



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

*Optimización de módulos prefabricados militares mediante
simulación energética y análisis multicriterio*

Grado en Ingeniería Mecánica

ALUMNO: Fernando Pérez Pineda

DIRECTORA: Lara Febrero Garrido

CURSO ACADÉMICO: 2025-2026

UniversidadeVigo



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

*Optimización de módulos prefabricados militares mediante
simulación energética y análisis multicriterio*

Grado en Ingeniería Mecánica

Intensificación en Tecnología Naval

Cuerpo General

UniversidadeVigo

RESUMEN

Los módulos prefabricados militares basados en contenedores ISO constituyen la solución de habitabilidad temporal predominante en los despliegues exteriores de las Fuerzas Armadas españolas. Su baja inercia térmica y la elevada dependencia de sistemas de climatización alimentados mediante grupos electrógenos diésel generan un consumo energético significativo, con importantes implicaciones logísticas y de seguridad operativa. La mejora de la envolvente térmica de estos módulos se presenta como una vía clave para reducir dicha dependencia.

En el presente Trabajo Fin de Grado se desarrolla un modelo energético de un módulo prefabricado militar, para el que se realizan simulaciones energéticas dinámicas en cuatro escenarios climáticos representativos de posibles entornos de despliegue mediante OpenStudio y EnergyPlus. A partir del modelo base se diseñan y simulan cuatro alternativas constructivas con distintos materiales aislantes. Posteriormente, los resultados energéticos se integran en un análisis multicriterio mediante el modelo de suma ponderada (WSM), que incorpora criterios energéticos, constructivos, logísticos y económicos bajo distintos escenarios estratégicos de ponderación. El estudio concluye con la propuesta de un módulo optimizado cuya configuración de envolvente logra reducciones de hasta un 25 % de la demanda energética de climatización en determinados climas, con incrementos moderados en espesor, peso y coste.

PALABRAS CLAVE

Módulos prefabricados, simulación energética, análisis multicriterio, envolvente térmica, eficiencia energética.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo pone fin a una etapa importante de mi vida, en la que he aprendido mucho tanto a nivel académico como personal. No siempre ha sido fácil, pero todo el esfuerzo ha merecido la pena para poder llegar hasta aquí.

En primer lugar, quiero dar las gracias a mi familia, y especialmente a mis padres, por su apoyo constante durante todos estos años. Gracias por confiar en mí y por darme la oportunidad de llegar hasta aquí.

A mis hermanas Isabel, Carmen y Ángela, y a mi hermano Miguel, que, aunque son más pequeños, siempre han estado ahí en el día a día. Y a mis abuelos, por su cariño y por todo lo que me han aportado a lo largo del tiempo.

Quiero agradecer también a mi tía Ena por su apoyo y sus consejos durante el desarrollo de este trabajo.

A mi promoción 426-156, con la que he compartido estos años, tanto en los momentos más exigentes como en los buenos, haciendo que el camino haya sido mucho más llevadero.

Por último, gracias a mi tutora del TFG, Lara Febrero Garrido, por su ayuda y orientación durante todo el proceso.

Gracias a todos por haber estado ahí.

CONTENIDO

Contenido	1
Índice de Figuras	4
Índice de Tablas.....	5
1 Introducción y objetivos	7
1.1 Introducción	7
1.2 Motivación	8
1.3 Objetivos	8
1.3.1 Objetivos específicos	8
1.4 Organización de la memoria	8
2 Estado del arte	11
2.1 Construcción modular y prefabricada	11
2.1.1 Concepto y evolución de la construcción modular prefabricada.....	11
2.1.2 Aplicaciones de los módulos prefabricados en misiones exteriores y ayuda humanitaria	12
2.1.3 Marco estratégico y sostenibilidad energética en infraestructuras militares temporales..	13
2.2 Misiones de España en el exterior.....	14
2.2.1 Climas presentes en las zonas de despliegue	15
2.3 Comportamiento térmico de los módulos prefabricados	16
2.3.1 Envolvente térmica en módulos prefabricados.....	17
2.3.2 Influencia del clima en el comportamiento energético de módulos ligeros	18
2.4 Métodos de análisis energético	19
2.4.1 Uso de software de simulación en edificios prefabricados.....	20
2.4.2 Datos de partida en la modelización energética	21
2.5 Análisis multicriterio en estudios de eficiencia energética	22
2.5.1 Limitaciones de los análisis basados en un único indicador.....	22
2.5.2 Enfoques de análisis multicriterio aplicados a la edificación	22
2.5.3 Criterios de evaluación en análisis multicriterio.....	23
3 Desarrollo del TFG.....	25
3.1 Metodología	25
3.2 Definición del caso de estudio	26
3.2.1 Contexto de aplicación: módulos prefabricados en misiones exteriores	26
3.3 Herramientas y software utilizados	26
3.3.1 Software de modelización energética	26

3.3.2 Enfoque de simulación y reproducibilidad	27
3.4 Escenarios climáticos	27
3.4.1 Selección de climas representativos de misiones exteriores.....	27
3.5 Definición constructiva del modelo base	28
3.6 Condiciones de uso y cargas internas	31
3.6.1 Definición del patrón de ocupación	31
3.6.2 Iluminación interior	32
3.7 Condiciones de ventilación e infiltraciones	32
3.7.1 Ventilación del módulo.....	33
3.7.2 Infiltraciones de aire	34
3.8 Condiciones de confort y control térmico	35
3.8.1 Consignas térmicas	35
3.8.2 Sistema de climatización empleado en la simulación.....	36
3.9 Módulos alternativos.....	36
3.9.1 Alternativa 1 - Panel sándwich con núcleo PIR	37
3.9.2 Alternativa 2 - Aislamiento con lana mineral.....	38
3.9.3 Alternativa 3 - Poliuretano proyectado célula cerrada (ccSPF).....	39
3.9.4 Alternativa 4 - Aislamiento continuo exterior mediante XPS	40
3.10 Indicadores de evaluación	41
3.10.1 Criterio 1 - Demanda energética anual total (kWh).....	42
3.10.2 Criterio 2 - Transmitancia térmica media de la envolvente (W/m^2K).....	42
3.10.3 Criterio 3 - Incremento de espesor respecto al modelo base (mm)	44
3.10.4 Criterio 4 - Peso superficial del cerramiento (kg/m^2).....	45
3.10.5 Criterio 5 - Coste estimado de los materiales del módulo (€)	46
3.11 Metodología de análisis multicriterio	48
3.11.1 Justificación del enfoque multicriterio	48
3.11.2 Selección del método de agregación.....	48
3.11.3 Normalización de criterios.....	48
3.11.4 Formulación del modelo	49
3.11.5 Asignación de pesos	49
3.11.6 Análisis de sensibilidad y escenarios estratégicos.....	49
3.11.7 Aplicación por escenario climático.....	50
4 Simulación y resultados.....	51
4.1 Resultados energéticos	52
4.1.1 Isla de Decepción (Antártida).....	52
4.1.2 Bagdad (Irak)	53

4.1.3 Marjayún (Líbano).....	55
4.1.5 Comparación global entre climas	59
4.2 Aplicación del análisis multicriterio	61
4.2.1 Matriz de decisión.....	61
4.2.2 Normalización de criterios.....	61
4.2.4 Ranking de alternativas por tipo de clima analizado	63
4.3 Evaluación de los materiales y configuraciones constructivas	64
4.4 Optimización del módulo.....	65
4.4.1 Construcción del módulo optimizado	65
4.4.2 Resultados energéticos del módulo optimizado	66
4.4.3 Evaluación multicriterio del módulo optimizado	67
4.4.4 Posición del módulo optimizado en el ranking.....	68
5 Conclusiones y líneas futuras	71
5.1 Conclusiones	71
5.2 Líneas futuras	72
6 Bibliografía.....	75
Anexo I: Implicaciones Sociales, y/o Económicas, y/o Ambientales	79
Anexo II: Reflexiones Éticas y Sociales	80
Anexo III: Uso responsable de la IA	81
Anexo IV: Matrices de decisión del análisis multicriterio	82
Anexo V: Criterios normalizados del análisis multicriterio	83
Anexo VI: Cálculos del índice global de desempeño.....	84
Anexo VII: Ranking de alternativas por escenario.....	85

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1 Portable Colonial Cottage de Herbert Mannig (1833) [3]	11
Figura 2-2 Dymaxion Deployment Unit de Buckminster Fuller (1941) [3]	12
Figura 2-3 Módulos prefabricados para los afectados por el volcán de La Palma [7]	13
Figura 2-4 Misiones fuera de territorio nacional en 2026 [11]	14
Figura 2-5 Sección del panel sándwich	17
Figura 2-6 Demanda anual de calefacción en distintos contextos climáticos para el mismo módulo [35]	19
Figura 2-7 Demanda anual de refrigeración en distintos contextos climáticos para el mismo módulo [35]	19
Figura 2-8 Esquema conceptual del método TOPSIS [47]	23
Figura 3-1 Diagrama de flujo metodológico	25
Figura 3-2 Evolución mensual de la temperatura exterior media en los climas analizados	28
Figura 3-3 Dimensiones interiores correspondientes a un contenedor ISO de 20 pies (TEU)	29
Figura 3-4 Vista en planta del modelo base	30
Figura 3-5 Perfil horario de ocupación en OpenStudio	31
Figura 3-6 Perfil horario de funcionamiento de la iluminación interior en OpenStudio	32
Figura 3-7 Definición del caudal de ventilación higiénica en OpenStudio	33
Figura 3-8 Definición de la infiltración en OpenStudio	34
Figura 3-9 Perfil horario de consigna de calefacción en OpenStudio	36
Figura 3-10 Perfil horario de consigna de refrigeración en OpenStudio	36
Figura 4-1 Esquema del simulación y resultados	51
Figura 4-2 Demanda mensual de calefacción - Isla de Decepción	53
Figura 4-3 Demanda mensual de calefacción – Bagdad	54
Figura 4-4 Demanda mensual de refrigeración – Bagdad	55
Figura 4-5 Demanda mensual de calefacción – Marjayún	56
Figura 4-6 Demanda mensual de refrigeración - Marjayún	57
Figura 4-7 Demanda mensual de calefacción – Zaporiyia	58
Figura 4-8 Demanda mensual de refrigeración - Zaporiyia	59
Figura 4-9 Consumo mensual de climatización de la mejor configuración energética en los climas analizados	60
Figura 4-10 Alternativa óptima por clima y escenario de ponderación	64
Figura 4-11 Alternativa óptima por clima y escenario de ponderación	68

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3-1 Composición constructiva del modelo base.....	30
Tabla 3-2 Elementos constructivos de la alternativa 1	37
Tabla 3-3 Elementos constructivos de la alternativa 2	38
Tabla 3-4 Elementos constructivos de la alternativa 3	39
Tabla 3-5 Elementos constructivos de la alternativa 4	41
Tabla 3-6 Transmitancia térmica de los cerramientos.....	43
Tabla 3-7 Transmitancia térmica media de la envolvente de cada módulo	43
Tabla 3-8 Espesor medio de la envolvente y desviación respecto al modelo base	45
Tabla 3-9 Peso superficial de los cerramientos y valor medio ponderado de la envolvente.....	46
Tabla 3-10 Precios de los materiales	46
Tabla 3-11 Coste estimado de los materiales de la envolvente para cada alternativa.....	48
Tabla 4-1 Resultados energéticos de las simulaciones - Isla de Decepción.....	52
Tabla 4-2 Resultados energéticos de las simulaciones – Bagdad	53
Tabla 4-3 Resultados energéticos de las simulaciones - Marjayún.....	56
Tabla 4-4 Resultados energéticos de las simulaciones - Zaporiyia.....	58
Tabla 4-5 Alternativa con mejor comportamiento energético en cada clima.....	59
Tabla 4-6 Matriz de decisión - Isla de Decepción.....	61
Tabla 4-7 Criterios normalizados – Isla de Decepción	62
Tabla 4-8 Índice global de desempeño - Isla de Decepción.....	62
Tabla 4-9 Ranking de alternativas por escenario – Isla de Decepción.....	63
Tabla 4-10 Ventajas e inconvenientes de los aislantes utilizados	65
Tabla 4-11 Configuración constructiva del módulo optimizado.....	66
Tabla 4-12 Consumo energético anual por clima y alternativa.....	67
Tabla 4-13 Valores del segundo al quinto criterio del módulo optimizado	67
Tabla 4-14 Posición del módulo optimizado por clima y escenario según análisis multicriterio	68
Tabla A4-1 Matriz de decisión – Bagdad.....	82
Tabla A4-2 Matriz de decisión – Marjayún	82
Tabla A4-3 Matriz de decisión – Zaporiyia	82
Tabla A5-1 Criterios normalizados – Bagdad.....	83
Tabla A5-2 Criterios normalizados – Marjayún.....	83
Tabla A5-3 Criterios normalizados – Zaporiyia.....	83
Tabla A6-1 Índice global de desempeño - Bagdad	84
Tabla A6-2 Índice global de desempeño - Marjayún	84

Tabla A6-3 Índice global de desempeño – Zaporiyia	84
Tabla A7-1 Ranking de alternativas por escenario – Bagdad	85
Tabla A7-2 Ranking de alternativas por escenario – Marjayún	85
Tabla A7-3 Ranking de alternativas por escenario – Zaporiyia	85

1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1 Introducción

En los últimos años, la construcción modular prefabricada ha adquirido una creciente relevancia en distintos ámbitos debido a su capacidad para proporcionar soluciones habitacionales rápidas, eficientes y adaptables. Este tipo de construcción, basado en la fabricación industrializada de módulos transportables y su posterior ensamblaje en destino, resulta especialmente adecuado en contextos donde se requiere una implantación rápida de infraestructuras, como ocurre en misiones militares en el exterior o en situaciones de emergencia.

En el ámbito de la defensa, los módulos prefabricados constituyen un elemento esencial para el despliegue de infraestructuras temporales destinadas a la habitabilidad del personal, apoyo logístico y operaciones. La principal tipología empleada por el Ejército de Tierra de España en sus misiones exteriores son los contenedores ISO de 20 pies, alimentados casi exclusivamente mediante grupos electrógenos diésel ante la escasa fiabilidad de las redes eléctricas locales. Estas estructuras deben garantizar condiciones mínimas de confort térmico en entornos climáticos muy diversos, que pueden abarcar desde climas extremos fríos hasta condiciones desérticas cálidas o tropicales.

Sin embargo, la naturaleza ligera de estos módulos, caracterizada por una baja inercia térmica y una elevada dependencia de los sistemas de climatización, plantea importantes retos desde el punto de vista energético. El consumo asociado a estas infraestructuras es significativo: en la base española Ruy González de Clavijo, en Afganistán, se estimaba una necesidad media de 30.000 litros diarios de combustible para abastecer 730 contenedores. Aproximadamente el 80 % se destinaba a calefacción y refrigeración, representando cada contenedor un consumo anual de 15.000 litros [1]. En muchos escenarios operativos, este combustible debe transportarse a través de largas cadenas logísticas, lo que no solo incrementa los costes, sino que genera riesgos de seguridad directos: en Afganistán se documentó una correlación entre el volumen de combustible consumido en las bases y el número de bajas derivadas de los ataques a los convoyes de suministro.

En este contexto, la mejora del comportamiento energético de los módulos prefabricados se convierte en un aspecto clave, no solo desde una perspectiva de sostenibilidad, sino también operativa y de seguridad. La optimización de la envolvente térmica permite reducir la demanda energética asociada a la climatización, mejorando la eficiencia del sistema y disminuyendo la dependencia de recursos externos.

Este trabajo se centra en el análisis energético de módulos prefabricados de uso militar mediante simulación dinámica, así como en la evaluación de distintas soluciones constructivas a través de un

enfoque de análisis multicriterio, con el objetivo de identificar configuraciones constructivas que optimicen su desempeño energético y operativo en diferentes escenarios climáticos.

1.2 Motivación

La principal motivación del trabajo es la necesidad de reducir el consumo energético de los módulos prefabricados utilizados en misiones militares, donde la climatización representa una parte significativa de la demanda total.

Además, la selección de soluciones constructivas no puede basarse únicamente en criterios energéticos, ya que factores como el peso, el espesor o el coste influyen directamente en la viabilidad del transporte y despliegue.

Por ello, se plantea la aplicación de un enfoque multicriterio que permita evaluar de forma conjunta variables energéticas, constructivas, logísticas y económicas, facilitando la toma de decisiones en el diseño de este tipo de infraestructuras.

1.3 Objetivos

El objetivo principal de este Trabajo Fin de Grado es analizar y comparar el comportamiento energético de un conjunto de módulos prefabricados de uso militar mediante simulación energética dinámica y técnicas de análisis multicriterio, con el fin de identificar la configuración constructiva que presente el mejor desempeño global en distintos escenarios climáticos.

1.3.1 Objetivos específicos

Para alcanzar el objetivo general, se plantean los siguientes objetivos específicos:

1. Modelizar energéticamente un módulo prefabricado de referencia que sirva como base de comparación.
2. Definir distintos escenarios climáticos representativos de misiones militares en el exterior.
3. Diseñar y caracterizar diferentes soluciones constructivas de la envolvente térmica.
4. Evaluar mediante simulación energética dinámica el comportamiento del conjunto de módulos analizados en cada escenario climático.
5. Comparar el comportamiento energético de todas las configuraciones en términos de demanda de calefacción y refrigeración.
6. Definir un conjunto de criterios de evaluación que incluyan variables energéticas, constructivas, logísticas y económicas.
7. Aplicar un método de análisis multicriterio que permita integrar dichos criterios en un índice global de desempeño.
8. Determinar la alternativa con mejor comportamiento en cada escenario climático.
9. Proponer una configuración optimizada del módulo a partir del análisis comparativo realizado.

1.4 Organización de la memoria

El presente documento se estructura en los siguientes capítulos:

1. Capítulo 1. Introducción y objetivos: se presenta el contexto del trabajo, la motivación, los objetivos y la organización de la memoria.
2. Capítulo 2. Estado del arte: se revisan los fundamentos de la construcción modular prefabricada, el comportamiento térmico de módulos ligeros, los métodos de simulación energética y los enfoques de análisis multicriterio aplicados a la edificación.

3. Capítulo 3. Desarrollo del TFG: se describe la metodología empleada, la definición del caso de estudio, las herramientas de simulación utilizadas, los escenarios climáticos, las configuraciones constructivas analizadas y los criterios de evaluación.
4. Capítulo 4. Simulación y resultados: se presentan los resultados de la simulación energética en los distintos climas, así como la aplicación del análisis multicriterio y la optimización del módulo.
5. Capítulo 5. Conclusiones y líneas futuras: se sintetizan los principales resultados del trabajo y se proponen posibles líneas de desarrollo futuro.
6. Capítulo 6. Bibliografía.

2 ESTADO DEL ARTE

2.1 Construcción modular y prefabricada

2.1.1 Concepto y evolución de la construcción modular prefabricada

La construcción modular prefabricada es un proceso de edificación en el que la mayor parte de los componentes de una construcción, generalmente entre el 80 % y el 95 %, se fabrican en un entorno industrial controlado, lo que permite aplicar estrictos controles de calidad. Este sistema se basa en la producción de módulos tridimensionales o de componentes constructivos que posteriormente son transportados y ensamblados en su ubicación final [2].

Este tipo de construcciones son ampliamente utilizadas debido a su eficiencia, sostenibilidad y capacidad de respuesta rápida ante necesidades de habitabilidad o infraestructura. Entre sus principales ventajas se encuentran la reducción de hasta un 50 % en los plazos de construcción, un ahorro económico aproximado del 20 % y una disminución de los residuos generados que puede alcanzar el 83 % [2].

Los orígenes de la arquitectura modular prefabricada se sitúan en Gran Bretaña antes de mediados del siglo XIX, destacando la *Portable Colonial Cottage* (1833), en la que la madera constituía el material predominante, como se puede observar en la Figura 2-1. Durante el siglo XIX y comienzos del siglo XX, la producción en serie y el uso de sistemas de chapa ondulada impulsaron la edificación rápida en Estados Unidos, resultando determinante para la colonización del oeste americano durante la fiebre del oro [3].

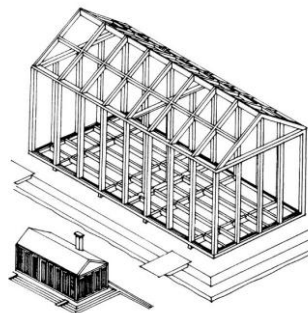


Figura 2-1 Portable Colonial Cottage de Herbert Mannig (1833) [3]

En 1916, en el contexto de la Primera Guerra Mundial, el oficial del ejército británico Peter Herman Nissen desarrolló un modelo constructivo que permitía la producción en masa incluso en periodos de escasez de materiales, así como su fácil transporte y montaje en pocas horas. Esta solución, conocida

como cabaña Nissen, no era más que una pequeña nave de chapa de acero y marcó el inicio del uso de construcciones prefabricadas para el alojamiento de personal militar en conflictos bélicos [3].

El modelo Nissen sirvió de precedente para el desarrollo de la *Dymaxion Deployment Unit* (DDU) por parte del ejército de los Estados Unidos, empleada en escenarios como Pearl Harbor. Estas unidades presentaban paredes circulares, un techo metálico en forma de cúpula, visible en la Figura 2-2, y uno de los primeros sistemas de confort térmico aplicados a este tipo de estructuras, basado en un sistema de ventilación que permitía la extracción del aire caliente y la entrada de aire fresco desde el suelo [3].



Figura 2-2 Dymaxion Deployment Unit de Buckminster Fuller (1941) [3]

Tras la Segunda Guerra Mundial, la industria continuó evolucionando estos módulos mediante el desarrollo de la denominada Construcción Modular Reubicable (RMC), caracterizada por módulos con una vida útil limitada, enfocados a instalaciones temporales empleados de forma habitual en situaciones de emergencia, debido a su rapidez de despliegue, facilidad de desmontaje y posibilidad de reutilización [2].

2.1.2 Aplicaciones de los módulos prefabricados en misiones exteriores y ayuda humanitaria

En los despliegues fuera del territorio nacional, los módulos prefabricados son utilizados por fuerzas armadas y organizaciones internacionales para establecer infraestructuras funcionales de forma rápida en zonas donde la infraestructura local es inexistente o se encuentra dañada, proporcionando una capacidad operativa mínima inmediata.

La importancia de esta infraestructura radica en su capacidad para organizar el despliegue en dos áreas clave: los servicios, que incluyen la protección de la fuerza, la generación de energía, la gestión de residuos, la producción de agua, los sistemas de comunicaciones y accesos como caminos y carreteras, y las instalaciones, que abarcan zonas de habitabilidad, ocio, entrenamiento y trabajo, así como aseos, cocinas, comedores y servicios médicos [4].

Este conjunto de módulos permite que las fuerzas desplegadas operen de manera autónoma y eficiente, reduciendo la dependencia de la infraestructura local, lo cual resulta esencial en operaciones desarrolladas en entornos remotos, inestables o carentes de servicios básicos.

Asimismo, los módulos prefabricados constituyen una solución óptima en situaciones de emergencia y ayuda humanitaria, ya que facilitan una respuesta rápida ante desastres naturales (Figura 2-3), conflictos armados o movimientos migratorios. Estas soluciones permiten proporcionar alojamientos temporales y viviendas transitorias que cumplen con estándares adecuados de confort y seguridad. Además, los módulos pueden transportarse mediante camión o incluso suspendidos de helicópteros, lo que posibilita su despliegue en zonas de difícil acceso [5].

Estas estructuras están diseñadas para ser desmontadas, transportadas y reinstaladas en otros escenarios operativos, lo que permite optimizar recursos y reducir costes logísticos en futuros despliegues.

Del mismo modo, los módulos prefabricados presentan una elevada adaptabilidad a diferentes condiciones climáticas, ya que su diseño permite incorporar soluciones específicas de aislamiento térmico, ventilación y protección frente a temperaturas extremas, humedad o radiación solar. Esta capacidad de adaptación resulta especialmente relevante en misiones desarrolladas en entornos climáticos diversos, garantizando condiciones mínimas de habitabilidad y funcionalidad [6].



Figura 2-3 Módulos prefabricados para los afectados por el volcán de La Palma [7]

2.1.3 Marco estratégico y sostenibilidad energética en infraestructuras militares temporales

La sostenibilidad energética se ha consolidado en los últimos años como una línea estratégica prioritaria en el ámbito de la defensa, debido tanto a la necesidad de reducir el impacto ambiental de las operaciones militares como a la conveniencia de mejorar la eficiencia y seguridad del suministro energético en escenarios operativos. En este contexto, la *Estrategia de Tecnología e Innovación para la Defensa 2020 (ETID 2020)* identifica la sostenibilidad energética como uno de los ámbitos de actuación del Ministerio de Defensa, alineado con los compromisos internacionales relacionados con el cambio climático y los procesos de descarbonización [8].

La ETID 2020 subraya que las bases, campamentos e infraestructuras desplegadas en zonas de operaciones constituyen uno de los principales focos de consumo energético del ámbito militar, especialmente cuando se trata de instalaciones aisladas o con acceso limitado a redes eléctricas convencionales. En la mayoría de estos escenarios, la generación de energía eléctrica se basa mayoritariamente en grupos electrógenos diésel, cuya utilización, pese a sus ventajas tácticas, implica una elevada huella logística, altos costes de operación y mantenimiento [8].

Ante esta situación, la estrategia establece que la mejora de la eficiencia energética en infraestructuras militares temporales debe abordarse desde una perspectiva integral. Si bien se reconoce el papel de los sistemas de generación renovable y de las redes energéticas inteligentes para reducir la dependencia de combustibles fósiles, el documento destaca igualmente la importancia de reducir la demanda energética de las instalaciones, en particular la asociada a los sistemas de climatización y agua caliente sanitaria (ACS), mediante el empleo de soluciones constructivas y materiales más eficientes [8].

En este sentido, la ETID 2020 identifica como línea de actuación prioritaria el desarrollo de edificaciones inteligentes y eficientes para bases y campamentos, aprovechando los avances tecnológicos del ámbito civil y adaptándolos a las exigencias del entorno militar. Estas infraestructuras, de carácter temporal y desplegable, deben ser capaces de ofrecer condiciones adecuadas de habitabilidad y confort térmico en contextos climáticos muy diversos, a la vez que minimizan el consumo energético y la dependencia logística asociada al suministro de combustible [8].

La edificación modular prefabricada se presenta como una solución a este marco estratégico, debido a su rapidez de despliegue, transportabilidad y flexibilidad de uso. No obstante, su carácter ligero y su baja inercia térmica plantean retos desde el punto de vista del comportamiento térmico y la eficiencia energética en entornos climáticos exigentes [8].

Las infraestructuras modulares no se diseñan según la normativa edificatoria civil convencional, sino a partir de criterios técnicos propios del entorno militar. La OTAN, a través de estudios y

documentos elaborados por organismos como el *NATO Industrial Advisory Group (NIAG)*, establece directrices de carácter funcional para el diseño de infraestructuras desplegables, orientadas a garantizar la interoperabilidad, la rapidez de despliegue y unas condiciones mínimas de habitabilidad [9].

Estas directrices no constituyen normativa de obligado cumplimiento, pero sí proporcionan referencias comunes aceptadas entre los países aliados, incluyendo organización de los campamentos y reducción de la demanda energética como medio para disminuir la dependencia logística de combustible y mejorar la autonomía operativa. Este enfoque resulta coherente con los objetivos estratégicos de sostenibilidad energética definidos en la ETID 2020, reforzando la relevancia del análisis energético de los módulos prefabricados empleados en infraestructuras militares temporales [8] [9].

2.2 Misiones de España en el exterior

España mantiene una presencia militar en el exterior con cerca de 4 000 militares y guardias civiles desplegados en cuatro continentes, véase la Figura 2-4. El Consejo de Ministros ha prorrogado esta participación en operaciones de mantenimiento de la paz, bajo mandato de la ONU, la OTAN y la Unión Europea, hasta finales de 2026 [10].

En el marco de la OTAN, España participa en diversas misiones, entre las que destaca el refuerzo del flanco este europeo en países como Letonia, Rumanía y Eslovaquia. Asimismo, contribuye a la operación *Persistent Effort*, donde aviones de la OTAN realizan vigilancia y control del espacio aéreo de los países bálticos, Rumanía, Bulgaria e Islandia, así como al apoyo a Turquía mediante el despliegue de una batería Patriot frente a posibles amenazas de misiles procedentes de Siria.

España también forma parte de los Grupos Navales Permanentes de la OTAN (SNMG 1 y 2) y de los Grupos Permanentes de Medidas Contra Minas 1 y 2, con el objetivo de proporcionar una presencia marítima permanente en áreas estratégicas como el Mediterráneo, el Mar Negro, el Mar Báltico, el Corredor Sur -desde el estrecho de Ormuz hasta el canal de Suez- y las costas de Somalia. A estas misiones se suma la operación *Sea Guardian*, centrada en el conocimiento del entorno marítimo del Mediterráneo para la disuasión y lucha contra el terrorismo, así como el apoyo a Irak mediante el adiestramiento de su ejército en la lucha contra el Dáesh [10].

Bajo mandato de la Organización de las Naciones Unidas, la misión con mayor presencia española es la desarrollada en Líbano, en el marco de la Fuerza Provisional de las Naciones Unidas en Líbano (FINUL), donde los cascos azules patrullan el sur del país con el objetivo de prevenir enfrentamientos entre Líbano e Israel. España mantiene asimismo presencia en Colombia, en apoyo a los procesos de vigilancia y verificación del Acuerdo de Paz [10].

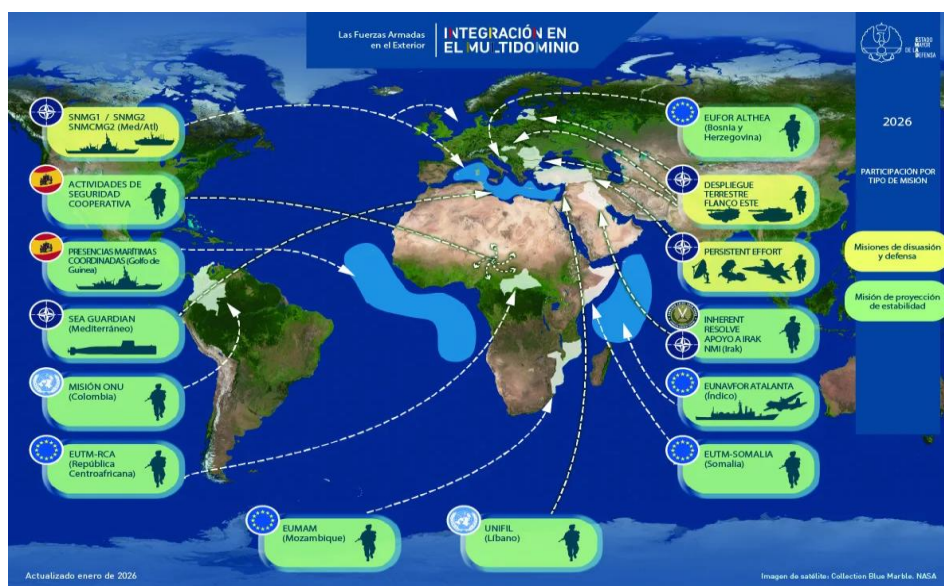


Figura 2-4 Misiones fuera de territorio nacional en 2026 [11]

En el ámbito de la Unión Europea, España participa en la Operación Atalanta, orientada a la lucha contra la piratería en el océano Índico. Asimismo, contribuye a la misión EUFOR Althea en Bosnia y Herzegovina, apoyando a la mejora del adiestramiento y la doctrina de las fuerzas armadas de ese país. A estas operaciones se suman misiones en Somalia (EUTM), República Centroafricana (EUTM) y Mozambique (EUMAM), cuyo objetivo principal es el entrenamiento y apoyo a las fuerzas armadas nacionales [10].

En cuanto a las misiones bajo mandato nacional, destacan los despliegues de unidades navales en el Golfo de Guinea, donde se desarrollan operaciones de seguridad marítima. Otra campaña relevante es la Campaña Antártica del Ejército de Tierra, cuyo fin es la investigación científica en la Base Antártica Española Gabriel de Castilla, en apoyo al Ministerio de Ciencia e Innovación y al Comité Polar Español [12].

Como posible escenario futuro, el Gobierno de España ha expresado su disposición a participar en procesos de reconstrucción de infraestructuras y en iniciativas orientadas a la recuperación económica de Ucrania, una vez se alcance un acuerdo de paz [13]. No obstante, este escenario dependerá de la evolución del contexto geopolítico y de diversos factores tanto de política exterior como de política interna.

2.2.1 Climas presentes en las zonas de despliegue

Los despliegues terrestres en los que participa España, descritos en el apartado 2.2, se desarrollan en regiones con condiciones climáticas muy diversas. Esta variedad de escenarios climáticos condiciona las necesidades de diseño, comportamiento térmico y consumo energético de las infraestructuras desplegadas, cubriendo prácticamente todas las posibilidades climáticas en nuestro planeta.

Letonia y Lituania tienen un clima continental húmedo [14], con precipitaciones durante todo el año. Las temperaturas presentan inviernos muy fríos, por debajo de 0 °C de media, y veranos templados, con valores máximos de 19,2 °C. En el litoral la influencia del mar Báltico contribuye a suavizar un poco las temperaturas. Debido a su latitud, destaca la gran variabilidad en las horas de sol diaria a lo largo del año, alcanzándose un máximo aproximado de 9,4 horas en junio y reduciéndose hasta unas 0,7 horas en diciembre [15] [16].

El clima en Eslovaquia y en la localidad de Cincu (Rumanía), donde se ubica el destacamento español, es similar al de los países bálticos. Estas regiones también presentan inviernos muy fríos, con temperaturas mínimas en torno a -5,4 °C, y veranos templados, algo más cálidos, con máximas cercanas a 28 °C. Las precipitaciones anuales son moderadas, siendo más abundantes en verano y en forma de nieve de noviembre a marzo. Las horas de sol diarias son comparables a las de Letonia y Lituania, con valores máximos de unas 9,2 h/día y mínimos cercanos a 1,7 h/día [17] [18] [19].

En Ucrania predomina el clima continental húmedo cálido, con inviernos fríos y veranos cálidos [14]. La temperatura media anual se sitúa en torno a 9-11 °C, con máximas medias estivales próximas a 25 °C y mínimas medias en enero que descienden habitualmente por debajo de 0 °C. Las precipitaciones anuales se distribuyen de forma relativamente uniforme a lo largo del año, con un ligero máximo en primavera y verano. La insolación presenta una variación estacional marcada, con días cortos en invierno y jornadas que superan las 15 horas de luz en el solsticio de verano [20].

En Líbano, la base española Miguel de Cervantes se localiza en la ciudad de Marjayún, donde el clima es mediterráneo con veranos secos y calurosos [14]. La temperatura media anual es de unos 17 °C, con máximas medias estivales de 30 °C y mínimas medias en enero en torno a 5 °C. Las precipitaciones anuales se concentran principalmente en los meses de invierno, mientras que los veranos son largos y muy secos, con un periodo de falta de agua de 7 meses, de abril a octubre. La insolación es elevada todo el año, con casi 10 horas en el solsticio de invierno y 14,1 h en el de verano [21].

En el despliegue situado en Turquía, próximo a la ciudad de Adana, predomina el clima mediterráneo cálido de veranos muy calurosos e inviernos suaves [14]. Las precipitaciones se concentran

en invierno y tienen valores mínimos estivales, con 4 meses de falta de agua entre junio y septiembre. La temperatura media anual es de aproximadamente 19,5 °C, alcanzándose valores cercanos a 29 °C en verano y alrededor de 10 °C en invierno [22] [23].

República Centroafricana y Mozambique se caracterizan por un clima tropical [14] con temperaturas elevadas durante todo el año, con medias alrededor de 30 °C, y abundantes precipitaciones, que suelen aproximarse a los 1500 mm anuales. Ambos países diferencian sus estaciones en dos, una seca en verano y otra lluviosa el resto del año, en la cual se concentran mayoritariamente las precipitaciones [24] [25] [26].

En Irak el grueso del contingente español se localiza en Bagdad. Aquí predomina un clima desértico [14], con precipitaciones inferiores a 150 mm anuales. Las temperaturas presentan una gran amplitud anual, con valores máximos que pueden alcanzar los 45,3 °C y mínimos cercanos a 6,1 °C. Además, se registran importantes oscilaciones térmicas entre el día y la noche, que en determinados meses pueden superar los 15 °C [27] [28].

En Somalia el clima es tropical muy cálido [14]. Al igual que en Irak, las precipitaciones son muy escasas a lo largo del año, con falta de agua especialmente en invierno. No obstante, la temperatura se mantiene relativamente constante, tanto durante el día, en torno a 30 °C, como durante la noche, con valores próximos a 25 °C [27] [29].

En la base de Keflavík (Islandia) predomina un clima oceánico subpolar [14], con precipitaciones abundantes todo el año (1104 mm/año), con valores muy altos de septiembre a marzo. La temperatura media anual es de 5,1 °C, con mínimas medias negativas de diciembre a marzo, y los periodos estivales más templados, con máximas medias cercanas a 13 °C - 14 °C. Las horas de luz solar varían de manera significativa a lo largo del año, con meses como junio y julio en los que el sol se pone únicamente durante unas pocas horas, y otros como noviembre, diciembre y enero en los que apenas alcanza las 4 horas diarias [30] [31].

La base Gabriel de Castilla, situada en la isla Decepción (Antártida), se encuentra en un entorno de clima polar marítimo [14], caracterizado por temperaturas muy bajas y condiciones meteorológicas severas, con fuertes vientos y elevada exigencia ambiental para las infraestructuras desplegadas. La temperatura media anual estimada es de unos -3 °C, con veranos cortos y fríos (medias de 0 a 3,3 °C) e inviernos largos con temperaturas negativas entre abril y octubre. Las precipitaciones anuales estimadas son unos 500 mm, la mayor parte en forma de nieve [32] [33] [34].

2.3 Comportamiento térmico de los módulos prefabricados

Una de las principales desventajas de la edificación modular prefabricada frente a la construcción tradicional es la imposibilidad de emplear materiales de elevada masa térmica, como bloques o piedra. Este tipo de edificación se basa en el uso de materiales ligeros con el objetivo de garantizar la transportabilidad de los módulos, facilitando un despliegue rápido y económico. Para ello, se emplean habitualmente materiales como aluminio, acero galvanizado y madera [2] [6].

La ausencia de una masa térmica significativa implica la falta de un efecto amortiguador frente a las fluctuaciones de la temperatura exterior, lo que se traduce en una baja inercia térmica. Como consecuencia, el confort térmico interior depende en gran medida del aislamiento térmico y del funcionamiento de los sistemas de calefacción y refrigeración en climas con elevada variabilidad térmica [6].

Asimismo, la construcción modular favorece la aparición de puentes térmicos en las uniones entre las distintas partes de un módulo provocando, por lo general, un nivel de infiltración de aire a través de las juntas superior al de una vivienda tradicional. Estos puentes térmicos generan incrementos localizados del flujo de calor y pueden tener una influencia significativa en la demanda energética total de la estructura y condiciones de habitabilidad interior [6].

2.3.1 Envolvente térmica en módulos prefabricados

La envolvente térmica de los módulos prefabricados constituye un elemento clave en su comportamiento energético. Las soluciones constructivas habituales se fundamentan en sistemas de paneles sándwich, formados por una capa exterior de acero inoxidable o acero COR-TEN, un núcleo aislante y una capa formada por un tablero interior, como se puede observar en la Figura 2-5 [35]. Esta configuración permite mantener un peso reducido y una elevada resistencia mecánica, al tiempo que se mejora el comportamiento térmico, siendo esencial para aplicaciones temporales o de despliegue rápido. En este tipo de construcciones, los suelos suelen elevarse mediante soportes con el fin de evitar el contacto directo con el terreno y facilitar el paso de instalaciones [5].

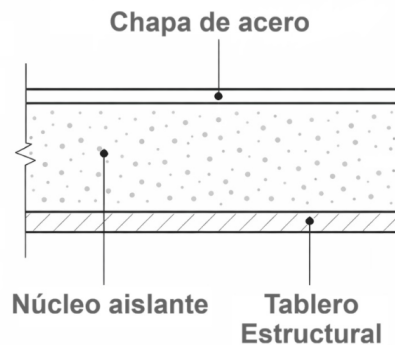


Figura 2-5 Sección del panel sándwich

Los materiales aislantes más utilizados en la envolvente de los módulos prefabricados responden a criterios de baja densidad, facilidad de instalación y buen comportamiento térmico en espesores reducidos. Entre los más empleados destaca el poliuretano proyectado de célula cerrada (ccSPF) en módulos metálicos, debido a su capacidad para limitar procesos de corrosión, su elevada durabilidad y su alto valor de resistencia térmica [36]. El poliuretano rígido (PUR), el poliisocianurato (PIR) y el poliestireno extruido (XPS) son habituales en paneles rígidos por su buena relación entre resistencia térmica y densidad, siendo el PIR el que presenta la conductividad térmica más baja de los tres. El XPS se caracteriza por una baja absorción de agua y una elevada resistencia a la difusión de vapor, lo que le permite mantener sus propiedades térmicas en condiciones de humedad [37]. Estas características justifican su uso habitual en posiciones exteriores o en cerramientos expuestos. La lana de vidrio continúa siendo una solución habitual por su bajo coste y facilidad de instalación, siendo uno de los aislantes más empleados en la actualidad [6].

Los materiales de cambio de fase (PCM) se emplean como complemento al aislamiento convencional con el objetivo de aumentar la capacidad de almacenamiento térmico de la envolvente y reducir las oscilaciones de temperatura interior en construcciones ligeras, permitiendo almacenar energía térmica en forma de calor latente durante el día y liberarla durante la noche [6] [38].

La envolvente térmica ejerce una influencia determinante sobre la demanda energética de los módulos prefabricados. Las prestaciones térmicas del módulo y las condiciones climáticas del entorno condicionan de forma directa las necesidades de calefacción y refrigeración y, por tanto, el consumo energético.

Diversos estudios analizan esta relación a partir de indicadores de consumo energético cuantificando la demanda energética de módulos ligeros mediante el consumo anual de energía para calefacción y refrigeración, expresado en kWh. Los resultados muestran reducciones significativas de dicha demanda cuando se mejora la envolvente térmica mediante el incremento del aislamiento o la adición de materiales de cambio de fase [6] [38].

De forma complementaria, existen investigaciones que abordan la influencia de la envolvente térmica desde una perspectiva climática, analizando el número de horas de inconfort térmico. Los

resultados muestran que los contenedores con envolventes poco aisladas presentan un mayor número de horas de inconfort térmico, especialmente en climas cálidos [36]. Aunque este estudio no cuantifica directamente el consumo energético en kWh, permite establecer una relación entre las condiciones climáticas exteriores, el comportamiento térmico de la envolvente y el incremento de la demanda energética asociada a climatización.

La eficiencia energética en módulos prefabricados militares resulta un aspecto clave debido al elevado peso que tiene la climatización en el consumo energético total de infraestructuras temporales desplegadas. Una envolvente térmica optimizada permite reducir de forma significativa la demanda energética, disminuyendo la dependencia logística de combustible y mejorando la autonomía operativa de los campamentos, además de contribuir a unas mejores condiciones de confort para el personal desplegado. Esto coincide con las prioridades estratégicas establecidas por el Ministerio de Defensa, que identifica la reducción de la demanda energética y la mejora de la eficiencia de los sistemas constructivos y de climatización como elementos fundamentales para aumentar la sostenibilidad y seguridad energética de bases y campamentos en zona de operaciones [4] [8] [35].

2.3.2 Influencia del clima en el comportamiento energético de módulos ligeros

Diversos estudios coinciden en que, en edificaciones ligeras y reubicables, el clima es uno de los factores que más condiciona el consumo energético anual, por encima de determinadas decisiones constructivas cuando se comparan climas fríos, templados, cálidos o extremos [6] [35] [38] [1].

La Figura 2-6 y la Figura 2-7 recogen la evolución mensual de la demanda energética en distintos climas, mostrando cómo las necesidades de calefacción y refrigeración varían en función de las condiciones exteriores. De este modo, se aprecia que el contexto climático influye directamente en el comportamiento energético del módulo.

En climas fríos, los edificios de baja inercia térmica se caracterizan por pérdidas de calor rápidas y continuas a través de la envolvente, especialmente cuando existen puentes térmicos o infiltraciones de aire. Los estudios y ensayos basados en la Base Gabriel de Castilla (Antártida) muestran que este tipo de módulos requiere un aporte energético prácticamente continuo para mantener condiciones de confort aceptables, debido a la combinación de bajas temperaturas sostenidas, fuertes vientos y elevada humedad ambiental. En este contexto, la mejora del aislamiento térmico y el control de infiltraciones son medidas imprescindibles para reducir la demanda de calefacción. No obstante, dichos estudios señalan que, incluso con envolventes altamente optimizadas, la baja inercia térmica sigue siendo un factor limitante en este tipo de edificaciones [6] [1].

En climas cálidos, áridos o tropicales, el comportamiento térmico de los edificios de baja inercia se ve dominado por el efecto de las ganancias térmicas exteriores asociadas a la radiación solar y a las elevadas temperaturas del aire. Estas condiciones provocan incrementos rápidos de la temperatura interior, dando lugar a una elevada demanda de refrigeración [36].

En climas extremos, como los desérticos, la combinación de temperaturas diurnas muy elevadas y fuertes oscilaciones térmicas entre el día y la noche genera ciclos térmicos muy marcados. Este comportamiento incrementa simultáneamente la demanda de refrigeración durante el día y la necesidad de calefacción por la noche. En este contexto, la adición de materiales de cambio de fase (PCM) ayuda a reducir dichas oscilaciones térmicas y estabilizar las condiciones interiores [6].

La relevancia de la climatización en el consumo energético de este tipo de edificaciones queda reflejada en el análisis de bases como Ruy González de Clavijo (Afganistán), donde se observó que cada uno de estos contenedores presentaba un consumo anual aproximado de 15.000 litros de combustible. De los cuales el 80% (12.000 litros/año) correspondían a la climatización, señalando la elevada dependencia energética de estos sistemas en entornos exigentes [1].

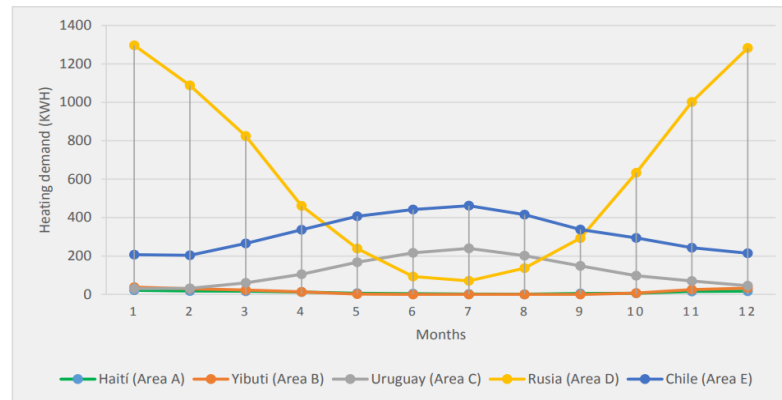


Figura 2-6 Demanda anual de calefacción en distintos contextos climáticos para el mismo módulo [35]

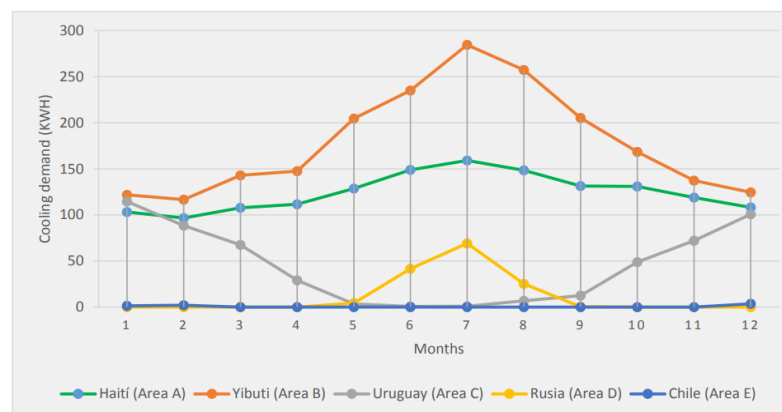


Figura 2-7 Demanda anual de refrigeración en distintos contextos climáticos para el mismo módulo [35]

2.4 Métodos de análisis energético

En el caso de edificaciones ligeras y de baja inercia térmica, como los módulos prefabricados, la elección del método de análisis resulta especialmente relevante, dado que su comportamiento energético está condicionado por la evolución horaria de las condiciones exteriores.

La evaluación energética de los edificios se apoya en distintos métodos de cálculo y análisis, cuyo grado de complejidad varía en función del objetivo del estudio, la fase del proyecto y el nivel de detalle requerido. Estos métodos se clasifican habitualmente en métodos estacionarios y métodos dinámicos, en función de si consideran o no la variación temporal de las condiciones climáticas [6] [36].

En el ámbito de la edificación, el término métodos estacionarios se emplea habitualmente para referirse a métodos cuasi-estacionarios, en los que las condiciones térmicas se representan mediante valores medios mensuales. Este enfoque permite estimar la demanda energética a partir de balances térmicos simplificados, siendo un método empleado para cálculos preliminares, evaluaciones simplificadas de eficiencia energética y análisis comparativos en fases tempranas de diseño [6] [39].

La principal ventaja es la simplicidad y el reducido volumen de datos necesarios. No obstante, los métodos estacionarios presentan limitaciones importantes cuando se aplican a edificios con baja inercia térmica, ya que no tienen en cuenta datos asociados a las variaciones meteorológicas [39].

Por el contrario, los métodos dinámicos consideran la evolución temporal de las variables meteorológicas, resolviendo el balance energético del edificio en cortos intervalos de tiempo, normalmente horarios. Así permite simular de manera más precisa el comportamiento térmico real de la construcción en periodos prolongados, teniendo en cuenta fenómenos transitorios, como las variaciones de temperatura o la radiación solar [36] [38].

Diversos estudios utilizan la simulación energética dinámica para el análisis de edificios de baja inercia térmica, la evaluación del impacto del clima sobre la demanda energética, el estudio de estrategias pasivas y soluciones constructivas, así como la comparación del comportamiento de un mismo módulo en distintas zonas climáticas [6] [36] [38]. En particular, el análisis del comportamiento térmico de materiales de cambio de fase (PCM) requiere necesariamente métodos dinámicos, ya que los procesos de carga y descarga térmica no pueden ser representados mediante modelos estacionarios [6] [38].

En consecuencia, aunque los métodos estacionarios pueden resultar útiles en fases iniciales de diseño o para análisis simplificados, los estudios coinciden en que los métodos dinámicos son la herramienta más adecuada para la evaluación energética de edificaciones ligeras y temporales. Esto es debido a que este método permite reproducir fenómenos que no pueden ser captados por enfoques estacionarios, como los picos de demanda energética, las oscilaciones térmicas interiores, los efectos acumulativos de la radiación solar y la influencia de la ventilación y las infiltraciones [1] [39].

2.4.1 *Uso de software de simulación en edificios prefabricados*

El uso de *software* de simulación energética es fundamental para el análisis del comportamiento térmico y energético de edificaciones prefabricadas. Este tipo de construcciones presenta una gran sensibilidad a las condiciones climáticas, a las características de la envolvente y a los patrones de uso, lo que hace necesario el uso de herramientas capaces de reproducir la evolución temporal del comportamiento energético. Diversos estudios sobre módulos prefabricados, contenedores habitacionales y edificaciones ligeras emplean herramientas de simulación energética dinámica para evaluar la demanda de calefacción y refrigeración, analizar la influencia del clima y comparar soluciones constructivas en distintos escenarios.

En este contexto, uno de los programas de simulación más utilizados es EnergyPlus, una herramienta gratuita de código abierto, ampliamente empleada en trabajos centrados en contenedores y edificaciones metálicas ligeras para analizar la evolución horaria de la temperatura interior y la demanda energética en climas cálidos y húmedos para obtener el confort térmico deseado [6], [38], [40]. Para facilitar la creación y gestión de los modelos de simulación, se utiliza frecuentemente OpenStudio, una plataforma de modelado que proporciona una interfaz gráfica y herramientas de gestión de modelos que operan sobre el motor de cálculo de EnergyPlus.

Otro *software* utilizado es TRNSYS (*Transient System Simulation Tool*), una herramienta de simulación dinámica de carácter modular que permite el análisis detallado del comportamiento térmico de edificios y sistemas energéticos. Su flexibilidad lo ha convertido en una referencia habitual en estudios de investigación, especialmente en trabajos comparativos entre métodos cuasi-estacionarios y dinámicos y en el análisis de estrategias pasivas [39], [41].

Asimismo, ESP-r se identifica como un entorno de simulación energética avanzado, orientado a la modelización integrada de energía y flujos de aire en edificios multi-zona. Este *software*, ha sido utilizado como programa de referencia en investigaciones sobre arquitectura solar pasiva y comportamiento térmico de edificios, destacando su capacidad para reproducir fenómenos dinámicos complejos y validar resultados mediante comparación con datos medidos [42].

En el ámbito de las infraestructuras temporales y militares, algunos estudios combinan el uso de *software* con datos a tiempo real, con el objetivo de validar los modelos y mejorar la fiabilidad de los resultados. El trabajo desarrollado por el Centro Universitario de la Defensa de Zaragoza destaca la utilidad de la simulación energética como herramienta complementaria a los ensayos experimentales [1]. En este proyecto se desarrolló el prototipo europeo ZEROENERGYMOD, un módulo habitable basado en contenedores de 20 pies con consumo energético casi nulo para bases militares desplegadas. El estudio combinó monitorización real de contenedores en bases militares con ensayos experimentales, incluyendo pruebas de infiltración de aire (*blower-door*), termografías y mediciones de transmitancia térmica, con el objetivo de caracterizar su comportamiento energético y establecer criterios de diseño

para nuevos módulos más eficientes. A partir de estos análisis se desarrolló un prototipo altamente aislado e integrado con energías renovables, capaz de reducir la demanda energética de este tipo de infraestructuras en torno a un 90 % respecto a los contenedores convencionales utilizados en bases militares [1].

El uso de *software* de simulación energética aporta ventajas claras, como la posibilidad de analizar el comportamiento térmico con diferentes frecuencias de tiempo (anual, mensual, semanal, horario...), evaluar el impacto del clima y comparar soluciones constructivas sin necesidad de ensayos físicos extensivos. No obstante, también tiene limitaciones, principalmente asociadas a la calidad de los datos de entrada, complementando, si fuera posible, la simulación con datos experimentales para mejorar la fiabilidad de los resultados, especialmente en infraestructuras modulares temporales [6] [38] [1].

2.4.2 Datos de partida en la modelización energética

La modelización energética de edificios requiere la definición de una serie de datos de partida que permiten representar el comportamiento térmico de la edificación dentro del modelo de simulación. En el caso de construcciones prefabricadas, estos parámetros de entrada incluyen condiciones de ocupación, cargas internas, consignas de temperatura y tasas de ventilación. Estos datos adquieren una especial relevancia, ya que pequeñas variaciones pueden provocar diferencias significativas en los resultados de la simulación energética [6] [36] [38].

Las ganancias internas constituyen uno de los principales parámetros de entrada en la simulación energética, ya que determinan tanto las cargas internas asociadas a la presencia de personas, equipos e iluminación del módulo [6]. En el ámbito de las infraestructuras temporales y campamentos militares, los patrones de ocupación e iluminación pueden diferir significativamente de los edificios residenciales, presentando periodos prolongados de ocupación continua o una elevada simultaneidad de uso. No obstante, en estudios de simulación energética, estos perfiles se normalizan con el objetivo de facilitar la comparación entre distintas soluciones constructivas o escenarios climáticos [6] [35].

Las consignas térmicas definen los rangos de temperatura considerados aceptables desde el punto de vista del confort y tienen una influencia directa sobre la demanda energética de calefacción y refrigeración [4]. Los valores de la temperatura en el interior suelen establecerse a partir de rangos definidos para los periodos de ocupación, siguiendo criterios de confort térmico aceptados [36]. La elección de estos valores resulta especialmente crítica, ya que la baja inercia térmica provoca que el sistema de climatización actúe con mayor frecuencia para mantener la temperatura interior dentro de los límites establecidos. Por este motivo, numerosos estudios emplean intervalos constantes a lo largo del año con el fin de aislar el efecto del clima y de las soluciones constructivas sobre la demanda energética [6] [35] [38].

La ventilación representa otro de los datos clave en la modelización energética, al influir directamente en las pérdidas y ganancias de calor y en la calidad del aire interior. En estudios de simulación energética de edificios prefabricados, la ventilación suele configurarse mediante tasas de renovación de aire constantes o programadas, que incluyen tanto la ventilación intencionada como las infiltraciones no controladas [6]. En edificaciones modulares ligeras, debido a las juntas, las infiltraciones de aire pueden incrementar la demanda energética, especialmente en climas fríos o con vientos fuertes y constantes. Debido a la dificultad de estimar estos flujos en la fase de diseño, muchos estudios adoptan valores normalizados o conservadores, permitiendo evaluar el comportamiento energético de diferentes configuraciones de envolvente [35] [1].

La definición de las ganancias internas, las consignas térmicas y la ventilación resultan esenciales para garantizar la fiabilidad de los resultados de la simulación energética. La adopción de parámetros normalizados y comparables permite centrar el análisis en la influencia del clima y del diseño de la envolvente, aspectos especialmente relevantes en edificaciones prefabricadas y de baja inercia térmica [6] [35] [36] [38] [1].

2.5 Análisis multicriterio en estudios de eficiencia energética

En los estudios de eficiencia energética de edificios, es habitual emplear indicadores únicos -como la demanda energética anual, el consumo total de energía o las emisiones asociadas- para evaluar y comparar distintas soluciones constructivas. Este enfoque presenta la ventaja de ofrecer una interpretación directa y sencilla de los resultados; sin embargo, el resultado es limitado cuando se aplica a sistemas complejos y dependientes del contexto climático y operativo en el que serán desplegados estos módulos [6] [35] [38].

2.5.1 Limitaciones de los análisis basados en un único indicador

La evaluación energética basada en un solo criterio resulta insuficiente para apoyar procesos de toma de decisiones en contextos reales. En el ámbito de la eficiencia energética, las decisiones fundamentadas en un único indicador energético pueden llevar a soluciones deficientes cuando no se consideran simultáneamente otros aspectos técnicos, ambientales, económicos y de confort [43].

Este aspecto resulta especialmente relevante en el caso de infraestructuras temporales y bases militares, donde no se debe tener en cuenta únicamente el consumo total, sino también factores como la estabilidad del comportamiento térmico, la reducción de picos de demanda, la continuidad del suministro energético o la dependencia logística de combustible. El empleo de un único indicador energético puede, por tanto, ofrecer una visión parcial del rendimiento real de este tipo de infraestructuras [4] [1].

En consecuencia, aunque los análisis basados en un único indicador pueden ser útiles como primera aproximación, no son suficientes para evaluar de forma completa la eficiencia energética de edificaciones prefabricadas y de baja inercia térmica en diferentes contextos climáticos. Esta limitación justifica la adopción de enfoques multicriterio, capaces de integrar distintos indicadores para la evaluación comparativa [38] [44].

2.5.2 Enfoques de análisis multicriterio aplicados a la edificación

En el ámbito de la edificación, los métodos de análisis multicriterio (*Multi-Criteria Decision Analysis*, MCDA) se han aplicado en estudios de rehabilitación energética, evaluación del ciclo de vida, comparación de soluciones constructivas y selección de estrategias de mejora energética. Estos métodos son adecuados cuando los criterios tienen diferentes unidades, relaciones no lineales o incluso conflictos entre sí, donde la mejora de un criterio puede implicar el empeoramiento de otro, como ocurre entre consumo energético, emisiones de gases contaminantes, confort térmico y coste [43] [44]. En este contexto, los métodos basados en la suma ponderada de criterios permiten integrar diferentes variables en un índice global que facilita la comparación y clasificación de alternativas [45].

Entre los distintos enfoques disponibles, el modelo de suma ponderada (*Weighted Sum Model*, WSM) ha sido ampliamente empleado en estudios de edificación por su simplicidad conceptual, transparencia y facilidad de implementación. Este método se basa en la normalización de los criterios y en la asignación de pesos, permitiendo obtener una puntuación global para cada alternativa a partir de la suma ponderada de los valores normalizados [44] [46].

Otro enfoque utilizado en el análisis multicriterio aplicado a la edificación es el método TOPSIS (*Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution*) [45]. Este método permite clasificar diferentes alternativas considerando simultáneamente múltiples criterios y se basa en el principio de que la mejor solución es aquella que presenta la menor distancia respecto a la solución ideal y, al mismo tiempo, la mayor distancia respecto a la solución anti-ideal. La solución ideal representa una alternativa hipotética con el mejor valor posible para cada criterio, mientras que la solución anti-ideal corresponde a la alternativa con los peores valores. El procedimiento de aplicación del método se estructura generalmente en cinco etapas: la definición del desempeño de las alternativas respecto a los criterios seleccionados, la normalización de los valores para hacer comparables los diferentes criterios, la asignación de pesos a los criterios, el cálculo de las distancias de cada alternativa a las soluciones ideal

y anti-ideal y, finalmente, la obtención de un coeficiente de cercanía que permite establecer la clasificación final de las alternativas.

La estructura conceptual del problema de decisión en el método TOPSIS se representa de forma esquemática en la Figura 2-8. En esta, A, B, C y D representan las distintas alternativas evaluadas, situadas en un espacio definido por los criterios de decisión (C1 y C2), mientras que A^+ y A^- corresponden a la solución ideal y a la solución anti-ideal, respectivamente.

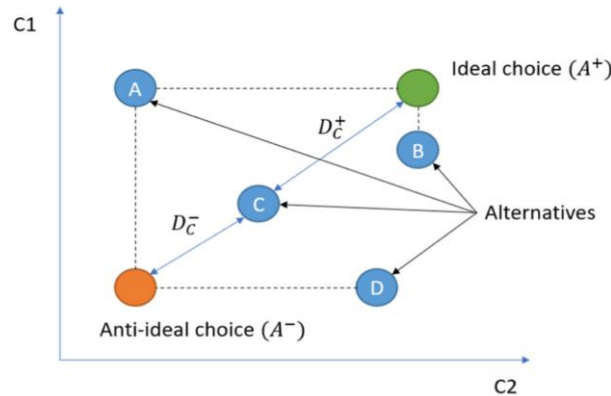


Figura 2-8 Esquema conceptual del método TOPSIS [47]

Otro método utilizado en el análisis multicriterio es el AHP (*Analytic Hierarchy Process*). Este método estructura el problema de decisión en una jerarquía formada por el objetivo, los criterios y las alternativas. La importancia relativa de los criterios se determina mediante comparaciones por pares, en las que cada criterio se compara con los demás utilizando la escala Saaty (1-9), que asigna valores numéricos para representar el grado de preferencia entre dos criterios. A partir de estas comparaciones se construye una matriz que permite calcular los pesos relativos de los criterios y evaluar posteriormente las alternativas [45].

El uso de estos métodos tiene gran relevancia en el caso de edificaciones prefabricadas, donde el comportamiento energético presenta una elevada sensibilidad a las condiciones climáticas y a los parámetros de diseño. En estos casos, la consideración de múltiples criterios resulta clave para estudiar aspectos que no quedan reflejados en un único parámetro, como la estabilidad del comportamiento térmico o la dependencia de los sistemas de climatización [36]. Asimismo, en infraestructuras temporales y bases militares, los enfoques multicriterio permiten incorporar criterios energéticos, operativos y ambientales, ayudando en la comparación de soluciones en entornos exigentes [4].

Por ello, los enfoques de análisis multicriterio, y en particular los modelos de agregación ponderada como el WSM, son una herramienta metodológica adecuada para la evaluación comparativa. Su aplicación permite integrar distintos criterios y seleccionar la alternativa con mejor desempeño para los módulos en los climas analizados [46].

2.5.3 Criterios de evaluación en análisis multicriterio

La comparación de módulos prefabricados requiere la definición de criterios para lograr evaluar el comportamiento global. En estudios que emplean enfoques multicriterio, estos criterios se seleccionan para tener en cuenta no solo el rendimiento energético, sino también aspectos técnicos, operativos y, en algunos casos, económicos, proporcionando una base más completa para la toma de decisiones [43].

Los criterios energéticos son el núcleo de la mayoría de los estudios de eficiencia energética en edificación y se emplean para cuantificar el comportamiento del edificio en términos de consumo y demanda. El indicador más utilizado es la demanda energética anual de calefacción y refrigeración, expresada en kWh o kWh/m²·año, empleada en estudios basados en simulación energética dinámica [36] [38].

No obstante, este indicador, por sí solo, no refleja la respuesta temporal de edificaciones ligeras. Por ello, se añaden criterios complementarios que permiten analizar la distribución temporal del consumo, como los picos de demanda energética o la potencia máxima requerida por los sistemas de climatización, parámetros necesarios a tener en cuenta para módulos temporales y en climas extremos [6] [35].

Otros criterios relacionados son el número de horas de inconfort térmico o el porcentaje de tiempo fuera de los rangos de temperatura. Estos indicadores permiten evaluar el equilibrio entre eficiencia energética y calidad ambiental interior, evitando soluciones que reduzcan el consumo a costa del empeoramiento de las condiciones interiores [38]. Algunos estudios incluyen también indicadores derivados del consumo energético, como las emisiones de gases contaminantes asociadas, sobre todo cuando se realiza el análisis desde una perspectiva ambiental [43] [46].

Además de los criterios energéticos, los criterios técnicos y operativos obtienen gran relevancia en el análisis de edificaciones prefabricadas, temporales y destinadas a entornos exigentes. Estos criterios permiten evaluar aspectos que condicionan la viabilidad real de los modelos analizados y que no quedan reflejados mediante indicadores energéticos [4] [1].

Entre los criterios técnicos más habituales se encuentran aquellos relacionados con la estabilidad del comportamiento térmico interior, definida como la capacidad del módulo para mantener condiciones interiores estables frente a variaciones meteorológicas. En edificaciones ligeras y de baja inercia térmica, este aspecto resulta clave debido a la dependencia de la envolvente y de los sistemas de climatización [6] [1].

La dependencia de los sistemas de climatización sirve para evaluar el grado en que el confort interior se mantiene únicamente mediante el funcionamiento continuo de dichos sistemas. Este criterio adquiere especial relevancia en infraestructuras temporales y bases militares, donde reducir la dependencia energética y logística es un objetivo prioritario [4].

Finalmente, algunos estudios incorporan de forma simplificada criterios de coste asociado a las soluciones constructivas, definido como el coste añadido de las mejoras respecto a un modelo base. Este enfoque integra la parte económica en la evaluación sin entrar en un análisis económico detallado, siendo habitual en estudios que utilizan métodos de agregación ponderada [43] [46].

Para que la evaluación de los módulos sea completa es necesario tener en cuenta los criterios energéticos, técnicos y operativos. Esta combinación permite reflejar de manera más fiel el comportamiento real de las edificaciones prefabricadas y temporales, donde la solución final debe equilibrar rendimiento energético, confort y viabilidad operativa.

3 DESARROLLO DEL TFG

3.1 Metodología

El trabajo se basa en la simulación energética dinámica de un módulo prefabricado de uso militar y en la evaluación de distintas estrategias de mejora aplicadas sobre un modelo base de referencia. Este planteamiento permite analizar el comportamiento energético y térmico del módulo bajo diferentes condiciones climáticas y comparar de forma coherente el efecto de las soluciones estudiadas.

A partir de los resultados obtenidos mediante simulación energética dinámica se aplica un análisis multicriterio (MCDA) que permite integrar simultáneamente indicadores energéticos, constructivos, logísticos y económicos y comparar de forma global las distintas configuraciones constructivas del módulo en los escenarios climáticos analizados.

Finalmente, a partir de los resultados energéticos y del análisis multicriterio, se plantea una fase de optimización de la envolvente del módulo con el objetivo de identificar una configuración constructiva que mejore el desempeño global del sistema.

En la Figura 3-1 se presenta el esquema que resume las fases desarrolladas a lo largo del capítulo.

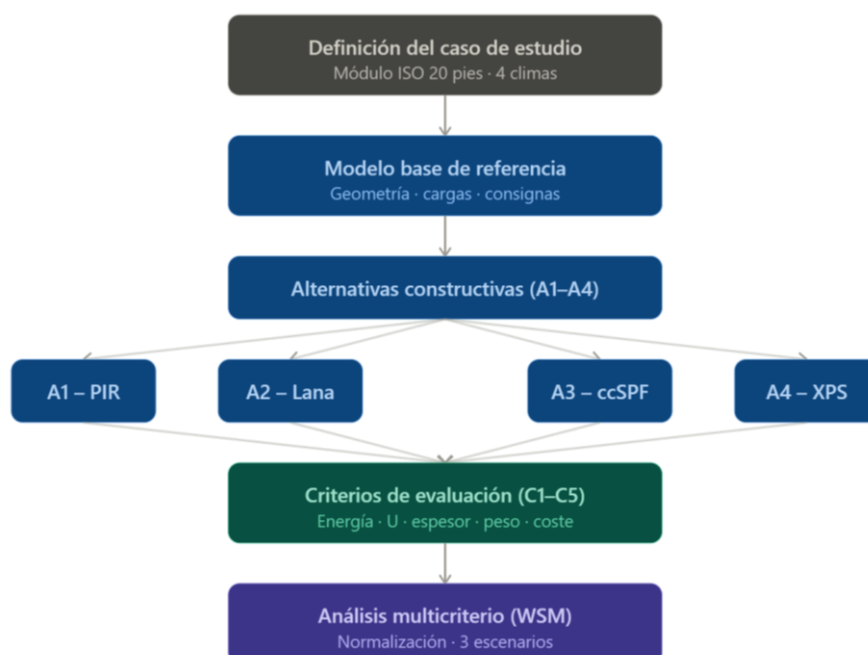


Figura 3-1 Diagrama de flujo metodológico

3.2 Definición del caso de estudio

El caso de estudio corresponde a un módulo prefabricado de uso militar destinado a la habitabilidad temporal del personal en misiones desarrolladas en el exterior, basado en contenedores transportables estándar tipo ISO de veinte pies (*Twenty-foot Equivalent Unit*, TEU). Estas infraestructuras se caracterizan por su carácter temporal, su rápida instalación y su funcionamiento en contextos climáticos diversos, justificando su análisis desde el punto de vista energético.

Con el fin de garantizar la comparabilidad de los resultados, se define un modelo base de referencia, a partir del cual se analizan las distintas estrategias de mejora consideradas. La geometría, la construcción y las condiciones de uso del módulo se mantienen constantes en todos los escenarios, de modo que las diferencias observadas puedan atribuirse exclusivamente a las condiciones climáticas y a las soluciones aplicadas.

3.2.1 Contexto de aplicación: módulos prefabricados en misiones exteriores

Los módulos prefabricados empleados en misiones en el exterior constituyen una solución habitual para la implantación rápida de infraestructuras destinadas a la habitabilidad del personal, al apoyo logístico y al almacenamiento de material. Su uso responde a la necesidad de disponer de edificaciones temporales que puedan ser transportadas, montadas y desmontadas con rapidez, adaptándose a condiciones climáticas y operativas muy diversas.

En estos contextos, los módulos deben garantizar unas condiciones mínimas de confort térmico y funcionalidad, al tiempo que se minimiza el consumo energético asociado, especialmente en escenarios donde el suministro de energía es limitado o depende de sistemas autónomos. La eficiencia energética adquiere así una relevancia particular, no solo desde el punto de vista ambiental, sino también por su impacto en la operatividad y la seguridad de las misiones.

Las misiones en el exterior presentan una elevada variabilidad climática, que puede abarcar desde climas cálidos hasta entornos fríos o húmedos. Esta diversidad condiciona de forma significativa el comportamiento térmico de los módulos prefabricados y justifica la necesidad de analizar su desempeño bajo distintos escenarios climáticos.

3.3 Herramientas y software utilizados

3.3.1 Software de modelización energética

OpenStudio se ha empleado como interfaz para la definición de geometría, materiales, construcciones y condiciones de uso, garantizando la trazabilidad de los parámetros introducidos en el modelo.

El modelo geométrico del módulo se ha generado mediante la herramienta FloorSpaceJS integrada en OpenStudio, que permite definir la geometría del edificio a partir de superficies planas y espacios térmicos, generando automáticamente el modelo geométrico compatible con EnergyPlus.

EnergyPlus actúa como motor de cálculo de la simulación energética, generando los resultados de las variables energéticas y térmicas del modelo durante la simulación. Para la consulta y visualización de estos resultados se ha utilizado el visor xEsoView, que permite explorar las variables generadas por EnergyPlus. A partir de las variables *Zone Air System Heating Energy* y *Zone Air System Cooling Energy* se obtiene la demanda energética media mensual de calefacción y refrigeración del módulo.

La elección de EnergyPlus se fundamenta en la necesidad de emplear simulación dinámica en un edificio de baja inercia térmica, donde las variaciones horarias de temperatura exterior influyen de forma directa en la demanda energética. Los métodos estacionarios o cuasi-estacionarios no permiten representar adecuadamente este comportamiento transitorio.

La herramienta seleccionada permite mantener constantes todas las variables y modificar exclusivamente la configuración constructiva o el clima, lo que garantiza la coherencia comparativa entre alternativas.

3.3.2 Enfoque de simulación y reproducibilidad

El modelo se ha estructurado de forma que todas las alternativas comparten la misma geometría, condiciones de uso, consignas térmicas y sistema de cálculo, variando únicamente la configuración de la envolvente térmica, salvo en la alternativa 3, donde también se modifica el nivel de infiltraciones. Este planteamiento asegura que las diferencias obtenidas en la demanda energética anual se deban exclusivamente a las variables objeto de estudio en cada caso, ya sea la estrategia constructiva o el escenario climático analizado.

El uso de una herramienta de código abierto y ampliamente documentada permite la reproducibilidad del modelo y la verificación independiente de los resultados.

3.4 Escenarios climáticos

Dado que la severidad climática condiciona directamente la demanda térmica, la selección de los climas se realiza atendiendo a criterios operativos, geográficos y de contrastación térmica.

3.4.1 Selección de climas representativos de misiones exteriores

La elección de los escenarios climáticos, descritos en el 2.2.1, se realiza con el objetivo de evaluar el comportamiento energético del módulo bajo condiciones ambientales representativas de posibles misiones exteriores. La selección de estas localizaciones responde a la necesidad de analizar entornos con exigencias térmicas diferenciadas para el módulo.

La Isla de Decepción, situada en el archipiélago de las Shetland del Sur (Antártida), constituye un caso de referencia para condiciones de frío extremo, caracterizadas por temperaturas persistentemente bajas y elevada severidad ambiental. Este escenario se corresponde con la Campaña Antártica del Ejército de Tierra, desarrollada en la Base Antártica Española Gabriel de Castilla, donde España mantiene una presencia periódica en apoyo a las actividades científicas del Ministerio de Ciencia e Innovación.

Bagdad, situada en Irak, representa un escenario de clima desértico muy cálido, con altas temperaturas y fuerte radiación solar, que permite analizar el comportamiento del módulo ante condiciones dominadas por cargas térmicas estivales. Este caso se asocia a las misiones internacionales desarrolladas en Irak en el marco de operaciones de la OTAN orientadas al adiestramiento y apoyo al ejército iraquí en la lucha contra el Dáesh.

Marjayún, situada en el sur del Líbano, constituye un caso representativo de clima mediterráneo templado, caracterizado por veranos calurosos e inviernos suaves. Este escenario se corresponde con la misión FINUL (Fuerza Provisional de las Naciones Unidas en Líbano), donde España mantiene una de sus mayores presencias militares en el exterior. En esta localidad se encuentra la Base Miguel de Cervantes, principal base del contingente español en el sur del país.

Zaporizhia, situada en Ucrania, se selecciona como ejemplo de clima continental, con inviernos fríos y veranos cálidos, representando un escenario de exigencia térmica estacional mixta. Aunque actualmente no existe una misión militar española permanente en esta localización, se considera como posible escenario futuro de participación española en procesos de reconstrucción y apoyo internacional en Ucrania, en función de la evolución del contexto geopolítico.

La Figura 3-2 muestra la evolución mensual de la temperatura exterior media para las cuatro localizaciones analizadas, obtenida a partir de la variable *Site Outdoor Air Drybulb Temperature* de cada

archivo climático empleado en la simulación. Estos perfiles térmicos se utilizan para realizar la simulación energética del módulo en los distintos escenarios climáticos considerados.

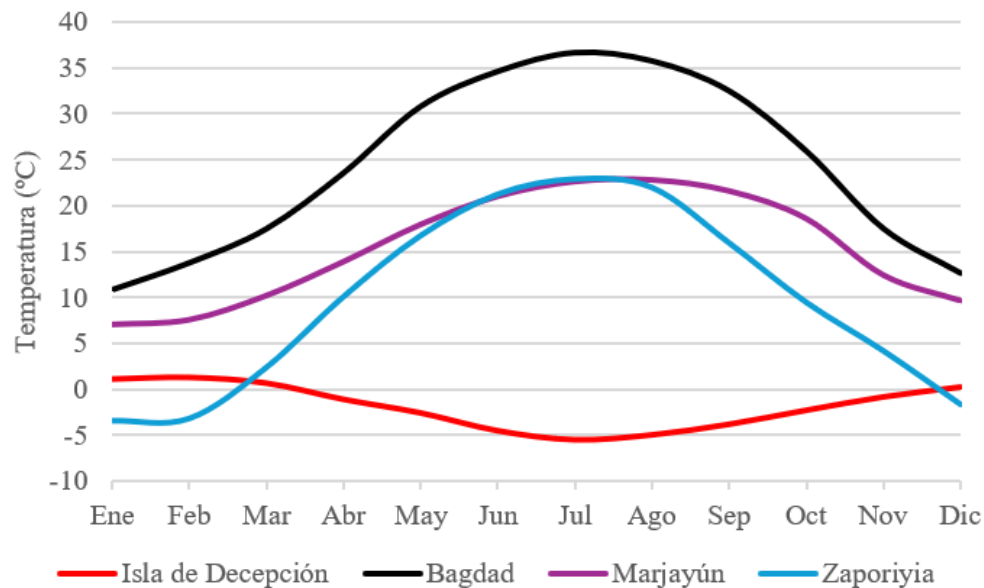


Figura 3-2 Evolución mensual de la temperatura exterior media en los climas analizados

Estos cuatro escenarios permiten contrastar el rendimiento del módulo frente a condiciones térmicas extremas, intermedias y templadas, garantizando una evaluación comparativa completa y aplicable a distintos contextos operativos.

Los datos climáticos empleados proceden de archivos meteorológicos en formato EPW (*EnergyPlus Weather*) [48]. Estos archivos contienen información horaria representativa de un año climático típico (TMY), incluyendo temperatura de bulbo seco exterior, humedad relativa, radiación solar directa y difusa, velocidad y dirección del viento, entre otras variables necesarias para la simulación dinámica.

Para asegurar la comparación entre modelos, todas las simulaciones realizadas para un mismo clima utilizan el mismo archivo meteorológico y las mismas condiciones, con el fin de que los resultados se deban exclusivamente a la variación en la solución constructiva.

3.5 Definición constructiva del modelo base

El módulo analizado se basa en infraestructuras militares temporales compatibles con contenedores transportables estándar tipo ISO de veinte pies (*Twenty-foot Equivalent Unit*, TEU), utilizado en los estudios sobre módulos de la *NATO Industrial Advisory Group* (NIAG) como unidad base para módulos prefabricados [9]. Las dimensiones exteriores del módulo son 6,05 m de longitud, 2,50 m de anchura y 2,60 m de altura.

A partir de estas dimensiones se obtienen unas dimensiones interiores útiles de 5,90 m de longitud, 2,35 m de anchura y 2,40 m de altura (Figura 3-3), empleadas directamente en la modelización energética mediante simulación dinámica. Además, incorpora una puerta exterior y una ventana fija para permitir el acceso y la iluminación natural del espacio interior.

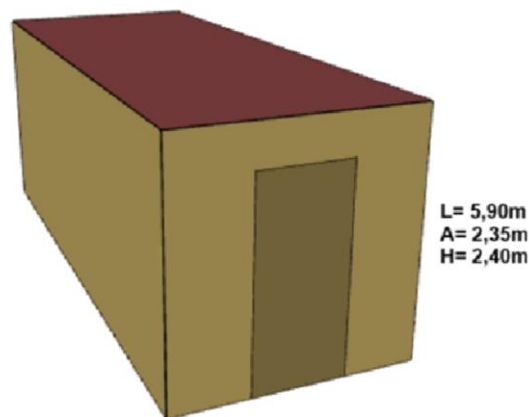


Figura 3-3 Dimensiones interiores correspondientes a un contenedor ISO de 20 pies (TEU)

El módulo se modela como un volumen de geometría sencilla y se considera una unidad térmica independiente, hipótesis que permite simplificar el modelo energético y la comparación entre escenarios, en el que los módulos pueden operar de manera individual o agrupada, pero manteniendo un funcionamiento térmico autónomo. Esta simplificación se adopta al tratarse de un espacio de dimensiones reducidas y uso homogéneo, en el que no se producen diferencias significativas de condiciones térmicas entre distintas áreas.

El suelo se define en contacto directo continuo con el terreno (*Ground*), configuración habitual en módulos prefabricados de uso temporal. Desde el punto de vista térmico, el terreno se modela como un medio de elevada inercia y variaciones térmicas menores que las del aire exterior ya que no recibe radiación solar ni influencia del viento, proporcionando un entorno más estable para este cerramiento.

El modelo base constituye el escenario de referencia frente al cual se evalúan todas las alternativas de mejora, garantizando que las variaciones en la demanda energética se deban exclusivamente a modificaciones en la envolvente o a las condiciones climáticas analizadas, estableciendo una base común y comparable para el análisis multicriterio en los escenarios estudiados.

Los cerramientos metálicos se modelan como chapa de acero al carbono galvanizado, solución habitual en sistemas modulares ligeros. El aislamiento térmico se define mediante poliestireno expandido (EPS) y finalmente un tablero de madera OSB.

En el modelo base, el tablero interior de las paredes se ha modelado con un espesor de 8 mm con el objetivo de permitir la incorporación de un mayor espesor de aislamiento manteniendo las dimensiones exteriores del contenedor ISO de referencia. Esta simplificación se adopta para representar un módulo compatible con las restricciones dimensionales del contenedor estándar utilizado como punto de partida del estudio.

En las alternativas analizadas posteriormente en el apartado 3.9 se adopta un espesor de 19 mm para el tablero OSB. En estos casos el objetivo ya no es reproducir la configuración del contenedor ISO, sino evaluar diferentes soluciones de cerramiento térmico. Por este motivo, las alternativas se modelan como sistemas constructivos independientes, sin imponer la restricción dimensional del modelo base.

Las propiedades térmicas de los materiales se han definido con los datos tabulados en el *ASHRAE Handbook - Fundamentals* [37], concretamente en los Capítulos 26 y 33, donde se recogen propiedades térmicas de materiales constructivos y metálicos. Se han seleccionado valores representativos dentro de los rangos publicados, evitando el uso de propiedades optimizadas de fabricante para garantizar la neutralidad de la simulación.

La composición constructiva de pared, cubierta y suelo se resume en la Tabla 3-1.

Cerramiento	Capa	Conductividad (W/m·K)	Densidad (kg/m ³)	Calor específico (J/kg·K)	Espesor de capa (mm)	Espesor total (mm)
Pared	Acero galvanizado	45	7824	500	0,5	75
	EPS	0,035	20	1300	66,5	
	Tablero interior	0,12	650	1880	8	
Cubierta	Acero galvanizado	45	7824	500	0,5	130
	EPS	0,035	20	1300	110,5	
	Tablero interior	0,12	650	1880	19	
Suelo	Acero galvanizado	45	7824	500	0,5	70
	EPS	0,035	20	1300	50,5	
	Tablero interior	0,12	650	1880	19	

Tabla 3-1 Composición constructiva del modelo base

El módulo incorpora una única puerta exterior de 0,90 m × 2,00 m, definida con la misma composición que la fachada, manteniendo el espesor total de las paredes. Asimismo, dispone de una única ventana fija de 0,60 m × 0,80 m, situada a 1,10 m sobre el nivel del suelo interior. La distribución de ambos elementos en planta se muestra en la Figura 3-4. La ventana se ha definido mediante doble acristalamiento 4/16/4 bajo emisivo con gas argón, con propiedades térmicas representativas ($U = 1,10$ W/m²·K, coeficiente de ganancias solares (SHGC) = 0,38 y transmitancia visible = 0,72). No se ha utilizado un producto comercial concreto, sino valores representativos del comportamiento de este tipo de acristalamiento, con el objetivo de mantener la neutralidad del modelo.



Figura 3-4 Vista en planta del modelo base

Tanto la puerta como la ventana se mantienen constantes en todas las variables analizadas, dado que su superficie es reducida en comparación con el resto de la envolvente y su influencia relativa en la demanda energética global es limitada.

3.6 Condiciones de uso y cargas internas

La definición de las condiciones de uso y de las cargas internas del módulo se ha realizado en OpenStudio mediante la asignación directa de objetos *People*, *Lights* y sus correspondientes perfiles horarios (*Schedule:RuleSets*). Estas condiciones se han mantenido constantes en todos los escenarios climáticos analizados con el fin de aislar la influencia del clima y de la envolvente sobre la demanda energética.

3.6.1 Definición del patrón de ocupación

El módulo se considera destinado al descanso del personal en un campamento desplegado en misión exterior. Se adopta una ocupación máxima simultánea de seis personas, acorde con la capacidad habitual de módulos de habitabilidad temporal de dimensiones similares.

El patrón de uso reproduce un escenario de descanso del personal, con ocupación principalmente nocturna y un intervalo puntual durante el día. Se establecen dos periodos diarios de ocupación:

- 14:00 - 15:00
- 21:00 - 05:00

Las ganancias térmicas asociadas a la presencia de ocupantes se estiman mediante un nivel de actividad metabólica de 72 W por persona, adoptado siguiendo las directrices de los manuales de EnergyPlus y ASHRAE [37]. La potencia térmica máxima generada por la ocupación asciende a 432 W ($6 \text{ personas} \times 72 \text{ W/persona}$).

La ocupación del módulo se define en el modelo mediante el objeto *OS:People:Definition* denominado *Ocupacion_Modulo_Descanso*, estableciendo un número fijo de 6 ocupantes como valor máximo simultáneo.

El perfil horario asociado (*Horario_Ocupacion_Modulo*) se aplica durante todo el año (*Through: 12/31, For: AllDays*) y reproduce el patrón de ocupación descrito anteriormente. Fuera de los periodos definidos la ocupación es nula. El perfil horario de ocupación definido en el modelo se muestra en la Figura 3-5, donde el valor 1 indica presencia de ocupantes y 0 ausencia de ocupación.

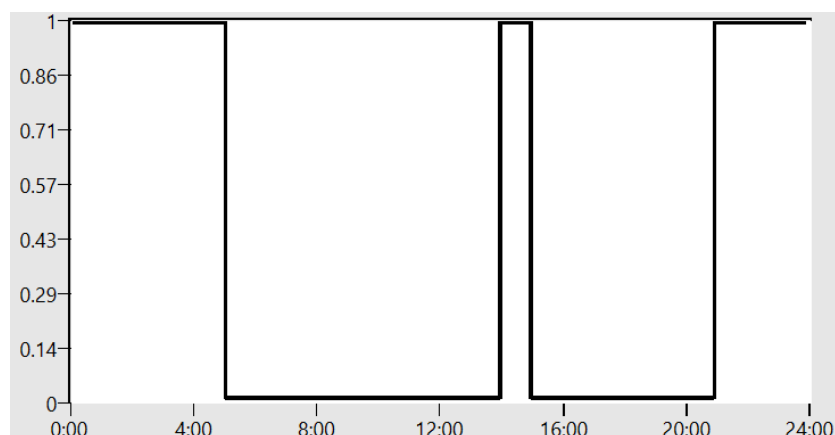


Figura 3-5 Perfil horario de ocupación en OpenStudio

Las ganancias internas asociadas a la presencia de personas se determinan automáticamente en el modelo a partir del número máximo de ocupantes y del nivel de actividad metabólica asignado mediante el perfil de actividad correspondiente (*Activity Level - Modulo*).

3.6.2 Iluminación interior

La iluminación del módulo se define mediante una potencia instalada total de 144 W, correspondiente a cuatro luminarias fluorescentes de 36 W cada una. Considerando la superficie útil interior del módulo (aproximadamente 13,9 m²), la densidad de potencia instalada resulta de 10,4 W/m².

El funcionamiento del sistema de iluminación se ajusta a los periodos de uso del módulo. En este sentido, la iluminación se activa únicamente en intervalos puntuales del día:

- 04:30 - 05:00
- 14:00 - 15:00
- 21:00 - 21:30

La iluminación interior se implementa en el modelo mediante el objeto *OS:Lights:Definition* denominado *Iluminacion_Modulo_Base*, en el que se establece la potencia instalada correspondiente al sistema de iluminación del módulo.

El perfil horario asociado (*Horario Iluminacion Modulo*) se aplica durante todo el año (*Through: 12/31, For: AllDays*) y reproduce el patrón de funcionamiento descrito anteriormente. El perfil horario definido en el modelo se muestra en la Figura 3-6, donde el valor 1 indica iluminación encendida y 0 iluminación apagada.

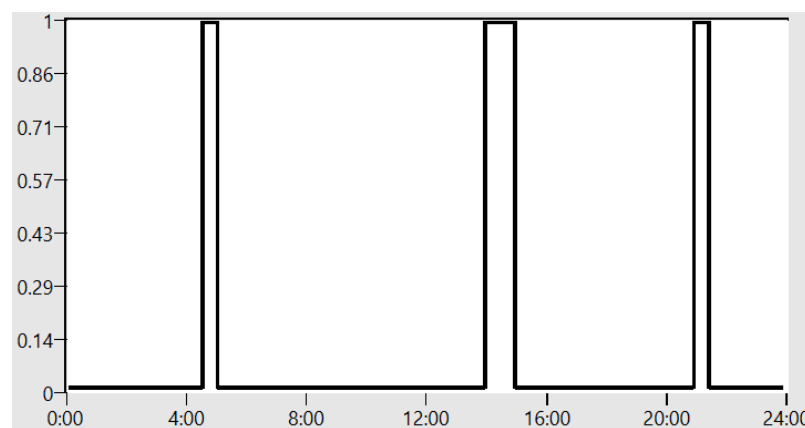


Figura 3-6 Perfil horario de funcionamiento de la iluminación interior en OpenStudio

3.7 Condiciones de ventilación e infiltraciones

Las condiciones de ventilación e infiltración del módulo se han definido explícitamente en el modelo de OpenStudio mediante *DesignSpecification:OutdoorAir* y *SpaceInfiltration:DesignFlowRate*. Estos parámetros constituyen una de las hipótesis más sensibles en la simulación energética, dado que las renovaciones de aire influyen directamente en las pérdidas y ganancias térmicas, especialmente en climas fríos y extremos.

Para el cálculo de las infiltraciones se emplea una superficie exterior constante correspondiente al modelo base, con un valor de 74,71 m². Aunque las distintas soluciones constructivas presentan variaciones en el espesor de los cerramientos, estas diferencias no se consideran en el cálculo del área exterior con el fin de mantener la coherencia comparativa del modelo. De este modo, se evita introducir variaciones geométricas adicionales que no forman parte de las variables principales de estudio.

En el cálculo tampoco se han descontado las superficies correspondientes a la puerta y la ventana del módulo. Dado que estas aberturas tienen las mismas dimensiones y características en todas las configuraciones constructivas analizadas, su influencia sobre la superficie total de la envolvente es constante y no altera la comparación relativa entre alternativas.

El volumen interior del módulo se considera constante e igual a 33,4 m³.

La tasa de renovación de aire se calcula mediante la ecuación (1):

$$ACH = \frac{\dot{V} \cdot 3600}{V} \quad (1)$$

Donde:

- ACH es el número de renovaciones de aire por hora (h^{-1})
- $\dot{V}$ es el caudal volumétrico de aire (m^3/s)
- V es el volumen interior del recinto (m^3)

En el modelo se consideran dos contribuciones al intercambio de aire: la ventilación higiénica y las infiltraciones no controladas. La tasa total de renovación de aire se obtiene como la suma de ambas contribuciones según la ecuación (2):

$$ACH_{total} = ACH_{vent} + ACH_{inf} \quad (2)$$

Donde:

- ACH_{total} es la tasa total de renovación de aire (h^{-1})
- ACH_{vent} es la renovación debida a ventilación (h^{-1})
- ACH_{inf} es la renovación debida a infiltraciones (h^{-1})

3.7.1 Ventilación del módulo

La ventilación higiénica del módulo se define mediante un caudal de aire exterior de $0,005 \text{ m}^3/\text{s}$ por persona, aplicado durante los periodos de ocupación del espacio. Este valor se ha adoptado a partir del Documento Básico HS 3 “Calidad del aire interior” del Código Técnico de la Edificación (CTE), que establece un caudal mínimo de 5 l/s por ocupante ($0,005 \text{ m}^3/\text{s} \cdot \text{persona}$) para espacios equivalentes a dormitorios.

La ventilación se ha definido mediante el objeto *DesignSpecification:OutdoorAir* denominado *Ventilacion_Modulo_Base*, en el que se establece el caudal de aire exterior asociado a cada ocupante. La definición de este parámetro en el modelo de OpenStudio se muestra en la Figura 3-7.

OS:DesignSpecification:OutdoorAir	
Name	Ventilacion_Modulo_Base
Outdoor Air Method	Sum
Outdoor Air Flow per Person	0.005 m³/s-person
Outdoor Air Flow per Floor Area	0.0 m/s
Outdoor Air Flow Rate	0.0 m³/s
Outdoor Air Flow Air Changes per Hour	0.0 1/h
Outdoor Air Flow Rate Fraction Schedule Name	Horario_Ventilacion_Modulo

Figura 3-7 Definición del caudal de ventilación higiénica en OpenStudio

Considerando la ocupación máxima simultánea de 6 personas, el caudal total de ventilación en condiciones de plena ocupación es:

$$\begin{aligned}\dot{V} &= 0,005 \text{ m}^3/\text{s por persona} \times 6 \text{ personas} \\ \dot{V} &= 0,03 \text{ m}^3/\text{s}\end{aligned}$$

Este caudal equivale a:

$$0,03 \text{ m}^3/\text{s} \times 3600 \text{ s/h} = 108 \text{ m}^3/\text{h}$$

Teniendo en cuenta que el volumen interior del módulo es aproximadamente $33,4 \text{ m}^3$, la tasa de renovación de aire equivalente debida a ventilación se calcula mediante la expresión (1):

$$ACH = \frac{108 \text{ m}^3/\text{h}}{33,4 \text{ m}^3} \approx 3,2 \text{ renovaciones/hora}$$

El perfil horario de ventilación (*Horario_Ventilación_Modulo*) coincide con los periodos de ocupación definidos previamente, activándose únicamente cuando el módulo se encuentra en uso. De este modo, se evita introducir renovaciones de aire innecesarias en periodos desocupados.

Desde el punto de vista energético, la ventilación constituye una carga térmica adicional que depende directamente de la diferencia de temperatura entre el aire exterior y el interior. En climas fríos incrementa la demanda de calefacción, mientras que en climas cálidos puede aumentar la necesidad de refrigeración.

3.7.2 Infiltraciones de aire

El módulo analizado no está sujeto a normativa edificatoria civil. El valor adoptado se ha definido teniendo en cuenta el comportamiento constructivo de este tipo de edificaciones. En construcciones desmontables con estructura metálica y uniones atornilladas, el nivel de permeabilidad al aire suele ser significativamente mayor que en edificios permanentes. Por este motivo, no se ha asumido un nivel de hermeticidad equivalente al exigido en edificación residencial convencional.

Las infiltraciones se han modelado mediante el objeto *SpaceInfiltration:DesignFlowRate*, utilizando el método de cálculo *Flow/ExteriorArea*, con un valor de $0,0005 \text{ m}^3/\text{s por m}^2$ de superficie exterior. Este valor se aplica a la superficie exterior del módulo y representa las infiltraciones no controladas debidas a juntas, encuentros constructivos y posibles imperfecciones. A diferencia de la ventilación, las infiltraciones se han considerado constantes a lo largo del tiempo, lo que permite representar un flujo de aire no controlado permanente. La definición de este parámetro en el modelo de OpenStudio se muestra en la Figura 3-8.

OS:SpaceInfiltration:DesignFlowRate	
Name	Infiltracion_Modulo_Base
Design Flow Rate Calculation Method	Flow/ExteriorArea
Design Flow Rate	m³/s
Flow per Space Floor Area	m/s
Flow per Exterior Surface Area	0.0005 m/s

Figura 3-8 Definición de la infiltración en OpenStudio

El caudal de infiltración se obtiene mediante la ecuación (3):

$$\dot{V} = q \cdot A \quad (3)$$

Donde:

- $\dot{V}$ es el caudal volumétrico de aire (m^3/s)
- q es el coeficiente de infiltración ($\text{m}^3/\text{s} \cdot \text{m}^2$)
- A es la superficie exterior del módulo (m^2)

Aplicando los valores adoptados:

$$\begin{aligned} \dot{V} &= \frac{0,0005 \text{ m}^3}{\text{s} \cdot \text{m}^2} \times 74,71 \text{ m}^2 \\ \dot{V} &= 0,0373 \text{ m}^3/\text{s} \end{aligned}$$

Este caudal equivale a:

$$0,0373 \text{ m}^3/\text{s} \times 3600 \text{ s/h} = 134,28 \text{ m}^3/\text{h}$$

El intercambio de aire no controlado correspondiente se calcula utilizando la ecuación (1):

$$ACH = \frac{134,28 \text{ m}^3/\text{h}}{33,4 \text{ m}^3} \approx 4 \text{ renovaciones/hora}$$

Considerando conjuntamente la ventilación higiénica y las infiltraciones, la tasa total de renovación de aire durante los periodos de ocupación se calcula mediante la ecuación (2):

$$ACH_{total} = 3,2 + 4 = 7,2 \text{ renovaciones/hora}$$

Este valor indica un nivel elevado de intercambio de aire con el exterior, lo que implica una demanda energética significativa asociada al acondicionamiento térmico del aire introducido, especialmente en condiciones climáticas extremas.

3.8 Condiciones de confort y control térmico

Las condiciones de confort y el control térmico del modelo determinan la demanda energética obtenida en la simulación. En un módulo ligero, con escasa inercia térmica y elevada renovación de aire, pequeñas variaciones en las temperaturas de consigna pueden modificar de forma apreciable las cargas de calefacción y refrigeración.

3.8.1 Consignas térmicas

Las consignas térmicas se definen mediante perfiles horarios que diferencian entre periodos de ocupación y periodos sin uso del módulo. Durante los intervalos de ocupación se establecen las siguientes temperaturas de consigna:

- 18 °C como temperatura mínima de calefacción
- 25 °C como temperatura máxima de refrigeración

Fuera de los periodos de ocupación, las consignas se relajan hasta 0 °C para calefacción y 50 °C para refrigeración. Estos valores no representan condiciones de confort, sino que limitan desviaciones excesivas de la temperatura interior respecto a las consignas establecidas. De este modo, se reducen picos de demanda energética, especialmente en climas severos.

El intervalo térmico adoptado responde a un criterio de confort funcional acorde con el uso del módulo como espacio de descanso del personal. No se busca reproducir un estándar residencial, sino

garantizar unas condiciones interiores estables que permitan el uso del espacio en diferentes escenarios climáticos.

Las consignas térmicas se implementan en el modelo mediante perfiles horarios de tipo *Schedule:RuleSets*, denominados *Horario_Calefaccion_Modulo* y *Horario_Refrigeracion_Modulo*, aplicados durante todo el año (Through: 12/31, For: AllDays).

Los perfiles horarios definidos para las consignas de calefacción y refrigeración se muestran en las Figura 3-9 y Figura 3-10.

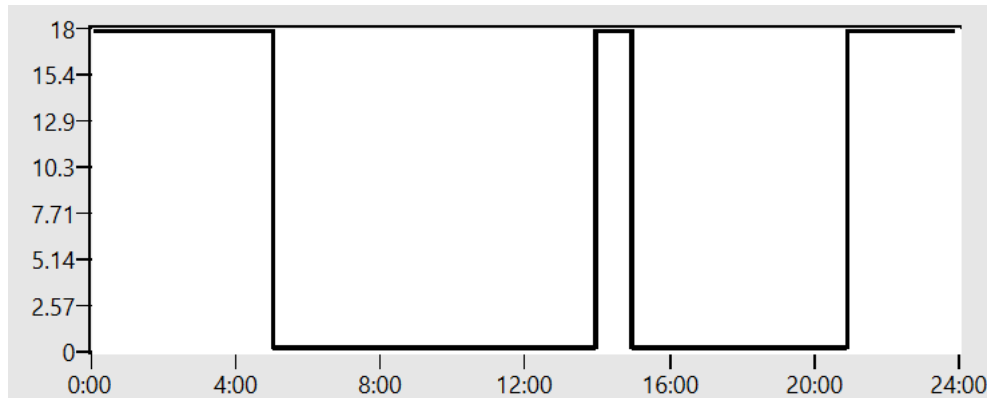


Figura 3-9 Perfil horario de consigna de calefacción en OpenStudio

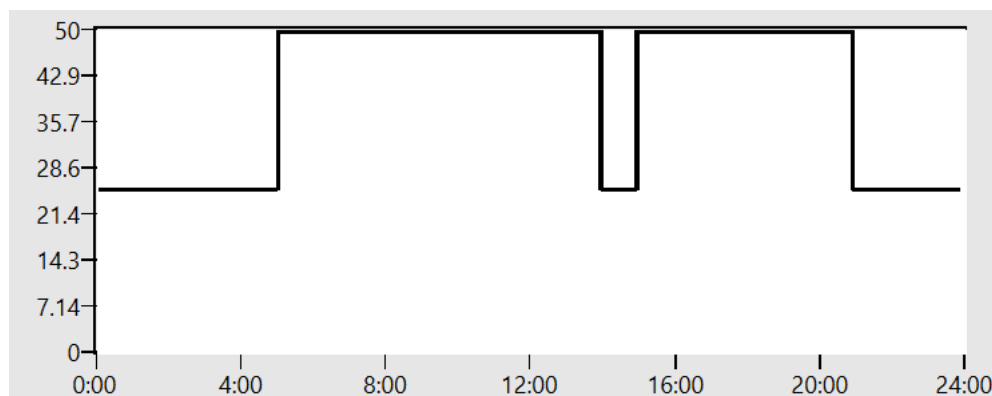


Figura 3-10 Perfil horario de consigna de refrigeración en OpenStudio

3.8.2 Sistema de climatización empleado en la simulación

La zona térmica se ha modelizado mediante la opción *Ideal Air Loads*, que representa un sistema teórico capaz de aportar, en cada instante, la potencia necesaria para mantener las temperaturas establecidas. No se han impuesto límites de capacidad, por lo que el sistema no restringe la carga calculada.

El objetivo del trabajo es cuantificar la demanda térmica del módulo y analizar su comportamiento frente a distintas condiciones climáticas. Por este motivo, no se ha utilizado un equipo concreto, ya que ello introduciría variables adicionales asociadas a rendimientos o tipologías de sistema. El uso de cargas ideales permite obtener directamente la energía necesaria para mantener las condiciones interiores fijadas, evaluando exclusivamente el comportamiento térmico del módulo.

3.9 Módulos alternativos

En este apartado se comparan distintas configuraciones de la envolvente térmica del modelo base, manteniendo las dimensiones interiores descritas en el apartado 3.5, con el fin de evaluar su influencia en la demanda energética.

Las alternativas propuestas modifican el tipo de aislamiento, su espesor y su disposición dentro del cerramiento. El análisis se centra en pared, cubierta y suelo, evaluando su transmitancia térmica, y adecuación a condiciones climáticas extremas, tanto frías como cálidas.

Para todas las alternativas los materiales se han definido en OpenStudio como materiales opacos con masa térmica, especificando espesor, conductividad térmica, densidad y calor específico. Las propiedades térmicas empleadas en la definición de los materiales (conductividad térmica, densidad y calor específico) se han obtenido de la misma manera que en el apartado 3.5.

En todas las alternativas se mantiene un tablero OSB de 19 mm entre el aislamiento y el acabado interior, que actúa como elemento estructural intermedio aportando la rigidez necesaria para el soporte del cerramiento ante las sollicitaciones de transporte y montaje. Sobre este tablero se dispone una placa de yeso laminado de 13 mm como acabado interior, que aporta protección frente al fuego, aspecto relevante en infraestructuras desplegadas en zonas aisladas donde la respuesta ante emergencias puede ser limitada. En el suelo no se incorpora yeso laminado, ya que el tablero OSB actúa directamente como superficie de acabado al tratarse de un elemento sometido a cargas de uso y desgaste mecánico para los que el yeso laminado no es un material adecuado.

3.9.1 Alternativa 1 - Panel sándwich con núcleo PIR

La Alternativa 1 plantea la mejora del comportamiento térmico del modelo base mediante la sustitución del aislamiento de EPS por un aislamiento rígido de poliisocianurato (PIR), configurado como panel tipo sándwich.

La composición constructiva adoptada se puede observar en la Tabla 3-2.

Cerramiento	Capa	λ (W/m·K)	ρ (kg/m ³)	c (J/kg·K)	Espesor capa (mm)	Espesor total (mm)
Pared	Acero galvanizado	45	7824	500	0,5	132,5
	PIR rígido	0,023	30	1400	100	
	Tablero interior	0,12	650	1880	19	
	Yeso laminado	0,16	640	1150	13	
Cubierta	Acero galvanizado	45	7824	500	0,5	152,5
	PIR rígido	0,023	30	1400	120	
	Tablero interior	0,12	650	1880	19	
	Yeso laminado	0,16	640	1150	13	
Suelo	Acero galvanizado	45	7824	500	0,5	99,5
	PIR rígido	0,023	30	1400	80	
	Tablero interior	0,12	650	1880	19	

Tabla 3-2 Elementos constructivos de la alternativa 1

El objetivo de esta solución es incrementar la resistencia térmica de la envolvente manteniendo los elementos estructurales originales del modelo base, chapa exterior de acero galvanizado de 0,5 mm y tablero estructural OSB de 19 mm.

El PIR se selecciona por su elevada resistencia térmica por unidad de espesor en comparación con otros materiales aislantes convencionales. Esta característica permite mejorar significativamente la transmitancia térmica del cerramiento con un incremento moderado del espesor total.

El aislamiento PIR constituye el elemento principal de mejora, al concentrar la mayor parte de la resistencia térmica del cerramiento. El incremento de espesor en cubierta respecto a fachada es debido a su mayor exposición a radiación solar directa.

La incorporación del aislamiento PIR incrementa el espesor total de los cerramientos respecto al modelo base, generando una ligera variación dimensional exterior en relación con el contenedor ISO de referencia. Esta modificación se adopta de forma deliberada para evaluar el efecto real del aumento de resistencia térmica. La posible penalización asociada a dicha desviación dimensional se incorporará posteriormente como criterio específico dentro del análisis multicriterio.

3.9.2 Alternativa 2 - Aislamiento con lana mineral

La Alternativa 2 propone la mejora del comportamiento térmico del modelo base mediante la sustitución del aislamiento de EPS por lana mineral, manteniendo la configuración multicapa del cerramiento. Esta solución permite evaluar el comportamiento de un aislamiento tradicional utilizado en edificación ligera y modular [6].

La composición constructiva adoptada se puede observar en la Tabla 3-3.

Cerramiento	Capa	λ (W/m·K)	ρ (kg/m ³)	c (J/kg·K)	Espesor capa (mm)	Espesor total (mm)
Pared	Acero galvanizado	45	7824	500	0,5	172,5
	Lana mineral	0,040	40	840	140	
	Tablero interior	0,12	650	1880	19	
	Yeso laminado	0,16	640	1150	13	
Cubierta	Acero galvanizado	45	7824	500	0,5	192,5
	Lana mineral	0,040	40	840	160	
	Tablero interior	0,12	650	1880	19	
	Yeso laminado	0,16	640	1150	13	
Suelo	Acero galvanizado	45	7824	500	0,5	139,5
	Lana mineral	0,040	40	840	120	
	Tablero interior	0,12	650	1880	19	

Tabla 3-3 Elementos constructivos de la alternativa 2

A diferencia del PIR, la lana mineral presenta una conductividad térmica superior, lo que requiere mayores espesores para alcanzar niveles equivalentes de resistencia térmica. Esta característica permite

analizar no solo el efecto del tipo de material aislante, sino también la influencia del incremento de espesor y de la masa térmica asociada al sistema.

El incremento de espesor total respecto al modelo base es superior al de la Alternativa 1, debido a la mayor conductividad térmica de la lana mineral. Esta variación dimensional exterior se adopta de forma deliberada con el fin de evaluar el impacto del aislamiento convencional en condiciones comparables. La posible penalización asociada a la desviación dimensional será considerada posteriormente dentro del análisis multicriterio.

Esta alternativa permite analizar un sistema más próximo a soluciones tradicionales de aislamiento, evaluando su comportamiento frente a la solución de alta prestación planteada en la Alternativa 1 y cuantificando la relación entre incremento de espesor, resistencia térmica y demanda energética anual.

3.9.3 Alternativa 3 - Poliuretano proyectado célula cerrada (ccSPF)

La Alternativa 3 plantea la mejora del comportamiento térmico del modelo base mediante la aplicación de poliuretano proyectado de célula cerrada (ccSPF) como aislamiento continuo adherido a la chapa metálica exterior.

La composición constructiva adoptada se puede observar en la Tabla 3-4.

Cerramiento	Capa	λ (W/m·K)	ρ (kg/m ³)	c (J/kg·K)	Espesor capa (mm)	Espesor total (mm)
Pared	Acero galvanizado	45	7824	500	0,5	132,5
	PUR proyectado (ccSPF)	0,025	35	1400	100	
	Tablero interior	0,12	650	1880	19	
	Yeso laminado	0,16	640	1150	13	
Cubierta	Acero galvanizado	45	7824	500	0,5	152,5
	PUR proyectado (ccSPF)	0,025	35	1400	120	
	Tablero interior	0,12	650	1880	19	
	Yeso laminado	0,16	640	1150	13	
Suelo	Acero galvanizado	45	7824	500	0,5	99,5
	PUR proyectado (ccSPF)	0,025	35	1400	80	
	Tablero interior	0,12	650	1880	19	

Tabla 3-4 Elementos constructivos de la alternativa 3

A diferencia de las soluciones con panel rígido, esta alternativa genera una capa aislante sin juntas internas, reduciendo discontinuidades térmicas y mejorando la estanqueidad del cerramiento.

El poliuretano proyectado presenta una conductividad térmica baja y un comportamiento constructivo distinto al aplicarse in situ, generando continuidad total en el aislamiento. Esta solución permite evaluar simultáneamente el efecto de una elevada resistencia térmica y de una mejora en la estanqueidad al aire.

El *ASHRAE Handbook - Fundamentals* [37] indica que el poliuretano proyectado de célula cerrada puede funcionar como barrera de aire cuando se aplica de forma continua, reduciendo la permeabilidad del cerramiento. En la misma línea, diversos estudios experimentales han demostrado que el ccSPF reduce de forma significativa la infiltración de aire en los cerramientos y actúa como un sistema continuo de sellado de la envolvente, mejorando el control conjunto de aire, humedad y temperatura [49]. No obstante, la magnitud de esta reducción depende de la calidad de ejecución y de las uniones estructurales existentes.

En módulos prefabricados ligeros, una parte significativa de las infiltraciones se produce en uniones entre paneles y encuentros constructivos. La aplicación continua del ccSPF reduce infiltraciones a través del propio cerramiento al eliminar juntas entre elementos aislantes. No obstante, no elimina completamente las infiltraciones asociadas a las uniones estructurales entre módulos.

Por este motivo, se adopta una reducción moderada del 30 % en el coeficiente de infiltración respecto al modelo base.

Valor base:

$$0,0005 \text{ m}^3/\text{s} \cdot \text{m}^2$$

Valor adoptado en Alternativa 3:

$$0,00035 \text{ m}^3/\text{s} \cdot \text{m}^2$$

Con una superficie exterior de 74,71 m²:

$$\begin{aligned} 0,00035 \times 74,71 &= 0,02615 \text{ m}^3/\text{s} \\ 0,02615 \times 3600 &= 94,13 \text{ m}^3/\text{h} \end{aligned}$$

Considerando un volumen interior de 33,4 m³:

$$\text{ACH} = \frac{94,13 \text{ m}^3/\text{h}}{33,4 \text{ m}^3} \approx 2,8 \text{ ACH}$$

Frente a los 4 ACH del modelo base, la tasa de infiltración se reduce aproximadamente en 1,2 renovaciones por hora.

El valor adoptado se mantiene conservador con el carácter desmontable del módulo, evitando asumir niveles de hermeticidad propios de edificaciones permanentes.

El incremento de espesor total respecto al modelo base es equivalente al de la Alternativa 1, lo que permite comparar dos soluciones de alta prestación con distinta configuración constructiva: panel rígido frente a aislamiento proyectado continuo.

La reducción de infiltraciones permite evaluar no solo la mejora térmica sino también el efecto combinado de resistencia térmica y estanqueidad sobre la demanda energética anual.

3.9.4 Alternativa 4 - Aislamiento continuo exterior mediante XPS

La Alternativa 4 propone una modificación del sistema constructivo del modelo base mediante la incorporación de un aislamiento continuo por el exterior, configurando una envolvente térmica que envuelve la estructura metálica. A diferencia de las alternativas anteriores, en las que el aislamiento se dispone en el interior del cerramiento estructural, esta solución sitúa el material aislante por el lado exterior de la chapa de acero, reduciendo la influencia de los puentes térmicos asociados a la estructura y mejorando la continuidad térmica del sistema.

El material seleccionado es poliestireno extruido (XPS), debido a su baja conductividad térmica, su estabilidad frente a la humedad y su comportamiento mecánico en aplicaciones exteriores. La estructura metálica queda incluida dentro de la envolvente térmica, mientras que se mantiene un aislamiento interior complementario de lana mineral para mejorar el comportamiento térmico global y aportar mayor estabilidad superficial interior.

La composición constructiva adoptada se puede observar en la Tabla 3-5.

Cerramiento	Capa	λ (W/m·K)	ρ (kg/m ³)	c (J/kg·K)	Espesor capa (mm)	Espesor total (mm)
Pared	Panel aluminio	221	2740	896	4	183
	XPS	0,030	35	1450	100	
	Acero galvanizado	45	7824	500	0,5	
	Lana mineral	0,040	40	840	60	
	Yeso laminado	0,16	640	1150	13	
Cubierta	Panel aluminio	221	2740	896	4	203
	XPS	0,030	35	1450	120	
	Acero galvanizado	45	7824	500	0,5	
	Lana mineral	0,040	40	840	60	
	Yeso laminado	0,16	640	1150	13	
Suelo	Acero galvanizado	45	7824	500	0,5	119,5
	XPS	0,030	35	1450	100	
	Tablero interior	0,12	650	1880	19	

Tabla 3-5 Elementos constructivos de la alternativa 4

El incremento de espesor total respecto al modelo base es superior al de las alternativas anteriores debido a la disposición exterior del aislamiento y a la incorporación de un panel de protección exterior. Esta solución permite evaluar el efecto de una envolvente térmica continua que integra la estructura dentro del volumen protegido, modificando el comportamiento térmico dinámico del módulo en comparación con las configuraciones con aislamiento interior.

La posición exterior del XPS reduce la influencia de los puentes térmicos asociados a la chapa metálica y disminuye los gradientes térmicos a través de la estructura. No se modifican las condiciones de infiltración respecto al modelo base, manteniéndose los mismos valores adoptados.

Esta alternativa introduce una variación significativa en la concepción del cerramiento, permitiendo analizar no solo el efecto del material aislante sino también el impacto de su posición dentro del sistema constructivo sobre el comportamiento térmico global del módulo.

3.10 Indicadores de evaluación

Con el fin de comparar las distintas alternativas constructivas en los escenarios climáticos definidos, se establecen una serie de indicadores cuantitativos que permiten evaluar el comportamiento energético, constructivo y operativo del módulo.

Los criterios seleccionados se agrupan en tres dimensiones principales: comportamiento energético del módulo (demanda energética anual y transmitancia térmica), características físicas de la envolvente (espesor y peso) y viabilidad económica del sistema constructivo (coste estimado).

Todos los valores adoptados para estos indicadores se obtienen a partir de los resultados obtenidos de simulación dinámica y de cálculos basados en las propiedades geométricas y físicas definidas en cada alternativa.

3.10.1 Criterio 1 - Demanda energética anual total (kWh)

Este indicador representa la energía anual necesaria para mantener el módulo dentro del intervalo de consigna establecido (18-25 °C) durante los periodos de ocupación definidos en el apartado 3.6.1.

La demanda energética total asociada al sistema de climatización (*Heating, Ventilation and Air Conditioning, HVAC*) se obtiene como la suma de calefacción y refrigeración según la ecuación (4). Los valores se obtienen mediante simulación energética dinámica. Los valores horarios generados por el motor de cálculo se integran anualmente y se convierten de julios a kWh para facilitar la comparación entre alternativas.

$$E_{HVAC} = E_{heating} + E_{cooling} \quad (4)$$

Donde:

- E_{HVAC} es la demanda energética total (kWh)
- $E_{heating}$ es la demanda de calefacción (kWh)
- $E_{cooling}$ es la demanda de refrigeración (kWh)

Este criterio se analiza en el apartado 4.1 al presentar los resultados de simulación energética. Su objetivo es la minimización, ya que refleja el consumo energético operativo asociado al comportamiento térmico de la envolvente. En el contexto de infraestructuras militares temporales, una menor demanda energética implica menor consumo de combustible, reducción de la dependencia logística y disminución del coste operativo en bases desplegadas.

3.10.2 Criterio 2 - Transmitancia térmica media de la envolvente (W/m²K)

La transmitancia térmica media se calcula como el valor ponderado de los cerramientos opacos principales (pared, cubierta y suelo), en función de su superficie relativa.

A partir de las composiciones constructivas definidas de la Tabla 3-1 a la Tabla 3-5 se ha calculado la transmitancia térmica de los cerramientos principales del módulo (pared, cubierta y suelo).

La resistencia térmica total del cerramiento se calcula mediante la ecuación (5):

$$R = \sum_{i=1}^n \frac{e_i}{\lambda_i} \quad (5)$$

Donde:

- R es la resistencia térmica total (m²·K/W)
- e_i es el espesor de la capa i (m)
- λ_i es la conductividad térmica de la capa i (W/(m·K))

La transmitancia térmica se obtiene a partir de la resistencia mediante la ecuación (6):

$$U = \frac{1}{R} \quad (6)$$

Donde:

- U es la transmitancia térmica ($W/(m^2 \cdot K)$)
- R es la resistencia térmica total ($m^2 \cdot K/W$)

En el cálculo se consideran exclusivamente las resistencias térmicas de las capas materiales definidas en cada sistema constructivo, ya que en la simulación energética las resistencias superficiales interior y exterior se modelan automáticamente mediante los coeficientes de intercambio convectivo definidos por EnergyPlus.

Los valores obtenidos se resumen en la Tabla 3-6.

Módulo	$U_{\text{pared}} (W/m^2K)$	$U_{\text{cubierta}} (W/m^2K)$	$U_{\text{suelo}} (W/m^2K)$
Modelo base	0,508	0,302	0,625
Alternativa 1	0,218	0,273	0,275
Alternativa 2	0,267	0,236	0,317
Alternativa 3	0,236	0,198	0,298
Alternativa 4	0,203	0,179	0,286

Tabla 3-6 Transmitancia térmica de los cerramientos

Estos valores permiten comparar de forma directa la capacidad aislante de las distintas soluciones constructivas y sirven como base para el cálculo del criterio de transmitancia térmica media de la envolvente, utilizado posteriormente en el análisis multicriterio.

Para el cálculo de la transmitancia térmica media de la envolvente se utiliza ecuación (7):

$$U_{\text{media}} = \frac{U_p \cdot A_p + U_c \cdot A_c + U_s \cdot A_s}{A_p + A_c + A_s} \quad (7)$$

Donde:

- U_{media} es la transmitancia media ($W/(m^2 \cdot K)$)
- U_p, U_c, U_s son las transmitancias de pared, cubierta y suelo ($W/(m^2 \cdot K)$)
- A_p, A_c, A_s son sus superficies (m^2)

Aplicando esta expresión a cada alternativa constructiva se obtienen los valores de transmitancia térmica media de la Tabla 3-7.

Módulo	$U_{\text{media}} (W/m^2K)$
Modelo base	0,490
Alternativa 1	0,241
Alternativa 2	0,271
Alternativa 3	0,241
Alternativa 4	0,215

Tabla 3-7 Transmitancia térmica media de la envolvente de cada módulo

Este indicador caracteriza el comportamiento térmico estacionario del sistema constructivo, independientemente del clima específico analizado.

El objetivo será minimizarlo debido a que una menor transmitancia implica reducción de pérdidas y ganancias térmicas a través de la envolvente. Aunque el estudio se basa en simulación dinámica, este parámetro permite comparar la calidad térmica estructural de las soluciones propuestas desde un punto de vista físico independiente de las condiciones exteriores contribuyendo a mejorar la eficiencia energética del módulo y a reducir su firma térmica exterior, aspecto relevante en entornos operativos donde la detección mediante sensores infrarrojos puede constituir un factor de riesgo.

3.10.3 Criterio 3 - Incremento de espesor respecto al modelo base (mm)

Se define como el incremento de espesor de la envolvente del módulo respecto al modelo base, obtenido a partir del espesor total de los cerramientos principales (pared, cubierta y suelo).

El espesor total del cerramiento se obtiene mediante la ecuación (8):

$$e_{total} = \sum_{i=1}^n e_i \quad (8)$$

Donde:

- e_{total} es el espesor total (mm)
- e_i es el espesor de cada capa (mm)

A partir de estos valores se determina el espesor medio de la envolvente del módulo y posteriormente su desviación respecto al modelo base, que constituye el indicador utilizado en el análisis multicriterio.

A partir de las composiciones constructivas definidas de la Tabla 3-1 a la Tabla 3-5 se obtiene el espesor total de los cerramientos principales del módulo (pared, cubierta y suelo) para cada alternativa. Con el fin de disponer de un único indicador representativo del módulo completo, el espesor medio de la envolvente se calcula mediante la ecuación (9):

$$e_{medio} = \frac{e_p \cdot A_p + e_c \cdot A_c + e_s \cdot A_s}{A_p + A_c + A_s} \quad (9)$$

Donde:

- e_{medio} es el espesor medio (mm)
- e_p, e_c, e_s son los espesores de cada cerramiento (mm)
- A_p, A_c, A_s son sus superficies (m²)

Con el fin de evaluar el impacto logístico de cada alternativa respecto al modelo base, la variación de espesor respecto al modelo base se calcula mediante la ecuación (10):

$$\Delta e = e_{medio} - e_{base} \quad (10)$$

Donde:

- Δe es la variación de espesor (mm)
- e_{medio} es el espesor de la alternativa (mm)
- e_{base} es el espesor del modelo base (mm)

El objetivo será minimizar este criterio, ya que el incremento de espesor respecto al modelo base influye directamente en aspectos logísticos y operativos, tales como la compatibilidad con contenedores estándar ISO, el volumen ocupado durante el transporte y la integración con módulos existentes. En

particular, un aumento significativo del espesor puede requerir adaptaciones en los sistemas de transporte, manipulación y despliegue del módulo en entornos operativos.

Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 3-8.

Módulo	Espesor pared (mm)	Espesor cubierta (mm)	Espesor suelo (mm)	Espesor medio (mm)	Δ espesor respecto al base (mm)
Modelo base	75	130	70	85,12	0
Alternativa 1	132,5	152,5	99,5	129,87	44,74
Alternativa 2	172,5	192,5	139,5	169,87	84,74
Alternativa 3	132,5	152,5	99,5	129,87	44,74
Alternativa 4	183	203	119,5	174,19	89,07

Tabla 3-8 Espesor medio de la envolvente y desviación respecto al modelo base

3.10.4 Criterio 4 - Peso superficial del cerramiento (kg/m^2)

En infraestructuras temporales y desplegables, la masa constituye un factor crítico de viabilidad operativa.

El peso superficial del cerramiento se calcula mediante la ecuación (11):

$$m = \sum_{i=1}^n \rho_i \cdot e_i \quad (11)$$

Donde:

- m es el peso superficial (kg/m^2)
- ρ_i es la densidad (kg/m^3)
- e_i es el espesor (m)

A partir de las composiciones constructivas definidas de la Tabla 3-1 a la Tabla 3-5 se calcula el peso superficial de los tres cerramientos principales del módulo (pared, cubierta y suelo). En el cálculo se consideran únicamente los cerramientos opacos del módulo. Las superficies correspondientes a la puerta y la ventana no se incluyen, ya que mantienen las mismas dimensiones y características en todas las configuraciones constructivas analizadas y, por tanto, no afectan a la comparación relativa entre alternativas.

El peso superficial medio de la envolvente se calcula mediante la ecuación (12):

$$m_{medio} = \frac{m_p \cdot A_p + m_c \cdot A_c + m_s \cdot A_s}{A_p + A_c + A_s} \quad (12)$$

Donde:

- m_{medio} es el peso superficial medio de la envolvente (kg/m^2)
- m_p, m_c, m_s son los pesos superficiales de pared, cubierta y suelo (kg/m^2)
- A_p, A_c, A_s son las superficies de pared, cubierta y suelo (m^2)

Aplicando esta expresión a cada alternativa constructiva se obtienen los valores recogidos en la Tabla 3-9.

Módulo	Peso pared (kg/m ²)	Peso cubierta (kg/m ²)	Peso suelo (kg/m ²)	Peso medio ponderado (kg/m ²)
Modelo base	10,44	18,47	17,27	13,45
Alternativa 1	27,58	28,18	18,66	25,89
Alternativa 2	30,18	30,98	21,06	28,49
Alternativa 3	28,08	28,78	19,06	26,39
Alternativa 4	29,09	29,79	19,76	27,34

Tabla 3-9 Peso superficial de los cerramientos y valor medio ponderado de la envolvente

El objetivo será minimizar este criterio, ya que el peso superficial del sistema constructivo influye en aspectos logísticos y operativos tales como el transporte del módulo, las operaciones de manipulación e izado desde los buques donde son transportados, el tiempo de montaje y las exigencias estructurales durante el despliegue.

En particular, soluciones constructivas con menor masa facilitan las operaciones de transporte y manipulación, reducen las cargas transmitidas a la estructura portante del módulo y mejoran la viabilidad del sistema en escenarios de despliegue rápido.

3.10.5 Criterio 5 - Coste estimado de los materiales del módulo (€)

Este criterio representa el coste aproximado de los materiales necesarios para construir la envolvente del módulo en cada una de las alternativas constructivas analizadas.

El cálculo se realiza a partir de precios unitarios de materiales disponibles en el mercado (Tabla 3-10), obtenidos del banco de precios de la construcción BEDEC [50]. Esta base de datos proporciona precios de referencia utilizados en estudios de costes y presupuestos de construcción en España.

Los precios disponibles en BEDEC se expresan habitualmente en €/m² para un espesor de referencia del material. Sin embargo, dado que las alternativas constructivas analizadas presentan espesores diferentes en las capas aislantes y en los distintos cerramientos, resulta necesario transformar estos valores a precios volumétricos (€/m³). De este modo, el coste puede calcularse de forma proporcional al volumen real de material empleado en cada configuración constructiva.

Material	Acero galvanizado	EPS	PIR	Lana mineral	PUR	XPS	Yeso laminado	Tablero OSB	Panel aluminio
Precio (€/m ²)	7,12	10,52	25,74	15,76	26,47	13,36	7,7	9,32	13,59
Espesor de referencia (mm)	0,6	70	100	120	100	100	12,5	18	0,8
Precio (€/m ³)	11866,67	150,29	257,4	131,33	264,7	133,6	616	517,78	16987,5

Tabla 3-10 Precios de los materiales

El precio volumétrico del material se obtiene mediante la ecuación (13):

$$p_{m^3} = \frac{p_{m^2}}{e_{ref}} \quad (13)$$

Donde:

- p_{m^3} es el precio volumétrico del material (€/m³)
- p_{m^2} es el precio superficial de la partida BEDEC [50](€/m²)
- e_{ref} es el espesor de referencia de dicha partida [50](m)

Una vez obtenidos los precios volumétricos, el coste de cada capa del cerramiento se calcula mediante la ecuación (14):

$$C_i = p_i \cdot A \cdot e_i \quad (14)$$

Donde:

- C_i es el coste de la capa i (€)
- p_i es el precio volumétrico del material (€/m³)
- A es la superficie del cerramiento (m²)
- e_i es el espesor real de la capa en el sistema constructivo (m)

El coste total de cada cerramiento se obtiene mediante la ecuación (15):

$$C_{cerramiento} = \sum C_i \quad (15)$$

Donde:

- $C_{cerramiento}$ es el coste total del cerramiento (€)
- C_i es el coste de cada capa que lo compone (€)

Finalmente, el coste total del módulo se calcula mediante la ecuación (16):

$$C_{módulo} = C_{paredes} + C_{cubierta} + C_{suelo} \quad (16)$$

Donde:

- $C_{módulo}$ es el coste total de la envolvente del módulo (€)
- $C_{paredes}$, $C_{cubierta}$, C_{suelo} son los costes de cada cerramiento (€)

En el cálculo no se han descontado las superficies correspondientes a la puerta y la ventana del módulo. Dado que estas presentan las mismas dimensiones y características en todas las alternativas analizadas, su influencia sobre el coste total resulta constante y no altera la comparación relativa entre configuraciones constructivas.

No se incluyen costes indirectos, transporte específico ni mano de obra especializada, ya que el objetivo del criterio es estimar únicamente el coste de materia prima de los materiales que componen la envolvente. Las posibles implicaciones logísticas derivadas del peso de los cerramientos se analizan de forma independiente mediante el criterio C4.

El objetivo de este criterio es su minimización, ya que el coste de los materiales influye directamente en la viabilidad económica del despliegue de infraestructuras militares temporales, especialmente en escenarios donde pueden requerirse múltiples unidades de estos módulos.

A partir de los precios unitarios y de las composiciones constructivas definidas en las Tabla 3-1 a la Tabla 3-5 se ha estimado el coste total de materia prima de la envolvente para cada alternativa constructiva. Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 3-11.

Módulo	Coste total del módulo (€)
Modelo base	1735,61
Alternativa 1	3578,91
Alternativa 2	3029,47
Alternativa 3	3633,45
Alternativa 4	6626,78

Tabla 3-11 Coste estimado de los materiales de la envolvente para cada alternativa

Los resultados muestran que el modelo base presenta el menor coste constructivo debido al uso de EPS como material aislante y a una composición constructiva más sencilla. Entre las alternativas de mejora, la solución basada en lana mineral (Alternativa 2) presenta el menor coste estimado, mientras que las configuraciones que incorporan aislantes de mayor coste unitario, como PIR (Alternativa 1) o PUR (Alternativa 3), presentan valores superiores debido al mayor precio volumétrico de estos materiales. Por su parte, la Alternativa 4 presenta el mayor coste total debido a la mayor complejidad de su composición constructiva, que incorpora capas adicionales y materiales metálicos como el panel de aluminio exterior, incrementando la cantidad total de material utilizado y, en consecuencia, el coste de la envolvente.

3.11 Metodología de análisis multicriterio

3.11.1 Justificación del enfoque multicriterio

La comparación entre las alternativas constructivas no puede basarse exclusivamente en la demanda energética anual, ya que el desempeño global del módulo depende simultáneamente de variables térmicas, físicas, logísticas y económicas.

En infraestructuras militares desplegables, una solución con baja demanda energética puede implicar incrementos significativos de espesor, peso o coste, afectando a su viabilidad operativa. Del mismo modo, una alternativa ligera y económica puede no garantizar un comportamiento térmico adecuado en climas extremos.

Por ello, se adopta un enfoque de análisis multicriterio que permite integrar los cinco criterios definidos en el apartado 3.10 dentro de un modelo único de decisión.

3.11.2 Selección del método de agregación

Se emplea el modelo de suma ponderada (WSM) al tratarse de un conjunto de criterios cuantitativos independientes y orientados a minimización, cuya agregación puede realizarse una vez normalizados. El carácter aditivo del método permite interpretar con claridad la contribución relativa de cada criterio en la puntuación final.

Dado que todos los criterios (C1-C5) son medibles y expresables numéricamente, el modelo aditivo es apropiado sin necesidad de recurrir a métodos de ordenación más complejos.

3.11.3 Normalización de criterios

Dado que los criterios presentan distintas unidades y órdenes de magnitud (kWh, W/m²K, mm, kg/m², €), se aplica una normalización lineal directa.

La normalización de los criterios se realiza mediante la ecuación (17):

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\max(x_i)} \quad (17)$$

Donde:

- x_{ij} es el valor original del criterio i para la alternativa j
- $\max(x_i)$ es el peor valor del criterio i entre todas las alternativas
- r_{ij} es el valor normalizado del criterio i para la alternativa j

Este procedimiento transforma los valores a una escala adimensional entre 0 y 1, manteniendo la proporcionalidad y evitando introducir distorsiones no lineales.

3.11.4 Formulación del modelo

El índice global de desempeño de cada alternativa se calcula mediante la ecuación (18):

$$S_j = \sum_{i=1}^5 w_i \cdot r_{ij} \quad (18)$$

Donde:

- S_j es la puntuación global de la alternativa
- w_i es el peso asignado al criterio i
- r_{ij} es el valor normalizado del criterio i para la alternativa j

Todos los criterios han sido definidos con objetivo de minimización, por lo que la alternativa óptima será aquella que presente el menor valor de S_j .

3.11.5 Asignación de pesos

Los pesos reflejan la importancia relativa de cada criterio en el contexto operativo del módulo. En infraestructuras desplegables, el consumo energético asociado a los sistemas de climatización constituye uno de los principales costes operativos, especialmente en ubicaciones remotas donde el suministro energético depende del transporte de combustible.

Como configuración equilibrada (escenario base) se adopta la siguiente ponderación:

- C1 - Demanda energética anual total: 0,50
- C2 - Transmitancia térmica media: 0,20
- C3 - Espesor total del módulo: 0,08
- C4 - Peso superficial del cerramiento: 0,12
- C5 - Coste estimado: 0,10

Cumpléndose:

$$\sum w_i = 1$$

Esta distribución prioriza el comportamiento energético del módulo, manteniendo al mismo tiempo la influencia de variables constructivas y logísticas como el peso, el espesor y el coste de los materiales.

3.11.6 Análisis de sensibilidad y escenarios estratégicos

Con el fin de evaluar la robustez del modelo frente a variaciones razonables en la importancia relativa de los criterios, se definen tres configuraciones estratégicas de ponderación.

Estas configuraciones no dependen del clima específico, sino del enfoque operativo adoptado en función de las condiciones del despliegue.

Escenario 1 - Prioridad energética:

- C1: 0,60
- C2: 0,15
- C3: 0,05
- C4: 0,10
- C5: 0,10

Representa contextos donde la reducción del consumo de combustible y la autonomía energética son prioritarias.

Escenario 2 - Prioridad logística/operativa

- C1: 0,40
- C2: 0,20
- C3: 0,10
- C4: 0,20
- C5: 0,10

Representa contextos donde factores como el transporte, la manipulación y el despliegue rápido del módulo adquieren mayor relevancia.

Para cada escenario de ponderación se recalculará el índice global en todos los climas analizados, permitiendo evaluar la estabilidad del ranking y la robustez de la alternativa seleccionada frente a distintos enfoques estratégicos.

3.11.7 Aplicación por escenario climático

El modelo multicriterio se aplicará de forma independiente en cada uno de los escenarios climáticos definidos.

Para cada clima se procederá a:

1. Obtener los valores originales de los cinco criterios
2. Normalizar los criterios
3. Calcular el índice global S_j
4. Establecer el ranking de alternativas

Este procedimiento permite identificar la alternativa óptima en cada entorno y analizar la influencia del clima en la toma de decisión.

4 SIMULACIÓN Y RESULTADOS

Este capítulo expone y analiza los resultados obtenidos a partir de la simulación energética en cuatro contextos climáticos diferenciados. En primer lugar, se presentan los resultados energéticos del modelo base y las cuatro alternativas constructivas en cada clima, evaluando su demanda anual de calefacción, refrigeración y consumo total. A continuación, estos resultados se integran en un análisis multicriterio mediante el modelo de suma ponderada (WSM), obteniendo un ranking de alternativas para tres escenarios de ponderación distintos. Posteriormente, se desarrolla la optimización de la envolvente del módulo, definiendo una configuración constructiva mejorada que se simula en los cuatro climas y se evalúa de nuevo mediante el análisis multicriterio. El capítulo concluye con la posición del módulo optimizado en el ranking global y la identificación de la solución con mejor desempeño en cada escenario.

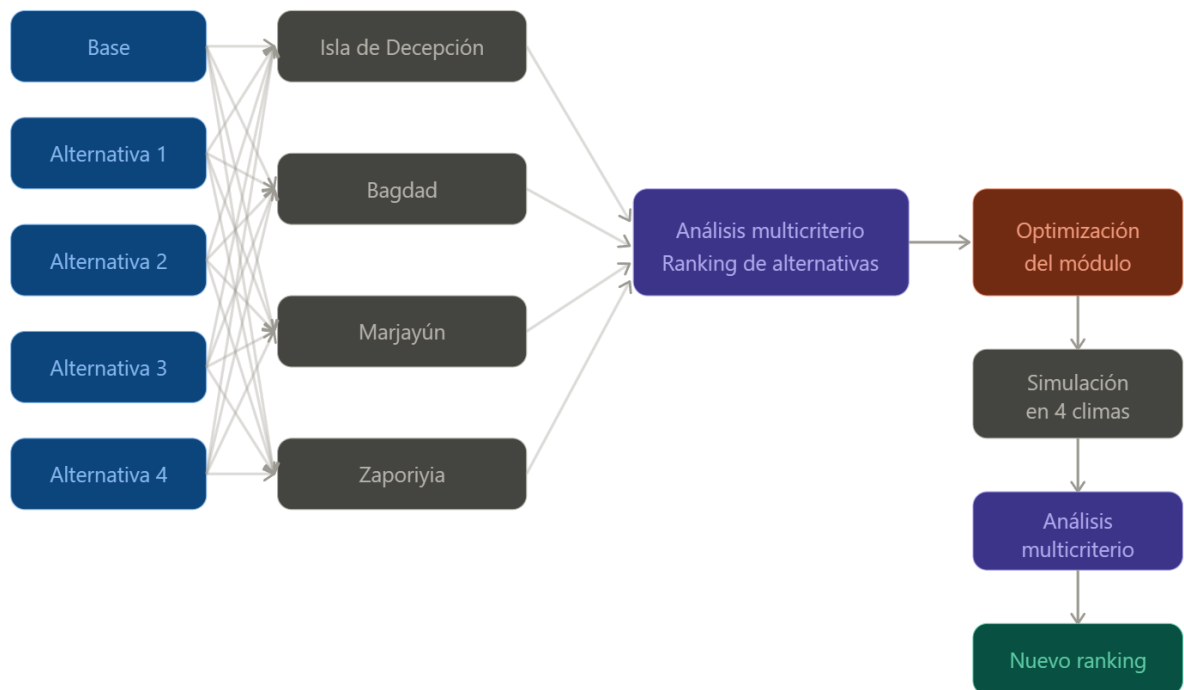


Figura 4-1 Esquema del simulación y resultados

4.1 Resultados energéticos

Para la comparación entre alternativas se utiliza la energía demandada por los sistemas de climatización, obtenida a partir de la suma de las demandas de calefacción (*District Heating*) y refrigeración (*District Cooling*) expresadas en kWh.

El indicador *Total Site Energy* proporcionado por OpenStudio incluye también el consumo eléctrico asociado a la iluminación del módulo (105,56 kWh), el cual permanece constante en todas las simulaciones y no depende de la solución constructiva analizada. Por este motivo, dicho indicador no se utiliza para la comparación entre configuraciones constructivas.

Las figuras correspondientes al modelo base se incluyen en este apartado con el fin de ilustrar el comportamiento térmico del módulo en cada clima.

4.1.1 Isla de Decepción (Antártida)

En el clima polar de Isla de Decepción, donde se encuentra la base Gabriel de Castilla, la demanda energética corresponde en su totalidad a calefacción, siendo la demanda de refrigeración nula, ya que su temperatura media es inferior a 3 °C todo el año y negativa durante 8 meses (Figura 3-2).

Los resultados obtenidos se recogen en la Tabla 4-1.

Módulo	Refrigeración [kWh]	Calefacción [kWh]	Total HVAC [kWh]	Variación respecto al modelo base
Modelo base	0	6234	6234	-
Alternativa 1	0	6000	6000	-3,8 %
Alternativa 2	0	6480	6480	+4,0 %
Alternativa 3	0	5450	5450	-12,6 %
Alternativa 4	0	5669	5669	-9,1 %

Tabla 4-1 Resultados energéticos de las simulaciones - Isla de Decepción

La demanda de calefacción se mantiene activa durante todo el año, sin periodos que no requieran demanda térmica, lo que responde al elevado gradiente térmico interior-exterior característico de este entorno.

Como se observa en la Figura 4-2, la evolución mensual de la demanda energética refleja un comportamiento similar en todas las configuraciones constructivas, con valores máximos durante los meses de invierno austral y una reducción progresiva durante los meses finales del año. La demanda más elevada se registra en julio y agosto, coincidiendo con los periodos de temperaturas exteriores más bajas.

La Alternativa 3 presenta de forma sistemática los valores de demanda más reducidos a lo largo de todo el año, seguida de la Alternativa 4 y la Alternativa 1, que también muestran mejoras respecto al modelo base. Por el contrario, la Alternativa 2 mantiene valores ligeramente superiores al modelo base durante la mayor parte del año, lo que confirma el incremento de demanda energética observado en los resultados anuales.

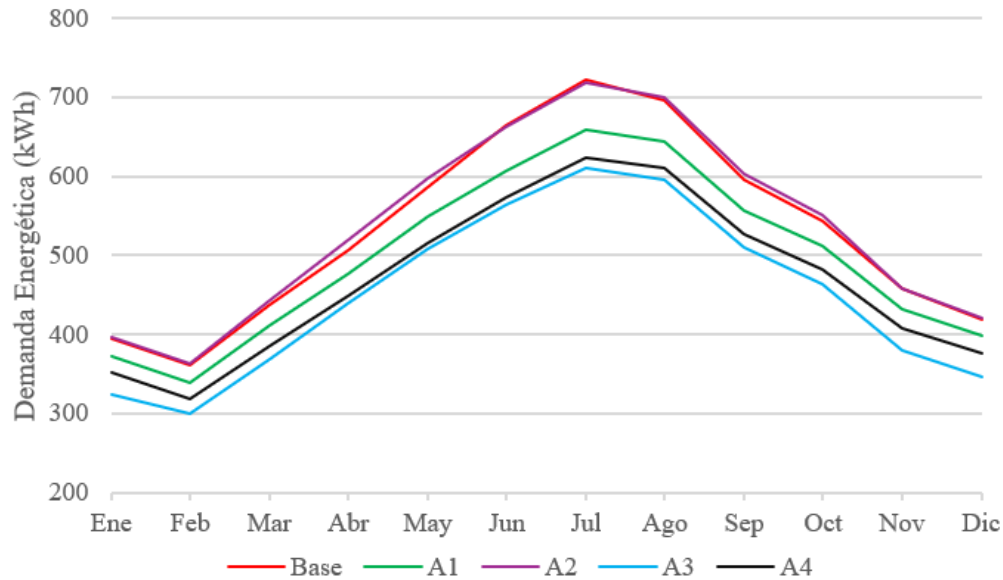


Figura 4-2 Demanda mensual de calefacción - Isla de Decepción

En este contexto climático, la mejora energética depende fundamentalmente de la reducción de la transmitancia térmica y de la continuidad del aislamiento, mientras que la influencia de la inercia térmica resulta secundaria frente al efecto dominante de las pérdidas por transmisión.

La Alternativa 3 se posiciona, por tanto, como la solución energéticamente más eficiente en este clima y será utilizada como referencia en el posterior análisis multicriterio.

4.1.2 Bagdad (Irak)

En el clima desértico cálido de Bagdad la demanda energética está dominada por la refrigeración, mientras que la calefacción tiene un peso minoritario en el balance anual, aunque necesario algunos días del invierno.

Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 4-2.

Módulo	Refrigeración [kWh]	Calefacción [kWh]	Total HVAC [kWh]	Variación respecto al modelo base
Modelo base	1897	319	2216	-
Alternativa 1	1967	256	2223	+0,3 %
Alternativa 2	2100	289	2389	+7,8 %
Alternativa 3	1953	208	2161	-2,5 %
Alternativa 4	1900	244	2144	-3,2 %

Tabla 4-2 Resultados energéticos de las simulaciones – Bagdad

La demanda de refrigeración se requiere desde primavera hasta otoño, con ausencia prácticamente total durante el invierno.

La calefacción aparece únicamente en los meses más fríos y con magnitudes significativamente inferiores.

El balance energético anual confirma que la refrigeración representa aproximadamente el 80-85 % del consumo total, mientras que la calefacción tiene un peso minoritario de en torno al 15 %. Las

diferencias entre alternativas están determinadas principalmente por su comportamiento frente a cargas térmicas estivales.

Desde el punto de vista comparativo, la Alternativa 4 presenta el menor consumo total (2144 kWh) con una reducción del 3,2 %, seguida de la Alternativa 3 (-2,5 %). La Alternativa 1 muestra un consumo prácticamente equivalente al modelo base, mientras que la Alternativa 2 incrementa la demanda un 7,8 %, siendo la menos adecuada en este clima.

Es importante matizar que el modelo base es el que presenta la menor demanda de refrigeración absoluta (1897 kWh). Este resultado se explica porque un mayor aislamiento limita también la disipación nocturna del calor acumulado durante el día. En este clima desértico, el descenso de temperatura nocturno favorece el enfriamiento natural del módulo, efecto que queda parcialmente bloqueado en las alternativas con mayor resistencia térmica.

Este comportamiento ha sido documentado en contenedores metálicos utilizados como espacios habitables, donde la ausencia de aislamiento permite una mayor disipación térmica durante el periodo nocturno, lo que puede reducir la demanda de refrigeración en climas cálidos [36].

Sin embargo, su consumo total es mayor debido a una demanda de calefacción superior al resto de alternativas. Esto explica que no sea la configuración óptima desde el punto de vista del consumo energético total del sistema HVAC.

Como se observa en la Figura 4-3, la evolución mensual de la demanda de calefacción presenta un comportamiento claramente estacional, concentrándose en los meses más fríos del año y desapareciendo prácticamente durante el periodo cálido. Los valores más elevados se registran en los meses de invierno, mientras que a partir de la primavera la demanda disminuye rápidamente hasta ser prácticamente nula durante gran parte del año.

La Alternativa 3 presenta de forma sistemática los valores de demanda más reducidos durante el periodo invernal, seguida de la Alternativa 4 y la Alternativa 1, que también muestran mejoras respecto al modelo base. Por el contrario, la Alternativa 2 mantiene valores ligeramente superiores al modelo base durante los meses fríos, lo que explica su mayor demanda anual de calefacción.

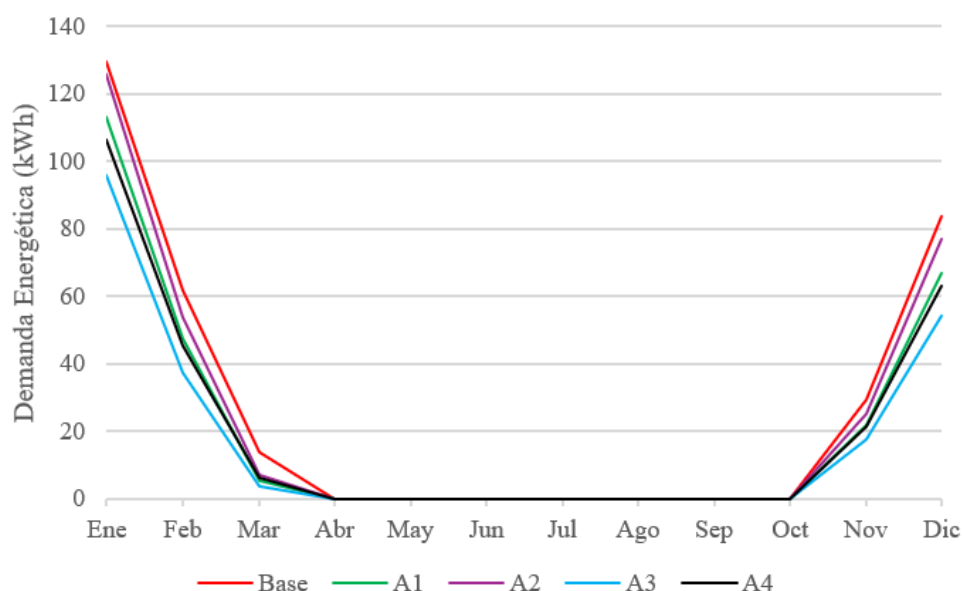


Figura 4-3 Demanda mensual de calefacción – Bagdad

Como se observa en la Figura 4-4, la evolución mensual de la demanda de refrigeración muestra un comportamiento estacional, concentrándose en los meses cálidos del año. La demanda comienza a incrementarse durante la primavera, alcanza sus valores máximos en los meses centrales del verano y desciende progresivamente durante el otoño hasta desaparecer prácticamente en invierno.

La Alternativa 4 presenta de forma sistemática los valores de demanda más reducidos durante el periodo estival. El modelo base muestra también consumos relativamente bajos y, en general, inferiores a los de la Alternativa 3 y la Alternativa 1 durante la mayor parte del año. Por el contrario, la Alternativa 2 mantiene los valores más elevados de demanda de refrigeración durante los meses cálidos.

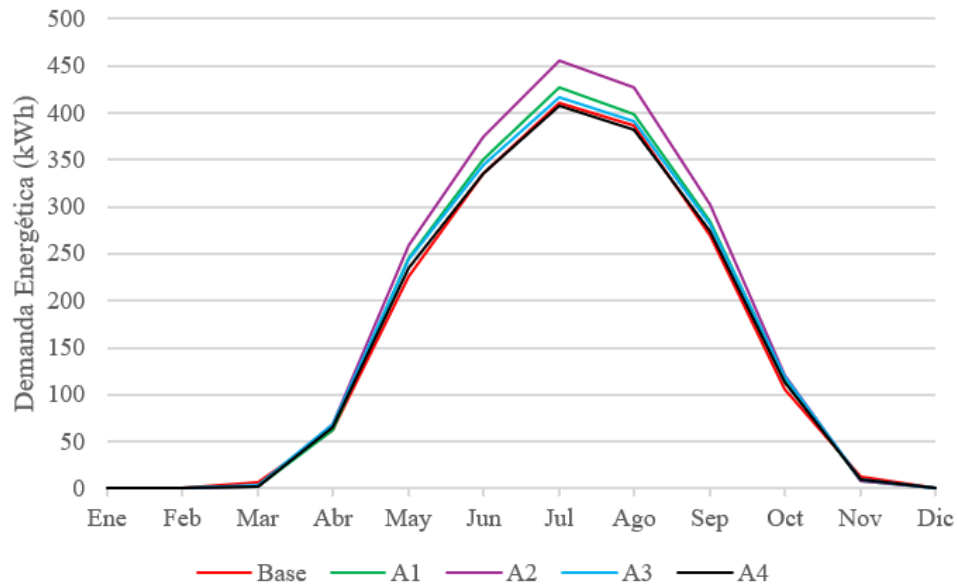


Figura 4-4 Demanda mensual de refrigeración – Bagdad

A diferencia del caso antártico, donde la variable dominante era la transmitancia térmica global en régimen de calefacción, en Bagdad el rendimiento energético depende fundamentalmente del control de ganancias solares y de la capacidad del cerramiento para limitar la entrada de calor durante el largo periodo anual de altas temperaturas (Figura 3-2).

La reducción observada en la Alternativa 4 sugiere un mejor comportamiento frente a la radiación solar incidente o una menor transmisión térmica durante los meses de mayor temperatura exterior, lo que se traduce en una reducción acumulada de la energía necesaria para refrigeración.

En consecuencia, la Alternativa 4 se posiciona como la solución energéticamente más eficiente en el clima desértico y será la referencia en el posterior análisis multicriterio.

4.1.3 Marjayún (Líbano)

El clima mediterráneo templado de Marjayún, donde se encuentra la base Miguel de Cervantes, presenta una demanda energética mixta, con necesidades tanto de calefacción en invierno como de refrigeración en verano.

La demanda de refrigeración se concentra principalmente en los meses estivales, con valores significativamente inferiores a los observados en Bagdad, lo que refleja unas condiciones climáticas menos extremas.

La demanda de calefacción aparece durante los meses de invierno, y a diferencia de los climas analizados previamente ambas demandas presentan magnitudes comparables a lo largo del año, reflejando el carácter mixto de este.

Los resultados obtenidos se recogen en la Tabla 4-3.

Módulo	Refrigeración [kWh]	Calefacción [kWh]	Total HVAC [kWh]	Variación respecto al modelo base
Modelo base	214	847	1061	-
Alternativa 1	175	722	897	-15,5 %
Alternativa 2	206	806	1012	-4,6 %
Alternativa 3	231	614	845	-20,4 %
Alternativa 4	194	686	880	-17,1 %

Tabla 4-3 Resultados energéticos de las simulaciones - Marjayún

El balance energético anual muestra que la calefacción representa aproximadamente el 75-80 % del consumo total, con una contribución menor de la refrigeración asociada principalmente al periodo estival.

Las diferencias entre alternativas se explican tanto por la reducción de pérdidas térmicas en invierno como por el control de ganancias solares en verano. La Alternativa 3 presenta el menor consumo energético (845 kWh) con una reducción del 20,4 %, seguida de la Alternativa 4 (-17,1 %) y la Alternativa 1 (-15,5 %). La Alternativa 2 presenta la menor mejora, con una reducción del 4,6 %.

Como se observa en la Figura 4-5, la evolución mensual de la demanda de calefacción presenta un comportamiento claramente estacional, concentrándose en los meses de invierno y desapareciendo prácticamente durante el periodo estival. Los valores más elevados se registran durante los meses más fríos del año, mientras que a partir de la primavera la demanda disminuye progresivamente hasta ser prácticamente nula durante el verano.

La Alternativa 3 presenta de forma sistemática los valores de demanda más reducidos durante el periodo invernal, seguida de la Alternativa 4 y la Alternativa 1, que también muestran mejoras respecto al modelo base. Por el contrario, la Alternativa 2 mantiene valores más próximos al modelo base durante la mayor parte del año.

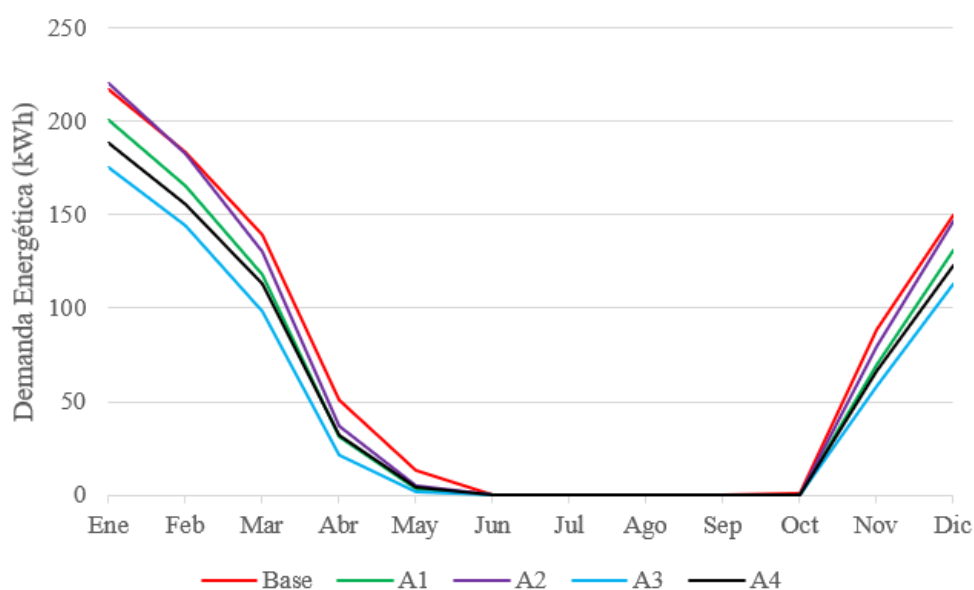


Figura 4-5 Demanda mensual de calefacción – Marjayún

Como se observa en la Figura 4-6, la evolución mensual de la demanda de refrigeración muestra un comportamiento estacional opuesto al de la calefacción, concentrándose en los meses cálidos del año

(de mayo a octubre). La demanda comienza a incrementarse a partir de finales de primavera, alcanza sus valores máximos en los meses centrales del verano y desciende progresivamente durante el otoño hasta desaparecer prácticamente en invierno.

En este caso, la Alternativa 1 presenta los valores de demanda más reducidos durante el periodo estival, seguida de la Alternativa 4 y la Alternativa 2, que también muestran consumos inferiores al modelo base. Por el contrario, la Alternativa 3 mantiene valores ligeramente superiores durante los meses de mayor carga térmica, lo que explica su mayor demanda anual de refrigeración.

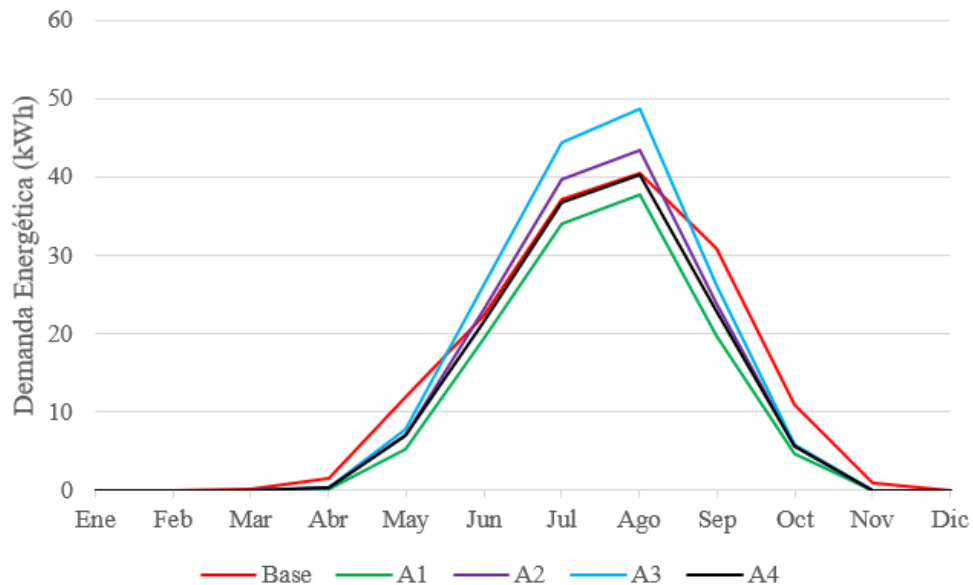


Figura 4-6 Demanda mensual de refrigeración - Marjayún

Estos resultados indican que, en climas mediterráneos templados, el rendimiento energético de la envolvente depende de su capacidad para equilibrar simultáneamente dos efectos: la limitación de pérdidas térmicas durante el invierno y la reducción de las ganancias de calor en los periodos estivales.

Este comportamiento es característico de climas mixtos, donde la envolvente debe responder de forma eficiente tanto a condiciones de invierno como de verano, lo que exige un equilibrio entre aislamiento térmico y control de ganancias solares.

La Alternativa 3 se posiciona como la solución energéticamente más eficiente en este clima y será empleada como referencia en el posterior análisis multicriterio.

4.1.4 Zaporiyia (Ucrania)

El clima continental de Zaporiyia presenta inviernos fríos y veranos cálidos, generando una demanda combinada de calefacción y refrigeración.

La demanda de refrigeración se concentra en los meses de verano, mientras que la calefacción se extiende durante gran parte del año, confirmando el carácter continental del clima con inviernos dominantes en el balance energético anual.

El balance energético anual refleja que la calefacción representa aproximadamente el 90 % del consumo total, con una contribución reducida de la refrigeración.

Los resultados obtenidos se resumen en la Tabla 4-4.

Módulo	Refrigeración [kWh]	Calefacción [kWh]	Total HVAC [kWh]	Variación respecto al modelo base
Modelo base	178	2808	2986	-
Alternativa 1	181	2653	2834	-5,1 %
Alternativa 2	194	2889	3083	+3,2 %
Alternativa 3	206	2400	2606	-12,7 %
Alternativa 4	183	2514	2697	-9,7 %

Tabla 4-4 Resultados energéticos de las simulaciones - Zaporíyia

Las diferencias entre alternativas están determinadas principalmente por su capacidad para reducir las pérdidas térmicas en invierno. La Alternativa 3 presenta el menor consumo energético (2606 kWh) con una reducción del 12,7 %, seguida de la Alternativa 4 (-9,7 %) y la Alternativa 1 (-5,1 %). La Alternativa 2 incrementa ligeramente el consumo un 3,2 %, siendo la opción menos favorable para este clima.

Como se observa en la Figura 4-7, la evolución mensual de la demanda de calefacción presenta un comportamiento claramente estacional, concentrándose en los meses de invierno y reduciéndose progresivamente a medida que aumentan las temperaturas exteriores en los equinoccios. Los valores más elevados se registran durante los meses más fríos del año, mientras que a partir de la primavera la demanda disminuye hasta desaparecer prácticamente durante los meses más cálidos (de mayo a septiembre).

La Alternativa 3 presenta de forma sistemática los valores de demanda más reducidos durante el periodo invernal, seguida de la Alternativa 4 y la Alternativa 1, que también muestran mejoras respecto al modelo base. Por el contrario, la Alternativa 2 mantiene valores ligeramente superiores al modelo base durante gran parte del año, lo que explica el incremento de demanda energética observado en los resultados anuales.

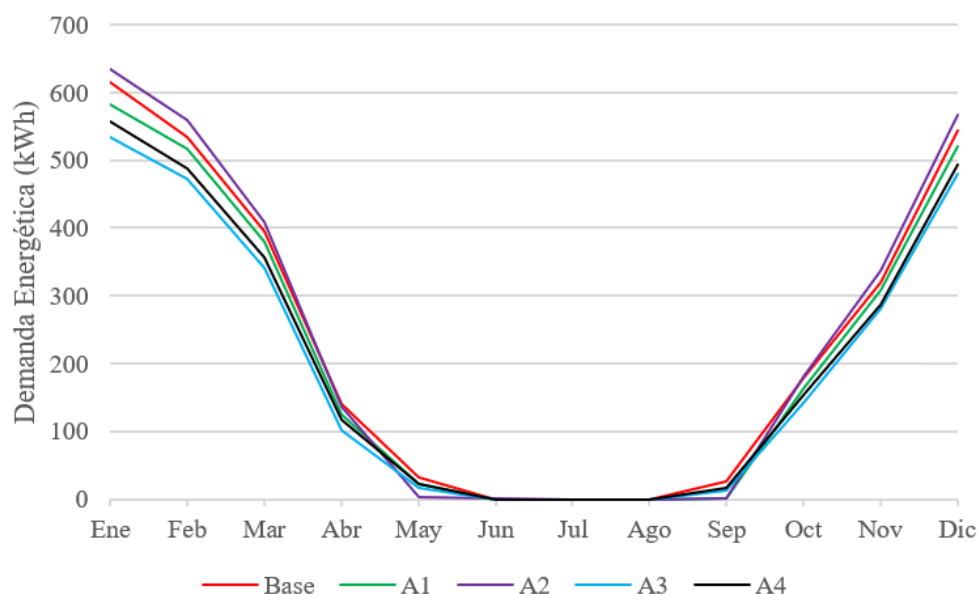


Figura 4-7 Demanda mensual de calefacción – Zaporíyia

Como se observa en la Figura 4-8, la evolución mensual de la demanda de refrigeración se concentra lógicamente en los meses cálidos del año, con un incremento progresivo desde finales de primavera hasta alcanzar los valores máximos durante el verano, seguido de un descenso rápido durante el otoño

hasta desaparecer prácticamente en invierno. En este caso, el modelo base y la Alternativa 4 presentan valores de demanda relativamente bajos durante el periodo estival. La Alternativa 1 muestra un comportamiento similar, mientras que las Alternativas 2 y 3 presentan valores ligeramente superiores durante los meses de mayor carga térmica.

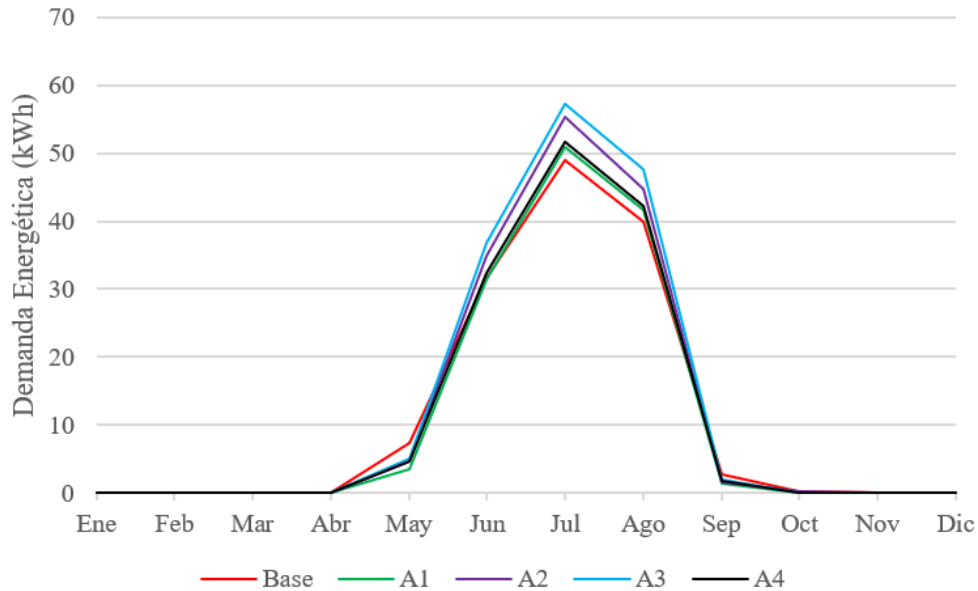


Figura 4-8 Demanda mensual de refrigeración - Zaporíyia

Los resultados indican que, en un clima continental como el de Zaporíyia, el comportamiento energético está dominado por la reducción de pérdidas térmicas durante el invierno, mientras que la refrigeración tiene un impacto relativamente menor en el consumo anual. Este tipo de comportamiento es habitual en climas continentales, donde la severidad del invierno determina el consumo energético anual y hace que la mejora de la envolvente térmica tenga un impacto especialmente relevante en la reducción de la demanda de calefacción.

En este contexto, la Alternativa 3 se posiciona como la solución energéticamente más eficiente y será considerada como referencia en el posterior análisis multicriterio para este clima.

4.1.5 Comparación global entre climas

La Tabla 4-5 resume la alternativa que presenta la menor demanda energética de climatización en cada clima, así como la reducción obtenida respecto al modelo base.

Localización	Modelo base (kWh)	Módulo óptimo	Total HVAC (kWh)	Reducción
Isla de Decepción (polar)	6234	Alternativa 3	5450	12,6 %
Bagdad (desértico)	2216	Alternativa 4	2144	3,2 %
Marjayún (mediterráneo)	1061	Alternativa 3	845	20,4 %
Zaporíyia (continental)	2986	Alternativa 3	2606	12,7 %

Tabla 4-5 Alternativa con mejor comportamiento energético en cada clima

Una vez analizado el comportamiento energético de cada configuración en los distintos escenarios climáticos se realiza una síntesis global que permite identificar la solución constructiva con mejor desempeño en cada localización.

La comparación se realiza a partir de la demanda energética de climatización (HVAC), definida como la suma de las demandas anuales de calefacción y refrigeración.

Con el fin de visualizar la influencia del clima sobre la demanda energética del módulo, la Figura 4-9 muestra la evolución mensual de la demanda de climatización correspondiente a la configuración óptima en cada localización.

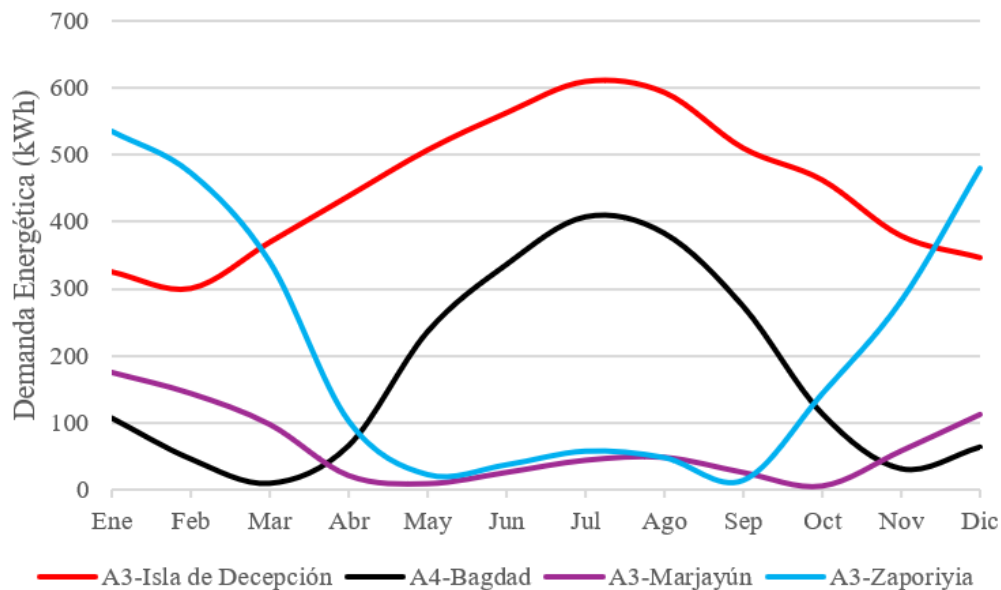


Figura 4-9 Consumo mensual de climatización de la mejor configuración energética en los climas analizados

La comparación pone de manifiesto diferencias claras en el comportamiento estacional del consumo energético en los diferentes climas analizados. En Isla de Decepción, la demanda energética se mantiene elevada durante todo el año debido a la dominancia de la calefacción en condiciones de clima polar. En Bagdad, por el contrario, la demanda se concentra principalmente en los meses de verano, reflejando el predominio de las cargas de refrigeración propias de un clima desértico cálido.

El clima mediterráneo templado de Marjayún presenta demandas más moderadas, con necesidades de calefacción en invierno y refrigeración en verano, aunque con magnitudes inferiores a las observadas en los climas extremos. En Zaporiyia, de carácter continental, la demanda se concentra principalmente en invierno, con una contribución menor de la refrigeración durante el periodo estival.

En conjunto, la comparación confirma que el clima condiciona de forma decisiva la demanda energética del módulo, tanto en términos de magnitud total como de distribución estacional de las cargas térmicas.

Las reducciones de demanda energética obtenidas mediante mejora de la envolvente son coherentes con los resultados documentados en la literatura para edificaciones ligeras prefabricadas de estructura metálica. En módulos habitables basados en contenedores, la climatización constituye la principal partida de consumo energético, alcanzando aproximadamente el 80 % del consumo total, lo que pone de manifiesto la relevancia de reducir la demanda térmica del edificio [1]. Asimismo, estudios sobre contenedores marítimos demuestran que el aislamiento térmico resulta imprescindible para su uso habitable y produce mejoras significativas en el comportamiento térmico respecto a configuraciones sin aislamiento [36].

Los valores obtenidos de demanda energética en Marjayún (-20,4 %), Zaporíyia (-12,7 %) e Isla de Decepción (-12,6 %) son coherentes con esta relación entre la mejora de la envolvente y la reducción de la demanda energética, al igual que la menor reducción observada en Bagdad (-3,2 %).

Asimismo, los resultados muestran que la Alternativa 3 presenta el comportamiento más robusto en la mayoría de los climas analizados, mientras que la Alternativa 4 resulta más favorable en el clima desértico de Bagdad, donde el control de las ganancias térmicas estivales adquiere mayor relevancia.

4.2 Aplicación del análisis multicriterio

4.2.1 Matriz de decisión

Para la aplicación del modelo de análisis multicriterio se construye una matriz de decisión que recoge los valores de los cinco criterios definidos en el apartado 3.10 para cada una de las alternativas constructivas analizadas.

La matriz de decisión constituye el punto de partida del modelo de suma ponderada (WSM), ya que permite organizar de forma estructurada los valores originales de los indicadores antes de proceder a su normalización y posterior agregación.

Los valores correspondientes a los criterios C2-C5 son independientes del clima, ya que dependen exclusivamente de la configuración constructiva de cada alternativa. Por el contrario, el criterio C1 varía en función del escenario climático considerado, al derivarse de los resultados de simulación energética presentados en el apartado 4.1.

Por este motivo, se construye una matriz de decisión específica para cada uno de los climas analizados. A modo de ejemplo, la Tabla 4-6 muestra la matriz de decisión correspondiente al escenario climático de Isla de Decepción.

Módulo	C1 Energía (kWh)	C2 U media (W/m ² K)	C3 Δ espesor (mm)	C4 Peso (kg/m ²)	C5 Coste (€)
Modelo base	6233	0,490	0,00	13,45	1735,61
Alternativa 1	6000	0,241	44,74	25,90	3578,91
Alternativa 2	6481	0,271	84,74	28,50	3029,47
Alternativa 3	5450	0,241	44,74	26,40	3633,45
Alternativa 4	5669	0,215	89,07	27,34	6626,78

Tabla 4-6 Matriz de decisión - Isla de Decepción

Esta matriz recoge los valores originales de cada criterio y constituye la base para el proceso de normalización, que permitirá transformar los indicadores a una escala adimensional común antes de aplicar el modelo de agregación.

El mismo procedimiento se aplica posteriormente a los restantes escenarios climáticos analizados, cuyas matrices de decisión completas se presentan en el Anexo IV: Matrices de decisión del análisis multicriterio.

4.2.2 Normalización de criterios

Dado que los criterios considerados presentan distintas unidades y órdenes de magnitud es necesario aplicar un proceso de normalización que permita transformar los valores originales a una escala adimensional común antes de aplicar el modelo de agregación.

La normalización se realiza mediante la expresión (17) definida en el apartado 3.11.3.

Este procedimiento permite transformar los indicadores a un rango comprendido entre 0 y 1, manteniendo la proporcionalidad entre alternativas. Dado que todos los criterios han sido definidos con objetivo de minimización, valores normalizados más bajos indican un mejor desempeño relativo.

A modo de ejemplo, la Tabla 4-7 muestra los valores normalizados correspondientes al escenario climático de Isla de Decepción.

Módulo	r1 Energía	r2 U media	r3 Espesor	r4 Peso	r5 Coste
Modelo base	0,962	1,000	0,000	0,472	0,262
Alternativa 1	0,926	0,491	0,502	0,909	0,540
Alternativa 2	1,000	0,553	0,951	1,000	0,457
Alternativa 3	0,841	0,491	0,502	0,926	0,548
Alternativa 4	0,875	0,439	1,000	0,960	1,000

Tabla 4-7 Criterios normalizados – Isla de Decepción

Estos valores constituyen la base para el cálculo del índice global de desempeño, que se obtiene mediante la aplicación del modelo de suma ponderada definido en el apartado metodológico.

El mismo procedimiento se aplica posteriormente al resto de escenarios climáticos considerados en el estudio, cuyos criterios normalizados se presentan en el Anexo V: Criterios normalizados del análisis multicriterio.

4.2.3 Cálculo del índice global de desempeño

Una vez obtenidos los valores normalizados de los criterios, se procede al cálculo del índice global de desempeño de cada alternativa mediante la aplicación del modelo de suma ponderada (WSM) utilizando la ecuación (18) descrita en el apartado 3.11.4.

Dado que todos los criterios han sido definidos con objetivo de minimización, valores menores de S_j indican un mejor desempeño global de la alternativa.

A partir de los valores normalizados de los criterios y de las ponderaciones definidas para cada escenario estratégico se calcula el índice global de desempeño para todas las alternativas constructivas analizadas.

La Tabla 4-8 muestra, a modo de ejemplo, los resultados obtenidos para el escenario climático de Isla de Decepción.

Módulo	S_j energético	S_j base	S_j logístico
Modelo base	0,801	0,764	0,705
Alternativa 1	0,799	0,764	0,755
Alternativa 2	0,876	0,852	0,851
Alternativa 3	0,751	0,725	0,725
Alternativa 4	0,837	0,820	0,830

Tabla 4-8 Índice global de desempeño - Isla de Decepción

Los resultados obtenidos permiten establecer un ranking de alternativas en función de su desempeño global en cada escenario de ponderación.

El mismo procedimiento se aplica al resto de escenarios climáticos considerados en el estudio, cuyos resultados completos se presentan en el Anexo VI: Cálculos del índice global de desempeño.

4.2.4 Ranking de alternativas por tipo de clima analizado

A partir de los valores del índice global de desempeño S_j obtenidos mediante el modelo WSM, se establece el ranking de alternativas para cada escenario climático y tipo de configuración de ponderación considerada. Dado que todos los criterios han sido definidos con objetivo de minimización, las alternativas con menor valor de S_j presentan un mejor desempeño global.

La Tabla 4-9 muestra, a modo de ejemplo, los resultados obtenidos para el escenario climático de Isla de Decepción.

El mismo procedimiento se aplica al resto de escenarios climáticos considerados en el estudio, cuyos resultados completos se presentan en el Anexo VII: Ranking de alternativas por escenario.

Escenario	1°	2°	3°	4°	5°
Prioridad energética	Alternativa 3	Alternativa 1	Modelo base	Alternativa 4	Alternativa 2
Configuración equilibrada	Alternativa 3	Alternativa 1	Modelo base	Alternativa 4	Alternativa 2
Prioridad logística	Modelo base	Alternativa 3	Alternativa 1	Alternativa 4	Alternativa 2

Tabla 4-9 Ranking de alternativas por escenario – Isla de Decepción

Los resultados muestran patrones diferenciados en función de la tipología climática. En los climas dominados por la demanda de calefacción (Isla de Decepción y Zaporíyia) la Alternativa 3 obtiene la mejor puntuación en los escenarios energético y equilibrado, mientras que el modelo base resulta más favorable cuando se priorizan criterios logísticos.

En el clima desértico cálido de Bagdad, donde la demanda energética está dominada por la refrigeración, el modelo base presenta el mejor desempeño en los tres escenarios de ponderación considerados. En el escenario equilibrado se observa una diferencia prácticamente nula entre el modelo base y la Alternativa 3, con valores de S_j coincidentes tras el redondeo. Esta situación refleja un comportamiento global muy similar entre ambas configuraciones bajo esta ponderación.

Por su parte, en el clima mediterráneo templado de Marjayún la Alternativa 3 obtiene la mejor puntuación global en los tres escenarios analizados, lo que indica un buen equilibrio entre rendimiento energético y características constructivas.

La Figura 4-10 muestra la alternativa que ocupa la primera posición del ranking para cada clima y escenario de ponderación considerado en el análisis multicriterio.

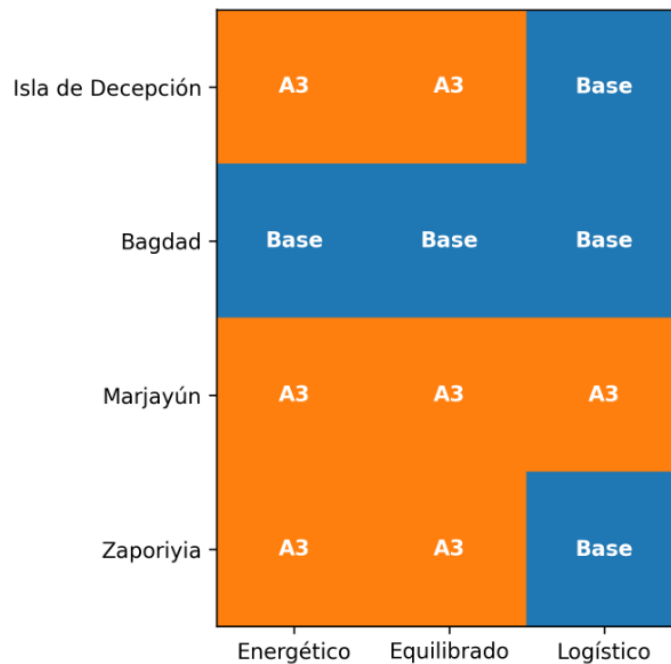


Figura 4-10 Alternativa óptima por clima y escenario de ponderación

En términos generales, la Alternativa 3 presenta el mejor comportamiento energético global en la mayoría de los climas analizados, mientras que el modelo base mantiene ventajas en escenarios donde predominan criterios logísticos o en climas dominados por la refrigeración.

4.3 Evaluación de los materiales y configuraciones constructivas

Las alternativas analizadas incorporan distintos materiales aislantes y configuraciones de cerramiento con propiedades térmicas y constructivas diferentes. El estudio de estas soluciones permite identificar los factores que influyen en el comportamiento térmico del módulo y su impacto sobre los criterios considerados en el análisis multicriterio.

En primer lugar, los materiales aislantes rígidos utilizados en paneles, como EPS, XPS o PIR, presentan buenas propiedades térmicas y una elevada facilidad de integración en sistemas prefabricados. Sin embargo, su comportamiento frente a infiltraciones depende en gran medida de la continuidad del sistema constructivo y del correcto sellado de las juntas entre paneles. En cerramientos ligeros prefabricados estas discontinuidades pueden favorecer la aparición de infiltraciones de aire, reduciendo parcialmente la eficacia del aislamiento térmico.

Por el contrario, la espuma de poliuretano proyectado (ccSPF) utilizada en la Alternativa 3 genera una capa continua adherida a la estructura metálica, lo que le permite actuar simultáneamente como aislante térmico y barrera de aire, característica que ha sido documentada como una de sus principales ventajas en cerramientos de estructura metálica [49].

Por otra parte, algunas configuraciones constructivas con altos niveles de aislamiento, como la empleada en la Alternativa 4, se basan en sistemas multicapa habituales en edificación convencional. Aunque este tipo de cerramientos permite reducir la transmitancia térmica del sistema, también implica un aumento significativo del espesor total y del peso superficial del cerramiento. En el contexto de módulos prefabricados transportables, estas características pueden suponer una penalización importante desde el punto de vista logístico, ya que incrementan las necesidades de transporte, manipulación y montaje.

La lana mineral presenta una conductividad térmica superior a la del EPS del modelo base (0,040 frente a 0,035 W/m·K), y su mayor densidad incrementa la masa térmica del cerramiento, lo que en

climas fríos puede generar desfases térmicos que aumentan la demanda de calefacción. El mayor espesor empleado no compensa suficientemente estas características.

La Tabla 4-10 resume las principales ventajas e inconvenientes de los materiales aislantes empleados en las alternativas analizadas.

Aislante	Ventaja principal	Limitación principal
EPS	Bajo coste y baja densidad	Conductividad térmica mayor que otros aislantes
XPS	Buena resistencia mecánica y baja absorción de agua	Mayor densidad que el EPS
PIR	Muy baja conductividad térmica	Coste elevado
Lana mineral	Buen comportamiento frente al fuego	Mayor espesor necesario para aislar
ccSPF	Formación de capa continua que mejora la estanqueidad	Coste elevado

Tabla 4-10 Ventajas e inconvenientes de los aislantes utilizados

Estas observaciones ponen de manifiesto que la elección del material aislante no debe basarse únicamente en su conductividad térmica, sino también en su influencia sobre el espesor, el peso y el coste del sistema constructivo.

El análisis de las configuraciones constructivas estudiadas muestra que el comportamiento energético del módulo depende tanto de las propiedades térmicas del material aislante como de la continuidad del sistema constructivo y del control de infiltraciones de aire. Asimismo, las soluciones con mayores espesores de aislamiento pueden generar penalizaciones en criterios logísticos relevantes para sistemas modulares transportables.

Estas observaciones sirven como base para plantear estrategias de mejora en el diseño de los cerramientos, orientadas a equilibrar el comportamiento térmico del módulo con los condicionantes de espesor, peso y coste propios de este tipo de infraestructuras prefabricadas.

4.4 Optimización del módulo

A partir de los resultados obtenidos en el análisis energético y multicriterio de los módulos estudiados se plantea una fase final de optimización de la envolvente con el objetivo de identificar una configuración de la envolvente que maximice el rendimiento global del sistema. Esta optimización se centra en la selección y el espesor de los materiales aislantes, manteniendo constantes las capas estructurales.

El proceso se desarrolla en cuatro etapas. En primer lugar, se define la configuración constructiva del módulo optimizado, estableciendo la composición de paredes, cubierta y suelo. A continuación se calculan los criterios de evaluación del análisis multicriterio. Posteriormente se realiza la simulación energética del modelo para los cuatro climas analizados. Finalmente se evalúa la posición del módulo optimizado en el ranking global en comparación con el resto de las alternativas.

4.4.1 Construcción del módulo optimizado

La configuración constructiva del módulo optimizado se define a partir de los resultados obtenidos en el análisis multicriterio, seleccionando los materiales y espesores que proporcionan el mejor equilibrio entre comportamiento energético, incremento de espesor, peso y coste. En todos los

cerramientos se mantiene la estructura constructiva empleada en las alternativas 1, 2 y 3 -compuesta por chapa de acero galvanizado exterior, tablero OSB y acabado interior de yeso laminado-, modificándose únicamente el tipo y espesor del aislamiento.

La solución adoptada combina espuma de poliuretano proyectado de celda cerrada (ccSPF) y paneles de poliisocianurato (PIR). La capa de ccSPF se aplica directamente sobre la chapa metálica, formando una barrera continua adherida que mejora la estanqueidad al aire del cerramiento y reduce las infiltraciones, manteniendo las del apartado 3.9.3. Sobre esta capa se dispone el aislamiento principal mediante paneles de PIR, material que presenta una baja conductividad térmica y permite alcanzar elevados valores de resistencia térmica con espesores moderados, lo que resulta favorable dentro del análisis multicriterio. La solución constructiva se observa en la Tabla 4-11.

Se adopta una estrategia de diseño diferenciada según el tipo de cerramiento. En paredes y cubierta, donde el intercambio térmico con el exterior es más intenso y continuo, se emplean espesores mayores de PIR para limitar las pérdidas térmicas. En el suelo, sin embargo, el módulo se apoya directamente sobre el terreno, cuya temperatura presenta una variación significativamente menor que la del aire exterior. Esta mayor estabilidad térmica reduce el gradiente de temperatura a través del cerramiento, por lo que no se justifica un nivel de aislamiento equivalente al de paredes y cubierta. En este elemento se mantiene un espesor reducido de aislamiento para no penalizar en exceso la transmitancia media de la envolvente.

Cerramiento	Material	Espesor (mm)	Espesor total del cerramiento (mm)
Pared	Acero galvanizado	0,5	132,5
	ccSPF	15	
	PIR	85	
	Tablero OSB	19	
	Yeso laminado	13	
Cubierta	Acero galvanizado	0,5	147,5
	ccSPF	15	
	PIR	100	
	Tablero OSB	19	
	Yeso laminado	13	
Suelo	Acero galvanizado	0,5	54,5
	ccSPF	15	
	PIR	20	
	Tablero OSB	19	

Tabla 4-11 Configuración constructiva del módulo optimizado

4.4.2 Resultados energéticos del módulo optimizado

La simulación energética del módulo optimizado se ha realizado siguiendo la misma metodología descrita en el capítulo 3, utilizando OpenStudio como entorno de modelado y EnergyPlus como motor

de cálculo. Se emplean los mismos archivos climáticos EPW, perfiles de ocupación, consignas térmicas y sistema de cargas ideales definidos para el resto de las alternativas, garantizando así la comparabilidad de los resultados. De este modo, las diferencias observadas en el consumo energético anual son atribuibles exclusivamente a la nueva configuración de la envolvente definida en el apartado anterior.

El módulo optimizado obtiene la menor demanda energética en los cuatro escenarios climáticos considerados. Las mayores reducciones respecto al modelo base se registran en los climas que requieren mayor peso de calefacción -Marjayún (-25,2 %), Zaporiyia (-16,1 %) e Isla de Decepción (-15,1 %)-, donde la combinación de ccSPF y PIR y la reducción de infiltraciones tiene un efecto más pronunciado sobre las pérdidas térmicas. En Bagdad donde la demanda está dominada por la refrigeración, la mejora es más moderada (-9,7 %), resultado coherente con el menor impacto que tiene el aislamiento de la envolvente frente a las ganancias solares en climas desérticos cálidos.

Este comportamiento confirma que, en climas cálidos dominados por cargas de refrigeración, la mejora de la envolvente térmica presenta un impacto más limitado sobre la demanda energética en comparación con climas donde predominan las pérdidas térmicas.

Los resultados obtenidos, junto con los del resto de alternativas, se presentan en la Tabla 4-12.

Localización	Base (kWh)	A1 (kWh)	A2 (kWh)	A3 (kWh)	A4 (kWh)	Optimizado (kWh)
Isla Decepción	6233	6000	6481	5450	5669	5289
Bagdad	2217	2222	2389	2161	2144	2003
Marjayún	1061	897	1011	845	881	794
Zaporiyia	2986	2833	3083	2606	2697	2506

Tabla 4-12 Consumo energético anual por clima y alternativa

En consecuencia, el módulo optimizado constituye la configuración con mejor comportamiento energético en todos los escenarios analizados y será empleado como referencia en el posterior análisis multicriterio.

4.4.3 Evaluación multicriterio del módulo optimizado

El procedimiento aplicado al módulo optimizado es idéntico al descrito en el apartado 4.2, por lo que no se repite su desarrollo.

Los criterios C2 a C5 son independientes del clima (Tabla 4-13), al depender exclusivamente de la configuración constructiva del módulo, mientras que el criterio C1 (demanda energética anual, Tabla 4-12) varía en función del escenario climático considerado.

Módulo	C2 U media (W/m ² K)	C3 Δ espesor (mm)	C4 Peso (kg/m ²)	C5 Coste (€)
Optimizado	0,295	34,62	25,67	3392,37

Tabla 4-13 Valores del segundo al quinto criterio del módulo optimizado

Aplicando el proceso de normalización y el modelo de suma ponderada (WSM) definidos en los apartados 3.11.3 y 3.11.4, se calcula el índice global de desempeño S_j para cada alternativa y escenario de ponderación. A partir de estos valores se obtiene el ranking de desempeño de cada solución constructiva.

La Tabla 4-14 recoge la posición obtenida por el módulo optimizado en los distintos escenarios de ponderación para los cuatro climas analizados.

Localización	Energético	Base	Logístico
Isla Decepción	1º	1º	2º
Bagdad	1º	1º	2º
Marjayún	1º	1º	1º
Zaporiyia	1º	1º	2º

Tabla 4-14 Posición del módulo optimizado por clima y escenario según análisis multicriterio

Los resultados obtenidos se analizan de forma conjunta en el siguiente apartado, donde se discute el comportamiento del módulo optimizado y su posición relativa respecto al resto de alternativas.

4.4.4 Posición del módulo optimizado en el ranking

Los resultados del análisis multicriterio muestran que el módulo optimizado obtiene la primera posición en los escenarios energético y base en los cuatro climas analizados, lo que confirma que la configuración propuesta logra el mejor equilibrio entre consumo energético, transmitancia térmica, incremento de espesor, peso y coste dentro del conjunto de alternativas estudiadas.

La Figura 4-11 resume la alternativa con mejor desempeño en cada clima y escenario de ponderación, permitiendo visualizar de forma sintética el resultado del proceso de optimización.

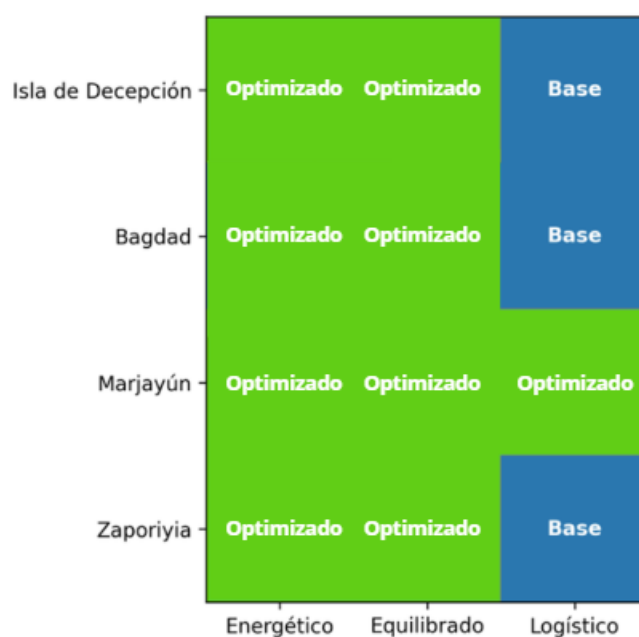


Figura 4-11 Alternativa óptima por clima y escenario de ponderación

Este resultado se debe principalmente a la reducción del consumo energético observada en todos los escenarios climáticos, combinada con un incremento moderado de espesor, peso y coste respecto al modelo base. La combinación de ccSPF y PIR, junto con la diferenciación de espesores entre cerramientos, permite mejorar el comportamiento térmico de la envolvente sin introducir penalizaciones excesivas en los criterios logísticos.

En el escenario logístico, el modelo base mantiene la primera posición en tres de los cuatro climas estudiados debido a su menor espesor, peso y coste. No obstante, el módulo optimizado se sitúa en segunda posición en estos casos y primera en Marjayún, lo que indica que la mejora energética obtenida se alcanza con un impacto logístico relativamente reducido.

La Alternativa 3 se mantiene como la segunda mejor solución en los escenarios energético y equilibrado en la mayoría de los climas, mientras que la Alternativa 2 ocupa sistemáticamente la última posición en todos los climas y escenarios, resultado atribuible a su mayor espesor y peso sin una ventaja energética proporcional.

Los resultados muestran que el módulo optimizado constituye la solución con mejor desempeño global dentro del espacio de alternativas analizado, al combinar una mejora significativa del comportamiento energético con unas penalizaciones moderadas en espesor, peso y coste. Por este motivo se considera que la configuración propuesta constituye la solución de mejor desempeño global dentro del conjunto de alternativas analizado.

En este sentido, los resultados obtenidos son especialmente relevantes en el contexto de las bases militares desplegadas en zonas de operaciones, donde la reducción de la demanda energética de los módulos habitables se traduce directamente en una menor dependencia de los convoyes logísticos de suministro de combustible y, por tanto, en la mayoría de los despliegues, en una reducción del riesgo operativo asociado a su protección. La configuración propuesta demuestra que es posible mejorar de forma significativa el comportamiento energético de estos módulos sin comprometer condicionantes como la transportabilidad y despliegue.

5 CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

5.1 Conclusiones

El presente trabajo ha desarrollado una metodología integrada de simulación energética dinámica y análisis multicriterio aplicada a un módulo prefabricado militar basado en contenedor ISO de 20 pies, evaluado en cuatro escenarios climáticos dispares representativos de misiones exteriores españolas: Isla de Decepción (polar), Bagdad (desértico cálido), Marjayún (mediterráneo templado) y Zaporiyia (continental).

A partir de los resultados obtenidos se extraen las siguientes conclusiones:

El clima condiciona de manera determinante el comportamiento térmico del módulo, tanto en términos de magnitud de la demanda como de su distribución estacional. La demanda más elevada corresponde al escenario polar de Isla de Decepción (6.234 kWh en el modelo base), dominada en su totalidad por calefacción, mientras que Marjayún presenta la menor demanda global (1.061 kWh), con un carácter mixto estacional. En Bagdad la refrigeración representa aproximadamente el 85 % del consumo anual, mientras que en Zaporiyia la calefacción supone cerca del 90 % del total.

La mejora de la envolvente térmica produce reducciones significativas de la demanda energética en todos los climas analizados, siendo especialmente relevante en los escenarios dominados por calefacción. Las reducciones energéticas más pronunciadas se obtienen en Marjayún (-20,4 % con la Alternativa 3) y en Zaporiyia e Isla de Decepción (-12,7 % y -12,6 %, respectivamente), mientras que en Bagdad la mejora es más moderada (-3,2 % con la Alternativa 4), lo que confirma el menor impacto del aislamiento frente a cargas de refrigeración en climas desérticos.

El poliuretano proyectado de celda cerrada (ccSPF), empleado en la Alternativa 3, ha demostrado el mejor comportamiento energético global en tres de los cuatro climas analizados, gracias a su doble función como aislante térmico y barrera de aire continua, que reduce simultáneamente las pérdidas por transmisión y por infiltraciones. En el clima desértico de Bagdad, sin embargo, la Alternativa 4 con aislamiento exterior de XPS ha resultado energéticamente más favorable, al limitar con mayor eficacia las ganancias térmicas estivales.

El análisis multicriterio mediante el modelo de suma ponderada ha permitido integrar criterios energéticos, constructivos, logísticos y económicos en un índice global de desempeño, poniendo de manifiesto que la solución óptima depende tanto del clima de despliegue como del enfoque estratégico adoptado. En los escenarios de prioridad energética y configuración equilibrada, la Alternativa 3 y el módulo optimizado lideran el ranking en la mayoría de los climas. En el escenario de prioridad logística, el modelo base mantiene ventajas derivadas de su menor espesor, peso y coste.

El módulo optimizado, basado en la combinación de ccSPF y PIR con espesores diferenciados según el tipo de cerramiento, ha obtenido la primera posición en los escenarios energético y equilibrado en los cuatro climas analizados. Las reducciones de demanda respecto al modelo base alcanzan el 25,2 % en Marjayún, el 16,1 % en Zaporíyia, el 15,1 % en Isla de Decepción y el 9,7 % en Bagdad, con incrementos moderados de espesor, peso y coste que no comprometen de forma significativa la viabilidad logística del sistema.

En términos operativos la reducción de la demanda energética del módulo se traduce directamente en una menor dependencia del suministro de combustible en misiones exteriores, con el consiguiente impacto positivo sobre la autonomía logística y la seguridad de los convoyes de abastecimiento.

El modelo de análisis multicriterio desarrollado ha demostrado ser una herramienta eficaz para integrar simultáneamente variables de naturaleza heterogénea en un índice global de desempeño, y su estructura es directamente extrapolable a otras tipologías de módulos prefabricados, otros escenarios climáticos o distintas configuraciones de criterios y ponderaciones. La lana mineral (Alternativa 2) ha presentado el peor comportamiento energético en todos los climas analizados, sin compensar su mayor espesor y peso con una ventaja térmica proporcional, lo que la sitúa sistemáticamente en la última posición del ranking. Cabe señalar, no obstante, que su comportamiento frente al fuego, superior al de los otros aislantes, constituye una ventaja relevante en infraestructuras militares que el modelo de evaluación utilizado no recoge explícitamente, lo que representa una limitación del análisis a considerar en aplicaciones reales.

Los resultados obtenidos confirman que la optimización de la envolvente térmica, junto con la aplicación de herramientas de análisis multicriterio, permite abordar de forma integrada el diseño de módulos prefabricados en entornos operativos complejos. La metodología desarrollada proporciona un marco de evaluación reproducible y adaptable, que puede emplearse como apoyo a la toma de decisiones en el diseño y despliegue de infraestructuras temporales en distintos contextos climáticos.

5.2 Líneas futuras

Los resultados obtenidos en este trabajo abren diversas líneas de investigación que podrían desarrollarse en futuros trabajos de fin de grado:

Incorporación de energías renovables al módulo: el presente trabajo se ha centrado en la reducción de la demanda energética mediante la mejora de la envolvente. Una línea natural de continuación consistiría en evaluar la integración de sistemas de generación fotovoltaica o solar térmica en el módulo, cuantificando la fracción de demanda cubierta por energía renovable en cada clima y el impacto sobre la autonomía energética de la base desplegada.

Análisis de módulos agrupados: el módulo ha sido modelizado como una unidad térmica independiente. Sin embargo, en las bases desplegadas los módulos suelen disponerse en configuraciones agrupadas o adosadas. Un trabajo futuro podría estudiar el efecto de la agrupación modular sobre la demanda energética, evaluando la reducción de pérdidas térmicas por los cerramientos en contacto y su influencia en los criterios del análisis multicriterio.

Dimensionamiento y selección del sistema de climatización: el presente trabajo ha utilizado el modelo de cargas ideales (*Ideal Air Loads*) para cuantificar la demanda térmica del módulo, sin considerar un sistema de climatización real. Una línea futura de interés práctico consistiría en dimensionar y seleccionar el equipo de climatización más adecuado para cada escenario climático, evaluando diferentes tecnologías (bombas de calor, sistemas de ventilación con recuperación de calor) y sus rendimientos reales, lo que permitiría obtener el consumo eléctrico efectivo del sistema y no solo la demanda térmica del edificio.

Evaluación experimental de infiltraciones: los valores de infiltración adoptados en la simulación se han definido a partir de hipótesis basadas en la tipología constructiva del módulo. Una línea futura podría abordar la caracterización experimental de la permeabilidad al aire de módulos prefabricados

militares reales mediante ensayos de presurización (*blower door*), permitiendo ajustar los modelos de simulación a datos medidos y reducir la incertidumbre asociada a este parámetro.

Extensión del análisis multicriterio a nuevos criterios y métodos de agregación: el modelo MCDA desarrollado en este trabajo se ha basado en el método de suma ponderada (WSM) con cinco criterios cuantitativos. Una línea futura podría ampliar el modelo incorporando criterios adicionales como la huella de carbono de los materiales, la facilidad de montaje en condiciones operativas adversas o la resistencia frente a impactos y agentes químicos, propios del entorno militar. Asimismo, podría evaluarse la aplicación de métodos de decisión multicriterio alternativos, como TOPSIS, comparando la estabilidad de los rankings obtenidos con distintas metodologías de agregación.

6 BIBLIOGRAFÍA

- [1] B. Rodríguez Soria, M. Á. García García y A. Rezeau, «MÓDULOS HABITABLES DE CONSUMO DE ENERGÍA CASI NULO PARA BASES MILITARES EN ENTORNOS NATO,» Centro Universitario de la Defensa de Zaragoza, Zaragoza, 2023.
- [2] M. Zohourian, A. Pamidimukkala, S. Kermanshachi and D. Almaskati, "Modular Construction: A Comprehensive Review," MDPI, Arlington, 2025.
- [3] J. C. Sánchez González, «CONSTRUCCIÓN MODULAR LIGERA ENERGÉTICAMENTE EFICIENTE,» UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID, Madrid, 2016.
- [4] P. Dvořák y J. Štoller, «Energy Efficiency in Military Camps,» University of Defence, Faculty of Military Technologies, Kounicova, Brno, 2022.
- [5] J. Pérez-Valcárcel, S. Muñiz, E. Mosquera, M. Freire-Tellado, J. Aragón y A. Corral, «Modular temporary housing for situations of humanitarian catastrophe,» Journal of Architectural, La Coruña, 2021.
- [6] E. Arce Fariña, L. Febrero Garrido, F. Troncoso Pastoriza, A. Suárez García y G. Mora Liroa, «Análisis de consumos energéticos de aislantes tradicionales y materiales de cambio de fase aplicados a contenedores marítimos para despliegues militares,» Universidad de Vigo, Vigo, 2019.
- [7] A. Ramos, «elDiario,» 21 Mayo 2023. [En línea]. Available: https://www.eldiario.es/canariasahora/politica/cabildo-palma-visocan-ultiman-convenio-adquirir-vivienda-prottegida-destinada-afectados-volcan_1_10224316.html. [Último acceso: 13 Enero 2026].
- [8] D. G. d. A. y. Material, «Estrategia de Tecnología e Innovación para la Defensa ETID,» MINISTERIO DE DEFENSA, Madrid, 2020.
- [9] R. Pudduck, J. Goodwin y R. Burstn, «NATO Industrial Advisory Group (NIAG) Mission Modularity Studies,» Conference Proceedings of INEC, 2020.
- [10] «Ministerio de Defensa,» Gobierno de España, Enero 2026. [En línea]. Available: https://www.defensa.gob.es/misiones/en_exterior/. [Último acceso: 14 Enero 2026].

- [11] «Operaciones en el exterior,» Ministerio de defensa, 2026. [En línea]. Available: <https://emad.defensa.gob.es/operaciones/operaciones-en-el-exterior/>. [Último acceso: 20 Enero 2026].
- [12] «Ejército de Tierra,» Ministerio de Defensa, [En línea]. Available: <https://ejercito.defensa.gob.es/unidades/Antartica/basegabrieldecastilla/index.html>. [Último acceso: 14 Enero 2026].
- [13] «La Moncloa,» Gobierno de España, 6 Enero 2026. [En línea]. Available: <https://www.lamoncloa.gob.es/presidente/actividades/Paginas/2026/060126-sanchez-coalicion-voluntarios-ucrania.aspx>. [Último acceso: 14 Enero 2026].
- [14] «Arcgis,» [En línea]. Available: <https://www.arcgis.com/apps/mapviewer/index.html?layers=1e468410784c4b9a81f43af7f0f9b133>. [Último acceso: 15 Enero 2026].
- [15] «DatosMundial,» [En línea]. Available: <https://www.datosmundial.com/comparacion-climatica.php?r1=letonia&r2=lituania>. [Último acceso: 15 Enero 2026].
- [16] «Climate Data,» [En línea]. Available: <https://es.climate-data.org/europa/letonia/vidzeme/riga-372/>. [Último acceso: 15 Enero 2026].
- [17] «Climate Data,» [En línea]. Available: <https://es.climate-data.org/europa/eslovaquia/region-of-banska-bystrica-1481/>. [Último acceso: 15 Enero 2026].
- [18] «Climate Data,» [En línea]. Available: <https://es.climate-data.org/europa/rumania/brasov-531/>. [Último acceso: 15 Enero 2026].
- [19] «DatosMundial,» [En línea]. Available: <https://www.datosmundial.com/comparacion-climatica.php?r1=eslovaquia&r2=ro-transilvania>. [Último acceso: 15 Enero 2026].
- [20] «Climate Data,» [En línea]. Available: <https://es.climate-data.org/europa/ucrania-231/>. [Último acceso: 15 Enero 2026].
- [21] «Climate Data,» [En línea]. Available: <https://es.climate-data.org/asia/libano/qada-bint-jubayl/nabatiye-el-faouqa-418023/>. [Último acceso: 15 Enero 2026].
- [22] «Climate Data,» [En línea]. Available: <https://es.climate-data.org/asia/turquia/adana/adana-239/>. [Último acceso: 15 Enero 2026].
- [23] «WMO Climatological Normals,» [En línea]. Available: <https://community.wmo.int/site/knowledge-hub/programmes-and-initiatives/climate-services/wmo-climatological-normals>. [Último acceso: 15 Enero 2026].
- [24] «Climate Data,» [En línea]. Available: <https://es.climate-data.org/africa/republica-centroafricana/ombella-m-poko/bangui-509/>. [Último acceso: 15 Enero 2026].
- [25] «Climate Data,» [En línea]. Available: <https://es.climate-data.org/africa/mozambique/cabo-delgado-1739/>. [Último acceso: 15 Enero 2026].
- [26] «Region WMO Normals,» [En línea]. Available: <https://www.nci.noaa.gov/data/oceans/archive/arc0216/0253808/6.6/data/0-data/Region-1-WMO-Normals-9120/>. [Último acceso: 15 Enero 2026].

- [27] «DatosMundial,» [En línea]. Available: <https://www.datosmundial.com/comparacion-climatica.php?r1=iq-mayorality-of-baghdad&r2=so-banaadir>. [Último acceso: 15 Enero 2026].
- [28] «Climate Data,» [En línea]. Available: <https://es.climate-data.org/asia/irak/baghdad/bagdad-86/>. [Último acceso: 15 Enero 2026].
- [29] «Climate Data,» [En línea]. Available: <https://es.climate-data.org/africa/somalia/banadir/mogadiscio-856/>. [Último acceso: 15 Enero 2026].
- [30] «Climate Data,» [En línea]. Available: <https://es.climate-data.org/europa/islandia/keflavik/keflavik-880472/>. [Último acceso: 15 Enero 2026].
- [31] «National Centers for Environmental Information,» NOAA, [En línea]. Available: <https://www.ncei.noaa.gov/products/wmo-climate-normals>. [Último acceso: 15 Enero 2026].
- [32] «OceanWide Expeditions,» [En línea]. Available: <https://oceanwide-expeditions.com/es/pf/como-es-el-clima-en-antartida>. [Último acceso: 15 Enero 2026].
- [33] «Deception Island,» Antarctic Specially Managed Area, [En línea]. Available: https://www.deceptionisland.aq/climate.php?utm_source=copilot.com. [Último acceso: 15 Enero 2026].
- [34] «weather and climate,» [En línea]. Available: <https://www.weatherandclimate.info/history/88938#close>. [Último acceso: 15 Enero 2026].
- [35] C. Ulloa, M. E. Arce, G. Rey, J. L. Míguez y J. Hernández, «Recycling COR-TEN® Sea Containers into Service Modules for Military Applications: Thermal Analysis,» MDPI, Marín, 2017.
- [36] M. E. Ghada, «Thermal Performance Assessment of Shipping Container Architecture in Hot and Humid Climates,» International Journal on Advanced Science Engineering Information Technology, Port Said, 2017.
- [37] ASHRAE, ASHRAE Handbook-Fundamentals, Atlanta: ASHRAE, 2017.
- [38] P. Marin, . M. Saffari, . A. de Gracia, X. Zhu, M. M. Farid, . L. F. Cabeza y . S. Ushak, «Energy savings due to the use of PCM for relocatable lightweight buildings passive heating and cooling in different weather conditions,» Elsevier, Lérida, 2016.
- [39] A. Gasparella y G. Pernigotto, «Comparison Of Quasi-Steady State And Dynamic Simulation Approaches For The Calculation Of Building Energy Needs: Thermal Losses,» International High Performance Buildings Conference, Purdue, 2012.
- [40] «EnergyPlus,» [En línea]. Available: <https://energyplus.net/>. [Último acceso: 2 Febrero 2026].
- [41] «TRNSYS,» [En línea]. Available: <https://www.trnsys.com/>. [Último acceso: 2 Febrero 2026].
- [42] M. Gea , A. Hernández y G. Lesino , «SIMULACIÓN ENERGÉTICA DE EDIFICIOS CON ESP-r,» Instituto de Investigación en Energías No Convencionales, Salta, 2003.
- [43] D. Souleymane y C. Ghiaus, «Multi-Criteria Decision Analysis for Energy Retrofit of Residential Buildings: Methodology and Feedback from Real Application,» MDPI, Lyon, 2023.

- [44] S. K. Sahoo, D. Pamucar y S. . S. Goswami, «A Review of Multi-Criteria Decision-Making Applications to Solve Energy Management Problems From 2010-2025: Current State and Future Research,» SDMA, Odisha, 2025.
- [45] K. Theilig, M. Vollmer, W. Lang y J. Albus, «Multi-Criteria Decision-Making For Energy Building Renovation Comparing Exterior Wall Structures With The AHP, ANP, Utility Analysis, and TOPSIS,» ElSevier, Munich, 2025.
- [46] A. Kaklauskas y E. K. Zavadskas, «Multiple criteria analysis of the life cycle of the built environment,» TECHNIKA, Vilna, 2015.
- [47] J. C. Fortes Garrido, Á. Rodríguez, J. A. Hernández Torres y C. Gutierrez, «Comparative Analysis of Water Extraction Mechanism in Roman Mines,» Foundations of Science, 2023.
- [48] «EPW map,» [En línea]. Available: <https://www.ladybug.tools/epwmap/#close>. [Último acceso: 12 Febrero 2026].
- [49] M. Knowles, «Spray Polyurethane Foam in Metal Buildings,» 2011.
- [50] ITeC, «BEDEC - Banco Construcción 2024-06,» [En línea]. Available: <https://metabase.itec.cat/vid/e/es/bedec/itec>. [Último acceso: 4 Marzo 2026].

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

El presente trabajo aborda la optimización energética de módulos prefabricados de uso militar. Dado que sus resultados tienen impacto directo sobre el consumo de combustible, la huella ambiental y la seguridad del personal desplegado, la incorporación de criterios sociales, económicos y ambientales no solo es pertinente, sino que constituye uno de los ejes centrales del análisis.

Criterios ambientales

La reducción de la demanda energética de los módulos habitables se traduce directamente en una menor quema de combustible diésel y, por tanto, en una disminución de emisiones de CO₂. La energía eléctrica consumida en las bases desplegadas se genera casi exclusivamente mediante grupos electrógenos diésel, cuyo factor de emisión se sitúa aproximadamente en el rango de 0,70-0,75 kg de CO₂ por kWh generado, valor sensiblemente superior al de las redes eléctricas convencionales. Cada kWh que se deja de consumir equivale a evitar la emisión de aproximadamente 0,72 kg de CO₂.

Los resultados obtenidos muestran reducciones de la demanda de hasta el 25,2 % en el clima mediterráneo, el 16,1 % en el continental, el 15,1 % en el polar y el 9,7 % en el desértico. Considerando una base con 730 contenedores y un consumo estimado de 15.000 litros de combustible por unidad y año -destinado en un 80 % a climatización-, una reducción media del 15 % equivaldría a un ahorro aproximado de 1,3 millones de litros de diésel anuales, lo que representa en torno a 3.500 toneladas de CO₂. Todo ello es coherente con los objetivos de descarbonización de la ETID 2020.

Criterios económicos

El coste estimado de los materiales de la envolvente se incorpora explícitamente como criterio C5 del análisis multicriterio. Los resultados muestran que el módulo optimizado logra mejoras energéticas significativas con un sobre coste moderado respecto al modelo base, lo que favorece su viabilidad en despliegues donde se requieren múltiples unidades. Además, la reducción del consumo de combustible implica un menor gasto operativo en aprovisionamiento logístico, aspecto de gran relevancia en misiones donde el suministro depende de largos y costosos convoyes.

Criterios sociales

La dependencia energética de combustible diésel en bases militares desplegadas no solo supone un coste económico y ambiental, sino también un riesgo directo para el personal. En el conflicto de Afganistán se documentó una correlación entre el volumen de combustible consumido y el número de bajas derivadas de ataques a los convoyes de suministro. La mejora de la eficiencia energética de los módulos reduce esta dependencia logística y, con ello, la exposición al riesgo del personal encargado de proteger dichos convoyes. Así, la mejora de la envolvente térmica confluye en una solución que es simultáneamente más sostenible, más económica y segura.

ANEXO II: REFLEXIONES ÉTICAS Y SOCIALES

El presente trabajo plantea la optimización de infraestructuras temporales destinadas al personal militar desplegado en misiones exteriores, lo que conlleva implicaciones éticas y sociales que merecen una reflexión explícita.

Dignidad y bienestar del personal desplegado

Las condiciones de habitabilidad en una misión exterior tienen un impacto directo sobre la salud física y el bienestar psicológico de los militares desplegados. Garantizar un confort térmico adecuado en entornos climáticos extremos -ya sean las temperaturas bajo cero de la Isla de Decepción o el calor desértico de Bagdad- no es una cuestión de comodidad accesoria, sino una condición necesaria para el rendimiento operativo y para preservar la dignidad de quienes sirven en condiciones de especial exigencia. Este trabajo contribuye a ese objetivo mediante la identificación de soluciones constructivas más eficientes.

Seguridad operativa y responsabilidad ética

La reducción del consumo de combustible tiene consecuencias éticas que van más allá del ahorro económico. Como se documenta en el apartado 1.1, en Afganistán existía una correlación directa entre el volumen de combustible consumido en las bases y el número de bajas producidas en los convoyes de suministro. Optimizar la envolvente térmica de los módulos no es, por tanto, una decisión puramente técnica: es una decisión que puede salvar vidas. Esta dimensión ética refuerza la responsabilidad del ingeniero en el diseño de infraestructuras militares y justifica la dedicación de recursos a su mejora.

Uso dual de la tecnología y transferencia civil

Las soluciones constructivas analizadas en este trabajo son aplicables no solo al ámbito militar, sino también a la respuesta ante emergencias humanitarias -como se ilustra en el estado del arte con los módulos desplegados tras la erupción del volcán de La Palma- y a la vivienda transitoria en contextos de desastre natural o desplazamiento forzado. La metodología desarrollada, basada en simulación dinámica y análisis multicriterio, puede ser empleada por organizaciones humanitarias, administraciones públicas e ingenieros civiles para mejorar las condiciones de habitabilidad de poblaciones vulnerables en situaciones de crisis.

Neutralidad metodológica y transparencia

El análisis multicriterio desarrollado incorpora criterios de ponderación ajustables según el contexto operativo, lo que permite adaptarlo a diferentes valores y prioridades sin imponer una única solución. Esta transparencia metodológica permite que los responsables de la toma de decisiones -tanto militares como civiles- puedan evaluar las implicaciones de cada opción constructiva de forma informada, asumiendo conscientemente los compromisos entre eficiencia energética, coste y viabilidad logística. En un contexto donde las decisiones afectan a la seguridad de personas y a recursos públicos, garantizar que el proceso de evaluación sea replicable y auditable es en sí mismo un imperativo ético.

ANEXO III: USO RESPONSABLE DE LA IA

En la elaboración de la presente memoria se ha empleado inteligencia artificial como herramienta de apoyo a la redacción. Su uso se ha limitado a la mejora de la claridad expositiva, corrección gramatical y reformulación de textos previamente elaborados por el autor. En ningún caso la inteligencia artificial ha sido utilizada para generar contenido técnico original, desarrollar el análisis ni obtener resultados del trabajo.

Todas las decisiones técnicas, el planteamiento metodológico, la interpretación de los resultados y las conclusiones presentadas son responsabilidad exclusiva del autor.

ANEXO IV: MATRICES DE DECISIÓN DEL ANÁLISIS MULTICRITERIO

En este anexo se presentan las matrices de decisión correspondientes a los restantes escenarios climáticos analizados. Estas matrices contienen los valores originales de los cinco criterios considerados y constituyen la base para el proceso de normalización y cálculo del índice global de desempeño descrito en el apartado 4.2.1.

Módulo	C1 Energía (kWh)	C2 U media (W/m ² K)	C3 Δ espesor (mm)	C4 Peso (kg/m ²)	C5 Coste (€)
Modelo base	2217	0,490	0,00	13,45	1735,61
Alternativa 1	2222	0,241	44,74	25,90	3578,91
Alternativa 2	2389	0,271	84,74	28,50	3029,47
Alternativa 3	2161	0,241	44,74	26,40	3633,45
Alternativa 4	2144	0,215	89,07	27,34	6626,78

Tabla A4-1 Matriz de decisión – Bagdad

Módulo	C1 Energía (kWh)	C2 U media (W/m ² K)	C3 Δ espesor (mm)	C4 Peso (kg/m ²)	C5 Coste (€)
Modelo base	1061	0,490	0,00	13,45	1735,61
Alternativa 1	897	0,241	44,74	25,90	3578,91
Alternativa 2	1011	0,271	84,74	28,50	3029,47
Alternativa 3	844	0,241	44,74	26,40	3633,45
Alternativa 4	881	0,215	89,07	27,34	6626,78

Tabla A4-2 Matriz de decisión – Marjayún

Módulo	C1 Energía (kWh)	C2 U media (W/m ² K)	C3 Δ espesor (mm)	C4 Peso (kg/m ²)	C5 Coste (€)
Modelo base	2986	0,490	0,00	13,45	1735,61
Alternativa 1	2833	0,241	44,74	25,90	3578,91
Alternativa 2	3083	0,271	84,74	28,50	3029,47
Alternativa 3	2606	0,241	44,74	26,40	3633,45
Alternativa 4	2697	0,215	89,07	27,34	6626,78

Tabla A4-3 Matriz de decisión – Zaporíyia

ANEXO V: CRITERIOS NORMALIZADOS DEL ANÁLISIS MULTICRITERIO

En este anexo se presentan los valores normalizados de los criterios utilizados en el análisis multicriterio para el resto de los escenarios climáticos considerados en el estudio.

Módulo	r1 Energía	r2 U media	r3 Espesor	r4 Peso	r5 Coste
Modelo base	0,928	1,000	0,000	0,472	0,262
Alternativa 1	0,930	0,491	0,502	0,909	0,540
Alternativa 2	1,000	0,553	0,951	1,000	0,457
Alternativa 3	0,905	0,491	0,502	0,926	0,548
Alternativa 4	0,898	0,439	1,000	0,960	1,000

Tabla A5-1 Criterios normalizados – Bagdad

Módulo	r1 Energía	r2 U media	r3 Espesor	r4 Peso	r5 Coste
Modelo base	1,000	1,000	0,000	0,472	0,262
Alternativa 1	0,846	0,491	0,502	0,909	0,540
Alternativa 2	0,953	0,553	0,951	1,000	0,457
Alternativa 3	0,796	0,491	0,502	0,926	0,548
Alternativa 4	0,830	0,439	1,000	0,960	1,000

Tabla A5-2 Criterios normalizados – Marjayún

Módulo	r1 Energía	r2 U media	r3 Espesor	r4 Peso	r5 Coste
Modelo base	0,968	1,000	0,000	0,472	0,262
Alternativa 1	0,919	0,491	0,502	0,909	0,540
Alternativa 2	1,000	0,553	0,951	1,000	0,457
Alternativa 3	0,845	0,491	0,502	0,926	0,548
Alternativa 4	0,875	0,439	1,000	0,960	1,000

Tabla A5-3 Criterios normalizados – Zaporíyia

ANEXO VI: CÁLCULOS DEL ÍNDICE GLOBAL DE DESEMPEÑO

En este anexo se presentan los valores del índice global de desempeño S_j obtenidos mediante la aplicación del modelo de suma ponderada (WSM) para los escenarios climáticos de Bagdad, Marjayún y Zaporíya. Estos resultados se incluyen con carácter complementario al análisis desarrollado en el capítulo de resultados, donde se muestra en detalle el procedimiento de cálculo para el caso de Isla de Decepción.

Módulo	S_j energético	S_j base	S_j logístico
Modelo base	0,780	0,7468	0,692
Alternativa 1	0,802	0,7665	0,756
Alternativa 2	0,876	0,8524	0,851
Alternativa 3	0,789	0,7568	0,750
Alternativa 4	0,850	0,8319	0,839

Tabla A6-1 Índice global de desempeño - Bagdad

Módulo	S_j energético	S_j base	S_j logístico
Modelo base	0,823	0,783	0,721
Alternativa 1	0,751	0,724	0,722
Alternativa 2	0,848	0,829	0,833
Alternativa 3	0,724	0,702	0,707
Alternativa 4	0,810	0,798	0,812

Tabla A6-2 Índice global de desempeño - Marjayún

Módulo	S_j energético	S_j base	S_j logístico
Modelo base	0,804	0,767	0,708
Alternativa 1	0,795	0,761	0,752
Alternativa 2	0,876	0,852	0,851
Alternativa 3	0,753	0,727	0,727
Alternativa 4	0,837	0,820	0,830

Tabla A6-3 Índice global de desempeño – Zaporíya

ANEXO VII: RANKING DE ALTERNATIVAS POR ESCENARIO

En este anexo se presentan los rankings completos de las alternativas constructivas obtenidos mediante el análisis multicriterio para los escenarios climáticos no desarrollados en el apartado principal de resultados. Los rankings se muestran para los tres escenarios de ponderación considerados: energético, equilibrado y logístico.

Escenario	1°	2°	3°	4°	5°
Prioridad energética	Modelo base	Alternativa 3	Alternativa 1	Alternativa 4	Alternativa 2
Configuración equilibrada	Modelo base	Alternativa 3	Alternativa 1	Alternativa 4	Alternativa 2
Prioridad logística	Modelo base	Alternativa 1	Alternativa 3	Alternativa 4	Alternativa 2

Tabla A7-1 Ranking de alternativas por escenario – Bagdad

Escenario	1°	2°	3°	4°	5°
Prioridad energética	Alternativa 3	Alternativa 1	Alternativa 4	Modelo base	Alternativa 2
Configuración equilibrada	Alternativa 3	Alternativa 1	Modelo Base	Alternativa 4	Alternativa 2
Prioridad logística	Alternativa 3	Alternativa 1	Modelo Base	Alternativa 4	Alternativa 2

Tabla A7-2 Ranking de alternativas por escenario – Marjayún

Escenario	1°	2°	3°	4°	5°
Prioridad energética	Alternativa 3	Alternativa 1	Modelo base	Alternativa 4	Alternativa 2
Configuración equilibrada	Alternativa 3	Alternativa 1	Modelo base	Alternativa 4	Alternativa 2
Prioridad logística	Modelo base	Alternativa 3	Alternativa 1	Alternativa 4	Alternativa 2

Tabla A7-3 Ranking de alternativas por escenario – Zaporíyia