

Trabajo Fin de Grado  
Grado en Ingeniería de la Energía.  
Mención en Ahorro y Eficiencia Energética

Propuesta de rehabilitación energética hasta  
el nivel NZEB de un colegio en Sevilla

Autor: Raúl Pedraza Galera

Tutor: María del Carmen Guerrero Delgado

Cotutor: José Luis Molina Félix

**Dpto. Ingeniería Energética**  
**Escuela Técnica Superior de Ingeniería**  
**Universidad de Sevilla**

Sevilla, 2021





Trabajo Fin de Grado  
Grado en Ingeniería de la Energía

# **Propuesta de rehabilitación energética hasta el nivel NZEB de un colegio en Sevilla**

Autor:

Raúl Pedraza Galera

Tutor:

María del Carmen Guerrero Delgado

Cotutor:

José Luis Molina Félix

Dpto. Ingeniería Energética  
Escuela Técnica Superior de Ingeniería  
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2021



Trabajo Fin de Grado: Propuesta de rehabilitación energética hasta el nivel NZEB de un colegio en Sevilla

Autor: Raúl Pedraza Galera

Tutor: María del Carmen Guerrero Delgado

El tribunal nombrado para juzgar el trabajo arriba indicado, compuesto por los siguientes profesores:

Presidente:

Vocal/es:

Secretario:

acuerdan otorgarle la calificación de:

El Secretario del Tribunal

Fecha:



# Agradecimientos

---

**Y**a ha llegado a su fin. Cuando leas este proyecto, habrá acabado una etapa muy importante y posiblemente de las más bonitas de mi vida. Es por ello, que quiero agradecer en primer lugar a mi familia, en especial a mis padres, por su incondicional y constante apoyo. No habría llegado hasta aquí sin ellos.

Especialmente, agradecer a José Luis Molina por brindarme la oportunidad de realizar este proyecto y por su ayuda y disposición en todo momento.

No puedo continuar este agradecimiento sin nombrar a María del Carmen Guerrero, por su infinita paciencia y dedicación. Gracias por disfrutar enseñando, es un lujo haber sido alumno tuyo.

Por último, no menos importante, agradecer a mis amigos por tantos momentos vividos, que sin duda es una de las mejores cosas que me llevo de esta etapa.

*Raúl Pedraza Galera  
Sevilla, 2021*



# Resumen

---

**E**l enfoque principal de este proyecto es la eficiencia energética. Analizaremos la mejora energética de un centro educativo en la ciudad de Sevilla, con el fin de reducir lo máximo posible el consumo de energía. Calcularemos las demandas del edificio en la situación inicial haciendo uso de la herramienta informática HULC. Además obtendremos las demandas del edificio mediante un procedimiento simplificado a partir de unas ecuaciones y unos coeficientes correctores.

Una vez conocida la situación inicial, se plantean medidas de mejora como el tratamiento de los puentes térmicos, reducción de las transmitancias de la envuelta, estrategias de ventilación, control solar y ventilación nocturna. Mediante el análisis del Coste del Ciclo de Vida, se obtendrá la combinación óptima a nivel económico que cumpla con el Documento Básico HE0 y HE1 del Código Técnico de la Edificación.

Por último, estudiaremos la inclusión de un elemento especial que en este caso será una cubierta activa, con el objetivo de reducir los picos de temperatura en las horas centrales del día y consecuentemente reducir la demanda de refrigeración del colegio.

Una vez que se implementen estas medidas de mejora se obtendrá un edificio renovado y más eficiente, acercándolo así al modelo de edificio de consumo de energía casi nulo.



# Abstract

---

The main focus of this project lays on energy efficiency. The study will analyze the energy improvement of an educational centre in the city of Seville, in order to reduce energy consumption to its maximum extent. The project will calculate the demands of the building in the initial situation using the computer tool HULC. In addition, the study will obtain the demands of the building using a simplified procedure based on equations and correction coefficients.

Once the initial situation is known, improvement measures such as the treatment of thermal bridges, reduction of the transmittances of the envelope, ventilation strategies, solar control and night ventilation are proposed. By means of the Life Cycle Cost analysis, the project will obtain the optimal economic combination that complies with the Basic Document HE0 and HE1 of the Technical Building Code.

Lastly, the project will study the inclusion of a special element, which in this case will be an active roof, in order to reduce the temperature peaks in the central hours of the day and consequently reduce the cooling demand of the school.

Once these improvement measures are implemented, the project reaches a renovated and more efficient building, thus bringing it closer to the near-zero energy consumption building model.



# Índice Abreviado

---

<i>Agradecimientos</i>	I
<i>Resumen</i>	III
<i>Abstract</i>	V
<i>Índice Abreviado</i>	VII
<i>Índice de Tablas</i>	XI
<i>Índice de Figuras</i>	XV
<i>Notación</i>	XVII
<b>1 Introducción</b>	<b>1</b>
1.1 Antecedentes	1
1.2 Motivación del proyecto	3
1.3 Objetivo del proyecto	3
1.4 Presentación de la Herramienta Unificada Líder-Calener (HULC)	4
<b>2 Definición del edificio en HULC</b>	<b>5</b>
2.1 Datos generales	5
2.2 Descripción constructiva	9
2.3 Descripción geométrica	10
<b>3 Evaluación energética inicial</b>	<b>15</b>
3.1 Períodos de calefacción y refrigeración mediante oscilación libre	15
3.2 Cálculo de demandas iniciales mediante HULC. Procedimiento detallado	16
3.3 Cálculo de demandas iniciales mediante procedimiento simplificado	20
3.4 Situación en relación con las exigencias de HE0	23
3.5 Situación en relación con las exigencias de HE1	24
3.6 Clase de eficiencia asociada a las demandas de calefacción y refrigeración	26
<b>4 Reducción de la demanda. Propuestas de mejora</b>	<b>29</b>
4.1 Tratamiento de los puentes térmicos	30
4.2 Mejora de los elementos de la envuelta	31
4.3 Estrategias de ventilación	35
4.4 Control solar	39
4.5 Ventilación nocturna	39
4.6 Resumen de mejoras	39
<b>5 Situación de mínima demanda energética</b>	<b>41</b>
5.1 Coste del ciclo de vida (CCV)	41
5.2 Sobrecostes	42
5.3 Costes de operación	45
5.4 Consumos energéticos	45
5.5 Selección del caso óptimo	48

<b>6</b>	<b>Inclusión de un elemento especial: Cubierta activa</b>	<b>53</b>
6.1	Introducción	53
6.2	Modelización	55
6.3	Capacidad adicional	60
6.4	Resultados	60
<b>7</b>	<b>Conclusiones</b>	<b>63</b>
	<b>Anexos</b>	<b>65</b>
	<b>Bibliografía</b>	<b>71</b>

# Índice

---

<i>Agradecimientos</i>	I
<i>Resumen</i>	III
<i>Abstract</i>	V
<i>Índice Abreviado</i>	VII
<i>Índice de Tablas</i>	XI
<i>Índice de Figuras</i>	XV
<i>Notación</i>	XVII
<b>1 Introducción</b>	<b>1</b>
<b>1.1 Antecedentes</b>	<b>1</b>
1.1.1 Clima de Sevilla	1
1.1.2 Cambio climático	1
1.1.3 Actuación frente al cambio climático	2
1.1.4 Acuerdos internacionales contra el cambio climático	2
<b>1.2 Motivación del proyecto</b>	<b>3</b>
<b>1.3 Objetivo del proyecto</b>	<b>3</b>
<b>1.4 Presentación de la Herramienta Unificada Líder-Calener (HULC)</b>	<b>4</b>
<b>2 Definición del edificio en HULC</b>	<b>5</b>
<b>2.1 Datos generales</b>	<b>5</b>
2.1.1 Ocupación	6
2.1.2 Ventilación	7
2.1.3 Zona climática	8
<b>2.2 Descripción constructiva</b>	<b>9</b>
<b>2.3 Descripción geométrica</b>	<b>10</b>
2.3.1 Orientación del edificio	10
2.3.2 Planos de planta	12
2.3.3 Plano de situación	13
<b>3 Evaluación energética inicial</b>	<b>15</b>
<b>3.1 Períodos de calefacción y refrigeración mediante oscilación libre</b>	<b>15</b>
<b>3.2 Cálculo de demandas iniciales mediante HULC. Procedimiento detallado</b>	<b>16</b>
3.2.1 Demanda de calefacción	16
3.2.2 Demanda de refrigeración	18
<b>3.3 Cálculo de demandas iniciales mediante procedimiento simplificado</b>	<b>20</b>
3.3.1 Demanda de calefacción	21
3.3.2 Demanda de refrigeración	22
<b>3.4 Situación en relación con las exigencias de HE0</b>	<b>23</b>
<b>3.5 Situación en relación con las exigencias de HE1</b>	<b>24</b>
3.5.1 Transmitancia de la envolvente térmica, $K_{lim}$	24
3.5.2 Control solar de la envolvente térmica, $q_{sol}$	26
3.5.3 Permeabilidad al aire de la envolvente térmica	26
<b>3.6 Clase de eficiencia asociada a las demandas de calefacción y refrigeración</b>	<b>26</b>

<b>4</b>	<b>Reducción de la demanda. Propuestas de mejora</b>	<b>29</b>
4.1	Tratamiento de los puentes térmicos	30
4.2	Mejora de los elementos de la envuelta	31
4.3	Estrategias de ventilación	35
4.3.1	Situación inicial	35
4.3.2	Mejora 1: Mejorar la estanqueidad	35
4.3.3	Mejora 2: Control de presencia	36
4.3.4	Mejora 3: Mejora1 + Mejora 2 + Recuperador de calor	38
4.4	Control solar	39
4.5	Ventilación nocturna	39
4.6	Resumen de mejoras	39
<b>5</b>	<b>Situación de mínima demanda energética</b>	<b>41</b>
5.1	Coste del ciclo de vida (CCV)	41
5.2	Sobrecostes	42
5.2.1	Tratamiento de los puentes térmicos	42
5.2.2	Mejora de los elementos de la envuelta	42
5.2.2.1	Cerramientos opacos: Muros, cubierta y suelo	42
5.2.2.2	Cerramientos semitransparentes: Ventanas	43
5.2.3	Estrategias de ventilación	44
5.2.4	Control solar	44
5.2.5	Ventilación nocturna	45
5.3	Costes de operación	45
5.4	Consumos energéticos	45
5.4.1	Consumo de energía final	45
5.4.1.1	Caso inicial	46
5.4.2	Consumo de energía primaria	46
5.4.2.1	Caso inicial	46
5.4.2.2	Todas las combinaciones	46
5.4.3	Consumo de energía primaria no renovable	47
5.4.3.1	Caso inicial	47
5.4.3.2	Todas las combinaciones	48
5.5	Selección del caso óptimo	48
5.5.1	Exigencia HE1	48
5.5.2	Exigencia HE0	50
5.5.2	Caso óptimo	51
<b>6</b>	<b>Inclusión de un elemento especial: Cubierta activa</b>	<b>53</b>
6.1	Introducción	53
6.2	Modelización	55
6.2.1	Hipótesis	55
6.2.2	Flujo de calor desde el interior hasta la cámara de aire	57
6.2.3	Evolución de la temperatura del aire en la cámara	57
6.2.4	Temperatura media del aire en la cámara	59
6.3	Capacidad adicional	60
6.4	Resultados	60
<b>7</b>	<b>Conclusiones</b>	<b>63</b>
	<b>Anexos</b>	<b>65</b>
	<b>Bibliografía</b>	<b>71</b>

# Índice de Tablas

---

Tabla 1. Densidades de ocupación (abreviada). <i>Fuente: DB-SI.</i>	6
Tabla 2. Calidad del aire según uso. <i>Fuente: RITE.</i>	7
Tabla 3. Caudal del aire exterior según calidad del aire. <i>Fuente: RITE.</i>	7
Tabla 4. Zonas climáticas (abreviada). <i>Fuente: DB-HE.</i>	8
Tabla 5. Calidades constructivas de fachada. <i>Fuente: Elaboración propia.</i>	9
Tabla 6. Calidades constructivas de cubierta plana. <i>Fuente: Elaboración propia.</i>	9
Tabla 7. Calidades constructivas de partición interior horizontal. <i>Fuente: Elaboración propia.</i>	9
Tabla 8. Calidades constructivas de partición interior vertical. <i>Fuente: Elaboración propia.</i>	10
Tabla 9. Calidades constructivas de suelo en contacto con el terreno. <i>Fuente: Elaboración propia.</i>	10
Tabla 10. Calidades constructivas de huecos. <i>Fuente: Elaboración propia.</i>	10
Tabla 11. Superficies y orientaciones de los cerramientos. <i>Fuente: Elaboración propia.</i>	11
Tabla 12. Comparativa demandas modelo detallado vs simplificado. <i>Fuente: Elaboración propia.</i>	23
Tabla 13. Valor límite $C_{ep,nren}$ [KWh/m <sup>2</sup> ·año] para uso distinto del residencial privado. <i>Fuente: DB-HE0.</i>	24
Tabla 14. Valor límite $C_{ep,tot}$ [KWh/m <sup>2</sup> ·año] para uso distinto del residencial privado. <i>Fuente: DB-HE0.</i>	24
Tabla 15. Valores mínimos de transmitancias térmicas. <i>Fuente: DB-HE1.</i>	25
Tabla 16. Valores límite de transmitancias de la envuelta ( $K_{lim}$ ). <i>Fuente: DB-HE1.</i>	25
Tabla 17. Verificación exigencia $K_{lim}$ del HE1. <i>Fuente: Elaboración propia.</i>	25
Tabla 18. Valores límite $q_{sol,jul}$ . <i>Fuente: DB-HE1.</i>	26
Tabla 19. Verificación exigencia $q_{sol,jul}$ del HE1. <i>Fuente: Elaboración propia.</i>	26

---

Tabla 20. Calificación energética del edificio en consumo de energía primaria no renovable. <i>Fuente: Certificado eficiencia energética de HULC.</i>	27
Tabla 21. Parámetros característicos régimen calefacción. <i>Fuente: Elaboración propia.</i>	29
Tabla 22. Parámetros característicos régimen refrigeración. <i>Fuente: Elaboración propia.</i>	29
Tabla 23. Propuestas de mejora puentes térmicos. <i>Fuente: Elaboración propia.</i>	30
Tabla 24. Transmitancia de los elementos de la envuelta según zonas climáticas. <i>Fuente: Elaboración propia.</i>	31
Tabla 25. Transmitancias térmicas zona climática B. <i>Fuente: Elaboración propia.</i>	32
Tabla 26. Combinaciones del coeficiente global de transmisión térmica (K). <i>Fuente: Elaboración propia.</i>	33
Tabla 27. Obtención del nuevo paquete constructivo Klim. <i>Fuente: Elaboración propia.</i>	33
Tabla 28. Transmitancias térmicas del paquete constructivo Klim. <i>Fuente: Elaboración propia.</i>	34
Tabla 29. Transmitancias térmicas de todos los paquetes constructivos. <i>Fuente: Elaboración propia.</i>	34
Tabla 30. Obtención de $ACH_{nom}$ para la mejora de control de presencia. <i>Fuente: Elaboración propia.</i>	37
Tabla 31. Parámetros característicos de cada una de las mejoras de ventilación. <i>Fuente: Certificado eficiencia energética de HULC.</i>	38
Tabla 32. Posibles valores de $g$ . <i>Fuente: Elaboración propia.</i>	39
Tabla 33. Posibles valores de $ACH_{noct}$ . <i>Fuente: Elaboración propia.</i>	39
Tabla 34. Resumen de mejoras de los parámetros. <i>Fuente: Elaboración propia.</i>	39
Tabla 35. Desglose de los costes contabilizados en el CCV. <i>Fuente: Elaboración propia.</i>	41
Tabla 36. Valores para el estudio del CCV. <i>Fuente: Elaboración propia.</i>	42
Tabla 37. Sobrecostes del tratamiento de los puentes térmicos. <i>Fuente: Elaboración propia.</i>	42
Tabla 38. Coeficientes para el cálculo del sobrecoste de cerramientos opacos. <i>Fuente: Grupo de Termotecnia US.</i>	43
Tabla 39. Sobrecoste del tratamiento de los puentes térmicos. <i>Fuente: Elaboración propia.</i>	43
Tabla 40. Coste de los cerramientos semitransparentes según su U. <i>Fuente: Grupo de Termotecnia US.</i>	43
Tabla 41. Sobrecostes de los cerramientos semitransparentes. <i>Fuente: Elaboración propia.</i>	44
Tabla 42. Sobrecostes de las mejoras de ventilación. <i>Fuente: Elaboración propia.</i>	44
Tabla 43. Sobrecostes del control solar. <i>Fuente: Elaboración propia.</i>	44

---

Tabla 44. Sobrecoste de mejorar la ventilación nocturna. <i>Fuente: Elaboración propia.</i>	45
Tabla 45. Precios de la energía. <i>Fuente: Grupo de Termotecnia US.</i>	45
Tabla 46. Valores de consumo de energía final para calefacción, refrigeración e iluminación. <i>Fuente: Elaboración propia.</i>	46
Tabla 47. Valores de consumo de energía primaria para calefacción, refrigeración e iluminación. <i>Fuente: Elaboración propia.</i>	46
Tabla 48. Valores de consumo de energía primaria no renovable para calefacción. <i>Fuente: Elaboración propia.</i>	47
Tabla 49. Comparativa situación inicial y caso óptimo. <i>Fuente: Elaboración propia.</i>	51



# Índice de Figuras

---

Figura 1. Vista aérea del centro. <i>Fuente: Google Maps.</i>	5
Figura 2. Vista aérea del edificio A. Fuente: Google Maps.	6
Figura 3. Orientaciones de las fachadas. Fuente: <i>Documento Básico HE Ahorro de energía.</i>	11
Figura 4. Plano de la planta baja del edificio. <i>Fuente: CEIP Arias Montano.</i>	12
Figura 5. Plano de la planta primera del edificio. <i>Fuente: CEIP Arias Montano.</i>	13
Figura 6. Plano de situación del CEIP Arias Montano. <i>Fuente: Google Maps.</i>	14
Figura 7. Representación del CEIP Arias Montano en HULC. Fuente: HULC.	14
Figura 8. Temperatura del edificio en oscilación libre. Fuente: Elaboración propia.	15
Figura 9. Demandas mensuales de calefacción y refrigeración. <i>Fuente: Herramienta Excel para la obtención de edificios de alta eficiencia.</i>	16
Figura 10. Ganancias y Pérdidas anuales en régimen calefacción. <i>Fuente: Elaboración propia.</i>	17
Figura 11. Demanda mensual de calefacción. <i>Fuente: Herramienta Excel para la obtención de edificios de alta eficiencia.</i>	18
Figura 12. Ganancias y Pérdidas anuales en régimen refrigeración. <i>Fuente: Elaboración propia.</i>	19
Figura 13. Demanda mensual de refrigeración. <i>Fuente: Herramienta Excel para la obtención de edificios de alta eficiencia.</i>	20
Figura 14. Demandas mensuales de calefacción. <i>Fuente: Herramienta Excel para la obtención de edificios de alta eficiencia.</i>	22
Figura 15. Demandas mensuales de refrigeración. <i>Fuente: Herramienta Excel para la obtención de edificios de alta eficiencia.</i>	23
Figura 16. Cálculo de ACH a través de la envuelta para $v=4\text{m/s}$ con impulsión y extracción. <i>Fuente: Grupo de Termotecnia US.</i>	35
Figura 17. Cálculo de ACH a través de la envuelta para $v=4\text{m/s}$ con impulsión y extracción. <i>Fuente: Grupo de Termotecnia US.</i>	36
Figura 18. Esquema de funcionamiento de un recuperador de calor. <i>Fuente: Elaboración propia.</i>	38
Figura 19. Relación CCV- Consumo de energía primaria total. <i>Fuente: Herramienta Excel para la obtención de edificios de alta eficiencia.</i>	47

---

Figura 20. Relación CCV- Consumo de energía primaria no renovable. <i>Fuente: Herramienta Excel para la obtención de edificios de alta eficiencia.</i>	48
Figura 21. CCV vs Cep,tot – Combinaciones que cumplen HE1. <i>Fuente: Herramienta Excel para la obtención de edificios de alta eficiencia.</i>	49
Figura 22. CCV vs Cep,nren – Combinaciones que cumplen HE1. <i>Fuente: Herramienta Excel para la obtención de edificios de alta eficiencia.</i>	49
Figura 23. CCV vs Cep,tot – Combinaciones que cumplen HE0 y HE1. <i>Fuente: Herramienta Excel para la obtención de edificios de alta eficiencia.</i>	50
Figura 24. CCV vs Cep,nren – Combinaciones que cumplen HE0 y HE1. <i>Fuente: Herramienta Excel para la obtención de edificios de alta eficiencia.</i>	50
Figura 25. CCV vs Cep,tot – Caso óptimo. <i>Fuente: Herramienta Excel para la obtención de edificios de alta eficiencia.</i>	51
Figura 26. Dimensiones de la cubierta activa. <i>Fuente: Elaboración propia.</i>	53
Figura 27. Secciones de la cubierta ventilada activa. <i>Fuente: Grupo de Termotecnia US.</i>	54
Figura 28. Período de carga de frío con sistema evaporativo. <i>Fuente: Elaboración propia.</i>	54
Figura 29. Período de descarga de frío. <i>Fuente: Elaboración propia.</i>	55
Figura 30. Esquema eléctrico equivalente en triángulo. <i>Fuente: Elaboración propia</i>	55
Figura 31. Esquema eléctrico equivalente en estrella. <i>Fuente: Elaboración propia.</i>	56
Figura 32. Esquema eléctrico equivalente simplificado. <i>Fuente: Elaboración propia.</i>	56
Figura 33. Volumen elemental de la cubierta activa. <i>Fuente: Elaboración propia.</i>	57
Figura 34. Fundamento del modelado de la capacidad adicional genérica. <i>Fuente: Grupo de Termotecnia US.</i>	60
Figura 35. Demandas anuales con la capacidad adicional. <i>Fuente: HULC.</i>	61
Figura 36. Temperatura superficial. <i>Fuente: grupo de termotecnia US.</i>	65
Figura 37. Selección de la cubierta asociada a cada espacio modelado en la vivienda. <i>Fuente: HULC.</i>	66
Figura 38. Exportación de datos. <i>Fuente: HULC.</i>	66
Figura 39. Archivos de capacidades adicionales obtenidos. <i>Fuente: Elaboración propia.</i>	67
Figura 40. Estructura del archivo de modelado de la capacidad adicional. <i>Fuente: Excel.</i>	67
Figura 41. Generación de archivos “MCF”. <i>Fuente: Elaboración propia.</i>	68
Figura 42. Importación de los archivos modificados. <i>Fuente: HULC.</i>	69
Figura 43. Cálculo de consumos. <i>Fuente: HULC.</i>	69

# Notación

---

CTE	Código Técnico de la Edificación
DB-HE	Documento Básico HE Ahorro de Energía
DB-HE0	Documento Básico HE Ahorro de Energía. Limitación del consumo energético.
DB-HE1	Documento Básico HE Ahorro de Energía. Condiciones para el control de la demanda energética
DB-SI	Documento Básico SI en caso de incendio
RITE	Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios
HULC	Herramienta Unificada Líder Calener
CE3	Calificación Energética de Edificios Existentes
CCV	Coste del Ciclo de Vida



# 1 Introducción

---

## 1.1 Antecedentes

### 1.1.1 Clima de Sevilla

Sevilla es una ciudad española ubicada al suroeste de la península ibérica. Es capital de provincia y de la Comunidad Autónoma de Andalucía. Es la cuarta ciudad española más importante en número de habitantes, por detrás de Madrid, Barcelona y Valencia. La orografía de su entorno es predominantemente llana, en plena depresión y llanura del río Guadalquivir, río que atraviesa y divide la ciudad en dos partes. Tiene una altitud de tan sólo 8 metros sobre el nivel del mar.

El clima de Sevilla es mediterráneo oceánico caracterizado por precipitaciones variables. Los veranos son secos y muy calurosos, llegándose a alcanzar los 40°. Los inviernos son suaves, y a menudo lluviosos que concentran más de la mitad de la lluvia anual. La temperatura media anual ronda los 19 °C, siendo una de las temperaturas medias más altas de Europa.

Debido a la situación geográfica de la región, es común que en verano se eleven masas de aire cálido y seco procedentes del norte de África, dando origen al fenómeno climático denominado Ola de Calor. Según la AEMET para que una ola de calor se pueda considerar como tal se deben de cumplir tres factores: las temperaturas registradas, la duración y el territorio afectado. De las 60 olas de calor que se han producido en España desde 1975 hasta el 2019, Andalucía ha sufrido 54 de ellas. Estas cifras colocan a Andalucía junto con Castilla-La Mancha como las comunidades autónomas que más se han visto afectadas por este fenómeno, según un informe publicado por la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET).

### 1.1.2 Cambio climático

El clima está cambiando como consecuencia del modelo de civilización industrial que se ha expandido por todo el mundo a lo largo del siglo XX, singularmente por las emisiones de gases efecto invernadero asociadas a la utilización de combustibles fósiles y a la deforestación. Este cambio en el clima está llegando a nivel mundial más rápido de lo que se esperaba.

Esto traerá consigo un importante aumento de las temperaturas. En la región mediterránea la temperatura media ha subido ya 1.5°C respecto a niveles preindustriales, y si no se reducen las emisiones de gases efecto invernadero, a final de siglo el termómetro podría subir tres o cuatro grados más, haciendo que el clima de Sevilla se parezca mucho más al clima del norte de África, donde las temperaturas son cálidas durante todo el año y los veranos excesivamente calurosos. El actual clima de Sevilla se vería desplazado hacia el norte.

Los veranos se alargarán cada vez más, aumentando consigo el número de noches tropicales, noches donde el mercurio no bajará de los 28°C. Las olas de calor serán cada vez más frecuentes y de mayor intensidad. Respecto a las precipitaciones, todo indica que serán de menor frecuencia pero aumentarían su torrencialidad provocando inundaciones en ciudades y daños en los cultivos.

### 1.1.3 Actuación frente al cambio climático

La necesidad de adoptar políticas para afrontar el cambio climático es ya una realidad que nadie discute. La concienciación de los organismos internacionales y nacionales sobre la necesidad de tomar medidas para frenar y paliar este fenómeno es cada vez más notoria, y está siendo liderada de forma clara por la Unión Europea. Los últimos informes y análisis científicos abren una pequeña puerta a la esperanza. Indican que, si actuamos ya, podríamos reducir las emisiones de aquí a 12 años y frenar el aumento de la temperatura media anual por debajo de los 2 °C, o incluso a 1,5 °C por encima de los niveles preindustriales.

Cabe destacar que Sevilla se está posicionando como una de las ciudades europeas que más está apostando por la lucha contra el cambio climático, siendo su alcalde presidente del Consejo de Gobierno de la Red Española de Ciudades por el Clima de la Federación de Municipios y provincias (FEMP). Los edificios municipales y espacios públicos van a afrontar un proceso de mejora y de eficiencia energética a través de la innovación y de nuevos proyectos.

### 1.1.4 Acuerdos internacionales contra el cambio climático

En 1992 se adoptó la Convención Marco de Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), ha sido ratificada por alrededor de 200 países. Dicha convención reconoce la existencia del cambio climático y establece unos objetivos para intentar mitigar los efectos de la crisis climática derivados de la acción humana.

Además, se celebra anualmente las Conferencias de las Partes (COP) con el objetivo de revisar la implementación de la Convención y poder negociar nuevos compromisos. La primera reunión tuvo lugar en Berlín en 1995 (COP1), de aquí salió el Mandato de Berlín, documento por el cual se exigía a todas las partes iniciar negociaciones para reducir las emisiones más allá del año 2000.

En 1997 surge el Protocolo de Kioto, aunque no entró en vigor hasta 2005. Este acuerdo tiene como objetivo reducir las emisiones de seis gases de efecto invernadero que causan el calentamiento global, se acordó reducir las emisiones al menos un 5 % en el periodo 2008-2012 en comparación con las emisiones de 1990.

Desde 1998 a 2006, las Cumbres del Clima se dedicaron especialmente a ultimar detalles y pulir todos los aspectos del Protocolo de Kioto.

En 2011 nace el Protocolo de Kioto II y en 2012 se acuerda la Puerta Climática de Doha, documento que suponía prorrogar el Protocolo de Kioto hasta el 2020.

En 2015 se celebró la XXI Conferencia sobre el Cambio Climático (COP21), en ella nació el Acuerdo de París, un convenio que establece medidas para la reducción de las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) a través de la mitigación, adaptación y resiliencia de los ecosistemas a efectos del Calentamiento Global y que se comenzará a aplicar en el 2020.

En 2019 se ha celebrado en Madrid la COP25, siendo la primera vez que se celebra en España una cumbre del clima. Esta cumbre era especialmente trascendente, ya que era la última reunión para activar el Acuerdo de París. Sin embargo, ha sido una cumbre un tanto decepcionante, no ha habido acuerdos sobre los mercados de carbono y poco compromiso de aumentar los planes nacionales. Los grandes emisores de gases de efecto invernadero como EE. UU, China, la India o Rusia, que, juntos, suman alrededor del 55 % de las emisiones mundiales de efecto invernadero, no se han comprometido a presentar planes climáticos más exigentes en 2020.

El futuro de la reducción de emisiones y de la lucha contra el cambio climático dependerá de la Cumbre del próximo año de Glasgow.

## 1.2 Motivación de proyecto

La mayoría de los colegios fueron construidos tras la firma de los Pactos de la Moncloa en 1977. Presentan graves problemas de aislamiento ya que por aquel entonces no existían los criterios de eficiencia energética. La subida de las temperaturas y la dilatación de los veranos ha acentuado el problema del estrés térmico en las aulas. Los picos de temperatura son cada vez más frecuentes por lo que obligan a rehabilitar los colegios mal aislados para evitar que alumnos y profesores puedan tener problemas de salud. El calor en las aulas puede dar lugar a situaciones de estrés térmico, discomfort, faltas de concentración, golpes de calor, etc.

Además, el Real Decreto 486/1997, por el que se establecen las disposiciones mínimas de seguridad y salud que deben cumplir los lugares de trabajo, recoge que la temperatura de los locales donde se realicen trabajos sedentarios (como los colegios) "estará comprendida entre 17°C y 27°C". Dicho límite es sobrepasado en muchos colegios e institutos, pese a que los menores son población de riesgo ante olas de calor, como queda recogido en el protocolo del Ministerio de Sanidad: "Existen características fisiológicas específicas, la mayoría de ellas relacionadas con la composición de agua corporal, el patrón de sudor y la producción de calor metabólico, que ponen a los niños en una desventaja termorreguladora en comparación con los adultos".

### **Ley andaluza:**

El Parlamento andaluz ha aprobado por unanimidad la ley para mejorar las condiciones térmicas y ambientales de los centros educativos andaluces mediante técnicas bioclimáticas y uso de energías renovables. Destaca la apuesta por incorporar iniciativas novedosas que, además, sean susceptibles de captar fondos europeos.

El origen de esta ley está en los meses previos al verano de 2017, que fueron muy calurosos. La plataforma de Escuelas de Calor, y las asociaciones de madres y padres de alumnos de los centros educativos de la comunidad se movilizaron entonces con fuerza.

Se abrió "un proceso de negociación" en el que han ido de la mano de la plataforma Escuelas de Calor, de las AMPAS de Andalucía, además de los sindicatos, y de las organizaciones de consumidores, ecologistas y de estudiantes.

## 1.3 Objetivo del proyecto

El objetivo de este Trabajo Fin de Grado es el estudio de la implementación de una serie de medidas para mejorar la energética del centro educativo CEIP Arias Montano situado en la ciudad de Sevilla. Este propósito está motivado por la problemática del calor en los colegios. Debido al cambio climático este problema dura más tiempo y afecta cada vez más al calendario escolar.

Para ello, se empezará por estudiar la situación energética actual del colegio. Posteriormente se estudiarán distintas estrategias de mejora y las distintas combinaciones posibles. Finalmente se elegirá la combinación óptima que reduzcan las demandas del edificio. Además se estudiará la implementación de una solución innovadora como es la cubierta activa.

Así se conseguirá cumplir con los objetivos energéticos que exige la normativa y reducir significativamente el uso de energías no renovables.

## 1.4 Presentación de la Herramienta Unificada Líder-Calener (HULC)

Para la realización de este proyecto vamos a hacer uso de la Herramienta Unificada Líder-Calener (HULC), con ella vamos a definir geoméricamente el edificio del colegio. Esta herramienta informática permite la verificación de las exigencias de algunas secciones del Documento Básico de Ahorro de Energía DB-HE: la sección HE0 (Limitación del consumo energético), y la sección HE 1 (Condiciones para el control de la demanda energética).

Este software permite determinar la demanda térmica de un edificio, respecto a uno de referencia (LIDER), posteriormente determinar la eficiencia energética de la instalación del edificio en cuanto a la relación demanda/consumo y emisiones de CO2 (CALENER). El programa CALENER presenta una amplia selección de tipos de instalaciones de generación. Para cada tipo de instalación, el programa dispone por defecto de una curva de “eficiencia”.

La herramienta genera el informe en formato oficial para la Certificación energética de Edificios, así como un archivo digital en formato XML, que contiene todos los datos del certificado y que deberá aportarse en el momento del registro.

## 2 Definición del edificio en HULC

---

### 2.1 Datos generales

El edificio objeto es un mediano terciario, en concreto el colegio CEIP Arias Montano, un centro educativo situado en la ciudad de Sevilla, con dirección: C/ Doctor Jiménez Díaz, 1, 41008 Sevilla. Parcela catastral 6241301TG3464S. Año de construcción 1970. Posee amplias instalaciones, conformada por 3 edificios separados por pistas deportivas y zonas ajardinadas para el recreo. En la siguiente imagen se aprecia la parcela con los tres edificios (A, B y C). En este proyecto nos enfocaremos exclusivamente en el edificio A.

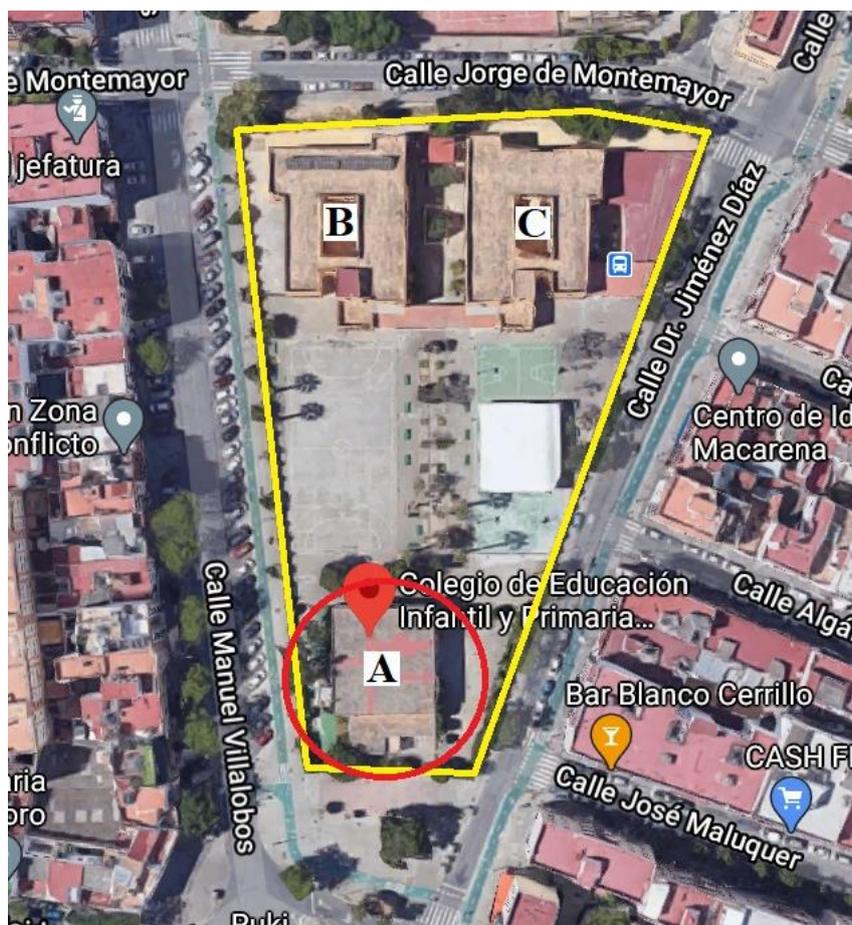


Figura 1. Vista aérea del centro. Fuente: Google Maps.

El edificio “A” cuenta con una superficie útil de 875.45 m<sup>2</sup> distribuidos en dos plantas sobre rasante, la planta baja con 489.67m<sup>2</sup> y la planta primera con 385.77 m<sup>2</sup>. Tiene una altura entreplantas de 3.3 m.

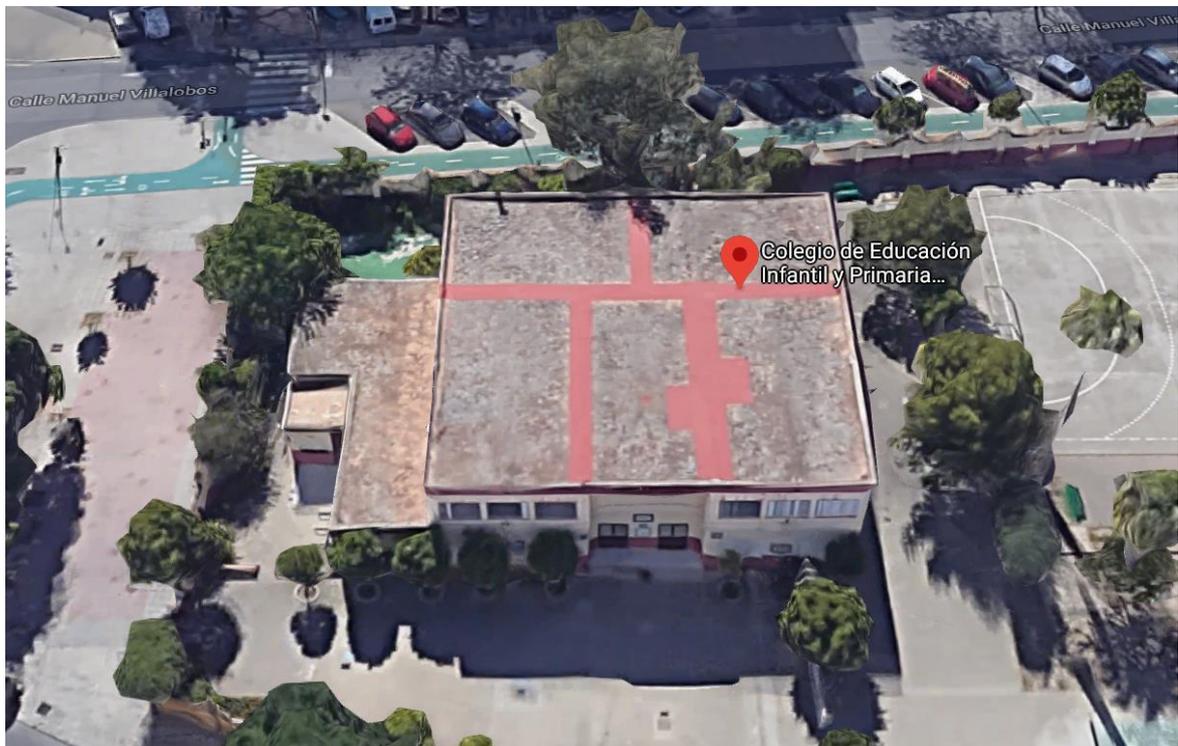


Figura 2. Vista aérea del edificio A. Fuente: Google Maps.

### 2.1.1 Ocupación

Debido a que no tenemos datos respecto a la ocupación del colegio, se hace una estimación del número de personas. El Documento Básico SI en caso de Incendio establece unos valores promedio de densidad de ocupación de los edificios en función del uso previsto y la zona que abarque. La densidad de ocupación para nuestro proyecto es de 10 m<sup>2</sup>/persona, que equivale a un edificio con uso Docente y la zona considerada es el conjunto del edificio.

Uso previsto	Zona, tipo de actividad	Ocupación (m <sup>2</sup> /persona)
Aparcamiento <sup>(2)</sup>	Vinculado a una actividad sujeta a horarios: comercial, espectáculos, oficina, etc.	15
	En otros casos	40
Administrativo	Plantas o zonas de oficinas	10
	Vestíbulos generales y zonas de uso público	2
Docente	Conjunto de la planta o del edificio	10
	Locales diferentes de aulas, como laboratorios, talleres, gimnasios, salas de dibujo, etc.	5
	Aulas (excepto de escuelas infantiles)	1,5
	Aulas de escuelas infantiles y salas de lectura de bibliotecas	2

Tabla 1. Densidades de ocupación (abreviada). Fuente: DB-SI.

Multiplicando la densidad de ocupación por el área del edificio, obtenemos el número estimado de personas:

$$\text{N}^\circ \text{ personas} = \frac{1}{10} [\text{pers}/\text{m}^2] \cdot 875.45 [\text{m}^2] = 87.54 \text{ personas}$$

### 2.1.2 Ventilación

Para garantizar la calidad del aire en el interior, el RITE establece unas categorías de la calidad del aire en función del tipo de uso del edificio.

CATEGORÍA DE LA CALIDAD DEL AIRE	TIPO DE USO
IDA 1 (aire de óptima calidad)	Hospitales, clínicas, laboratorios y guarderías
IDA 2 (aire de buena calidad)	Oficinas, residencias (locales comunes de hoteles y similares, residencias de ancianos y de estudiantes), salas de lectura, museos, salas de tribunales, aulas de enseñanza y asimilables y piscinas.
IDA 3 (aire de calidad media)	Edificios comerciales, cines, teatros, salones de actos, habitaciones de hoteles y similares, restaurantes, cafeterías, bares, salas de fiestas, gimnasios, locales para el deporte (salvo piscinas) y salas de ordenadores.

Tabla 2. Calidad del aire según uso. *Fuente: RITE*

El RITE también establece unos caudales mínimos de ventilación en función de la calidad de aire esperada para cada uso, distinguiendo también entre fumadores y no fumadores. En la siguiente tabla se muestran los valores para personas ‘no fumadoras’:

CATEGORÍA DE LA CALIDAD DEL AIRE	l/s*persona	m <sup>3</sup> /h*persona
IDA 1	20.0	72.0
IDA 2	12.5	45.0
IDA 3	8.0	28.8

Tabla 3. Caudal del aire exterior según calidad del aire. *Fuente: RITE*

En nuestro caso, al tratarse de un colegio, es IDA 2 (calidad del aire buena) con un caudal mínimo de ventilación de 45 m<sup>3</sup>/h\*persona.

• Cálculo de  $ACH_{nominal}$

Se calcula de diferente manera para terciarios que para residencial privado.

$$ACH_{nom} = \text{Caudal}_{aire\_exterior} \cdot \frac{1}{\text{Volumen total}} \cdot N^{\circ} \text{ personas}$$

$$ACH_{nom} = \frac{45 \text{ m}^3}{h \cdot \text{persona}} \cdot \frac{1}{2888.98 \text{ m}^3} \cdot 87.54 \text{ personas} = 1.36 \text{ ren/h}$$

$$ACH_{nom} = 1.36 \text{ ren/h}$$

2.1.3 Zona climática

La zona climática viene especificada en el Documento Básico HE Ahorro de energía en función de la capital de provincia dónde se ubica el edificio y la altitud de la localidad. En este caso, al encontrarse en la ciudad de Sevilla, con una altitud de 7 metros sobre el nivel del mar, la zona climática es B4.

Provincia	Altitud sobre el nivel del mar (h)																										
	≤ 50 m	51-100 m	101-150 m	151-200 m	201-250 m	251-300 m	301-350 m	351-400 m	401-450 m	451-500 m	501-550 m	551-600 m	601-650 m	651-700 m	701-750 m	751-800 m	801-850 m	851-900 m	901-950 m	951-1000 m	1001-1050 m	1051-1100 m	1101-1150 m	1151-1200 m	1201-1250 m	1251-1300 m	≥ 1301 m
Albacete	C3							D3							E1												
Alicante/Alacant	B4			C3							D3																
Almería	A4	B4			B3			C3							D3												
Araba/Alava	D1							E1																			
Asturias	C1	D1							E1																		
Ávila	D2							D1							E1												
Badajoz	C4							C3	D3																		
Balears, Illes	B3			C3																							
Barcelona	C2			D2			D1			E1																	
.....																											
.....																											
Rioja, La	C2			D2							E1																
Salamanca	D2							E1																			
Santa Cruz de Tenerife	a3			A2							B2			C2													
Segovia	D2							E1																			
<b>Sevilla</b>	<b>B4</b>			C4																							
Soria	D2							D1	E1																		
Tarragona	B3	C3			D3																						
Teruel	C3			C2	D2							E1															
Toledo	C4			D3																							
Valencia/València	B3	C3			D2							E1															
Valladolid	D2							E1																			
Zamora	D2							E1																			
Zaragoza	C3			D3							E1																

Tabla 4. Zonas climáticas (abreviada). Fuente: DB-HE.

## 2.2 Descripción constructiva

Para construir el modelo en HULC es necesario definir los distintos cerramientos que componen tanto la envolvente del edificio como las particiones interiores, así como los acristalamientos. Las calidades constructivas de los mismos se han determinado realizando una estimación a partir de la base de datos de CE3, tomando como referencia el año de construcción del colegio.

FACHADA		
Material	Espesor[m]	Transmitancia [W/m <sup>2</sup> K]
½ pie LP métrico o catalán 40 mm < G < 60	0.120	1.72
Cámara de aire ligeramente ventilada vertical 2cm	0.020	
Tabique de LH sencillo [40 mm < Espesor < 60 mm]	0.050	
Enlucido de yeso 1000 < d < 1300	0.020	

Tabla 5. Calidades constructivas de fachada. Fuente: *Elaboración propia.*

CUBIERTA PLANA		
Material	Espesor[m]	Transmitancia [W/m <sup>2</sup> K]
Plaqueta o baldosa cerámica	0.020	1.87
Mortero de cemento o cal para albañilería y para revoco/enlucido d > 2000	0.020	
Tabique de LH sencillo Gran Formato [40 mm < E < 60 mm]	0.050	
Cámara de aire ligeramente ventilada	0.020	
Enlucido de yeso 1000 < d < 1300	0.020	

Tabla 6. Calidades constructivas de cubierta plana. Fuente: *Elaboración propia.*

PARTICIÓN INTERIOR HORIZONTAL		
Material	Espesor[m]	Transmitancia [W/m <sup>2</sup> K]
Plaqueta o baldosa cerámica	0.020	1.82
Mortero de cemento o cal para albañilería y para revoco/enlucido d > 2000	0.020	
FU Entrevigado cerámico – Canto 250 mm	0.050	
Enlucido de yeso 1000 < d < 1300	0.025	
Yeso de altura dureza 900 < 1200	0.020	

Tabla 7. Calidades constructivas de partición interior horizontal. Fuente: *Elaboración propia*

PARTICIÓN INTERIOR VERTICAL		
Material	Espesor[m]	Transmitancia [W/m <sup>2</sup> K]
Enlucido de yeso 1000 < d < 1300	0.020	2.35
Tabicón de LH doble [60 mm < E < 90 mm]	0.080	
Enlucido de yeso 1000 < d < 1300	0.020	

Tabla 8. Calidades constructivas de partición interior vertical. Fuente: Elaboración propia.

SUELO EN CONTACTO CON EL TERRENO		
Material	Espesor[m]	Transmitancia [W/m <sup>2</sup> K]
Hormigón armado d > 2500	0.300	3.32
Mortero de cemento o cal para albañilería y para revoco/enlucido d > 2000	0.020	

Tabla 9. Calidades constructivas de suelo en contacto con el terreno. Fuente: Elaboración propia.

HUECOS	
Tipo de vidrio	Monolíticos en posición vertical
Tipo de marco	Metálicos en posición vertical
Fracción de hueco cubierto por el marco [%]	10.00
Permeabilidad del aire [m <sup>3</sup> /hm <sup>2</sup> ] a 100 Pa	50.00
Transmitancia [W/m <sup>2</sup> K]	5.70
Retranqueo	0
Elementos de protección solar	Persianas de lamas verticales <ul style="list-style-type: none"> <li>• Transmisividad = 0</li> <li>• Reflectividad = 0.87</li> </ul>

Tabla 10. Calidades constructivas de huecos. Fuente: Elaboración propia.

## 2.3 Descripción geométrica

### 2.3.1 Orientación del edificio

La descripción geométrica de un edificio es fundamental para poder realizar un buen análisis de éste. Uno de los parámetros más importantes es la orientación de las superficies que lo componen. Para definir la orientación de la fachada principal en HULC, se emplea el ángulo  $\alpha$  que es el formado por el norte geográfico y la normal exterior de la fachada, medido en sentido horario. Se distinguen 8 orientaciones según los sectores angulares contenidos en la siguiente figura:

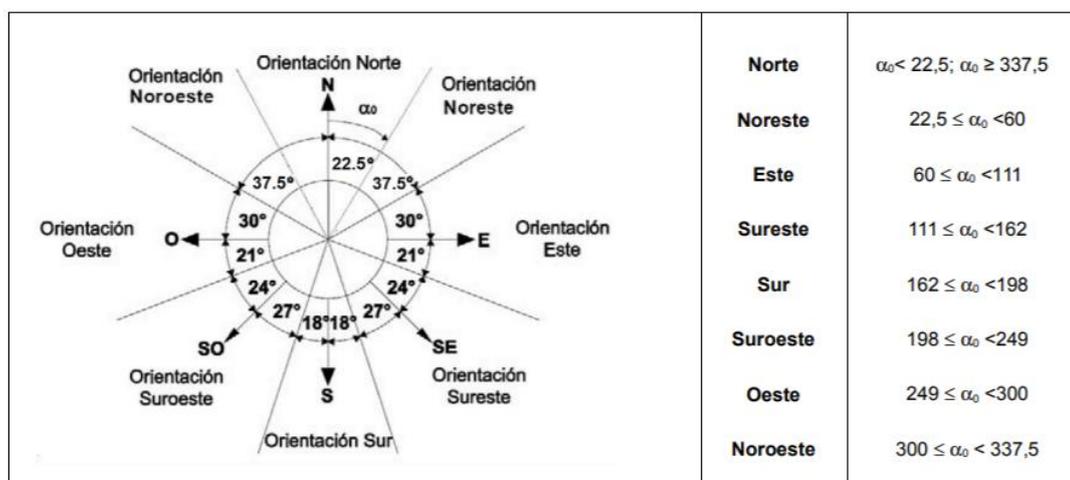


Figura 3. Orientaciones de las fachadas. Fuente: Documento Básico HE Ahorro de energía.

El ángulo  $\alpha$  de la fachada principal es aproximadamente  $0^\circ$ . A continuación, se muestra una tabla con las orientaciones y superficies de los distintos cerramientos que componen el edificio:

Tipo	Orientación	Superficie [m <sup>2</sup> ]	Superficie total [m <sup>2</sup> ]
Muros	Norte	139.75	574.74
	Noreste	-	
	Este	144.05	
	Sureste	-	
	Sur	137.99	
	Suroeste	-	
	Oeste	152.95	
	Noroeste	-	
Huecos	Norte	11.16	92.86
	Noreste	-	
	Este	38.84	
	Sureste	-	
	Sur	12.92	
	Suroeste	-	
	Oeste	29.94	
	Noroeste	-	
Suelo	-	489.67	489.67
Cubierta	-	489.67	489.67

Tabla 11. Superficies y orientaciones de los cerramientos. Fuente: Elaboración propia.

Con esta tabla podemos ver el porcentaje de huecos en cada fachada. La orientación Este es la que tiene mayor superficie de ventanas, ocupando un 21.2 % de la fachada.

También, hay que destacar la importancia que tiene la cubierta. No tiene ventanas, pero es la que tiene mayor superficie y recibe radiación solar prácticamente todo el día.

### 2.3.2 Planos de planta

Las dos plantas de las que dispone el edificio son sobre rasante. La planta baja tendrá un área de 489.67 m<sup>2</sup> y la planta primera de 385.77 m<sup>2</sup>, con una superficie total del edificio de 875.44 m<sup>2</sup>. Cada planta tiene una altura de 3.3 m. Al ser un edificio aislado, no tiene ningún edificio adosado, y por lo tanto no tiene medianeras. La cubierta se considera plana con una superficie de 510.37 m<sup>2</sup>. A continuación, se muestran los planos correspondientes a la planta baja (Figura 4) y a la planta primera (Figura 5).

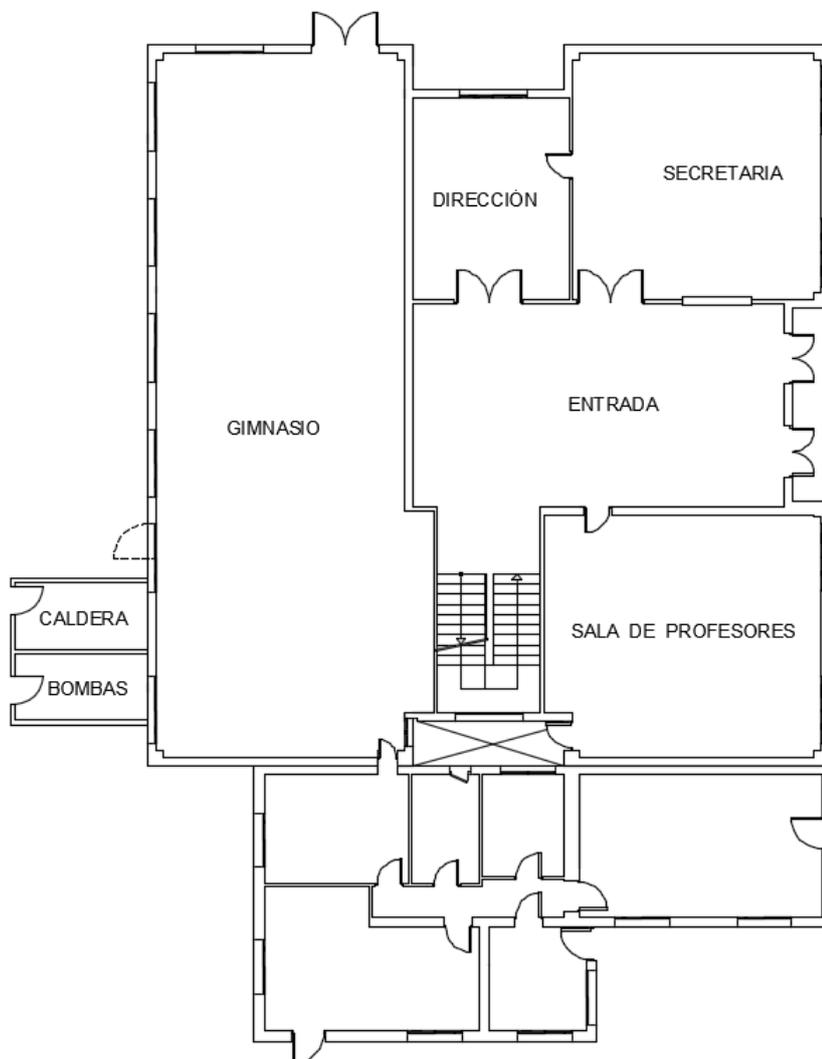


Figura 4. Plano de la planta baja del edificio. Fuente: CEIP Arias Montano.

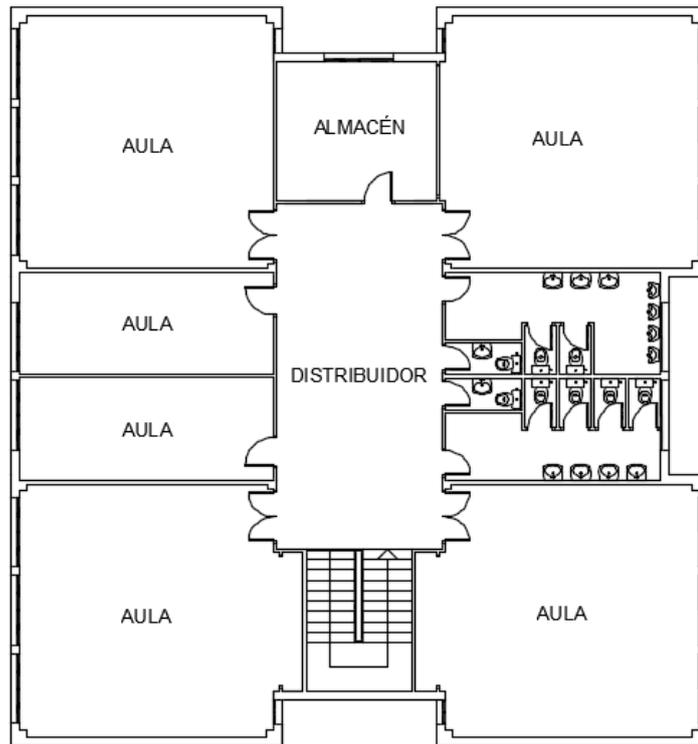


Figura 5. Plano de la planta primera del edificio. *Fuente: CEIP Arias Montano.*

### 2.3.3 Planos de situación

A continuación, se muestra un plano de situación dónde se puede apreciar la planta del colegio y los edificios colindantes. Es importante incluir dichos edificios colindantes porque van a afectar directamente sobre la energética del edificio. Sólo se han definido en HULC aquellos edificios que por su cercanía puedan hacer sombras al colegio. Dichos edificios han sido definidos como “elementos de sombra”.



Figura 6. Plano de situación del CEIP Arias Montano. Fuente: Google Maps.

En la siguiente imagen se muestra nuestro caso de estudio introducido en HULC. Para la definición de los elementos de sombra hemos necesitado la posición de los edificios en coordenadas y el número de plantas de cada edificio:

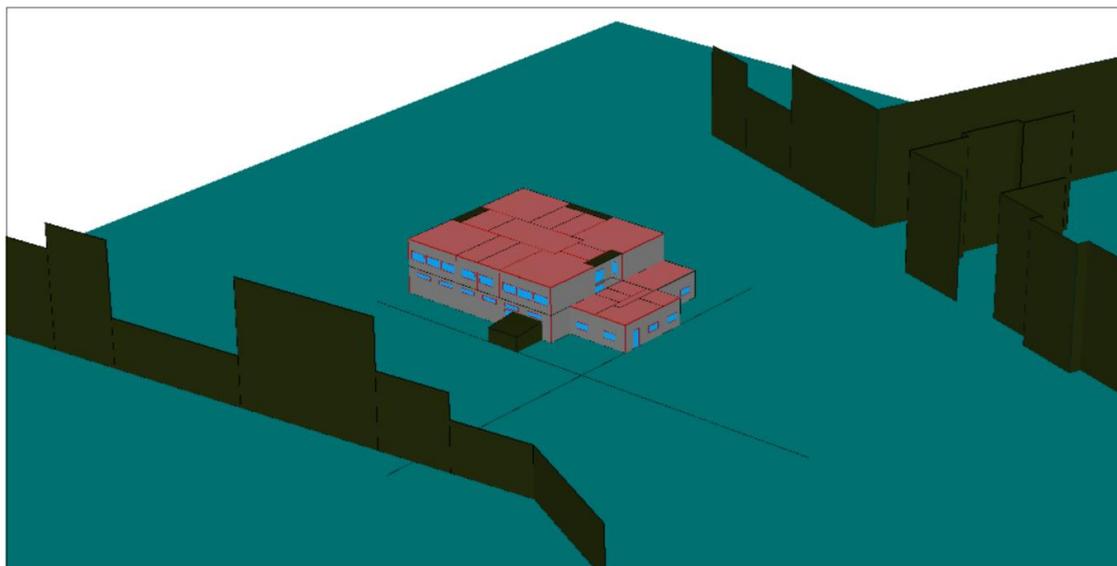


Figura 7. Representación del CEIP Arias Montano en HULC. Fuente: HULC

# 3 Evaluación energética inicial

## 3.1 Períodos de calefacción y refrigeración mediante oscilación libre

Un edificio en oscilación libre es aquel que carece de sistemas de acondicionamiento o que se encuentran desconectados. La temperatura del edificio en oscilación libre irá fluctuando en función de las condiciones climáticas exteriores. Normalmente, los edificios en oscilación libre presentan problemas de confort térmico, entendiéndose confort térmico como la satisfacción con el ambiente térmico. Las condiciones de confort térmico son temperaturas entorno a 20°C en invierno y a 25°C en verano.

Aunque no es habitual, hay edificios que no necesitan equipos de climatización, ya que se su temperatura en oscilación libre se encuentra en la banda de confort al menos el 96% de las horas totales de funcionamiento. En la situación inicial del CEIP Arias Montano no ocurre esto, ya que las calidades constructivas de la envuelta no son lo suficientemente buenas.

A continuación, se muestra una gráfica con la evolución de la temperatura media horaria a lo largo del año, en la gráfica se puede observar que la mayoría de las horas (84.33% del total) la temperatura se encuentra fuera la de banda de confort. En aquellos periodos dónde la temperatura sea superior a 25°C será necesario refrigeración, y donde la temperatura sea menor a 20°C será necesario calefacción.

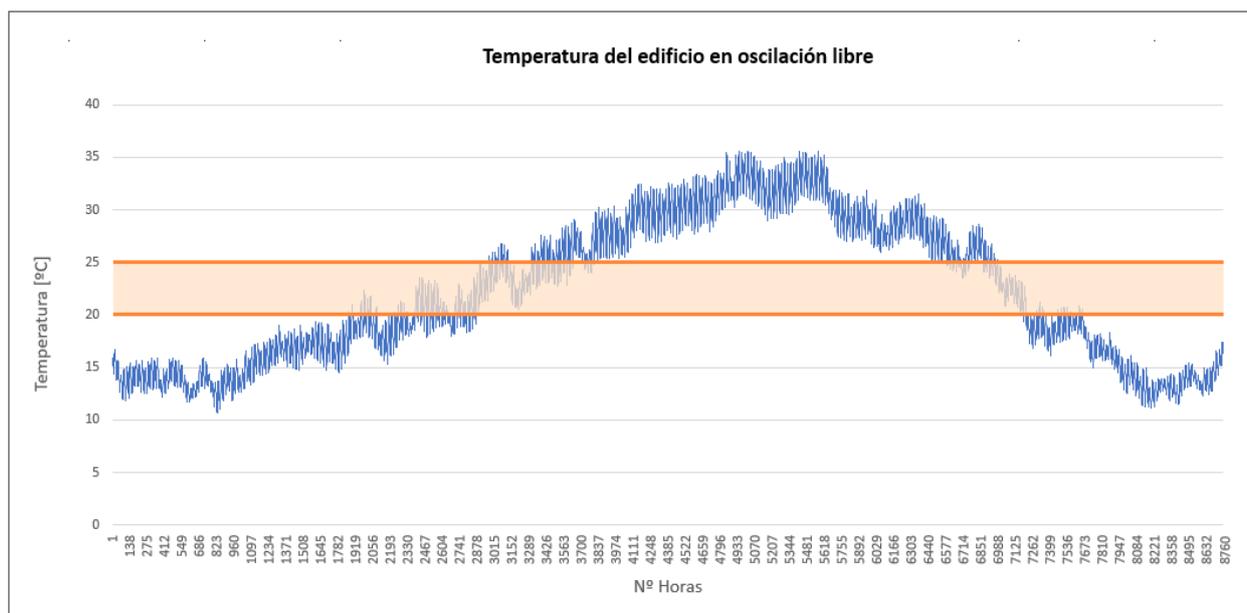


Figura 8. Temperatura del edificio en oscilación libre. Fuente: Elaboración propia.

### 3.2 Cálculo de demandas iniciales mediante HULC. Procedimiento detallado

Una vez definido el edificio en HULC se realiza la simulación, ya que HULC calcula las demandas del edificio a través de simulaciones dinámicas. Tras la simulación se generan una serie de archivos, entre todos ellos vamos a utilizar uno con extensión .RES. Para poder leer este archivo haremos uso de la Hoja de Excel “*Herramienta para la obtención de edificios de alta eficiencia*”, la cual leerá las demandas de calefacción y refrigeración. A continuación, se muestra una gráfica donde se aprecian las demandas mensuales de calefacción y refrigeración de manera conjunta:

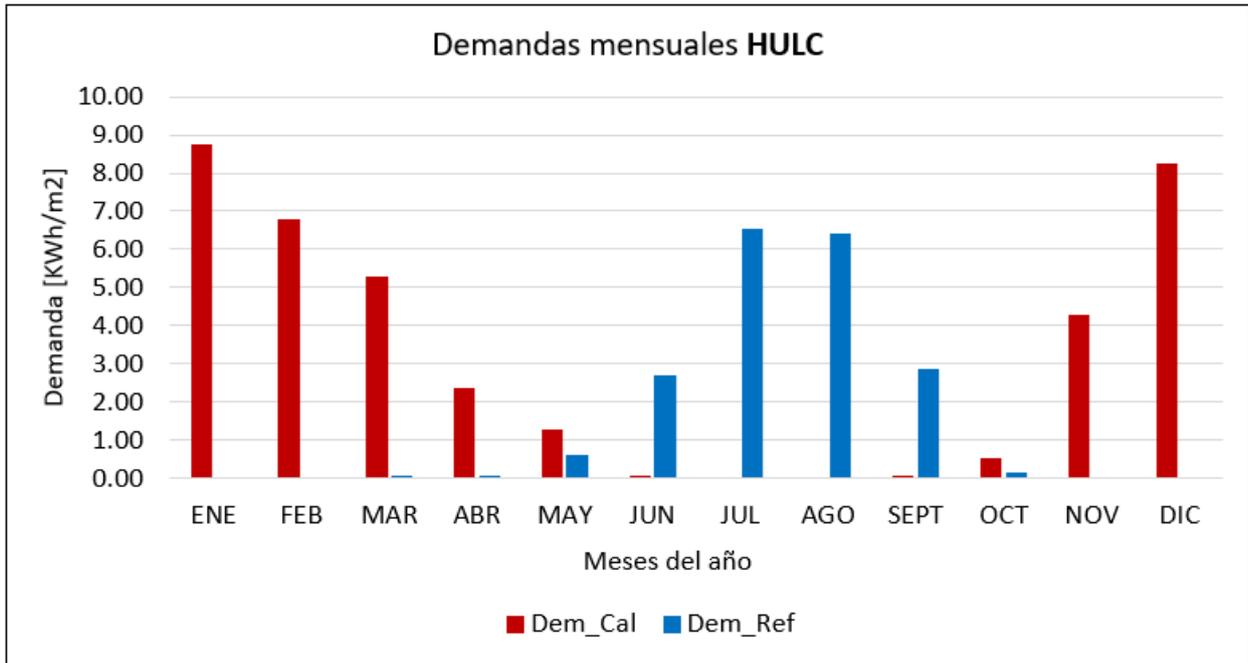


Figura 9. Demandas mensuales de calefacción y refrigeración.  
Fuente: Herramienta Excel para la obtención de edificios de alta eficiencia.

Una vez vista la figura anterior, realizaremos un estudio independiente para cada demanda.

#### 3.2.1 Demanda de calefacción

Se entiende por demanda de calefacción como la diferencia entre las pérdidas de calor del edificio y las ganancias solares y debidas a fuentes internas.

$$\text{Demanda\_Cal} = \text{Pérdidas} - \text{Ganancias} \quad \text{Siendo: Pérdidas} > \text{Ganancias}$$

En la siguiente figura se representan las pérdidas y ganancias anuales para el régimen de calefacción y la contribución de sus flujos:

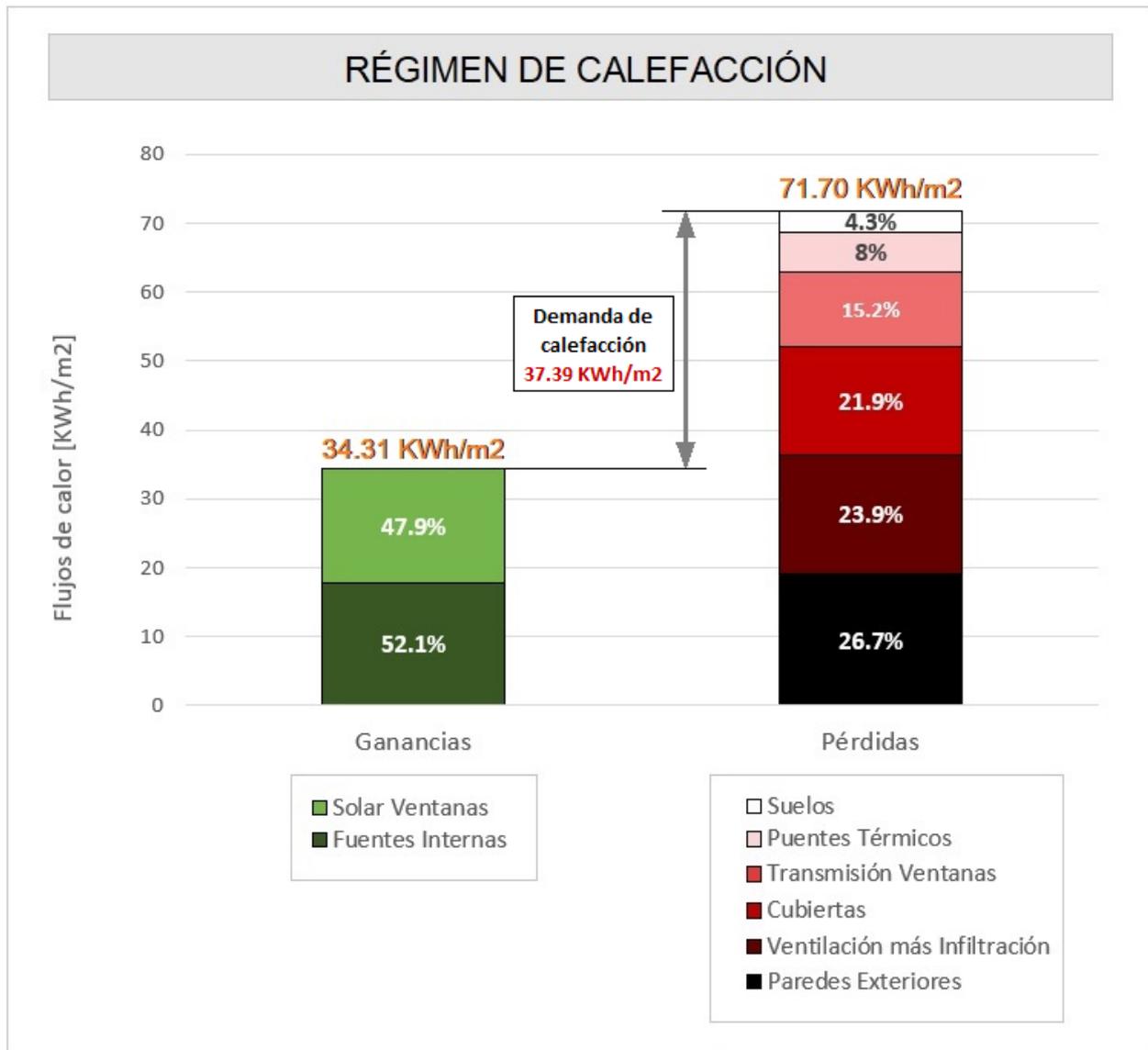


Figura 1. Ganancias y Pérdidas anuales en régimen calefacción. Fuente: *Elaboración propia.*

Como se puede apreciar en la Figura 10, las pérdidas son mayores que las ganancias, y la diferencia entre ambas es la demanda de calefacción, 37.39 kWh/m<sup>2</sup>·año. La demanda de calefacción es mayor a medida que aumentan las pérdidas, por lo que es interesante actuar sobre ellas para reducirlas. Las pérdidas a través de paredes exteriores, ventilación e infiltración y cubiertas son las que más peso tienen, entre ellas abarcan el 72.5% del total. Además, un aumento de las ganancias solares también contribuirá a reducir de la demanda de calefacción.

A continuación, se muestra la demanda de calefacción de manera mensual. La mayor demanda de calefacción se produce en el mes de enero, con un valor de 8.74 kWh/m<sup>2</sup>.

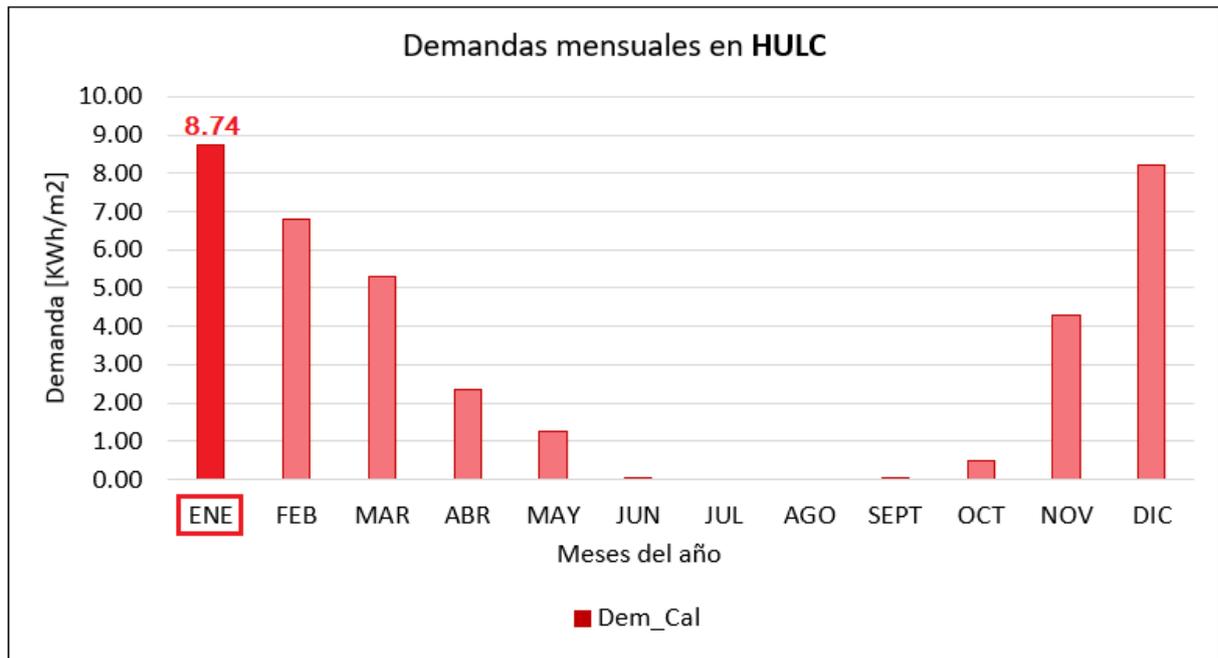


Figura 2. Demanda mensual de calefacción. .

Fuente: Herramienta Excel para la obtención de edificios de alta eficiencia.

### 3.2.2 Demanda de refrigeración

Se entiende por demanda de refrigeración como la diferencia entre las ganancias solares y debidas a fuentes internas y las pérdidas de calor del edificio.

$$\text{Demanda\_Ref} = \text{Ganancias} - \text{Pérdidas}$$

Siendo: Ganancias > Pérdidas

En la siguiente figura se representan las ganancias y pérdidas anuales para el régimen de refrigeración y la contribución de sus flujos:

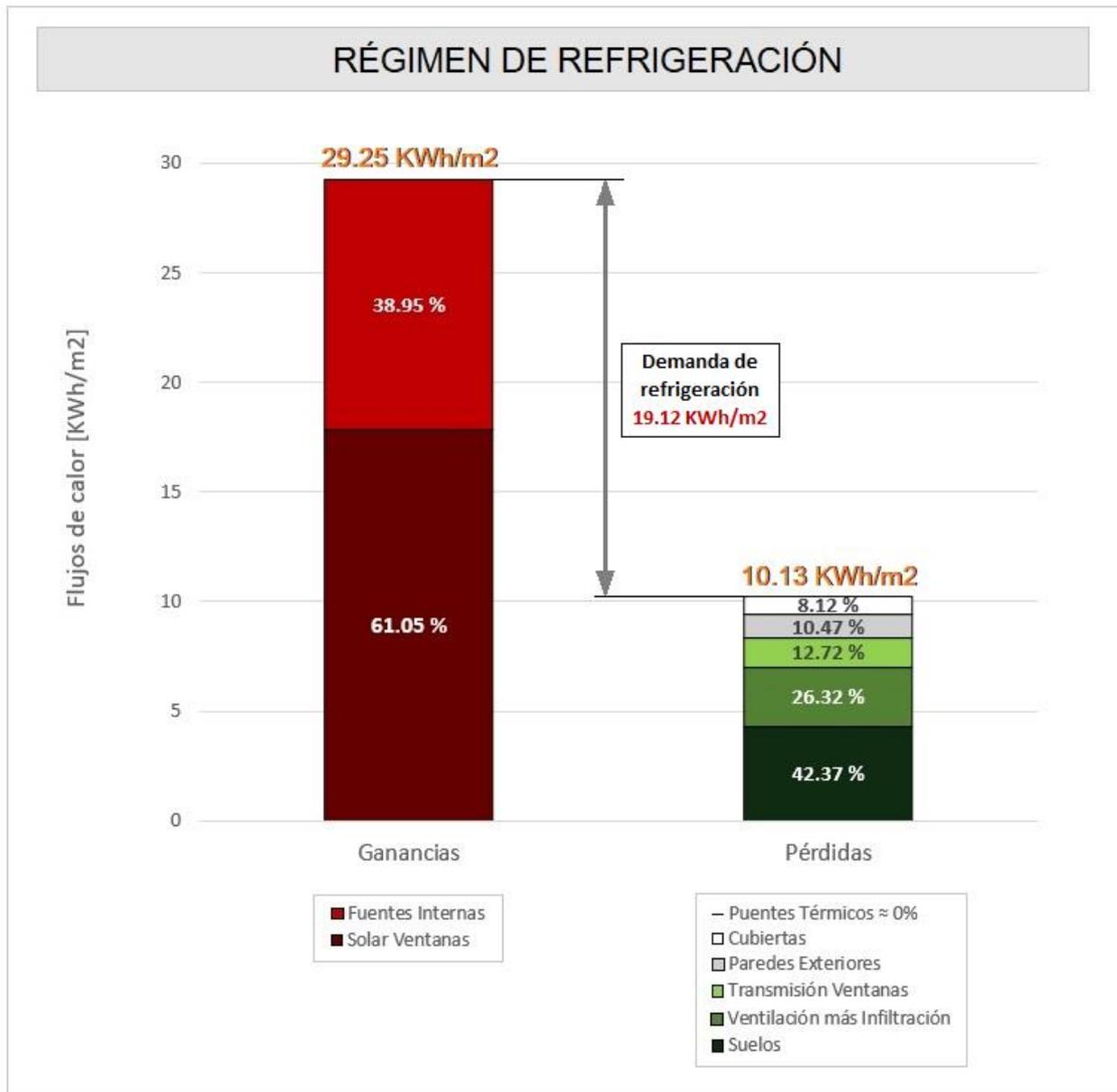


Figura 12. Ganancias y Pérdidas anuales en régimen refrigeración. Fuente: Elaboración propia.

Como se puede apreciar en la Figura 12, las ganancias son mayores que las pérdidas, y la diferencia entre ambas es la demanda de refrigeración, 19.12 KWh/m<sup>2</sup>·año. La demanda de refrigeración es mayor a medida que aumentan las ganancias, por lo que es interesante actuar sobre ellas para reducirlas. Nada más que las ganancias solares de las ventanas representan el 61.05% de las ganancias totales, por lo que si se quiere disminuir la demanda de refrigeración sería necesario estudiar e implementar medidas que las disminuyan.

A continuación, se muestra la demanda de refrigeración de manera mensual. La mayor demanda de refrigeración se produce en el mes de julio, con un valor de 6.50 KWh/m<sup>2</sup>.

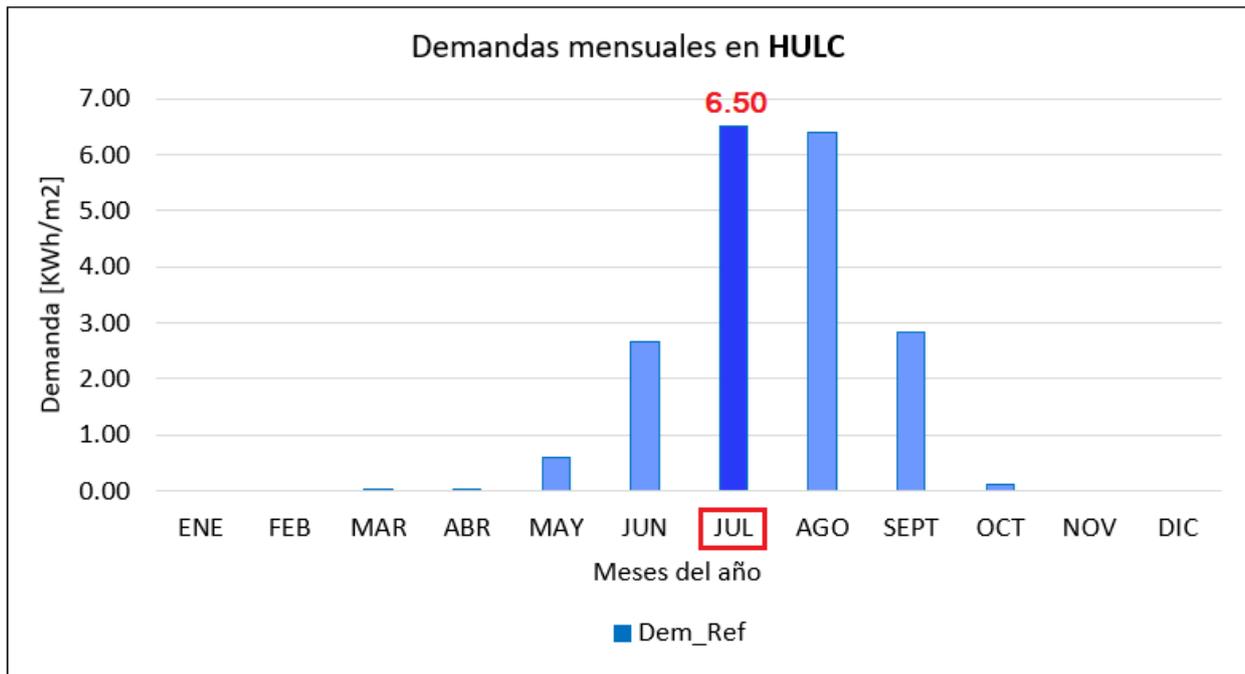


Figura 3. Demanda mensual de refrigeración. .

Fuente: Herramienta Excel para la obtención de edificios de alta eficiencia.

### 3.3 Cálculo de demandas iniciales mediante procedimiento simplificado

En este apartado se van a calcular las demandas de calefacción y de refrigeración mediante un procedimiento simplificado. Para ello, volveremos a usar la Hoja de Excel “Herramienta para la obtención de edificios de alta eficiencia”. De los archivos que se generan tras la simulación del edificio en HULC, la Hoja de Excel leerá uno con extensión .XML.

Las ecuaciones que se usan en el procedimiento simplificado son las siguientes:

$$Q_{cal} = \left( \sum_{i=1}^n U_i \cdot A_i + \rho_a \cdot C_{pa} \cdot ACH_{eq} \cdot V \right) - \left( \sum_{i=1}^{no} I_i \cdot \sum_{j=1}^{ne_i} A_{s,j,i} + \phi_a \cdot t \right) \cdot \eta$$

$$Q_{ref} = \sum_{i=1}^{no} I_i \cdot \sum_{j=1}^{ne_i} A_{s,j,i} + \phi_a \cdot t + \left( \sum_{i=1}^n U_i \cdot A_i + \rho_a \cdot C_{pa} \cdot ACH_{eq} \cdot V \right) - P_{nocturnas} \cdot \eta \cdot \varepsilon$$

$$P_{nocturnas} = \rho_a \cdot C_{pa} \cdot (ACH_{noct}) \cdot V \cdot GN$$

Siendo:

$\sum_{i=1}^n U_i \cdot A_i$  : Pérdidas de calor a través de cerramientos

$\rho_a \cdot C_{pa} \cdot ACH_{eq} \cdot V$  : Pérdidas de ventilación (infiltración/exfiltración)

$\sum_{i=1}^{no} I_i \cdot \sum_{j=1}^{ne_i} A_{s,j,i}$  : Ganancias solares

$\Phi_a \cdot t$  : Ganancias debidas a fuentes internas

$\eta$  : Factor de utilización

$\epsilon$  : Eficiencia

Las hipótesis que utilizan los procedimientos simplificados son conservadoras, es decir, colocan los resultados del lado de la seguridad. Por este motivo, las demandas obtenidas difieren bastante del modelo detallado ya que las ganancias solares están exageradas.

Para poder trabajar con el modelo simplificado, las demandas mensuales deben asemejarse lo máximo posible a las demandas del modelo detallado. Para ello es necesario hacer una corrección o calibrado calculando los siguientes coeficientes correctores.

- Coeficiente corrector de pérdidas:  $a_{inv}$ ,  $a_{ver}$
- Coeficiente corrector del área solar sur equivalente:  $b_{inv}$ ,  $b_{ver}$

Al aplicar estos coeficientes correctores, las ecuaciones de demanda de calefacción y refrigeración quedan de la siguiente manera:

$$Q_{cal} = \left( \sum_{i=1}^n U_i \cdot A_i + \rho_a \cdot C_{pa} \cdot ACH_{eq} \cdot V \right) \cdot a_{inv} - \left( \sum_{i=1}^{no} I_i \cdot \sum_{j=1}^{ne_i} A_{s,j,i} \cdot b_{inv} + \Phi_a \cdot t \right) \cdot \eta$$

$$Q_{ref} = \sum_{i=1}^{no} I_i \cdot \sum_{j=1}^{ne_i} A_{s,j,i} \cdot b_{ver} + \Phi_a \cdot t + \left( \sum_{i=1}^n U_i \cdot A_i + \rho_a \cdot C_{pa} \cdot ACH_{eq} \cdot V \right) \cdot a_{ver} - P_{noct} \cdot \eta \cdot \epsilon$$

Una vez corregido el procedimiento simplificado se podrá trabajar sobre él para hacer las mejoras.

### 3.3.1 Demanda de calefacción

Para la calibración se ha hecho coincidir la mayor demanda mensual de calefacción del modelo detallado (Julio, con 8.74 KWh/m<sup>2</sup>) con la demanda del mismo mes en el modelo simplificado, obteniendo así los siguientes coeficientes correctores para el régimen de calefacción:

$a_{inv}$	0.31
$b_{inv}$	0.02

En la Figura 14 se muestran las demandas calculadas mediante el modelo detallado (HULC) y las calculadas mediante el modelo simplificado (Herramienta para la obtención de edificios de alta eficiencia):

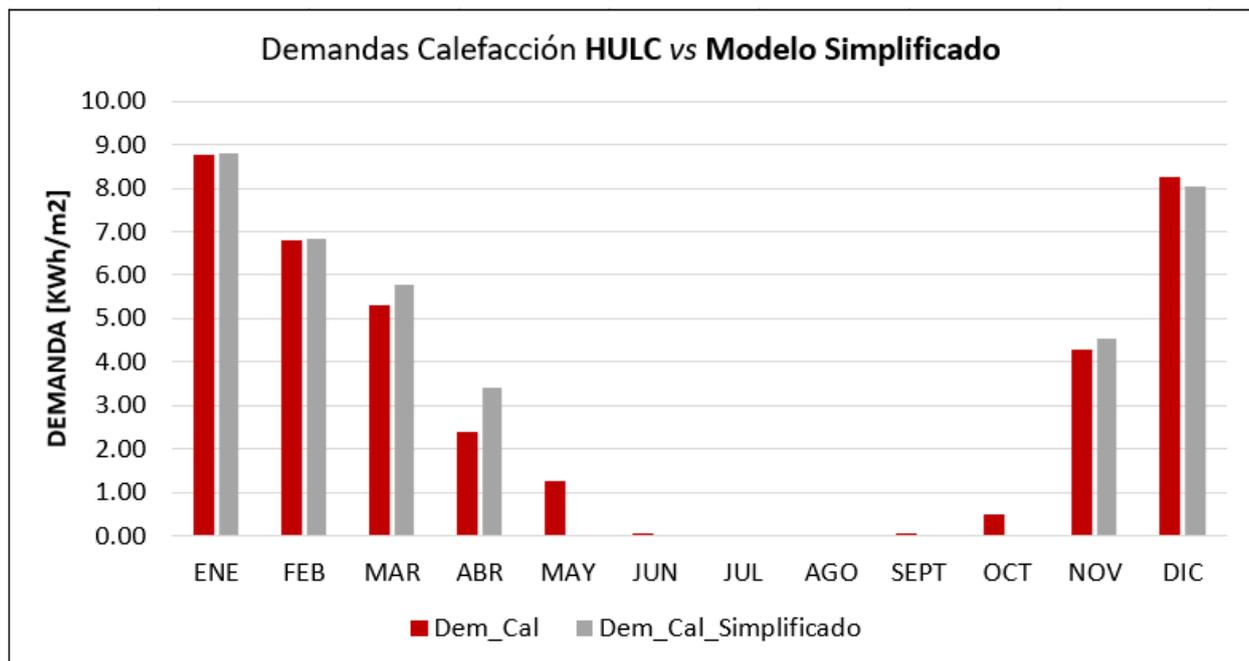


Figura 4. Demandas mensuales de calefacción. .

Fuente: Herramienta Excel para la obtención de edificios de alta eficiencia.

Como se puede observar, las demandas mensuales calculadas mediante el procedimiento simplificado se asemejan bastante a las obtenidas en HULC. El error que se comete al aceptar como válido el modelo simplificado es del 1.36.%.

### 3.3.2 Demanda de refrigeración

Para el régimen de refrigeración se ha realizado el mismo procedimiento que para el de calefacción, se ha hecho coincidir la mayor demanda mensual de refrigeración del modelo detallado (enero, con 6.50 KWh/m<sup>2</sup>) con la demanda del mismo mes en el modelo simplificado. Se han obtenido los siguientes coeficientes correctores para el régimen de refrigeración:

<b>a<sub>ver</sub></b>	0.13
<b>b<sub>ver</sub></b>	0.28

En la Figura 15 se muestran las demandas calculadas mediante el modelo detallado (HULC) y las calculadas mediante el modelo simplificado (Herramienta para la obtención de edificios de alta eficiencia):

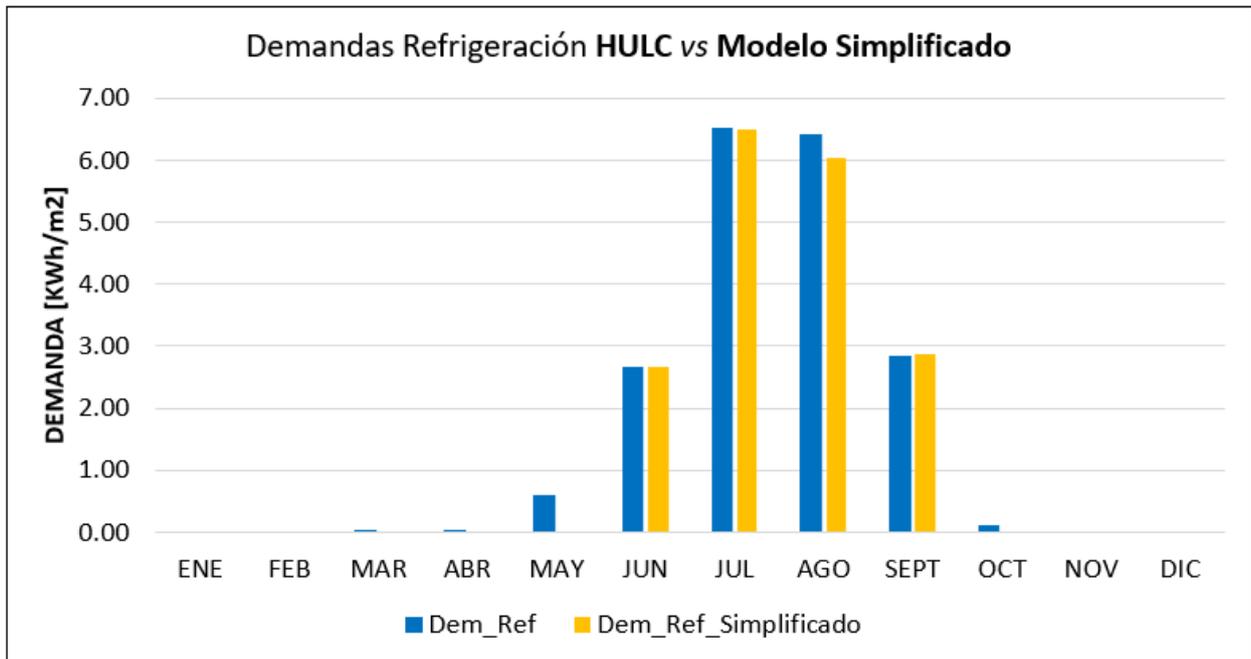


Figura 15. Demandas mensuales de refrigeración. .

Fuente: Herramienta Excel para la obtención de edificios de alta eficiencia.

Como se puede observar, las demandas mensuales calculadas mediante el procedimiento simplificado se asemejan bastante a las obtenidas en HULC. El error que se comete al aceptar como válido el modelo simplificado es del 1.20%.

A continuación, se muestran los valores de demanda anual de calefacción y refrigeración del modelo detallado y simplificado. Se puede apreciar que los valores son muy parecidos, siendo despreciable el error que se asume al considerar como válido el modelo simplificado.

	Modelo detallado (HULC)	Modelo simplificado	Error cometido
<b>Demanda de Calefacción (KWh/m²·año)</b>	37.39	36.88	1.36%
<b>Demanda de Refrigeración (KWh/m²·año)</b>	19.12	18.89	1.20%

Tabla 12. Comparativa demandas del modelo detallado vs simplificado.

Fuente: Elaboración propia.

### 3.4 Situación en relación con las exigencias de HE0

El HE0 limita el consumo de energía primaria no renovable ( $C_{ep,nren}$ ) y el consumo de energía primaria total ( $C_{ep,tot}$ ) en función de la zona climática de la localidad, del tipo de uso del edificio y, en caso de edificios existentes, del alcance de la intervención.

#### 3.4.1 Consumo de energía primaria no renovable, $C_{ep,nren}$

El consumo de energía primaria no renovable del edificio no superará el valor límite ( $C_{ep,nren,lim}$ ) obtenido en la siguiente tabla:

Zona climática de invierno					
$\alpha$	A	B	C	D	E
$70 + 8 \cdot C_{FI}$	$55 + 8 \cdot C_{FI}$	$50 + 8 \cdot C_{FI}$	$35 + 8 \cdot C_{FI}$	$20 + 8 \cdot C_{FI}$	$10 + 8 \cdot C_{FI}$

Tabla 13. Valor límite  $C_{ep,nren}$  [KWh/m<sup>2</sup>·año] para uso distinto del residencial privado.  
Fuente: DB-HE0.

Sabiendo que el colegio se encuentra en la ciudad de Sevilla, con zona climática B4, y que el valor de las cargas debido a fuentes internas ( $C_{FI}$ ) es 4.26 W/m<sup>2</sup>, obtenemos un valor límite  $C_{ep,nren,lim} = 84.08$  KWh/m<sup>2</sup>·año.

### 3.4.2 Consumo de energía primaria total, $C_{ep,tot}$

El consumo de energía primaria total del edificio no superará el valor límite ( $C_{ep,tot,lim}$ ) obtenido en la siguiente tabla:

Zona climática de invierno					
$\alpha$	A	B	C	D	E
$165 + 9 \cdot C_{FI}$	$155 + 9 \cdot C_{FI}$	$150 + 9 \cdot C_{FI}$	$140 + 9 \cdot C_{FI}$	$130 + 9 \cdot C_{FI}$	$120 + 9 \cdot C_{FI}$

Tabla 14. Valor límite  $C_{ep,tot}$  [KWh/m<sup>2</sup>·año] para uso distinto del residencial privado.  
Fuente: DB-HE0.

A partir de esta tabla, obtenemos un valor límite  $C_{ep,tot,lim} = 188.34$  KWh/m<sup>2</sup>·año.

## 3.5 Situación en relación con las exigencias de HE1

La HE1 establece una serie de exigencias que debe de cumplir la envolvente térmica para limitar las necesidades de energía primaria:

### 3.5.1 Transmitancia de la envolvente térmica, $K_{lim}$

Con el objetivo de limitar la demanda de calefacción se recurre al parámetro  $K_{lim}$ . Para entender mejor este apartado, es importante dejar claro la terminología que vamos a emplear

- Llamaremos  $U_m$  a la transmitancia térmica media de la envuelta (media entre las transmitancias térmicas de muros, cubierta, suelo y ventanas)

$$U_m = \frac{\sum A_i \cdot U_i}{A_T}$$

- Llamaremos  $K$  a la transmitancia térmica global de la envolvente incluidos los puentes térmicos

$$K = \frac{\sum A_i \cdot U_i + \sum \Phi_i \cdot L}{A_T} = U_m + U_{PT}$$

El DB-HE1 establece para cada zona climática las exigencias mínimas de transmitancias térmicas ( $U_{min}$ ) que deben cumplir cada elemento de la envolvente. Las transmitancias térmicas de cada elemento no podrán ser superior al valor  $U_{min}$ . Los valores  $U_{min}$  para la ciudad de Sevilla, con zona climática B4 son los siguientes:

Valores mínimos de <i>transmitancias térmicas</i> , $U_{min}$ [W/m²K]						
Elemento	Zona climática de invierno					
	$\alpha$	A	B	C	D	E
Muros y suelos en contacto con el aire exterior ( $U_s, U_M$ )	0,80	0,70	0,56	0,49	0,41	0,37
Cubiertas en contacto con el aire exterior ( $U_C$ )	0,55	0,50	0,44	0,40	0,35	0,33
Muros, suelos y cubiertas en contacto con espacios no habitables o con el terreno ( $U_T$ ) Medianerías o particiones interiores pertenecientes a la <i>envolvente térmica</i> ( $U_{MD}$ )	0,90	0,80	0,75	0,70	0,65	0,59
<i>Huecos</i> (conjunto de marco, vidrio y, en su caso, cajón de persiana) ( $U_H$ )*	3,2	2,7	2,3	2,1	1,8	1,80
Puertas con superficie semitransparente igual o inferior al 50%	5,7	5,7	5,7	5,7	5,7	5,7

Tabla 15. Valores mínimos de transmitancias térmicas. *Fuente: DB-HE1*

A parte de que cada elemento cumpla con unas exigencias mínimas o básicas de transmitancias térmicas, la envolvente del edificio en su conjunto (incluido puentes térmicos) debe cumplir con un valor límite de transmitancia térmica global ( $K_{lim}$ ), que depende de la compacidad y de la zona climática. El coeficiente global de transmisión térmica de la envolvente ( $K$ ) no podrá superar ese valor límite. A continuación, se muestran los valores de  $K_{lim}$  para uso distinto del residencial privado.

Valor límite $K_{lim}$ [W/m²K] para uso distinto del residencial privado							
	Compacidad $V/A$ [m³/m²]	Zona climática de invierno					
		$\alpha$	A	B	C	D	E
Edificios nuevos. Ampliaciones. Cambios de uso. Reformas en las que se renueve más del 25% de la superficie total de la <i>envolvente térmica</i> final del edificio	$V/A \leq 1$	0,96	0,81	0,76	0,65	0,54	0,43
	$V/A \geq 4$	1,12	0,98	0,92	0,82	0,70	0,59

Los valores límite de las compacidades intermedias ( $1 < V/A < 4$ ) se obtienen por interpolación.

Tabla 16. Valores límite de transmitancias de la envuelta ( $K_{lim}$ ). *Fuente: DB-HE1*.

Para calcular el valor límite ( $K_{lim}$ ) del edificio tenemos que ver primero que compacidad tiene:

$$\text{Compacidad} = \frac{\text{Volumen}}{\text{Área}_{\text{transf}}} = \frac{2888.99 \text{ m}^3}{1646.94 \text{ m}^2} = 1.75$$

Por lo tanto, como  $1 \leq V/A=1.75 \leq 4$ , tenemos que interpolar en la Tabla 16 con los valores correspondientes a la zona climática de invierno B, obteniendo un valor de  $K_{lim} = 0.8$

El edificio tiene un coeficiente global de transmisión de calor  $K = U_m + U_{PT} = 2.46 + 0.3165 = 2.78$ . Como  $K = 2.78 > K_{lim}$ , no cumple con la exigencia de HE1

$K_{\text{edificio}}$	$K_{lim}$	Exigencia $K_{lim}$ HE1
2.78	0.8	<b>NO CUMPLE</b>

Tabla 17. Verificación exigencia  $K_{lim}$  del HE1. *Fuente: elaboración propia.*

### 3.5.2 Control solar de la envolvente térmica, $q_{sol}$

Para limitar la demanda de refrigeración del edificio se recurre al parámetro de control solar ( $q_{sol;jul}$ ). Este parámetro representa las ganancias solares para el mes de julio por  $m^2$  de superficie acondicionada. No podrá superar los valores límite de la tabla 18:

Valor límite del parámetro de control solar, $q_{sol;jul,lim}$ [kWh/m <sup>2</sup> ·mes]	
Uso	$q_{sol;jul}$
Residencial privado	2,00
Otros usos	4,00

Tabla 18. Valores límite  $q_{sol;jul}$ . Fuente: DB-HE1.

$$q_{sol;jul} = \frac{ASSE_{julio}}{Area_{acond}} \cdot I_{sur} \cdot b_{ver} = \frac{134,15 \text{ m}^2}{875,45 \text{ m}^2} \cdot 90 \text{ kWh/m}^2 \cdot \text{mes} \cdot 0,28 = 3,85 \text{ kWh/m}^2 \cdot \text{mes}$$

Como el edificio tiene un parámetro de control solar ( $q_{sol;jul} = 3,85 > q_{sol;jul,lim}$ ), cumple con la exigencia de HE1

$q_{sol;jul;edificio}$	$q_{sol;jul;limite}$	Exigencia $q_{sol;jul}$ HE1
3.85	4	CUMPLE

Tabla 19. Verificación exigencia  $q_{sol;jul}$  del HE1. Fuente: elaboración propia.

### 3.5.3 Permeabilidad al aire de la envolvente térmica

No aplica. Sólo será obligatorio realizar un ensayo de permeabilidad al aire para edificios de uso residencial privado con una superficie útil superior a  $120 \text{ m}^2$ .

## 3.6 Clase de eficiencia asociada a las demandas de calefacción y refrigeración

Para obtener la calificación energética de un edificio se establece una escala de letras, que van desde la A (edificio más eficiente) a la letra G (edificio menos eficiente).

Para edificios de uso distinto al residencial privado, la calificación energética se obtendrá a partir de un índice de eficiencia energética “C”, este índice compara el consumo anual de energía primaria no renovable del edificio objeto con el del edificio de referencia. El edificio de referencia tiene la misma geometría, dimensiones, orientación y obstáculos remotos, pero con las calidades constructivas del CTE.

$$C = \frac{C_{ep,nren}|_{edif. \text{ objeto}}}{C_{ep,nren}|_{edif. \text{ referencia}}}$$

A continuación, procedemos a calcular la calificación energética en consumo de energía primaria no renovable:

$$C_{ep,nren}|^{CAL} = \frac{D_{CAL}}{\eta_{CAL}} \cdot FP_{EF \rightarrow EP,nren}|^{CAL} = \frac{36.88}{0.7} \cdot 1.179 = 62.12 \text{ KWh/m}^2 \cdot \text{año}$$

$$C_{ep,nren}|^{REF} = \frac{D_{REF}}{\eta_{REF}} \cdot FP_{EF \rightarrow EP,nren}|^{REF} = \frac{18.89}{1.7} \cdot 1.954 = 21.71 \text{ KWh/m}^2 \cdot \text{año}$$

$$C_{ep,nren}|^{ILUM} = 26.09 \text{ KWh/m}^2 \cdot \text{año} \quad (\text{Dato obtenido en el certificado de eficiencia energética de HULC})$$

INDICADOR GLOBAL		INDICADORES PARCIALES			
	<p>Consumo global de energía primaria no renovable (kWh/m²·año)<sup>1</sup></p>	CALEFACCIÓN		ACS	
		Energía primaria no renovable calefacción (kWh/m²·año)	F	Energía primaria no renovable ACS (kWh/m²·año)	-
		62.12		0.00	
		REFRIGERACIÓN		ILUMINACIÓN	
Energía primaria no renovable refrigeración (kWh/m²·año)	B	Energía primaria no renovable iluminación (kWh/m²·año)	C		
21.71		26.09			

Tabla 20. Calificación energética del edificio en consumo de energía primaria no renovable.  
Fuente: Certificado de eficiencia energética de HULC.

Los indicadores parciales obtenidos en la situación inicial son: “F” referente a energía primaria no renovable de calefacción, “B” a refrigeración y “C” a iluminación. El indicador global resulta de la suma de los indicadores parciales, obteniendo una letra “G”. Esta mala calificación es entendible ya que se trata de un edificio de hace 50 años.



## 4 Reducción de la demanda. Propuestas de mejora

Para analizar las distintas propuestas de mejora es imprescindible conocer primero los parámetros característicos del edificio y los límites entre los que deben estar comprendidos. Estos límites muestran el intervalo entre las exigencias de la legislación y un valor de alta eficiencia. En ocasiones, el valor de alta eficiencia no es económicamente rentable.

CALEFACCIÓN			
Parámetro característico	Valor edificio	Límite inferior	Límite superior
Compacidad terciarios ( $V/A_{\text{transf}}$ )	1.75	2	4.5
$U_m$ (W/m <sup>2</sup> K)	2.46	0.4	0.76 a 0.92 (*)
$\Delta U_m$ debido a Puentes térmicos	0.3165	0.07	0.35
$ACH_{\text{nom}}$ (1/h) terciarios	1.36	0.4	0.6
$n_{50}$	5.51	1	6
$ACH_{\text{eq}}$ (1/h)	1.57	0.2	0.8

Tabla 21. Parámetros característicos régimen calefacción. Fuente: Elaboración propia.

$$(*) 0.76 \text{ a } 0.92 \Rightarrow 0.76 + (0.92 - 0.76) * \frac{V/A_{\text{transf}}}{ACH_{\text{eq}}} = 0.76 + (0.92 - 0.76) * \frac{1.75}{4} = 0.83$$

REFRIGERACIÓN			
Parámetro característico	Valor edificio	Límite inferior	Límite superior
$q_{\text{sol};\text{jul}} = (ASSE / A_a) \cdot b_{\text{ver julio zona 4}}$	0.042	0.01	0.044
$ACH_{\text{noche}}$ espacios ocupados	4	6	15
Eficiencia de intercambio	0.4	0.30	0.60

Tabla 22. Parámetros característicos régimen refrigeración. Fuente: Elaboración propia.

Como se puede observar, hay parámetros característicos que no se encuentran dentro del rango, como la compacidad ( $V/A_t$ ), la transmitancia media de la envuelta ( $U_m$ ), el  $ACH_{nom}$  y el  $ACH_{noche}$ . Adoptando medidas de mejora conseguiremos que estos valores se encuentren dentro de los rangos recomendados o que se aproximen lo máximo posible.

Las propuestas de mejora que ayudarán a reducir la demanda energética son las siguientes:

- Tratamiento de los puentes térmicos
- Mejora de los elementos de la envuelta
- Estrategias de ventilación
- Control solar
- Ventilación nocturna

## 4.1 Tratamiento de los puentes térmicos

En primer lugar, es necesario hacer un análisis de los distintos tipos de puentes térmicos que hay en el edificio, conocer sus longitudes y sus transmitancias térmicas lineales. Estos datos se obtuvieron al cargar el archivo .XML en la “Herramienta para la obtención de edificios de alta eficiencia”. A continuación, se establecen 2 propuestas de mejoras de las transmitancias térmicas lineales determinadas por el Grupo de Termotecnia de la Universidad de Sevilla para cada puente térmico. Por último, se calculan las transmitancias globales de los puentes térmicos ( $U_{PT}$ ) para cada escenario de mejora:

Tipo de puente térmico	L $\equiv$ Longitud [m]	Phi $\equiv$ Transmitancia térmica lineal [W/m·K]		
		TTL <sub>0</sub> (Situación inicial)	TTL <sub>1</sub> (Mejora 1)	TTL <sub>2</sub> (Mejora 2)
Frente de forjado	77.10	0.7	0.19	0.19
Forjado de cubierta	253.85	0.96	0.24	0.24
Esquina cóncava (entrante)	52.80	-0.16	-0.16	-0.16
Esquina convexa (saliente)	66	0.11	0.11	0.11
Pilar	1	1.2	0.20	0.20
Unión solera-pared exterior	101.96	0.49	0.15	0.15
Hueco ventana	294.40	0.59	0.1	0.05
$\sum \text{Phi} \cdot L$ [W/K]		521.33	119.32	104.59
$\Delta U_m = U_{PT} = \frac{\sum \text{Phi} \cdot L}{A_{tot}}$ [W/m <sup>2</sup> K]		<b>0.3165</b>	<b>0.0724</b>	<b>0.0635</b>

Tabla 23. Propuestas de mejora puentes térmicos. Fuente: Elaboración propia.

## 4.2 Mejora de los elementos de la envuelta

La envuelta del edificio está compuesta por los muros, el suelo, la cubierta y las ventanas. El objetivo de mejorar la envuelta es reducir la transmitancia térmica ( $U$ ) de cada componente. Esto se conseguirá añadiendo aislamiento térmico a los muros, suelos y cubierta. Las ventanas se sustituirán por otras con acristalamientos y marcos de mayor calidad.

Para cada elemento de la envolvente, en función de la zona climática, se han planteado 3 posibles paquetes constructivos o mejoras de las transmitancias térmicas (valores “mínimos”, “recomendados” y de “alta eficiencia”). Los valores “mínimos”, como ya se ha visto en el apartado 3.5.1, corresponden con las exigencias mínimas establecidas en el DB-HE1. El paquete constructivo de “alta eficiencia”, son unos valores que obtuvieron el Grupo de Termotecnia del Departamento de Ingeniería Energética de la Universidad de Sevilla en un estudio sobre coste óptimo para saber el valor de alta eficiencia del edificio. Por último, los valores “recomendados” corresponden a la media entre los valores “mínimos” y los de “alta eficiencia”.

		Paquetes constructivos – $U(W/m^2K)$		
		Min.	Recom.	Alta ef.
$U_{\text{muros}}$	A	0.70	0.50	0.30
	B	0.56	0.42	0.27
	C	0.49	0.34	0.18
	D	0.41	0.30	0.18
	E	0.37	0.28	0.18
$U_{\text{cubierta}}$	A	0.50	0.37	0.23
	B	0.44	0.33	0.21
	C	0.40	0.28	0.15
	D	0.35	0.25	0.15
	E	0.33	0.24	0.15
$U_{\text{suelo}}$	A	0.70	0.54	0.37
	B	0.56	0.44	0.32
	C	0.49	0.36	0.22
	D	0.41	0.30	0.19
	E	0.37	0.28	0.19
$U_{\text{ventanas}}$	A	3.60	3.10	2.60
	B	3.10	2.60	2.10
	C	2.60	2.20	1.80
	D	2.30	1.85	1.40
	E	1.80	1.55	1.30

Tabla 24. Transmitancia de los elementos de la envuelta según zonas climáticas.

*Fuente: Elaboración propia*

Haciendo uso de la tabla anterior, se muestran los valores de transmitancias térmicas “mínimos”, “recomendados” y de “alta eficiencia” de la zona climática B. Además, también se muestran los valores de transmitancia térmica del edificio en la situación inicial y las transmitancias medias  $U_m$  de la envuelta para cada paquete constructivo.

Tipo	Situación inicial	Transmitancias térmicas zona climática B (W/m <sup>2</sup> ·K)		
		Min.	Recom.	Alta ef.
U <sub>muros</sub>	1.72	0.56	0.42	0.27
U <sub>cubierta</sub>	1.87	0.44	0.33	0.21
U <sub>suelo</sub>	3.32	0.56	0.44	0.32
U <sub>ventanas</sub>	5.70	3.10	2.60	2.10
<b>U<sub>m</sub></b>	<b>2.46</b>	<b>0.667</b>	<b>0.522</b>	<b>0.370</b>

Tabla 25. Transmitancias térmicas zona climática B. *Fuente: Elaboración propia.*

Como se observa en la Tabla 25, el valor de la transmitancia térmica media del edificio en la situación inicial ( $U_m=2.46$  W/m<sup>2</sup>K) es superior al mínimo exigido por el DB-HE1 ( $U_{m,min} = 0.667$  W/m<sup>2</sup>K) para la zona climática B.

Según las exigencias de HE1 que vimos en el apartado 3.5.1, aparte de que cada elemento de la envolvente cumpla con unas exigencias mínimas o básicas de transmitancias térmicas, la envolvente del edificio en su conjunto (incluido puentes térmicos) debe cumplir con un valor límite de transmitancia térmica global ( $K_{lim}$ ), que en este caso es 0.8. El coeficiente global de transmisión de calor de la envolvente (K) del edificio no podrá superar ese valor límite.

A continuación, en la Tabla 26, se muestran diferentes opciones del coeficiente global de transmisión de la envolvente (K), éstos se obtienen mediante combinaciones entre las transmitancias térmicas medias ( $U_m$ ) de los paquetes constructivos “mínimo”, “recomendado” y de “alta eficiencia” y las transmitancias térmicas de los 3 escenarios de puentes térmicos planteados en la tabla 23 (situación actual, mejora 1 y mejora 2).

El orden de prioridad de la toma de decisiones es el siguiente:

- 1º) Mantener los puentes térmicos de la situación inicial e intervenir sólo en la envuelta con los valores de transmitancias térmicas medias ( $U_m$ ) de los paquetes constructivos “mínimo”, “recomendado” y de “alta eficiencia”
- 2º) Si los valores de K obtenidos en el paso anterior son superiores al  $K_{lim}$ , intervenimos con las mejoras de los puentes térmicos (mejora 1 y 2).
- 3º) Si tampoco fuera posible cumplir el valor de  $K_{lim}$  con la mejoras de los puentes térmicos, se admitirían valores de la envuelta por debajo de los de “alta eficiencia”.

		$U_{PT,TTL0}$	$U_{PT,TTL1}$	$U_{PT,TTL2}$
		0.3165	0.0724	0.0635
$U_{m, \min}$	0.667	$K_1$	$K_4$	$K_7$
$U_{m, \text{recom}}$	0.522	$K_2$	$K_5$	$K_8$
$U_{m, \text{Alta ef.}}$	0.370	$K_3$	$K_6$	$K_9$

Tabla 26. Combinaciones del coeficiente global de transmisión térmica (K). Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 27 se muestran los valores de K obtenidos de las diferentes combinaciones. El valor K del edificio no puede superar  $K_{lim}=0.8$ . Como  $K_2=0.838 > K_{lim}$  no podría ser, y como  $K_3=0.687$ , cumpliríamos en exceso la exigencia, por lo que vamos a crear un nuevo paquete constructivo llamado  $K_{lim}$  comprendido entre los paquetes “recomendados” y de “alta eficiencia” y con TTL0, en el que la K del edificio sea igual a la  $K_{lim}$ . La transmitancia térmica media asociada a K es  $U_m=0.483$ .

Para la realización de los cálculos, he de recordar que  $K=U_m + U_{PT}$ .

		$U_{PT,TTL0}$	$U_{PT,TTL1}$	$U_{PT,TTL2}$
		0.3165	0.0724	0.0635
$U_{m, \min}$	0.667	0.984	0.739	0.731
$U_{m, \text{recom}}$	0.522	0.838	0.595	0.586
$U_{m, Klim}$	0.483	$K=(K_{lim}=0.8)$		
$U_{m, \text{Alta ef.}}$	0.370	0.687	0.442	0.434

Tabla 27. Obtención del nuevo paquete constructivo Klim. Fuente: Elaboración propia.

Una vez obtenido el valor de transmitancia media de la envolvente  $U_{m,Klim}$ , calculamos las transmitancias térmicas de cada uno de los componentes: muros, cubierta, suelo y ventanas. Sabiendo que el paquete constructivo Klim se encuentra entre los paquetes constructivos “recomendado” y el de “alta eficiencia”, realizamos la ecuación de la recta para cada componente de la envuelta a partir de las transmitancias térmicas “recomendado” y “alta eficiencia” de la Tabla 22.

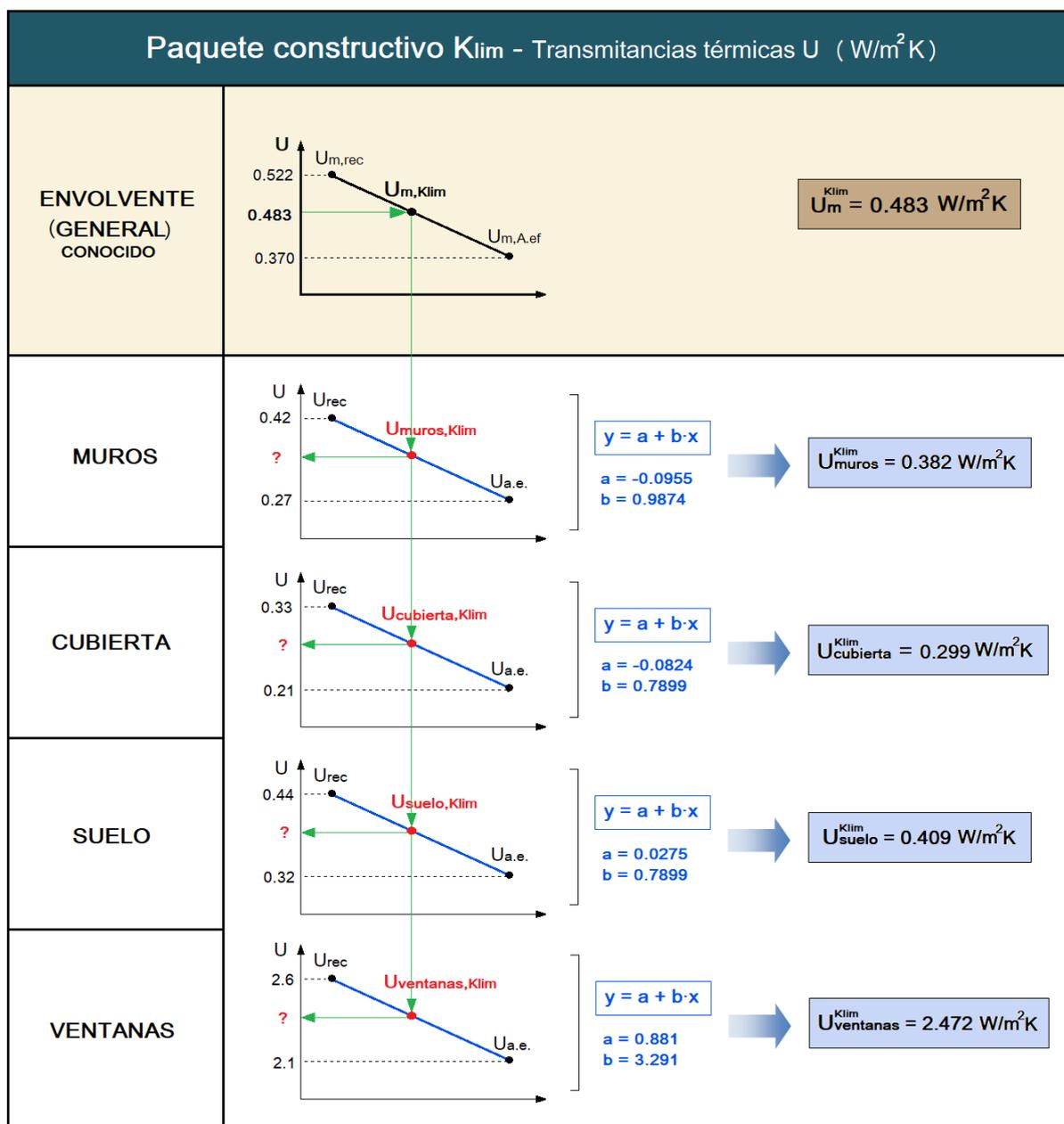


Tabla 28. Transmitancias térmicas del paquete constructivo Klim. Fuente: Elaboración propia.

A continuación, a modo de resumen, se muestra una tabla con todos los paquetes constructivos. En ella también aparece el paquete constructivo Klim que cumple con las exigencias de la HE1.

Tipo	Transmitancias térmicas (W/m <sup>2</sup> ·K)				
	Situación inicial	Min.	Recom.	Klim	Alta ef.
U <sub>muros</sub>	1.72	0.56	0.42	<b>0.382</b>	0.27
U <sub>cubierta</sub>	1.87	0.44	0.33	<b>0.299</b>	0.21
U <sub>suelo</sub>	3.32	0.56	0.44	<b>0.409</b>	0.32
U <sub>ventanas</sub>	5.70	3.10	2.60	<b>2.472</b>	2.10
<b>U<sub>m</sub></b>	2.46	0.667	0.522	<b>0.483</b>	0.370

Tabla 29. Transmitancias térmicas de todos los paquetes constructivos. Fuente: Elaboración propia.

## 4.3 Estrategias de ventilación

### 4.3.1 Situación inicial

Se han propuesto tres mejoras para reducir el  $ACH_{equivalente}$ : aumentar la estanqueidad del edificio, controlar los caudales de ventilación en función de las necesidades reales de calidad de aire y recuperación de la energía del aire de extracción.

Antes de analizar cada una de ellas, vamos a poner en contexto la situación de la que partimos. Se trata de un edificio terciario con un sistema de doble flujo, con el caudal de impulsión igual al de extracción y  $n_{50} = 5.51$ . Con estos datos entramos en la Figura 16 y obtenemos un  $ACH_{inf} = 0.45 \text{ h}^{-1}$ .

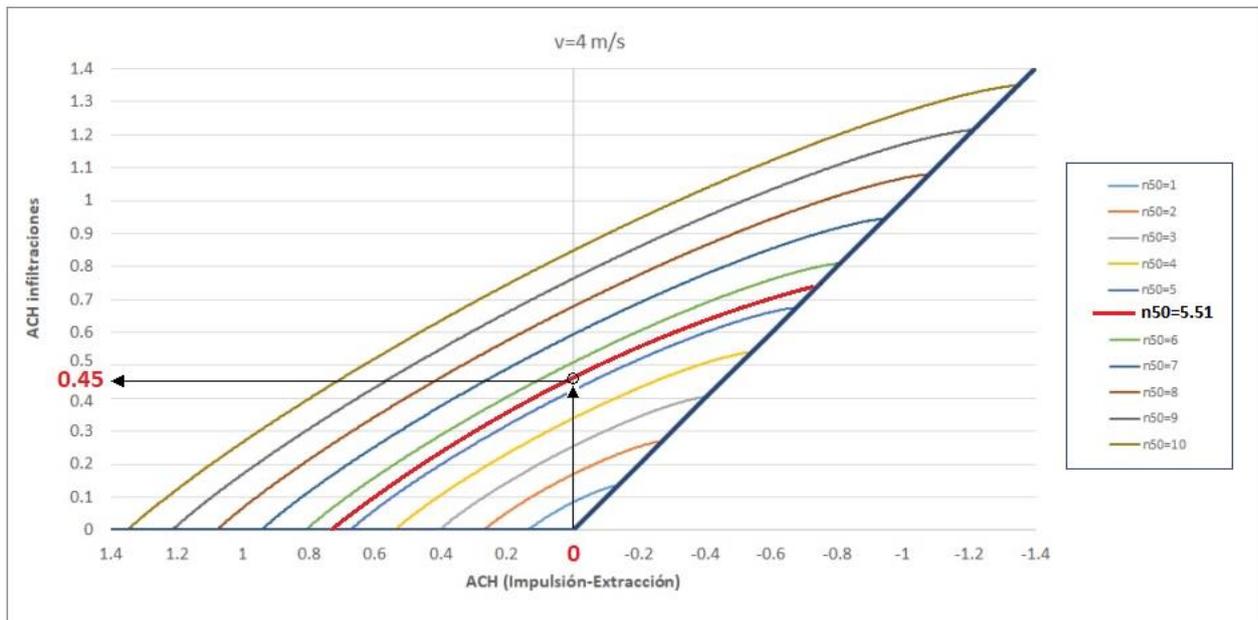


Figura 16. Cálculo de ACH a través de la envuelta para  $v=4\text{m/s}$  con impulsión y extracción.

Fuente: Grupo de Termotecnia US.

Una vez conocido el valor de  $ACH_{inf}$  y sabiendo que  $ACH_{imp} = ACH_{nom} = 1.36 \text{ h}^{-1}$ , podemos obtener  $ACH_{eq}$  a partir de la siguiente ecuación:

$$ACH_{eq} = ACH_{imp} + \frac{ACH_{inf}}{2} = 1.36 + \frac{0.45}{2} = 1.57 \text{ h}^{-1}$$

### 4.3.2 Mejora 1: Mejorar la estanqueidad

La primera propuesta para reducir el ACH equivalente es mejorar la estanqueidad del edificio. Esto se puede conseguir mediante la aplicación de elementos sellantes.

El objetivo es reducir el  $n_{50}$  lo máximo posible manteniendo el caudal de impulsión igual al de extracción. Como se puede ver en la Figura 16, pasamos de un  $n_{50} = 5.51$  a un  $n_{50}=1$ , o lo que es lo mismo, de un  $ACH_{inf}=0.45$  a un  $ACH_{inf}=0.08$ .

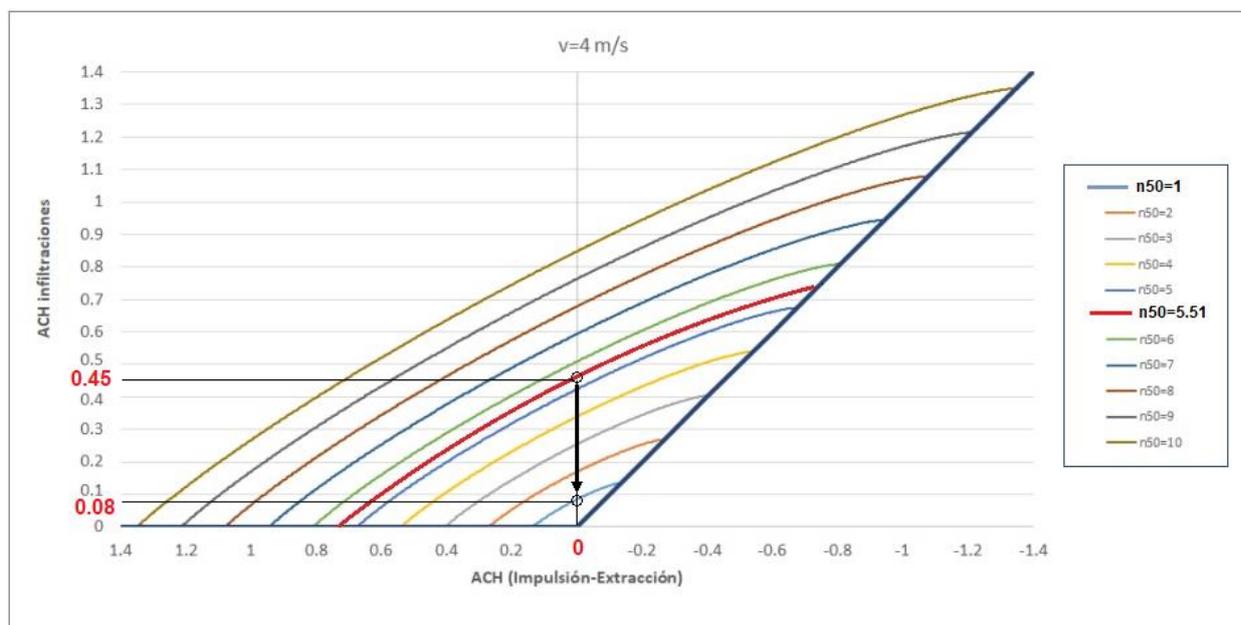


Figura 17. Cálculo de ACH a través de la envuelta para  $v=4\text{m/s}$  con impulsión y extracción.  
Fuente: Grupo de Termotecnia US.

Una vez conocido que  $\text{ACH}_{\text{inf}} = 0.08 \text{ h}^{-1}$  para  $n_{50}=1$  y sabiendo que  $\text{ACH}_{\text{imp}} = \text{ACH}_{\text{nom}} = 1.36 \text{ h}^{-1}$ , podemos obtener  $\text{ACH}_{\text{eq}}$  a partir de la siguiente ecuación:

$$\text{ACH}_{\text{eq}} = \text{ACH}_{\text{imp}} + \frac{\text{ACH}_{\text{inf}}}{2} = 1.36 + \frac{0.08}{2} = 1.4 \text{ h}^{-1}$$

### 4.3.3 Mejora 2: Control de presencia

Otra posible mejora para reducir la demanda de ventilación es la instalación de controles de presencia para adaptar los caudales de ventilación en función de las necesidades reales de calidad de aire.

El horario de apertura del colegio es de lunes a viernes desde las 8:00h hasta las 15:00h. Los sábados, domingos y festivos permanece cerrado. El número de personas es aproximadamente 87.5, valor que se estimó en el apartado 2.1.1. Una hora antes de la apertura del colegio se supone un porcentaje de ocupación del 10%, correspondiente a los profesores que llegan antes y a algún limpiador. De 11:00 a 11:30 es el recreo, con un porcentaje de ocupación del 0%, ya que los niños se encuentran jugando en el patio. Como el análisis se está realizando por horas, supongo una ocupación del 50% de 11:00 a 12:00.

Hora	% Ocupación	Ocupación real [pers]	ACH <sub>nom</sub> horario [-]
		% Ocupación · Nº pers.máx	Caudal <sub>aire_ext</sub> · $\frac{1}{\text{Volumen edif.}}$ · Nº personas
00:00 – 01:00	0	-	-
01:00 – 02:00	0	-	-
02:00 – 03:00	0	-	-
03:00 – 04:00	0	-	-
04:00 – 05:00	0	-	-
05:00 – 06:00	0	-	-
06:00 – 07:00	0	-	-
<b>07:00 – 08:00</b>	<b>10</b>	87.5 x 0.1 = <b>8.75</b>	8.75 x 45 x 1/2888.89 = <b>0.136</b>
<b>08:00 – 09:00</b>	<b>100</b>	87.5 x1 = <b>87.5</b>	87.5 x 45 x 1/2888.89 = <b>1.36</b>
<b>09:00 – 10:00</b>	<b>100</b>	87.5 x1 = <b>87.5</b>	87.5 x 45 x 1/2888.89 = <b>1.36</b>
<b>10:00 – 11:00</b>	<b>100</b>	87.5 x1 = <b>87.5</b>	87.5 x 45 x 1/2888.89 = <b>1.36</b>
<b>11:00 – 12:00</b>	<b>50</b>	87.5 x 0.5 = <b>43.75</b>	87.5 x 45 x 1/2888.89 = <b>0.68</b>
<b>12:00 – 13:00</b>	<b>100</b>	87.5 x1 = <b>87.5</b>	87.5 x 45 x 1/2888.89 = <b>1.36</b>
<b>13:00 – 14:00</b>	<b>100</b>	87.5 x1 = <b>87.5</b>	87.5 x 45 x 1/2888.89 = <b>1.36</b>
<b>14:00 – 15:00</b>	<b>100</b>	87.5 x1 = <b>87.5</b>	87.5 x 45 x 1/2888.89 = <b>1.36</b>
15:00 – 16:00	0	-	-
16:00 – 17:00	0	-	-
17:00 – 18:00	0	-	-
18:00 – 19:00	0	-	-
19:00 – 20:00	0	-	-
20:00 – 21:00	0	-	-
21:00 – 22:00	0	-	-
22:00 – 23:00	0	-	-
23:00 – 00:00	0	-	-

$$\text{ACH}_{\text{nom}} = \frac{\sum \text{ACH}_{\text{nom horario}}}{\text{N}^{\circ} \text{ horas}} \quad [\text{h}^{-1}]$$

$$8.976/24 = \mathbf{0.374}$$

Tabla 30. Obtención de ACH<sub>nom</sub> para la mejora de control de presencia. Fuente: Elaboración propia.

Una vez conocido que ACH<sub>nom</sub> = 0.374 h<sup>-1</sup> = ACH<sub>imp</sub> y sabiendo que ACH<sub>inf</sub> tiene el mismo valor que en la situación inicial (ACH<sub>inf</sub> = 0.45 h<sup>-1</sup>), podemos obtener ACH<sub>eq</sub> a partir de la siguiente ecuación:

$$\text{ACH}_{\text{eq}} = \text{ACH}_{\text{imp}} + \frac{\text{ACH}_{\text{inf}}}{2} = 0.374 + \frac{0.45}{2} = \mathbf{0.6 \text{ h}^{-1}}$$

#### 4.3.4 Mejora 3: Mejora 1 + Mejora 2 + Recuperador de calor

Por último, se propone añadir a las mejoras anteriores un recuperador de calor, que permite recuperar la energía del aire de extracción. Como inconveniente, introducirá una pérdida de carga adicional, que para vencer dicha carga provocará un aumento en el consumo energético por ventiladores. A pesar de ello, el ahorro en la demanda energética será muy superior.

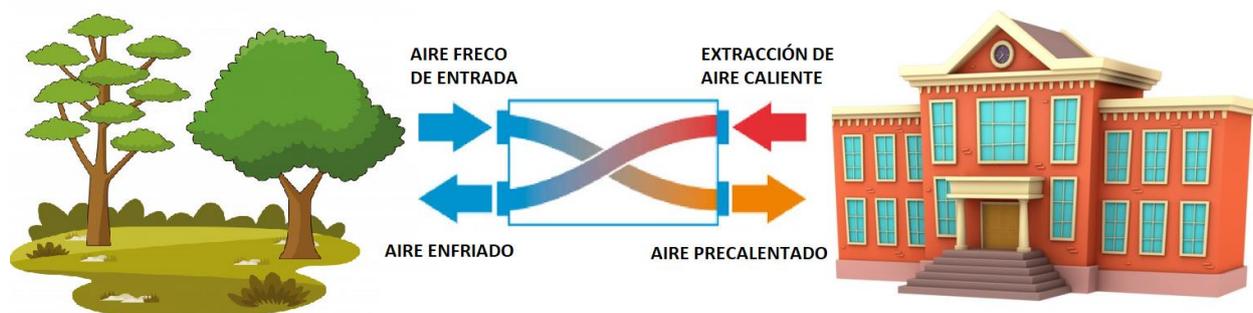


Figura 18. Esquema de funcionamiento de un recuperador de calor. Fuente: Elaboración propia.

En la actualidad hay distintos tipos de recuperadores de calor, cada uno con diferente tecnología y eficiencia. Para los cálculos asumiremos un recuperador de calor con una eficiencia del 70%.

Sabiendo que el  $ACH_{nom}$  corresponde al de la mejora por control de presencia ( $ACH_{nom}=0.374\text{ h}^{-1}$ ) y el  $n_{50}$  es el de la mejora de la estanqueidad ( $n_{50}=1$  y su  $ACH_{inf}=0.08$ ), podemos calcular el  $ACH_{eq}$

$$ACH_{eq} = ACH_{imp}(1-\epsilon) + \frac{ACH_{inf}}{2} = 0.374 \cdot (1-0.7) + \frac{0.08}{2} = 0.1522\text{ h}^{-1}$$

En la siguiente tabla se muestran los valores de los parámetros característicos que hemos ido variando en cada una de las mejoras con el objetivo de reducir el  $ACH_{equivalente}$ :

Escenario	$n_{50}$	$ACH_{inf} [\text{h}^{-1}]$	$\epsilon_{recuperador} [\%]$	$ACH_{imp} [\text{h}^{-1}]$	$ACH_{eq} [\text{h}^{-1}]$
Situación inicial	5.51	0.45	-	1.36	<b>1.57</b>
Mejora 1	<b>1</b>	<b>0.08</b>	-	1.36	<b>1.4</b>
Mejora 2	5.51	0.45	-	<b>0.374</b>	<b>0.6</b>
Mejora 3	<b>1</b>	<b>0.08</b>	<b>70</b>	<b>0.374</b>	<b>0.152</b>

Tabla 31. Parámetros característicos de cada una de las mejoras de ventilación. Fuente: Elaboración propia

## 4.4 Control solar

Como ya hemos visto en el apartado 3.5.2, partimos de una situación inicial que cumple con la exigencia del CTE relativa al  $q_{sol}$ , ya que el edificio tiene un parámetro de control solar ( $q_{sol;jul} = 3.85 > q_{sol;jul;lim} = 4$ ).

El objetivo de esta mejora es reducir el factor solar “g” en un 50%, que inicialmente tiene un valor de 0.78, hasta un valor de 0.39. Esto se puede conseguir mediante la instalación de elementos de sombra como persianas de lamas.

	Actual	Mejora 1
g	0.78	0.39

Tabla 32. Posibles valores de g. Fuente: Elaboración propia.

## 4.5 Ventilación nocturna

La ventilación nocturna consiste en ventilar el edificio de noche, cuando la temperatura exterior es menor que la temperatura interior. Con esto se consigue enfriar la estructura del edificio durante la noche, que actuará de sumidero de calor durante el día y absorberá las ganancias solares, de ocupación y de equipos. La ventilación nocturna consigue reducir el pico de demanda del edificio.

Inicialmente se supone una ventilación nocturna de  $4 \text{ h}^{-1}$ , valor que se encuentra por debajo del límite inferior. Proponemos una mejora que aumente a 10 renovaciones/hora este parámetro.

	Actual	Mejora 1
$ACH_{noct} (\text{h}^{-1})$	4	10

Tabla 33. Posibles valores de  $ACH_{noct}$ . Fuente: Elaboración propia.

## 4.6 Resumen de mejoras

A continuación, se muestra una tabla con todas las mejoras que hemos visto:

$U_{muros}$ [W/m <sup>2</sup> ·K]	$U_{cubierta}$ [W/m <sup>2</sup> ·K]	$U_{suelo}$ [W/m <sup>2</sup> ·K]	$U_{ventanas}$ [W/m <sup>2</sup> ·K]	$\Phi \cdot L$ [W/K]	$ACH_{eq}$ [h <sup>-1</sup> ]	$g_{verano}$	$ACH_{noct}$ [h <sup>-1</sup> ]
1.72	1.87	3.32	5.70	521.33	1.57	0.78	4
0.56	0.44	0.56	3.1	119.32	1.4	0.39	10
0.42	0.33	0.44	2.6	104.59	0.584		
0.382	0.299	0.409	2.472		0.152		
0.27	0.21	0.32	2.1				

Tabla 34. Resumen de mejoras de los parámetros. Fuente: Elaboración propia.



## 5 Situación de mínima demanda energética

Una vez calculadas todas las posibles mejoras, las combinamos todas haciendo uso de la Hoja de Excel “Herramienta para la obtención de edificios de alta eficiencia”. El número de combinaciones resultante es 240. Se obtiene una situación diferente del edificio para cada combinación. Cada caso tiene un sobrecoste con respecto a la situación inicial pero una reducción en la demanda de energía, lo que se traduce en un ahorro de energía primaria.

### 5.1 Coste del ciclo de vida (CCV)

El Coste del Ciclo de Vida de un edificio (CCV) es una herramienta que se usa para evaluar y comparar diferentes alternativas de optimización. Es el coste total del edificio, durante toda su vida, desde que se construye hasta que se demuele. En la siguiente Tabla se hace un desglose de todos los costes del CCV:

Desglose del Coste del ciclo de vida			
Coste del Ciclo de Vida	Coste de edificación	Coste de la envolvente	Es el coste base, más el coste de las mejoras que se vayan a considerar. Para nuestros propósitos sólo importa el sobrecoste de las mejoras.
		Coste de los sistemas de acondicionamiento	Es el coste de adquisición e instalación de los sistemas de acondicionamiento de la situación inicial
	Coste de operación		Corresponde al coste de los consumos de energía final de calefacción, refrigeración e iluminación durante toda la vida del edificio. Pueden variar en función del precio de la energía

Tabla 35. Desglose de los costes contabilizados en el CCV. Fuente: *Elaboración propia.*

$$CCV = \text{Coste}_{\text{edificación}} + \text{Coste}_{\text{operación}}$$

Para que el análisis económico sea lo más realista posible hay recurrir al concepto del “valor presente de una cantidad del futuro”, que tiene en cuenta la tasa de descuento ( $i$ ) y la inflación ( $inf$ ). El valor presente nos permite calcular el coste de una operación económica futura, en euros del momento presente

Valor presente de un capital futuro ( $C_{op}$ ) en el año ( $k$ ):

$$VP(C_{op,i,inf,k}) = \frac{C_{op}}{(1+i_{eficaz})^k} \quad \text{Siendo } (1+i_{eficaz}) = \frac{(1+i)}{(1+inf)}$$

Sumando el valor presente de todas las cantidades que se vayan a gastar en el futuro da lugar a la “suma del valor presente” de los costes del ciclo de vida:

$$CCV = \text{Sobrecoste} + \sum_{k=1}^N \frac{C_{op}}{(1+i_{eficaz})^k}$$

Datos para el estudio del CCV:

Dato	Símbolo	Valor
Inflación productos energéticos	inf	2%
Tasa de descuento	i	5%
Vida útil elementos de la envuelta	N	30 años

Tabla 36. Valores para el estudio del CCV. Fuente: *Elaboración propia.*

$$CCV = \text{Sobrecoste} + C_{operación} \cdot \sum_{k=1}^{30} \frac{1}{(1+0.03)^k} \quad \text{Siendo } \sum_{k=1}^{30} \frac{1}{(1+0.03)^k} = 19.6$$

## 5.2 Sobrecostes

### 5.2.1 Tratamiento de los puentes térmicos

Sabemos que la longitud total de los puentes térmicos es 847.11 m. Los sobrecostes de las dos mejoras se calculan de forma directa sabiendo que la mejora 1 tiene un sobrecoste de 6 € por metro de puente térmico y la mejora 2 de 7 € por metro de puente térmico.

	Phi·L [W/K]	Precio [€/m]	Sobrecoste [€]
Inicial	521.33	-	0
Mejora 1	119.32	6	5082.66
Mejora 2	104.59	7	5929.77

Tabla 37. Sobrecoste del tratamiento de los puentes térmicos. Fuente: *Elaboración propia.*

### 5.2.2 Mejora de los elementos de la envuelta

#### 5.2.2.1 Cerramientos opacos: Muros, cubierta y suelo

Los sobrecostes que suponen los cerramientos opacos se han calculado mediante la siguiente ecuación, donde a y b son coeficientes que se obtienen de la tabla 38.

$$\text{Sobrecoste [€]} = \left[ a \cdot \left( \frac{1}{U_{final}} - \frac{1}{U_{inicial}} \right) + b \right] \cdot \text{Área cerramiento}$$

	a	b
Muros	2.7325	2.004
Cubierta	1.7019	1.948
Suelo	4.135	2.38

Tabla 38. Coeficientes para el cálculo del sobrecoste de cerramientos opacos.  
Fuente: Grupo de Termotecnia US.

Haciendo uso de la información anterior y teniendo en cuenta el área de cada cerramiento, se obtienen los correspondientes sobrecostes:

	$U_{\text{muros}}$ [W/m <sup>2</sup> ·K]	$U_{\text{cubierta}}$ [W/m <sup>2</sup> ·K]	$U_{\text{suelo}}$ [W/m <sup>2</sup> ·K]	Sobrecoste muro [€]	Sobrecoste cubierta [€]	Sobrecoste suelo [€]
Inicial	1.72	1.87	3.32	0	0	0
Mínimo	0.56	0.44	0.56	3043.13	2402.24	4171.23
Recomendado	0.42	0.33	0.44	3977.94	3033.58	5157.32
Klim	0.382	0.299	0.409	4349.91	3295.41	5506.12
Alta eficiencia	0.27	0.21	0.32	6055.29	4476.65	6882.99

Tabla 39. Sobrecoste del tratamiento de los puentes térmicos. Fuente: Elaboración propia.

### 5.2.2.2 Cerramientos semitransparentes: Ventanas

Haciendo uso de la siguiente tabla se puede estimar, mediante interpolación, el coste de las ventanas [€/m<sup>2</sup>] en función de su U.

$U_{\text{ventanas}}$	$g_{\text{ventanas}}$	Precio [€/m <sup>2</sup> vent]
5.70	0.83	182.00
4.46	0.79	196.27
3.49	0.76	211.55
2.73	0.72	228.26
2.13	0.69	246.15
1.67	0.65	265.46
1.30	0.62	286.27
1.20	0.61	331.03
1.10	0.60	373.23
1.00	0.59	415.43
0.90	0.58	457.63
0.80	0.57	499.83

Tabla 40. Coste de los cerramientos semitransparentes según su U.  
Fuente: Grupo de Termotecnia US.

Para calcular el sobrecoste que supone cambiar las ventanas, hay que calcular el coste de la ventana en la situación mejorada y restarle el coste de la ventana en la situación inicial. Los resultados obtenidos se representan a continuación:

	$U_{\text{ventanas}}$ [W/m <sup>2</sup> ·K]	Precio [€/m <sup>2</sup> ]	Sobrecoste [€]
Inicial	5.70	182	0
Mínimo	3.10	220.18	3545.95
Recomendado	2.60	232.14	4656.37
Klim	2.472	236.01	5015.74
Alta eficiencia	2.10	247.40	6073.23

Tabla 41. Sobrecostos de los cerramientos semitransparentes.  
Fuente: Elaboración propia.

### 5.2.3 Estrategias de ventilación

El sobrecoste de la ventilación se obtiene de manera directa a partir de unos costes ya estipulados. La mejora de la estanqueidad tiene un coste de 60€/m<sup>2</sup> de ventana, el control de presencia tiene un coste de 60€/m<sup>2</sup> de ventana más 1200€ y las dos mejoras anteriores más un recuperador de calor tiene un coste de 60€/m<sup>2</sup> ventana + 3000€.

	$ACH_{\text{eq}}$ [h <sup>-1</sup> ]	Precio	Sobrecoste [€]
Inicial	1.57	-	0
Mejora 1	1.4	60€/m <sup>2</sup> ventana	5572
Mejora 2	0.6	60€/m <sup>2</sup> ventana + 1200€/vivienda	6772
Mejora 3	0.152	60€/m <sup>2</sup> ventana + 3000€/vivienda	8572

Tabla 42. Sobrecostos de las mejoras de ventilación. Fuente: Elaboración propia.

### 5.2.4 Control solar

Para el control solar de las ventanas se ha propuesto unas lamas que reducen “g” un 50%, con un coste de 150 €/m<sup>2</sup> de ventana.

		g	Precio [€/m <sup>2</sup> ventana]	Sobrecoste [€]
Inicial		0.78	-	0
Mejora	Norte	0.39	150	1674
	Sur	0.39	150	5826
	Este	0.39	150	1938
	Oeste	0.39	150	4490

Tabla 43. Sobrecostos del control solar. Fuente: Elaboración propia.

### 5.2.5 Ventilación nocturna

Mejorar el ACH nocturno a  $10h^{-1}$  tiene un coste de  $8€/m^2$  de ventana.

	ACH <sub>noct</sub> [h <sup>-1</sup> ]	Precio [€/m <sup>2</sup> ]	Sobrecoste [€]
Inicial	4	-	0
Mejora	10	8	7003.6

Tabla 44. Sobrecoste de mejorar la ventilación nocturna.

Fuente: *Elaboración propia.*

## 5.3 Costes de operación

Como vimos en el apartado 5.1, el coste de operación corresponde al coste de los consumos energía final de calefacción, refrigeración e iluminación. Para calefacción se usa el precio del gas natural y para refrigeración e iluminación se usa el precio de la electricidad. La siguiente ecuación se aplicará a las 240 combinaciones.

$$C_{op} = [C_{EF,cal} \cdot Coste_{G.N.}] + [C_{EF,ref} \cdot Coste_{Elect}] + [C_{EF,ilum} \cdot Coste_{Elect}]$$

El coste de operación puede variar en función del precio de la energía, que en este análisis hemos usado los siguientes:

	Coste [€/KWh]
Gasóleo C	0.096
Gas Natural	0.068
GLP	0.115
Electricidad	0.209
Biomasa	0.046

Tabla 45. Precios de la energía. Fuente: *Grupo de Termotecnia US.*

## 5.4 Consumos energéticos

### 5.4.1 Consumos de energía final

Para determinar cuál es la combinación óptima, vamos a representar el CCV frente al consumo de energía primaria total y frente al consumo de energía primaria no renovable. Para el cálculo de los consumos de energía primaria es necesario calcular primero el consumo de energía final, al que se le aplicará unos factores de paso.

El consumo de energía final se obtiene a partir de la demanda y del rendimiento:

$$Consumo_{EF} = \frac{Demanda}{Rendimiento}$$

### 5.4.1.1 Caso inicial

A partir de la fórmula anterior, se procede al cálculo de los consumos de energía final de la situación inicial para calefacción, refrigeración e iluminación. Este cálculo se repetiría para las 240 combinaciones.

	<b>Demanda (KWh/m<sup>2</sup>·año)</b>	<b>Rendimiento (%)</b>	<b>Consumo E.F. (KWh/m<sup>2</sup>·año)</b>
Calefacción	36.88	70	<b>52.69</b>
Refrigeración	18.89	170	<b>11.11</b>
Iluminación	13.35	100	<b>13.35</b>

Tabla 46. Valores de consumo de energía final para calefacción, refrigeración e iluminación.  
Fuente: Elaboración propia.

### 5.4.2 Consumos de energía primaria

Los consumos de energía primaria se obtienen multiplicando los consumo de energía final, calculados en el apartado anterior, por unos factores de paso.

$$C_{EP} = C_{EF} \cdot FP_{EF \rightarrow EP}$$

#### 5.4.2.1 Caso inicial

Aplicando la fórmula anterior, se procede al cálculo de los consumos de energía primaria de calefacción, refrigeración e iluminación. Este cálculo se repetiría para las 240 combinaciones.

	<b>Consumo E.F. (KWh/m<sup>2</sup>·año)</b>	<b>FP<sub>EF→EP,tot</sub></b>	<b>Consumo E.P. (KWh/m<sup>2</sup>·año)</b>
Calefacción	52.69	1.182	<b>62.18</b>
Refrigeración	11.11	2.368	<b>26.31</b>
Iluminación	13.35	2.368	<b>31.61</b>

Tabla 47. Valores de consumo de energía primaria para calefacción, refrigeración e iluminación.  
Fuente: Elaboración propia.

#### 5.4.2.2 Todas las combinaciones

En la siguiente gráfica se representa una nube de puntos. Cada punto es una posible combinación. En el eje de ordenadas se encuentra el coste del ciclo de vida y en el de abscisas el consumo de energía primaria total:

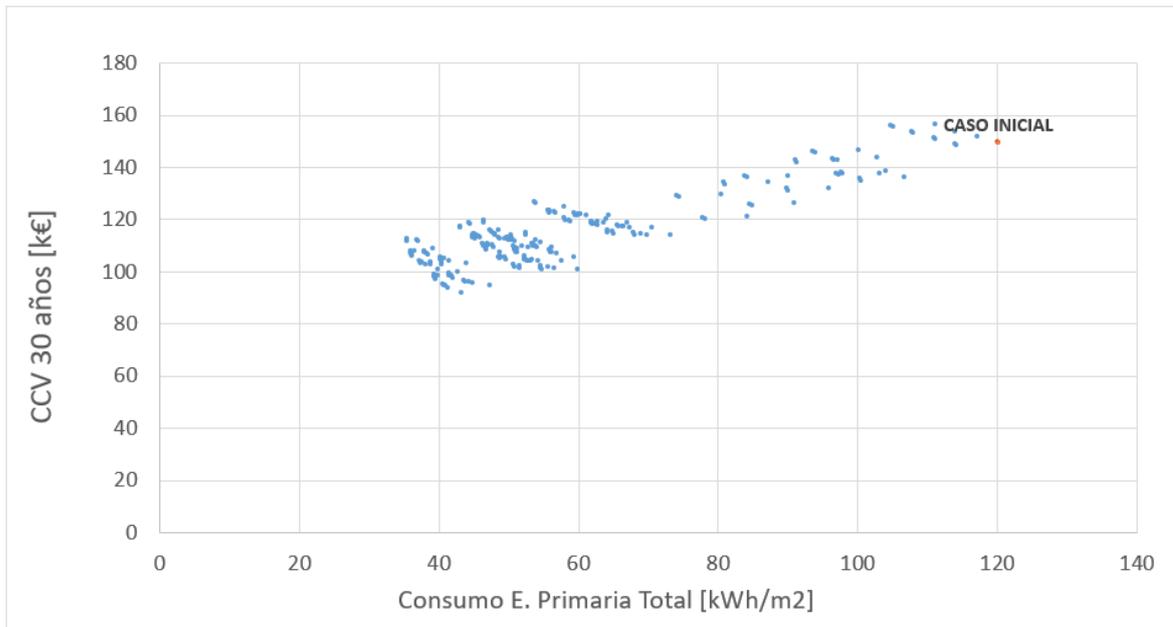


Figura 19. Relación CCV- Consumo de energía primaria total.  
 Fuente: Herramienta Excel para la obtención de edificios de alta eficiencia.

Como se observa el punto rojo hace referencia a la situación actual en la que se encuentra el edificio y los puntos azules hacen referencia a las diferentes situaciones que podría estar el edificio para cada una de las combinaciones anteriormente citadas.

### 5.4.3 Consumos de energía primaria no renovable

Al igual que en el apartado anterior, los consumos de energía primaria no renovable se obtienen multiplicando los consumo de energía final, calculados en el apartado 5.4.1, por unos factores de paso. Estos cálculos se realizarán para calefacción, refrigeración e iluminación:

$$C_{EP,nren} = C_{EF} \cdot FP_{EF \rightarrow EP,nren}$$

#### 5.4.3.1 Caso inicial

Haciendo uso de la fórmula anterior, se procede al cálculo de los consumos de energía primaria no renovable de calefacción, refrigeración e iluminación. Este cálculo se repetiría para las 240 combinaciones.

	Consumo E.F. (KWh/m <sup>2</sup> ·año)	FP <sub>EF→EP,nren</sub>	Consumo E.P.nren (KWh/m <sup>2</sup> ·año)
Calefacción	52.69	1.179	<b>62.12</b>
Refrigeración	11.11	1.954	<b>21.71</b>
Iluminación	13.35	1.954	<b>26.09</b>

Tabla 48. Valores de consumo de energía primaria no renovable para calefacción, refrigeración e iluminación. Fuente: Elaboración propia.

### 5.4.3.2 Todas las combinaciones

A continuación, se representa el CCV frente al consumo de energía primaria no renovable. El punto rojo hace referencia a la situación inicial en la que se encuentra el colegio y los puntos azules a las posibles situaciones en las que se puede encontrar.

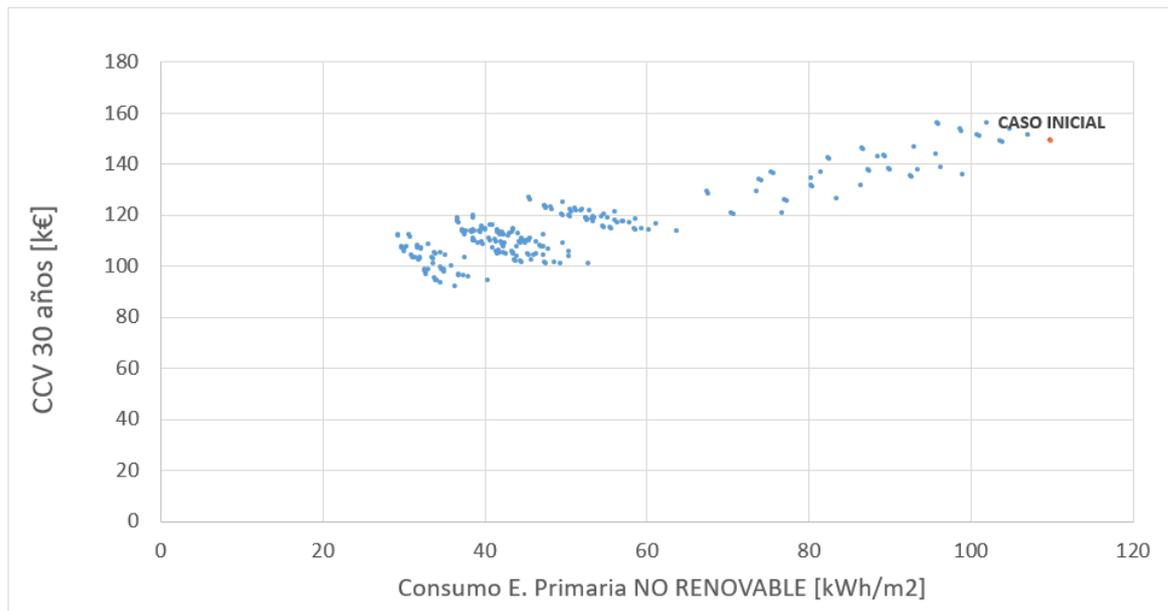


Figura 20. Relación CCV- Consumo de energía primaria no renovable.  
Fuente: Herramienta Excel para la obtención de edificios de alta eficiencia.

## 5.5 Selección del caso óptimo

Las nubes de puntos de la Figura 19 y Figura 20 permite identificar la alternativa que tiene un menor CCV. Aun así, la alternativa debe satisfacer las exigencias de HE0 y HE1 detalladas en el apartado 3.4 y 3.5 respectivamente.

### 5.5.1 Exigencia HE1

Para que cumplan con la exigencia HE1,  $U_m$  tiene que ser menor o igual que  $K_{lim}=0.48$  y  $q_{sol}$  menor que 4. En la Figura 21 y Figura 22 se muestran todas las combinaciones, en las que están remarcadas de color verde aquellas que cumplen con la exigencia HE1.

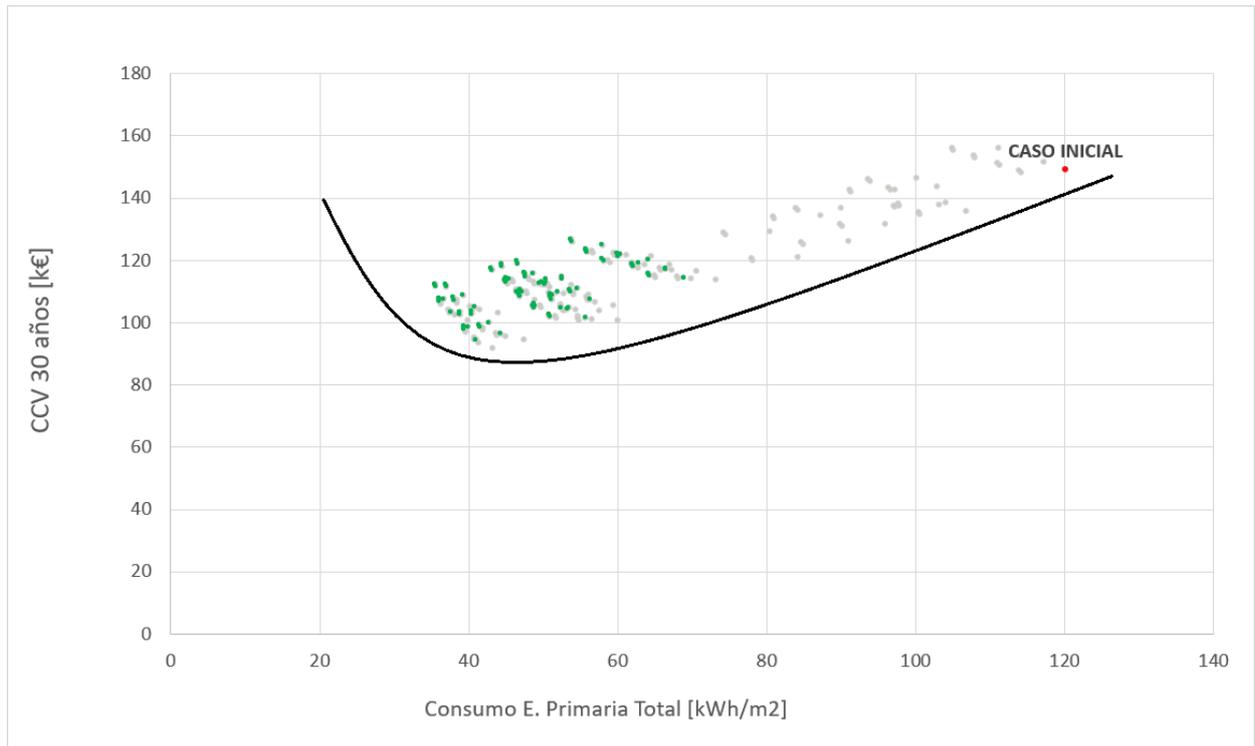


Figura 21. CCV vs Cep,tot - Combinaciones que cumplen HE1.  
 Fuente: Herramienta Excel para la obtención de edificios de alta eficiencia.

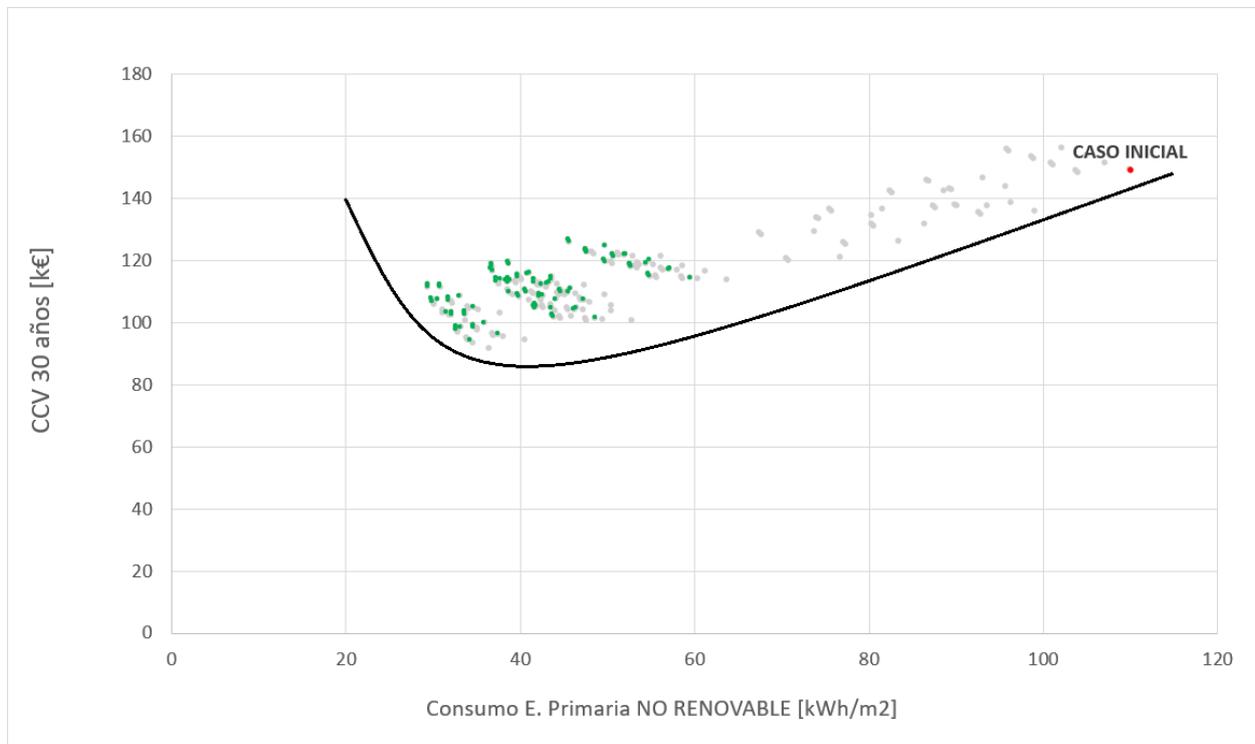


Figura 22. CCV vs Cep,nren – Combinaciones que cumplen HE1.  
 Fuente: Herramienta Excel para la obtención de edificios de alta eficiencia.

### 5.5.2 Exigencia HE0

Además de la exigencia HE1, el caso óptimo debe de cumplir con la exigencia HE0. Como vimos en el apartado 3.4, el consumo de energía primaria total debe ser menor que 188.34 kWh/m<sup>2</sup> y el consumo de energía primaria no renovable menor que 84.04 kWh/m<sup>2</sup>. A continuación, se muestra de manera gráfica los límites de consumo de energía primaria.

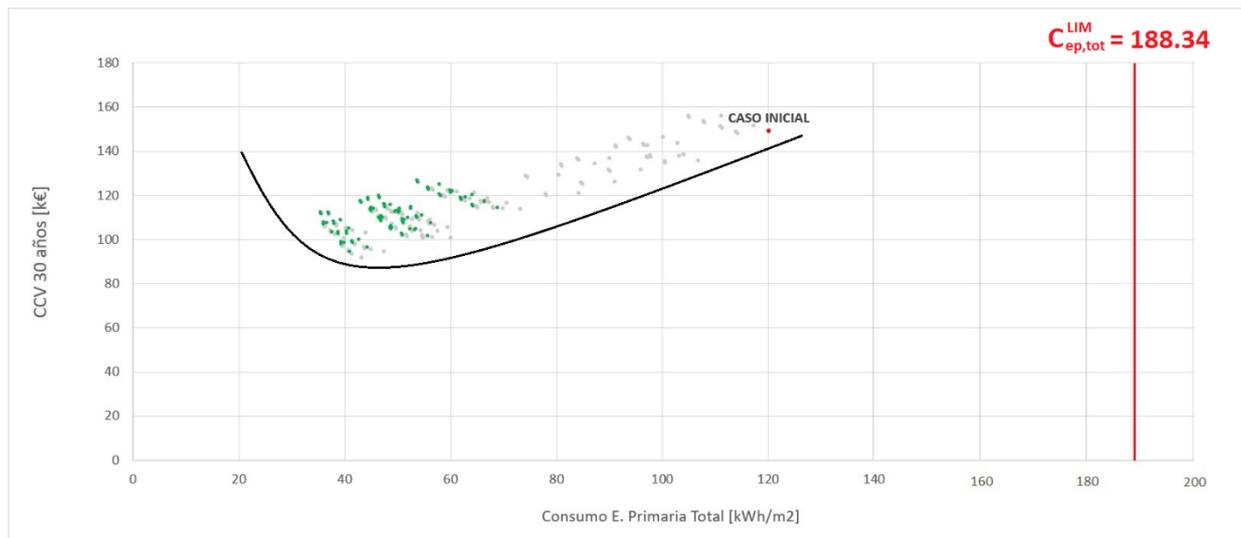


Figura 23. CCV vs Cep,tot - Combinaciones que cumplen HE0 y HE1.  
Fuente: Herramienta Excel para la obtención de edificios de alta eficiencia.

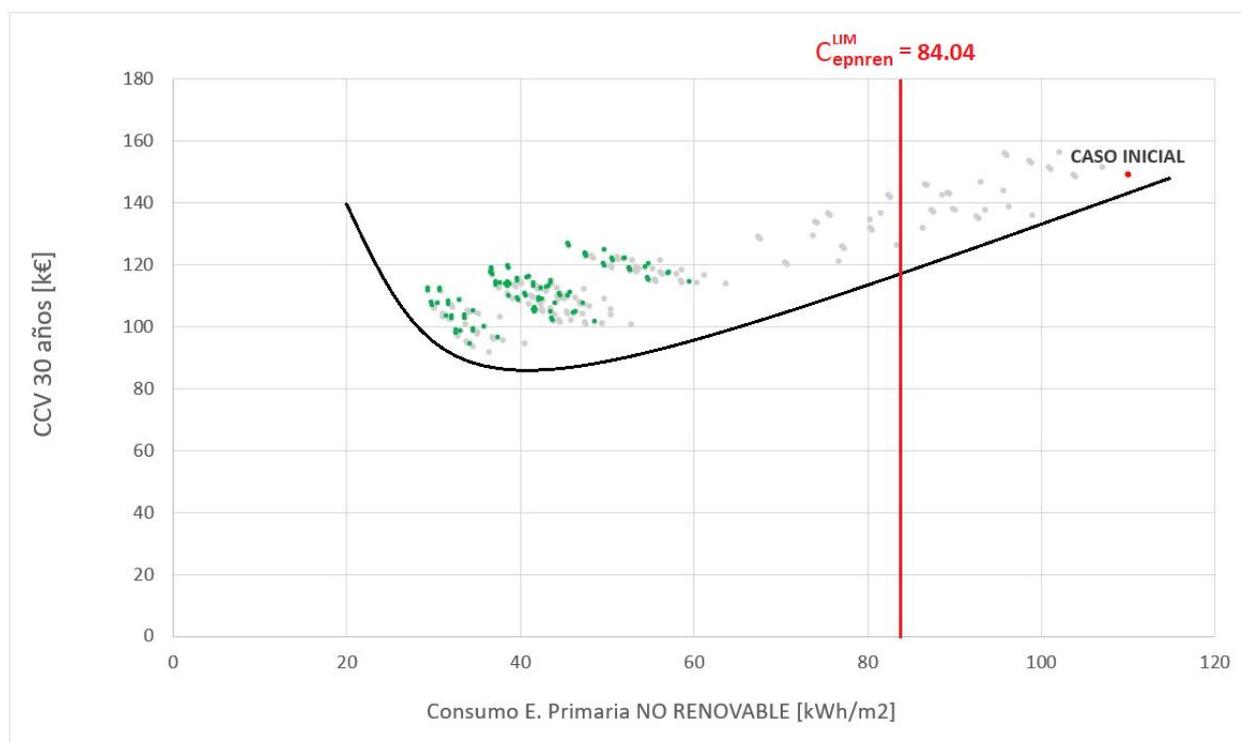


Figura 24. CCV vs Cep,nren – Combinaciones que cumplen HE0 y HE1.  
Fuente: Herramienta Excel para la obtención de edificios de alta eficiencia.

### 5.5.3 Caso óptimo

El caso óptimo será aquel que tenga un menor coste del ciclo de vida y que cumpla con la normativa. De todas las combinaciones posibles, la que presenta un nivel de rentabilidad óptimo es la medida 158, con un CCV a 30 años de 94580 € y un consumo de energía primaria total de 40.92 KWh/m<sup>2</sup>.

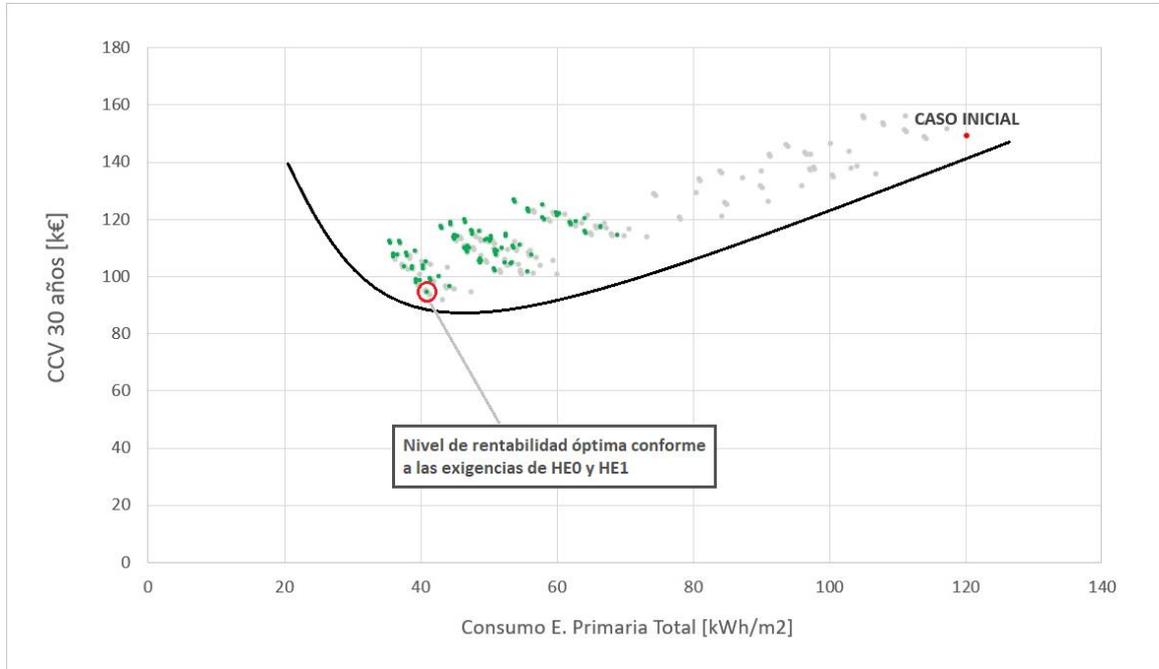


Figura 25. CCV vs Cep,tot – Caso óptimo.

Fuente: Herramienta Excel para la obtención de edificios de alta eficiencia.

A continuación, se muestran los parámetros característicos y los valores de demanda y consumo de la combinación óptima.

		Situación Inicial	Mejora 158
Parámetros característicos	Phi·L [W/m]	521.33	521.33
	U <sub>m</sub> [W/m <sup>2</sup> ·K]	2.46	0.483
	ACH <sub>eq</sub> [h <sup>-1</sup> ]	1.57	0.15
	ACH <sub>nom</sub> [h <sup>-1</sup> ]	1.36	0.374
	ACH <sub>noct</sub> [h <sup>-1</sup> ]	4	10
	n50 [-]	5.51	1
	ASSE <sub>ver</sub> [m <sup>2</sup> ]	134.15	95.69
	q <sub>sol</sub> [KWh/m <sup>2</sup> ·mes]	3.85	2.75
	g [-]	0.78	0.78
Demanda de calefacción [KWh/m <sup>2</sup> ·año]		36.88	1.29
Demanda de refrigeración [KWh/m <sup>2</sup> ·año]		18.89	5.12
Consumo EP total [KWh/m <sup>2</sup> ·año]		120.2	40.92
Consumo EP no renovable [KWh/m <sup>2</sup> ·año]		109.92	34.15
Coste del Ciclo de Vida a 30 años [€]		149200	94580

Tabla 49. Comparativa situación inicial y caso óptimo. Fuente: Elaboración propia.

A la vista de la Tabla 49, con la combinación óptima se consigue mejorar todos los parámetros característicos estudiados menos los puentes térmicos y el factor solar, que se mantienen en los valores de la situación inicial.

Con este proyecto se pone de manifiesto que es absolutamente posible reducir la demanda de un edificio mal diseñado mediante elementos convencionales, hasta alcanzar niveles de alta eficiencia y consiguiendo un ahorro de dinero a largo plazo. En este estudio, hemos pasado de un edificio con una demanda anual de climatización de  $55.77 \text{ KWh/m}^2$  y un coste del ciclo de vida a 30 años de 149200 € a un edificio que demanda anualmente  $6.41 \text{ KWh/m}^2$  y un coste del ciclo de vida a 30 años de 94580 €. Se ha conseguido reducir la demanda anual de climatización en más de un 85% y los costes en casi un 40%.

# 6 Inclusión de un elemento especial.

## Cubierta activa

---

### 6.1 Introducción

El clima de Sevilla en régimen de refrigeración, al igual que en otras muchas zonas, presenta una gran amplitud térmica entre el día y la noche. Durante las horas de sol se alcanzan altas temperaturas, que bajan considerablemente durante la noche. Esta disminución tan brusca de la temperatura se puede aprovechar energéticamente para disminuir la demanda de refrigeración durante el día.

Vamos a proponer la inclusión de un elemento especial llamado cubierta ventilada activa, concebida especialmente para zonas climáticas con régimen de refrigeración dominante y edificios con pocas plantas. Tiene como objetivo reducir las ganancias solares y enfriar los espacios bajo cubierta.

La cubierta ventilada activa consiste en la instalación de un panel sándwich EPS de 8 cm de espesor sobre la cubierta del edificio, creando una cámara de aire de 5 cm de alto entre éste y la cubierta del edificio. La cámara de aire tendrá una longitud de 20 m y una anchura de 28 m, y contará con ventiladores en cada extremo para que el aire exterior circule a través de ésta. Este elemento estará térmicamente activo por la noche, momento en el que la temperatura exterior es más baja y se pueda enfriar la superficie de la cubierta. Debido a la inercia térmica de los materiales de la cubierta, el frío captado se irá transmitiendo hacia el interior con el paso de las horas hasta llegar al techo del aula, que actuará como sumidero de calor durante el día, consiguiendo disminuir la temperatura interior de las aulas, aportando un mayor nivel de confort a las personas.

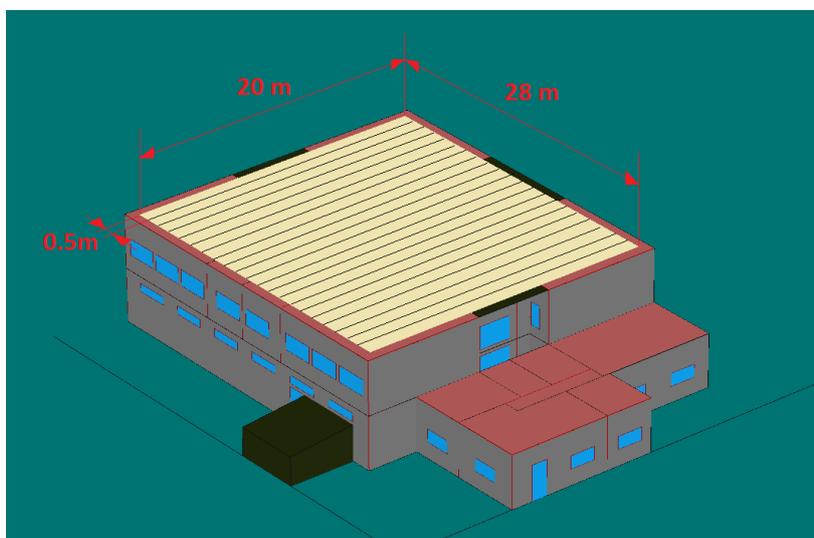


Figura 26. Dimensiones de la cubierta activa. Fuente: *Elaboración propia.*

La distribución de tabiquillos en el interior del módulo debe garantizar un flujo uniforme de aire en toda la cubierta a partir de una entrada y salida centralizada del módulo. Es importante que se eviten puntos calientes o fríos que reduzcan la eficiencia del sistema.

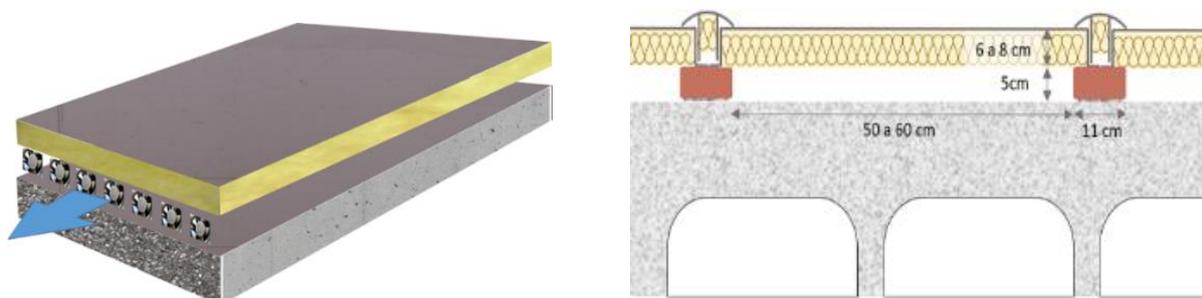


Figura 27. Secciones de la cubierta ventilada activa. Fuente: Grupo de Termotecnia US.

La operación de la ventilación está automatizada de tal manera que funciona únicamente cuando resulta conveniente desde el punto de vista energético. Para ello, la cubierta tiene tres modos fundamentales de operación:

- **Modo 1.** Durante la noche, cuando la temperatura exterior es baja, la circulación de aire se activa (ventilador encendido y compuertas abiertas) y disipa calor de la hoja interior de la cubierta que consecuentemente se enfría. Debido a las cálidas noches de Sevilla, las temperaturas mínimas nocturnas no bajan lo suficiente como para disipar calor de la cubierta, por lo que se ha incluido un sistema de enfriamiento evaporativo para conseguir una reducción adicional de la temperatura del aire. Este modo se denomina de carga de frío.

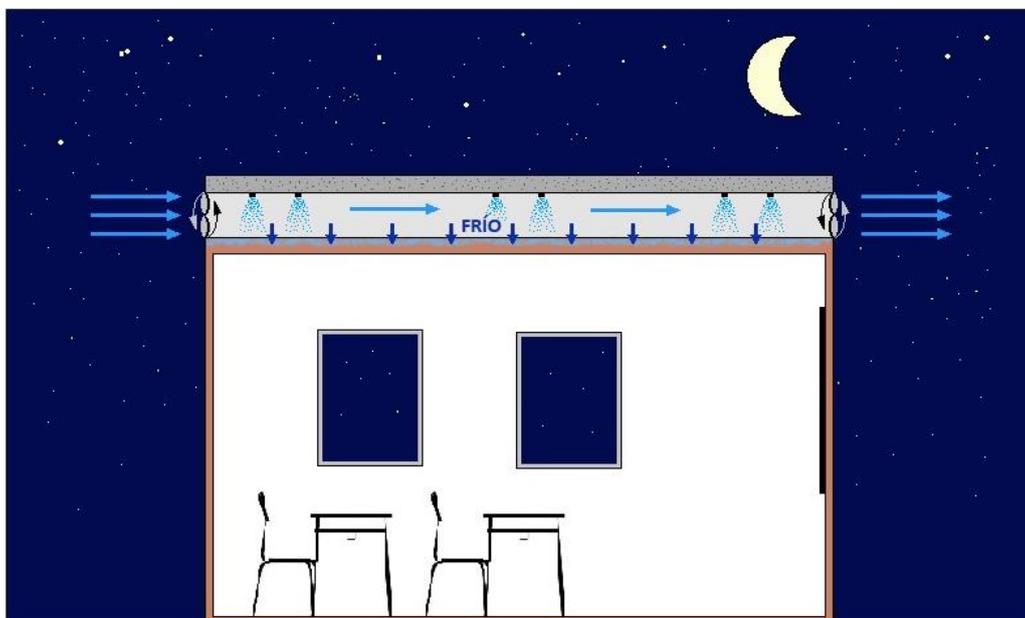


Figura 28. Período de carga de frío con sistema evaporativo. Fuente: Elaboración propia.

- **Modo 2.** Durante el día, cuando hay radiación solar y las temperaturas exteriores son altas, la circulación de aire se encuentra detenida (ventilador apagado y compuertas cerradas). La hoja exterior al encontrarse aislada rechaza la mayor parte el calor, evitando simultáneamente que el frío almacenado durante la noche en la hoja interior se escape al exterior. La consecuencia es que el frío ingresa al interior del edificio. Este modo se puede llamar como el periodo de descarga (de frío) de la cubierta térmicamente activa.

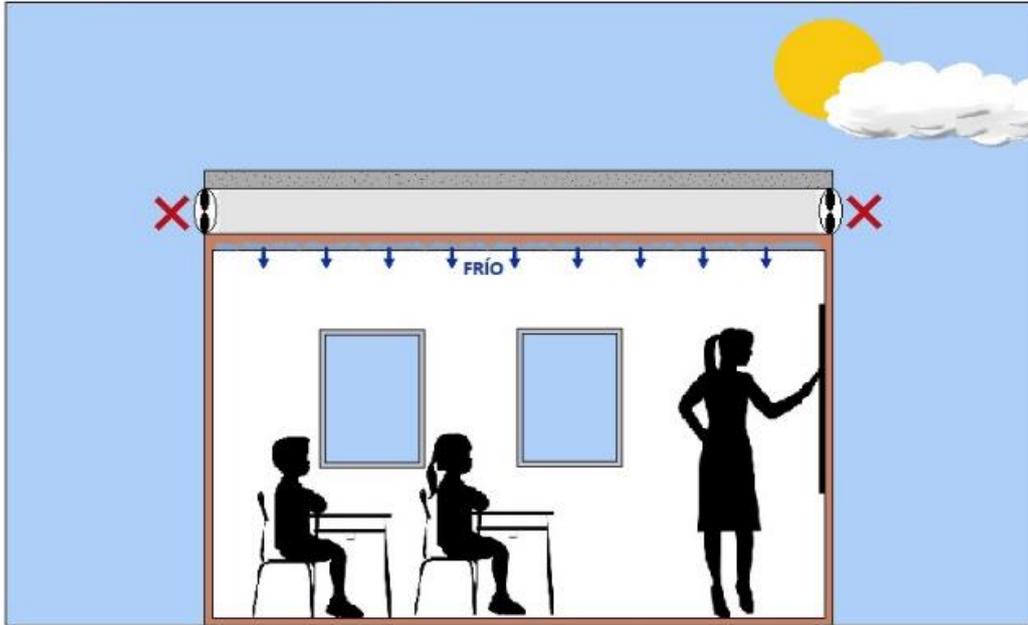


Figura 29. Período de descarga de frío. Fuente: Elaboración propia.

## 6.2 Modelización

### 6.2.1 Hipótesis

- La hoja exterior es muy aislada por lo que el flujo de calor a través de ella es despreciable.
- Las temperaturas de las superficies son uniformes (no varían con la altura).
- Régimen permanente.

El esquema eléctrico equivalente es:

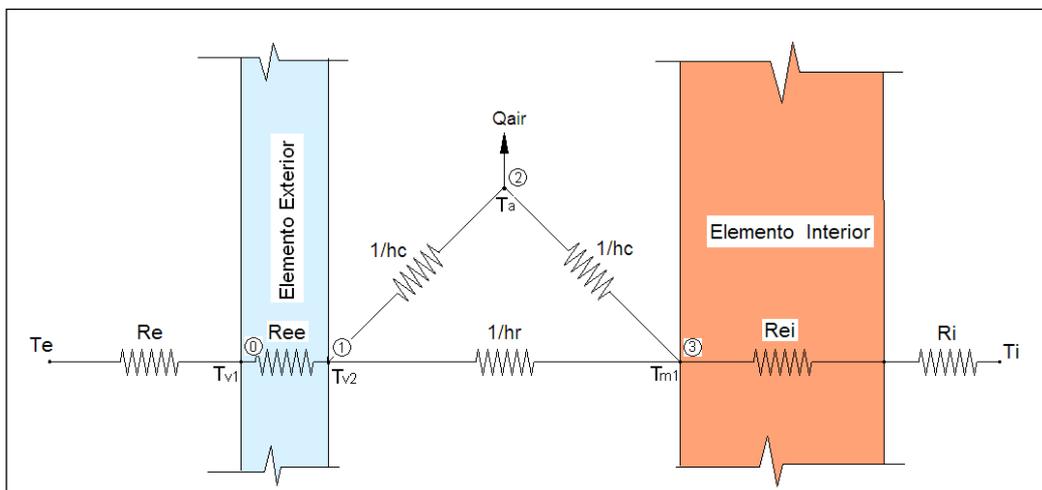


Figura 30. Esquema eléctrico equivalente en triángulo. Fuente: Elaboración propia.

El circuito triángulo que representa los diferentes coeficientes de transmisión de calor de la cámara, pueden ser transformados a un circuito estrella que es más conveniente para el desarrollo de las ecuaciones:

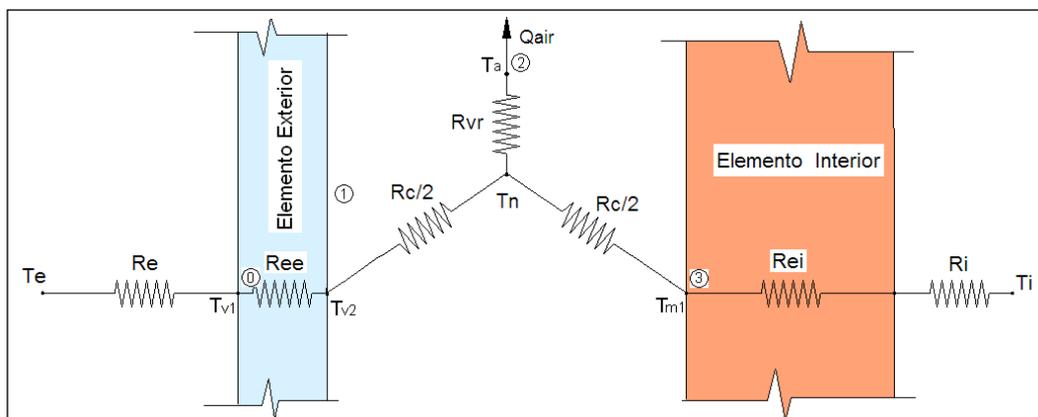


Figura 31. Esquema eléctrico equivalente en estrella. Fuente: Elaboración propia.

Donde:

$$R_c = \frac{1}{h_r + \frac{h_c}{2}} \quad \text{y} \quad R_{vr} = \frac{h_r}{h_c(2h_r + h_c)}$$

Debido a que el elemento exterior se puede suponer adiabático, No existirá flujo de calor desde el nodo Tn al nodo Tv2. Lo que quiere decir que Tn=Tv2. Por este motivo el esquema eléctrico equivalente se puede reducir a:

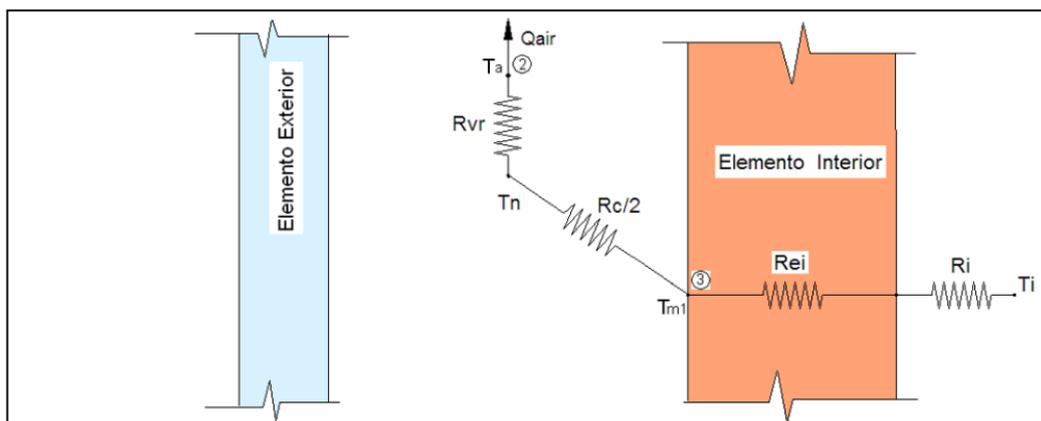


Figura 32. Esquema eléctrico equivalente simplificado. Fuente: Elaboración propia.

### 6.2.2 Flujo de calor desde el interior hasta la cámara de aire

El flujo de calor desde el interior hasta la cámara de aire será

$$\dot{q}_{perd} = \frac{1}{R_i + R_{ei} + \frac{R_C}{2} + R_{vr}} (T_i - T_a),$$

Donde  $T_a$  es la temperatura media del aire en la cámara.

Definiendo  $U_i$  como la transmitancia térmica desde la mitad de la cámara hasta el interior:

$$U_i = \frac{1}{R_i + R_{ei} + \frac{R_C}{2}}$$

Y “Z” como la transmitancia térmica desde el interior hasta la cámara de aire como:

$$Z = \frac{1}{R_i + R_{ei} + \frac{R_C}{2} + R_{vr}} = \frac{1}{\frac{1}{U_i} + R_{vr}}$$

Se tiene que:

$$\dot{q}_{perd} = Z(T_i - T_a)$$

### 6.2.3 Evolución de la temperatura del aire en la cámara

Supóngase un volumen elemental como el mostrado en la figura siguiente

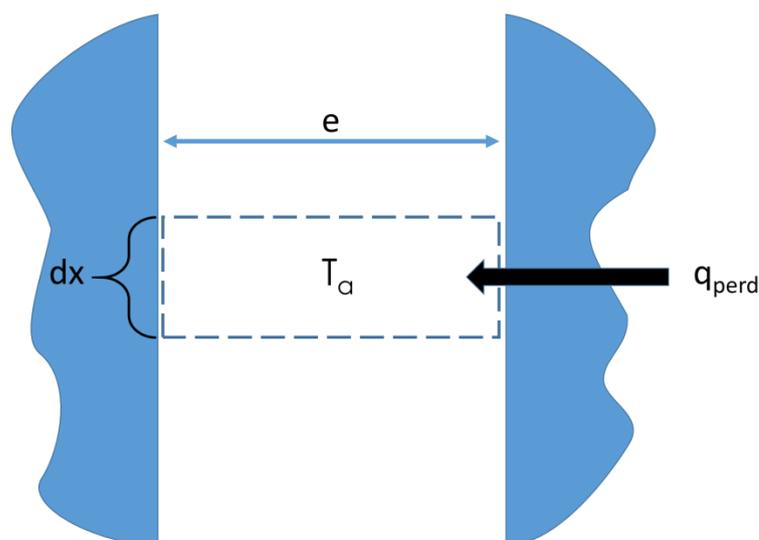


Figura 33. Volumen elemental de la cubierta activa. Fuente: Elaboración propia.

Suponiendo un ancho de cámara unitario se puede plantear el primer principio sobre el volumen elemental de la siguiente forma:

Entalpía de entrada + Calor generado = Calor transferido + Entalpía de salida +  $\Delta$  Energía interna

- Entalpía de entrada.-  $\dot{m} \cdot c_p \cdot (T_a - T_r)$
- Calor generado = 0
- Calor transferido =  $h \cdot 1 \cdot \Delta x \cdot (T_a - T_{m1})$
- Entalpía de salida.-  $\dot{m} \cdot c_p \cdot ((T_a + \frac{\partial T_a}{\partial x} \cdot \Delta x) - T_r)$
- Variación de energía interna.-  $\rho \cdot c_p \cdot e \cdot \Delta x \cdot \frac{\partial T_f}{\partial t}$

Sustituyendo términos resulta:

$$\dot{m} \cdot c_p \cdot (T_a - T_r) + 0 = h \cdot 1 \cdot \Delta x \cdot (T_a - T_{m1}) + \dot{m} \cdot c_p \cdot ((T_a + \frac{\partial T_a}{\partial x} \cdot \Delta x) - T_r) + \rho \cdot c_p \cdot e \cdot \Delta x \cdot \frac{\partial T_f}{\partial t}$$

y reordenando términos:

$$-\dot{m} \cdot c_{pf} \cdot \frac{\partial T_a}{\partial x} \cdot \Delta x = h \cdot 1 \cdot \Delta x \cdot (T_a - T_{m1}) + \rho \cdot c_p \cdot e \cdot \Delta x \cdot \frac{\partial T_f}{\partial t}$$

El último término de la ecuación está relacionado con el número de Strouhal (St),  $St = \frac{H}{t_c} \cdot u$  y, en nuestro caso, para tiempos característicos de observación del fenómeno del orden de 10 minutos tiende a cero.

La ecuación queda, por tanto:

$$-\dot{m} \cdot c_{pf} \cdot \frac{\partial T_a}{\partial x} \cdot \Delta x = h \cdot 1 \cdot \Delta x \cdot (T_a - T_{m1})$$

Eliminando el  $\Delta x$  y haciendo uso de la expresión final del apartado 2.4.2

$$\dot{m} \cdot c_{pf} \cdot \frac{\partial T_a}{\partial x} = Z(T_i - T_a)$$

O bien:

$$\rho \cdot e \cdot v \cdot c_{pf} \cdot \frac{\partial T_a}{\partial x} = Z(T_i - T_a)$$

Realizando separación de variables:

$$\frac{\rho \cdot e \cdot v \cdot Cp}{Z} \int \frac{dT_a}{T_i - T_a} = \int dx$$

Integrando:

$$-\frac{\rho \cdot e \cdot v \cdot Cp}{Z} \ln|T_i - T_a| = x + C_0$$

$$T_i - T_a = C_1 \cdot \exp\left(-\frac{Z \cdot x}{\rho \cdot e \cdot v \cdot Cp}\right)$$

$$T_a = T_i - C_1 \cdot \exp\left(-\frac{Z \cdot x}{\rho \cdot e \cdot v \cdot Cp}\right)$$

Aplicando condiciones iniciales:

$$T_a(x=0) = T_{in}$$

Se tiene:

$$T_{in} = T_i - C_1 \cdot \exp(0)$$

Despejando la constante de integración:

$$C_1 = T_i - T_{in}$$

Con lo que la temperatura en la cámara es:

$$T_a = T_i - (T_i - T_{in}) \exp\left(-\frac{Z \cdot x}{\rho \cdot e \cdot v \cdot Cp}\right)$$

La anterior expresión describe la temperatura del aire en la cámara para una posición “x”, Pero para calcular el flujo de calor desde el interior, es necesario determinar la temperatura media del aire en la cámara.

#### 6.2.4 Temperatura media del aire en la cámara

La temperatura media se puede calcular con la siguiente expresión:

$$\bar{T}_a = \frac{\int_0^H T_a \cdot dx}{H}$$

$$\bar{T}_a = \frac{1}{H} \int_0^H \left( T_i - (T_i - T_{in}) \exp\left(-\frac{Z \cdot x}{\rho \cdot e \cdot v \cdot Cp}\right) \right) \cdot dx$$

Cuya solución es:

$$\bar{T}_a = \frac{1}{H} \left( T_i \cdot x + (T_i - T_{in}) \frac{\rho \cdot e \cdot v \cdot Cp}{Z} \cdot \exp\left(-\frac{Z \cdot x}{\rho \cdot e \cdot v \cdot Cp}\right) \right) \Big|_0^H$$

$$\bar{T}_a = \frac{1}{H} \left( T_i \cdot H + (T_i - T_{in}) \frac{\rho \cdot e \cdot v \cdot Cp}{Z} \cdot \exp\left(-\frac{Z \cdot H}{\rho \cdot e \cdot v \cdot Cp}\right) - (T_i - T_{in}) \frac{\rho \cdot e \cdot v \cdot Cp}{Z} \right)$$

$$\boxed{\bar{T}_a = T_i - (T_i - T_{in}) \frac{\rho \cdot e \cdot v \cdot Cp}{Z \cdot H} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{Z \cdot H}{\rho \cdot e \cdot v \cdot Cp}\right) \right]}$$

### 6.3 Capacidad adicional

La modelización de la cubierta activa como capacidad adicional se lleva a cabo en la herramienta unificada LIDER-CALENER. El fundamento principal del modelado de la capacidad adicional genérica de la cubierta activa consiste en la sustitución de la excitación a la que se encuentra sometida la cubierta en la situación inicial, por una excitación modificada por el uso de la solución innovadora, siendo el cálculo de dicha excitación fundamentado en el uso del modelo analítico de la cubierta descrito anteriormente.

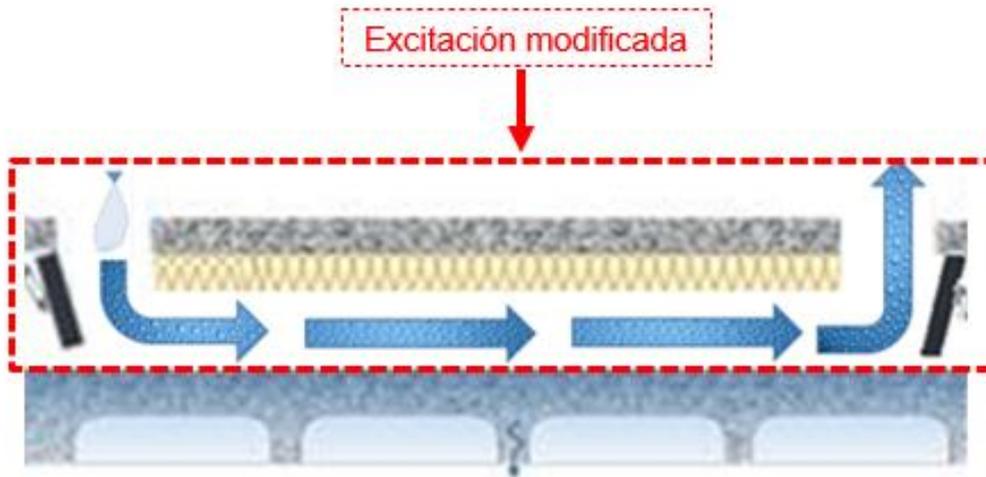


Figura 34. Fundamento del modelado de la capacidad adicional genérica.

*Fuente: Grupo de Termotecnia US.*

La información detallada del procedimiento se detalla en el Anexo.

### 6.4 Resultados

El impacto de la integración de la solución innovadora de cubierta se lleva a cabo gracias al modelado de la solución en la herramienta unificada como capacidad adicional genérica, tal y como se ha comentado previamente.

A continuación, se muestran los resultados obtenidos en términos de demanda. Estos valores de demanda serán comparados con los valores de demanda de la situación convencional, es decir, con la situación mejorada que se calculó en el Capítulo 5.

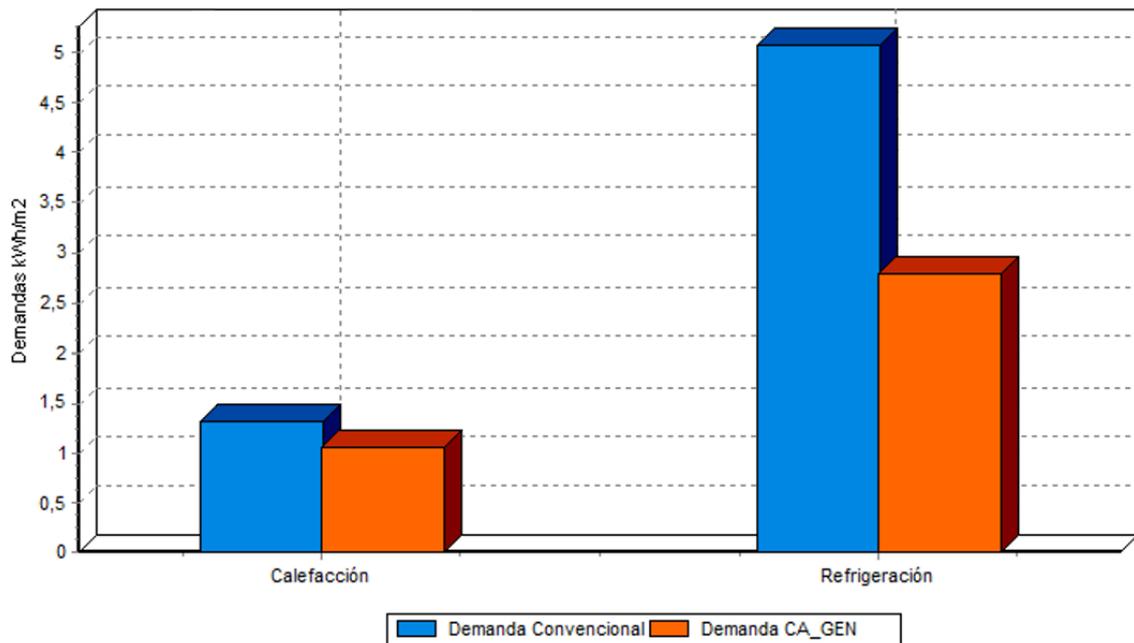


Figura 35. Demandas anuales con la capacidad adicional. Fuente: HULC.

Como se puede observar en la Figura 35, la posibilidad de instalar la cubierta activa de manera adicional a la situación mejorada, reduce considerablemente las demandas del edificio, en especial la demanda de refrigeración. El porcentaje de reducción de la demanda de calefacción es del 15.8%, pasando de 1.29 a 1.09 KWh/m<sup>2</sup>·año, y el de refrigeración del 45.5%, pasando de 5.12 a 2.79 KWh/m<sup>2</sup>·año.

Además de los resultados en demanda, se consigue reducir la temperatura interior del colegio y por tanto, la mejora del confort térmico logrado tras la implementación de la cubierta innovadora.



# 7 Conclusiones

---

Hoy en día, vivimos en una sociedad muy consumista, hasta tal punto de que se ha convertido en un serio problema para la sostenibilidad del planeta. Reducir las emisiones, el consumo o utilizar las energías renovables, son algunos de las directrices para combatirlo.

A medida que salen nuevas las actualizaciones del DB-HE, éstas son cada vez más exigentes respecto a la eficiencia energética. El objetivo de dicha actualización es caminar hacia el concepto de “Edificio de Consumo Casi Nulo”, mejorando los equipos y el diseño de los edificios. En este nuevo concepto de edificación, las renovables juegan un papel fundamental.

El objetivo principal de este proyecto ha sido la rehabilitación de un colegio. Siguiendo la normativa vigente, se han planteado distintas propuestas de mejora. La primera medida era reducir la demanda del edificio actuando sobre las transmitancias térmicas de muros, cubierta, suelo y ventanas, mejorar los puentes térmicos, la ventilación y el factor solar. La combinación óptima se ha obtenido haciendo uso del Coste del Ciclo de Vida y con ella se consigue una reducción de la demanda del 88.5%.

Para aproximarnos al concepto de “Edificio de Consumo Casi Nulo”, se he planteado una segunda medida de mejora para reducir la demanda. Se ha propuesto la instalación de una cubierta activa. Para su caracterización se ha utilizado el Software EES. Con esta medida se consigue mejorar especialmente la demanda de refrigeración, consiguiendo una reducción del 45.5%.

Con este proyecto se pone de manifiesto que es absolutamente posible reducir la demanda de un edificio mal diseñado mediante elementos convencionales, hasta alcanzar niveles de alta eficiencia y consiguiendo un ahorro de dinero a largo plazo.



## ANEXO. Capacidades adicionales genéricas

A continuación, se describe el procedimiento llevado a cabo para el cálculo de las capacidades adicionales genéricas

### PASO 1. Cálculo de la excitación modificada

El cálculo de la excitación modificada (temperatura superficial) variará en función de la operación de la solución.

Las diferentes formas de operación evaluadas en régimen de refrigeración son las siguientes:

- Cubierta funcionando en modo ventilación 8h (noche).
- Cubierta funcionando en modo ventilación y evaporativo 8h (noche).

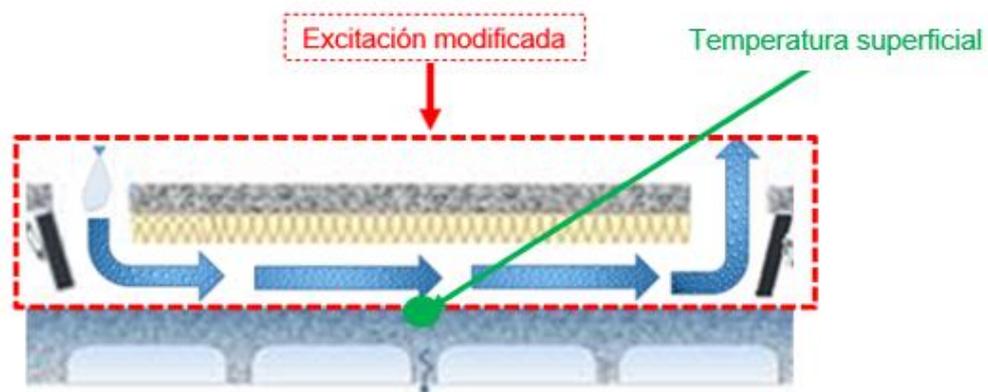


Figura 36. Temperatura superficial. Fuente: Grupo de Termotecnia US.

La excitación a la que se vería sometida la cubierta en la situación de partida viene dada por las condiciones climáticas estándar de la zona a estudio. Sin embargo, dada la existencia de la solución innovadora, se requiere el cálculo de la excitación modificada. Esto consiste en la obtención de la temperatura superficial obtenida en el punto mostrado en la figura 36 y que será impuesta como excitación en la herramienta de modelado. Para el cálculo de las excitaciones se ha empleado la herramienta informática EES

### PASO 2. Obtención de los ficheros de modelado de la capacidad adicional genérica en la herramienta unificada

Para la obtención de los ficheros de modelado de la capacidad adicional genérica, en la función de capacidades adicionales genéricas de la herramienta, es necesario seleccionar de cada espacio modelado, la cubierta asociada a dicho espacio, tal y como puede observarse en la siguiente figura.

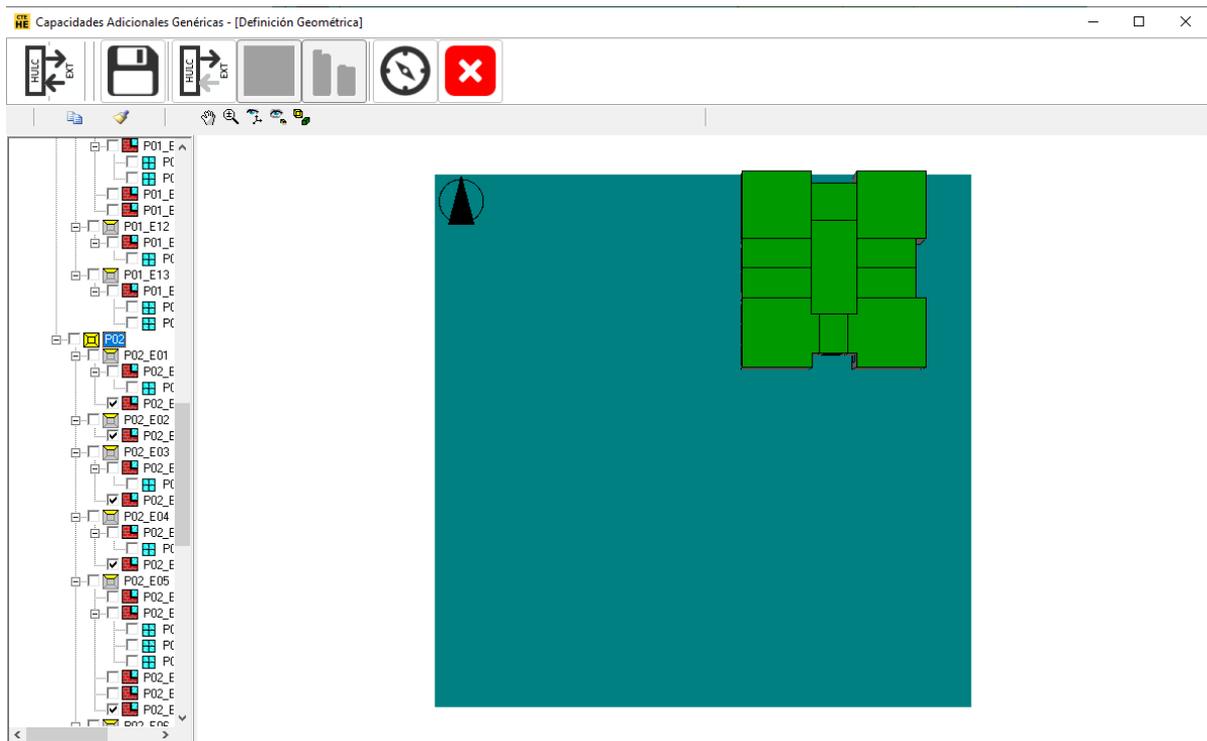


Figura 37. Selección de la cubierta asociada a cada espacio modelado en la vivienda. *Fuente: HULC.*

Una vez seleccionada la cubierta completa, donde se lleva a cabo la implementación de la solución innovadora, se procede a la exportación de datos. Una vez finalizada la exportación, los ficheros necesarios aparecerán en la carpeta del proyecto de HULC denominada “Datos\_CA\_GEN” en formato CSV, tal y como aparece en la figura.

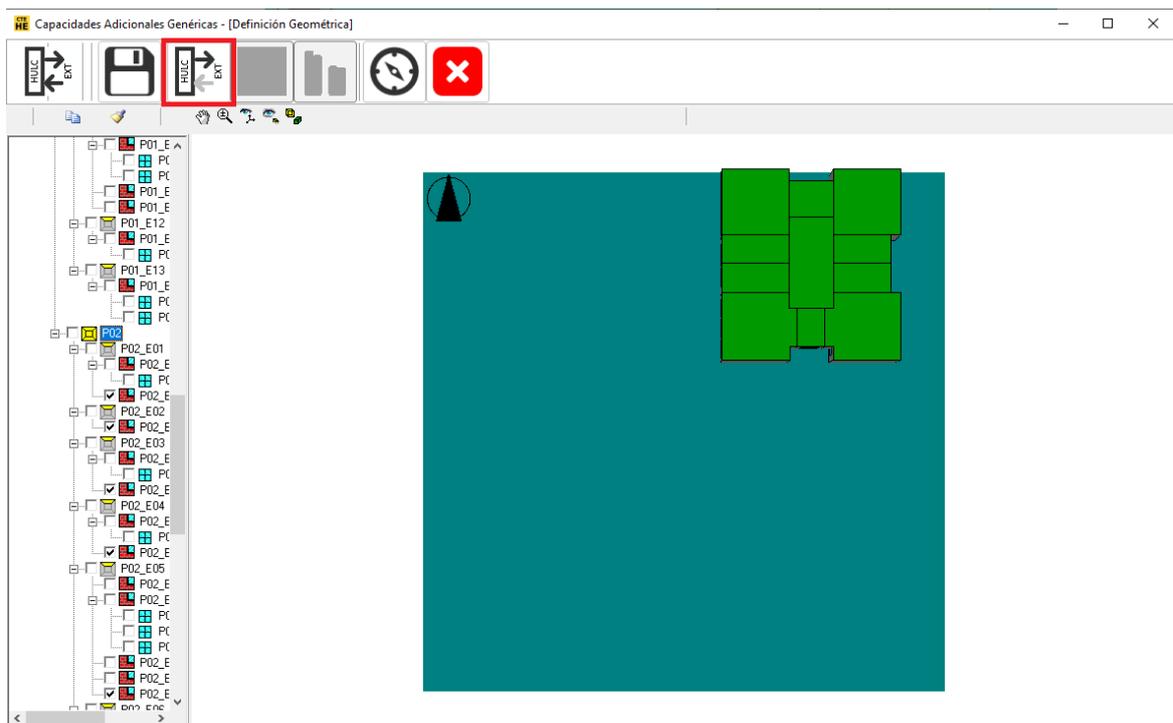


Figura 38. Exportación de datos. *Fuente: HULC.*

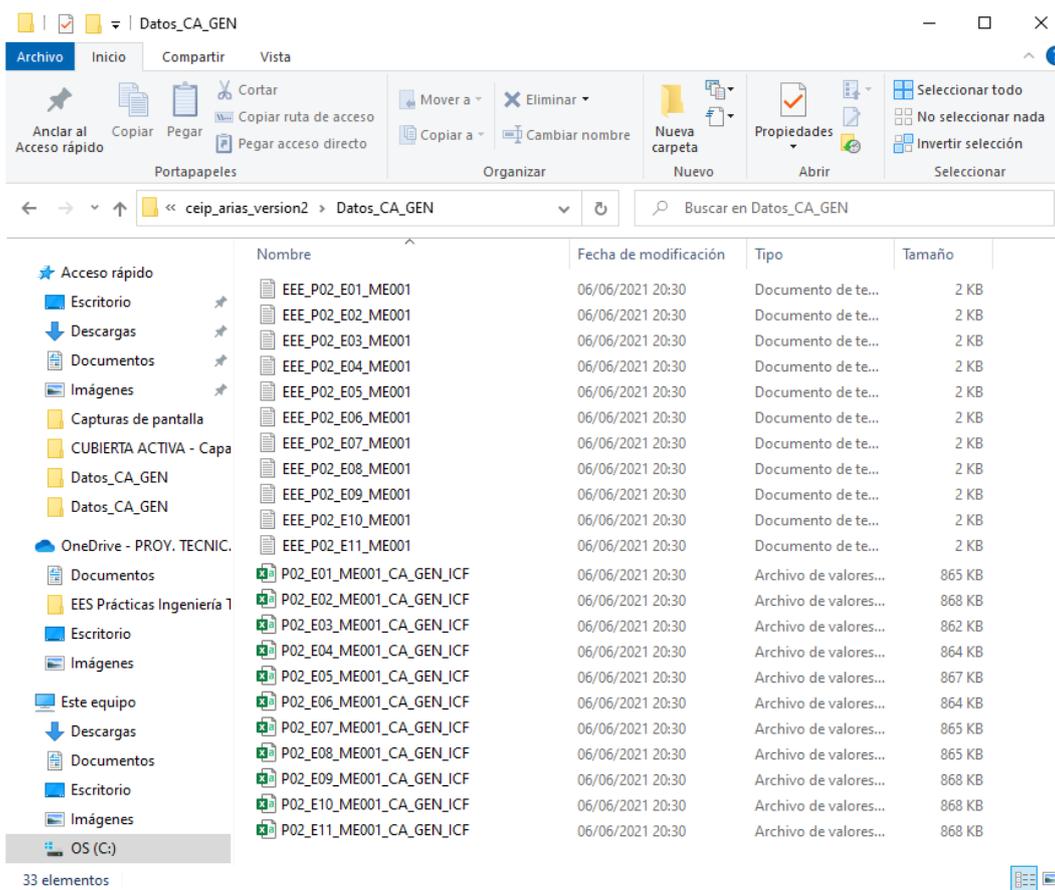


Figura 39. Archivos de capacidades adicionales obtenidos. Fuente: Elaboración propia.

### PASO 3. Creación de los archivos de capacidades adicionales modificados

Los archivos generados para el modelado de la capacidad adicional presentan la estructura mostrada en la figura siguiente. El detalle de cada una de las variables de detalla en el anexo correspondiente.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R
1	hci(W/m2K)	hri(W/m2K)	Taire interic	Tradiante in	Carga sensit	hce(W/m2K)	hre(W/m2K)	Taire exter	Tradiante ex	Radiación D	Radiación di	Angulo Radi	Azimuth	Zenit	Caudal de al	Delta T ext-int (°C)		
2	2.00	5.70	18.13	18.13	-923.20	20.00	4.63	2.78	-9.05	0.00	0.00	0.00	0.00	90.00	0	0		
3	2.00	5.70	17.92	17.92	-911.99	20.00	4.63	12.22	1.57	0.00	0.00	0.00	0.00	90.00	0	0		
4	2.00	5.70	17.75	17.75	-930.16	20.00	4.63	15.00	4.71	0.00	0.00	0.00	0.00	90.00	0	0		
5	2.00	5.70	17.60	17.60	-948.66	20.00	4.63	14.44	4.26	0.00	0.00	0.00	0.00	90.00	0	0		
6	2.00	5.70	17.47	17.47	-964.28	20.00	4.63	13.89	3.59	0.00	0.00	0.00	0.00	90.00	0	0		
7	2.00	5.70	17.34	17.34	-985.31	20.00	4.63	13.33	3.14	0.00	0.00	0.00	0.00	90.00	0	0		
8	2.00	5.70	20.00	20.00	-724.75	20.00	4.63	12.78	2.47	0.00	0.00	0.00	0.00	90.00	0	0		
9	2.00	5.70	20.00	20.00	-732.89	20.00	4.63	12.22	2.03	0.00	0.00	0.00	0.00	90.00	0	0		
10	2.00	5.70	20.00	20.00	-730.58	20.00	4.63	12.22	2.03	0.00	9.42	0.00	0.00	90.00	0	0		
11	2.00	5.70	20.00	20.00	-691.02	20.00	4.63	13.33	3.14	0.00	78.50	83.01	-51.34	83.01	0	0		
12	2.00	5.70	20.00	20.00	-597.76	20.00	4.63	14.44	4.26	111.15	96.73	74.87	-39.97	74.87	0	0		
13	2.00	5.70	20.00	20.00	-515.78	20.00	4.63	16.11	6.06	171.63	133.95	68.58	-27.02	68.58	0	0		
14	2.00	5.70	20.00	20.00	-423.51	20.00	4.63	17.78	7.64	235.95	172.57	64.72	-12.58	64.72	0	0		
15	2.00	5.70	20.01	20.01	-343.80	20.00	4.63	18.33	8.33	394.01	193.34	63.74	2.71	63.74	0	0		
16	2.00	5.70	19.88	19.88	-378.77	20.00	4.63	18.89	8.78	344.99	169.86	65.77	17.61	65.77	0	0		
17	2.00	5.70	19.85	19.85	-368.48	20.00	4.63	18.33	8.33	313.43	125.87	70.55	31.77	70.55	0	0		
18	2.00	5.70	19.82	19.82	-381.24	20.00	4.63	17.78	7.64	42.00	86.17	77.56	44.15	77.56	0	0		
19	2.00	5.70	19.73	19.73	-419.69	20.00	4.63	17.22	6.96	0.00	34.54	86.22	55.01	86.22	0	0		
20	2.00	5.70	19.58	19.58	-478.46	20.00	4.63	16.11	5.83	0.00	3.14	0.00	0.00	90.00	0	0		
21	2.00	5.70	19.40	19.40	-530.65	20.00	4.63	16.11	5.83	0.00	0.00	0.00	0.00	90.00	0	0		
22	2.00	5.70	19.20	19.20	-585.95	20.00	4.63	15.56	5.39	0.00	0.00	0.00	0.00	90.00	0	0		
23	2.00	5.70	18.99	18.99	-638.09	20.00	4.63	15.00	4.71	0.00	0.00	0.00	0.00	90.00	0	0		
24	2.00	5.70	18.78	18.78	-688.62	20.00	4.63	14.44	4.03	0.00	0.00	0.00	0.00	90.00	0	0		

Figura 40. Estructura del archivo de modelado de la capacidad adicional. Fuente: Excel.

Del conjunto de variables mostradas, la excitación modificada, se integra modificando las variables asociadas al clima exterior. Para ello, es necesario crear un archivos con la misma estructura inicial pero modificando en la nomenclatura del archivo la denominación “ICF” por “MCF”, con objeto de que la herramienta detecta correctamente los archivos modificados a posteriori.

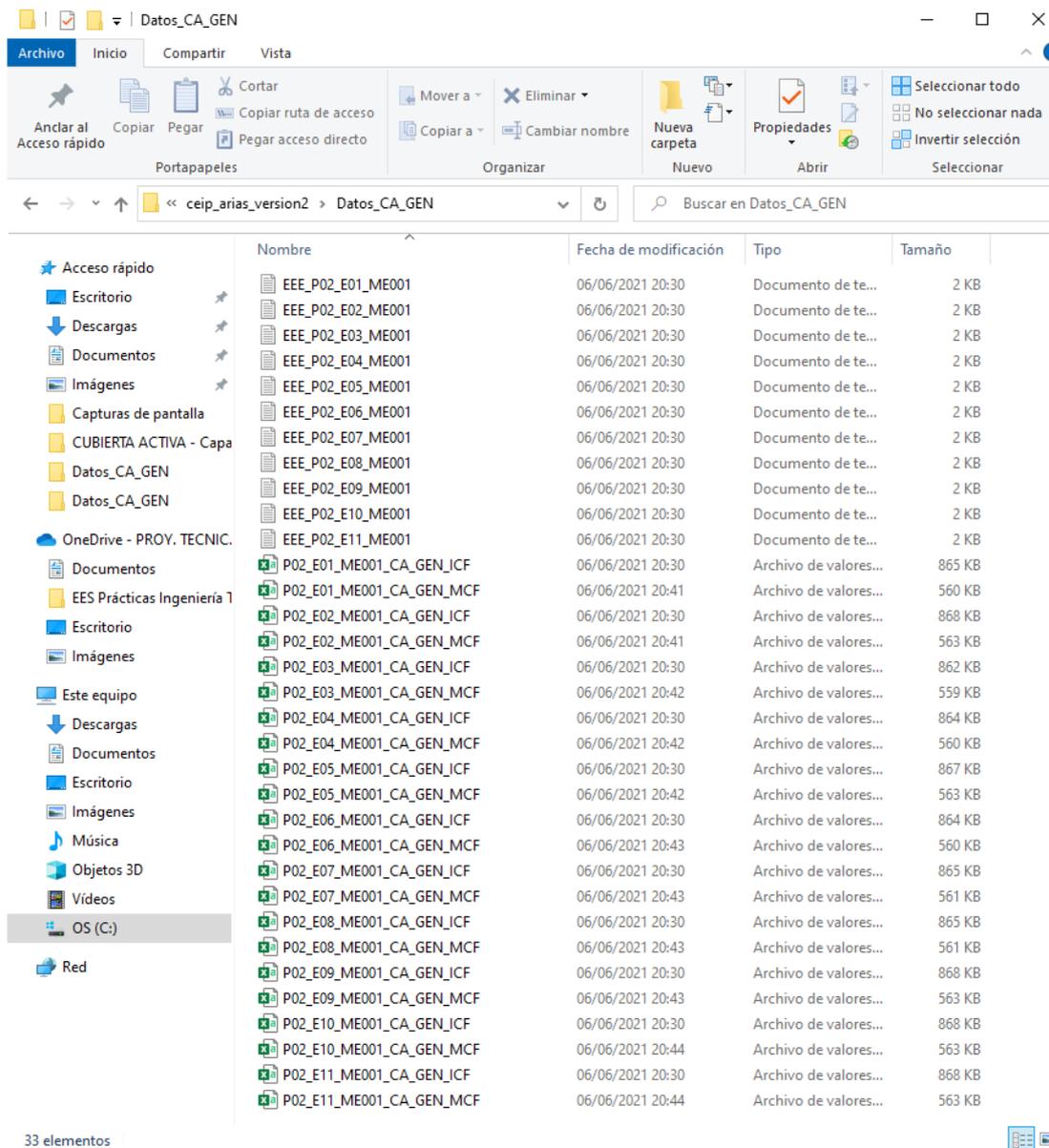


Figura 41. Generación de archivos “MCF”. Fuente: Elaboración propia.

Cada uno de los archivos “MCF” creados debe ser modificado con la excitación en temperatura superficial impuesta calculada previamente. Para ello, la temperatura exterior y temperatura radiante exterior de cada espacio debe ser modificada por la temperatura superficial calculada, el valor del coeficiente de película exterior y coeficiente radiante se imponen a valores altos con objeto de imponer la temperatura en superficie y finalmente, dado que la temperatura superficial calculada e impuesta presenta la influencia de la radiación en la cámara, se anula la radiación directa y difusa de los archivos.

#### **PASO 4. Importación de los archivos modificados en la herramienta**

Una vez generados y modificados los archivos, se procede a la importación de los mismos en la herramienta unificada, pulsando sobre la opción mostrada en la figura.

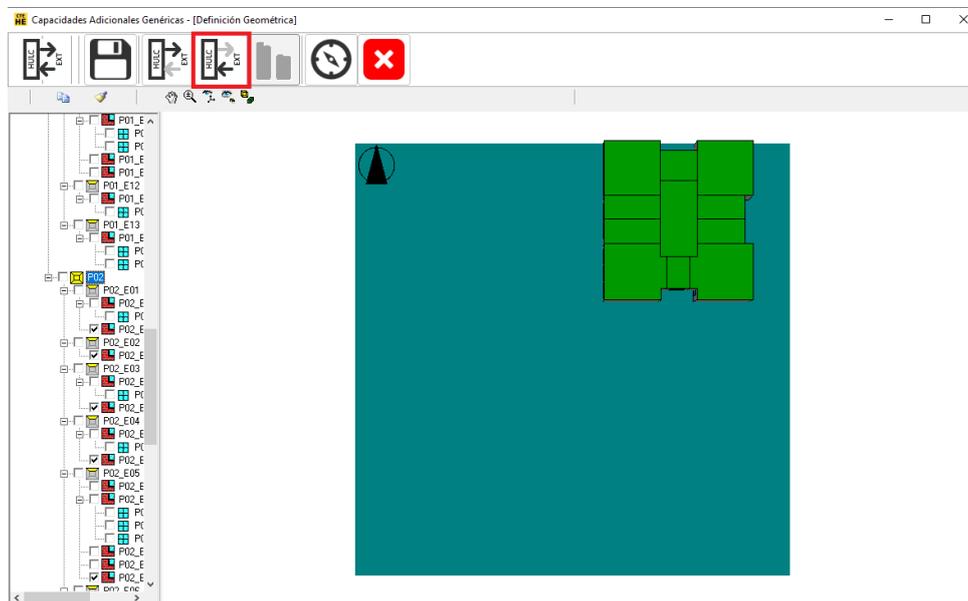


Figura 42. Importación de los archivos modificados. *Fuente: HULC.*

#### **PASO 5. Cálculo del caso y obtención del certificado energético de la vivienda con la inclusión de la capacidad adicional**

Finalmente, una vez importados los archivos, se procede al cálculo del caso. Para ello, en el apartado de la definición de sistemas y cálculo de consumos, se procede al cálculo de consumos, según se muestra en la figura siguiente.

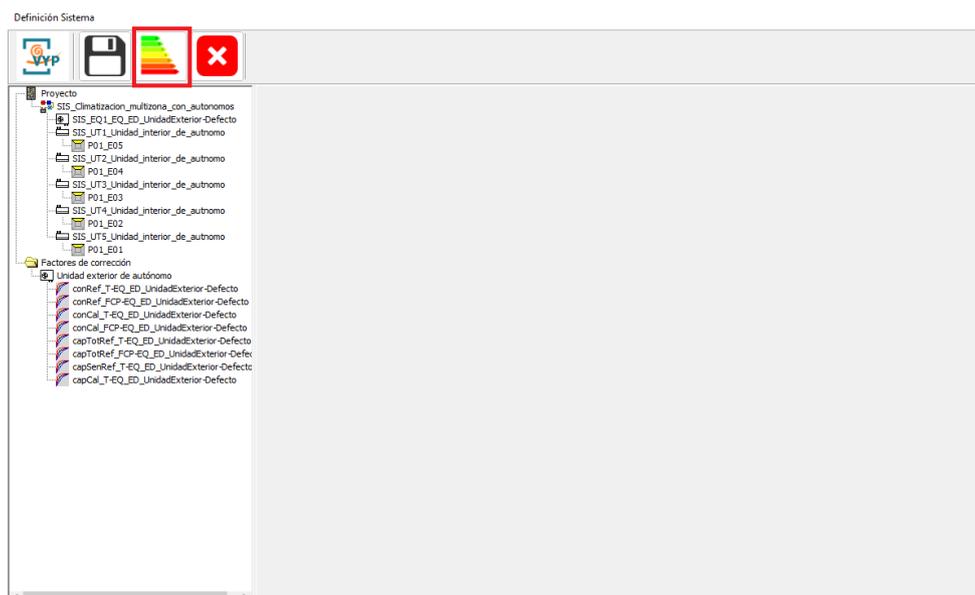


Figura 43. Cálculo de consumos. *Fuente: HULC.*



# Bibliografía

---

- [1] **Campano Laborda, Miguel Ángel. 2015.** Confort térmico y eficiencia energética en espacios con alta carga interna climatizados: Aplicación a espacios docentes no universitarios en Andalucía. Tesis doctoral.
- [2] **Consejería de Educación de la Junta de Andalucía. 2017.** Programa de climatización y eficiencia energética de centros escolares públicos en Andalucía.
- [3] **Área de Climatología y Aplicaciones Operativas. 2020.** Olas de Calor en España desde 1975. Estudio de la Agencia Estatal de Meteorología.
- [4] **Martín Arroyo, Javier. 2019.** Alerta contra el calor en las aulas. El País. Artículo periodístico.
- [5] **Bocanegra, Raúl. 2020.** 800 días después, el Parlamento debate la ley que busca aliviar el calor en los colegios de Andalucía. Público. Artículo periodístico.
- [6] **Badia Camprubí, Inma. 2017.** Cómo hacer frente al calor en los centros escolares. Feuso. Artículo periodístico.
- [7] **Anónimo. 2019.** Andalucía, a la cabeza en número de olas de calor. Andalucía en datos. Artículo periodístico.
- [8] **Vázquez Maestre, Irene. 2019.** Optimización energética de la envuelta e instalaciones del C.E.I.P. Concepción Estevarena. Trabajo Fin de Grado.
- [9] **Calzado Esparcia, Sonia. 2019.** Dimensionado óptimo en la rehabilitación de un colegio de educación primaria e infantil para alcanzar la categoría de edificio de consumo energético casi nulo. Trabajo Fin de Grado.
- [10] **Grupo de Termotecnia US.** Obtención Klim y qsol. Diapositivas.
- [11] **Grupo de Termotecnia US.** Planeamiento y resolución de ecuaciones de comportamiento térmico de la envuelta de edificios. Diapositivas.
- [12] **Grupo de Termotecnia US.** Parámetros característicos y coeficientes correctores. Diapositivas.
- [13] **Grupo de Termotecnia US.** Estrategias globales de reducción de demanda. Diapositivas.
- [14] **Grupo de Termotecnia US.** Cálculo práctico de ACH equivalente. Diapositivas.
- [15] **Grupo de Termotecnia US.** Cálculo del Coste del Ciclo de Vida en Energética de los Edificios. Diapositivas.
- [16] **Grupo de Termotecnia US.** Identificación de la alternativa óptima absoluta y la alternativa óptima conforme las exigencias reglamentarias. Diapositivas.
- [17] **Ministerio de Fomento. 2019.** Documento Básico de Ahorro de Energía.

