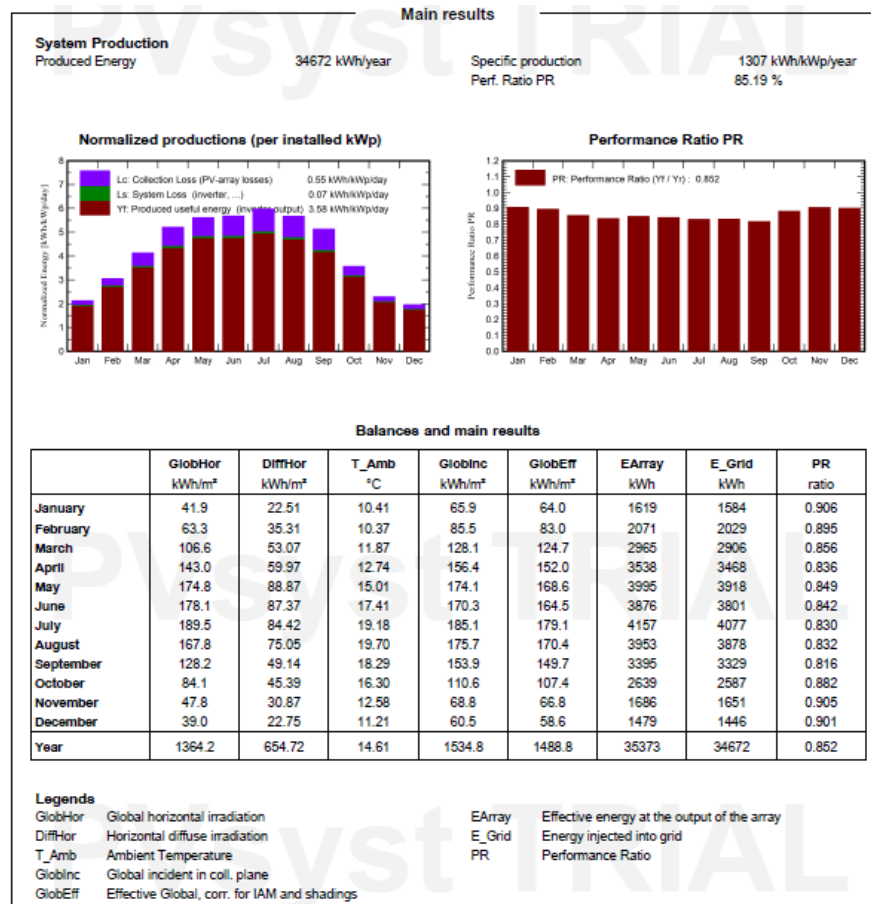


Figura 54- Informe de producción de la instalación. Fuente: PVSyst.

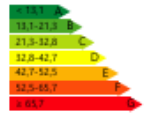
La calificación energética final del edificio tras aplicar las medidas seleccionados resultó de categoría A para el término de emisiones con un valor de 10,84 kgCO₂/(m²*año) y de categoría B para el término de consumo de energía primaria no renovable con un valor de 63,99 kWh/(m²*año).

Los indicadores de sostenibilidad ambiental consolidan la viabilidad del conjunto de medidas seleccionado. Específicamente, se ha cuantificado una reducción de emisiones de CO₂ del **70,23%** respecto al caso inicial, acompañada de una disminución en el consumo de energía primaria no renovable del **61,37%**. Estas tasas de mitigación confirman la eficacia del proyecto como estrategia rehabilitación energética y descarbonización activa del CITENI.

Calificación energética del edificio

Zona climática	C1	Uso	Otros usos
----------------	----	-----	------------

1. CALIFICACIÓN ENERGÉTICA DEL EDIFICIO EN EMISIONES

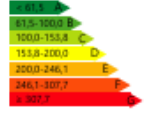
INDICADOR GLOBAL	INDICADORES PARCIALES			
	CALEFACCIÓN		ACS	
	Emisiones calefacción [kgCO ₂ /m ² ·año]	A	Emisiones ACS [kgCO ₂ /m ² ·año]	A
	2.78		0.13	
	Emisiones refrigeración [kgCO ₂ /m ² ·año]	B	Emisiones iluminación [kgCO ₂ /m ² ·año]	B
	0.28		7.66	
Emisiones globales[kgCO ₂ /m ² ·año] ¹				

La calificación global del edificio se expresa en términos de dióxido de carbono liberado a la atmósfera como consecuencia del consumo energético del mismo.

	kgCO ₂ /m ² ·año	kgCO ₂ ·año
Emisiones CO ₂ por consumo eléctrico	10.84	22807.15
Emisiones CO ₂ por otros combustibles	0.00	0.00

2. CALIFICACIÓN ENERGÉTICA DEL EDIFICIO EN CONSUMO DE ENERGÍA PRIMARIA NO RENOVABLE

Por energía primaria no renovable se entiende la energía consumida por el edificio procedente de fuentes no renovables que no ha sufrido ningún proceso de conversión o transformación.

INDICADOR GLOBAL	INDICADORES PARCIALES			
	CALEFACCIÓN		ACS	
	Energía primaria calefacción [kWh/m ² ·año]	A	Energía primaria ACS [kWh/m ² ·año]	A
	16.39		0.76	
	Energía primaria refrigeración [kWh/m ² ·año]	B	Energía primaria iluminación [kWh/m ² ·año]	B
	1.62		45.22	
Consumo global de energía primaria no renovable[kWh/m ² ·año] ¹				

3. CALIFICACIÓN PARCIAL DE LA DEMANDA ENERGÉTICA DE CALEFACCIÓN Y REFRIGERACIÓN

La demanda energética de calefacción y refrigeración es la energía necesaria para mantener las condiciones internas de confort del edificio.

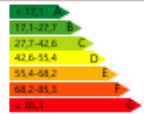
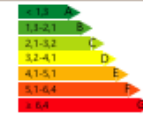
DEMANDA DE CALEFACCIÓN	DEMANDA DE REFRIGERACIÓN
	
Demanda de calefacción[kWh/m ² ·año]	Demanda de refrigeración[kWh/m ² ·año]

Figura 55- Calificación energética del conjunto final. Fuente: CYPETHERM HE Plus.

5 PRESUPUESTO Y FINANCIACIÓN

5.1 Presupuesto

La determinación del presupuesto base de licitación del presente proyecto se ha instrumentado mediante el empleo de la herramienta Generador de Precios de CYPE, una base de datos de referencia técnica diseñada para la obtención de costes paramétricos y mediciones de obra en el ámbito de la ingeniería y la edificación

Dicha plataforma permite la descomposición de las unidades de obra en partidas específicas integrando en su análisis los siguientes factores de coste:

- **Costes directos:** evaluación pormenorizada de los materiales, rendimientos de la mano de obra especializada y costes horarios de la maquinaria necesaria para la ejecución.
- **Costes indirectos:** Gastos auxiliares de obra no vinculados directamente a la unidad, pero necesarios para su materialización.
- **Documentación técnica:** generación de especificaciones de producto y pliegos de condiciones asociados a la normativa vigente.

Si bien los importes obtenidos no constituyen un presupuesto de ejecución real cerrado debido a la variabilidad propia del mercado y la situación de incertidumbre global en la que nos encontramos, se consideró que la herramienta ofrece una aproximación suficientemente rigurosa y fiable para la estimación económica desarrollada en este proyecto académico.

A continuación, se presenta un desglose en el que se recogen las distintas partidas que componen el presupuesto, junto con el coste individual asociado a cada una de ellas y ofrecer una visión de la económica del coste del proyecto.

Tabla 25- Presupuesto del conjunto de medidas de mejora. Fuente: CYPE generador de precios.

PRESUPUESTO REHABILITACIÓN ENERGÉTICA CITENI						
CAPÍTULO 1 - INSTALACIÓN FOTOVOLTAICA						
Partida		Unidad	Cantidad	Precio unitario (€)	Importe (€)	Observaciones
1.1	Módulo fotovoltaico	ud	39	160,85 €	6.273,15 €	AIKO 680 W
1.2	Estructura soporte cubierta	ud	14	177,56 €	2.485,84 €	Soporte aluminio reforzado XXL
1.3	Inversor trifásico	ud	1	2.884,26 €	2.884,26 €	Huawei SUN2000-20KTL-M5
1.4	Monitorización	ud	1	175,83 €	175,83 €	Huawei DTSU666-H
1.5	Cableado DC	m	200	1,56 €	312,00 €	Cable solar rojo H1Z2-K 6mm² rojo
1.6	Cableado DC	m	200	1,56 €	312,00 €	Cable solar rojo H1Z2-K 6mm² negro
1.7	Protección DC	ud	1	456,67 €	456,67 €	Cuadro DC IP65/IP66
1.8	Cableado AC	m	30	15,56 €	466,80 €	Cable RZ1-K 5G10 mm²
1.9	Protección AC	ud	1	543,56 €	543,56 €	Cuadro AC trifásico IP65
1.10	Cableado tierra	m	30	5,67 €	170,10 €	Cable tierra 16mm²
1.11	Cableado tierra	m	100	3,45 €	345,00 €	Cable tierra 6mm²
1.12	Canalización	m	100	11,53 €	1.153,00 €	Bandejas, rieles y tubos
1.13	Mano de Obra	ud	80	81,25 €	6.500,00 €	Persona de montaje y proyectista
1.14	Legalización	ud	1	1.500,00 €	1.500,00 €	Permisos de obra
TOTAL					23.578,21 €	IVA INCLUIDO
CAPÍTULO 2 - INSTALACIÓN CLIMATIZACIÓN						
Partida		Unidad	Cantidad	Precio unitario (€)	Importe (€)	Observaciones
2.1	Bomba de calor aire-aire tipo VRF	ud	1	41.303,43 €	41.303,43 €	Bosch AFS300 197 kW
2.2	Unidad interior de conduccion por conductos	ud	8	1.492,00 €	11.936,00 €	AF-DM-80-1-P
2.3	Unidad interior de conduccion por conductos	ud	1	1.627,50 €	1.627,50 €	AF-DM-90-1-P
2.4	Unidad interior de conduccion por conductos	ud	6	1.816,61 €	10.899,66 €	AF-DM-112-1-P
2.5	Unidad interior de conduccion por conductos	ud	4	1.854,22 €	7.416,88 €	AF-DM-140-1-P
2.6	Rejillas impulsión	ud	30	53,35 €	1.600,50 €	Dimensiones 125x125
2.7	Rejillas impulsión	ud	5	56,45 €	282,25 €	Dimensiones 200x125
2.8	Rejillas impulsión	ud	15	59,32 €	889,80 €	Dimensiones 300x150
2.9	Rejillas impulsión	ud	2	65,65 €	131,30 €	Dimensiones 400x200
2.10	Rejillas impulsión	ud	5	80,23 €	401,15 €	Dimensiones 500x250
2.11	Rejillas retorno	ud	30	53,35 €	1.600,50 €	Dimensiones 125x125
2.12	Rejillas retorno	ud	5	56,45 €	282,25 €	Dimensiones 200x125
2.13	Rejillas retorno	ud	15	59,32 €	889,80 €	Dimensiones 300x150
2.14	Rejillas retorno	ud	2	65,65 €	131,30 €	Dimensiones 400x200
2.15	Rejillas retorno	ud	5	80,23 €	401,15 €	Dimensiones 500x250
2.16	Red de conductos chapa galvanizada aislada	m²	353,1	65,00 €	22.951,50 €	Conductos de chapa galvanizada aislada
2.17	Derivacion	ud	5	124,82 €	624,10 €	AF-BJ01
2.18	Derivacion	ud	2	160,52 €	321,04 €	AF-BJ02
2.19	Derivacion	ud	7	211,52 €	1.480,64 €	AF-BJ03
2.20	Derivacion	ud	2	298,22 €	596,44 €	AF-BJ04
2.21	Derivacion	ud	2	497,12 €	994,24 €	AF-BJ05
2.22	Derivacion	ud	2	513,34 €	1.026,68 €	AF-BJO 03
2.23	Linea frigorífica	m	265,57	47,37	12580,0509	Liquido ø9,5mm
2.24	Linea frigorífica	m	11,13	49,55	551,4915	Liquido ø12,7mm
2.25	Linea frigorífica	m	1,99	53,55	106,5645	Liquido ø15,9mm
2.26	Linea frigorífica	m	3,88	56,15	217,862	Liquido ø19,1mm
2.27	Linea frigorífica	m	14,71	50,46	742,2666	Liquido ø22,2mm
2.28	Linea frigorífica	m	150,71	53,55	8070,5205	Gas ø15,9mm
2.29	Linea frigorífica	m	113,71	56,15	6384,8165	Gas ø19,1mm
2.30	Linea frigorífica	m	0,95	59,24	56,278	Gas ø22,2mm
2.31	Linea frigorífica	m	6,16	61,33	377,7928	Gas ø25,4mm
2.32	Linea frigorífica	m	4,97	64,75	321,8075	Gas ø28,6mm
2.33	Linea frigorífica	m	5,37	68,75	369,1875	Gas ø31,8mm
2.34	Linea frigorífica	m	4,58	75,8	347,164	Gas ø34,9mm
2.35	Linea frigorífica	m	6	116,72	700,32	Gas ø41,3mm
2.36	Linea frigorífica	m	4,13	132,21	546,0273	Gas ø44,5mm
2.37	Legalización	ud	1	1.500,00 €	1.500,00 €	Permisos de obra
TOTAL					140.660,26 €	IVA INCLUIDO
COSTE TOTAL			164.238,47 €		IVA INCLUIDO	

5.2 Marco de financiación e incentivos

En el caso de edificios con titularidad institucional, como es el caso del CITENI y la Xunta de Galicia existen mecanismos de subvenciones a fondo perdido a nivel nacional y europeo.

Para el presente proyecto, se realizó un análisis de los marcos incentivos disponibles tanto en el ámbito nacional como en el europeo, considerando como vía de financiación principal el Programa de Impulso a la Rehabilitación de Edificios públicos (PIREP autonómico) [9]. Dicho plan está integrado en el Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia, financiado por la Unión Europea a través de los fondos Next Generation

Para que la propuesta técnica pueda acogerse a las partidas presupuestarias del PIREP autonómico, el inmueble y la intervención del proyecto deben satisfacer los siguientes criterios:

- **Titularidad:** El edificio debe ser de titularidad pública.
- **Destino y uso:** Se debe garantizar formalmente el mantenimiento del uso público del inmueble durante un periodo mínimo de 20 años.
- **Antigüedad:** La fecha de construcción catastral del edificio debe ser anterior al 1 de enero de 2009.
- **Eficiencia energética:** La solución proyectada debe certificar obligatoriamente una reducción mínima del 30% del consumo de energía primaria no renovable.

Asimismo, la escala de la actuación debe cumplir con al menos, una de las tres condiciones fijadas en las bases reguladoras:

- Presupuesto de ejecución de la obra proyectada (base imponible, excluyendo impuestos) igual o superior a **500.000€**
- Superficie útil de intervención superior a **1000 m²**
- Ratio de inversión económica superior a **500 €/m²**

El marco regulador del PIREP establece una cobertura del 100% de los costes elegibles de la actuación. Dentro de esta consideración se engloban costes directos de ejecución material, honorarios profesionales de redacción de proyecto y dirección facultativa, estudios técnicos previos y costes derivados de publicidad institucional obligatoria.

No obstante, quedan estrictamente excluidos los tributos, tasas administrativos e impuestos que para este edificio devenga el 21%.

Trasladando estos criterios al presente proyecto, cuyo coste total del proyecto es de **164.238,47€**, sitúan la tasa del incentivo en un **76,11%** con un importe de **125.008,39€** del coste total de la inversión. Esta financiación reduce drásticamente el periodo de amortización a 1,93 años validando la viabilidad financiera de la propuesta.

Es preciso señalar que, si bien la convocatoria específica se encuentra temporalmente fuera de plazo, se ha determinado la inclusión de su marco paramétrico al tratarse de una línea de incentivos de carácter recurrente a lo largo de los últimos años.

6 CONCLUSIONES

Una vez evaluadas las propuestas de mejora planteadas y analizada la viabilidad técnica y financiera de estas, se exponen las conclusiones principales derivadas de este proyecto de rehabilitación energética.

Durante el flujo BIM entre entornos aparecieron algunas incompatibilidades debido al formato de exportación del archivo IFC. A pesar de las dificultades se comprobó que esta metodología de trabajo ofrece gran facilidad y efectividad de trabajo en proyectos en los que están involucrados diferentes personas y softwares a lo largo de la vida útil del proyecto.

En cuanto a las actuaciones planteadas orientadas a la modificación de la envolvente térmica resultaron inviables en términos económicos. El valor actual neto de la aplicación de las medidas de manera aislada resultó negativo, obteniendo unas tasas internas de retorno inferiores a la tasa de descuento estimada por el IDAE y con índices de retorno inferiores a la unidad. Por el contrario, las mejoras en las instalaciones ofrecieron indicadores económicos correctos para la ejecución de estas, no obstante, la alternativa de la caldera de biomasa tuvo que ser descartada por incompatibilidades dimensionales.

Entre las opciones de aerotermia evaluadas, se seleccionó el sistema VRF. A pesar de presentar indicadores económicos ligeramente peores a la otra alternativa, sus ventajas operativas y funcionales justifican su elección. Esta medida se complementó con la proyección de un sistema de generación fotovoltaica en cubierta, fundamentado en su alta rentabilidad económica y su impacto positivo directo en los indicadores de calificación energética

La estrategia de descarbonización proyectada para el escenario seleccionado quedó ratificada mediante un análisis de sensibilidad frente a posibles fluctuaciones futuras en la tarifa de la electricidad y el precio del gasóleo.

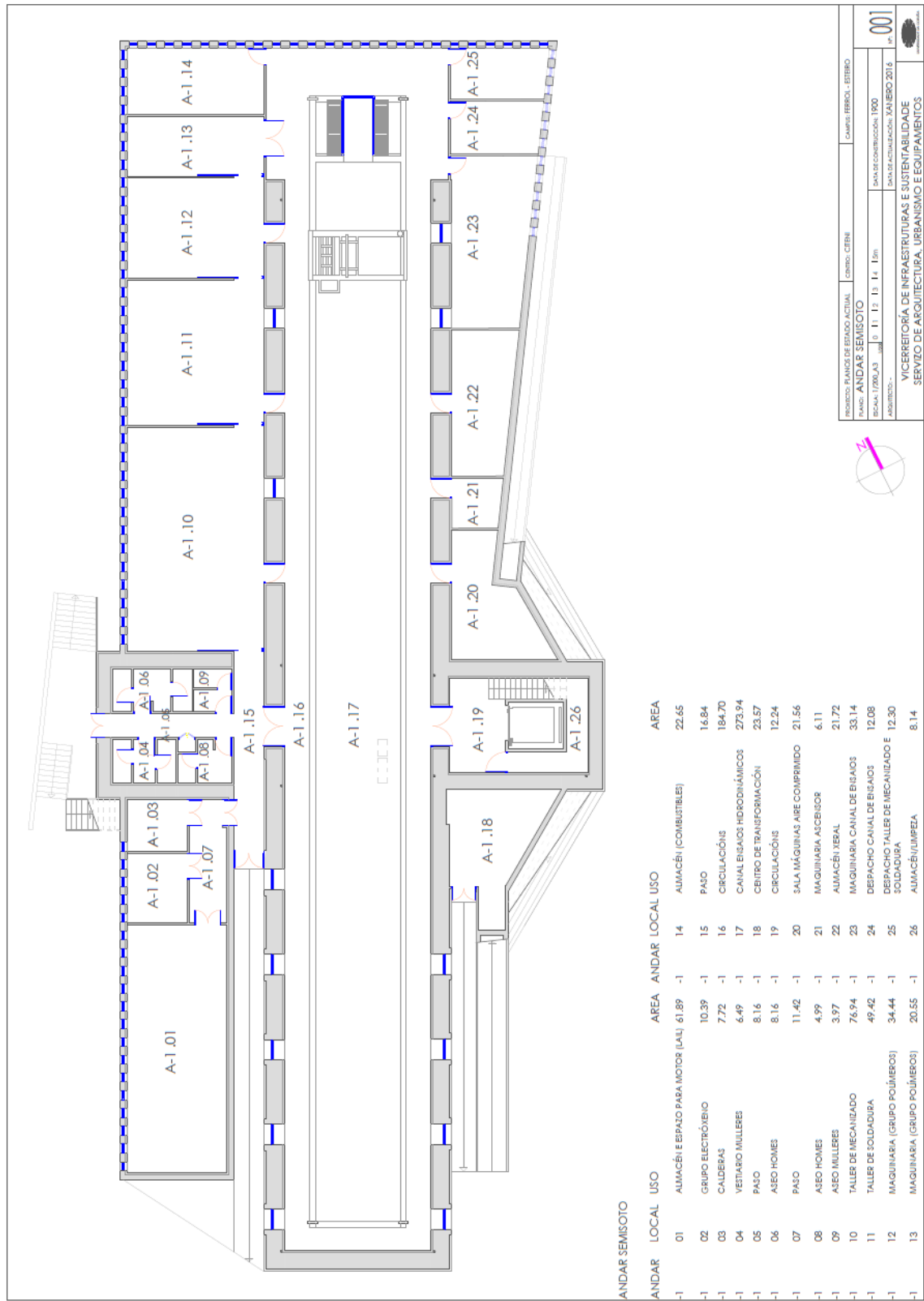
La simulación del conjunto seleccionado permitió alcanzar una etiqueta verde, logrando una reducción significativa en términos de emisiones, alcanzando calificación **A**, y una disminución considerable en el consumo de energía primaria no renovable, obteniendo calificación **B**.

Los resultados cuantitativos obtenidos confirman que la propuesta de rehabilitación energética y descarbonización del CITENI cumplen rigurosamente con los Objetivos de Desarrollo Sostenible y los criterios de sostenibilidad planteados al inicio de esta investigación.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Guía de acceso rápido Revit , Autodesk [Octubre 2025] Disponible en: autodesk.com
- [2] *Manual de Usuario IFC*, CYPE, [Noviembre 2025]. Disponible en: learning.cype.com
- [3] *Manual de Usuario CYPETHERM LOADS*, CYPE, [Noviembre 2025]. Disponible en: learning.cype.com
- [4] *Manual de Usuario CYPETHERM HE Plus*, CYPE, [Diciembre 2025]. Disponible en: learning.cype.com
- [5] *Generador de precios*, CYPE, [Febrero 2026]. Disponible en: generadordeprecios.info/
- [6] Meizoso, Carmen; *Sistemas de aprovechamiento solar*, 2026
- [7] González Sierra, Carlos; *Diseño y cálculo de instalaciones de climatización*, 2013
- [8] González Sierra, Carlos; *Refrigeración Industrial*, 2012
- [9] *PIREP autonómico*, Ministerio de vivienda, [Mayo 2026]. Disponible en: mivau.gob.es

ANEXO I: PLANOS Y DETALLES CONSTRUCTIVOS



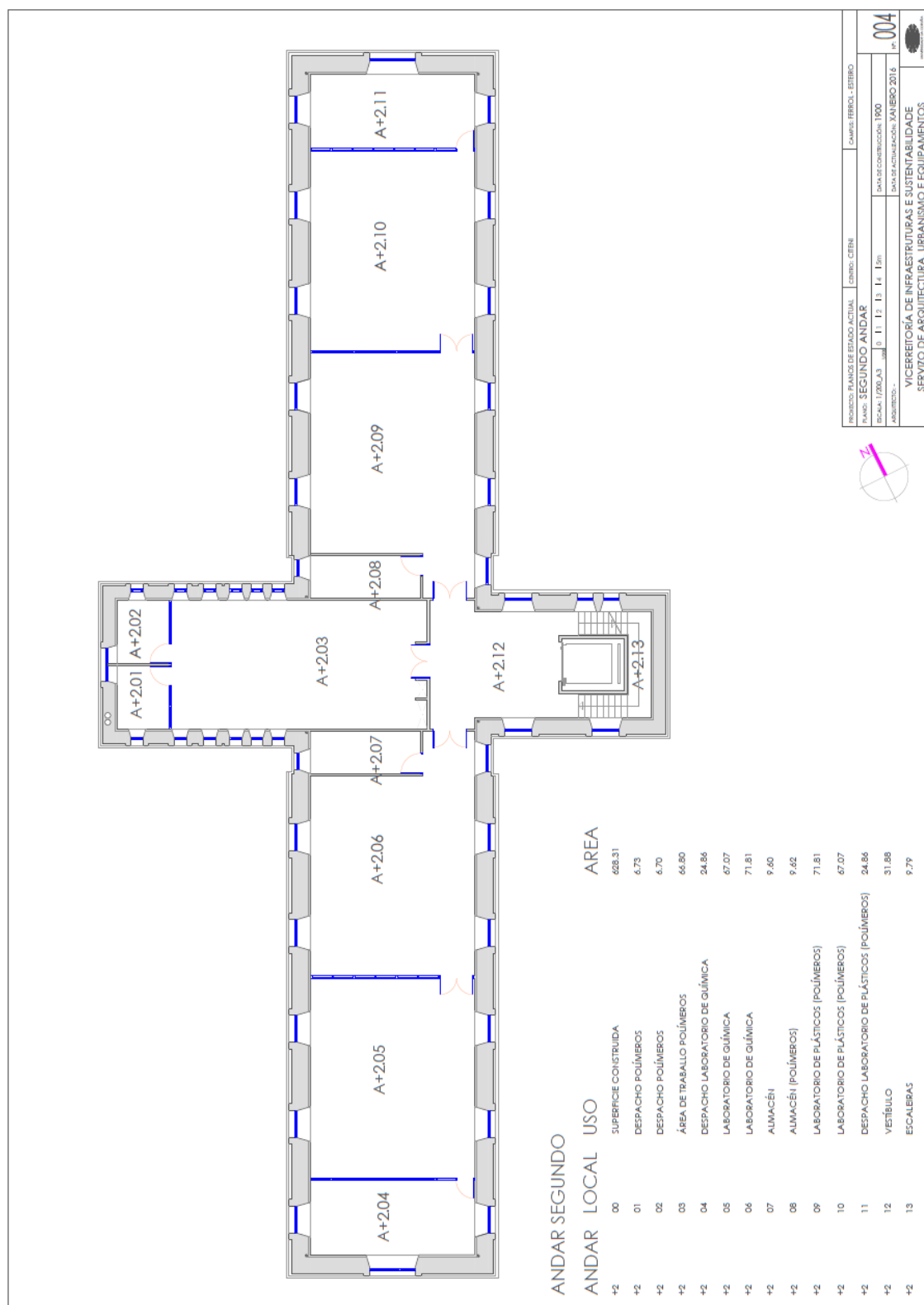


Figura 59- Plano de planta segunda. Fuente: Vicerrectorado de infraestructuras y sostenibilidad.

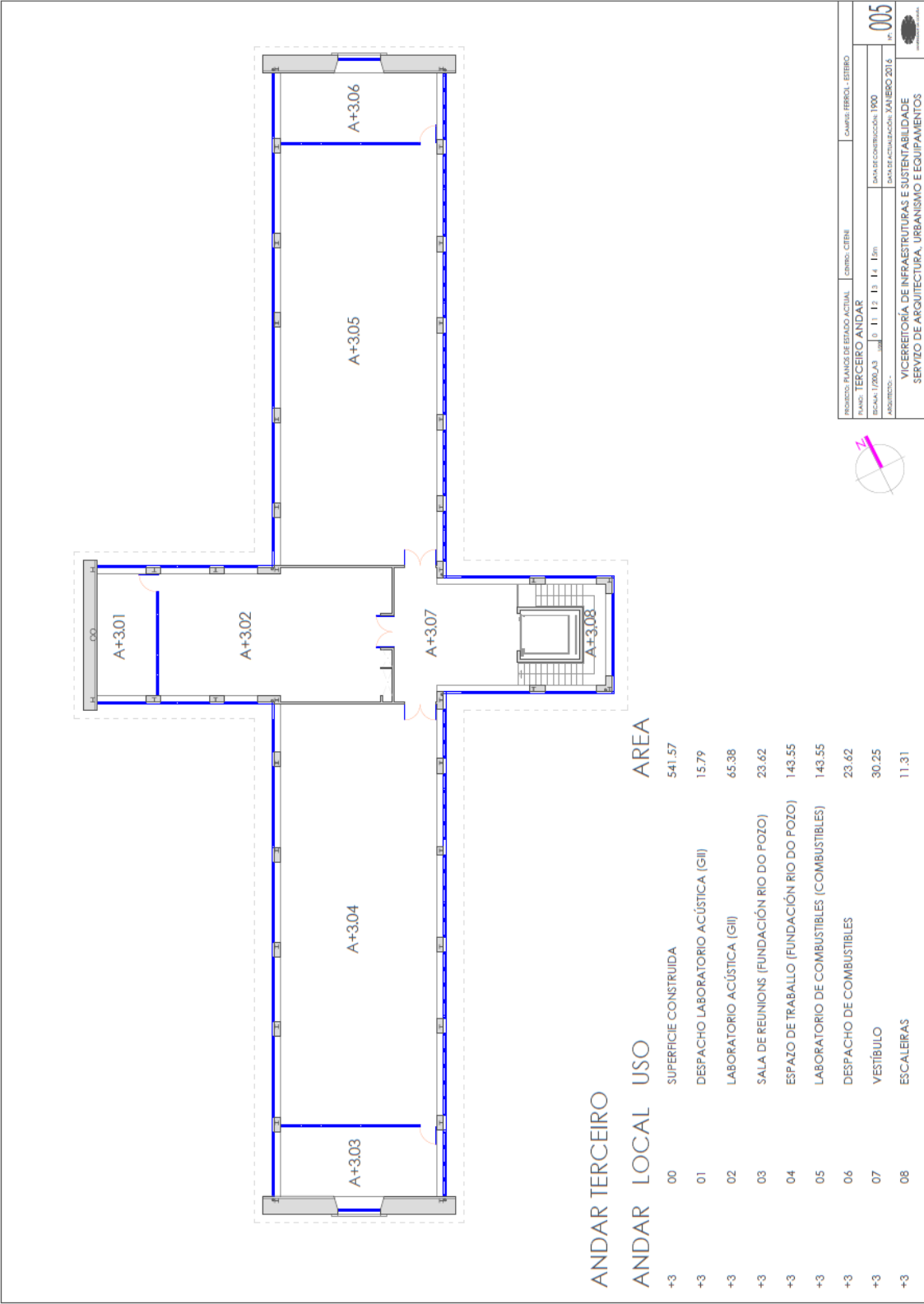


Figura 60- Plano de planta tercera. Fuente: Vicerrectoría de infraestructuras y sostenibilidad.

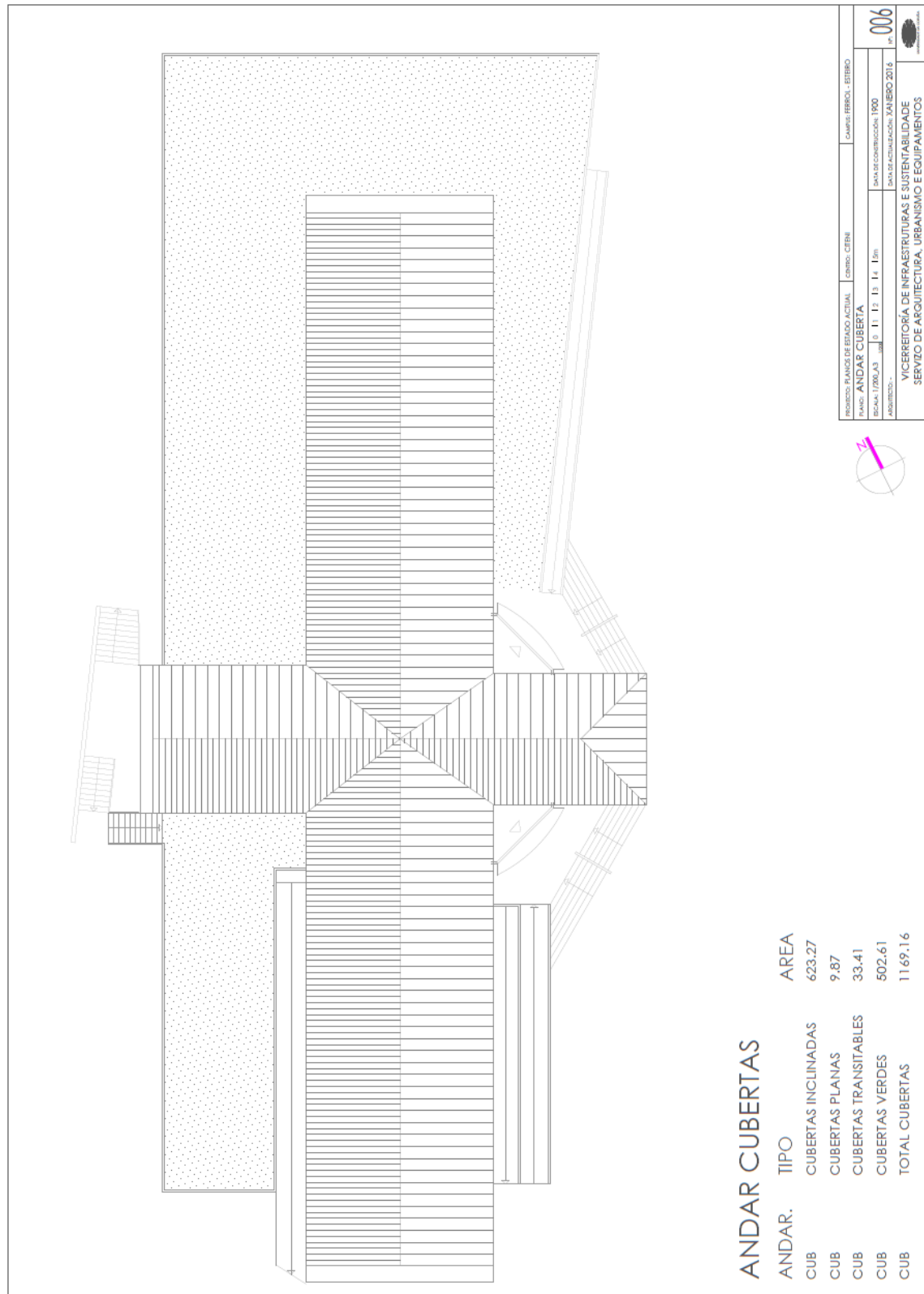


Figura 61- Plano de planta tercera. Fuente: Vicerrectoría de infraestructuras y sostenibilidad.



Figura 63- Alzados laterales. Fuente: Vicerrectorado de infraestructuras y sostenibilidad.



Figura 64- Secciones. Fuente: Vicerrectorado de infraestructuras y sostenibilidad.

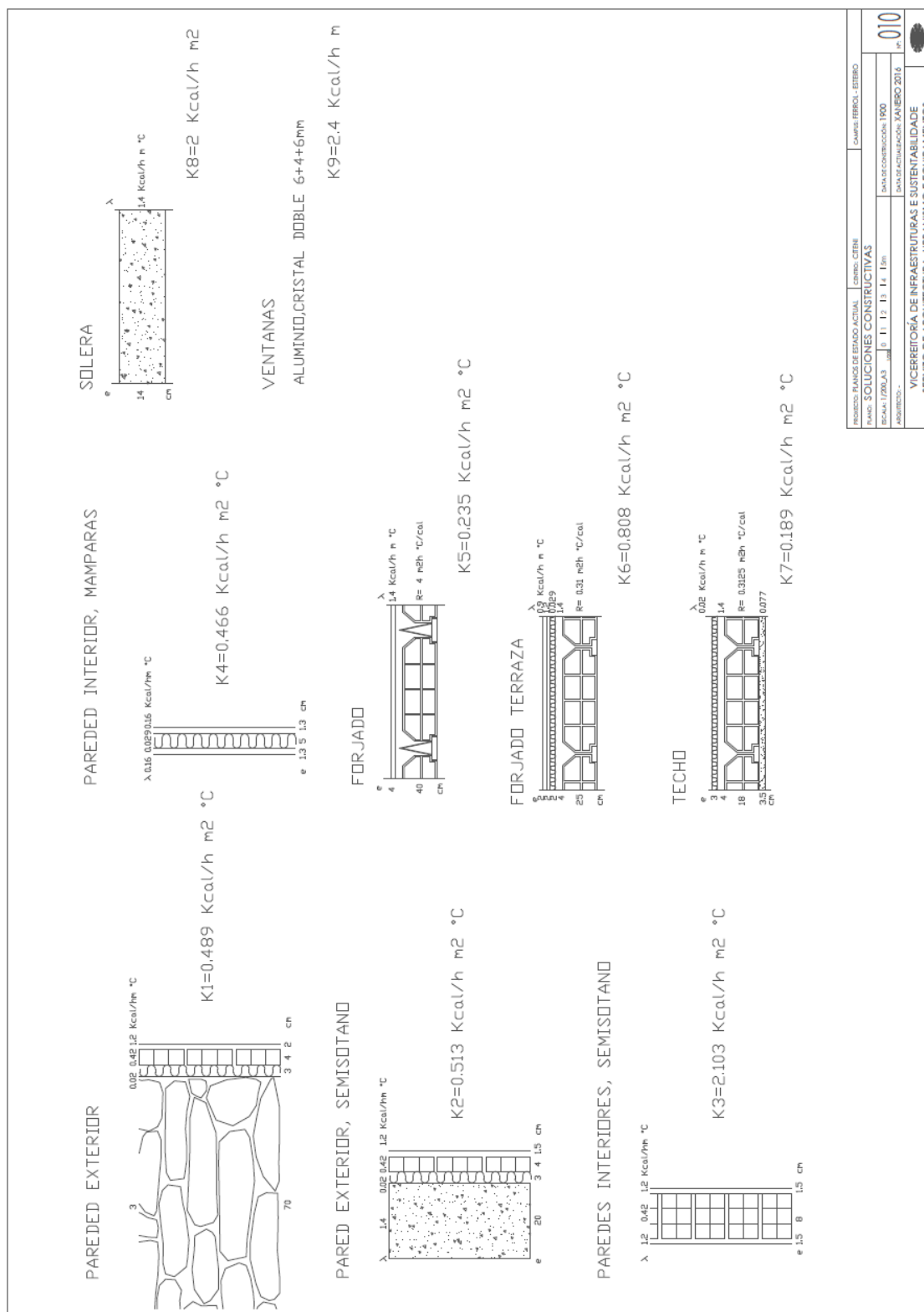


Figura 65- Soluciones constructivas. Fuente: Vicerrectorado de infraestructuras y sostenibilidad.

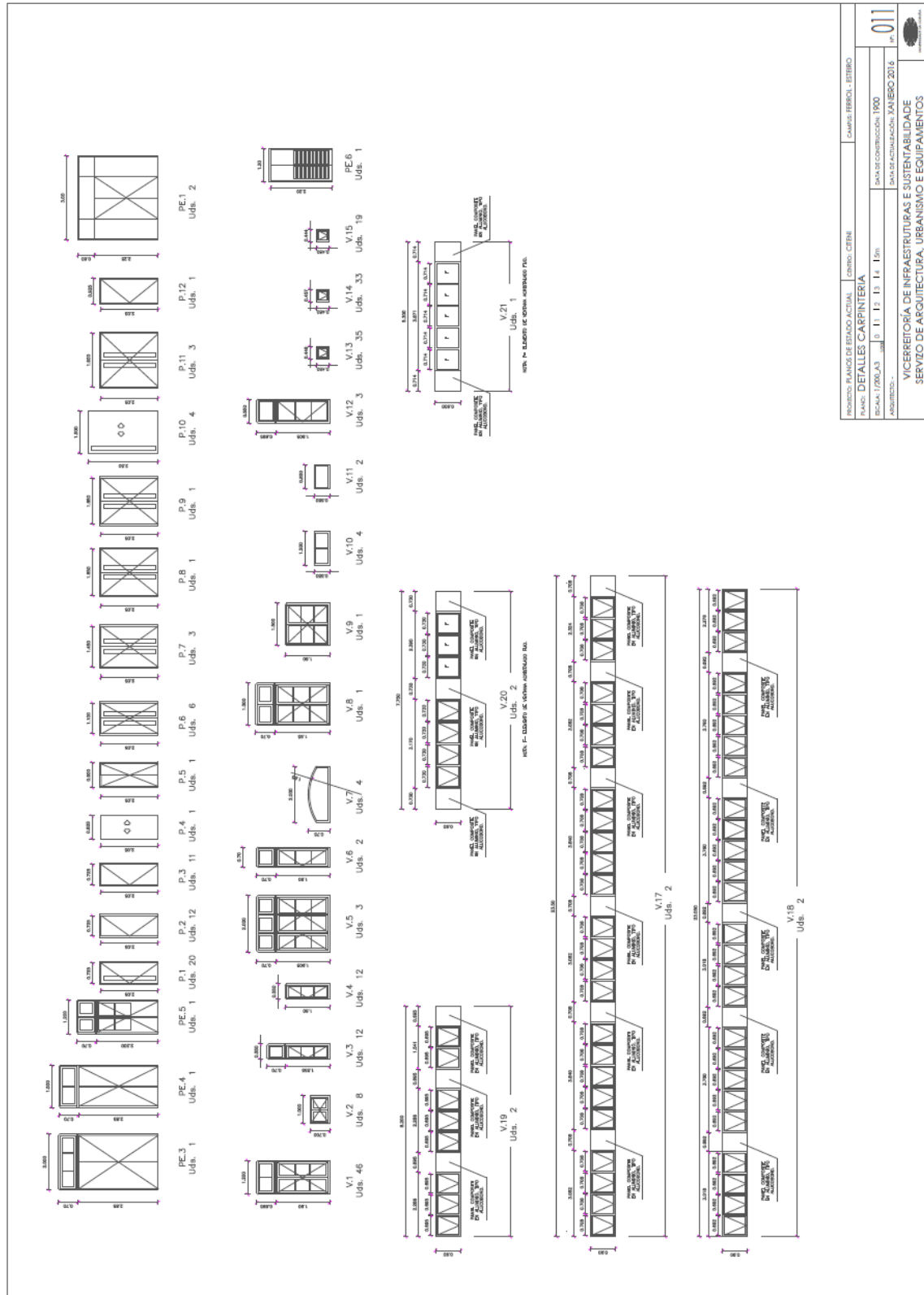


Figura 66- Detalles de carpintería. Fuente: Vicerrectorado de infraestructuras y sostenibilidad.

ANEXO II: DOCUMENTACIÓN GRÁFICA DE VISITAS



Figura 68- Vista exterior oblicua sureste del CITENI. Fuente: Elaboración propia.



Figura 69- Vista exterior oblicua noreste del CITENI. Fuente: Elaboración propia.



Figura 70- Vista detalle oblicua de la entrada principal del CITENI. Fuente: Elaboración propia.

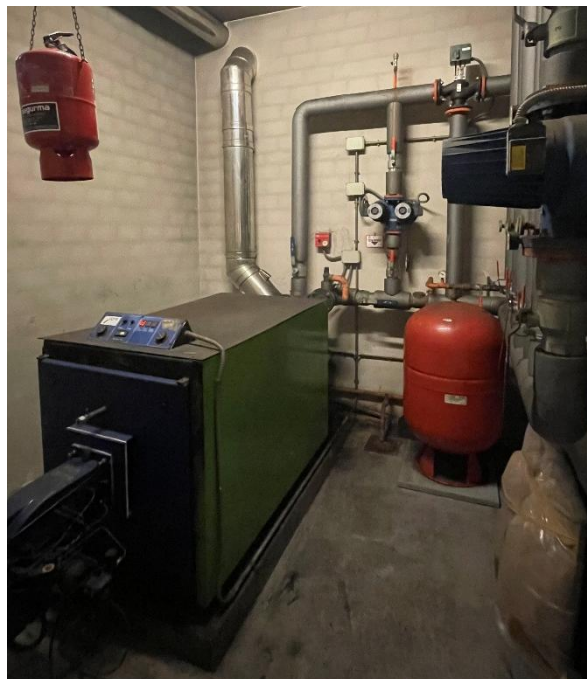


Figura 71- Sala de Calderas. Fuente: Elaboración propia.

testo 330-2
V2.23 03184432/E

ELECNOR MANTENIMIENTO
GALICIA NORTE CP503

10.12.2025 12:01:28

Situación:
1

Tipo de sistema: Caldera
UDC

Combustible: Gasóleo C
O2ref: 3.0 %
CO2max: 15.5 %

P-10	
144.8 °C	Temp. PDC's
65 ppm	CO corregido
43 ppm	CO
7.0 %	O2
1.50	Lambda
10.33 %	CO2
6.8 %	qA
22.0 °C	Temp. Amb.
0.182 mbar	Tiro
93.2 %	REN
46.4 °C	Pto. de rocío
--- ppm	COamb
--- ppm	CO2amb

6035-01

Figura 72- Justificante revisión diciembre 2025 caldera de gasóleo. Fuente: Elecnor.



Figura 73- Aerotermo de pared en canal de ensayos de planta semisótano. Fuente: Elaboración propia.



Figura 74- Aerothermo de pared en taller de planta baja. Fuente: Elaboración propia.



Figura 75- Radiador en vestíbulo general en planta baja. Fuente: Elaboración propia.

ANEXO III: GENERACIÓN DEL MODELO 3D

La construcción del modelo tridimensional se realizó mediante el software Autodesk Revit, fundamentándose en la documentación gráfica y técnica suministrada por el personal de la universidad. El flujo de trabajo seguido para la obtención del modelo se detalla a continuación:

Definición de la infraestructura niveles

El proceso de modelado se inició con la configuración de la estructura de niveles. Tomando como base las cotas del proyecto de los planos de sección y alzados, se definieron los planos horizontales correspondientes a cada planta. Esta jerarquía espacial resulta de vital importancia para garantizar la coherencia geométrica y la correcta restricción de altura de los elementos verticales.

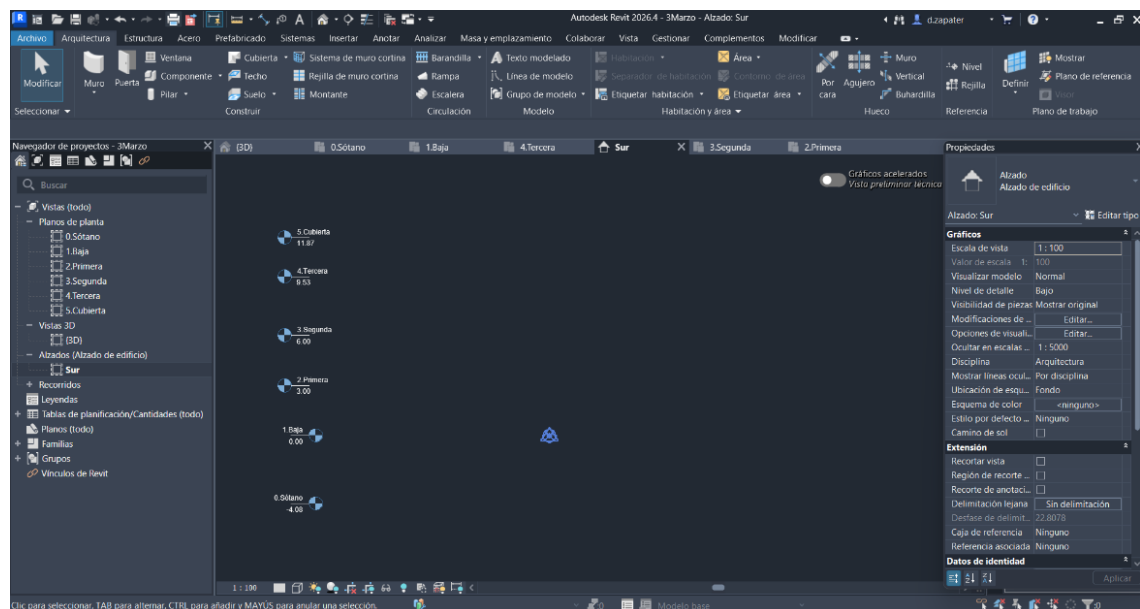


Figura 76- Introducción de niveles. Fuente: Autodesk Revit.

Integración de cartografía y plantillas de referencia

Establecida la base de niveles, se procedió a la vinculación de los archivos en formato *.dwg* de cada planta. La inserción de estos archivos se realizó mediante coordenadas de origen, asignando cada plano a su cota correspondiente. Esta metodología asegura que el modelado posterior se ejecute con precisión sobre las plantillas originales.

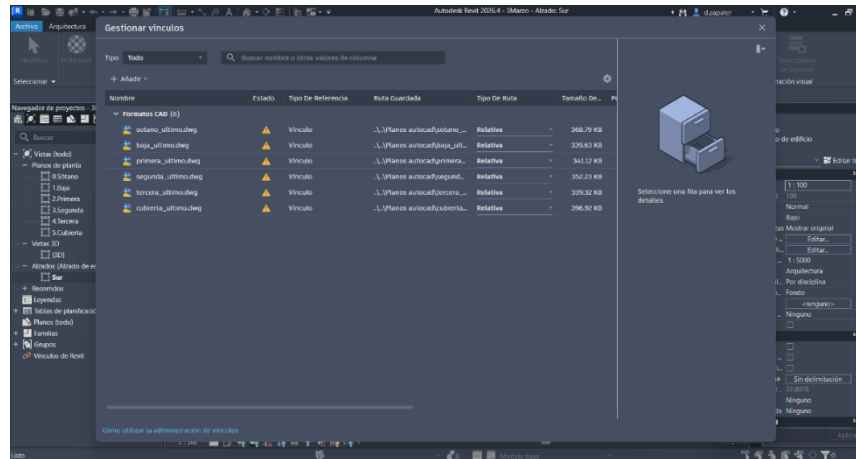


Figura 77- Vinculación de las plantillas *.dwg*. Fuente: Autodesk Revit.

Modelado de Elementos Constructivos y Envoltente

A continuación, se procedió a la modelización de los distintos elementos constructivos sobre las plantillas importadas. Para ello, se emplearon las herramientas disponibles en el entorno de la arquitectura del software (muros, puertas, ventanas...), permitiendo la creación de cerramientos, forjados, cubiertas, ventanas, puertas y otros elementos que definen la envoltente del edificio, así como la topografía del lugar o elementos exteriores como escaleras y rampas. Durante este proceso se respetaron las dimensiones y características constructivas recogidas en la documentación de partida.

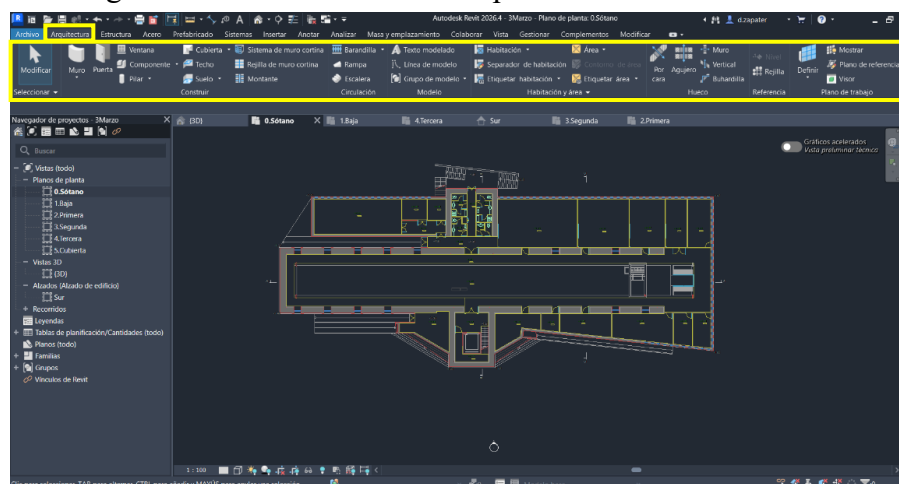


Figura 78- Introducción de los elementos constructivos sobre la plantilla. Fuente: Autodesk Revit.

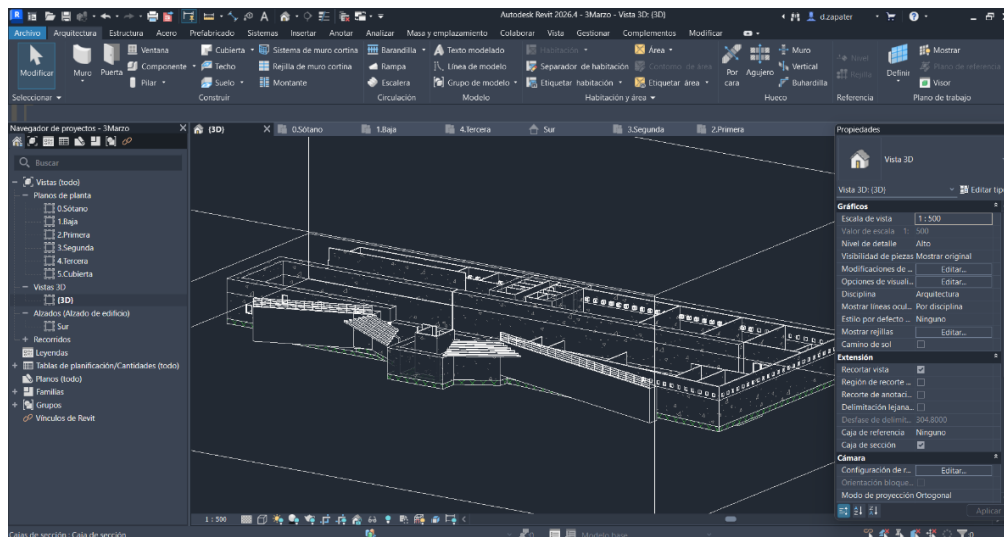


Figura 79- Resultado de la construcción de los diferentes elementos. Fuente: Autodesk Revit.

Consolidación del modelo global

Este proceso se repitió de manera sistemática para cada una de las plantas del edificio, asegurando la continuidad y correcta superposición de los elementos en el modelo tridimensional.

Como resultado final, se obtuvo un modelo completo del edificio que constituye la base para los posteriores cálculos de cargas y análisis energéticos desarrollados en el presente trabajo.

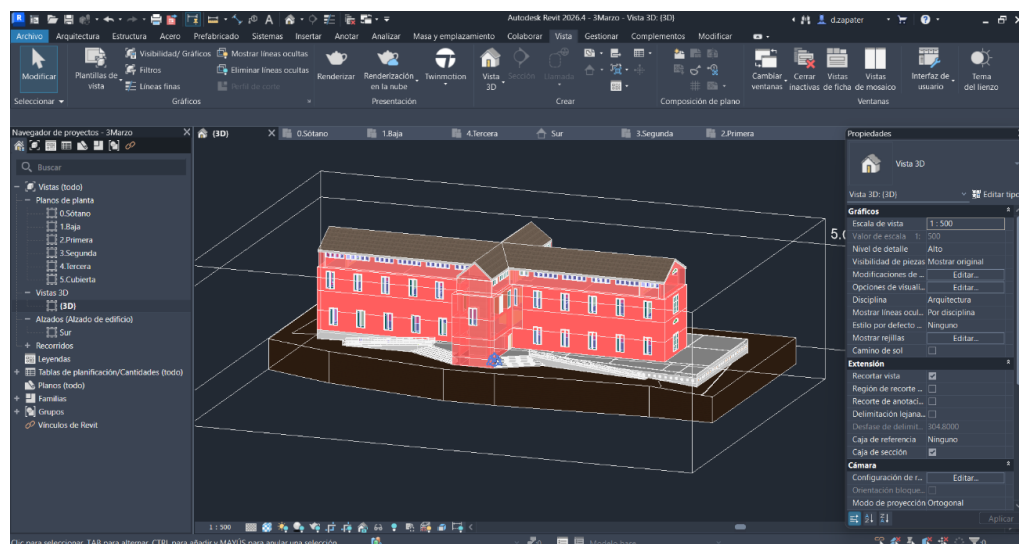


Figura 80- Modelo tridimensional final del edificio. Fuente: Autodesk Revit.

Interoperabilidad y exportación a formato IFC

Dada la necesidad de continuar el análisis en el ecosistema CYPE, se realizó la exportación del modelo bajo el estándar IFC. Este procedimiento es clave dentro del flujo de trabajo BIM, ya que garantiza la integridad de la información geométrica y técnica durante la transferencia entre plataformas. El archivo resultante permite la importación directa en las herramientas de cálculo térmico, facilitando la evaluación precisa de la demanda y el consumo energético del edificio.

Este proceso permitirá la posterior realización de los cálculos correspondientes a las cargas térmicas, la estimación de los consumos energéticos y la evaluación de las emisiones asociadas al edificio objeto de estudio.

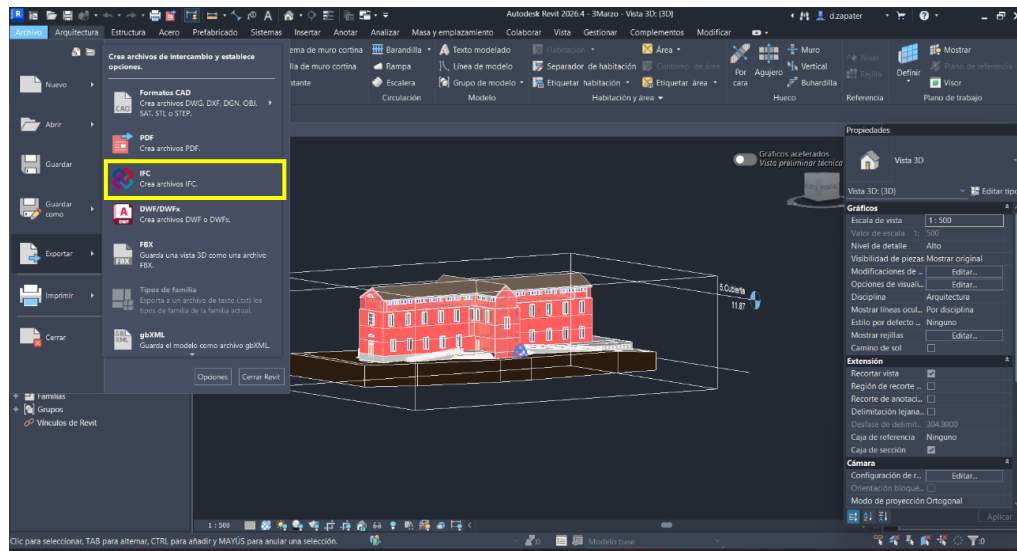


Figura 81- Importación del archivo IFC. Fuente: Autodesk Revit.

ANEXO IV: INTEROPERABILIDAD ENTRE ENTORNOS

Interoperabilidad Revit - CYPE

IFC Builder es una aplicación de modelado arquitectónico orientada específicamente a la integración de proyectos dentro del ecosistema CYPE. Debido a que el diseño conceptual y la gestión avanzada de la información constructiva requieren un entorno de alta densidad, se optó por Autodesk Revit para la fase de levantamiento inicial. No obstante, para garantizar la compatibilidad y la transferencia de datos a través de la plataforma BIMserver.center, se seleccionó IFC Builder como nodo de enlace entre el modelo arquitectónico original y el motor de simulación de cargas térmicas.

BIMserver.center permite que varios usuarios de un mismo equipo de trabajo realicen modificaciones y actualizaciones de manera independiente y el modelo se actualice en tiempo real entre los diferentes participantes de un proyecto de arquitectura e ingeniería.

En el caso de este proyecto evitó la necesidad de generar el modelo arquitectónico en los diferentes programas involucrados en el proyecto (CYPETHERM LOADS y CYPETHERM HE Plus)

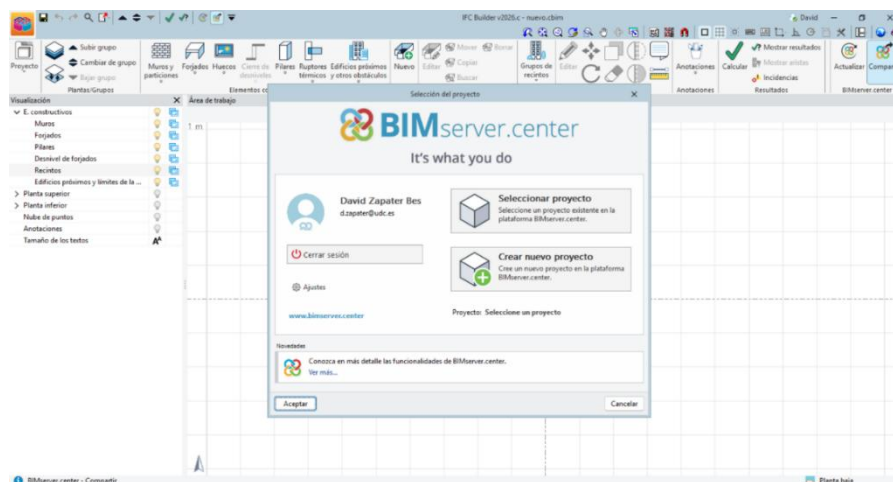


Figura 82- Creación de un proyecto en BIMserver.center. Fuente: IFC Builder.

Sincronización en la plataforma BIMserver.center

La fase operativa en el entorno CYPE se inició con la creación de un proyecto centralizado en la nube BIMserver.center. Esta configuración en red es indispensable para articular el flujo de trabajo colaborativo, permitiendo alojar de manera coordinada los distintos archivos del proyecto: modelo arquitectónico, simulación de cargas térmicas y modelado de certificación energética. Consolidado este espacio de trabajo se procedió a la importación del archivo IFC generado en Revit.

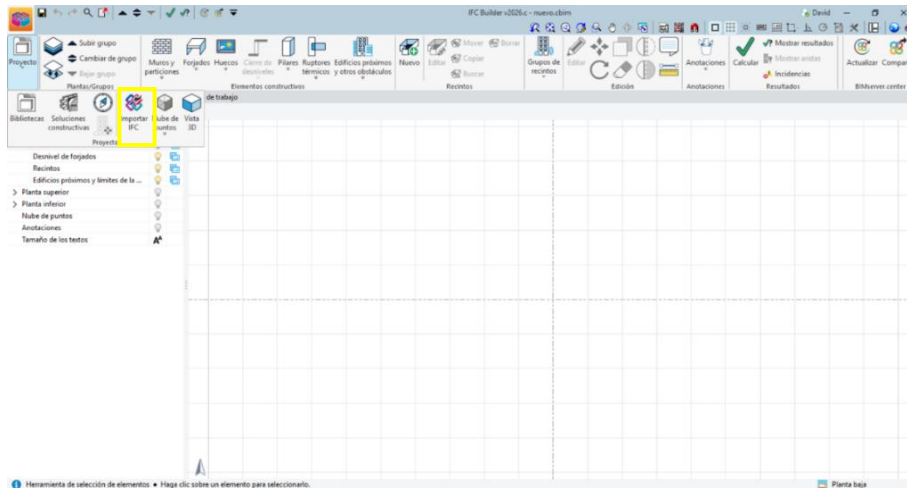


Figura 83- Importación del archivo IFC generado en Revit. Fuente: IFC Builder.

Auditoría de datos y control de calidad del modelo

Tras la importación, se realizó una auditoría geométrica para verificar la integridad de los elementos destinados al análisis térmico. Se constató que los diferentes elementos constructivos se transfirieron sin pérdida de información geométrica. Cabe señalar que ciertos componentes como escaleras y rampas exteriores no son asimilados por la interfaz de IFC Builder, sin embargo, al encontrarse fuera de la envolvente térmica su omisión no induce a alteraciones en los balances de energía del edificio.

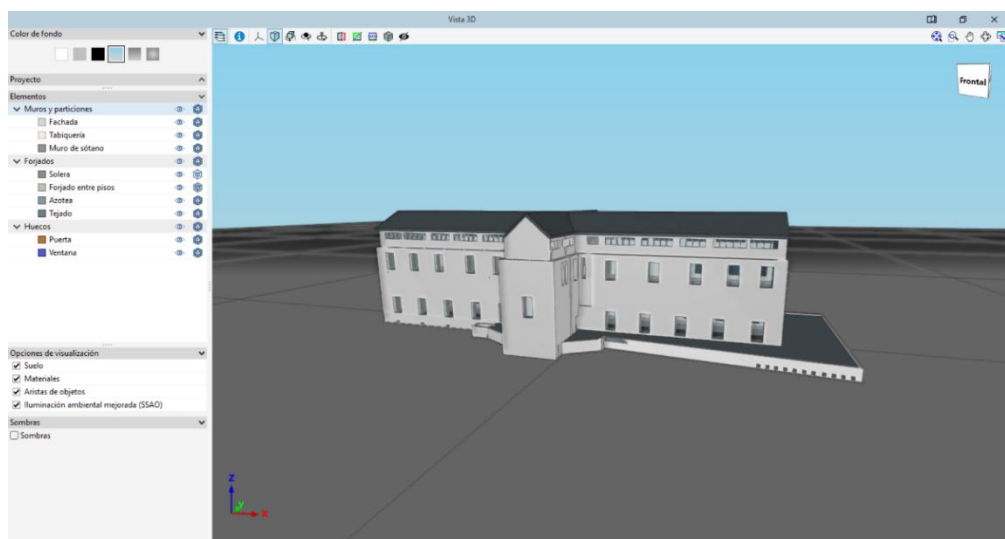


Figura 84- Modelo tridimensional importado correctamente. Fuente: IFC Builder.

Zonificación espacial

La fase final en este entorno consistió en la modelación espacial y creación de los distintos recintos en todas las plantas del edificio. Esta segmentación permitió clasificar los espacios según su régimen de funcionamiento y exigencias en: No climatizables (NC) y Climatizables (C)

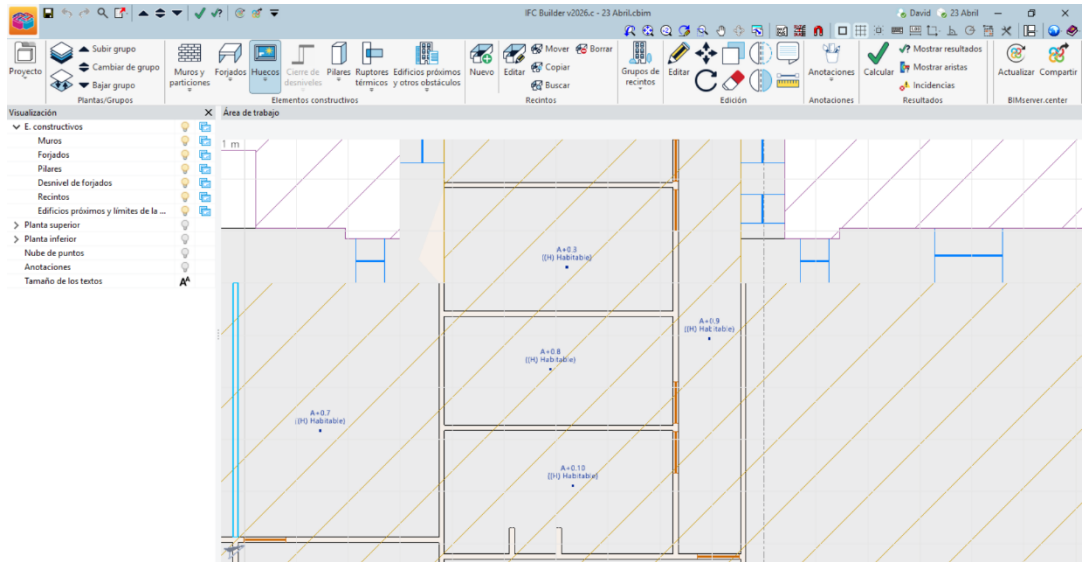


Figura 85- Generación de los recintos del edificio. Fuente: IFC Builder

ANEXO V: SIMULACIÓN DE CARGAS TÉRMICAS

Diagnóstico e interoperabilidad del modelo importado

El análisis de las cargas térmicas se realizó mediante el software CYPETHERM LOADS, integrando el modelo geométrico consolidado en la fase previa. Durante el proceso a través de la plataforma BIMserver.center se corrigieron las incidencias asociadas al flujo de trabajo.

Esta primera fase de depuración requirió la caracterización térmica de los recintos definidos en IFC Builder, indicando de forma explícita su régimen de funcionamiento (habitable o no habitable) y asignando las condiciones de contorno higrotérmicas de diseño, referidas a consignas de temperatura operativa y niveles de humedad relativa.

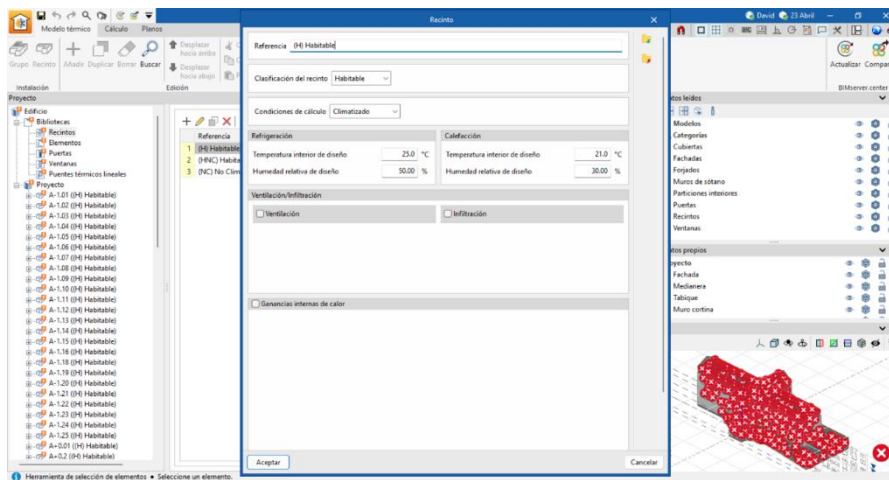


Figura 86- Definición de los diferentes tipos de recintos y las condiciones de diseño. Fuente: CYPETHERM LOADS.

Caracterización termo física de las soluciones constructivas

Posteriormente, el proceso de auditoría del modelo detectó la necesidad de tipificar y asignar las propiedades de los elementos constructivos de la envolvente térmica. Para su correcta caracterización, se utilizaron las especificaciones técnicas provistas por el personal de la vicerrectoría de infraestructuras y sostenibilidad. Este procedimiento permitió asignar a cada unidad de obra de sus coeficientes de transmitancia térmica, resistencia térmica e inercias, coherentes con la realidad constructiva del edificio.

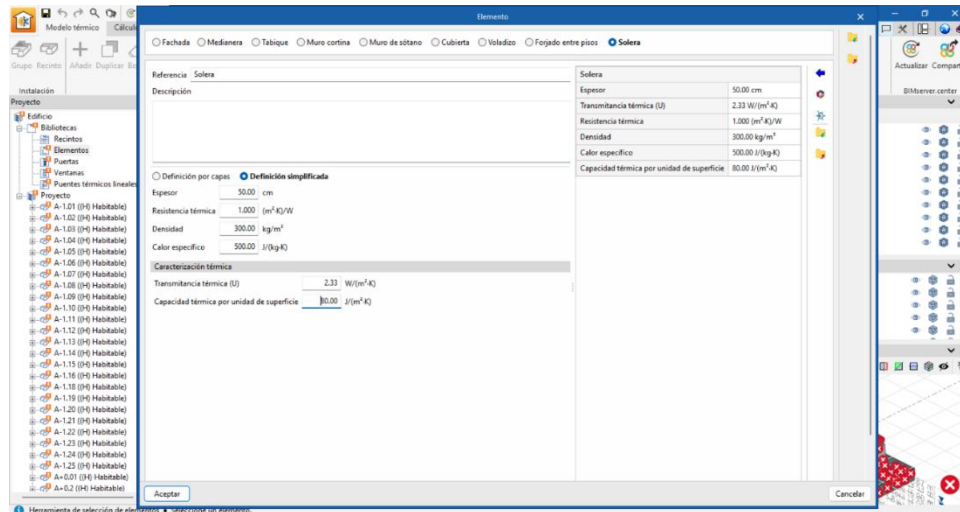


Figura 87- Definición de las características de los elementos constructivos. Fuente: CYPETHERM LOADS.

Tratamiento automatizado de puentes térmicos lineales

Con carácter previo a la ejecución del motor de cálculo del programa, se procedió a la resolución de las pérdidas lineales mediante la herramienta de procesamiento de aristas integrada en el propio software. Esta funcionalidad analizó los encuentros geométricos del edificio y aplicó de forma automática los coeficientes de transmitancia térmica lineal en puentes térmicos. El algoritmo operó conforme a las especificaciones del CTE DB HE1 y las directrices de la norma UNE-EN-ISO 13370, garantizando la validez y el cumplimiento normativo del modelo.

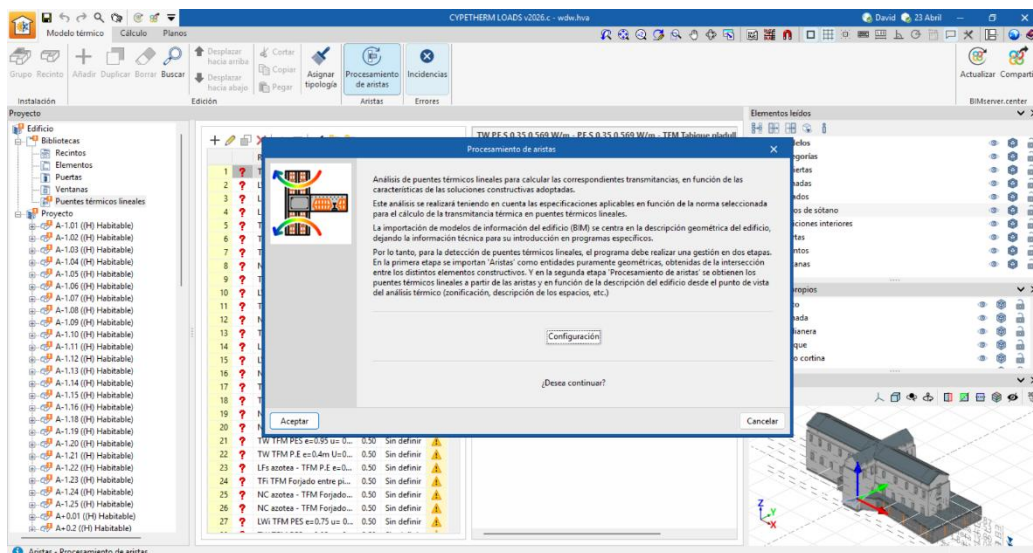


Figura 88- Procesamiento de aristas en puentes térmicos. Fuente: CYPETHERM LOADS.

Parametrización climática del emplazamiento

Una vez subsanadas las incidencias derivadas de la importación, se procedió a la definición de las condiciones de emplazamiento del proyecto, correspondiente a la localidad de Ferrol. Los parámetros climáticos empleadas se detallan en la *Figura 90*.

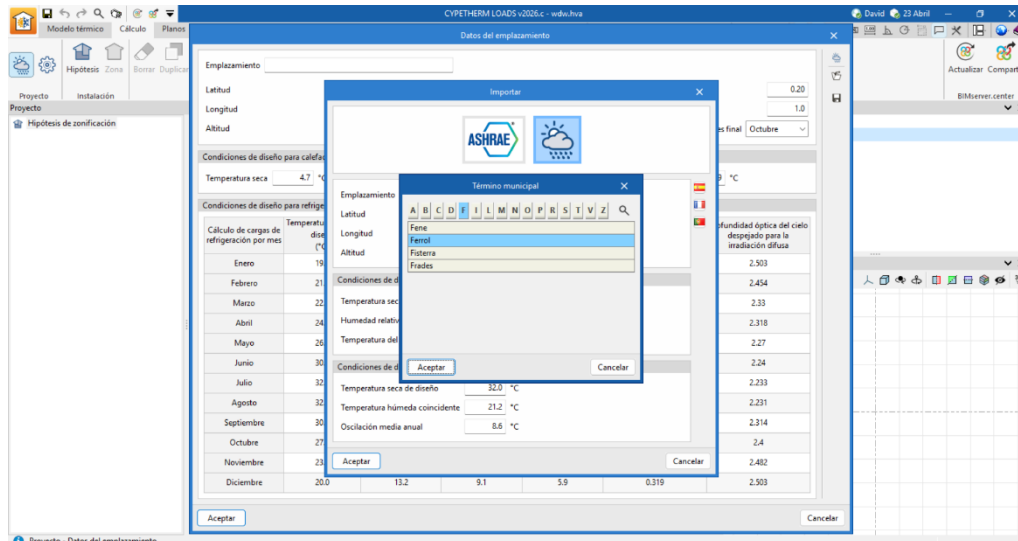


Figura 89- Selección del emplazamiento del proyecto. Fuente: CYPETHERM LOADS.

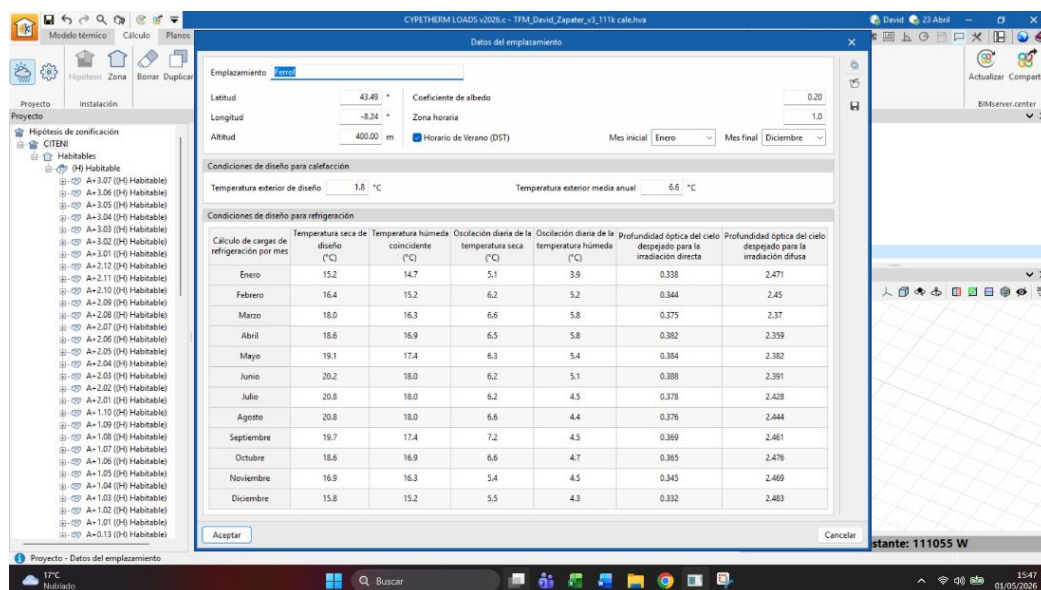


Figura 90- Parámetros climáticos para la localidad de Ferrol. Fuente: CYPETHERM LOADS.

Selección del método de cálculo

El software permite la simulación de las demandas mediante diferentes metodologías de ingeniería destacando el método de series temporales de ASHRAE y el método analítico basado en la norma UNE-EN 12831. Para este proyecto se seleccionó esta última metodología debido a su estricta convergencia con el marco normativo europeo y la justificación de las exigencias del CTE.

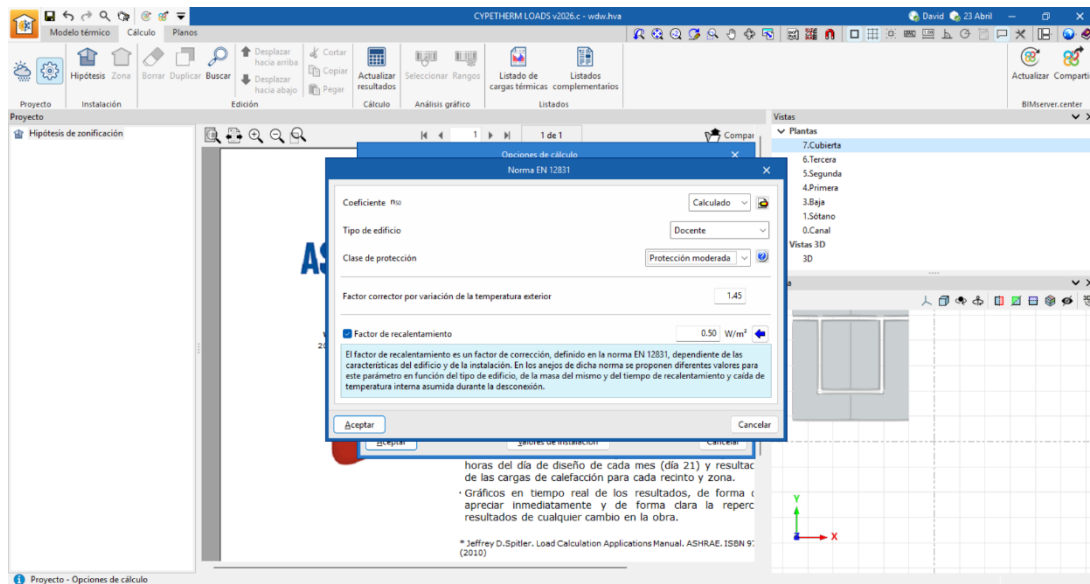


Figura 91- Valores de cálculo según norma UNE-EN 12831. Fuente: CYPETHERM LOADS

Zonificación térmica

Respecto a la estrategia de sectorización del CITENI, el criterio de discretización se fundamentó en el régimen de funcionamiento y en la tipología de las unidades terminales encargadas del aporte térmico. De este modo, las zonas climatizadas quedaron diferenciadas en: talleres y laboratorios, aulas y zonas comunes y despachos y oficinas y despachos.

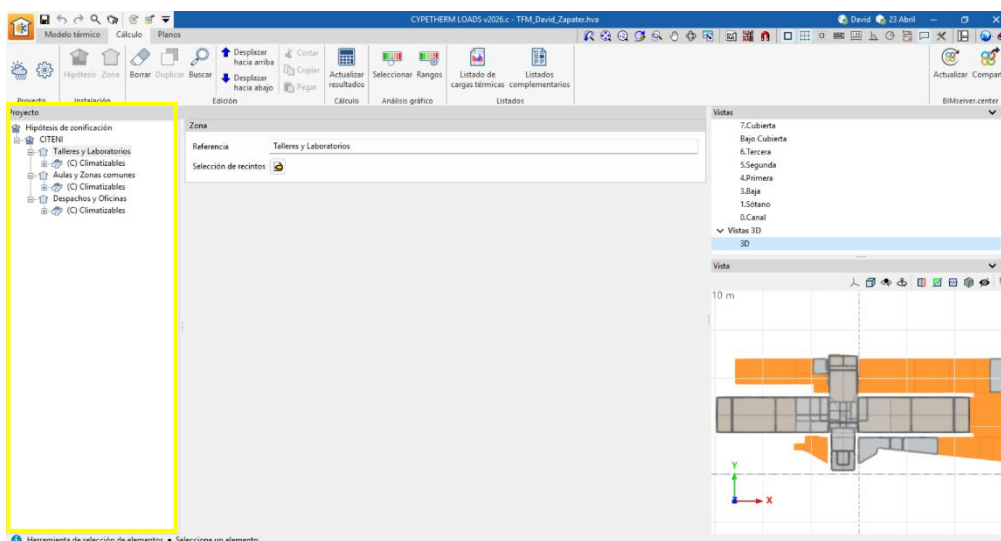


Figura 92- Zonificación térmica del edificio. Fuente: CYPETHERM LOADS.

Balances y obtención de resultados de diseño

El procesamiento de las ecuaciones de calor proporcionó un desglose cuantitativo y detallado de las cargas térmicas por recinto. Los resultados obtenidos distinguen las contribuciones de carga por transmisión a través de cerramiento, radiación solar directa e infiltraciones de aire exterior entre otras.

Adicionalmente, el software permite generar diversas gráficas de cargas máximas térmicas por calefacción y refrigeración además de carga máxima simultánea de refrigeración, permitiendo diagnosticar de forma precisa los periodos de máxima solicitud y los picos de carga simultánea del edificio.

Tabla 26- Carga de refrigeración máxima simultánea en talleres y laboratorios. Fuente: CYPETHERM LOADS.

Informe de cargas térmicas

1. RESUMEN DE LOS RESULTADOS DEL CÁLCULO DE CARGAS

1.1.Refrigeración

Resumen de las cargas de refrigeración de la zona: Talleres y Laboratorios

	Externas					Internas		Ventilación			Totales			
	A	Conducción Solar Inf. lat. Inf. sens.				Lat. Sens.		Caudal Lat. Sens.	Lat. Sens.	Total	Total			
	(m²)	(W)	(W)	(W)	(W)	(W)	(W)	(l/s)	(W)	(W)	(W)	(W)	(W/m²)	(W)
Carga máxima de refrigeración por recinto														
A+1.03(C)	50.5	-176	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-176	-3	-176
A+1.01(C)	54.1	-356	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-356	-7	-356
A+0.11(C)	170.1	-1118	7805	0	0	0	0	0	0	0	0	6687	39	6687
A+0.5(C)	92.1	-963	5409	0	0	0	0	0	0	0	0	4446	48	4446
A+0.4(C)	33.7	-300	1883	0	0	0	0	0	0	0	0	1583	47	1583
A-1.25(C)	13.2	61	0	0	0	0	0	0	0	0	0	61	5	61
A-1.24(C)	12.4	73	0	0	0	0	0	0	0	0	0	73	6	73
A-1.23(C)	34.6	143	0	0	0	0	0	0	0	0	0	143	4	143
A-1.18(C)	22.7	21	62	0	0	0	0	0	0	0	0	84	4	84
A-1.16(C)	181.1	-926	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-926	-5	-926
A-1.15(C)	14.6	-80	82	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	2
A-1.13(C)	20.9	119	0	0	0	0	0	0	0	0	0	119	6	119
A-1.12(C)	35.3	178	0	0	0	0	0	0	0	0	0	178	5	178
A-1.11(C)	50.6	248	0	0	0	0	0	0	0	0	0	248	5	248
A-1.10(C)	81.4	-39	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-39	0	-39
A-1.07(C)	13.5	12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	12	1	12
A-1.05(C)	7.4	-116	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-116	-16	-116
A-1.02(C)	10.9	52	0	0	0	0	0	0	0	0	0	52	5	52
A-1.01(C)	65.3	314	0	0	0	0	0	0	0	0	0	314	5	314
Carga máxima simultánea de refrigeración para el conjunto de recintos: 21 de Junio a las 19h (16 horas solar aparente)														
Talleres y Laboratorios	964.1						0				0	10878	11.28	10878

Tabla 27- Carga térmica de diseño de calefacción en talleres y laboratorios. Fuente: CYPETHERM LOADS.

1.2.Calefacción

Resumen de las cargas de calefacción de la zona: Talleres y Laboratorios

	A (m²)	Φ_r (W)	Φ_i (W)	Φ_{di} (W)	$\Phi_{t,s}$ (W)	$\Phi_{t,e}$ (W)
Carga térmica de diseño de calefacción por recinto						
A+1.03(C)	50.5	694	0	25	719	719
A+1.01(C)	54.1	1243	0	27	1270	1270
A+0.11(C)	170.1	4313	0	85	4398	4398
A+0.5(C)	92.1	2618	0	46	2664	2664
A+0.4(C)	33.7	1362	0	17	1379	1379
A-1.25(C)	13.2	733	0	7	739	739
A-1.24(C)	12.4	591	0	6	597	597
A-1.23(C)	34.6	1767	0	17	1784	1784
A-1.18(C)	22.7	1425	0	11	1436	1436
A-1.16(C)	181.1	16220	0	91	16310	16310
A-1.15(C)	14.6	659	0	7	666	666
A-1.13(C)	20.9	1172	0	10	1182	1182
A-1.12(C)	35.3	1621	0	18	1638	1638
A-1.11(C)	50.6	2325	0	25	2351	2351
A-1.10(C)	81.4	3709	0	41	3750	3750
A-1.07(C)	13.5	784	0	7	790	790
A-1.05(C)	7.4	539	0	4	543	543
A-1.02(C)	10.9	610	0	5	616	616
A-1.01(C)	65.3	3447	0	33	3480	3480
Carga térmica de diseño de calefacción para la zona						
Talleres y Laboratorios	964.1				46314	46314

Tabla 28- Carga de refrigeración máxima simultánea en aulas y zonas comunes. Fuente: CYPETHERM LOADS.

Informe de cargas térmicas

1. RESUMEN DE LOS RESULTADOS DEL CÁLCULO DE CARGAS

1.1. Refrigeración

Resumen de las cargas de refrigeración de la zona: Aulas y Zonas comunes

	Externas				Internas		Ventilación		Totales		
	A (m²)	Conducción (W)	Solar Inf. (W)	Lat. Inf. (W)	Lat. Sens. (W)	Lat. Sens. (W)	Caudal (l/s)	Lat. Sens. (W)	Lat. Sens. (W)	Total (W/m²)	Total (W)
Carga máxima de refrigeración por recinto											
A+3.07(C)	29.9	-317	998	0	0	0	0	0	0	680	680
A+1.10(C)	21.9	-117	0	0	0	0	0	0	0	-117	-117
A+2.12(C)	29.6	-243	1382	0	0	0	0	0	0	1139	1139
A+3.05(C)	144.5	-1327	5503	0	0	0	0	0	0	4176	4176
A+3.04(C)	144.5	-1343	5540	0	0	0	0	0	0	4197	4197
A+3.02(C)	65.2	-463	1422	0	0	0	0	0	0	959	959
A+0.10(C)	10.4	-7	0	0	0	0	0	0	0	-7	-7
A+2.09(C)	70.9	-421	2954	0	0	0	0	0	0	2533	2533
A+2.10(C)	66.0	-433	2997	0	0	0	0	0	0	2564	2564
A+2.06(C)	71.3	-462	3080	0	0	0	0	0	0	2618	2618
A+2.05(C)	66.0	-432	3026	0	0	0	0	0	0	2594	2594
A+2.03(C)	66.3	-630	3088	0	0	0	0	0	0	2458	2458
A+1.09(C)	3.9	-7	0	0	0	0	0	0	0	-7	-7
A+1.08(C)	3.2	-6	0	0	0	0	0	0	0	-6	-6
A+1.06(C)	7.1	-16	0	0	0	0	0	0	0	-16	-16
A+1.05(C)	6.4	-15	0	0	0	0	0	0	0	-15	-15
A+1.04(C)	7.5	-16	0	0	0	0	0	0	0	-16	-16
A+0.12(C)	9.0	-59	0	0	0	0	0	0	0	-59	-59
A+0.7(C)	18.9	-92	528	0	0	0	0	0	0	436	436
A+0.6(C)	13.8	-155	1259	0	0	0	0	0	0	1105	1105
A+0.9(C)	12.6	-223	443	0	0	0	0	0	0	219	219
A+0.13(C)	28.9	-166	99	0	0	0	0	0	0	-67	-67
A-1.19(C)	13.2	-97	0	0	0	0	0	0	0	-97	-97
A-1.09(C)	4.8	-36	0	0	0	0	0	0	0	-36	-36
A-1.08(C)	6.8	-45	0	0	0	0	0	0	0	-45	-45
A-1.04(C)	8.5	-63	0	0	0	0	0	0	0	-63	-63
Carga máxima simultánea de refrigeración para el conjunto de recintos: 21 de Julio a las 19h (16 hora solar aparente)											
Aulas y Zonas comunes	930.9						0			22631	22631

Tabla 29- Carga térmica de diseño de calefacción en aulas y zonas comunes. Fuente: CYPETHERM LOADS.

1.2. Calefacción						
Resumen de las cargas de calefacción de la zona: Aulas y Zonas comunes						
	A (m ²)	Φ _h (W)	Φ _h (W)	Φ _h (W)	Φ _h (W)	Φ _h (W)
Carga térmica de diseño de calefacción por recinto						
A+3.07(C)	29.9	965	0	15	980	980
A+1.10(C)	21.9	429	0	11	440	440
A+2.12(C)	29.6	653	0	15	668	668
A+3.05(C)	144.5	5147	0	72	5220	5220
A+3.04(C)	144.5	5202	0	72	5274	5274
A+3.02(C)	65.2	1444	0	33	1476	1476
A+0.10(C)	10.4	14	0	5	19	19
A+2.09(C)	70.9	1864	0	35	1899	1899
A+2.10(C)	66.0	1643	0	33	1676	1676
A+2.06(C)	71.3	2005	0	36	2041	2041
A+2.05(C)	66.0	1644	0	33	1677	1677
A+2.03(C)	66.3	1936	0	33	1969	1969
A+1.09(C)	3.9	11	0	2	13	13
A+1.08(C)	3.2	10	0	2	11	11
A+1.06(C)	7.1	27	0	4	31	31
A+1.05(C)	6.4	24	0	3	27	27
A+1.04(C)	7.5	28	0	4	32	32
A+0.12(C)	9.0	184	0	4	189	189
A+0.7(C)	18.9	268	0	9	277	277
A+0.6(C)	13.8	414	0	7	421	421
A+0.9(C)	12.6	735	0	6	741	741
A+0.13(C)	28.9	572	0	14	586	586
A-1.19(C)	13.2	643	0	7	649	649
A-1.09(C)	4.8	180	0	2	182	182
A-1.08(C)	6.8	254	0	3	257	257
A-1.04(C)	8.5	443	0	4	448	448
Carga térmica de diseño de calefacción para la zona						
Aulas y Zonas comunes	930.9				27202	27202

Tabla 30- Carga de refrigeración máxima simultánea en despachos y oficinas. Fuente: CYPETHERM LOADS.

Informe de cargas térmicas

1. RESUMEN DE LOS RESULTADOS DEL CÁLCULO DE CARGAS

1.1. Refrigeración

Resumen de las cargas de refrigeración de la zona: Despachos y Oficinas												
	Externas				Internas		Ventilación			Totales		
	A (m ²)	Conducción (W)	Solar (W)	Inf.lat. (W)	Inf.sens. (W)	Lat. Sens. (W)	Caudal (l/s)	Lat. Sens. (W)	Inf.sens. (W)	Lat. Sens. (W)	Inf.sens. (W)	Total (W)
Carga máxima de refrigeración por recinto												
A+3.06(C)	22.7	-360	1104	0	0	0	0	0	0	0	744	744
A+3.03(C)	22.7	-351	1298	0	0	0	0	0	0	0	947	947
A+3.01(C)	16.4	-261	799	0	0	0	0	0	0	0	537	537
A+2.11(C)	21.1	-637	2326	0	0	0	0	0	0	0	1689	1689
A+2.04(C)	21.8	-334	3161	0	0	0	0	0	0	0	2828	2828
A+2.02(C)	5.4	-131	444	0	0	0	0	0	0	0	312	312
A+2.01(C)	5.7	-134	803	0	0	0	0	0	0	0	669	669
A+1.07(C)	25.1	-108	0	0	0	0	0	0	0	0	-108	-108
A+1.02(C)	24.8	-102	0	0	0	0	0	0	0	0	-102	-102
A+0.3(C)	10.4	-26	0	0	0	0	0	0	0	0	-26	-26
A+0.2(C)	14.8	-179	1566	0	0	0	0	0	0	0	1387	1387
A+0.1(C)	18.2	-315	1927	0	0	0	0	0	0	0	1612	1612
Carga máxima simultánea de refrigeración para el conjunto de recintos: 21 de Agosto a las 18h (15 hora solar aparente)												
Despachos y Oficinas	209.1						0			0	9552	9552

Tabla 31- Carga térmica de diseño de calefacción en despachos y oficinas. Fuente: CYPETHERM LOADS.

1.2.Calefacción

Resumen de las cargas de calefacción de la zona: Despachos y Oficinas						
	A (m ²)	Φ_{t} (W)	Φ_{v} (W)	Φ_{int} (W)	Φ_{HLS} (W)	Φ_{HL} (W)
Carga térmica de diseño de calefacción por recinto						
A+3.06(C)	22.7	1361	0	11	1372	1372
A+3.03(C)	22.7	1362	0	11	1373	1373
A+3.01(C)	16.4	965	0	8	974	974
A+2.11(C)	21.1	1343	0	11	1354	1354
A+2.04(C)	21.8	1424	0	11	1435	1435
A+2.02(C)	5.4	489	0	3	491	491
A+2.01(C)	5.7	507	0	3	509	509
A+1.07(C)	25.1	385	0	13	398	398
A+1.02(C)	24.8	370	0	12	383	383
A+0.3(C)	10.4	46	0	5	51	51
A+0.2(C)	14.8	524	0	7	532	532
A+0.1(C)	18.2	1244	0	9	1253	1253
Carga térmica de diseño de calefacción para la zona						
Despachos y Oficinas	209.1				10125	10125

ANEXO VI: COMPARACIÓN DE FABRICANTES

Tabla 32- Resultados para diferentes fabricantes aislamiento de fachada interior. Fuente: Elaboración propia.

Mejora: Aislamiento de fachada por el Interior								
	Caso Base		Chovafoam 40mm		Superglass 40 mm		Aislatermic 40mm	
Parámetro	Valor	Categoría	Valor	Categoría	Valor	Categoría	Valor	Categoría
Demanda de Calefacción (kWh/m ² .año)	61,89	D	57,24	D	57,54	D	56,71	C
Demanda de Refrigeración (kWh/m ² .año)	1,85	D	2,10	D	2,11	D	2,09	D
Emisiones Globales (kgCO ₂ /m ² .año)	36,41	D	34,57	C	34,78	C	34,36	C
Consumo Global de Energía primaria no renovable (kWh/m ² .año)	165,66	D	158,28	C	158,87	C	157,46	C

Tabla 33- Resultados para diferentes fabricantes aislamiento de fachada exterior. Fuente: Elaboración propia.

Mejora: Aislamiento de fachada por el Exterior								
	Caso Base		Termoklinker 48mm		Wurth 40 mm		Saint-Gobain 40mm	
Parámetro	Valor	Categoría	Valor	Categoría	Valor	Categoría	Valor	Categoría
Demanda de Calefacción (kWh/m ² .año)	61,89	D	58,45	D	58,1	D	58,89	D
Demanda de Refrigeración (kWh/m ² .año)	1,85	D	1,89	D	1,82	C	1,91	D
Emisiones Globales (kgCO ₂ /m ² .año)	36,41	D	35,1	C	34,95	C	35,47	C
Consumo Global de Energía primaria no renovable (kWh/m ² .año)	165,66	D	160,13	D	159,83	D	161,34	D

Tabla 34- Resultados para diferentes fabricantes aislamiento de cubierta. Fuente: Elaboración propia.

Mejora: Aislamiento de cubierta								
	Caso Base		Chovafoam 80mm		Danoprent 80 mm		Tecnozone 80mm	
Parámetro	Valor	Categoría	Valor	Categoría	Valor	Categoría	Valor	Categoría
Demanda de Calefacción (kWh/m ² .año)	61,89	D	61,89	D	61,89	D	61,89	D
Demanda de Refrigeración (kWh/m ² .año)	1,85	D	1,85	D	1,85	D	1,85	D
Emisiones Globales (kgCO ₂ /m ² .año)	36,41	D	36,41	D	36,41	D	36,41	D
Consumo Global de Energía primaria no renovable (kWh/m ² .año)	165,66	D	165,66	D	165,66	D	165,66	D

Tabla 35- Resultados para diferentes fabricantes vidrios y carpintería. Fuente: Elaboración propia.

Mejora: Sustitución de vidrios y carpintería								
	Caso Base		Kommerleing 76 AD-Ext		OnVentanas EnergyPRO		Itesal IT-81-NG	
Parámetro	Valor	Categoría	Valor	Categoría	Valor	Categoría	Valor	Categoría
Demanda de Calefacción (kWh/m ² .año)	61,89	D	58,13	D	56,62	C	55,94	C
Demanda de Refrigeración (kWh/m ² .año)	1,85	D	1,60	C	1,83	C	1,83	C
Emisiones Globales (kgCO ₂ /m ² .año)	36,41	D	34,97	C	34,33	C	34,09	C
Consumo Global de Energía primaria no renovable (kWh/m ² .año)	165,66	D	159,68	D	157,07	C	156,12	C

Tabla 36- Resultados para diferentes fabricantes calderas de biomasa. Fuente: Elaboración propia.

Mejora: Sustitución de caldera por caldera de biomasa								
	Caso Base		Oekoferm Pellematic XL		Bioclass Domussa		Hargassner ECO-PK	
Parámetro	Valor	Categoría	Valor	Categoría	Valor	Categoría	Valor	Categoría
Demanda de Calefacción (kWh/m ² .año)	61,89	D	61,89	D	61,89	D	61,89	D
Demanda de Refrigeración (kWh/m ² .año)	1,85	D	1,85	D	1,85	D	1,85	D
Emisiones Globales (kgCO ₂ /m ² .año)	36,41	D	14,97	B	15,08	B	15,05	B
Consumo Global de Energía primaria no renovable (kWh/m ² .año)	165,66	D	82,44	B	82,67	B	82,74	B

Tabla 37- Resultados para diferentes fabricantes aerotermia aire-agua. Fuente: Elaboración propia.

Mejora: Sustitución de caldera por aerotermia aire-agua								
	Caso Base		Daikin		Mitsubishi		Baxi	
Parámetro	Valor	Categoría	Valor	Categoría	Valor	Categoría	Valor	Categoría
Demanda de Calefacción (kWh/m ² .año)	61,89	D	61,89	D	61,89	D	61,89	D
Demanda de Refrigeración (kWh/m ² .año)	1,85	D	1,85	D	1,85	D	1,85	D
Emisiones Globales (kgCO ₂ /m ² .año)	36,41	D	17,10	B	17,13	B	16,58	B
Consumo Global de Energía primaria no renovable (kWh/m ² .año)	165,66	D	107,95	B	107,86	B	97,87	B

Tabla 38- Resultados para diferentes fabricantes aerotermia aire-aire VRF. Fuente: Elaboración propia.

Mejora: Sustitución de caldera y climatizadoras por aerotermia aire-aire VRF								
	Caso Base		Bosch		Daikin		Mitsubishi	
Parámetro	Valor	Categoría	Valor	Categoría	Valor	Categoría	Valor	Categoría
Demanda de Calefacción (kWh/m ² .año)	61,89	D	61,89	D	61,89	D	61,89	D
Demanda de Refrigeración (kWh/m ² .año)	1,85	D	1,85	D	1,85	D	1,85	D
Emisiones Globales (kgCO ₂ /m ² .año)	36,41	D	10,49	A	10,98	A	10,59	A
Consumo Global de Energía primaria no renovable (kWh/m ² .año)	165,66	D	61,95	A	64,75	A	64,17	A

Tabla 39- Resultados para diferentes fabricantes módulos fotovoltaicos. Fuente: Elaboración propia.

Mejora: Instalación de paneles fotovoltaicos								
	Caso Base		AIKO Solar		IRMA Solar		TCL Solar	
Parámetro	Valor	Categoría	Valor	Categoría	Valor	Categoría	Valor	Categoría
Demanda de Calefacción (kWh/m ² .año)	61,89	D	61,89	D	61,89	D	61,89	D
Demanda de Refrigeración (kWh/m ² .año)	1,85	D	1,85	D	1,85	D	1,85	D
Emisiones Globales (kgCO ₂ /m ² .año)	36,41	D	30,96	C	31,28	C	31,03	C
Consumo Global de Energía primaria no renovable (kWh/m ² .año)	165,66	D	133,51	C	134,69	C	133,89	C

ANEXO VII: CÁLCULOS ESTUDIO DE VIABILIDAD

Costes operativos de las mejoras propuestas

Tabla 40- Coste operativo anual en el estado actual. Fuente: Elaboración propia.

Coste operativo anual del edificio en el estado actual			
Instalación	Coste por unidad (€/l o €/kWh)	Consumo (kWh/año)	Coste anual (€/año)
Gasoil	1,10	157787,40	17.391,40 €
Electricidad	0,17	83179,00	14.140,43 €
Total			31.531,83 €

Tabla 41- Coste operativo anual tras aplicar aislamiento de fachada por el interior. Fuente: Elaboración propia.

Coste operativo anual tras aplicar aislamiento de fachada por el interior					
Fuente de Energía	Coste por unidad (€/l o €/kWh)	Consumo (kWh/año)	Coste anual (€/año)	Coste total mejora (€)	PB (años)
Gasoil	1,10	145390,40	16.024,99 €	27.772,70 €	17,40
Electricidad	0,17	81826,70	13.910,54 €		
Total			29.935,53 €		

Tabla 42- Coste operativo anual tras aplicar aislamiento de fachada por el exterior. Fuente: Elaboración propia.

Coste operativo anual tras aplicar aislamiento de fachada por el exterior					
Fuente de Energía	Coste por unidad (€/l o €/kWh)	Consumo (kWh/año)	Coste anual (€/año)	Coste total mejora (€)	PB (años)
Gasoil	1,10	148886,60	16.410,35 €	23.050,85 €	20,29
Electricidad	0,17	82267,60	13.985,49 €		
Total			30.395,84 €		

Tabla 43- Coste operativo anual tras aplicar aislamiento de cubierta. Fuente: Elaboración propia.

Coste operativo anual tras aplicar aislamiento de cubierta					
Fuente de Energía	Coste por unidad (€/l o €/kWh)	Consumo (kWh/año)	Coste anual (€/año)	Coste total mejora (€)	PB (años)
Gasoil	1,10	155560,50	17.145,95 €	16.658,04 €	58,25
Electricidad	0,17	82940,50	14.099,89 €		
Total			31.245,83 €		

Tabla 44- Coste operativo anual tras aplicar sustitución de vidrios y carpintería. Fuente: Elaboración propia.

Sustitución de vidrios y carpintería					
Fuente de Energía	Coste por unidad (€/l o €/kWh)	Consumo (kWh/año)	Coste anual (€/año)	Coste total mejora (€)	PB (años)
Gasoil	1,10	144448,20	15.921,14 €	50.940,74 €	26,68
Electricidad	0,17	80595,90	13.701,30 €		
Total			29.622,45 €		

Tabla 45- Coste operativo anual tras aplicar sustitución de caldera de biomasa. Fuente: Elaboración propia.

Sustitución de caldera convencional por caldera biomasa					
Fuente de Energía	Coste por unidad (€/kg o €/kWh)	Consumo (kWh/año)	Coste anual (€/año)	Coste total mejora (€)	PB (años)
Pellets	0,20	126031,70	4.501,13 €	23.399,69 €	1,82
Electricidad	0,17	83186,20	14.141,65 €		
Total			18.642,79 €		

Tabla 46- Coste operativo anual tras aplicar sustitución por aerotermia aire-agua. Fuente: Elaboración propia.

Coste operativo anual tras aplicar sustitución de caldera convencional por aerotermia aire-agua					
Fuente de Energía	Coste por unidad (€/l o €/kWh)	Consumo (kWh/año)	Coste anual (€/año)	Coste total mejora (€)	PB (años)
Electricidad	0,17	104052,60	17.688,94 €	121.265,75 €	8,76
Total			17.688,94 €		

Tabla 47- Coste operativo anual tras aplicar sustitución por aerotermia aire-aire VRF. Fuente: Elaboración propia.

Coste operativo anual tras aplicar sustitución de caldera convencional por aerotermia aire-aire VRF					
Fuente de Energía	Coste por unidad (€/l o €/kWh)	Consumo (kWh/año)	Coste anual (€/año)	Coste total mejora (€)	PB (años)
Electricidad	0,17	100130,60	17.022,20 €	140.660,26 €	9,69
Total			17.022,20 €		

Tabla 48- Coste operativo anual tras aplicar instalación fotovoltaica. Fuente: Elaboración propia.

Coste operativo anual tras aplicar instalación de paneles fotovoltaicos					
Fuente de Energía	Coste por unidad (€/kWh)	Producción (kWh/año)	Ahorro anual (€/año)	Coste total mejora (€)	PB (años)
Electricidad	0,17	34672,00	5.894,24 €	23.578,21 €	4,00

Análisis de sensibilidad financiera

Metodología y objeto del análisis de sensibilidad

Una vez definido y seleccionado el conjunto óptimo de actuaciones de mejora, se desarrolló un análisis de sensibilidad financiera. El propósito de este estudio es evaluar la resiliencia económica del proyecto frente a la volatilidad e incertidumbres del mercado energético actual, cuantificando el grado de afección de las variaciones en los precios de la electricidad y el gasóleo al periodo de retorno de la inversión.

Este análisis permite reafirmar que la inversión propuesta para el CITENI se mantiene dentro de los márgenes de rentabilidad incluso ante situaciones macroeconómicas desfavorables.

Escenarios de volatilidad del mercado eléctrico

Dado que la propuesta de mejora traslada la totalidad del consumo de energía primaria a electricidad, el coste de la electricidad se convierte en una de las variables con mayor importancia dentro del coste operativo del edificio. Se evaluaron escenarios de fluctuación de la tarifa eléctrica dentro de un rango de $\pm 40\%$.

Tabla 49- Indicadores del análisis de sensibilidad a la tarifa eléctrica. Fuente: Elaboración propia.

Variación del precio de la electricidad	Coste total de las mejoras (€)	Coste operativo anual (€/año)	Ahorro anual (€)	VAN	TIR	IR	PB
(-40%)	164.238,47 €	6.760,24 €	24.771,59 €	180.508,55 €	13,06%	2,10 €	6,63
(-30%)		7.886,95 €	23.644,88 €	161.025,49 €	12,20%	1,98 €	6,95
(-20%)		9.013,66 €	22.518,17 €	141.542,43 €	11,32%	1,86 €	7,29
(-10%)		10.140,37 €	21.391,46 €	122.059,37 €	10,42%	1,74 €	7,68
Precios actuales		11.267,07 €	20.264,76 €	102.576,31 €	9,49%	1,62 €	8,10
(+10%)		12.393,78 €	19.138,05 €	83.093,25 €	8,54%	1,51 €	8,58
(+20%)		13.520,49 €	18.011,34 €	63.610,19 €	7,55%	1,39 €	9,12
(+30%)		14.647,19 €	16.884,64 €	44.127,13 €	6,52%	1,27 €	9,73
(+40%)		15.773,90 €	15.757,93 €	24.644,07 €	5,45%	1,15 €	10,42

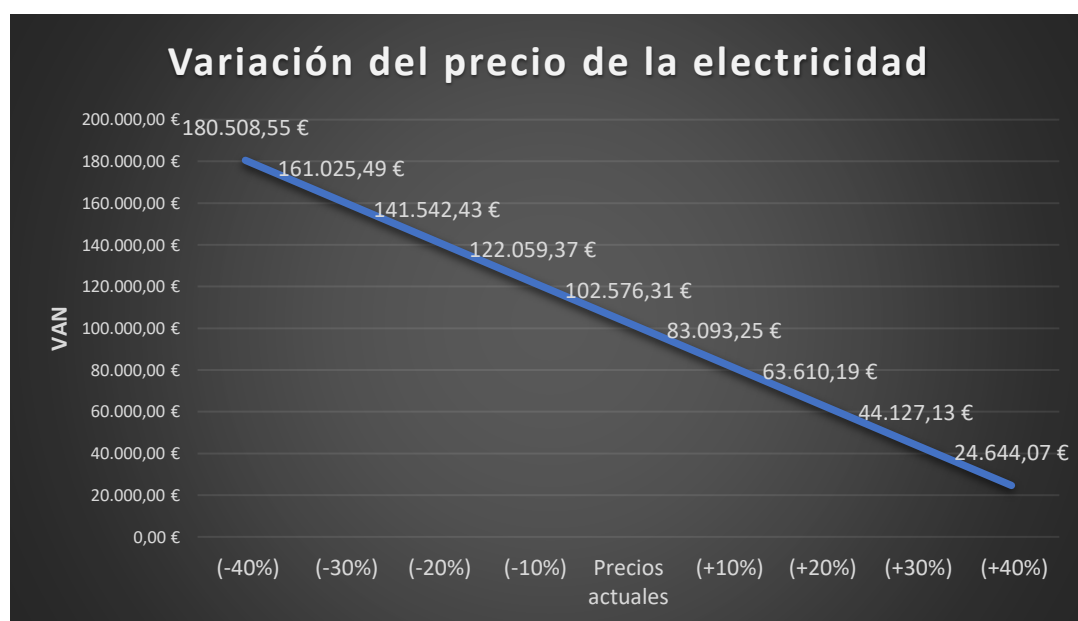


Figura 93- Representación del VAN frente a la variación de la tarifa eléctrica. Fuente: Elaboración propia

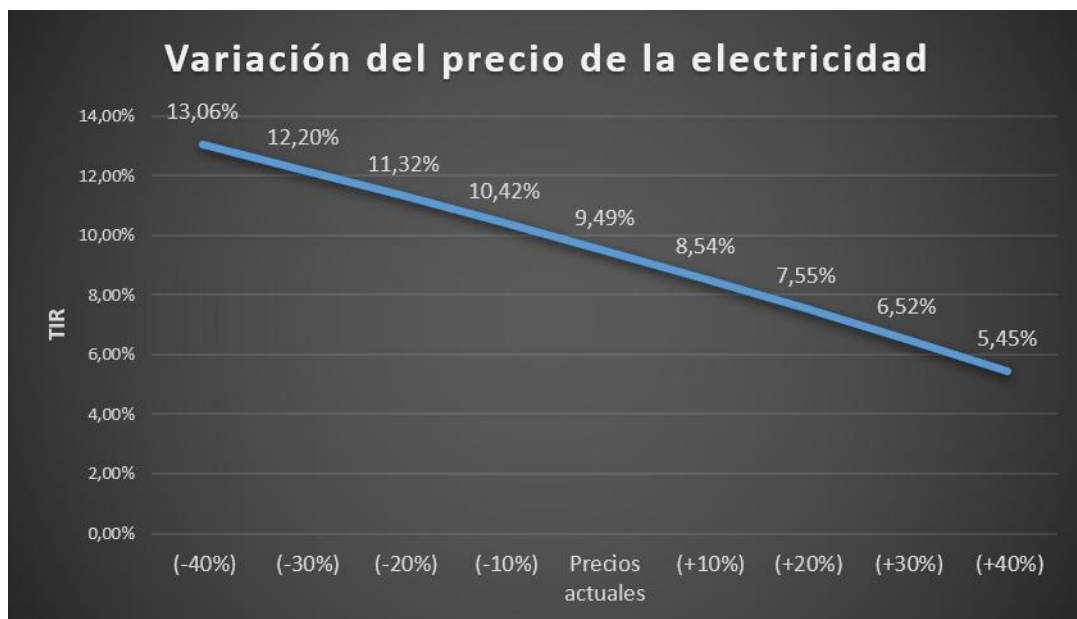


Figura 94- Representación del TIR frente a la variación de la tarifa eléctrica. Fuente: Elaboración propia

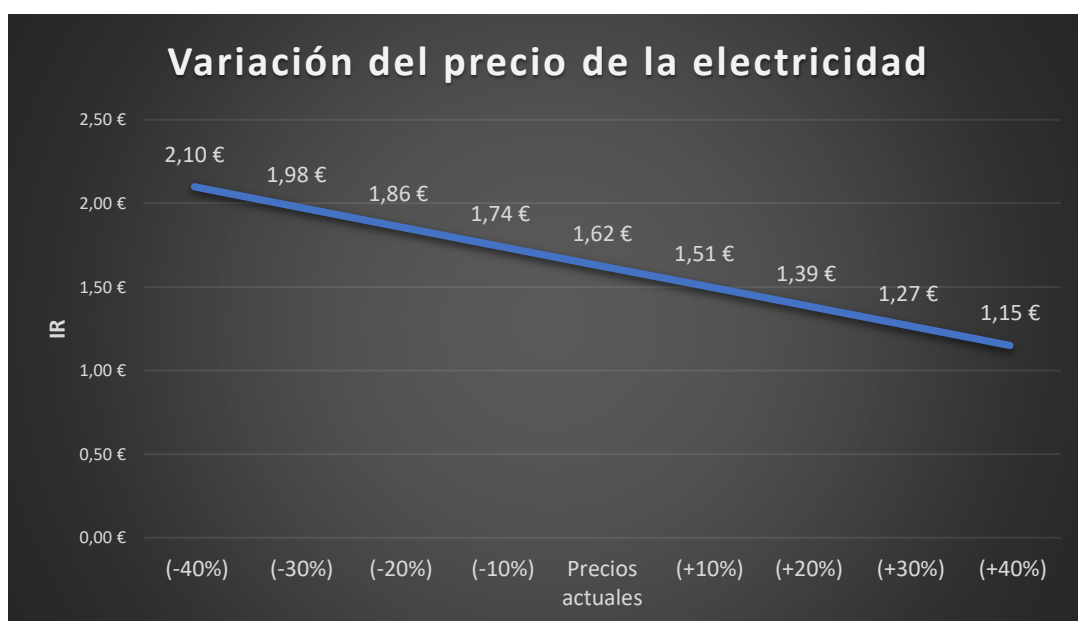


Figura 95- Representación del IR frente a la variación de la tarifa eléctrica. Fuente: Elaboración propia

Escenarios de volatilidad del mercado del petróleo

Aunque el gasóleo queda eliminado tras la ejecución de las medidas de mejora seleccionadas, su precio de mercado afecta directamente a la cuantificación del coste operativo del CITENI en el estado actual. Para este caso, se simuló una horquilla de variación $\pm 20\%$.

Tabla 50- Indicadores del análisis de sensibilidad al precio del gasoil. Fuente: Elaboración propia

Variación del precio del gasóleo	Coste total de las mejoras (€)	Coste operativo anual (€/año)	Ahorro anual (€)	VAN	TIR	IR	PB
(-20%)	164.238,47 €	11.267,07 €	16.786,47 €	42.429,74 €	6,43%	1,26 €	9,78
(-15%)		11.267,07 €	17.656,04 €	57.466,37 €	7,23%	1,35 €	9,30
(-10%)		11.267,07 €	18.525,61 €	72.503,00 €	8,01%	1,44 €	8,87
(-5%)		11.267,07 €	19.395,18 €	87.539,63 €	8,76%	1,53 €	8,47
Precios actuales		11.267,07 €	20.264,75 €	102.576,26 €	9,49%	1,62 €	8,10
(+5%)		11.267,07 €	21.134,32 €	117.612,89 €	10,21%	1,72 €	7,77
(+10%)		11.267,07 €	22.003,89 €	132.649,52 €	10,91%	1,81 €	7,46
(+15%)		11.267,07 €	22.873,46 €	147.686,15 €	11,60%	1,90 €	7,18
(+20%)		11.267,07 €	23.743,03 €	162.722,78 €	12,27%	1,99 €	6,92

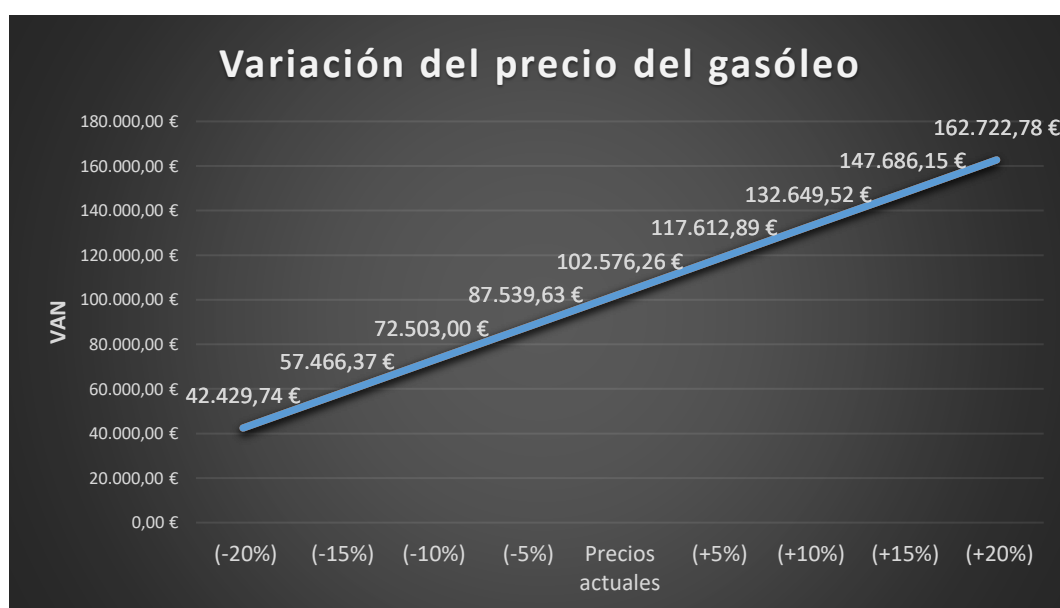


Figura 96- Representación del VAN frente a la variación del petróleo. Fuente: Elaboración propia

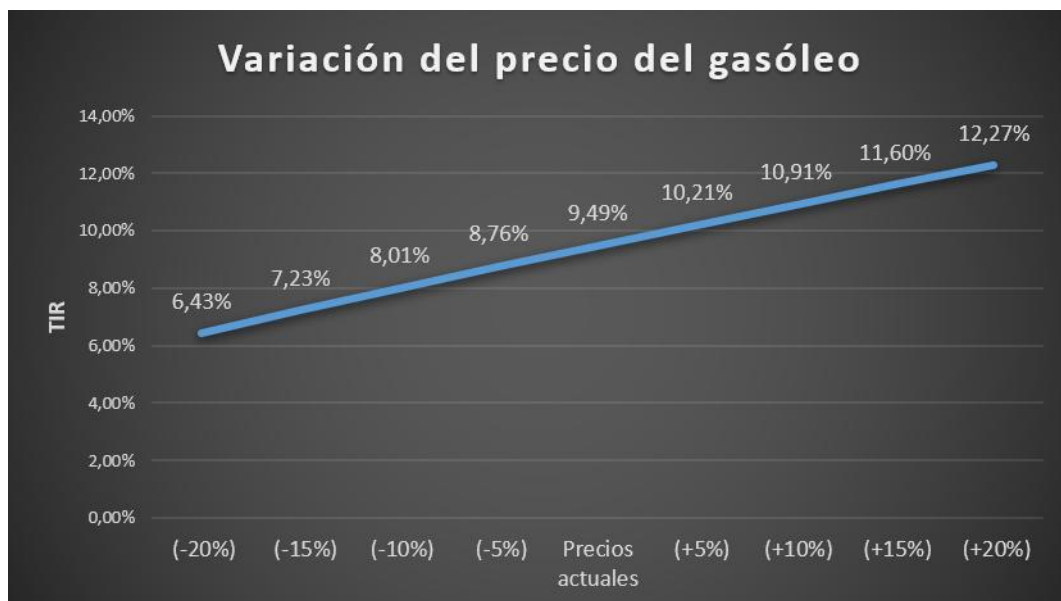


Figura 97- Representación del TIR frente a la variación del petróleo. Fuente: Elaboración propia

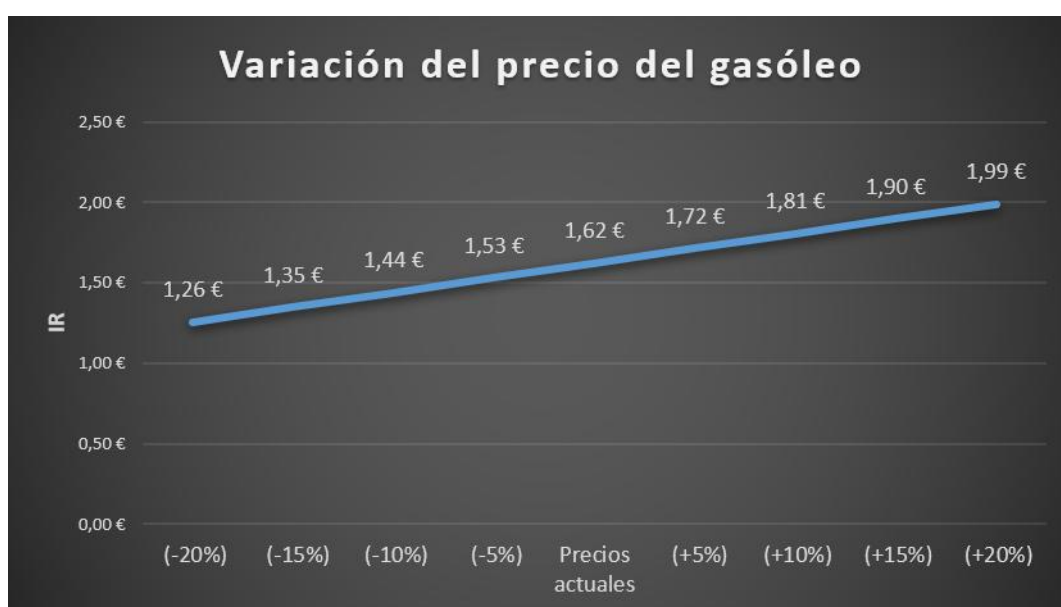


Figura 98- Representación del IR frente a la variación del petróleo. Fuente: Elaboración propia