

Trabajo Fin de Grado
Ingeniería de la Energía

**Dimensionado óptimo en la rehabilitación de un
colegio de educación primaria e infantil para
alcanzar la categoría de edificio de consumo
energético casi nulo**

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Autor: Sonia Calzado Esparcia

Tutor: Servando Álvarez Domínguez

Laura Romero Rodríguez

Dpto. Termotecnia
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2019



Trabajo de Fin de Grado
Ingeniería de la Energía

Dimensionado óptimo en la rehabilitación de un colegio de educación primaria e infantil para alcanzar la categoría de edificio de consumo energético casi nulo

Autor:

Sonia Calzado Esparcia

Tutor: Servando Álvarez Domínguez

Laura Romero Rodríguez

Dpto. de Termotecnia
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla
Sevilla, 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

Autor: Sonia Calzado Esparcia

Tutor: Servando Álvarez Domínguez
Laura Romero Rodríguez

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2019

El Secretario del Tribunal

Agradecimientos

En primer lugar, agradezco a mis profesores porque sus exigencias me han llevado a mejorar en todos los aspectos de la vida.

A Servando, por darme la oportunidad de hacer este proyecto y por su generosidad a la hora de transmitirme sus conocimientos.

A Laura, por su paciencia, por ofrecernos siempre su ayuda. Quiero valorar su dedicación en todo lo que hace.

Agradezco a cada uno de los compañeros que han vivido estos años de trabajo, esfuerzo y convivencia. Compañeros que se han convertido en amigos y es que sin ellos todo esto hubiese sido mucho más complicado. A Manuel, Alicia, Noemi, Cristina, Ana, Marina, Pablo, Rafa, Luis, Juanjo, David, Victoria, Susana, Marta, María, Auxi, Ana Luisa, Juan Isaac, Juanje, Jose, Kiko, Raquel, Álvaro, Lucía, Mario, Reguera, Vargas, Elías, Pinazo, Rubia, Quintana, Darren y Javi. Gracias chicos por todos los momentos vividos. Quiero agradecer especialmente a Irene, este último viaje lo hemos hecho juntas y ella sabe todo.

A mis amigos que no son de la escuela que desde la distancia han estado siempre para mí, Lomas, Raquel, Lidia, Anabel, Álvaro, Rocío, Pablo, Elena, Manuel, Jesús, Nelson, David S, David I, Marta, Samuel, Amparo, María S, Almudena y Mónica.

A mi familia que ha confiado siempre en mí.

A mi hermana Carmen, por ser mi mejor amiga en todo momento.

A mi hermana Nuria, por no separarse nunca de mí.

A mi madre por quererme aún sin entenderme y por soportarlo todo.

A mi padre por apostar por mí siempre, incluso después de ir al arcoíris de los padres.

Sonia Calzado Esparcia

Sevilla, 2019.

La eficiencia energética será la base de este proyecto pues se buscará el buen aprovechamiento de la energía, teniendo como principal meta el menor consumo posible. Se partirá de un edificio real con una demanda y consumo inicial y se buscará alcanzar el consumo casi nulo del mismo.

Para el proyecto se plantean dos medidas. La primera medida que se propondrá será una reducción de la demanda del edificio, un colegio público situado en Jaén. Para ello las primeras modificaciones afectarán a la envolvente del centro entre otros aspectos. A través de un modelo simplificado, se encontrará la opción más apropiada para el edificio tanto energética como económicamente.

La segunda medida que se aplicará será la mejora de la instalación de climatización. El centro cuenta de base con equipos que cubren tanto la demanda de calefacción como la demanda de ACS. Se hará una modificación de la instalación buscando producción de calor y de ACS de la manera más eficiente y renovable posible. Para esta medida se hará uso del software TRNSYS, en el cual se simulará la nueva instalación y su funcionamiento, haciendo un análisis transitorio detallado en paso de tiempo corto. Los nuevos equipos requerirán un dimensionamiento y por ello se volverá a optar por la opción más favorable tanto energética como económicamente.

Finalmente, ambas medidas conseguirán dar lugar a un edificio totalmente renovado y mucho más eficiente que el original, alcanzando el buscado consumo casi nulo.

The energy efficiency will be the base of this project because it will seek the good use of energy, having as main goal the lowest possible consumption. The base situation is a real building with an initial demand and consumption, and we will seek to achieve almost zero consumption.

Two measures are proposed for the project. The first measure that will be proposed is a reduction in the demand of the building, a public school located in Jaén. To achieve this, the first modifications will affect the envelope of the building among other aspects. Through a simplified model, you will find the most appropriate option for the building both energetically and economically.

The second measure that will be applied is the improvement of the air-conditioning system. The building has originally an equipment that covers both the heating demand and the DHW demand. A modification of the installation will be made seeking heating and DHW production in the most efficient and renewable possible way. For this measure, the TRNSYS software will be used, in which the new installation and its operation will be simulated, making a detailed transient analysis in short time steps. The new equipment will require a dimensioning, and for that reason the most favorable option will be chosen, both energetically and economically.

Finally, both measures will lead to a building completely renovated and much more efficient than the original one, reaching almost zero consumption.

| | |
|--|-----------|
| Agradecimientos | vii |
| Resumen | ix |
| Abstract | xi |
| Índice | xiii |
| Índice de Tablas | xv |
| Índice de Figuras | xvii |
| Notación | xxi |
| 1 Introducción | 1 |
| 1.1 Consumo de energía a nivel europeo y normativa | 1 |
| 1.2. Distribución del consumo en España | 3 |
| 2 Objetivo del proyecto | 5 |
| 3 Edificio objeto del proyecto | 7 |
| 3.1. Presentación edificio objeto..... | 7 |
| 3.2. Calidades constructivas..... | 10 |
| 4 Situación inicial del edificio | 13 |
| 4.1. Introducción a la Herramienta nZEB | 13 |
| 4.1.1. Introducción de los datos del edificio tras simularse en HULC..... | 13 |
| 4.1.2. Cálculo de demandas en situación inicial..... | 14 |
| 4.1.3. Verificación de los datos a partir de los parámetros correctores..... | 15 |
| 4.2. Demandas iniciales..... | 16 |
| 4.2.1. Demanda de calefacción y refrigeración | 16 |
| 4.2.2. Demanda de iluminación..... | 18 |
| 4.2.3. Demanda de agua caliente sanitaria (ACS) | 19 |
| 5 Estrategias de reducción de la demanda..... | 21 |
| 5.1. Definición de las propuestas de mejora..... | 21 |
| 5.2. Coste de ciclo de vida | 23 |
| 6 Combinación óptima | 25 |
| 6.1. Características situación mejorada..... | 25 |
| 6.2. Situación mejorada en HULC..... | 26 |
| 6.3. Otros datos de la situación mejorada..... | 27 |
| 7 Edificio en oscilación libre | 29 |
| 8 Instalación de climatización | 31 |
| 8.1. Instalación Original | 31 |
| 8.2. TRNSYS | 32 |
| 8.3. Nueva instalación para reducción del consumo..... | 33 |
| 8.3.1. Introducción a la nueva instalación | 33 |
| 8.3.2. Equipos..... | 34 |
| 8.3.3. Modelo instalación en TRNSYS. | 38 |
| 8.3.3.1. Types y esquema completo..... | 38 |

| | |
|--|-----------|
| 8.3.3.2. Definición de cada type | 42 |
| 8.3.3.3. Diagrama de flujo..... | 46 |
| 8.3.4. Balances de la instalación..... | 48 |
| 8.3.4.1. Estudio del consumo de la caldera | 49 |
| 8.3.4.2. Estudio de área de colectores..... | 51 |
| 8.4. Tanques de acumulación en TRNSYS..... | 52 |
| 8.5. Dimensionamiento de los nuevos equipos | 55 |
| 8.5.1. Propuestas para la nueva instalación..... | 55 |
| 8.5.2. Estudio de las combinaciones simuladas | 57 |
| 8.5.3. Comparativa entre las simulaciones | 61 |
| 8.5.3.1. Evolución de temperatura en los tanques variando potencia nominal de la caldera | 61 |
| 8.5.3.2. Evolución de temperatura en los tanques variando volumen del tanque de calefacción..... | 63 |
| 8.5.3.3. Evolución de temperatura en los tanques variando volumen tanque ACS..... | 65 |
| 8.5.3.4. Evolución de temperatura en los tanques variando volumen tanque panel..... | 66 |
| 8.5.3.5. Evolución de temperatura en los tanques variando el área de panel..... | 67 |
| 8.5.3.6. Evolución de temperatura en los tanques en periodos de baja y alta demanda | 68 |
| 9 Toma de decisiones..... | 71 |
| 9.1. Coste de Ciclo de Vida..... | 71 |
| 9.2. Consumo de energía primaria..... | 74 |
| 9.2.1. Normativa relativa al consumo de energía..... | 74 |
| 9.3. Curvas de distribución..... | 75 |
| 9.3.1. Comparación de curvas de CCV | 75 |
| 9.3.2. Curvas de CCV filtradas..... | 80 |
| 9.4. Otros análisis de las curvas..... | 82 |
| 9.4.1. Comparación de curvas de Sobrecoste | 82 |
| 9.4.1.1. Curvas de Sobrecoste filtradas | 83 |
| 9.4.2. Zona de óptimos | 86 |
| 9.4.3. Zona de combinaciones menos apropiadas | 87 |
| 10 Instalación óptima | 89 |
| 10.1. Características combinación óptima | 89 |
| 10.2. Cumplimiento de la normativa | 91 |
| 11 Conclusiones | 95 |
| Referencias..... | 97 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|---|----|
| Tabla 1. Consumo de energía en los distintos sectores. | 3 |
| Tabla 2. Régimen de funcionamiento. | 8 |
| Tabla 3. Superficies y orientaciones de las fachadas. | 9 |
| Tabla 4. Orientaciones y superficies de los huecos. | 9 |
| Tabla 5. Superficie de cubierta y suelo. | 9 |
| Tabla 6. Calidades constructivas fachadas. | 11 |
| Tabla 7. Calidades constructivas cerramientos en contacto con el terreno. | 11 |
| Tabla 8. Calidades constructivas cubiertas. | 11 |
| Tabla 9. Calidades constructivas partición interior vertical. | 12 |
| Tabla 10. Calidades constructivas huecos. | 12 |
| Tabla 11. Parámetros correctores. | 15 |
| Tabla 12. Características situación base. | 18 |
| Tabla 13. Clase eficiencia energética. | 18 |
| Tabla 14. Sectorización del sistema de iluminación. | 19 |
| Tabla 15. Mejoras de puentes térmicos. | 22 |
| Tabla 16. Opciones de mejora. | 22 |
| Tabla 17. Características situación inicial y óptima. | 25 |
| Tabla 18. Clase en situación inicial. | 25 |
| Tabla 19. Clase en situación óptima. | 25 |
| Tabla 20. Óptimos de demandas. | 26 |
| Tabla 21. Características caldera calefacción. | 32 |
| Tabla 22. Componentes de la instalación. | 39 |
| Tabla 23. Valores para la primera simulación. | 56 |
| Tabla 24. Valores para la segunda simulación. | 56 |
| Tabla 25. Características de los óptimos. | 86 |
| Tabla 26. Características caso óptimo. | 90 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1. Evolución hacia EECN. | 2 |
| Figura 2. Distribución consumo de energía en los sectores. | 4 |
| Figura 3. Esquema evolución del proyecto y objetivos. | 5 |
| Figura 4. Edificio objeto. | 7 |
| Figura 5. Plano del edificio. | 8 |
| Figura 6. Mapa de zonas climáticas. | 10 |
| Figura 7. Edificio en HULC. | 14 |
| Figura 8. Demandas iniciales. | 14 |
| Figura 9. Demandas calefacción. | 16 |
| Figura 10. Demandas refrigeración. | 17 |
| Figura 11. Demanda horaria calefacción. | 17 |
| Figura 12. Demanda de ACS horaria anual. | 20 |
| Figura 13. Demanda de ACS de un día. | 20 |
| Figura 14. Combinaciones CCV-Consumo Energía Primaria. | 23 |
| Figura 15. Combinaciones Sobrecoste-Consumo Energía Primaria. | 24 |
| Figura 16. Demandas caso inicial y óptimo. | 26 |
| Figura 17. Demanda horaria de calefacción en el caso óptimo. | 27 |
| Figura 18. Temperaturas interiores promedio caso óptimo. | 27 |
| Figura 19. Temperaturas en oscilación libre. | 29 |
| Figura 20. Horas de funcionamiento que están dentro y fuera de los límites de confort. | 30 |
| Figura 21. Esquema instalación, parte de la caldera. | 32 |
| Figura 22. Esquema instalación nueva. | 33 |
| Figura 23. Captador plano. | 35 |
| Figura 24. Caldera Condensación. | 36 |
| Figura 25. Tanques de acumulación de agua. | 37 |
| Figura 26. Tanque con serpentín. | 37 |
| Figura 27. Bomba circulación. | 38 |
| Figura 28. Circuito agua en TRNSYS. | 40 |
| Figura 29. Instalación TRNSYS completa. | 41 |
| Figura 30. Instalación TRNSYS parte calefacción. | 41 |
| Figura 31. Instalación TRNSYS parte ACS. | 42 |
| Figura 32. Información de la curva de la caldera de condensación. | 42 |
| Figura 33. Curva modificadora del rendimiento. | 43 |
| Figura 34. Distribución ACS. | 46 |
| Figura 35. Diagrama del funcionamiento de la caldera. | 47 |

| | |
|--|----|
| Figura 36. Diagrama del funcionamiento de los paneles. | 47 |
| Figura 37. Balance mensual. | 48 |
| Figura 38. Balance diario. | 49 |
| Figura 39. Casos propuestos. | 50 |
| Figura 40. Consumos mensuales para cada caso. | 50 |
| Figura 41. Consumos diarios para cada caso. | 51 |
| Figura 42. Consumo caldera mensual, variando el área de panel. | 51 |
| Figura 43. Consumo caldera diario, variando el área de panel. | 52 |
| Figura 44. Type tanque. | 53 |
| Figura 45. Consumo caldera VS volumen del tanque de ACS, considerando pérdidas. | 54 |
| Figura 46. Consumo caldera VS volumen del tanque de ACS, sin considerar pérdidas. | 54 |
| Figura 47. Consumo caldera VS volumen del tanque de los paneles, considerando pérdidas. | 55 |
| Figura 48. Consumo caldera VS volumen del tanque de los paneles, sin considerar pérdidas. | 55 |
| Figura 49. Evolución consumo caldera conforme aumenta la potencia nominal. | 57 |
| Figura 50. Evolución consumo caldera al aumentar el rendimiento. | 58 |
| Figura 51. Evolución consumo caldera al aumentar el volumen del tanque de ACS (sin pérdidas). | 58 |
| Figura 52. Evolución consumo caldera al aumentar el volumen del tanque del panel (sin pérdidas). | 59 |
| Figura 53. Evolución consumo caldera al aumentar el área del panel. | 59 |
| Figura 54. Porcentaje de ACS que cubren los paneles, con volumen fijado de 5 m ³ . | 60 |
| Figura 55. Porcentaje de ACS que cubren los paneles con área fijada de 200 m ² . | 60 |
| Figura 56. Valores de contribución solar mínima. | 60 |
| Figura 57. Evolución temperatura tanque calefacción con potencia caldera variable. | 61 |
| Figura 58. Evolución temperatura tanque ACS con potencia caldera variable. | 62 |
| Figura 59. Evolución temperatura tanque panel con potencia caldera variable. | 62 |
| Figura 60. Evolución temperatura tanque calefacción tras la parada de verano. | 63 |
| Figura 61. Evolución temperatura tanque calefacción para varios volúmenes. | 63 |
| Figura 62. Evolución temperatura tanque calefacción en detalle. | 64 |
| Figura 63. Evolución temperatura tanque ACS con volumen tanque calefacción variable. | 64 |
| Figura 64. Evolución temperatura tanque panel con volumen tanque calefacción variable. | 65 |
| Figura 65. Evolución temperatura tanque ACS con volumen tanque ACS variable. | 65 |
| Figura 66. Evolución temperatura tanque ACS con volumen tanque ACS variable. | 66 |
| Figura 67. Evolución temperatura tanque del panel con volumen tanque panel variable. | 67 |
| Figura 68. Evolución temperatura tanque panel tras temporada de verano. | 67 |
| Figura 69. Evolución temperatura tanque del panel con volumen tanque del panel variable. | 68 |
| Figura 70. Evolución temperatura tanque panel tras temporada de verano. | 68 |
| Figura 71. Comparación temperatura tanque calefacción entre época de alta y baja demanda. | 69 |
| Figura 72. Comparación temperatura tanque ACS entre época de alta y baja demanda. | 69 |
| Figura 73. Comparación temperatura tanque de panel entre época de alta y baja demanda. | 70 |
| Figura 74. Costes de inversión de la caldera de condensación. | 72 |

| | |
|--|----|
| Figura 75. Costes de inversión de los colectores planos. | 73 |
| Figura 76. Costes de inversión de los tanques. | 73 |
| Figura 77. Obtención de energía final a partir de energía primaria. | 74 |
| Figura 78. Factores de paso de energía final. | 75 |
| Figura 79. Combinaciones para primera simulación, consumo no renovable. | 76 |
| Figura 80. Combinaciones para la segunda simulación, consumo no renovable. | 76 |
| Figura 81. Combinaciones para la primera simulación, consumo energía primaria total. | 77 |
| Figura 82. Combinaciones para la segunda simulación, consumo total. | 77 |
| Figura 83. Mezcla de combinaciones, consumo no renovable. | 78 |
| Figura 84. Mezcla de combinaciones, filtrando en simulaciones 1, la potencia de 40kW. | 79 |
| Figura 85. Mezcla de combinaciones, filtrando en simulaciones 2, el área de 100 m ² . | 79 |
| Figura 86. Combinaciones filtradas por rendimiento nominal de la caldera. | 80 |
| Figura 87. Combinaciones filtradas por potencia nominal de la caldera. | 81 |
| Figura 88. Combinaciones filtradas por volumen del tanque de calefacción. | 81 |
| Figura 89. Combinaciones filtradas por volumen del tanque de ACS. | 82 |
| Figura 90. Sobrecostes combinaciones simulación 1, consumo no renovable. | 83 |
| Figura 91. Sobrecostes combinaciones simulación 1, consumo total. | 83 |
| Figura 92. Combinaciones sobrecoste filtradas por rendimiento. | 84 |
| Figura 93. Combinaciones sobrecoste filtradas por potencia nominal de la caldera. | 84 |
| Figura 94. Combinaciones sobrecoste filtradas por volumen tanque calefacción. | 85 |
| Figura 95. Combinaciones sobrecoste filtradas por volumen tanque ACS. | 85 |
| Figura 96. Combinaciones con serie de óptimos. | 87 |
| Figura 97. Combinaciones con casos de instalación antigua. | 87 |
| Figura 98. Combinaciones con filtro en volumen ACS. | 88 |
| Figura 99. Combinaciones consumo no renovable. | 89 |
| Figura 100. Zoom combinaciones consumo no renovable. | 90 |
| Figura 101. Combinaciones sobrecoste con consumo no renovable. | 91 |
| Figura 102. Zoom combinaciones sobrecoste con consumo no renovable. | 91 |
| Figura 103. Límites para consumo energía primaria, no renovable. | 92 |
| Figura 104. Límites para consumo energía primaria total. | 92 |
| Figura 105. Limitación por normativa aplicada a combinaciones, consumo no renovable. | 93 |
| Figura 106. Limitación por normativa aplicada a combinaciones, consumo total. | 93 |

Notación

| | |
|--------|--|
| nZEB | Nearly Zero Energy Building |
| EECN | Edificios Energía Casi Nula |
| CE | Comisión Europea |
| UE | Unión Europea |
| CTE | Código Técnico en la Edificación |
| DB HE | Documento Básico “Ahorro de Energía” |
| IDAE | Instituto para la Diversificación y el Ahorro de Energía |
| ACS | Agua Caliente Sanitaria |
| AC | Agua Caliente |
| HULC | Herramienta Unificada Líder Calener |
| CCV | Coste de Ciclo de Vida |
| COP | Costes de Operación |
| CMant | Costes de Mantenimiento |
| CI | Coste de Inversión |
| CSTB | Centre Scientifique et Technique du Bâtiment |
| TESS | Thermal Energy Systems Specialists |
| TRNSYS | Transient Systems Simulation Program |
| PVgis | Photovoltaic Geographical Information System |

1 INTRODUCCIÓN

Los científicos estudian el mundo como es, los ingenieros crean el mundo que nunca ha existido.

-Theodore von Karman

1.1 Consumo de energía a nivel europeo y normativa

El consumo de energía en el mundo crece cada vez más. De hecho, en la actualidad, los edificios revisten capital importancia para la política de eficiencia energética de la UE dado que representan cerca del 40 % del consumo final de energía.

Actualmente llegar a que un edificio consiga un consumo energético prácticamente nulo ya está al alcance del ser humano. En los próximos años uno de los grandes retos del sector de la construcción en todos los países europeos será cumplir los objetivos que la Directiva de Eficiencia Energética de Edificios (2010/31/EC) señalaba para la implantación en 2020 de los llamados edificios de consumo de energía casi nulo, llamados nZEB (Nearly Zero Energy Buildings) [1].

Las implicaciones que la aplicación de esta directiva tiene en este sector son de enorme calado porque transformarán muchos de los procedimientos de diseño, construcción y gestión de los edificios hacia una mayor eficiencia energética en los edificios y las ciudades. Estos cambios implicarán tanto a los arquitectos como al resto de agentes (promotoras, constructoras, fabricantes de materiales, sistemas y equipos) que tendrán que adaptarse para cumplir las exigencias normativas que se prevén según el calendario marcado por las Directivas Europeas [1].

La relevancia del sector de la construcción para las mejoras en materia de eficiencia energética fue destacada por la Comisión Europea en sus Comunicaciones «La eficiencia energética y su contribución a la seguridad de la energía y al marco 2030 para las políticas en materia de clima y energía» y «Estrategia Marco para una Unión de la Energía resiliente con una política climática prospectiva» [2].

La completa aplicación y ejecución de la normativa energética vigente está reconocida como prioridad absoluta para el establecimiento de la Unión de la Energía. Según estipula la directiva 2010/31/UE, a partir del 31 de diciembre de 2018 todos los edificios públicos nuevos deben ser edificios de consumo de energía casi nulo (nZEB). Esta obligación se extenderá dos años después, en 2020, a todos los edificios nuevos que deberán ser edificios de consumo de energía casi nulo [3].

En la Figura 1 se puede ver la evolución que se ha tenido y que se está teniendo para alcanzar el objetivo de edificios nZEB (EECN). Se destaca como en 2015 se exigían simplemente unos mínimos de energías renovables en los edificios y que para 2020 se espera que ya todos los edificios nuevos sean EECN.

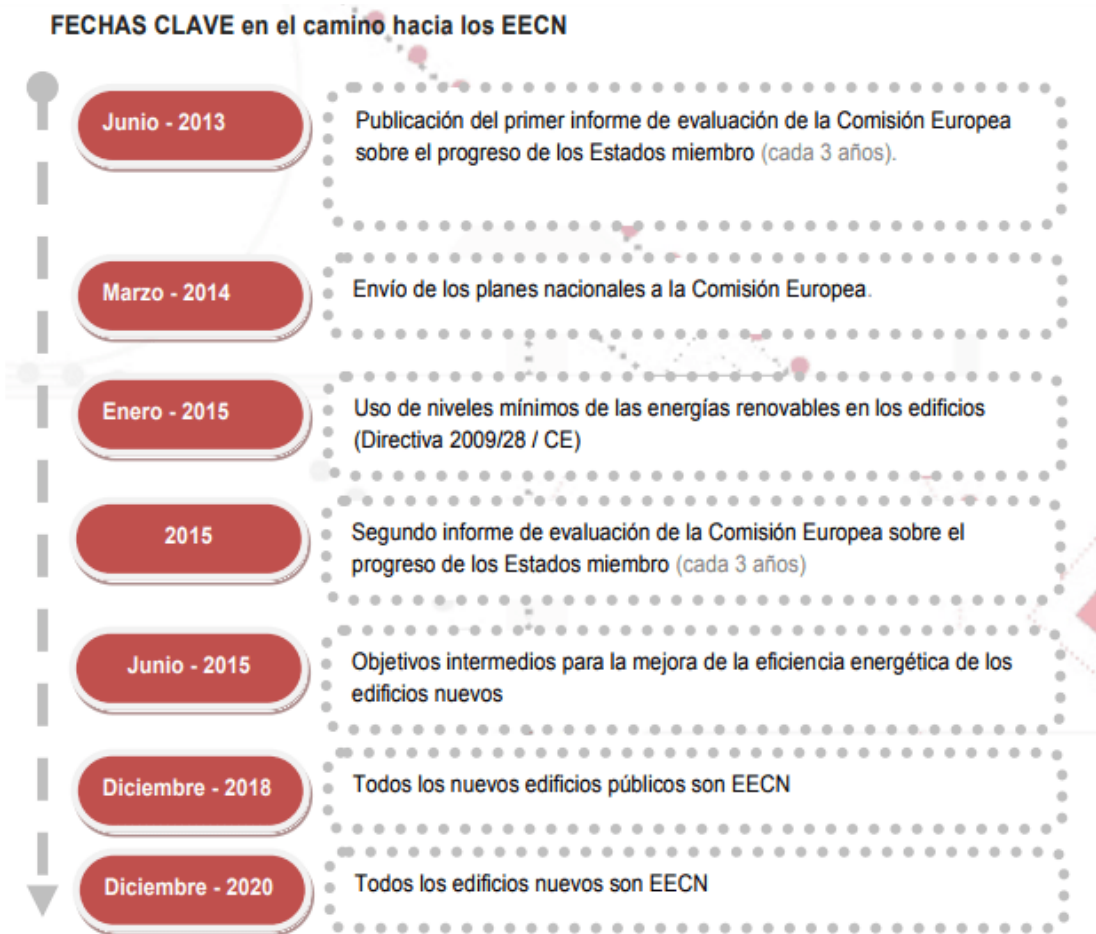


Figura 1. Evolución hacia EECN. Fuente: *Remica Eficiencia Energética*. [3]

Con respecto a la normativa actual que regula la situación energética en edificios en España, sobresalen documentos como el Código Técnico de la Edificación (CTE) y el Reglamento de Instalaciones Térmicas en Edificios (RITE).

El objetivo del documento básico (DB) “Ahorro de energía” consiste en conseguir un uso racional de la energía necesaria para la utilización de los edificios, reduciendo a límites sostenibles su consumo y conseguir asimismo que una parte de este consumo proceda de fuentes de energía renovable, como consecuencia de las características de su proyecto, construcción, uso y mantenimiento. El documento está compuesto por las siguientes secciones:

- HE 0: Limitación del consumo energético.
- HE 1: Limitación de la demanda energética (calefacción y refrigeración).
- HE 2: Rendimiento de las instalaciones térmicas.
- HE 3: Eficiencia energética de las instalaciones de iluminación.
- HE 4: Contribución solar mínima de ACS.
- HE 5: Contribución fotovoltaica mínima de energía eléctrica [4].

Por otro lado, el RITE se aplicará a las instalaciones térmicas en los edificios de nueva construcción y a las instalaciones térmicas que se reformen en los edificios existentes, exclusivamente en lo que a la parte reformada se refiere, así como en lo relativo al mantenimiento, uso e inspección de todas las instalaciones térmicas, con las limitaciones que en el mismo se determinan. Las mayores exigencias en eficiencia energética que establece son:

- Mayor rendimiento energético en los equipos de generación de calor y frío.
- Mejor aislamiento en los equipos y conducciones de los fluidos térmicos.
- Mejor regularización y control para mantener las condiciones de diseño previstas en los locales climatizados.
- Utilización de energías renovables disponibles, en especial la energía solar y la biomasa.
- Incorporación de subsistemas de recuperación de energía y el aprovechamiento de energías residuales.
- Sistemas obligatorios de contabilización de consumos en el caso de instalaciones colectivas.
- Desaparición gradual de combustibles sólidos más contaminantes.
- Desaparición gradual de equipos generadores menos eficientes [5].

1.2. Distribución del consumo en España

El consumo energético en España en 2016 aumentó en torno a un 1.5%. Este crecimiento vino claramente motivado por el crecimiento económico tras haber pasado por largo periodo de crisis económica. De la mano de este crecimiento económico se suma el aumento de la laborabilidad que también ha favorecido un aumento del consumo energético. Finalmente, un empeoramiento de las condiciones climáticas ha caracterizado al 2016 por ser más frío que 2015 [6].

En España, a pesar del crecimiento del consumo en el sector del transporte en los últimos años, debido al aumento del uso de productos petrolíferos, el porcentaje de edificios también tiene gran peso. Según el IDAE (Instituto para la Diversificación y el Ahorro de Energía) el sector de edificios representa más de un 30% del consumo total de energía final. Como se puede ver en la Figura 2, al transporte le corresponde un 42.3 %, a las industrias un 23%, a los edificios un 31.2% y el porcentaje restante corresponde a otros servicios (agricultura, pesca, etc.). Esto hace en el país un consumo total en 2016 de 82.334 kTep que equivalen a $9.57 \cdot 10^{11}$ kWh [7].

| SECTOR | CONSUMO ENERGÍA FINAL [kTep] | % |
|-----------------|------------------------------|------|
| Industria | 18.9 | 23 |
| Transporte | 35.0 | 42.3 |
| Edificios | 25.7 | 31.2 |
| Otros servicios | 2.9 | 3.5 |

Tabla 1. Consumo de energía en los distintos sectores. Fuente: *Elaboración propia con datos de la IDAE.* [7]

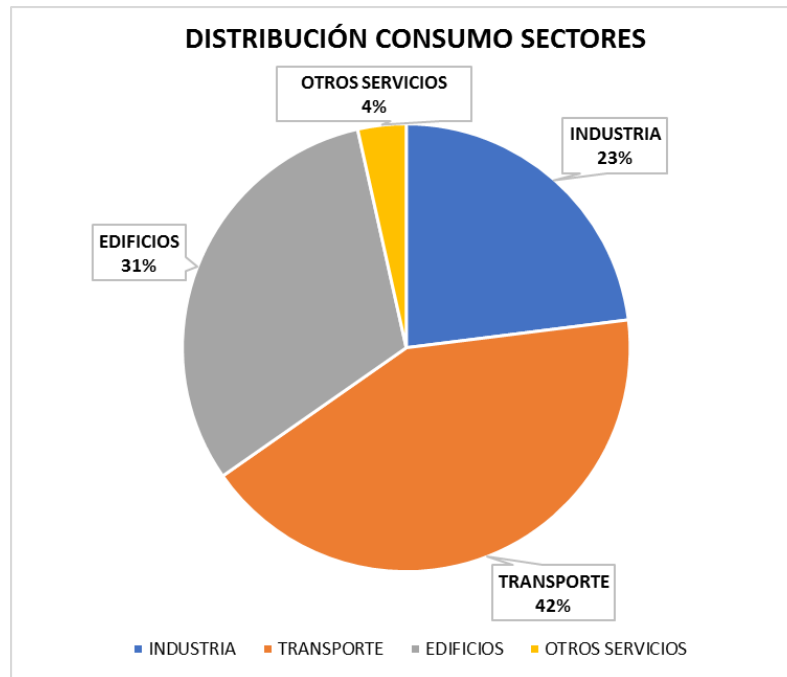


Figura 2. Distribución consumo de energía en los sectores. Fuente: *Elaboración propia con datos del IDAE.* [7]

Dentro del 31% que representa el consumo de los edificios se pueden hacer más subdivisiones. Los edificios se dividen en uso residencial y uso terciario. En uso terciario la mayor parte del consumo viene por parte de la climatización. Calefacción y refrigeración abarcan en torno a un 50-60% del consumo de estos edificios [7].

El siguiente proyecto busca conseguir reducir el consumo de un edificio terciario existente hasta hacerlo casi nulo. Calefacción y refrigeración al ser los sectores que más consumo abarcan en este tipo de edificios, serán objetivos clave a reducir. Para alcanzar los objetivos de este proyecto se ha seguido la normativa actualizada en 2018 del DB-HE (Documento Básico de Ahorro de Energía).

2 OBJETIVO DEL PROYECTO

El objetivo de este proyecto es alcanzar el consumo casi nulo de un edificio a través de la rehabilitación de un colegio de primaria e infantil para así mejorar la eficiencia del centro y a la vez mejorar las condiciones de confort. El Código Técnico de la Edificación (DB-HE) define edificio de consumo de energía casi nulo como aquel edificio que cumple con las exigencias reglamentarias establecidas para edificios de nueva construcción en las diferentes secciones del documento básico. Por lo que este proyecto buscará cumplir con las exigencias del DB-HE en su totalidad.

El proyecto consta de dos etapas:

- La primera etapa o el primer objetivo consistirá en reducir la demanda propia del edificio. Se conocen todos los datos de la envuelta del edificio real, pues es información obtenida de la auditoría que fue llevada a cabo. Es por ello, que se propone mejorar las calidades constructivas del centro y así generar notables reducciones en la demanda tanto de calefacción como de refrigeración del centro.
- La segunda etapa se realizará sobre los resultados de la primera. Se basará en modificar la instalación de climatización y ACS del edificio. Se propondrá la sustitución de los equipos por un diseño de instalación más eficiente para así alcanzar el consumo mínimo. En este caso y debido al no uso del centro en gran parte del periodo de refrigeración, la mejora de la instalación de climatización solo se aplicará a la parte de calefacción.

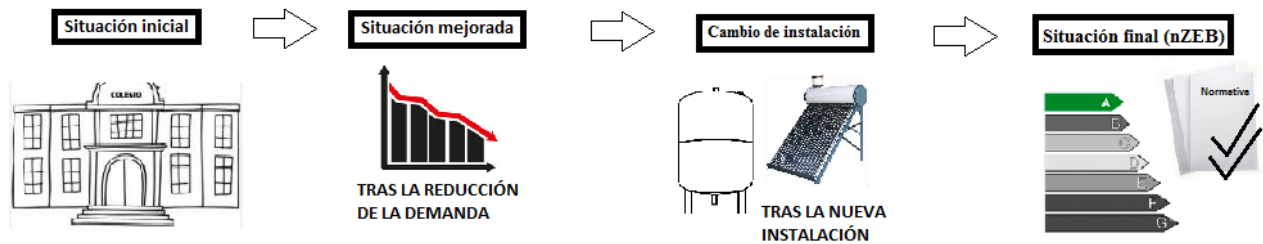


Figura 3. Esquema evolución del proyecto y objetivos. *Fuente: Elaboración propia.*

3 EDIFICIO OBJETO DEL PROYECTO

La formulación de un problema es más importante que su solución

- Albert Einstein

3.1. Presentación edificio objeto



Figura 4. Edificio objeto. Fuente: Google Maps.

El edificio objeto de la rehabilitación es un mediano terciario, en concreto un colegio público de primaria e infantil, originario de Sevilla. A la hora de realizar este proyecto se ha decidido modificar la ubicación, situándolo en Jaén con zona climática C4. El centro cuenta con una superficie de 658.64 m² en una única planta sobre rasante. Además, el colegio cuenta con un gimnasio auxiliar con su correspondiente demanda de agua caliente sanitaria. Además de los equipos de climatización, ACS e iluminación que se encuentran en el centro y que serán descritos más adelante, el colegio cuenta con otros equipos de consumo como ordenadores, impresoras, televisión, equipo de música y otros equipos que también forman parte del consumo total del edificio [8].

La ocupación media del edificio se obtenido a partir de una estimación. Se ha contado con el plano del edificio en el que se puede ver el número de aulas del centro y se conoce la media permitida de alumnos que suele haber por aula en este tipo de edificios. Se obtiene así un total de 150 alumnos. Por otro lado, considerando que el centro está en uso y que el ligero cambio de ubicación no afecta, se ha estimado el siguiente régimen de funcionamiento para el mismo:

| RÉGIMEN DE FUNCIONAMIENTO | |
|---------------------------|-------------|
| Horario día laborable | 8 horas |
| Días laborables al año | 188 |
| Días no laborables al año | 177 |
| Ocupación media | 150 alumnos |

Tabla 2. Régimen de funcionamiento. Fuente: *Elaboración propia*. [8]

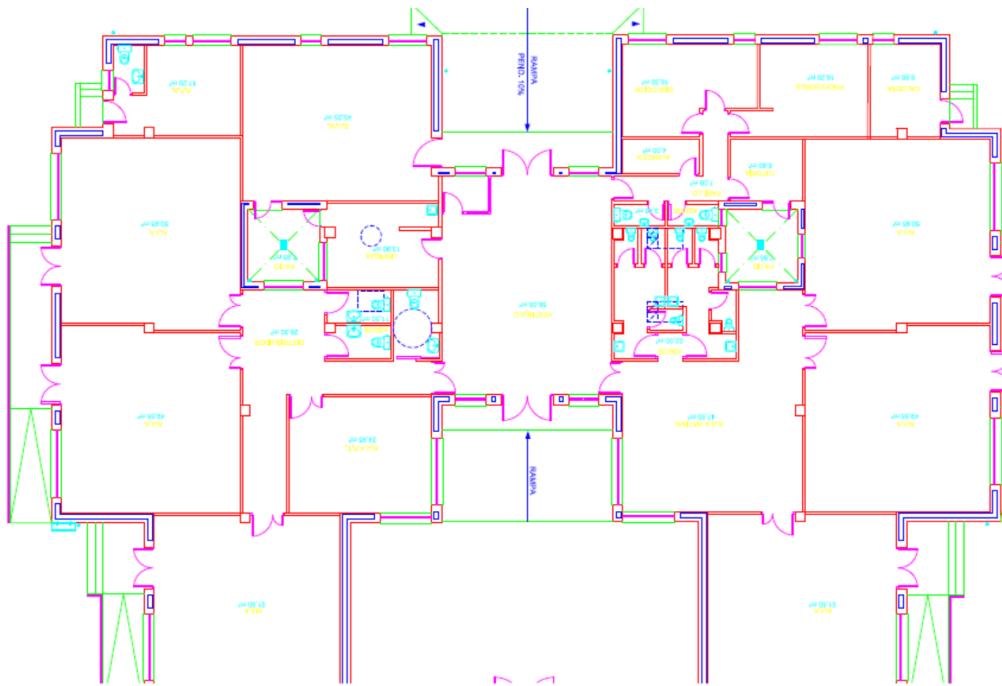


Figura 5. Plano del edificio. Fuente: *Auditoría del edificio*. [8]

Para el buen estudio del edificio es necesario conocer las superficies de fachada, huecos, cubierta y suelo en sus distintas orientaciones. Se destaca la mayor superficie de ventanas en la orientación sur, lo que supondrá un punto para tener en cuenta y del cual se puede sacar provecho a la de proponer una mejora de huecos en esta orientación. Por otro lado, como el edificio es de una única planta sobre rasante y la cubierta es horizontal, ambos tendrán igual superficie. Todas estas superficies se pueden ver en las siguientes Tabla 3, Tabla 4 y Tabla 5.

| FACHADA | ORIENTACIÓN | SUPERFICIE [m²] |
|----------------|--------------------|-----------------------------------|
| | Norte | 115.10 |
| | Noreste | 0.00 |
| | Este | 125.10 |
| | Sureste | 0.00 |
| | Sur | 100.85 |
| | Suroeste | 0.00 |
| | Oeste | 126.60 |
| | Noroeste | 0.00 |

Tabla 3. Superficies y orientaciones de las fachadas. *Fuente: Auditoría del centro.* [8]

| HUECOS | ORIENTACIÓN | SUPERFICIE [m²] |
|---------------|--------------------|-----------------------------------|
| | Norte | 14.50 |
| | Noreste | 0.00 |
| | Este | 19.50 |
| | Sureste | 0.00 |
| | Sur | 28.75 |
| | Suroeste | 0.00 |
| | Oeste | 18.00 |
| | Noroeste | 0.00 |

Tabla 4. Orientaciones y superficies de los huecos. *Fuente: Auditoría del centro.*[8]

| ORIENTACIÓN | SUPERFICIE [m²] |
|------------------------------|-----------------------------------|
| CUBIERTA (horizontal) | 658.64 |
| SUELO | 658.64 |

Tabla 5. Superficie de cubierta y suelo. *Fuente: Auditoría del centro.* [8]

La zona climática se determina en función de la localidad donde se ubica el edificio y la diferencia de altura entre dicha localidad y la altura de referencia de la capital de provincia. En este caso como el edificio está situado en Jaén capital, la zona climática es C4 con 436 metros de altura [4].

A causa de la localización de nuestro edificio, los meses en los que se considera demanda de calefacción son Enero, Febrero, Marzo, Abril, Mayo, Octubre, Noviembre y Diciembre. Por lo tanto, la demanda de calefacción será dominante frente a la demanda de refrigeración que se da solo en los cuatro meses restantes del año.

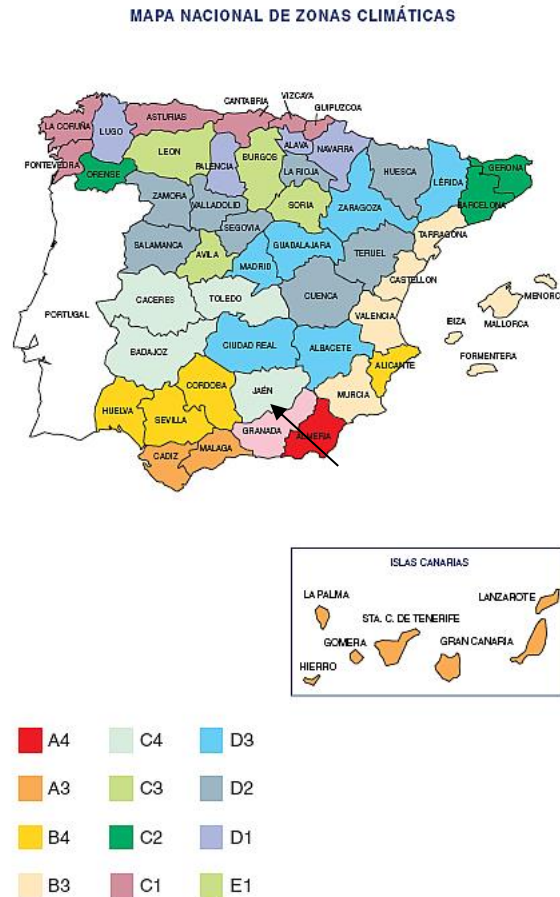


Figura 6. Mapa de zonas climáticas. Fuente: Construmática. [9]

3.2. Calidades constructivas

Las calidades constructivas de partida del edificio se pueden ver en Tabla 6, Tabla 7, Tabla 8, Tabla 9 y Tabla 10. Otros datos como son los materiales de los que están hechas las distintas capas y sus correspondientes espesores también están detallados. Como se puede observar las transmitancias térmicas son elevadas con respecto a las exigidas por la normativa, por lo tanto, en un principio, reducirlas puede proponerse como uno de los objetivos para la mejora.

| FACHADAS | |
|--|--------------------|
| Transmitancia Térmica [W/m² K] | 1.47 |
| Materiales | Espesor [m] |
| ½ pie LM métrico o catalán 40 mm < G < 50 | 0.012 |
| Aislante Térmico | 0.004 |
| Tabique de LH sencillo Gran Formato [40 mm < E < 60mm] | 0.05 |
| Enlucido de yeso 1000 < d < 1300 | 0.02 |

Tabla 6. Calidades constructivas fachadas. Fuente: Auditoría del centro. [8]

| CERRAMIENTOS EN CONTACTO CON EL TERRENO | |
|--|--------------------|
| Transmitancia Térmica [W/m² K] | 1.16 |
| Materiales | Espesor [m] |
| Hormigón armado d > 2500 | 0.3 |
| Aislante Térmico | 0.016 |
| Mortero de cemento o cal para albañilería y para revoco/enlucido 1000 < d < 1250 | 0.02 |

Tabla 7. Calidades constructivas cerramientos en contacto con el terreno. Fuente: Auditoría del centro. [8]

| CUBIERTA | |
|--|--------------------|
| Transmitancia Térmica [W/m² K] | 1.17 |
| Materiales | Espesor [m] |
| Plaqueta o baldosa cerámica | 0.02 |
| Mortero de cemento o cal para albañilería y para revoco/enlucido 1000 < d < 1250 | 0.02 |
| Tabique de LH sencillo Gran Formato [40 mm < E < 60 mm] | 0.05 |
| Cámara de aire ligeramente ventilada | |
| Aislante Térmico | 0.007 |
| Hormigón armado d > 2500 | 0.15 |
| Enlucido de yeso 1000 < d < 1300 | 0.02 |

Tabla 8. Calidades constructivas cubiertas. Fuente: Auditoría del centro. [8]

| PARTICIÓN INTERIOR VERTICAL | |
|--|--------------------|
| Transmitancia Térmica [W/m² K] | 2.49 |
| Materiales | Espesor [m] |
| Enlucido de yeso 1000 < d < 1300 | 0.02 |
| Tabicón de LH doble [60 mm < E < 90 mm] | 0.07 |
| Enlucido de yeso 1000 < d < 1300 | 0.02 |

Tabla 9. Calidades constructivas partición interior vertical. *Fuente: Auditoría del centro.* [8]

| HUECOS | |
|---|------|
| Transmitancia Térmica [W/m²K] | 2.92 |
| Factor Solar | 0.75 |
| Materiales | Tipo |
| Vidrio [W/m ² K] | 2.8 |
| Marco[W/m ² K] | 4 |

Tabla 10. Calidades constructivas huecos. *Fuente: Auditoría del centro.* [8]

4 SITUACIÓN INICIAL DEL EDIFICIO

Despacito y buena letra, que el hacer las cosas bien importa más que el hacerlas.

- Antonio Machado

Cuando se decide restaurar un edificio, es importante pensar en cómo mejorar la eficiencia energética de este edificio ya existente, el cual probablemente ya tenga su correspondiente antigüedad. En este tipo de edificios se cuenta con unos parámetros previos que pueden condicionar la instalación de algunas medidas. Por ello, el primer paso es realizar un buen análisis de la estructura de los espacios disponibles para mejorar la eficiencia. Se ha de valorar cuáles pueden ser las medidas más acertadas para conseguir el objetivo y vale la pena analizar de manera clara qué propuestas permitirán un mayor ahorro energético [10].

4.1. Introducción a la Herramienta nZEB

La primera medida para alcanzar el objetivo del proyecto es reducir la demanda del edificio. Para llevar a cabo este primer objetivo se hará uso de una herramienta de Excel para cálculo de Edificios de Consumo Casi Nulo (nZEB). Esta herramienta analizará la situación inicial del edificio, lo que lo caracteriza y los posibles parámetros a mejorar, además de calcular las propuestas de mejora óptimas para el centro.

De partida se cuenta con el edificio modelado en HULC, con sus correspondientes demandas generadas a través de simulaciones dinámicas horarias. Una vez tenemos el edificio en HULC, la herramienta nZEB leerá un archivo que genera HULC con los datos del edificio. A continuación, la herramienta calcula ella misma de nuevo las demandas a través de un proceso simplificado. Se compararán los datos de demanda calculados de ambos modos. Una vez validados estos resultados se introducen en la herramienta las distintas propuestas de mejora para la reducción de demanda. A partir de aquí, la propia herramienta se encarga de calcular los consumos y los costes de todas las combinaciones posibles que optan a situación mejorada del edificio.

En resumen, la herramienta seguirá los siguientes pasos:

- Introducción de los datos del edificio tras simularse en HULC.
- Cálculo de demandas en situación inicial.
- Verificación de los datos a partir de parámetros correctores.
- Introducción de las propuestas de mejora.
- Cálculo de las posibles combinaciones.
- Catálogo de mejoras para elección de la mejor combinación.

En este apartado 4.1. Introducción a la Herramienta nZEB, solo se verán los primeros cuatro pasos de reconocimiento de la situación inicial, el resto de los pasos se verán más adelante.

4.1.1. Introducción de los datos del edificio tras simularse en HULC

Para proceder a usar esta herramienta se ha partido del edificio simulado en HULC (Herramienta Unificada Lider Calener). Como se ha mencionado anteriormente la localización del edificio es de zona climática C4. La zona climática es determinante a la hora de calcular la demanda del edificio.

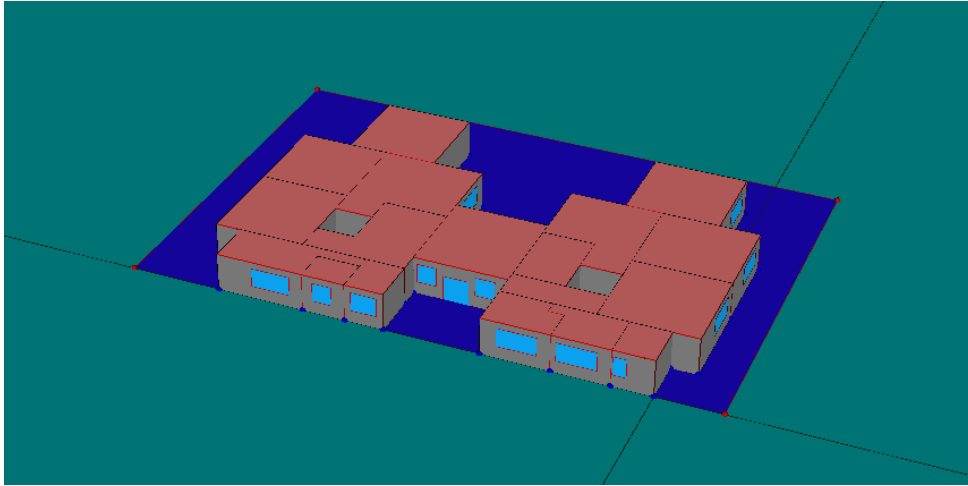


Figura 7. Edificio en HULC. Fuente: Elaboración propia en HULC.

Tras simular el edificio en HULC se exporta a la herramienta la cual recogerá estos datos de simulación. Se obtienen así gráficamente las demandas en HULC visibles en la siguiente Figura 8:

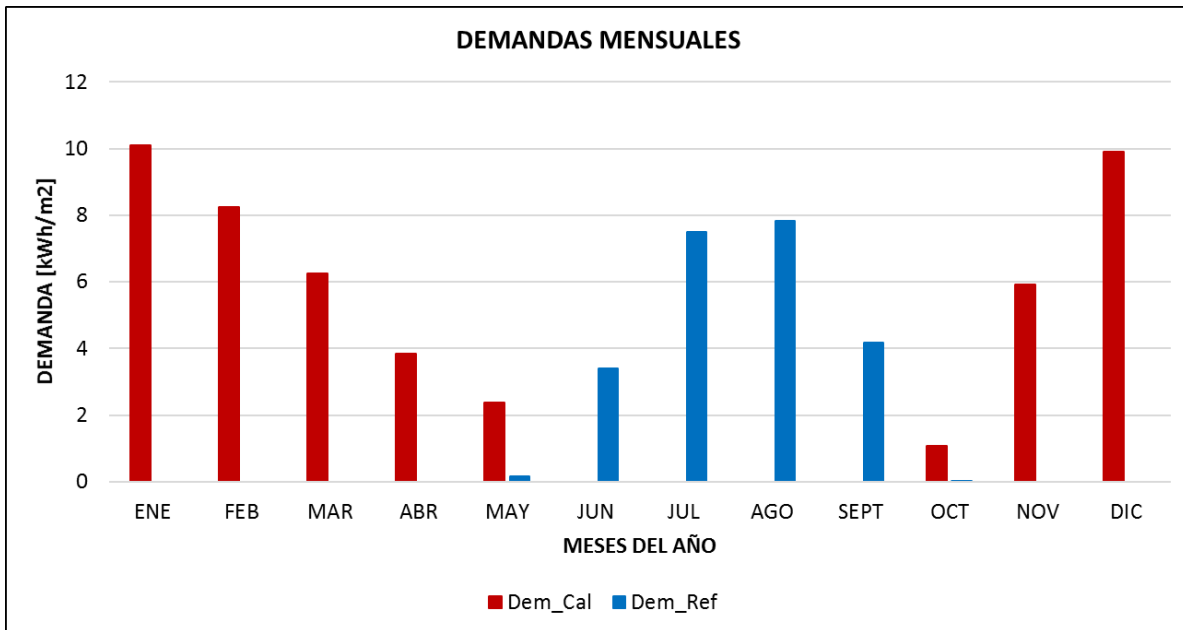


Figura 8. Demandas iniciales. Fuente: Elaboración propia

4.1.2. Cálculo de demandas en situación inicial.

Ahora sí, la herramienta procede a calcular las demandas mensuales de calefacción y refrigeración a través de un proceso simplificado que usa las siguientes ecuaciones. La herramienta cuenta con unos coeficientes correctores que harán una comparación de los resultados de HULC y los resultados de demanda calculados por la propia herramienta.

Para calcular las demandas a partir de un procedimiento simplificado se aplican las siguientes ecuaciones:

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

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

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

Donde:

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

η : Factor de utilización

ε : Eficiencia

4.1.3. Verificación de los datos a partir de los parámetros correctores

A estas ecuaciones se le aplicarán los factores correctores que ajustarán los cálculos. Los coeficientes correctores serán los siguientes:

- a: coeficiente corrector de pérdidas.
- b: coeficiente corrector del área solar sur equivalente.

De tal modo que las ecuaciones con los parámetros correctores aplicados quedan de la siguiente manera:

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

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

Para obtener los coeficientes correctores, se llevará a cabo un procedimiento de optimización, teniendo como herramienta el Solver de Excel. Se comprueba que estos coeficientes correctores son fiables y que los valores tanto de HULC como de la herramienta son parecidos y por lo tanto válidos. Una vez el procedimiento simplificado ha sido calibrado mediante los coeficientes correctores, se compararán los valores de demandas.

| Parámetros correctores | Valor |
|------------------------|-------|
| \mathbf{a}_{inv} | 0.38 |
| \mathbf{b}_{inv} | 0.2 |
| \mathbf{a}_{ver} | 0.16 |
| \mathbf{b}_{ver} | 0.05 |

Tabla 11. Parámetros correctores. Fuente: Elaboración propia.

4.2. Demandas iniciales

La demanda energética de un edificio es la energía que este requiere para que en su interior un usuario pueda disfrutar de unas determinadas condiciones de confort. Esta energía incluirá entre otras, la energía mínima necesaria para la calefacción, la refrigeración, la ventilación, la producción de ACS y la iluminación [11].

En los edificios la demanda de energía varía considerablemente dependiendo de su función, así un edificio terciario como es un colegio presenta una demanda muy diferente en la distribución temporal respecto a la de una vivienda. En general, la demanda en los edificios es básicamente de tres tipos:

- Térmica: para satisfacer los requerimientos de ACS, calefacción y refrigeración.
- Luminosa: para los requerimientos de confort lumínico.
- Eléctrica: para las aplicaciones (diferentes aparatos) con alimentación eléctrica [11].

La demanda energética de un edificio varía dependiendo de varios factores que básicamente se pueden clasificar en los siguientes:

- La ubicación y climatología.
- La función y uso final del edificio.
- El diseño del edificio.
- La calidad de la construcción.
- El comportamiento del usuario [11].

En los siguientes subapartados se presentan las distintas demandas con las que cuenta el edificio en su situación de partida.

4.2.1. Demanda de calefacción y refrigeración

En las siguientes Figura 9 y Figura 10 se puede observar la mínima diferencia entre las demandas calculadas a través de HULC y calculadas a través de la herramienta con el proceso simplificado. Se comprueba que la herramienta se ajusta a unos valores muy semejantes a los simulados en HULC.

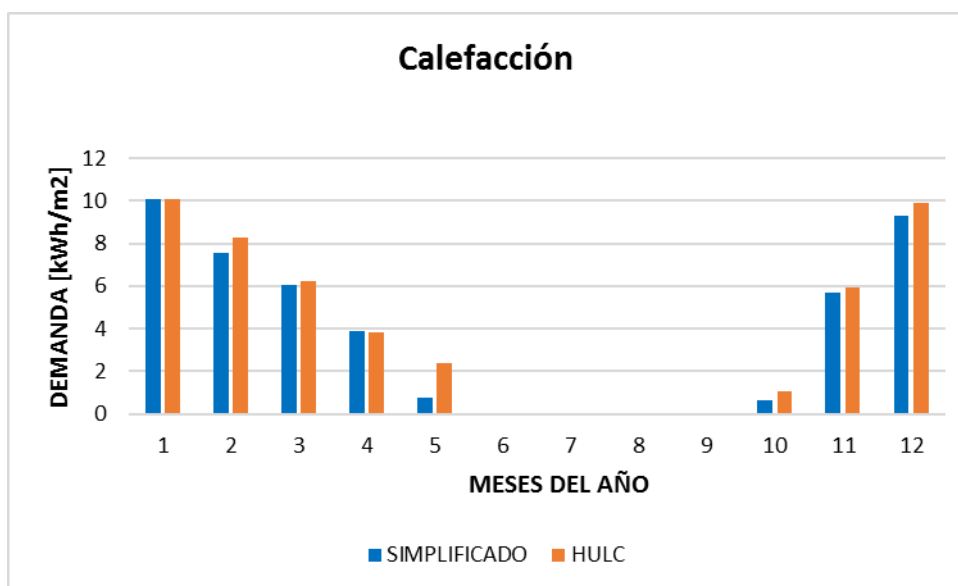


Figura 9. Demandas calefacción. Fuente: Elaboración propia.

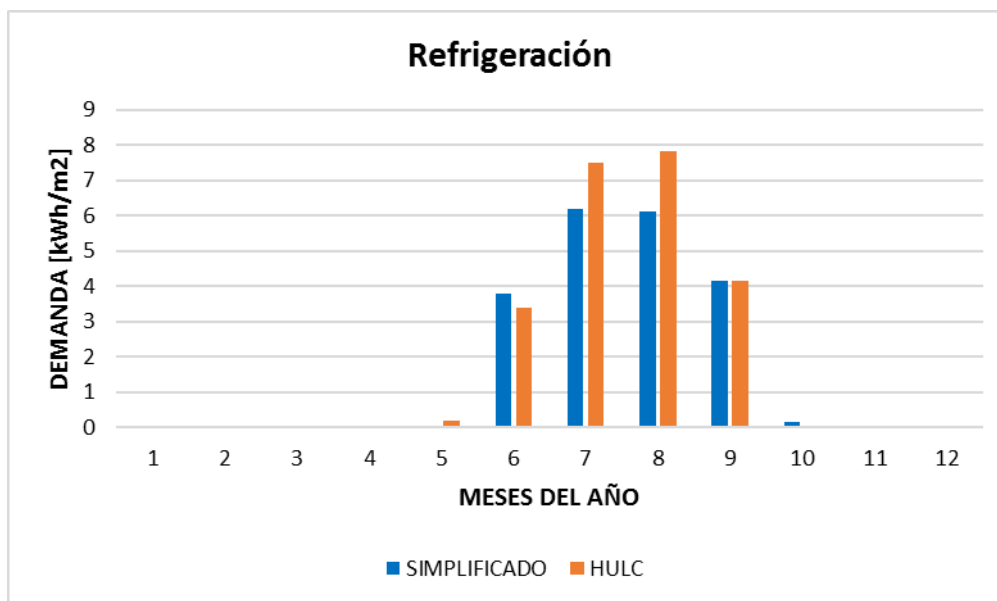


Figura 10. Demandas refrigeración. Fuente: Elaboración propia.

Se consideran válidos los resultados tras comprobar que los resultados del simplificado y de HULC se asemejan bastante. Se observa gran parecido en los distintos meses, tanto en el caso de calefacción como en el de refrigeración.

Por otro lado, otra forma de graficar la demanda es de forma horaria. Así se podrá estudiar más en detalle como varía la misma con el paso de las horas y días.

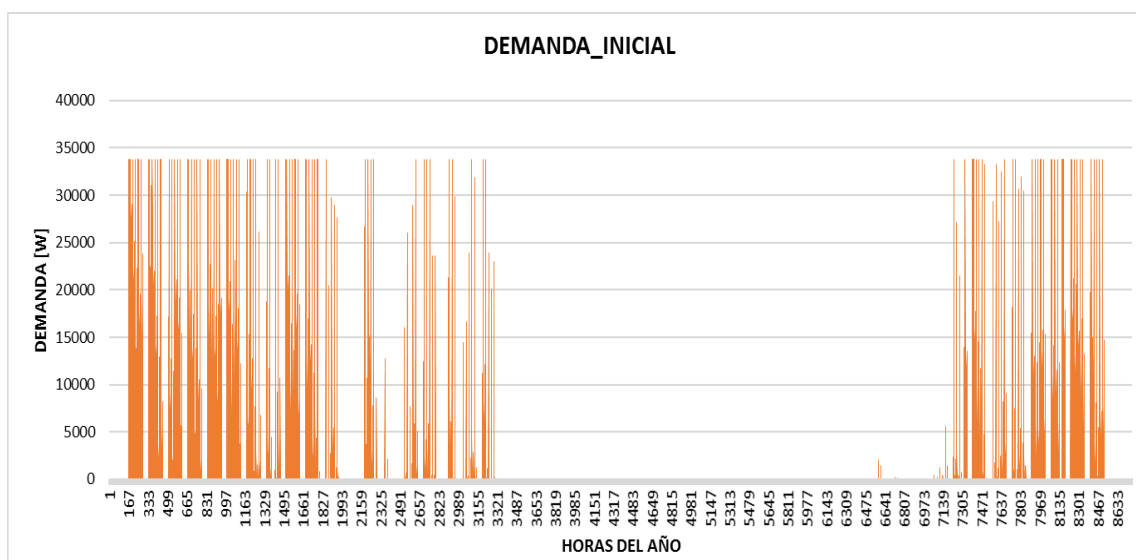


Figura 11. Demanda horaria calefacción. Fuente: Elaboración propia.

Esto da paso a la búsqueda de la reducción de la demanda a través de una serie de propuestas de mejoras del edificio, cuyo fin será reducir las demandas en todos distintos meses.

Como se ha visto en las calidades constructivas, la situación de partida del edificio cuenta con unas transmitancias térmicas elevadas y además no cumplen los valores mínimos según la normativa vigente. La situación inicial del edificio cuenta con las características que se muestran en la Tabla 12, que dan lugar a la correspondiente clase de eficiencia energética.

| CASO BASE | VALORES |
|--------------------------------|---------|
| Umuros [W/m ² K] | 1.47 |
| Ucubierta [W/m ² K] | 1.17 |
| Usuelos [W/m ² K] | 1.16 |
| Uventana [W/m ² K] | 2.92 |
| Phi*L [W/mK] | 486.49 |
| ACHeq | 0.38 |
| Ginv | 0.69 |
| gver (norte, sur, este, oeste) | 0.69 |
| ACHeq_noct | 0.38 |

Tabla 12. Características situación base. Fuente: *Elaboración propia.*

La clase de eficiencia energética del centro en la situación inicial se calcula a través de una comparación con el edificio de referencia. El edificio de referencia es un edificio obtenido a partir del edificio objeto, con su misma forma, tamaño, orientación, zonificación interior, uso de cada espacio, e iguales obstáculos remotos, y unas soluciones constructivas tipificadas. Este edificio de referencia será similar al edificio objeto, pero se caracterizará por cumplir la reglamentación.

Una vez tenemos estos valores obtenemos la clase de eficiencia del colegio:

| | |
|-----|-----|
| CAL | REF |
| F | B |

Tabla 13. Clase eficiencia energética. Fuente: *Elaboración propia.*

4.2.2. Demanda de iluminación

Los datos de iluminación del edificio se han estimado a través de una auditoría cedida que se le ha realizado este mismo año al edificio. A partir de la potencia instalada se ha estimado los vatios demandados en el centro. Se destaca que el 96% de las lámparas son fluorescente T8, un 3% de fluorescente compacto y un 1% de vapor de mercurio. Considerando unas 8 horas de funcionamiento diarias y teniendo en cuenta los días de actividad del centro se obtiene una demanda total de 11.88 kWh/m² anuales [8].

| Ubicación | Tecnología de luminaria | Potencia lámpara(W) | N.º de luminarias | N.º de Lámparas | Equipo auxiliar | Regulación y control |
|-------------------|-------------------------|---------------------|-------------------|-----------------|------------------|----------------------|
| Hall | Fluorescente_T8 | 36 | 6 | 12 | Electromagnético | Manual |
| Garita | Fluorescente_T8 | 36 | 1 | 1 | Electromagnético | Manual |
| Pasillo dirección | Fluorescente_T8 | 36 | 3 | 3 | Electromagnético | Manual |
| AMPA | Fluorescente_T8 | 36 | 2 | 4 | Electromagnético | Manual |
| Aseos | Fluorescente_T8 | 36 | 4 | 8 | Electromagnético | Manual |
| Almacén | Fluorescente_T5 | 24 | 2 | 4 | Electromagnético | Manual |
| Secretaría | Fluorescente_T8 | 36 | 2 | 4 | Electromagnético | Manual |
| Sala profesores | Fluorescente_T8 | 36 | 1 | 2 | Electromagnético | Manual |
| Aulas | Fluorescente_T8 | 36 | 41 | 82 | Electromagnético | Manual |
| Hall Aulas | Fluorescente_T8 | 36 | 7 | 14 | Electromagnético | Manual |
| Aseos | Fluorescente_T8 | 36 | 2 | 4 | Electromagnético | Manual |
| Exterior | Fluorescente_T8 | 36 | 2 | 2 | Electromagnético | Manual |
| Exterior | Fluor_Compacto | 26 | 5 | 5 | Electromagnético | Manual |
| Exterior | Vapor_mercurio | 80 | 1 | 1 | Electromagnético | Manual |

Tabla 14. Sectorización del sistema de iluminación. Fuente: Datos extraídos de la auditoria de Applus. [8]

4.2.3. Demanda de agua caliente sanitaria (ACS)

La demanda de agua caliente sanitaria se ha calculado partiendo de un total de 150 alumnos y considerando que, debido a la existencia de un gimnasio, los estudiantes dan uso a las duchas diariamente. Teniendo en cuenta que el consumo individual por ducha es de 21 litros, eso hace una demanda total de 3150 litros de ACS al día. Para expresar la demanda de ACS en kWh/m² se ha hecho uso de la siguiente ecuación. Así se obtiene una demanda de 0,8 kWh/m². La demanda de ACS no se verá modificada en este proyecto, se mantendrá constante y será un dato necesario a la hora de dimensionar la nueva instalación. Como se puede ver en Figura 12 que se muestra a continuación, esta demanda pasará a ser nula en el periodo estival, cuando el centro no está en funcionamiento. El resto del año, la demanda se repetirá periódicamente pues no habrá variaciones según la época del año, como si ocurre con la demanda de calefacción y refrigeración. En Figura 13 se puede ver la demanda diaria de ACS que tiene el edificio.

$$Q_{ACS}[kJ] = Q_d^{ACS} \left[\frac{l}{día} \right] \cdot Cp \left[\frac{J}{kg \cdot K} \right] \cdot \rho_{agua} \left[\frac{kg}{l} \right] \cdot (T_{sum} - T_{red}[K])$$

$$T_{sum}=60^{\circ}C=333K.$$

$$T_{RedMediaAnual}(Jaén)=15^{\circ}C=288K [12].$$

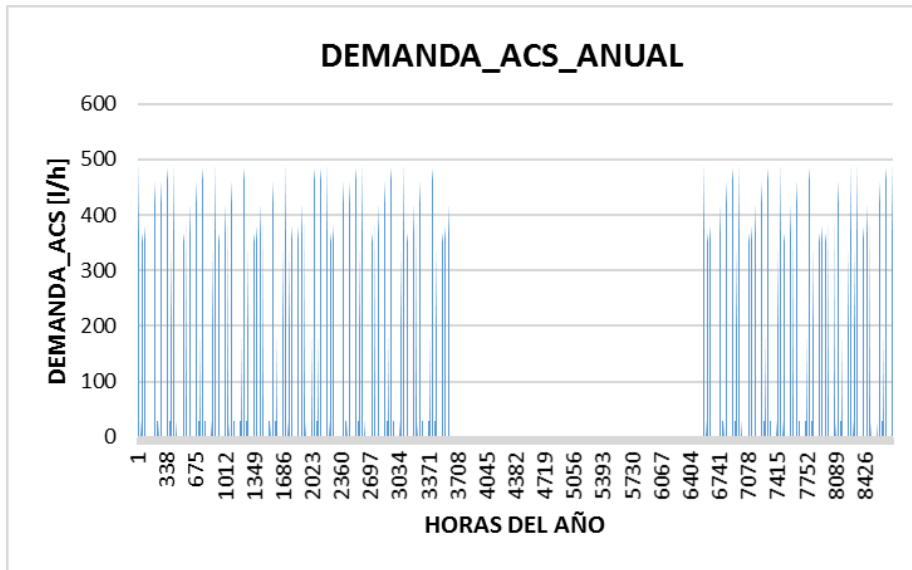


Figura 12. Demanda de ACS horaria anual. Fuente: Elaboración propia.

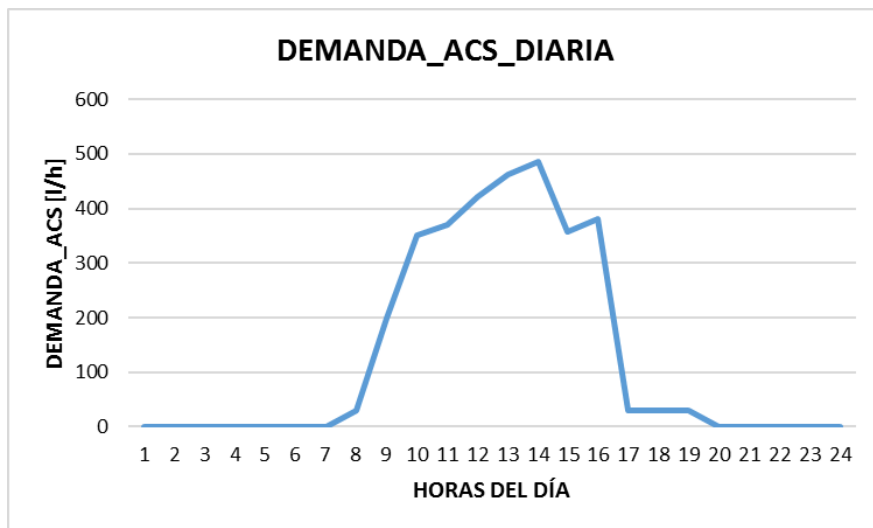


Figura 13. Demanda de ACS de un día. Fuente: Elaboración propia.

5 ESTRATEGIAS DE REDUCCIÓN DE LA DEMANDA

*Una experiencia nunca es un fracaso,
pues siempre viene a demostrar algo.*

Thomas Alva Edison

5.1. Definición de las propuestas de mejora

Para conseguir reducir la demanda se proponen una serie de cambios en el mismo edificio. Para encontrar el caso óptimo a través de la herramienta se hace una simulación combinando las distintas opciones posibles y viendo las demandas que alcanza cada combinación. Los cambios que se proponen para reducir la demanda son:

- Mejorar el aislamiento de los opacos.
- Mejorar la calidad de las ventanas (transmitancia y factor solar).
- Tratar los puentes térmicos.
- Control de la estanqueidad.
- Estrategias de ventilación (incluida ventilación nocturna).

Para llevar a cabo estas modificaciones se propone la reducción de la transmitancia de las fachadas añadiendo aislamiento a estas. También reducción de la transmitancia de cubierta, suelos y huecos. La reducción de transmitancia de puentes térmicos, reducción del factor solar tanto de invierno como de verano y finalmente aumentar la ventilación nocturna.

En cuanto a las mejoras de puentes térmicos se proponen dos escenarios de mejora que son los siguientes:

| Tipo de Puente Térmico | Escenario Base (W/mK) | Escenario mejora 1 (W/mK) | Escenario mejora 2 (W/mK) |
|-------------------------------------|--------------------------|------------------------------|------------------------------|
| Frente de forjado | 0.97 | 0.2 | 0.2 |
| Forjado de cubierta | 0.96 | 0.2 | 0.2 |
| Forjado de suelo al exterior | 0.86 | 0.2 | 0.2 |
| Esquina saliente | 0.11 | 0.1 | 0.1 |
| Esquina entrante | -0.16 | -0.15 | -0.15 |
| Contorno de hueco (ventanas) | 0.44/0.82/0.53 | 0.1 | 0.05 |
| Pilar | 1.2 | 0.2 | 0.2 |
| Unión entre solera y pared exterior | 0.57 | 0.15 | 0.15 |

Tabla 15. Mejoras de puentes térmicos. Fuente: Elaboración propia con temario de la asignatura ADE.

En la Tabla 16 se pueden ver las distintas opciones que se proponen. A partir de estas mejoras se calcularán las distintas combinaciones posibles y se elegirá la opción óptima energética y económica. Las propuestas de mejora se combinarán entre ellas para optimizar el edificio. Para la generación de combinaciones hay que tener en cuenta que las propuestas de envuelta van asociadas las unas a las otras, es decir no se pueden combinar entre sí los distintos valores de Umuros, Ucubierta, Usuelos y Uventanas. No se podrá combinar la Umuros de menor valor con una Usuelos de mayor valor, por lo que estas propuestas irán de la mano. Se generan así un total de 288 combinaciones.

| Umuros [W/m ² K] | Ucubiertas [W/m ² K] | Usuelos [W/m ² K] | Uventanas [W/m ² K] | Phi*L [W/mK] | ACH_eq | g_inv | g_ver | ACH_eq_noc |
|--------------------------------|------------------------------------|---------------------------------|-----------------------------------|-----------------|--------|-------|-------|------------|
| 1.47 | 1.17 | 1.16 | 2.92 | 486.49 | 0.38 | 0.69 | 0.69 | 0.38 |
| 1 | 0.65 | 1.5 | 2 | 102.63 | 0.35 | 0.65 | 0.4 | 4 |
| 0.38 | 0.33 | 0.65 | 1.67 | 93.83 | - | 0.62 | 0.3 | 8 |
| 0.27 | 0.21 | 0.46 | 1.3 | - | - | 0.61 | - | 12 |

Tabla 16. Opciones de mejora. Fuente: Elaboración propia.

5.2. Coste de ciclo de vida

El coste de ciclo de vida (CCV) de un edificio es el coste total que supone el edificio, durante toda su vida desde que se construye hasta que se demuele. El estudio del coste de ciclo de vida que se pretende realizar consiste en volcar sobre una gráfica diferentes puntos que corresponden a diferentes alternativas. Cada una de las alternativas tendrá como objetivo la rehabilitación energética a través de la reducción de la demanda [13].

El CCV tiene en cuenta los costes de instalación, operación y mantenimiento de las instalaciones de climatización original de los edificios, además del coste que supone cada mejora en términos de reforma de la envuelta [13].

Dentro de los costes de operación se encuentran los costes de los consumos energéticos de los sistemas de acondicionamiento durante toda la vida del edificio. Para obtener un resultado real, el cálculo deberá tener en cuenta el precio de la energía, la inflación y la tasa de interés [13].

$$CCV = \text{Sobrecoste} + Cop \cdot \sum_{k=1}^{30} \frac{1}{(1+0.03)^k} \text{ [€]}$$

Por otro lado, la demanda de energía de cada alternativa se calcula por el método simplificado y finalmente se suman todas las demandas que tiene el edificio. Con respecto a iluminación y Agua Caliente Sanitaria, sus demandas permanecerán constantes para todas las alternativas estudiadas.

$$Cons_{E,P} = Cons_{CALEF} + Cons_{REFR} + Cons_{ILUM} + Cons_{ACS} \text{ [kWh/m}^2\text{]}$$

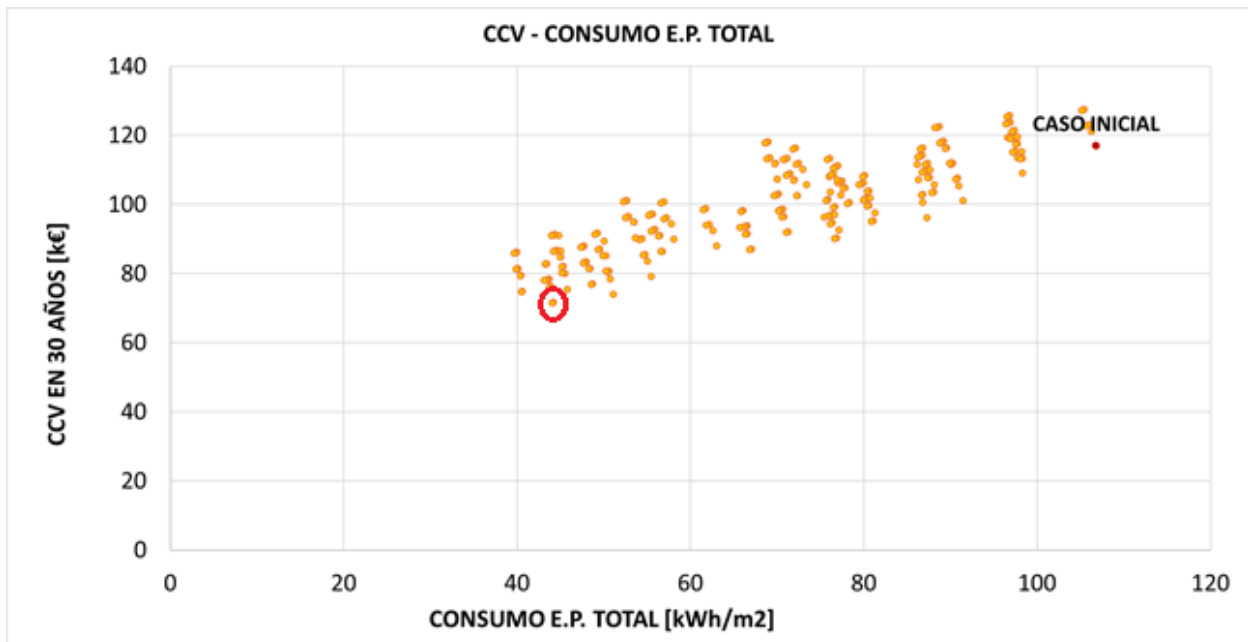


Figura 14. Combinaciones CCV-Consumo Energía Primaria. Fuente: Elaboración propia

En el eje de abscisas de la Figura 14 se muestra el consumo de energía primaria total de las diferentes opciones, y en el eje de ordenadas se muestra el Coste de Ciclo de Vida de cada una de ellas, dando lugar a una dispersión de puntos en los que podemos ver todas las combinaciones. Se elegirá de opción óptima a la que presente un menor coste de ciclo de vida.

En la Figura 15, se pueden ver representadas las combinaciones de nuevo. Se resalta que la combinación elegida como óptima tiene un sobrecoste que se encuentra entre la media de las distintas opciones de mejora.

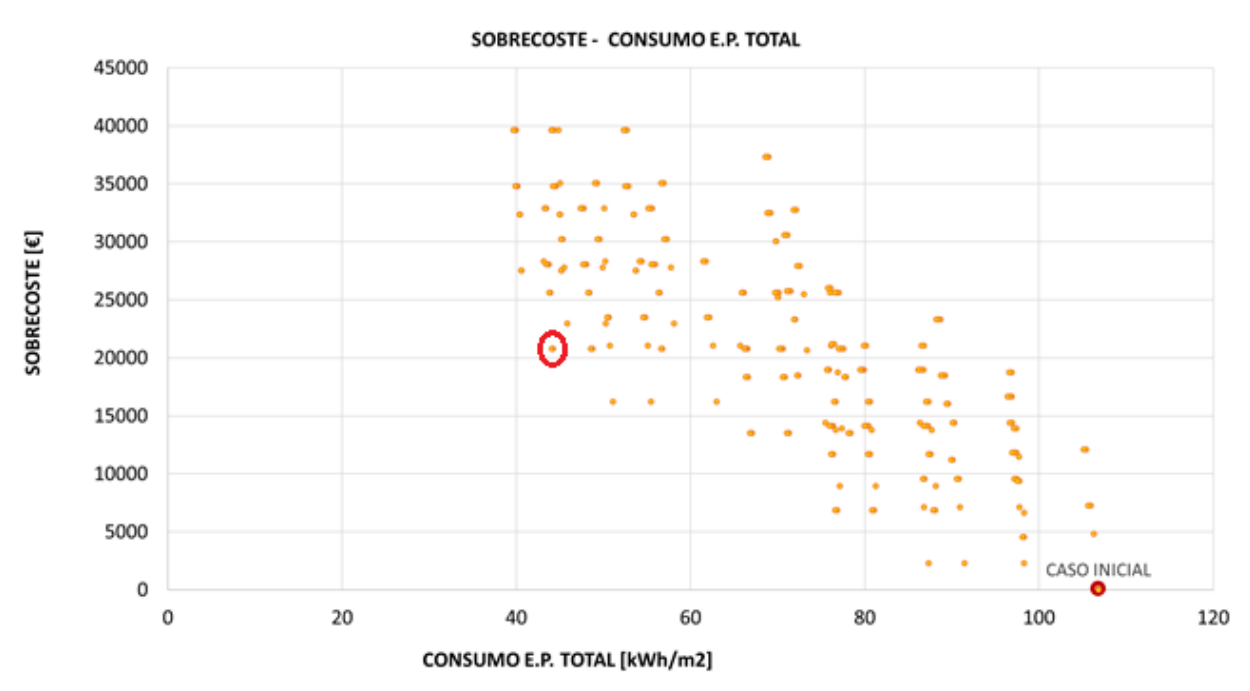


Figura 15. Combinaciones Sobrecoste-Consumo Energía Primaria. *Fuente: Elaboración propia.*

Los datos para resaltar de la combinación óptima y que se pueden ver en estas gráficas son:

- Consumo de energía primaria total [kWh/m²]: 44.20
- Coste de ciclo de vida a los 30 años [k€]: 71.66
- Sobrecoste inicial [€]: 20777.8

6 COMBINACIÓN ÓPTIMA

En la vida no existe nada que temer, solo cosas que comprender.

-Marie Curie

6.1. Características situación mejorada

La combinación que se ha elegido como óptima es la 172, reduciéndose la demanda de calefacción hasta 5.63 kWh/m² y la demanda de refrigeración a 4.7 kWh/m².

En la Tabla 17 se aprecia cuáles han sido los cambios que se aplicarían según la combinación que se ha elegido como óptima:

| CASO | U _{mur} [W/m ² K] | U _{cub} [W/m ² K] | U _{suel} [W/m ² K] | U _{vent} [W/m ² K] | Phi*L[W/mK] | ACH_eq | g_inv | g_ver | ACH_eq_noct |
|---------|---------------------------------------|---------------------------------------|--|--|-------------|--------|-------|-------|-------------|
| INICIAL | 1.47 | 1.17 | 1.16 | 2.92 | 486.49 | 0.38 | 0.69 | 0.69 | 0.38 |
| ÓPTIMO | 0.38 | 0.33 | 0.65 | 1.67 | 102.63 | 0.38 | 0.62 | 0.62 | 12 |

Tabla 17. Características situación inicial y óptima. Fuente: Elaboración propia.

Debido a estas modificaciones, la calificación energética del edificio se ha visto modificada y mejorada, pasando a tener clase de eficiencia A tanto en calefacción como en refrigeración.

| | |
|-----|-----|
| CAL | REF |
| F | B |

Tabla 18. Clase en situación inicial. Fuente: Elaboración propia.

| | |
|-----|-----|
| CAL | REF |
| A | A |

Tabla 19. Clase en situación óptima. Fuente: Elaboración propia.

6.2. Situación mejorada en HULC

Una vez elegida la situación mejorada (combinación óptima), se procede a introducir en HULC las características de estas mejoras para hacer una validación de los resultados obtenidos. Se harán las modificaciones necesarias para que el edificio tenga las características del caso óptimo, las cuales se pueden ver en la Tabla 17.

Una vez introducidas estas características se vuelve a simular el edificio en HULC, obteniéndose una demanda de calefacción de 6.21 kWh/m², valor bastante similar al de 5.63 kWh/m² que daba el caso óptimo en la herramienta simplificada. Se puede ver en la Figura 16 cómo es la reducción de la demanda tanto en HULC como en la herramienta simplificada. A partir de aquí se trabajará con la demanda reducida en calefacción, considerando que el edificio en verano está fuera de funcionamiento. Además, aparte de que la refrigeración se ha mejorado bastante en la reducción de demanda, el periodo de duración de refrigeración es menor frente al de calefacción.

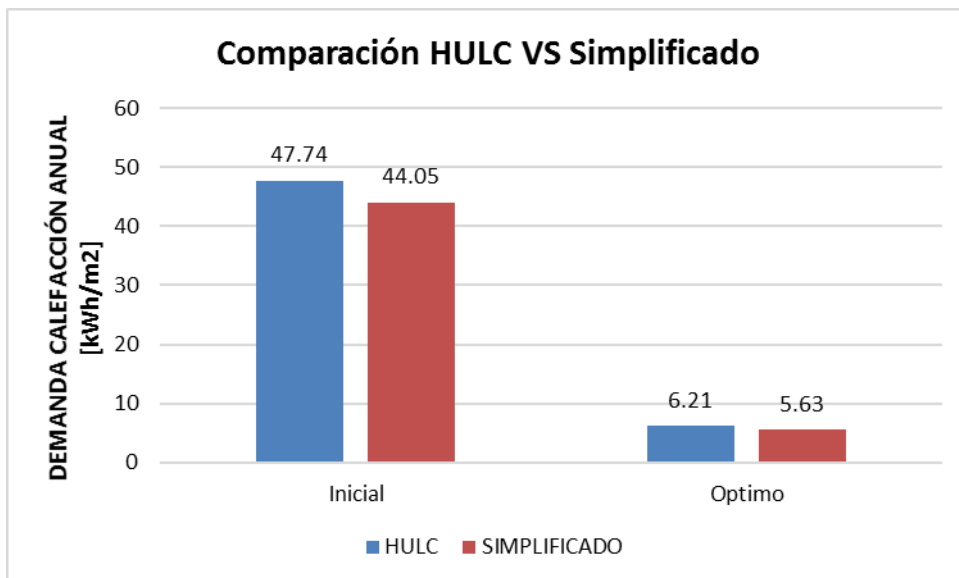


Figura 16. Demandas caso inicial y óptimo. Fuente: Elaboración propia.

Por lo tanto, una vez llegado a este punto el edificio se encontraría con la demanda reflejada en la Tabla 20. Se partirá de este punto en el que la demanda de calefacción se ha conseguido reducir un 87%.

| ÓPTIMO | DEMANDA CALEFACCIÓN |
|--------------|----------------------------|
| HULC | 6.21 [kWh/m ²] |
| SIMPLIFICADO | 5.63 [kWh/m ²] |

Tabla 20. Óptimos de demandas. Fuente: Elaboración propia.

6.3. Otros datos de la situación mejorada.

Se observa que con el proceso de reducción de la demanda el edificio se encontrará mucho más cerca del objetivo final, el consumo casi nulo. En este punto aún queda aplicar la modificación de la instalación tanto de climatización como de la instalación de ACS. Para ello, lo primero de todo ha sido obtener las nuevas demandas horarias del edificio para calefacción en Figura 17. Además de esto, en la Figura 18 también se pueden ver representadas las temperaturas horarias promedio de los espacios del colegio ya en la situación mejorada. Como ya se comentó en el comienzo del proyecto, una vez hechas las reducciones de la demanda, para el periodo de refrigeración no se va a proponer un modelo de instalación puesto que los meses que abarcan este periodo son reducidos frente a los que abarcan la calefacción. Por ello, en verano el edificio se dejará en oscilación libre con la mejora de ventilación nocturna.

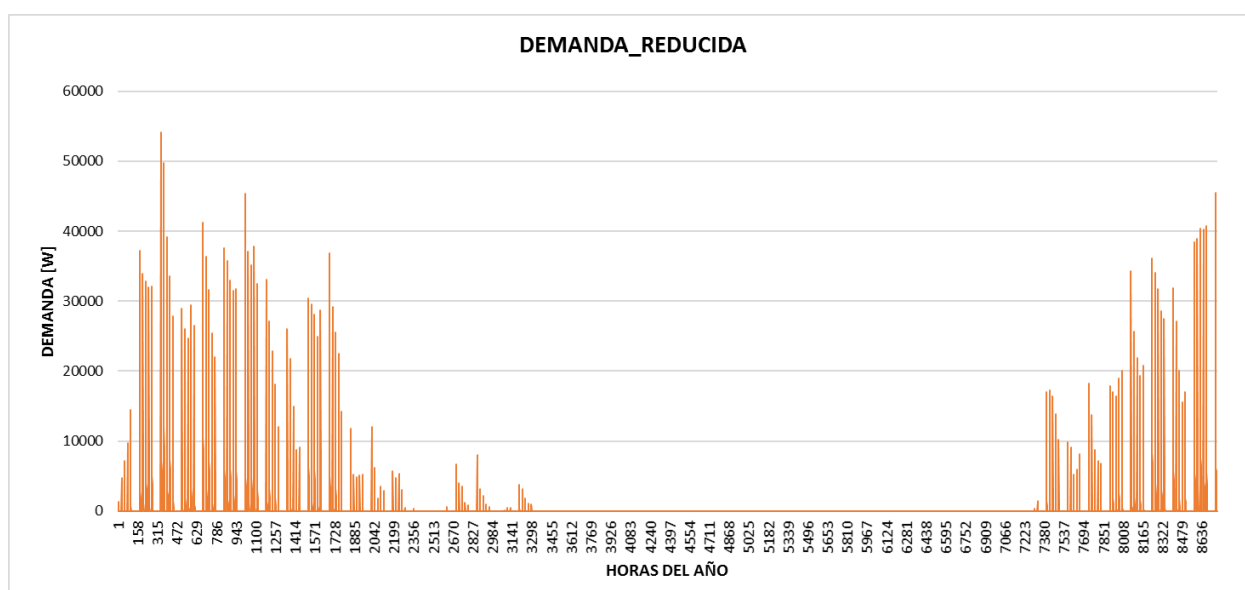


Figura 17. Demanda horaria de calefacción en el caso óptimo. Fuente: Elaboración propia.

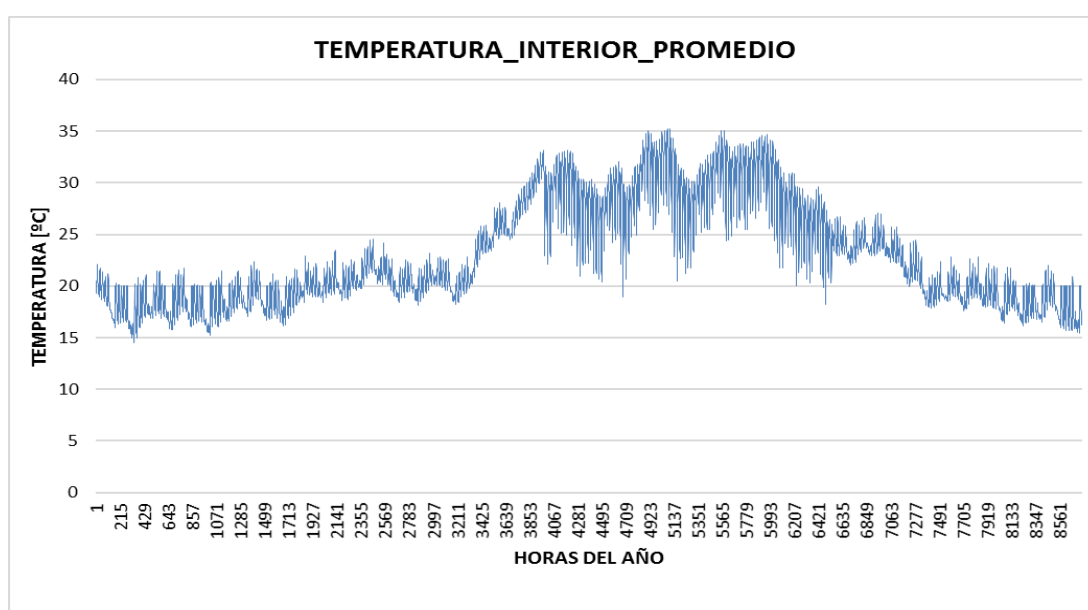


Figura 18. Temperaturas interiores promedio caso óptimo. Fuente: Elaboración propia.

7 EDIFICIO EN OSCILACIÓN LIBRE

*Vive como si fueras a morir mañana.
Aprende como si fueras a vivir siempre.
-Gandhi*

La situación del centro tras la reducción de demanda está mejorada con respecto a la inicial de partida. Las condiciones del edificio para su uso podrían ser hasta válidas sin necesidad de la implantación de una instalación de climatización. Para comprobar esta afirmación, se evaluarán las temperaturas del centro cada hora durante todo el año, y así descubrir en que momentos hay confort térmico en el centro o no.

El confort térmico es la sensación que expresa la satisfacción de los usuarios de los edificios con el ambiente térmico. Por lo tanto, es subjetivo y depende de diversos factores. Una de las funciones principales de los edificios es proveer ambientes interiores que son térmicamente confortables. La temperatura del aire es uno de los factores a estudiar, esta determina cuánto calor el cuerpo pierde hacia el aire, principalmente por convección. La temperatura del aire basta para calificar el confort térmico siempre y cuando la humedad, la velocidad del aire y el calor radiante no influyen mucho en el clima interior [14]. El rango de confort será diferente en los periodos de calefacción y refrigeración. Los rangos de confort serán los siguientes:

- Horas fuera de confort en calefacción: Horas cuya temperatura media del edificio sea inferior a 20°C.
- Horas fuera de confort en refrigeración: Horas cuya temperatura media del edificio sea superior a 25°C.

Para estudiar este confort térmico, se simulará el edificio en oscilación libre. La oscilación libre es analizar las temperaturas del centro sin necesidad de poner en funcionamiento ningún equipo de climatización. Para que el edificio pudiese estar en funcionamiento en esta situación de oscilación libre y aun así cumplir la normativa, el 4% de las horas de funcionamiento del centro son las que pueden estar fuera de confort.

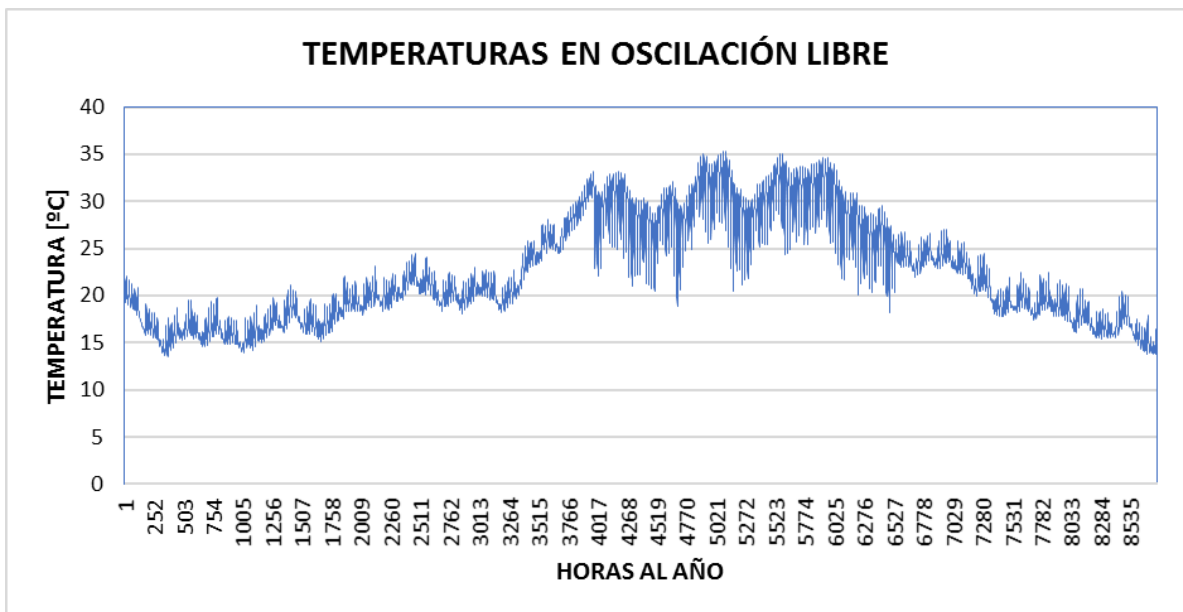


Figura 19. Temperaturas en oscilación libre. Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 19 se puede ver la evolución de las temperaturas a lo largo del año, ya ahí se puede ver perfectamente que en época de refrigeración las temperaturas son superiores a 25°C en muchas ocasiones. Si se evalúan todas las horas del año, de las 8760 horas que tiene un año, su correspondiente 4% serían 350 horas de límite. Se comprueba con las temperaturas medias del edificio que un total de 6539 horas habría demanda o de calefacción o de refrigeración. Es decir, se supera este límite de horas de confort, teniendo que recurrir a la implantación de una instalación.

Se ha planteado el mismo cálculo, pero solo observando las horas en las que el edificio estaría en funcionamiento. Contando con una media de 188 días de funcionamiento al año y considerando 8 horas de funcionamiento al día, se tienen 1504 horas. De estas horas 1149 están fuera de las temperaturas de confort, que se pueden ver reflejadas en el siguiente gráfico circular, en el que el 76% de las horas de funcionamiento están fuera de confort. Se sigue apoyando la causa de recurrir al uso de una instalación de climatización para cubrir todas las horas fuera de confort.

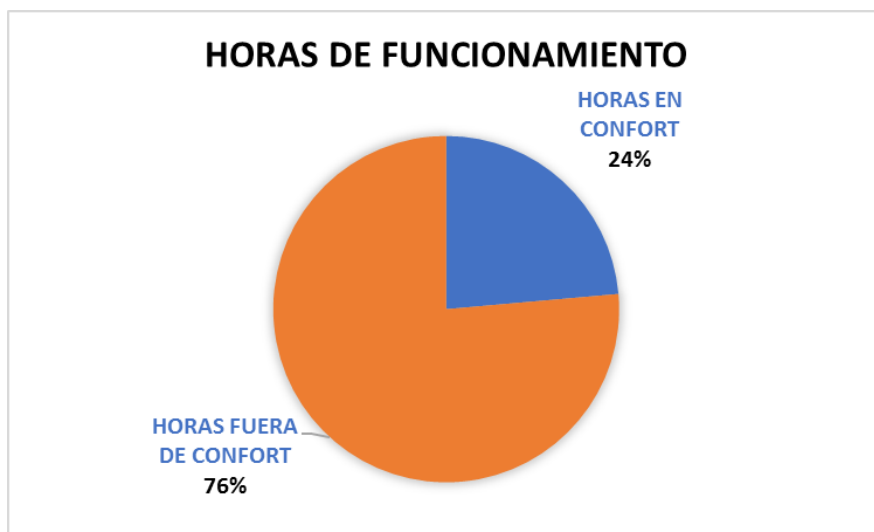


Figura 20. Horas de funcionamiento que están dentro y fuera de los límites de confort. *Fuente: Elaboración propia.*

8 INSTALACIÓN DE CLIMATIZACIÓN

*Siente menos curiosidad por la gente y
más curiosidad por sus ideas.*

-Marie Curie

La climatización consiste en crear unas condiciones de temperatura, humedad y limpieza del aire adecuadas para la comodidad y la calidad del aire interior dentro de los espacios habitados. La normativa española define climatización como: dar a un espacio cerrado las condiciones de temperatura, humedad relativa, calidad del aire y, a veces, también de presión, necesarias para el bienestar de las personas y/o conservación de las cosas [15].

Un sistema completo de climatización comprendería estas partes:

-Generación de energía térmica (frío y calor).

-Transporte (primario) de esa energía térmica a donde será utilizada. Este transporte se hará generalmente por agua.

-Uso de la energía térmica, que puede ser:

- En un climatizador: aparato de tratamiento de aire (UTA) que recibe la energía de una red de agua, caliente o fría, y, por otro lado, aire del exterior (aire de ventilación) y que también puede ser recirculado, lo mezcla (en su caso), lo trata y lo impulsa hacia los locales a climatizar.
- Directamente a aparatos terminales: lo que se da cuando se trata de sistemas que no integran ventilación. Para refrigeración se utilizarían fan-coils y para calefacción, radiadores, superficies radiantes o también fan-coils.
- Las dos cosas a la vez: climatizadores y aparatos terminales.

-Transporte (secundario) por medio de aire tratado, por conductos adecuados para llevarlo a los locales a climatizar.

-Emisión en los locales y, en caso de ser climatización por aire, difusión en los ambientes, de modo que el aire tratado alcance toda la zona considerada como “habitada” dentro de ellos [15].

Hay instalaciones que no tienen todos los componentes. Un claro ejemplo es la instalación del edificio de este proyecto, en el cual, tanto la instalación original como la propuesta contarán con generación térmica, transporte primario (por agua) y aparatos terminales que emiten al ambiente (radiadores), pero no trata el aire, ni ventila (no lleva aire a los locales).

8.1. Instalación Original

La instalación de climatización que posee el centro en la actualidad está compuesta de los siguientes equipos.

Por la parte de equipos generadores a partir de combustible el centro posee una caldera Ferroli convencional de gas natural. La caldera se encarga de distribuir el agua caliente por todo el colegio a través de 21 radiadores para así cubrir la demanda de calefacción. Esta misma caldera será la que se encarga de producir el ACS del centro. [8]

| Caldera de gas | Valores |
|----------------|---------|
| Potencia | 45Kw |
| Rendimiento | 92% |

Tabla 21. Características caldera calefacción. Fuente: Elaboración propia con datos de auditoría. [8]

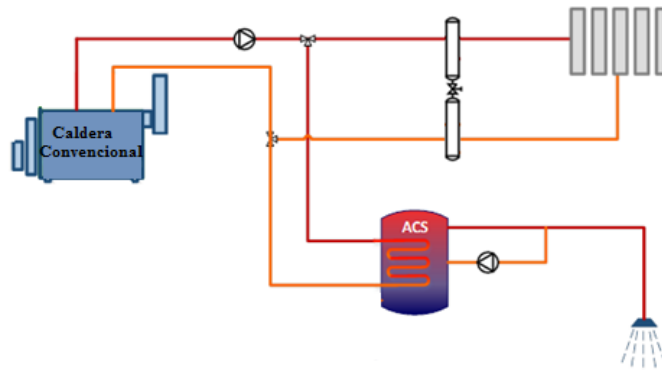


Figura 21. Esquema instalación, parte de la caldera. Fuente: Elaboración propia.

8.2. TRNSYS

Para esta segunda parte del proyecto se contará con el apoyo del programa TRNSYS. Se trata de un software basado en un entorno gráfico muy flexible, usado para simular el comportamiento de sistemas transitorios. Fue desarrollado en la Universidad de Wisconsin, y enriquecido por las contribuciones de TRANSSOLAR Energietechnik GMBH, Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB) y Thermal Energy Systems Specialists (TESS) [16].

TRNSYS es un software muy adecuado para diseñar, optimizar, y hacer un análisis detallado de cualquier sistema cuyo comportamiento sea dependiente del paso del tiempo. Es usado por ingenieros e investigadores de todo el mundo para validar nuevos desarrollos energéticos, desde sistemas de agua caliente sanitaria hasta el diseño y simulación de edificios y sus equipos, incluyendo estrategias de control y sistemas alternativos de energía (eólica, fotovoltaica, solar, sistemas de hidrógeno, etc.) [16].

La forma de generar un proyecto en TRNSYS resulta muy intuitiva: se conectan gráficamente los componentes del sistema (types) por medio del interfaz visual Simulation Studio. Cada uno de los types se describe con un modelo matemático mediante lenguaje de programación Fortran y lleva asociado un Proforma en el Simulation Studio. Éste describe el componente como una caja negra por medio de entradas, salidas y parámetros. Las salidas de cada componente actúan como entradas de otro [16].

Esencialmente, TRNSYS es un solucionador de ecuaciones algebraicas y diferenciales, capaz de leer y procesar un archivo de datos de entrada de texto para posteriormente resolver el sistema iterativamente, determinando la convergencia, y representado variables. Junto a este potente sistema de resolución de ecuaciones se encuentra una enorme biblioteca de componentes que modelan desde simples bombas a detallados edificios multizona [16].

Además, la biblioteca de TRNSYS incluye muchos de los componentes que se encuentran comúnmente en los sistemas de energía térmica y eléctrica, así como rutinas de componentes para manejar la entrada de datos meteorológicos u otras funciones [16].

Se usará TRNSYS para dimensionar la nueva instalación del colegio.

8.3. Nueva instalación para reducción del consumo.

8.3.1. Introducción a la nueva instalación

Se partía de un centro educativo de unos 150 alumnos, que contaba con una demanda de calefacción y una demanda de ACS. Además, el centro contaba con una instalación inicial que cubría la calefacción gracias a una caldera convencional que distribuía el agua caliente a través de radiadores. Por otro lado, la demanda de ACS se cubría también a través de la misma caldera convencional.

Una vez reducida la demanda de calefacción del edificio y manteniendo la demanda de ACS, se busca seguir reduciendo el consumo del centro a partir de una nueva instalación.

Se propone una instalación nueva la cual contará con una caldera de condensación mixta que abastecerá tanto calefacción como ACS. Por otro lado, se propone la implantación de paneles solares capaces de cubrir también parte de la demanda de ACS, y aportar de esta manera un equipo renovable a la instalación para así cumplir la normativa correspondiente.

Con la nueva instalación y la demanda reducida del edificio se pretende llegar al consumo casi nulo del centro. El modelo de la instalación que se plantea implementar en el centro se simulará en TRNSYS según el siguiente esquema simplificado:

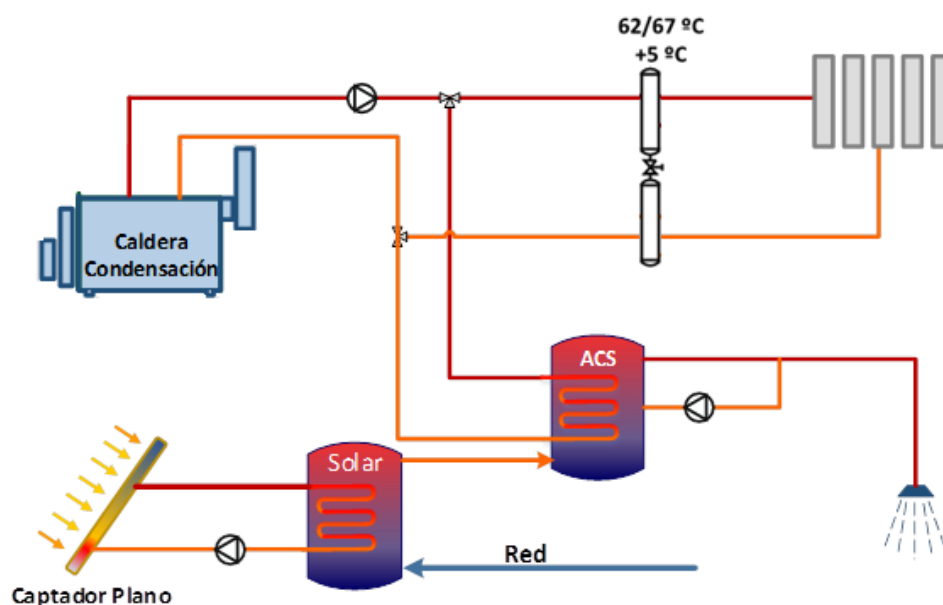


Figura 22. Esquema instalación nueva. Fuente: Elaboración propia.

Con respecto a los equipos que se proponen para la nueva instalación, se cuenta como se ve en el esquema con una caldera de condensación que cubrirá la demanda de calefacción del centro, y que distribuirá el agua a través de radiadores. Estos radiadores serán los mismos que tenía la instalación antigua, puesto que eran de baja temperatura y se podrán conservar. Además, la caldera también será el equipo auxiliar para la parte de demanda de ACS. Los captadores planos serán encargados de satisfacer parte de la demanda de ACS, pero tendrán de apoyo la caldera para los días de invierno o simplemente aquellos días de menor radiación. En la Figura 22 se pueden ver tres tanques que serán los encargados de almacenar el agua calentada por los equipos generadores. La instalación contará con las distintas bombas necesarias para impulsar el agua.

Para el buen funcionamiento de los equipos se han necesitado ciertos datos climáticos horarios de la ciudad de Jaén como lo son la temperatura ambiente o la radiación. Además de estos archivos también se necesitarán los datos de demanda reducida y la demanda de ACS, ambos en formato horario.

Finalmente, se tomará energía de los paneles siempre que haya radiación pues es un recurso renovable y se aprovechará toda la radiación posible para calentar el agua, aunque en algunos momentos solo sirva de precalentamiento. Por otro lado, la caldera solo se encenderá cuando sea necesario, es decir, o cuando haya demanda de calefacción o cuando haya de ACS y los paneles no puedan combatirla. Para entender mejor el mecanismo de funcionamiento de la instalación, se podrá ver un diagrama de flujo con el funcionamiento en el apartado 8.3.3.3.

8.3.2. Equipos

La eficiencia energética en edificios tiene como objetivo reducir el consumo de energía y es una de las principales preocupaciones de las organizaciones por su impacto ambiental. Por lo tanto, se propone una nueva instalación con equipos de mayor eficiencia y con una parte de renovabilidad. Es por ello, que se plantean los siguientes equipos:

1. CAPTADOR PLANO

Los captadores solares utilizan al sol como fuente de energía. Esta energía limpia y ecológica, permite abastecer de agua caliente tanto al hogar como a la industria, sin la necesidad de utilizar combustibles o electricidad, y, con el volumen de agua necesario para cada necesidad. Su funcionamiento es independiente del resto de los sistemas instalados, por lo tanto, puede ser utilizado de forma complementaria. Es ideal para aquellos establecimientos que no cuentan con energía eléctrica [17][18].

Los captadores solares térmicos o placas solares térmicas permiten aprovechar la energía solar para generar calor el cual se utilizará en edificios para agua caliente sanitaria, calefacción, calentamiento de piscinas, etc. [17][18].

El captador plano se caracteriza como su nombre indica por tener una superficie de captación totalmente plana. Estos captadores presentan mucha resistencia al viento, con lo que requieren mejores anclajes para contrarrestar los efectos de fuertes ráfagas de viento. Además, son robustos, pesados y resistentes lo que dificulta que puedan dañarse con facilidad. También se caracterizan por perder mucho calor por convección y conducción, sobre todo en lugares de mucho frío o viento. A la vez son propensos a sufrir condensaciones, sobre todo si se deteriora la junta entre el cristal y la caja, lo que provoca corrosiones y afecta al rendimiento y duración del módulo [17][18].

La estructura del equipo captador es:

- Subsistema de captación: Es el encargado de transformar la energía solar recibida en energía térmica para calentar el fluido caloportador.
- Subsistema de intercambio y acumulación: Desempeña la función de transferir la energía térmica captada al agua que se consume y su posterior almacenamiento hasta que se necesite en la aplicación necesaria.
- Subsistema de apoyo o auxiliar: Sistema de energía convencional para cubrir la demanda prevista cuando fuera necesario.

Circuito hidráulico: Es el encargado de garantizar el funcionamiento del fluido por toda la instalación [17][18].

Además, con este equipo se cubrirá el porcentaje de renovabilidad que deben tener las nuevas instalaciones según el código técnico.

La radiación es uno de los factores más importantes pues una parte de la radiación solar que incide sobre el panel será absorbida y será la encargada de calentar el agua. Por otro lado, en los momentos en los que no haya radiación el panel no será capaz de producir ese calor y habría que recurrir al subsistema de apoyo. La zona climática será determinante a la hora de ver si este tipo de instalación merece la pena.

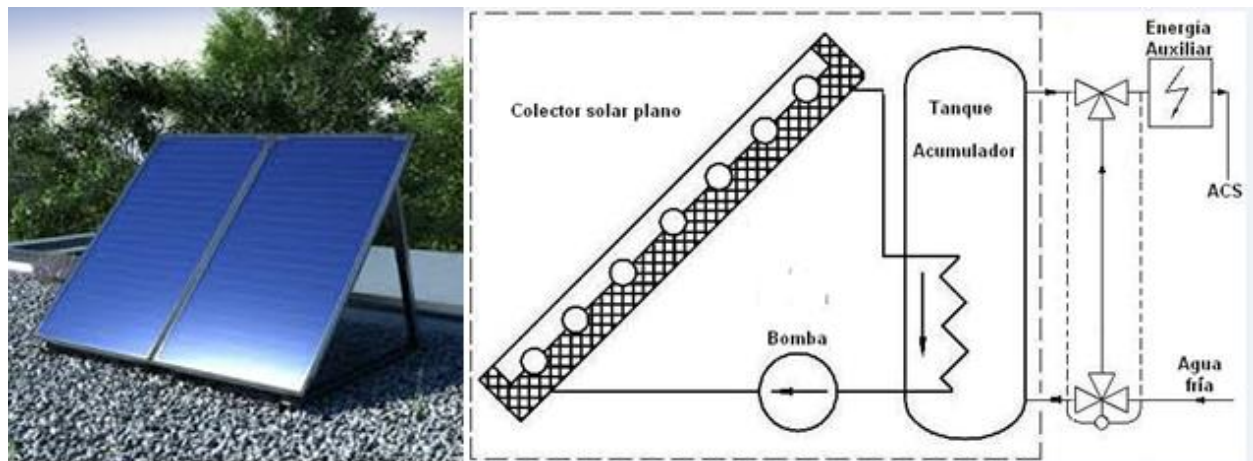


Figura 23. Captador plano. Fuente: Usos de la Energía Solar Community Blog. [19]

2. CALDERA DE CONDENSACIÓN

Las calderas de condensación son las calderas más eficientes del mercado. Logran alcanzar un rendimiento óptimo, superior al 100%, aprovechando el calor latente de los humos procedentes de la combustión. Al enfriar estos humos por debajo de la temperatura de rocío (temperatura en la que el vapor de agua pasa de estado gaseoso a líquido) se libera energía en forma de calor que es aprovechada para calentar el agua del circuito [20].

Esta energía, que las calderas convencionales desaprovechan, puede suponer un ahorro de hasta un 20% en la factura de gas. Además, la caldera de condensación es más respetuosa con el medioambiente ya que los gases que desprende son menos contaminantes que los de una caldera convencional [20].

La caldera de condensación permite instalar más metros de chimenea que una estanca convencional, lo que puede resultar determinante a la hora de su elección. Es importante tener en cuenta que la pendiente de la chimenea vaya hacia la caldera, ya que en una caldera de condensación interesa recoger el vapor una vez condensado para aprovechar el calor latente [20].

El material de la chimenea también es diferente: en una caldera estanca está fabricada con aluminio, mientras que en la de condensación es de polipropileno para evitar que los vapores ya condensados corroan la chimenea y se produzcan fugas [20].

Una vez aprovechado el calor del vapor de agua ya condensado (en estado líquido) hay que eliminarlo conduciéndolo hacia un desagüe. No se recomienda que el desagüe se encuentre a más de 3 m de la caldera y se le dará siempre pendiente para evitar acumulaciones [20].

En caso de no poder acceder a un desagüe cercano, se instalará una bomba para impulsar los condensados al desagüe más cercano. Existen bombas diseñadas específicamente para este cometido, ya que los condensados son parcialmente corrosivos y podrían dañar la bomba. Por último, el tubo de desagüe debe ser de material plástico para evitar la corrosión [20].

Para optimizar el rendimiento de la caldera de condensación es aconsejable hacer que trabaje a menor temperatura que una estanca convencional. En lugar de impulsar el agua a 80-90°C, se calienta a entre 50-60°C. Al funcionar a menor temperatura, la caldera es capaz de condensar más, por lo que aprovecha más calor latente y ahorra más gas. Al contrario de lo que pueda parecer, no es necesario sobredimensionar los radiadores para obtener una temperatura confortable, ya que la caldera trabaja más tiempo, pero con un rendimiento superior [20].

En el caso de calentar el agua a 80-90°C como hace una caldera de gas convencional, el ahorro que se consigue con la caldera de condensación es muy pequeño, por lo que es importante bajar la temperatura del circuito de calefacción [20].

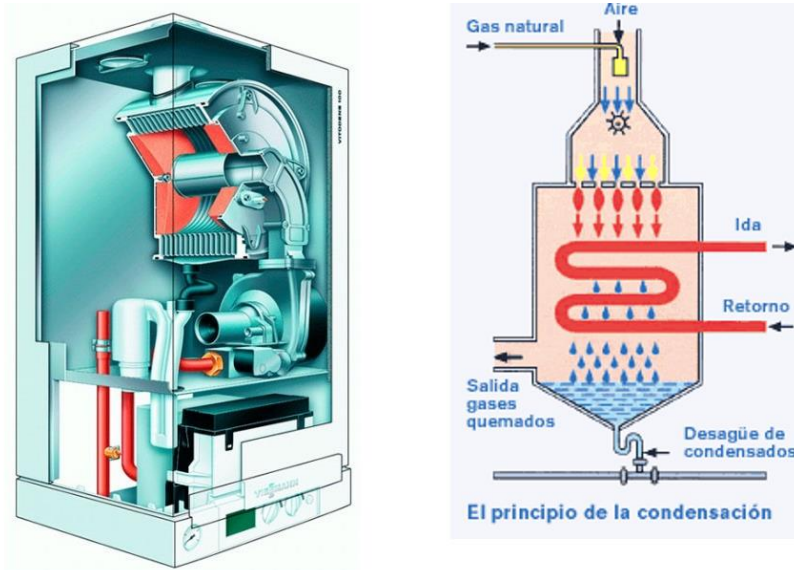


Figura 24. Caldera Condensación. Fuente: Junkers oficial. [21]

3. TANQUES DE ACUMULACIÓN

Como su nombre indica, un acumulador de agua tiene es un tanque o depósito con aislante térmico que calienta el agua, a través de un serpentín o por mezcla, y que obtiene la energía a través de la caldera y almacena el agua caliente para suministrarla a la instalación sanitaria o la calefacción. El acumulador puede ser calentado mediante la combustión de gas de la caldera que proporciona energía térmica al serpentín para calentar el agua del acumulador [22].

- Ventajas de un acumulador de agua: Es más barato calentar agua a través de la energía producida por la caldera que mediante la resistencia eléctrica de un termo; el suministro de agua caliente está a una temperatura constante y la temperatura del agua no baja si se abren o cierran otras llaves conectadas al acumulador. Además, permite calentar una mayor cantidad de agua que un termo con menos consumo eléctrico [22].
- Desventajas de un acumulador de agua: Es necesario contar con espacio extra debido al tamaño del tanque y los periodos de recuperación del calor son muy largos [22].

Normalmente los acumuladores suelen tener forma cilíndrica, teniendo más de alto que de ancho para favorecer la estratificación de la temperatura. En la parte baja del tanque estará el agua más fría y en la parte de arriba del tanque estará el agua más caliente. Por lo tanto, a mayor altura del tanque, mayor podrá ser la diferencia de temperatura y por ello se alcanzará un mayor rendimiento [22].

Para facilitar la estratificación del tanque, el agua caliente que llega de los equipos generadores entrará por la parte alta del tanque. Por esta misma zona alta saldrá también el agua que va a la demanda. Sin embargo, el agua que entra de la red o fría y la que sale del tanque hacia los equipos calentadores se encontrarán en las zonas bajas del tanque.

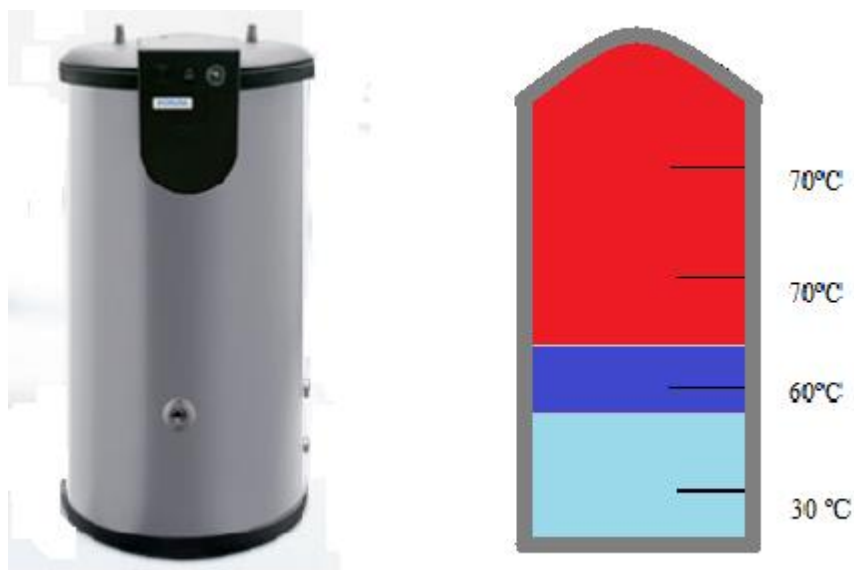


Figura 25. Tanques de acumulación de agua. Fuente: Elaboración propia con datos de Tu&Co. [22]

Los tanques acumuladores podrán tener serpentín o no. En el caso de los tanques que almacenen agua dirigida al consumo de ACS estos tanques deberán contar con serpentín. En este caso el generador de calor se sitúa en el exterior del acumulador y por tanto requiere de un intercambiador de calor, para transmitir esta energía hasta el acumulador. Este acumulador será más higiénico que el anterior y además se puede tratar el agua con anticongelante en zonas donde haya heladas. Los depósitos con serpentín eliminan la posibilidad de zonas frías en el depósito donde podría proliferar la bacteria de la legionela [23].

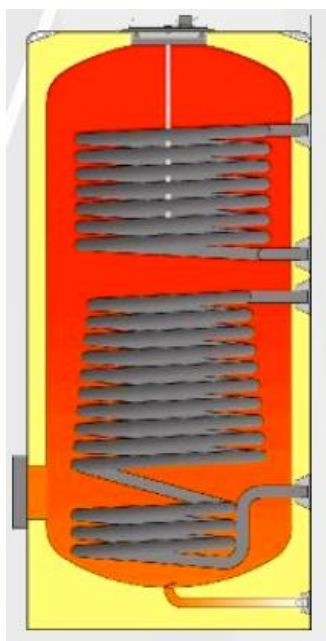


Figura 26. Tanque con serpentín. Fuente: Lapesa. [23]

4. BOMBAS DE CIRCULACIÓN

Una bomba es una turbo máquina generadora para líquidos. La bomba se usa para transformar la energía mecánica en energía hidráulica. Para que un fluido fluya desde donde hay mayor presión hasta donde hay menos presión no se necesita ningún gasto de energía, pero para realizar el movimiento inverso, es necesaria una bomba, la cual le comunica al fluido energía, sea de presión, potencial o ambas. Para esto, necesariamente se tiene que absorber energía de alguna máquina motriz, ya sea un motor eléctrico, uno de combustión interna, o una turbina de vapor o gas, etc. [24].

En un circuito de calefacción o de agua caliente sanitaria es necesaria una bomba de circulación que mueva el agua por todo el circuito. Al ser un circuito cerrado no recibe energía externa y solo con la inercia del calor del agua sería muy lento e ineficaz. Todas las calderas llevan instalada una bomba en su interior, pero a veces (altura, dimensiones de la instalación, seccionamiento de la instalación) es necesaria otra bomba de apoyo [24].



Figura 27. Bomba circulación. Fuente: HidroDiselec. [24]

8.3.3. Modelo instalación en TRNSYS.

8.3.3.1. Types y esquema completo

Como se ha mencionado anteriormente en TRNSYS se usan types para representar los distintos equipos. Los types irán definidos con las características correspondientes de cada equipo (rendimientos, caudales, temperaturas...). Además, estos types irán conectados según la relación que hay entre los equipos.

Para simular la nueva instalación se han usado los siguientes types:









| COMPONENTE DE LA INSTALACIÓN | TYPE |
|---|--|
| <u>Tanques</u> : Se emplean para representar el acumulador solar, el de ACS, así como el bus de alta. |  TYPE4a- |
| <u>Panel termosolar</u> : El captador solar encargado de calentar agua con la radiación solar. |  Type73 |
| <u>(Diverter) Diversor de flujo</u> : Divide un flujo en dos. |  TYPE11f |
| <u>Mixer (Mezclador)</u> : Unifica dos flujos en uno. |  TYPE11h |
| <u>Tempering Valve</u> : Controla la temperatura del elemento que se le indique. |  TYPE11b-2 |
| <u>Controlador</u> : Se encarga de activar y desactivar los equipos generadores. |  TYPE2b |
| <u>Bombas</u> : Impulsan el agua en el circuito. |  Type114 |
| <u>Ecuaciones</u> : Algunos equipos se simularán a través de sus propias ecuaciones. Ej: La caldera. |  Equa |

Tabla 22. Componentes de la instalación. *Fuente: Elaboración propia con datos de TRNSYS.*

El modelo en TRNSYS de la nueva instalación completa está representado en la Figura 28 y Figura 29. En la primera de ambas están representados simplemente los flujos de agua que contiene la instalación y los distintos equipos generadores y consumidores, además de las bombas y los mixers y diverter. En Figura 29 se encuentran definidos todos los archivos con datos de entrada, controladores de equipos y calculadoras que contienen señales de funcionamiento también entre otras definiciones.

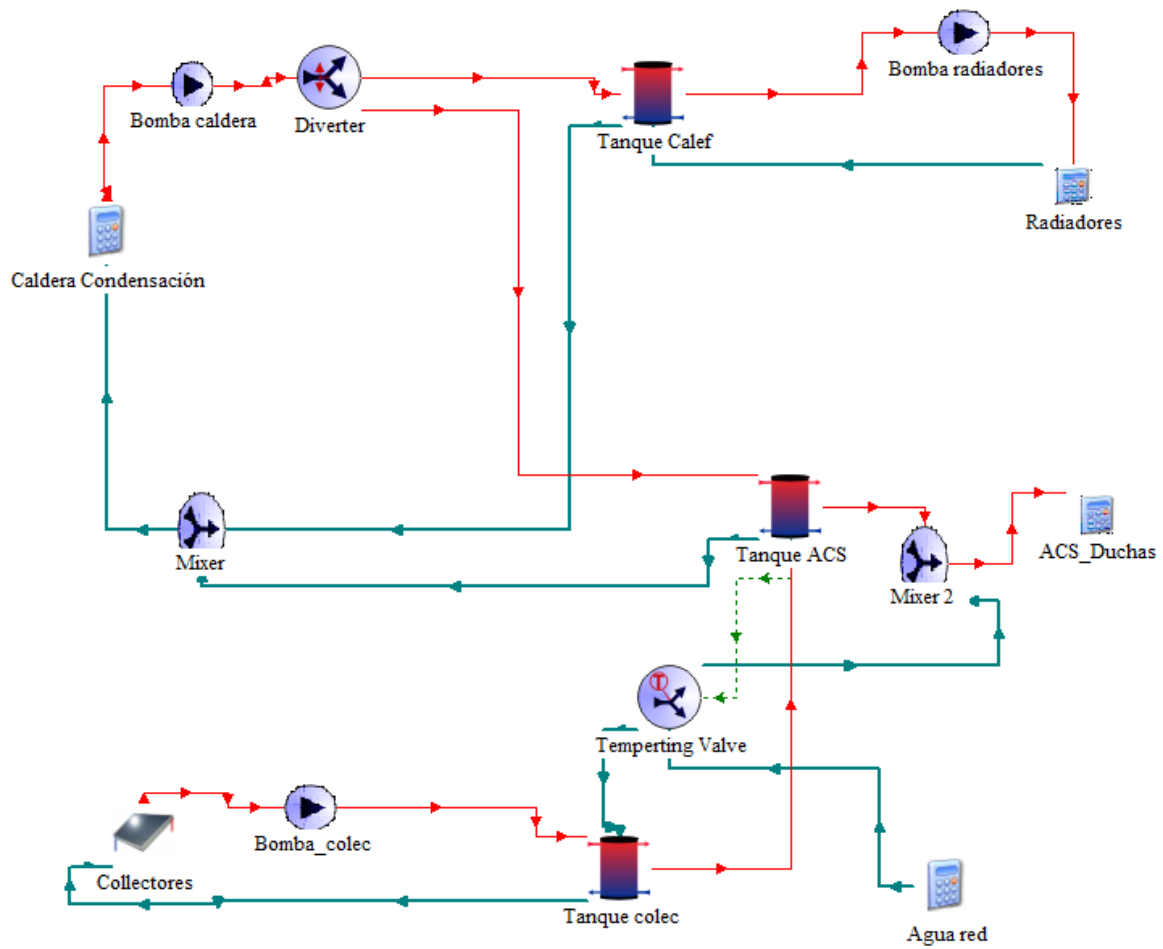


Figura 28. Circuito agua en TRNSYS. Fuente: *Elaboración propia con datos de TRNSYS.*

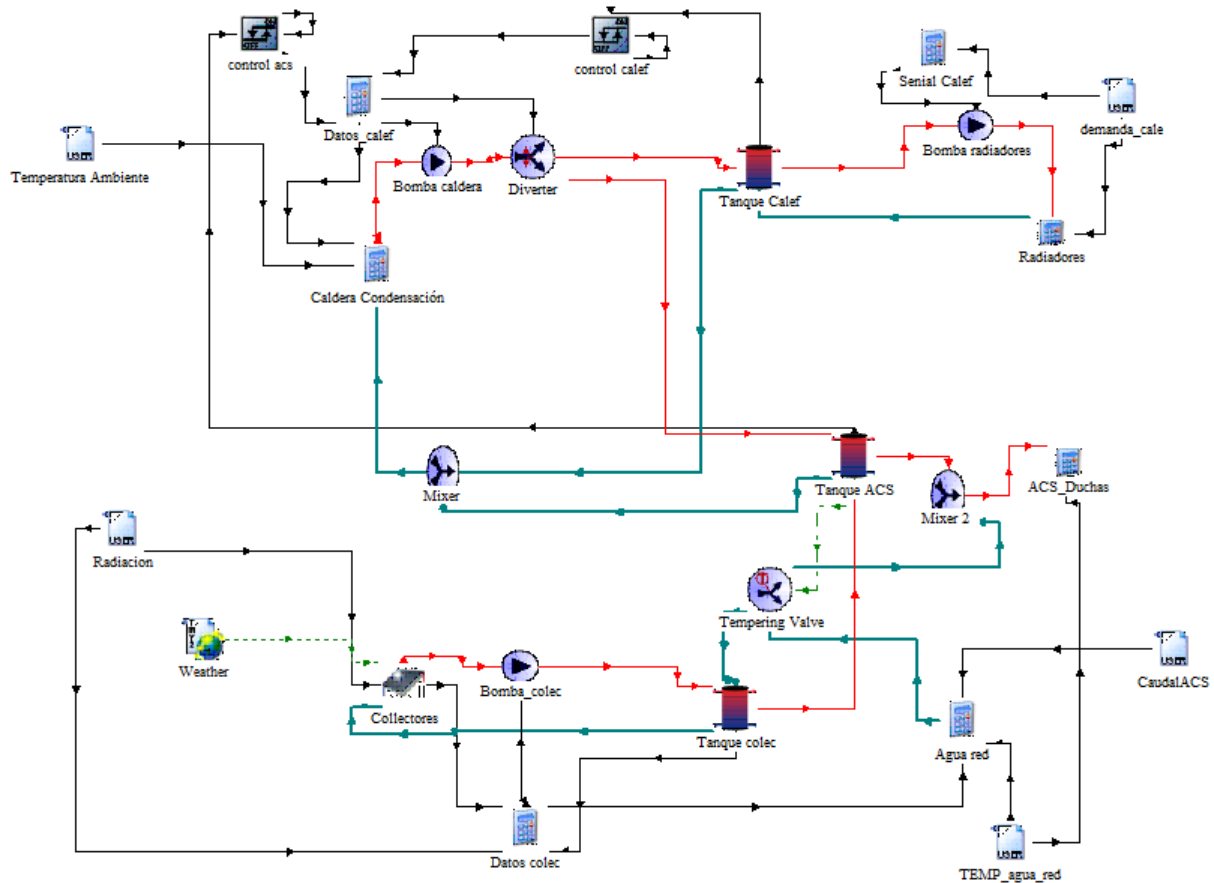


Figura 29. Instalación TRNSYS completa. Fuente: Elaboración propia con datos de TRNSYS.

Por otro lado, la instalación se puede desglosar en dos partes: la que engloba la parte de calefacción, y la que engloba la parte de ACS, aunque realmente ambas partes están muy conectadas entre sí debido a que la caldera abastecerá ambas demandas. Vemos en las siguientes dos imágenes como se divide la instalación.

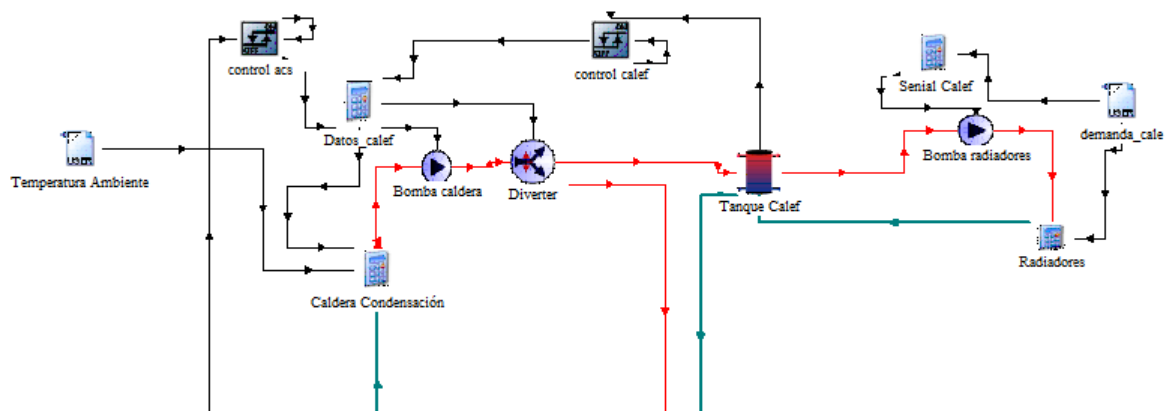


Figura 30. Instalación TRNSYS parte calefacción. Fuente: Elaboración propia con datos de TRNSYS.

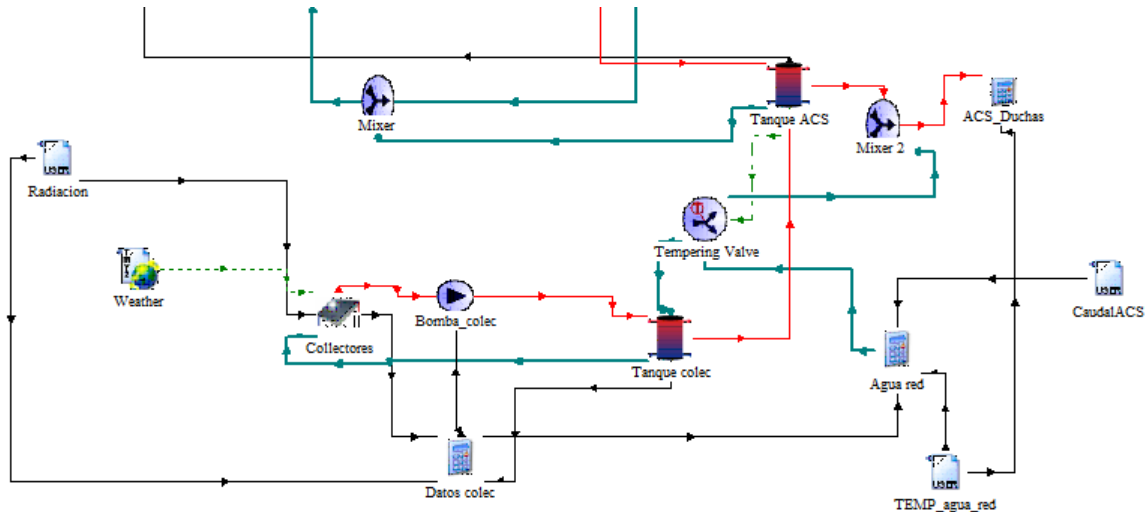


Figura 31. Instalación TRNSYS parte ACS. Fuente: Elaboración propia con datos de TRNSYS.

8.3.3.2. Definición de cada type

Los types serán los elementos principales a la hora de definir la instalación y sus equipos. Aunque el funcionamiento de estos ya esté predeterminado en la mayoría de ellos, habrá que definir algunos parámetros para que todo se ajuste al proyecto de la instalación. De hecho, para algunos de los elementos de la instalación no tendremos un type predeterminado y se tendrá que definir completamente.

Caldera de condensación

La caldera será la encargada de calentar tanto el agua que va a calefacción como el agua que va a ACS, existiendo la posibilidad de dividir el flujo y abastecer ambas a la vez. Además, se debe encargarse de que el agua llegue en un rango de 5 grados, entre los 67°C de máximo y 62°C de mínimo.

La caldera se modelará a través de su curva de rendimiento a partir del factor de carga parcial, para ello se utilizará una calculadora o ecuación:

| | | |
|------------------------------------|--|---|
| REND-TERM_FCP (HIR-FPLR) | Variación, respecto al valor nominal, de la relación entre el consumo de combustible y la potencia térmica de la caldera (HIR), en función del factor de carga parcial. El valor del HIR es el inverso del rendimiento térmico nominal definido en CALENER-GT (REND-TERM). | |
| | $f(PLR)$ | |
| | Cúbica, Cuadrática, Lineal | |
| | <i>PLR</i> | Factor de carga parcial, definido como cociente entre la carga del sistema y la capacidad sensible del mismo (en el caso de calefacción la carga sensible coincide con la total). |
| | | n/a |

Figura 32. Información de la curva de la caldera de condensación. Fuente: Manual de curvas CALENER. [25]

$$\eta = \eta_{\text{nominal}} \cdot (0.0002 + 0.8761 \cdot \text{fcp} + 0.2428 \cdot (\text{fcp} \cdot \text{fcp}) - 0.119 \cdot (\text{fcp} \cdot \text{fcp} \cdot \text{fcp}))$$

Siendo fcp:

$$\text{fcp} = \frac{P_{\text{term}_{\text{real}}}}{P_{\text{nom}_{\text{cala}}}}$$

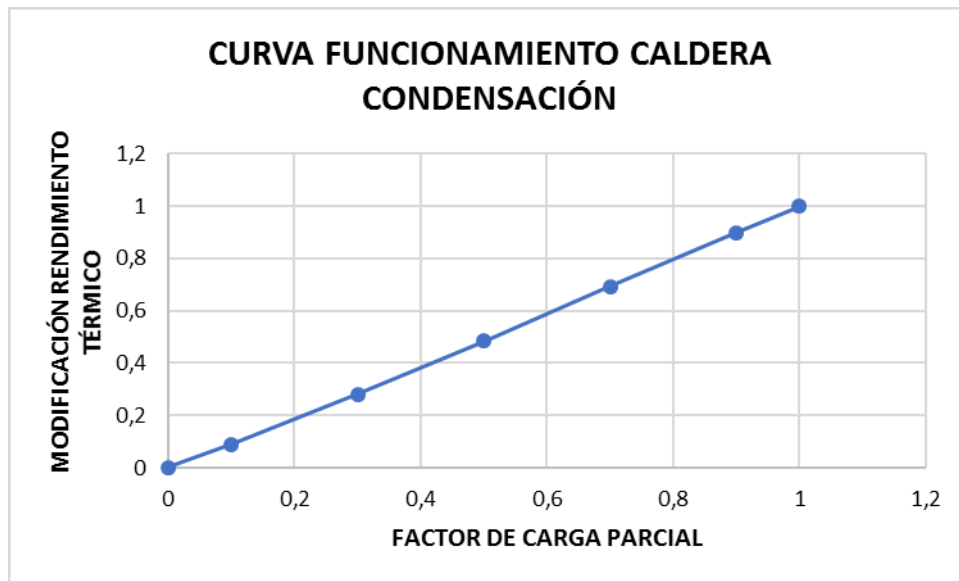


Figura 33. Curva modificadora del rendimiento. Fuente: Elaboración propia con datos de la asignatura de Ahorro en Demanda.

El consumo de la caldera se define como:

$$C_{caldera} [Wh] = \text{Caudal} \left[\frac{\text{kg}}{\text{h}} \right] \cdot 4190 \left[\frac{\text{J}}{\text{kgK}} \right] \cdot \left(\frac{\Delta T_{\text{real}}}{3600} \right) [K]$$

El objetivo del tipo de la caldera es mantener los tanques en el rango de temperaturas que se ha mencionado. Se contará con un controlador encargado de darle la señal a la bomba de la caldera en el momento en que tenga que empezar a funcionar o dejar de hacerlo [26].

La potencia y el rendimiento nominales serán variables para optimizar en este equipo. Sin embargo, para empezar a probar a simular la instalación se ha tomado como base una potencia de 40000W aproximada a la de la caldera que había anteriormente y un rendimiento de 98%.

El caudal fijo que tendrá el agua calentada por la caldera se calculará en función del volumen del tanque de calefacción. Estos están relacionados de tal forma que el volumen del tanque es igual al caudal que pasa por el mismo en un tiempo de 10 minutos. Dicho caudal se dividirá en dos caudales, pudiendo ir a radiadores (calefacción) o a duchas (ACS) según la demanda en cada uno de estos puntos. Al estar dimensionado este caudal en función solo del volumen de calefacción puede dar lugar a algunas anomalías en la parte de ACS que se comentan más adelante. Para evitarlas, habría que hacer un estudio más en detalle del dimensionamiento de los caudales.

Tanques

Los tanques son types originales del propio TRNSYS, pero cuyo volumen y altura habrá que dimensionar. Puesto que el volumen es una variable para optimizar se adjudicará a cada tanque un volumen de partida, capaz de cubrir la demanda original del edificio. Los tanques tendrán agua que se almacenará entre los 62 y los 67°C, por lo que estos mandarán una señal de temperatura al controlador que hará funcionar o no la caldera. El tanque del panel tendrá una limitación superior, ya que intentará aprovechar toda la radiación posible. El type utilizado es el 4: Stratified Fluid Storage Tank y está formado por N volúmenes totalmente mezclados. Con N igual a 1 no habría estratificación en el tanque. Dispone de dos calentadores auxiliares internos que son opcionales. Es un modelo robusto que proporciona buena precisión a la vez que mantiene una complejidad razonable de los parámetros. Es el modelo más utilizado de tanque de la biblioteca estándar [26].

La altura de cada tanque se calculará a partir de cada volumen, una vez esté determinado:

$$h_{\text{tanque}} [m] = 1.929 * e^{\left(\frac{1}{3} \ln v_{\text{tanque}} \right)}$$

Estos depósitos de agua serán los encargados de conectar los equipos generadores con los equipos distribuidores.

- Tanque Solar: Es aquel en el que se almacena el agua que se calienta a partir de los paneles solares y va destinada a cubrir la demanda de ACS.
- Tanque ACS: Es aquel en el que se almacena el agua que va destinada a ACS. Puede haber sido calentada por el panel o por la caldera.
- Tanque calefacción: Es el encargado de conectar la caldera con los radiadores.

Radiadores AC

A los radiadores llegará un caudal de agua del tanque de calefacción, la cual ha sido calentada anteriormente por la caldera. Los radiadores tampoco tendrán un type prediseñado. Por ello, al igual que en la caldera, se usará una calculadora en la que se definirán estos equipos. Los radiadores se definirán a través de la temperatura de salida de estos. Esta temperatura dependerá de la demanda del edificio en cada momento:

$$T_{\text{salida}_{\text{rad}}} [\text{K}] = T_{\text{entrada}_{\text{rad}}} [\text{K}] - \text{caudal} \left[\frac{\text{kg}}{\text{h}} \right] \cdot \left(\frac{D_{\text{calef}} [\text{kWh}]}{\max(\text{Caudal}_{\text{IN}}) \cdot \left(\frac{4.18 \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kgK}} \right]}{3.6} \right)} \right)$$

Una vez pase el agua por los radiadores retornará al mismo tanque, para así repetirse el proceso.

Captador plano

Las placas solares térmicas serán las principales responsables de cubrir la demanda de ACS. Generarán agua caliente en todo momento en el que les llegue radiación. Para el panel solar sí habrá un type prediseñado con el funcionamiento del mismo colector integrado. Será el type 73, que se basa en un componente que modela el rendimiento térmico de un colector teórico de placa plana. El conjunto total de colectores puede consistir en colectores conectados en serie y en paralelo. El rendimiento térmico de la matriz total de colectores está determinado por el número de módulos en serie y las características de cada módulo. Este modelo prevé los análisis teóricos de una placa plana [26]. En este caso se estudiará el panel como uno único y se aumentarán los metros cuadrados en función de la superficie de la cubierta del edificio. La energía ganada por los paneles se definirá de la siguiente manera:

$$Qu[\text{kWh}] = m \cdot \text{dot} \left[\frac{\text{kg}}{\text{h}} \right] \cdot C_p \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kgK}} \right] \cdot (T_{\text{out}} - T_{\text{in}}) [\text{K}]$$

Solo harán falta algunos detalles de este proyecto para que el type se adecue a la instalación que se plantea. Los datos horarios que se han aportado para los paneles son:

- Radiación incidente.
- Radiación horizontal directa.
- Radiación horizontal difusa.

Por último, otro detalle importante del panel es la inclinación de los captadores, que será de 33° siendo la óptima tras haber sido consultada en PVGIS.

El área del panel será uno de los parámetros a optimizar y de este valor dependerá el caudal que pase por el mismo:

$$\text{Caudal}_{\text{panel}} = 50 * \text{area}_{\text{capt}}$$

Actualmente el código técnico (DB-HE) exige una contribución solar en zonas climáticas C4 de 50% para demandas inferiores a 5000 litros/día.

Sistema ACS

En el centro hay duchas y aseos a los que corresponden la demanda de ACS. En TRNSYS esta demanda también se presentará como una calculadora, pero sin ecuaciones puesto que el agua usada ya no volverá a ningún tanque. El agua demandada de ACS podrá proceder del tanque de la caldera, del panel o de ambos a la vez.

Los captadores planos tienen un circuito de agua que irá a un depósito (depósito solar). A este depósito también llegará agua de red. El agua de red se calentará e irá al depósito de ACS del cual se abastece la demanda. El agua usada para ACS procede de la red, por lo que entra a la instalación a la temperatura que esta marque. Se usará una mezcladora y una válvula atemperadora encargada de que el agua del grifo salga a 60°C, que es la temperatura de salida del agua según la normativa.

Bombas

Como la instalación está completamente formada por circuitos de agua, las bombas tendrán un papel importante, pues impulsarán el agua en distintos puntos de la instalación. Las bombas funcionan a caudal constante, y estas tendrán su type correspondiente [26]. La instalación contará con un total de tres bombas, dos que impulsen el agua de los equipos generadores y una última que llevará el agua a los radiadores en función de la demanda.

La bomba que acompaña a la caldera se encarga de activar la caldera cuando la temperatura del tanque de calefacción está por debajo de 62°C o desactivarla cuando la temperatura está por encima de 67°C.

La bomba que lleva el agua a los radiadores se activará solamente cuando haya demanda de calefacción.

La bomba que lleva el agua de los paneles se activará cuando haya radiación y los paneles sean capaces de generar agua caliente.

Mixer/Diverter

El primer divisor se encuentra tras la bomba del circuito de calefacción. Este se encargará de dividir el flujo, para el tanque de calefacción y para el tanque de ACS, según si se demanda en uno, en otro o en ambos.

Igual que el primer divisor, debe haber un mezclador que coja el agua de retorno de los dos tanques y los unifique para devolverlos a la caldera en un único flujo que volverá a calentarse.

Para la parte de ACS, habrá un mezclador que unifique el agua de red junto con el agua del tanque de ACS. Además, el agua que salga por el grifo estará controlada para que se distribuya a la temperatura que indica la normativa.

El funcionamiento que sigue esta válvula se basa en dos alternativas:

-El agua de red llega a la mezcladora. Esta mezcladora, que está conectada al tanque de ACS, recibe la señal de temperatura de este. Si este tanque se encuentra a suficiente temperatura como para que la mezcla con el agua de red sea superior a 60°C (temperatura a la que debe salir el agua según la normativa), entonces el agua de red irá directamente a una mezcladora que mezclará esta agua junto con la del tanque de ACS y la mandará a los grifos del centro [27].

-Sin embargo, el agua del tanque de ACS puede no estar lo suficientemente caliente para que la mezcla alcance los 60°C, entonces el agua de red será enviada al tanque del panel (solar). Pasar el agua por este tanque servirá de precalentamiento para que esta agua posteriormente se envíe al tanque de ACS. Finalmente, del tanque de ACS el agua irá a la mezcladora y junto con el agua de red se mandará a los grifos [27].

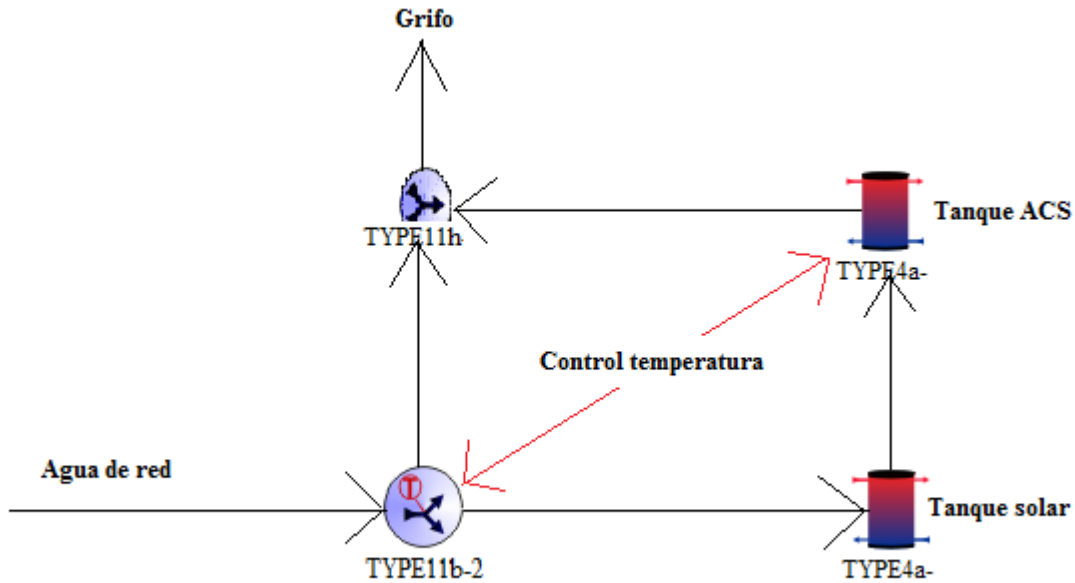


Figura 34. Distribución ACS. Fuente: *Elaboración propia con datos de TRNSYS.*

Tras completar el modelo y conectar todos los types correctamente entre sí, se ha simulado el proyecto para comprobar que tuviese un correcto funcionamiento. Hay que resaltar que hay una serie de variables que no se han fijado porque se decidirán tras optimizar la instalación. Las variables para optimizar son el campo de colectores (área), el volumen de acumulación solar, el volumen de acumulación de alta temperatura (calefacción), el tanque de ACS y la potencia y rendimiento de la caldera de condensación.

8.3.3.3. Diagrama de flujo

Se muestra a continuación un diagrama de flujos del funcionamiento de la instalación para entenderla mejor. Se destaca que la caldera se activa dependiendo de si los tanques están en las temperaturas que corresponde, y que el panel generará con la condición de que haya radiación.

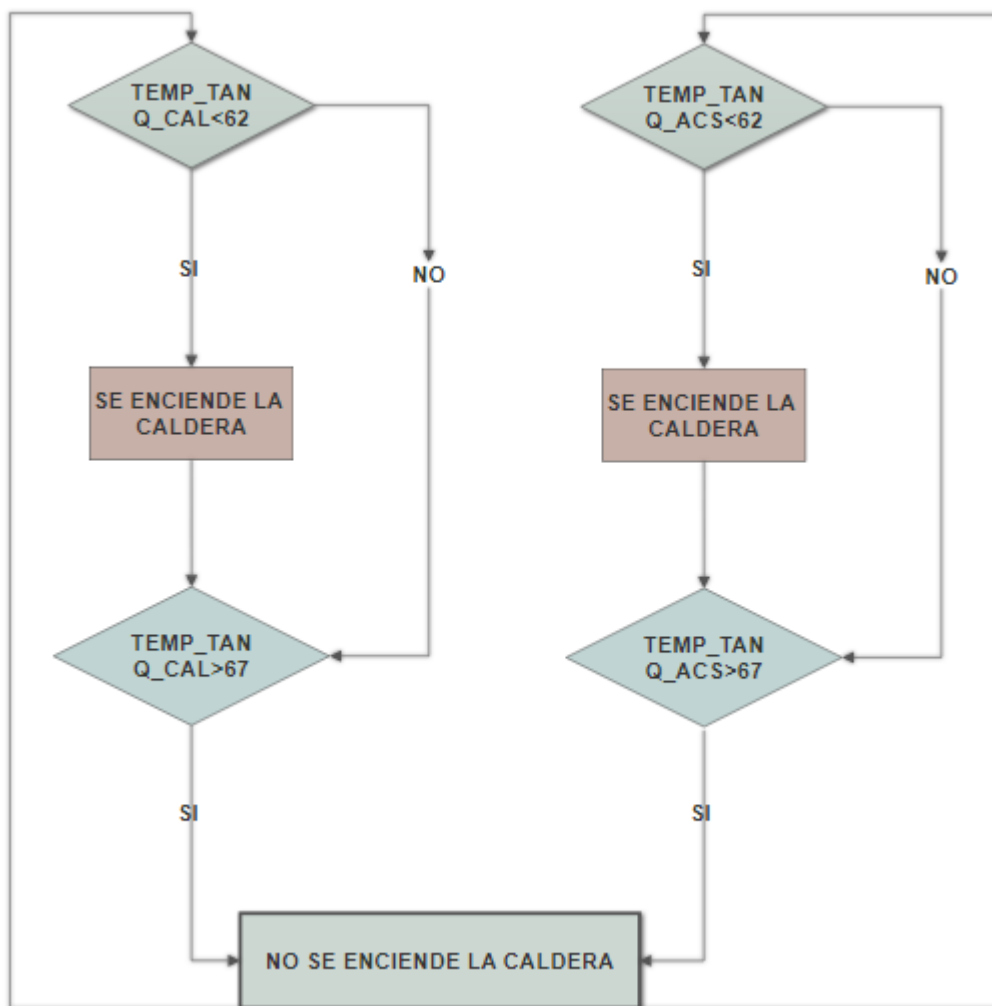


Figura 35. Diagrama del funcionamiento de la caldera. Fuente: Elaboración propia.

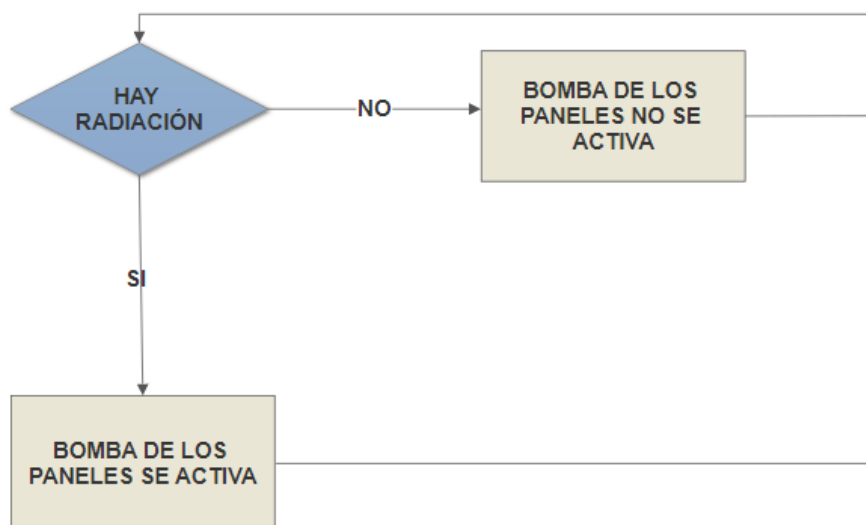


Figura 36. Diagrama del funcionamiento de los paneles. Fuente: Elaboración propia.

8.3.4. Balances de la instalación

Antes de optimizar el dimensionamiento de los equipos, se ha procedido a hacer una comprobación de que la instalación está bien modelada. Para ello, se ha hecho una validación a través de los balances de energía de la instalación. La comprobación del primer y segundo principio de la termodinámica serán la clave para poder demostrar que los resultados que da TRNSYS son fiables.

Para realizar los balances de la instalación se ha hecho la simulación de la planta con un “simulation time step” de 0.16, es decir se obtendrán valores cada 10 minutos, siendo un total de 52564 valores al año por cada variable.

Los datos que se han extraído de la simulación son:

- La potencia de la caldera [W].
- La energía captada por el panel [kWh].
- Las pérdidas de los tres tanques [kWh].
- La demanda de calefacción y la de ACS [kWh].

Los datos obtenidos se habrán convertido todos a las mismas unidades (kWh) y se agruparán mensualmente para facilitar el balance.

Finalmente tendremos que comparar lo que han generado la caldera y los colectores con lo que se demanda de calefacción y ACS, teniendo en cuenta las pérdidas de los tanques. Se buscará un error (%) lo menor posible.

$$\text{Generación equipos}[kWh] = \text{Demandas}[kWh] + \text{Pérdidas tanques}[kWh]$$

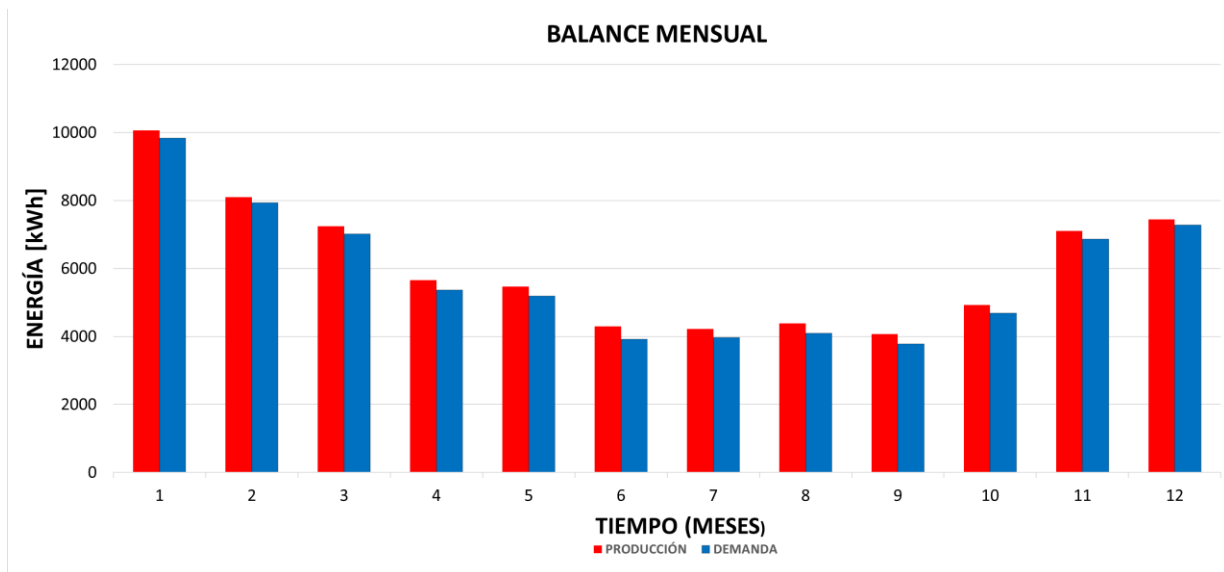


Figura 37. Balance mensual. Fuente: Elaboración propia

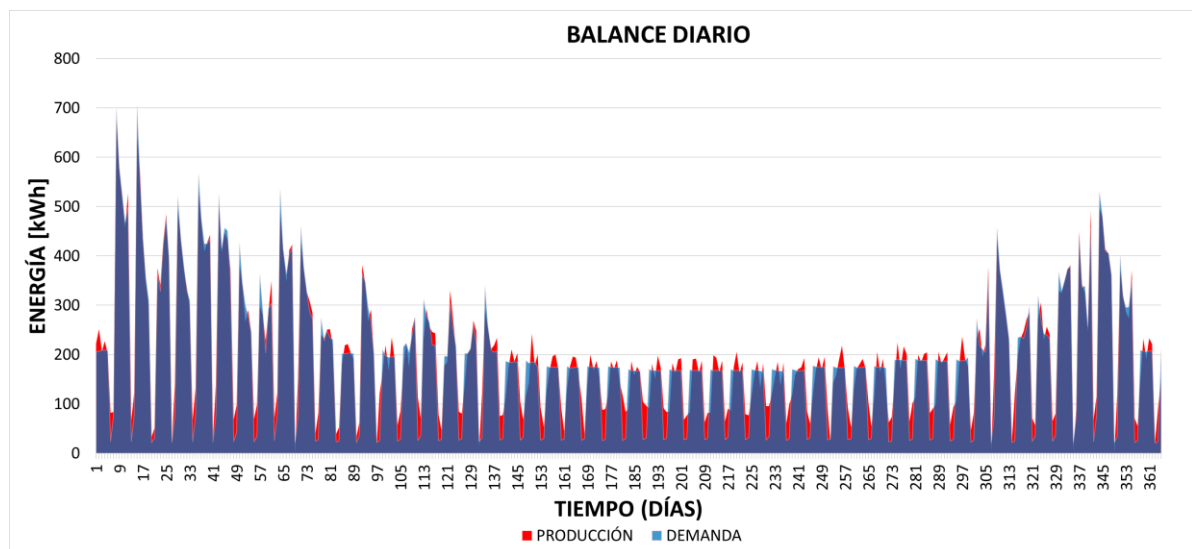


Figura 38. Balance diario. Fuente: Elaboración propia.

Por otro lado, también se han calculado los errores diarios y anuales para ver la relación entre la producción y la demanda en el edificio. Se ha obtenido un error de 4.19% anual, se puede confirmar con este valor el correcto funcionamiento de la instalación.

8.3.4.1. Estudio del consumo de la caldera

Una vez el modelo ha cumplido los balances, se comenzó a hacer pruebas y análisis de funcionamiento para ir perfeccionando el modelo hasta tenerlo a punto para las simulaciones definitivas de dimensionamiento.

De partida, para estudiar en profundidad el modelo de la instalación y antes de plantearse el dimensionamiento, se decide probar a hacer varios casos de simulación para así hacer una comparación de los distintos resultados. En este apartado se estudiará como varía el consumo de la caldera en función de varias modificaciones. Se proponen las siguientes cuatro situaciones:

- Caso 1: Instalación existente, demanda original.
- Caso 2: Instalación existente, demanda reducida.
- Caso 3: Instalación propuesta, demanda original.
- Caso 4: Instalación propuesta, demanda reducida.

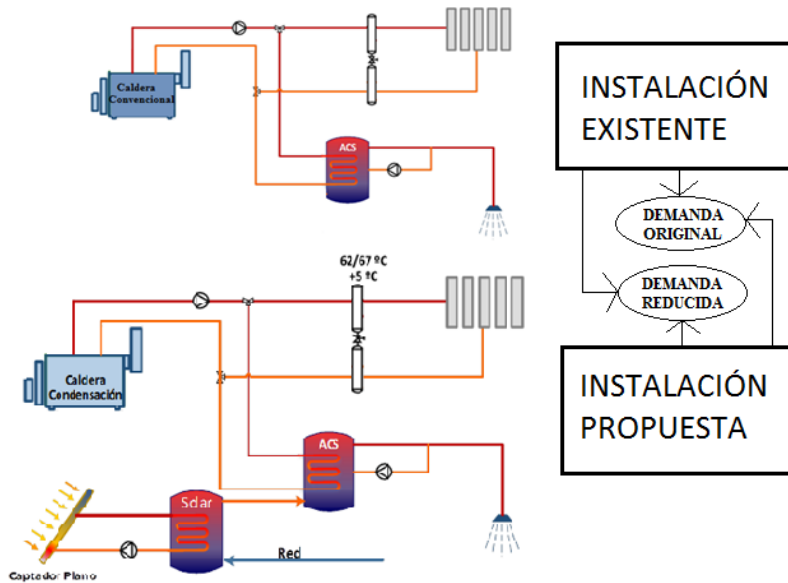


Figura 39. Casos propuestos. Fuente: Elaboración propia.

Para simular los cuatro casos, se ha tenido que ir editando el modelo. Se parte de la instalación propuesta que ya cumplía los balances de energía y a partir de esta se aplicarán las distintas modificaciones necesarias para generar los distintos casos. Con la instalación propuesta, simplemente cambiando los archivos de demanda se generan los casos 3 y 4.

En segundo lugar, para conseguir simular la instalación original, se han hecho las siguientes modificaciones:

- El área de panel debe ser 0 m² ya que en la instalación original no había colectores.
- La potencia de la caldera es de 45kW, y con un rendimiento del 90%, tal y como tenía la caldera original convencional.

Tras hacer estas modificaciones y para generar los casos 1 y 2, se añadieron los archivos de demanda en cada caso. Se obtienen así por lo tanto los siguientes resultados gráficos en los que se pueden analizar cómo afecta el cambio de instalación y la reducción de demanda al consumo de la caldera. Los casos 1 y 2 serán los que cuentan con la instalación antigua y, tal y como se muestra gráficamente, serán los casos más desfavorables frente al caso 4 que además de tener la instalación nueva, cuenta con la demanda reducida.

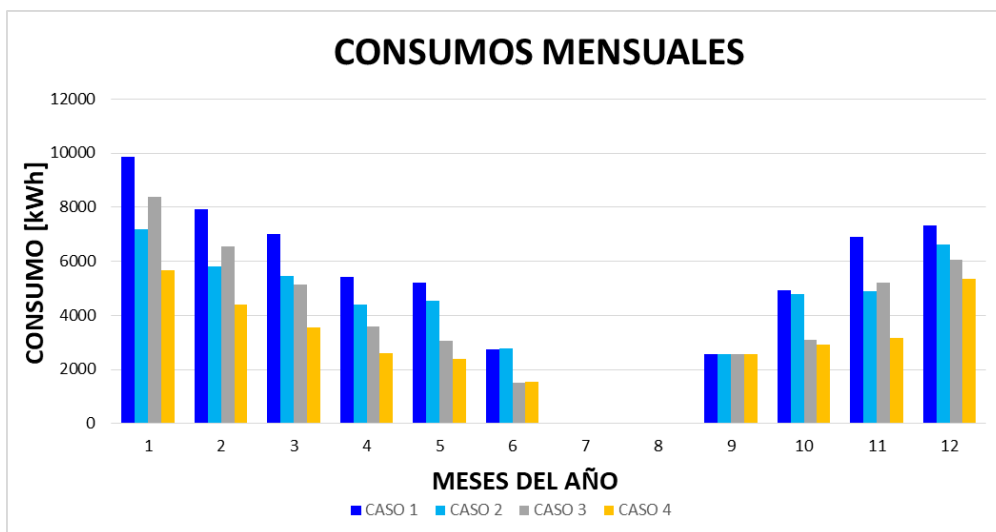


Figura 40. Consumos mensuales para cada caso. Fuente: Elaboración propia.

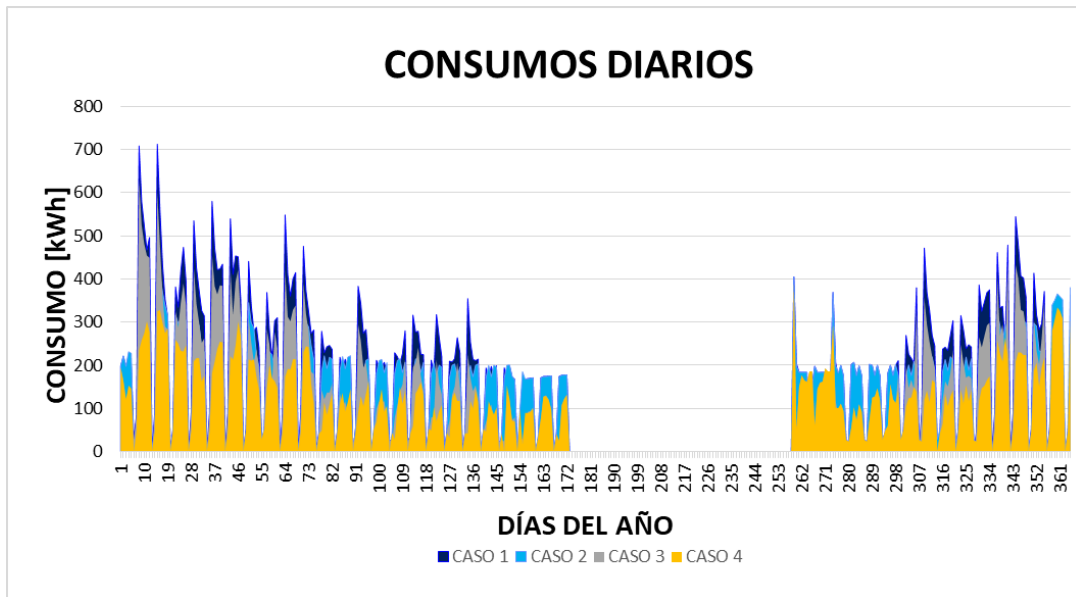


Figura 41. Consumos diarios para cada caso. Fuente: Elaboración propia.

8.3.4.2. Estudio de área de colectores.

Debido a que inicialmente tanto la caldera como el panel solar conjuntamente cubren la demanda de ACS, se ha decidido hacer la comprobación de que, al aumentar el área de panel, se reduce el consumo de la caldera. Para el siguiente análisis se han considerado las siguientes áreas de panel: 50, 100, 250 y 500 m², y se ha ido verificando como el consumo de la caldera va reduciéndose. Se aprecia que en algunos meses el consumo de la caldera se estabiliza, manteniéndose debido a que, en ciertos días del año, debido a la escasa radiación, la caldera tendrá que aportar un mínimo.

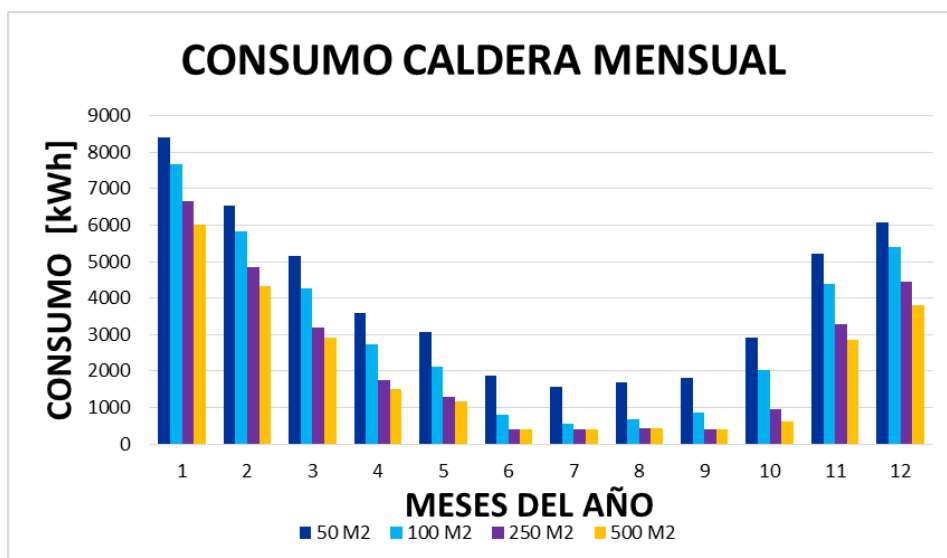


Figura 42. Consumo caldera mensual, variando el área de panel. Fuente: Elaboración propia.

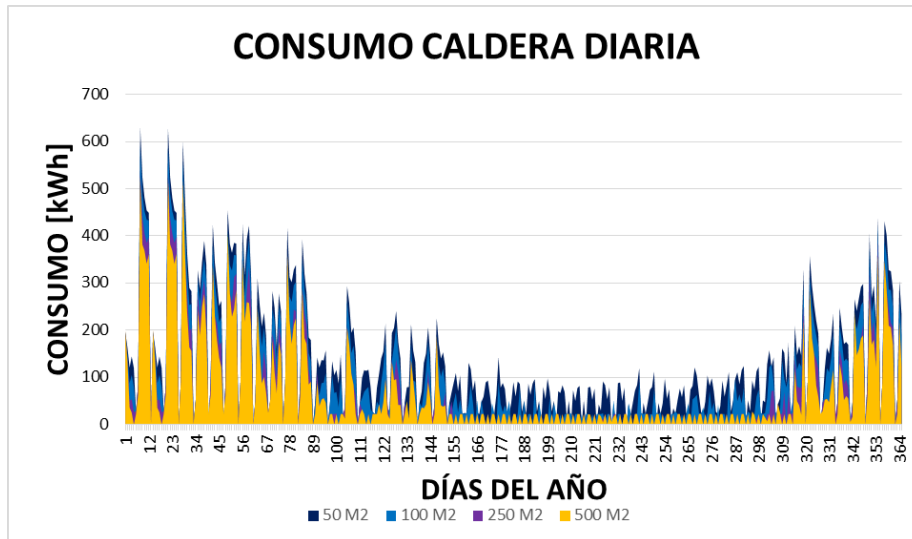


Figura 43. Consumo caldera diario, variando el área de panel. Fuente: Elaboración propia.

En este proyecto, se ha decidido hacer una combinación de dos equipos generadores, siendo uno apoyo del otro a la hora de cubrirse la demanda de ACS. Aun así, se ha propuesto la siguiente comprobación: se dimensionará la instalación de tal forma que solo el panel se hará cargo de cubrir la demanda de ACS. Es por ello, que el análisis se basará en saber cuántos metros cuadrados de panel son necesarios para prescindir por completo de la caldera a la hora de cubrir la demanda de ACS. Para ello se han hecho algunas modificaciones en el modelo:

- Se ha considerado la demanda de calefacción totalmente nula y se le ha dado la señal a la caldera de solo atender el tanque de ACS.
- Se ha añadido un controlador en el tanque del panel solar que limitase las temperaturas, ya que sino en algunas horas del año al incrementar el área del panel, las temperaturas se disparaban.
- Se ha ido incrementando poco a poco el área de panel para ver como afectaba esto al funcionamiento de la caldera.

Finalmente se ha alcanzado un área de panel, 2000 m², a partir del cual la caldera tendría un funcionamiento casi nulo, y es que, aunque se siga incrementando el área del panel, no se consigue reducir más el funcionamiento de la caldera. Esto se debe a que en el periodo de invierno hay muchos días que apenas hay radiación y, por lo tanto, por muchos metros que haya de panel, este no va a poder cubrir toda la demanda. Por lo que para asegurar que se cubren las demandas del edificio, es una buena combinación tener la caldera a la vez que el panel solar. Por otro lado, se debe tener superficie suficiente para implantar una instalación de dicha extensión, y es algo con lo que nuestro proyecto no cuenta.

8.4. Tanques de acumulación en TRNSYS

En la realización de este proyecto se han llevado a cabo diversos estudios tanto de la envuelta del edificio y sus posibles mejoras, como de la instalación de climatización existente y la propuesta mejorada. El diseño de la nueva instalación se hizo en TRNSYS como ya se ha expuesto en anteriormente. Analizando el funcionamiento del programa y del proyecto de instalación se observaron algunas anomalías que han llevado a un estudio en detalle del funcionamiento de los tanques. Este análisis de los tanques y como pueden afectar las pérdidas de estos a los resultados del funcionamiento de la instalación se han convertido en un punto interesante que se va a tratar en este Anexo.

El type de tanque que se añadió al modelo es el 14, sin elementos auxiliares de calentamiento. Deben indicarse una serie de parámetros, siendo los más importantes:

-Coeficiente de pérdidas por unidad de área: 3 [kJ/hm²K]

-Volumen de acumulación, que será variado en las distintas simulaciones que se llevaran a cabo: “Variable a dimensionar” [m³]

-Altura del tanque, que se definirá en función del volumen de este: $h_{\text{tanque}} [m] = 1.929 \cdot e^{\left(\frac{1}{3} \ln V_{\text{tanque}}\right)}$

-Densidad del fluido que va a almacenar: 1000 [kg/m³] [26].



Figura 44. Type tanque.

El rendimiento térmico de los tanques de almacenamiento de energía en este proyecto, sujetos a estratificación térmica, puede modelarse suponiendo que el tanque consiste en N (N <= 15) segmentos de volumen igual totalmente mezclados. El grado de la estratificación está determinada por el valor de N. Si N es igual a 1, el tanque de almacenamiento se modela como un tanque completamente mezclado y no es posible ningún efecto de estratificación. Este último caso (N=1) es el que se ha usado en el proyecto [26].

$$Q = h_o \cdot A_o \cdot (T_1 - T_2)$$

Según la fórmula anterior así es como se definen las pérdidas del tanque, siendo:

h_o =Coeficiente combinado de transferencia de calor en el tubo

A_o =Área exterior cuerpo del tanque

T_1 =Temperatura superficie exterior del tanque

T_2 =Temperatura del aire

Por medio de este modelo se determinan las pérdidas de un tanque de almacenamiento. Por otro lado, hay que mencionar que no se sabe con total exactitud cómo funciona internamente el type de TRNSYS. Sin embargo, ya vemos en la ecuación que las pérdidas dependen del área exterior del cuerpo del tanque [28].

En un pequeño proceso de documentación, se descubre que el orden de pérdidas para un tanque de unos 300 litros es de 1 kWh/día lo que se convierte en 30 kWh/mes y 365 kWh/año. Si esto lo aplicamos al tamaño de los tanques con los que se trabajan en este proyecto se obtienen valores considerables que no pasan nada desapercibidos [28].

A medida que se ha ido desarrollando el proyecto se ha comprobado que conforme los tanques aumentaban de tamaño, sus pérdidas eran tan grandes que perjudicaban al consumo de los equipos generadores como es la caldera. De hecho, la realidad es que, a mayor volumen del tanque, menos consumo debe tener el equipo generador puesto que se almacena más cantidad y se conserva la temperatura más tiempo. Sin embargo, debido a las pérdidas de los tanques lo que se consigue es que para cubrir estas la caldera tiene que trabajar mucho más, aumentando así considerablemente su consumo.

Es por ello, que se decidió despreciar estas pérdidas para llevar a cabo un buen estudio de la instalación y conseguir obtener combinaciones óptimas para el centro. En este estudio se podrán ver gráficas de la instalación tanto considerando pérdidas de los tanques como no, se realizarán comparaciones y distintos comentarios al respecto.

En las siguientes gráficas (Figura 45, Figura 46, Figura 47 y Figura 48) se puede observar como varía el consumo de la caldera con la variación del volumen de los tanques. Se presentan ambos casos, el que tiene en cuenta las pérdidas y el que no las considera. En el caso en el que se tienen en cuenta las pérdidas se pueden ver como el aumento del volumen de los tanques hace el consumo se dispare de una forma nada parecida al funcionamiento real. Sin embargo, si se observan los casos en los que se desprecian las pérdidas del tanque, al aumentar el volumen disminuye el consumo y lo hace de un modo menos brusco al comentado anteriormente. Este comportamiento se asemeja mucho más a la realidad y es por ello que es el que se considerará válido.

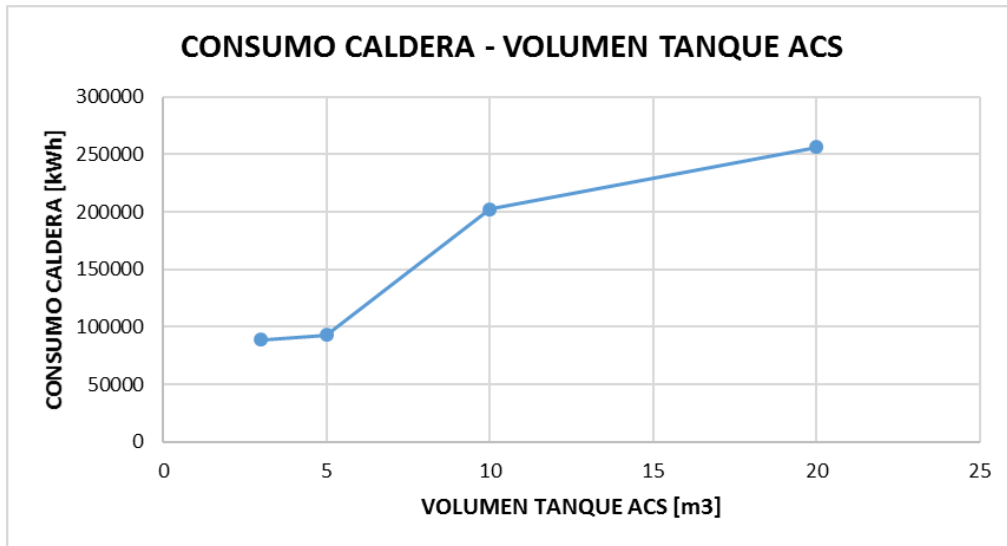


Figura 45. Consumo caldera VS volumen del tanque de ACS, considerando pérdidas. Fuente: Elaboración propia.

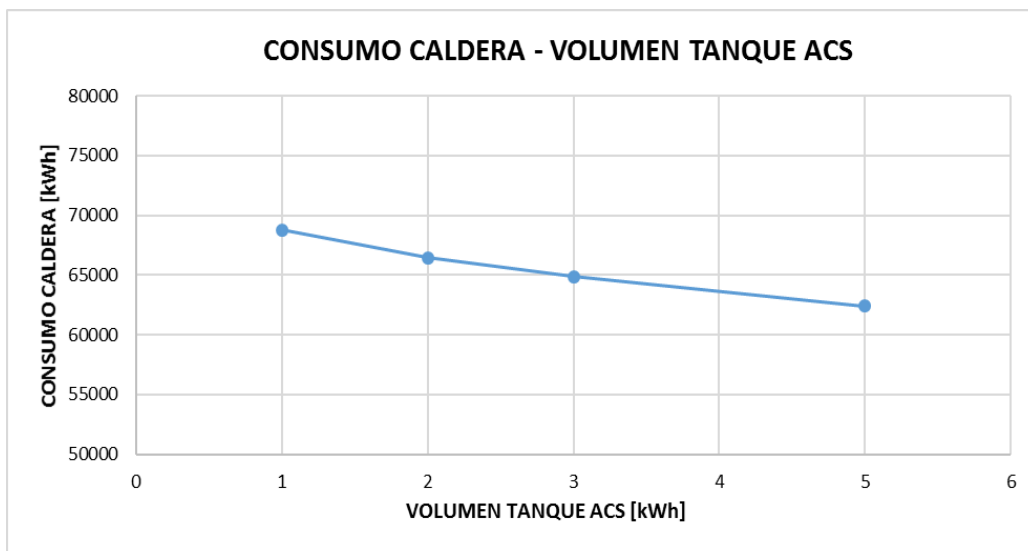


Figura 46. Consumo caldera VS volumen del tanque de ACS, sin considerar pérdidas. Fuente: Elaboración propia.

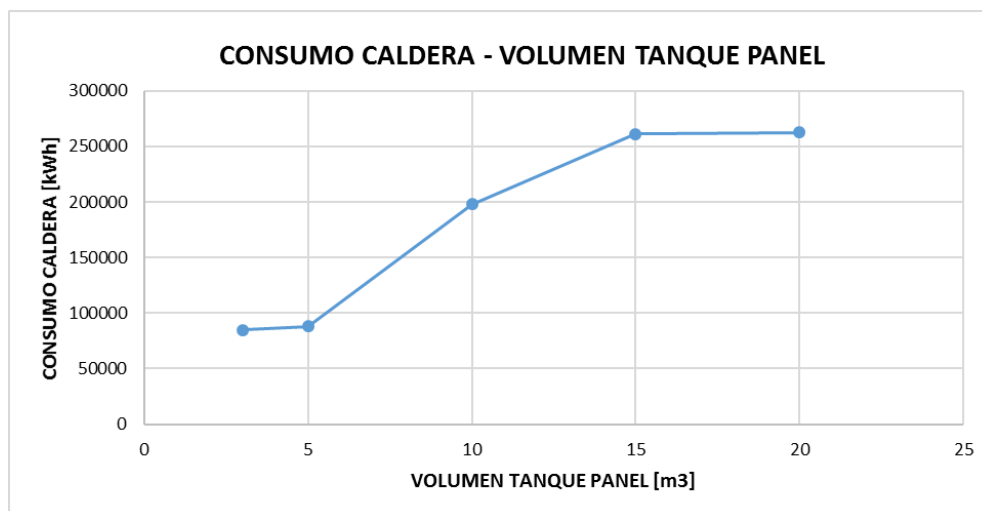


Figura 47. Consumo caldera VS volumen del tanque de los paneles, considerando pérdidas. Fuente: *Elaboración propia.*

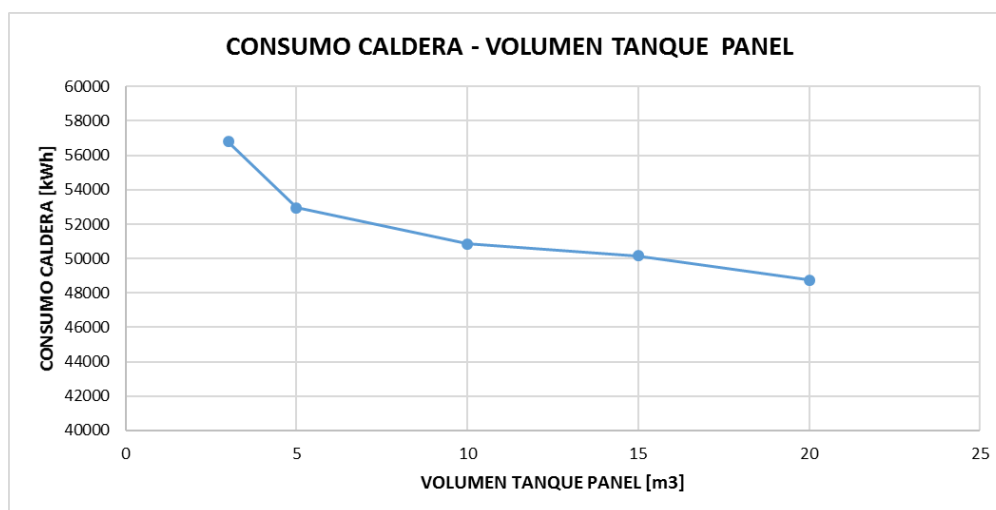


Figura 48. Consumo caldera VS volumen del tanque de los paneles, sin considerar pérdidas. Fuente: *Elaboración propia.*

8.5. Dimensionamiento de los nuevos equipos

8.5.1. Propuestas para la nueva instalación

Una vez que el modelo en TRNSYS funciona correctamente, se deben dimensionar los distintos equipos para conseguir que cada uno de ellos cumpla las diversas necesidades del centro. Debido a que TRNSYS ofrece una gran cantidad de posibilidades, ya que permite la variación de un gran número de parámetros y configuraciones, se ha optado por la realización de una macro en Excel programada en Visual Basic for Applications (VBA) que hace simulaciones realizando pasadas masivas en TRNSYS y obteniendo los resultados de todas estas. Ello se lleva a cabo a través de llamadas externas a TRNSYS, modificando del archivo del modelo los valores de las variables a optimizar. Se simularán una serie de combinaciones con los distintos valores a probar en cada una de las variables a dimensionar [27].

Como se hizo en las propuestas de mejora de reducción de demanda, cada combinación posible se estudiará tanto energética como económicamente para ver cuál de ellas es la óptima en el proyecto.

Se debe comentar también que las simulaciones definitivas tendrán una parada de funcionamiento en los meses de verano para que no se simulen esos días en los que el edificio no está en uso. De las 8760 horas que tiene en un año, las horas que englobaban las vacaciones de verano y que no tenían ningún tipo de demanda se englobaban en el rango [3624, 6552], y por lo tanto en esas horas los equipos dejarán de funcionar.

Entre las distintas variables a dimensionar se encuentra la potencia y el rendimiento de la caldera, el área de panel solar y los volúmenes de los distintos tanques de almacenamiento. Como se cuenta con dos equipos generadores se ha decidido dimensionar ambos por separado. Por ello se han llevado a cabo dos simulaciones.

La primera simulación busca dimensionar principalmente la potencia nominal [kW] de la caldera de condensación de la nueva instalación. A su vez y viéndose relacionado con esta, se buscará también optimizar los volúmenes de los tanques de calefacción y ACS [m³]. Los valores propuestos son los siguientes:

| Nombre de variable | Potencia nominal caldera [kW] | Rendimiento caldera [adim] | Volumen tanque calefacción [m ³] | Volumen tanque ACS [m ³] | Volumen tanque colector [m ³] | Área colector [m ²] (fijado) |
|--------------------|-------------------------------|----------------------------|--|--------------------------------------|---|--|
| Valores propuestos | 1 | 0.92 | 3 | 1 | 5 | 100 |
| | 10000 | 0.98 | 5 | 2 | 10 | - |
| | 20000 | 1 | 10 | 3 | - | |
| | 30000 | 1.1 | 20 | 5 | - | |
| | 40000 | 1.2 | - | - | - | |
| | 50000 | - | - | - | - | |

Tabla 23. Valores para la primera simulación. Fuente: *Elaboración propia.*

La segunda simulación será para dimensionar el área de colectores [m²] que se colocarán junto con el volumen del tanque [m³] que se calentará con este equipo. Los valores propuestos son:

| Nombre de variable | Área colector [m ²] | Volumen tanque ACS [m ³] | Volumen tanque 56colector [m ³] | Potencia nominal caldera [Kw] (fijado) | Rendimiento caldera [adimen] (fijado) | Volumen tanque calefacción [m ³] (fijado) |
|--------------------|---------------------------------|--------------------------------------|---|--|---------------------------------------|---|
| Valores propuestos | 1 | 3 | 3 | 40000 | 0.98 | 3 |
| | 100 | 5 | 5 | - | - | - |
| | 200 | 10 | 15 | | | |
| | 500 | 15 | 20 | | | |
| | - | 20 | 30 | | | |

Tabla 24. Valores para la segunda simulación. Fuente: *Elaboración propia.*

Se generan así un total de 1060 combinaciones a estudiar en detalle. De estas combinaciones 960 pertenecerán a la primera simulación y 100 a la segunda.

8.5.2. Estudio de las combinaciones simuladas

La realización de las dos simulaciones da lugar a las mencionadas combinaciones: las propuestas para la nueva instalación. Antes de empezar a hacer estudios económicos o entrar más en detalle en la relación entre combinaciones, se va a hacer un análisis de los resultados obtenidos. Conocer como varía el consumo de los equipos al modificar distintas variables, cerciora el correcto funcionamiento del modelo. En las siguientes figuras se pueden analizar los cambios del consumo de la caldera, modificando las variables a dimensionar. Cada vez que se ha ido modificando una variable, el resto de estas se han fijado en un valor determinado de los propuestos.

$$Consumo = \frac{Potencia_{T\acute{e}rmica}}{\eta}$$

1. POTENCIA NOMINAL: En la Figura 49 se puede ver como al aumentar la potencia nominal de la caldera, ésta consume mucho más, viéndose un aumento prácticamente lineal. Esto se debe al factor de carga parcial. Si se recuerda su definición:

$$fcp = \frac{P_{term_{real}}}{P_{nom_{cald}}}$$

Como se muestra en la definición, para una misma demanda ($P_{term_{real}}$), a mayor potencia nominal menor será el factor de carga parcial, el cual causará un aumento del consumo de la caldera.

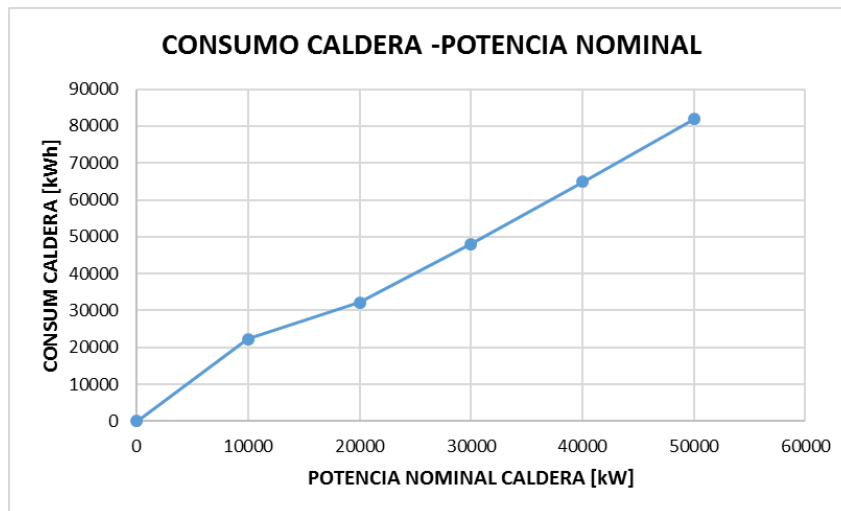


Figura 49. Evolución consumo caldera conforme aumenta la potencia nominal. Fuente: *Elaboración propia con datos de TRNSYS.*

2. RENDIMIENTO CALDERA: En la Figura 50 se puede comprobar que, a mayor rendimiento de la caldera, menor será el consumo de esta, pues una mayor eficiencia del equipo llevará a que este necesite consumir menos, para una misma potencia térmica.

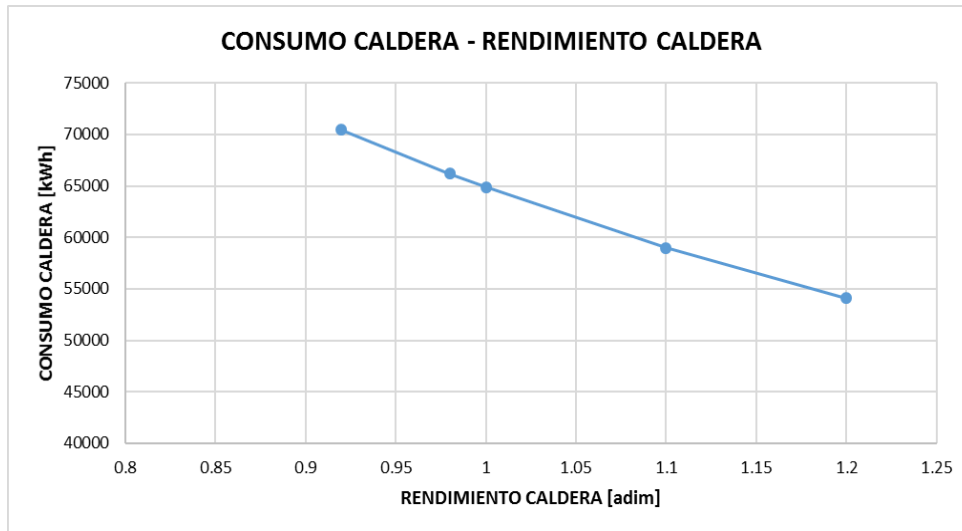


Figura 50. Evolución consumo caldera al aumentar el rendimiento. Fuente: *Elaboración propia con datos de TRNSYS.*

3. **VOLUMEN TANQUE ACS:** La variación del volumen del tanque de ACS también afectará al consumo de la caldera, puesto que los tanques de mayor tamaño serán capaces de almacenar más calor y más tiempo y por lo tanto esto reducirá el consumo de los equipos generadores.

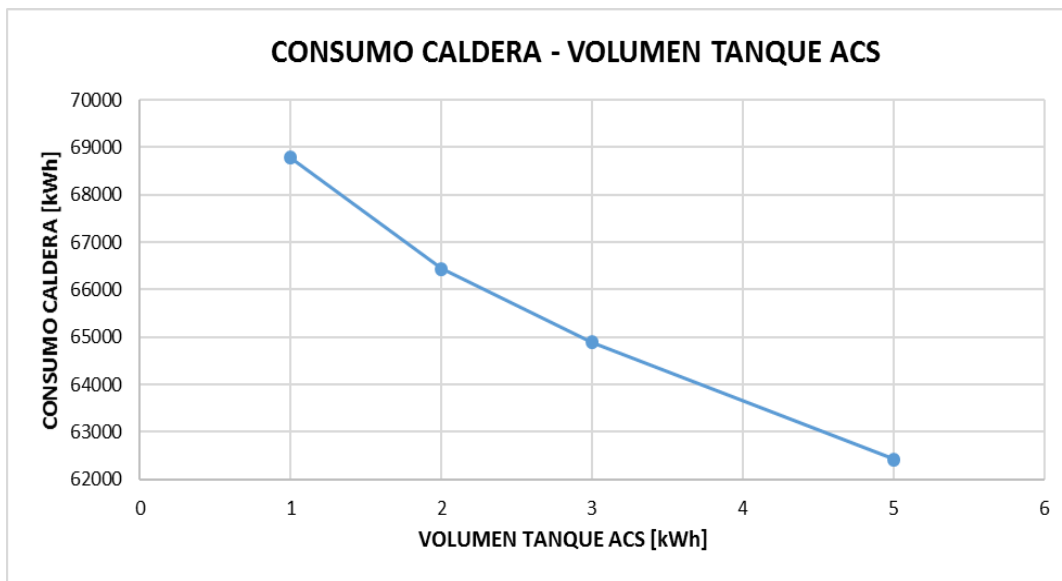


Figura 51. Evolución consumo caldera al aumentar el volumen del tanque de ACS (sin pérdidas). Fuente: *Elaboración propia con datos de TRNSYS.*

4. **VOLUMEN TANQUE PANEL:** Al volumen del tanque del panel le ocurre lo mismo que al de ACS: a mayor capacidad, menor será el consumo de la caldera. Además, a ello se añade que para altos volúmenes del tanque puede que el área de paneles no sea lo suficientemente grande para calentar el agua, y por ello se apoye mucho más en la caldera.

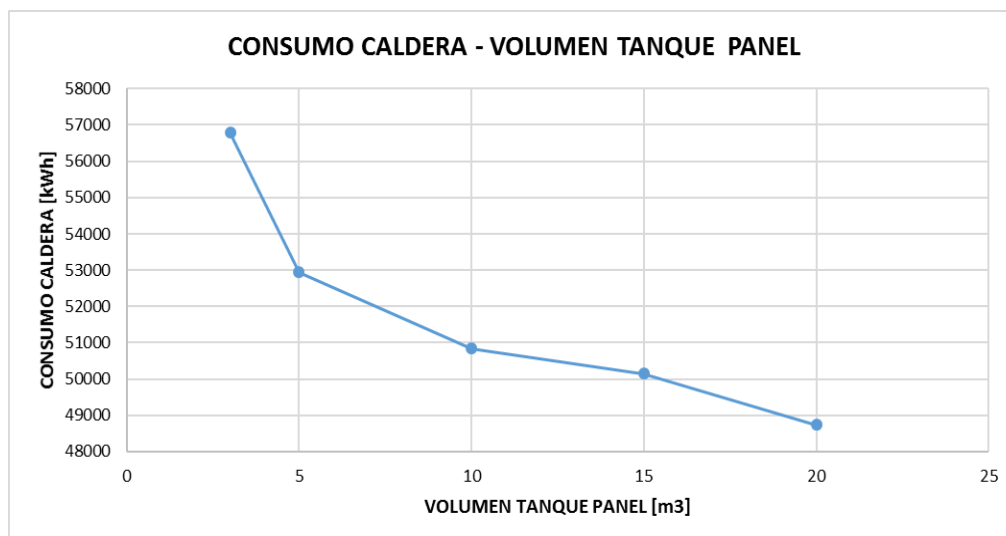


Figura 52. Evolución consumo caldera al aumentar el volumen del tanque del panel (sin pérdidas). Fuente: *Elaboración propia con datos de TRNSYS.*

5. **ÁREA PANEL:** El área de colectores también afectará al consumo de caldera, debido a que el aumento de este parámetro favorecerá su producción y por lo tanto se reducirá el consumo de la caldera.

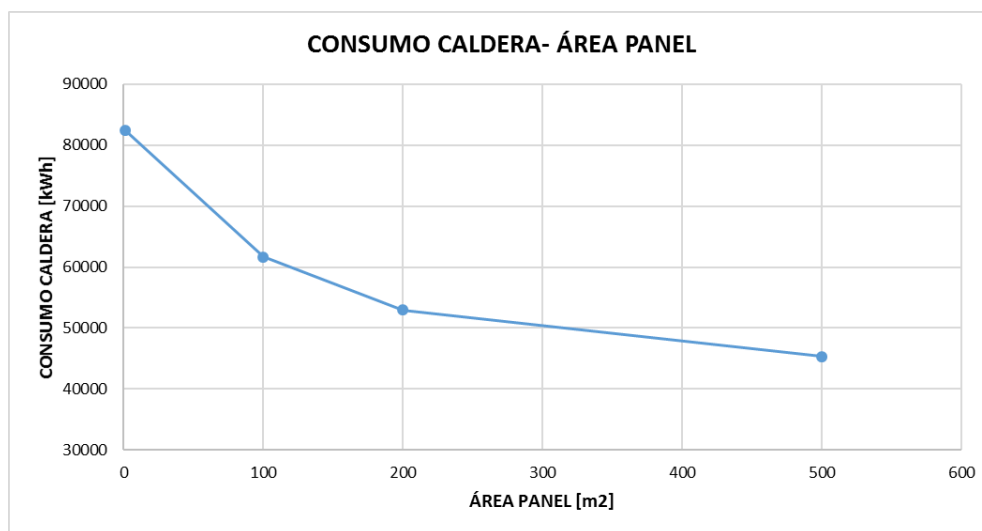


Figura 53. Evolución consumo caldera al aumentar el área del panel. Fuente: *Elaboración propia con datos de TRNSYS.*

Se han incluido también la Figura 54 y Figura 55, en las cuales se puede apreciar cómo cambia el porcentaje de ACS cubierto por el panel, conforme aumenta el área de panel y también considerando el aumento del volumen del tanque del panel. Se puede apreciar en ambas gráficas como el aumento de ambos parámetros, área y volumen, conllevan un aumento del porcentaje de ACS cubierto, lo cual tiene lógica.

Se destaca que con 500m² se puede llegar a cubrir hasta casi el 70% del ACS del centro. Según el DB-HE, hay un mínimo de demanda de ACS que debe cubrirse a partir de una fuente renovable. Este porcentaje se conoce como la contribución solar mínima anual y dependerá de la demanda de ACS del edificio junto con la zona climática en la que este se encuentre. Con respecto a este proyecto, al tener una demanda de ACS de 3150 litros al día y situarse el edificio en zona climática C4, le corresponde un porcentaje mínimo del 50% (según normativa en vigor actualmente).

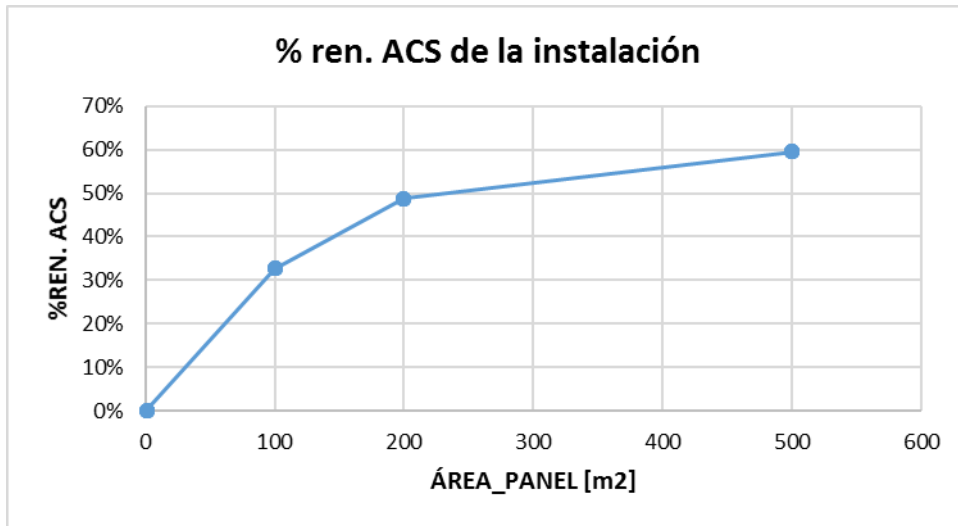


Figura 54. Porcentaje de ACS que cubren los paneles, con volumen fijado de 5 m³. Fuente: *Elaboración propia con datos de TRNSYS.*

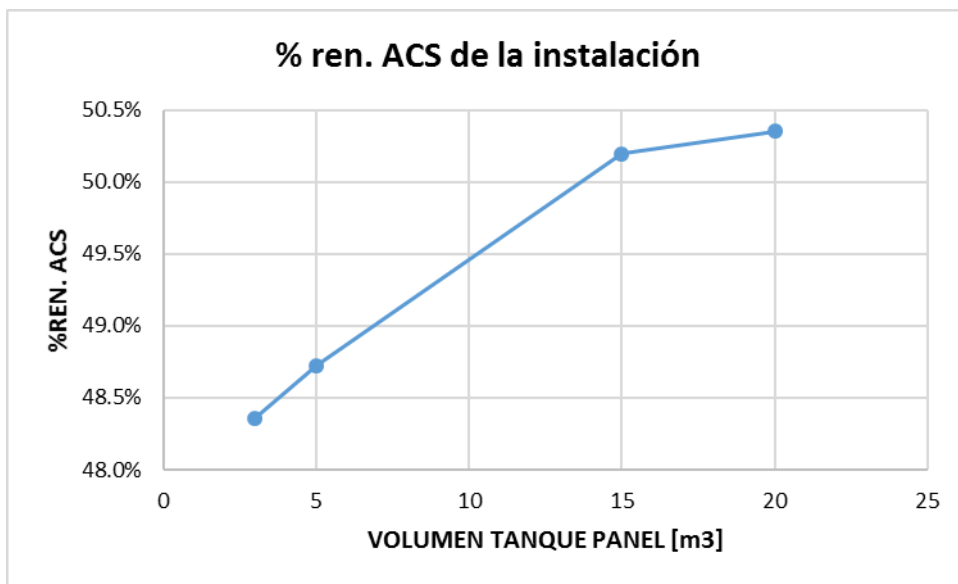


Figura 55. Porcentaje de ACS que cubren los paneles con área fijada de 200 m². Fuente: *Elaboración propia con datos de TRNSYS.*

Tabla 2.1. Contribución solar mínima anual para ACS en %.

| Demanda total de ACS del edificio (l/d) | Zona climática | | | | |
|---|----------------|----|-----|----|----|
| | I | II | III | IV | V |
| 50 – 5.000 | 30 | 30 | 40 | 50 | 60 |
| 5.000 – 10.000 | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 |
| > 10.000 | 30 | 50 | 60 | 70 | 70 |

Figura 56. Valores de contribución solar mínima. Fuente: DBHE.

Un parámetro interesante que se ha obtenido al hacer las simulaciones son las horas no cubiertas, es decir el número de horas al año que la instalación no es capaz de cubrir la demanda. Es por ello, que de cada combinación se obtendrá un valor de horas no cubiertas. Según el código técnico (DBHE), el número de horas fuera de consigna no deberá exceder 350 h [4]. Es por ello, que con todas las combinaciones se hará una filtración para descartar aquellas que superen dicho límite de horas. Al hacerlo se descartan algunas potencias nominales de caldera como son 1kW y 10kW. A partir de 20kW todas las combinaciones pasarán el filtro sin problema como se verá posteriormente.

8.5.3. Comparativa entre las simulaciones

Para verificar que no hay anomalías o fallos de la instalación en ningún momento del año, es interesante graficar algunos parámetros como las temperaturas de distintos puntos de la instalación, variando algunos de los restantes parámetros. Esta pequeña revisión servirá de comprobación y a la vez ayudará a conocer mucho mejor el funcionamiento de cada uno de los equipos y como se afectan los unos a los otros. Además, también se comprobarán las diferencias entre épocas de alta y baja demanda. Para las medidas se tomarán pequeños periodos de tiempo, del orden de pocos días a 1 o 2 semanas, para así apreciar mejor en detalle los resultados.

8.5.3.1. Evolución de temperatura en los tanques variando potencia nominal de la caldera.

Se pretende observar la evolución de las temperaturas de los tres tanques, al ir sólo variando la potencia de la caldera. Los tres tanques tendrán un volumen constante. Se comprueba que, el tanque que se ve más afectado es el de calefacción pues tiene la relación más directa con la caldera. Las potencias entre las que se ha variado son 20000, 30000 y 50000 kW.

En la Figura 57 se puede comprobar que la potencia más alta (50 kW) es capaz de mantener el tanque de calefacción dentro del rango de temperaturas con más facilidad, mientras las potencias más pequeñas hacen que las temperaturas caigan por debajo del mínimo en algunas horas.

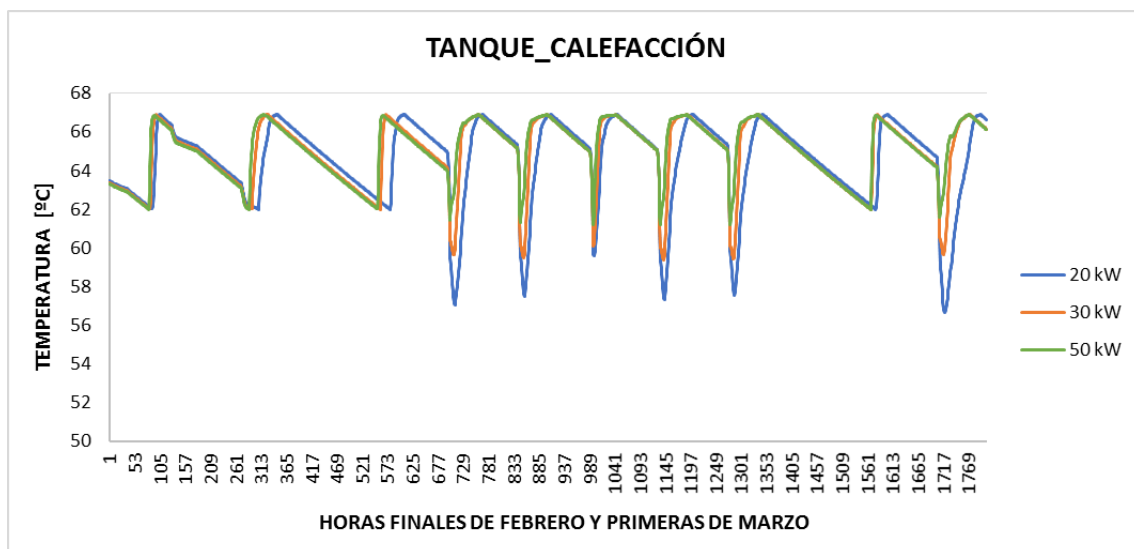


Figura 57. Evolución temperatura tanque calefacción con potencia caldera variable. Fuente: *Elaboración propia con datos de TRNSYS.*

La variación de la potencia de la caldera afecta mínimamente a la temperatura del tanque de ACS. Se puede ver en la siguiente gráfica como en pocas ocasiones la temperatura está por debajo del mínimo. Hay que tener en cuenta que este tanque se calienta también gracias a la generación del panel solar.

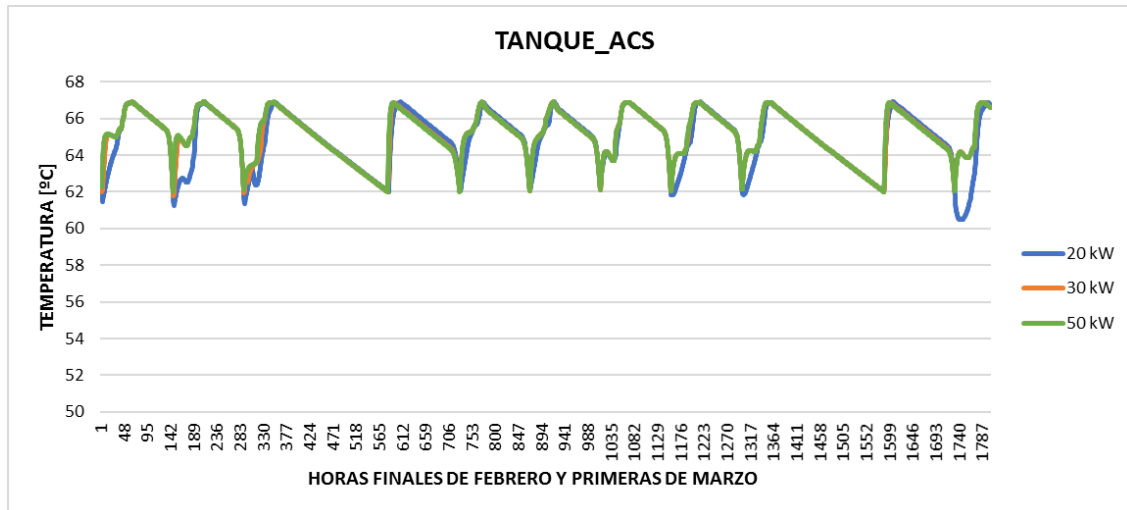


Figura 58. Evolución temperatura tanque ACS con potencia caldera variable. Fuente: *Elaboración propia con datos de TRNSYS.*

Al tanque del panel le es indiferente la potencia de la caldera, puesto que sus condiciones de funcionamiento no dependen de esta. Es por ello, que en la siguiente gráfica se puede apreciar que las tres potencias de caldera generan tres curvas prácticamente iguales.

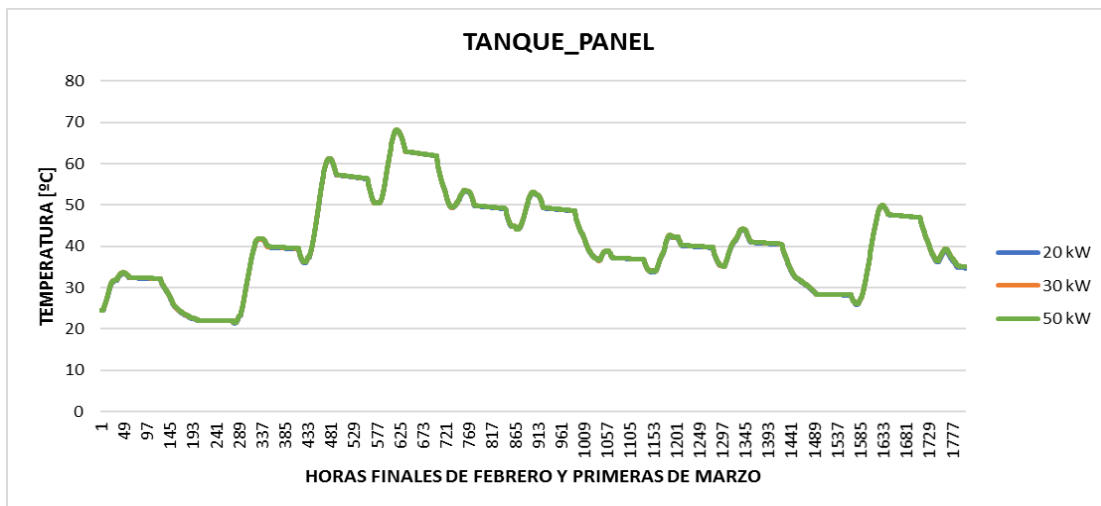


Figura 59. Evolución temperatura tanque panel con potencia caldera variable. Fuente: *Elaboración propia con datos de TRNSYS.*

Por último, se ha graficado la evolución de la temperatura del tanque de calefacción una vez se encienden los equipos, tras la parada de funcionamiento de la temporada de verano. Es en la

Figura 60 donde se puede ver claramente que, a mayor potencia de la caldera, más rápido se alcanza el rango de temperaturas de funcionamiento del tanque

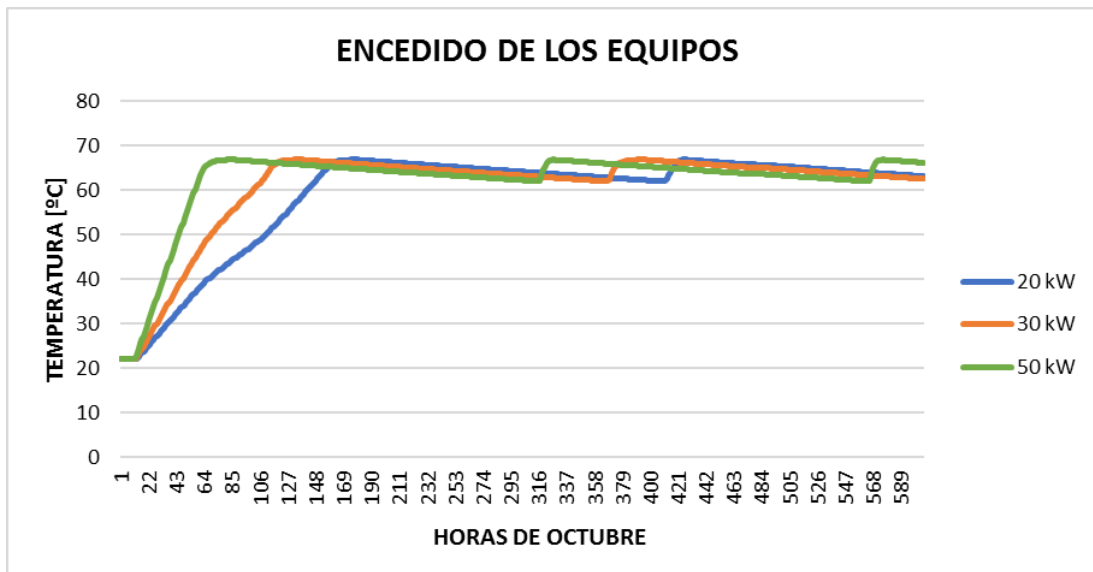


Figura 60. Evolución temperatura tanque calefacción tras la parada de verano. Fuente: *Elaboración propia con datos de TRNSYS.*

8.5.3.2. Evolución de temperatura en los tanques variando volumen del tanque de calefacción.

En este caso se va a variar el volumen del tanque de calefacción manteniendo constantes los otros dos tanques y la potencia de la caldera. En las siguientes imágenes se podrán apreciar en detalle como las temperaturas más afectadas son las del propio tanque. Los volúmenes entre los que se ha variado el tanque de calefacción son 3, 10 y 20 m³. En la Figura 61 y Figura 62 se puede ver la evolución de temperaturas del tanque de calefacción al variar el volumen de este. Como es de esperar hay cambios visibles a comentar. El volumen más pequeño dará lugar a un mayor número de calentamientos y enfriamientos del tanque, frente a tanques de mayor tamaño que conservarán mejor el calor de este en un mismo periodo de tiempo. En la Figura 62 se puede ver más en detalle como el tanque de mayor tamaño se enfría más lentamente que el tanque de menor volumen.

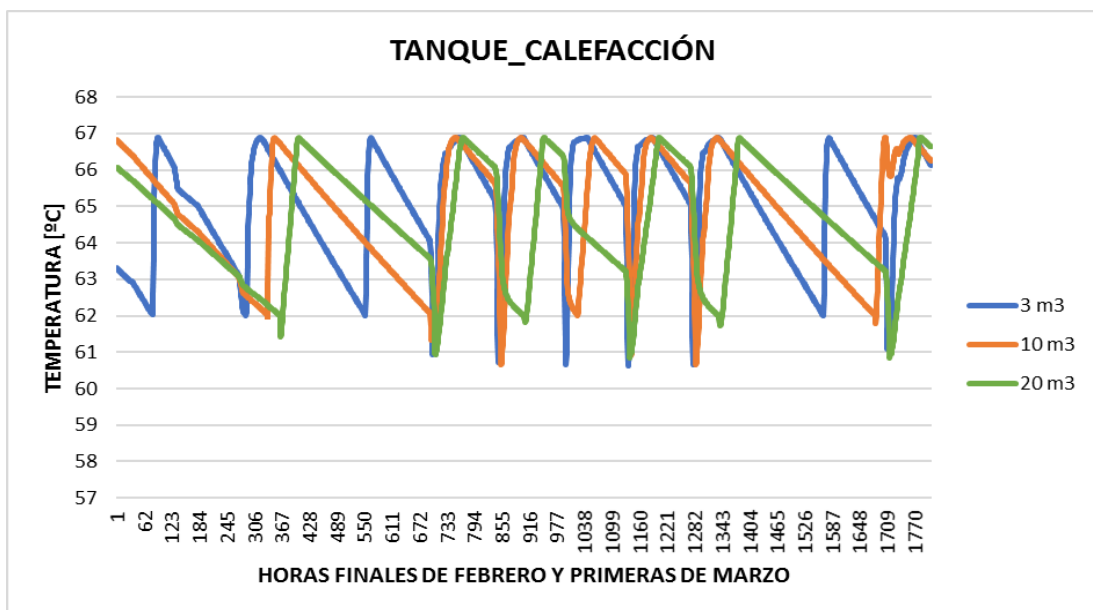


Figura 61. Evolución temperatura tanque calefacción para varios volúmenes. Fuente: *Elaboración propia con datos de TRNSYS.*

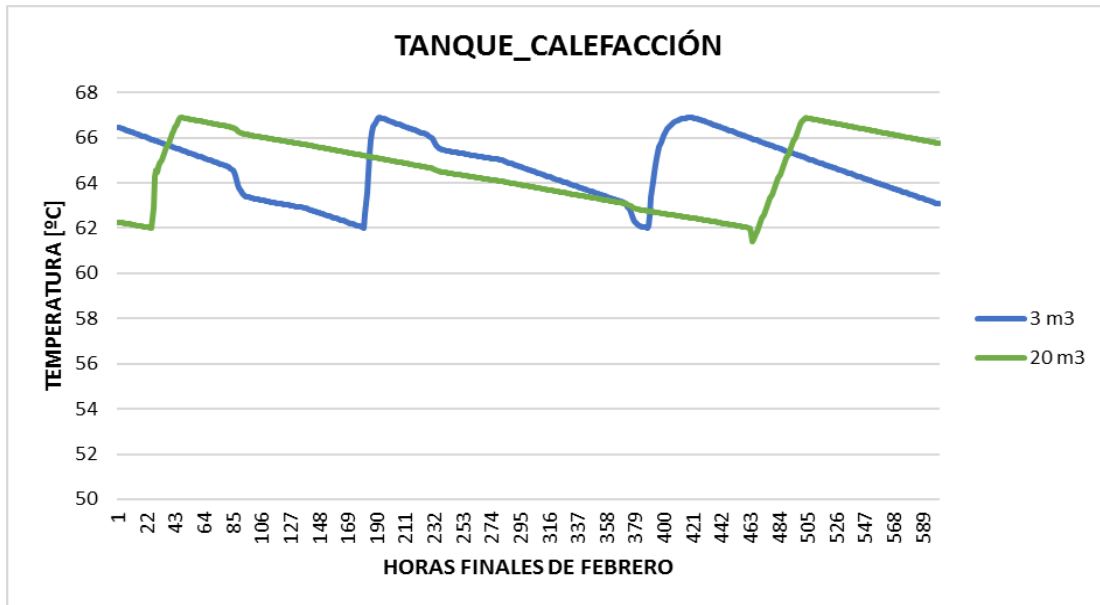


Figura 62. Evolución temperatura tanque calefacción en detalle. Fuente: Elaboración propia con datos de TRNSYS.

En la Figura 63 se puede ver como los tanques de calefacción de gran volumen generan notables caídas de las temperaturas del tanque de ACS, por debajo del límite inferior. Esto se debe a que grandes volúmenes de calefacción darán lugar a grandes caudales, debido a que están directamente relacionados en el dimensionamiento. Por lo tanto, el caudal que llega al tanque de ACS no está dimensionado con respecto a este tanque, y un caudal muy grande en un tanque no tan grande puede dar lugar a un mal comportamiento de este, generándose así las visibles caídas de temperatura. Es por ello por lo que, para evitar este problema, se debería hacer un estudio más detallado de los caudales, para evitar dar lugar a estas situaciones.

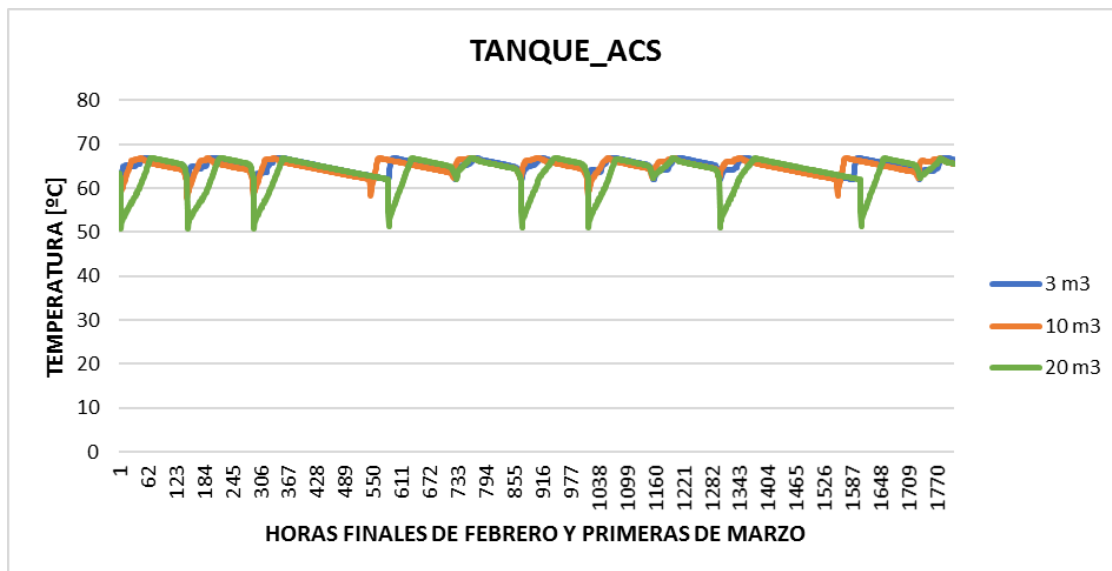


Figura 63. Evolución temperatura tanque ACS con volumen tanque calefacción variable. Fuente: Elaboración propia con datos de TRNSYS.

De nuevo es indiferente para el tanque del panel lo que ocurra en la parte de calefacción, por lo que la variación del volumen del tanque de calefacción no afecta a las temperaturas del tanque del panel y se muestra gráficamente en la Figura 64.

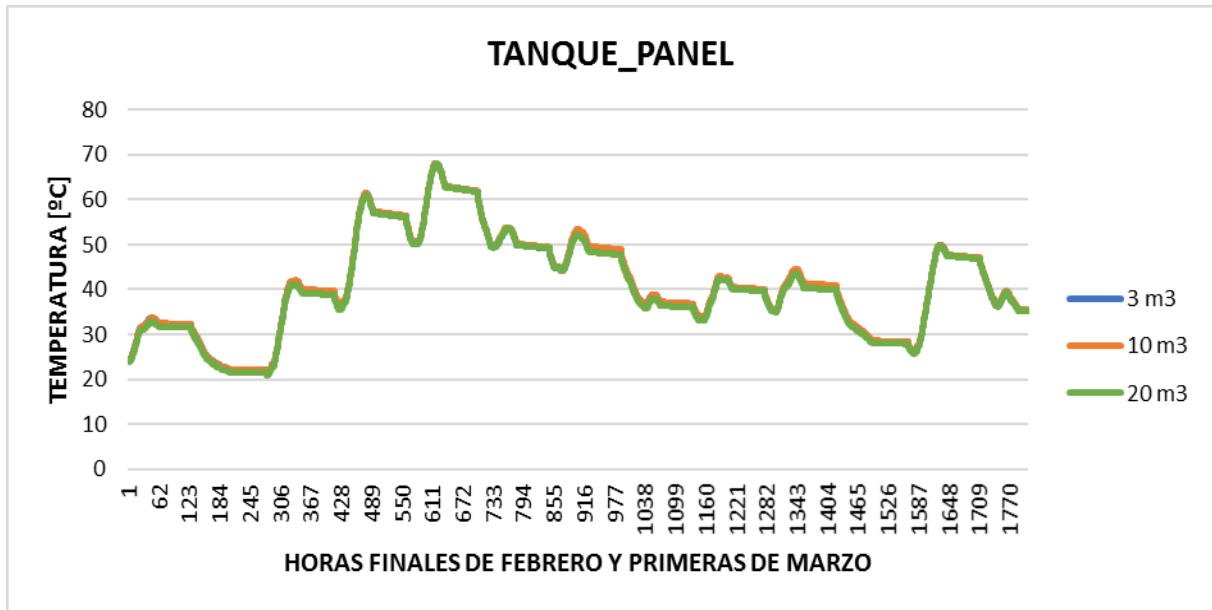


Figura 64. Evolución temperatura tanque panel con volumen tanque calefacción variable. Fuente: Elaboración propia con datos de TRNSYS.

8.5.3.3. Evolución de temperatura en los tanques variando volumen tanque ACS.

Se estudia en este apartado las consecuencias de variar el volumen de ACS. Los tanques de calefacción y del panel no se ven afectados y los distintos volúmenes generan las mismas gráficas que se han visto en los casos anteriores. Esta vez no se han añadido las correspondientes gráficas porque no aportan información nueva. Los volúmenes entre los que se ha variado el tanque de ACS son 3, 5 y 10 m³.

En la Figura 65 y Figura 66 se puede ver cómo afecta al tanque de ACS la variación del volumen de este. Se aprecia de nuevo, que los tanques pequeños tienen más facilidad para calentar, pero también tardarán menos en enfriarse mientras que los más grandes necesitarán más tiempo en ambos procesos. En la Figura 66 se aprecia esto con más detalle, comparando solamente dos volúmenes. Se aprecia claramente como un tanque de mayor tamaño tarda más en enfriarse.

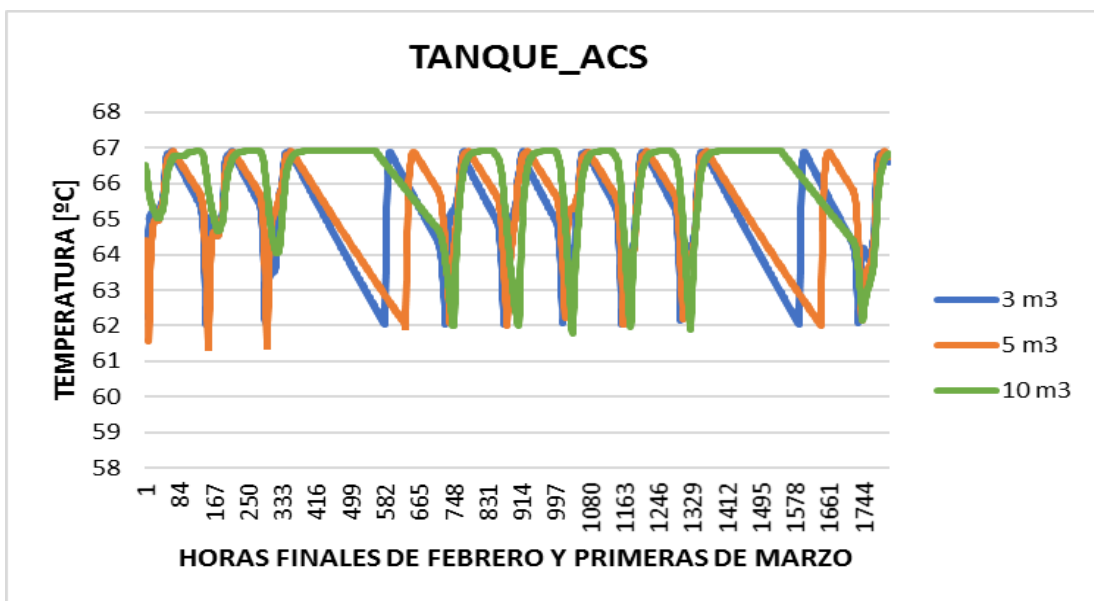


Figura 65. Evolución temperatura tanque ACS con volumen tanque ACS variable. Fuente: Elaboración propia con datos de TRNSYS.

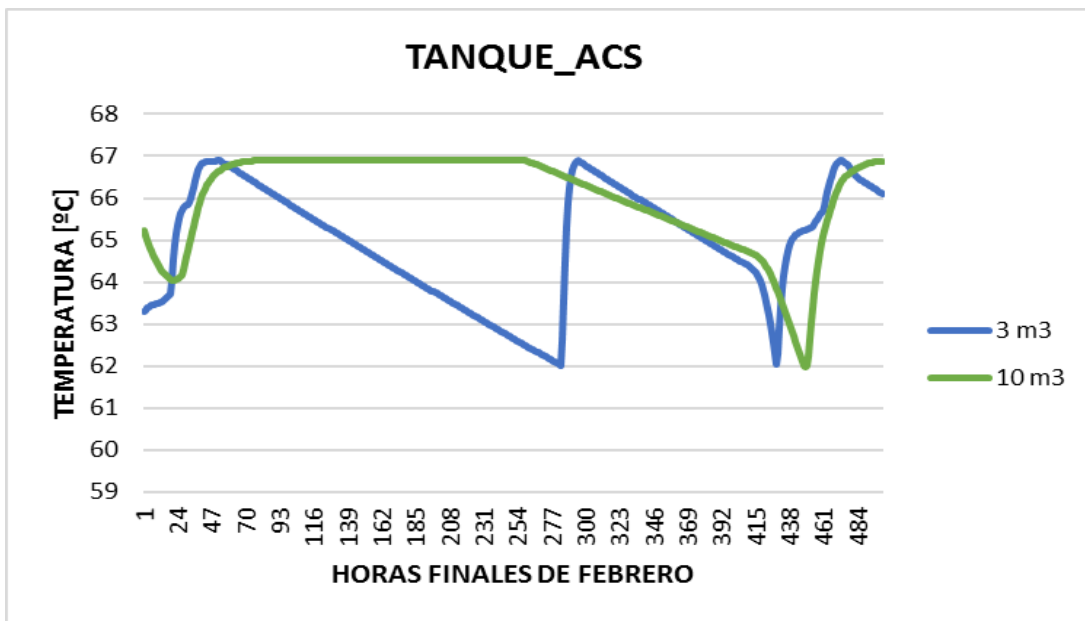


Figura 66. Evolución temperatura tanque ACS con volumen tanque ACS variable. Fuente: *Elaboración propia con datos de TRNSYS.*

8.5.3.4. Evolución de temperatura en los tanques variando volumen tanque panel.

Por último, queda el tercer tanque con el que se hará la misma comprobación. Modificar el volumen del tanque del panel afectará a las temperaturas de este mismo, con consecuencias poco visibles en el resto de los tanques, es por ello, que estos no se han graficado. Los volúmenes más grandes no conseguirán alcanzar tan altas temperaturas, mientras que los más pequeños si lo lograrán. Los valores con los que se ha hecho la comprobación son 5,15 y 20 m³.

En la Figura 67 se puede observar cómo los volúmenes más pequeños alcanzan mayores temperaturas, pero también son los que llegan a las temperaturas más bajas, pues se enfrían más rápidamente. Sin embargo, los tanques más grandes, son capaces de mantener más tiempo las temperaturas, aunque las que alcancen no sean tan altas. Se aprecia en la Figura 67 que el tanque de 5m³ llega hasta una temperatura de casi 70°C y este mismo se enfría hasta temperaturas del orden de 20°C. Por otro lado, un tanque de 20 m³, tendrá un rango de entre 25 y 45°C para el mismo periodo de tiempo.

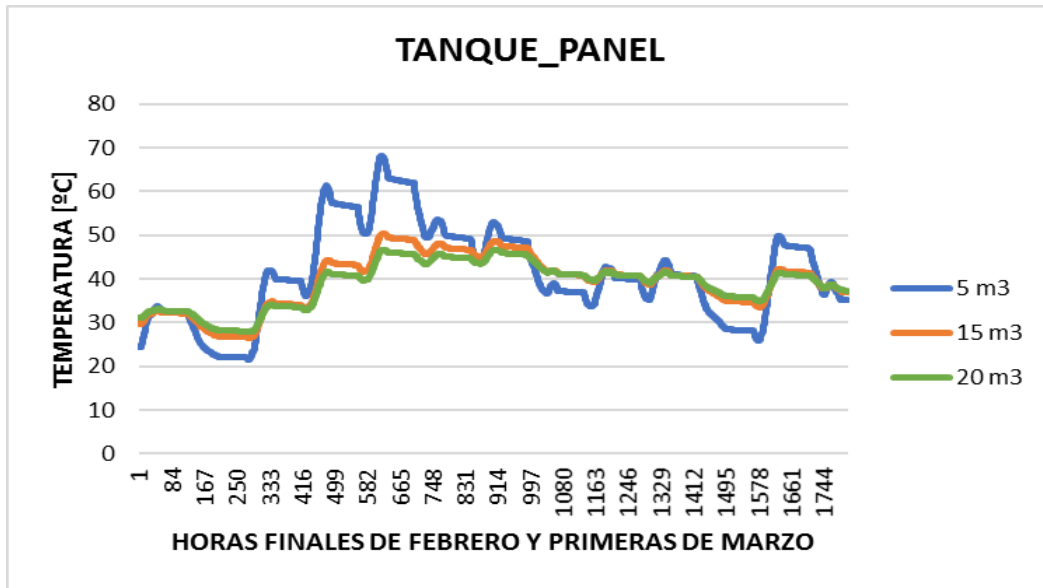


Figura 67. Evolución temperatura tanque del panel con volumen tanque panel variable. Fuente: *Elaboración propia con datos de TRNSYS.*

Se ha estudiado cómo evolucionan las temperaturas del tanque del panel tras la parada de funcionamiento de verano. Se observa en la Figura 68 como en menores volúmenes se alcanzan rápidamente mayores temperaturas.

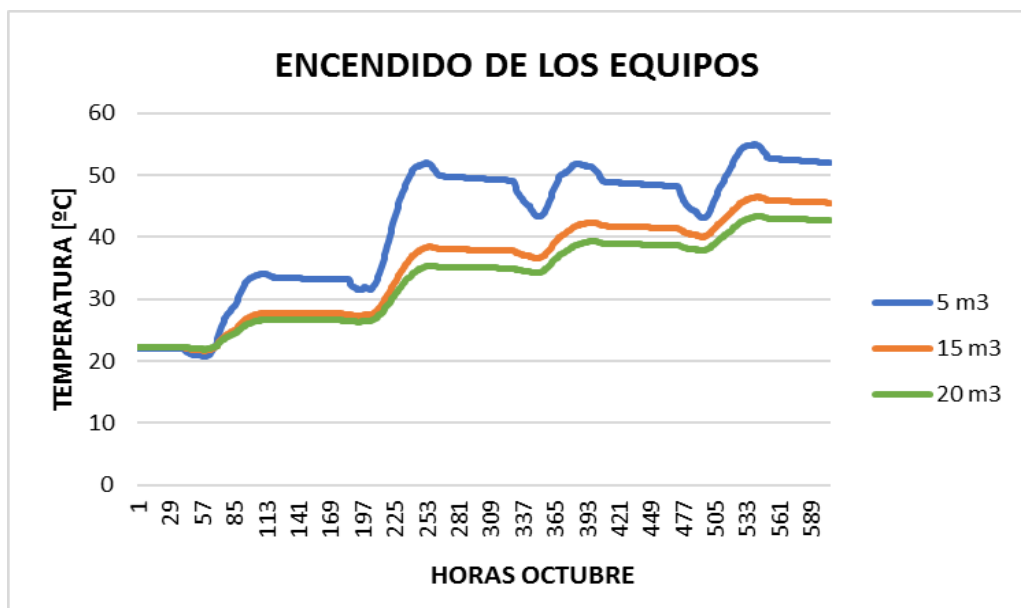


Figura 68. Evolución temperatura tanque panel tras temporada de verano. Fuente: *Elaboración propia con datos de TRNSYS.*

8.5.3.5. Evolución de temperatura en los tanques variando el área de panel.

Se ha hecho también la comprobación de variar el área del panel, viendo cómo afecta al tanque de este mismo. Se resalta como a mayor área, mayores temperaturas y más rápido se alcanzan. Los valores de área que se han probado son 100, 200 y 500 m². Los tanques de ACS y calefacción no se ven afectados prácticamente.

En la Figura 69 se puede ver como áreas de gran tamaño generan las temperaturas más altas, pero también dan lugar a grandes bajadas. Esto se debe de nuevo a un mal dimensionamiento del caudal. El caudal está calculado a partir del área de colectores, pero no cambia en función del volumen del tanque, es por lo que en algunos momentos de lugar a irregularidades en el funcionamiento. Como se ha comentado anteriormente, lo correcto sería hacer un detallado estudio del dimensionamiento de los caudales.

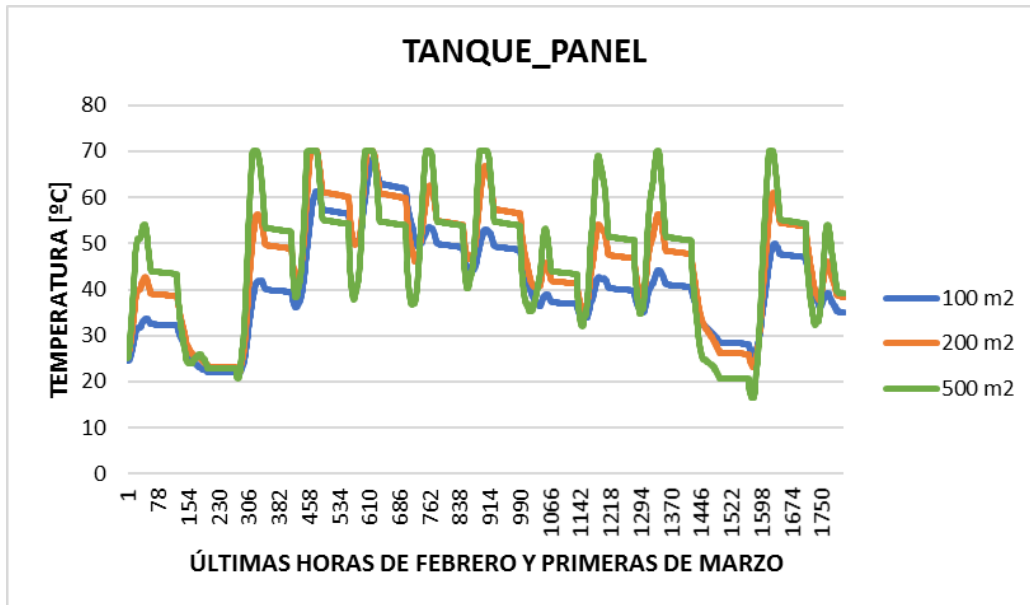


Figura 69. Evolución temperatura tanque del panel con volumen tanque del panel variable. Fuente: *Elaboración propia con datos de TRNSYS.*

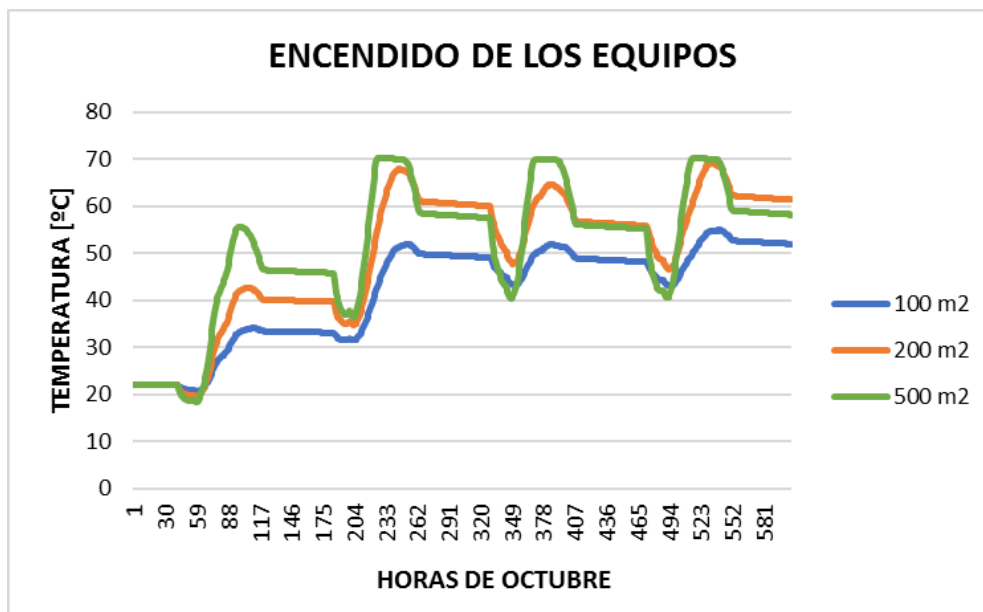


Figura 70. Evolución temperatura tanque panel tras temporada de verano. Fuente: *Elaboración propia con datos de TRNSYS.*

8.5.3.6. Evolución de temperatura en los tanques en periodos de baja y alta demanda.

Finalmente, se va a observar la evolución de las temperaturas de los tres tanques en temporada de verano y de invierno. En el tanque de calefacción se puede ver como en temporada de invierno este se calienta y enfría más veces, debido a la alta demanda. Sin embargo, en una época más cercana al verano la demanda de calefacción será mínima.

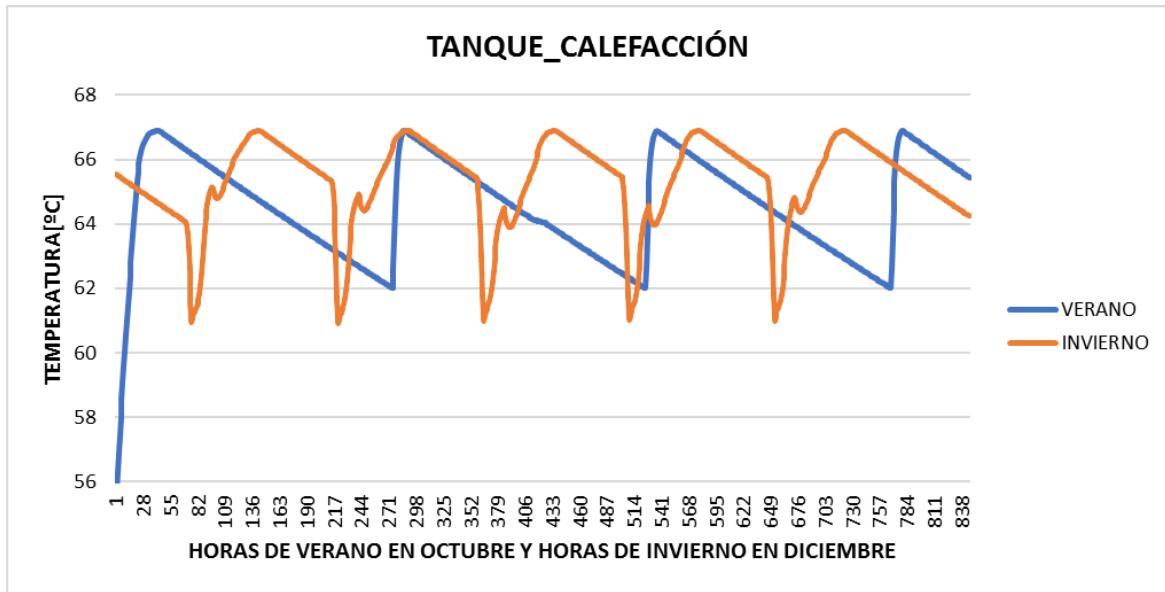


Figura 71. Comparación temperatura tanque calefacción entre época de alta y baja demanda. Fuente: *Elaboración propia con datos de TRNSYS.*

El tanque de ACS se mantendrá similar en ambas épocas del año, habrá una mínima diferencia en las curvas representadas en Figura 72 debido a que en verano este ACS lo abastecen parcialmente los paneles solares y en invierno los paneles tendrán que verse apoyados por la caldera

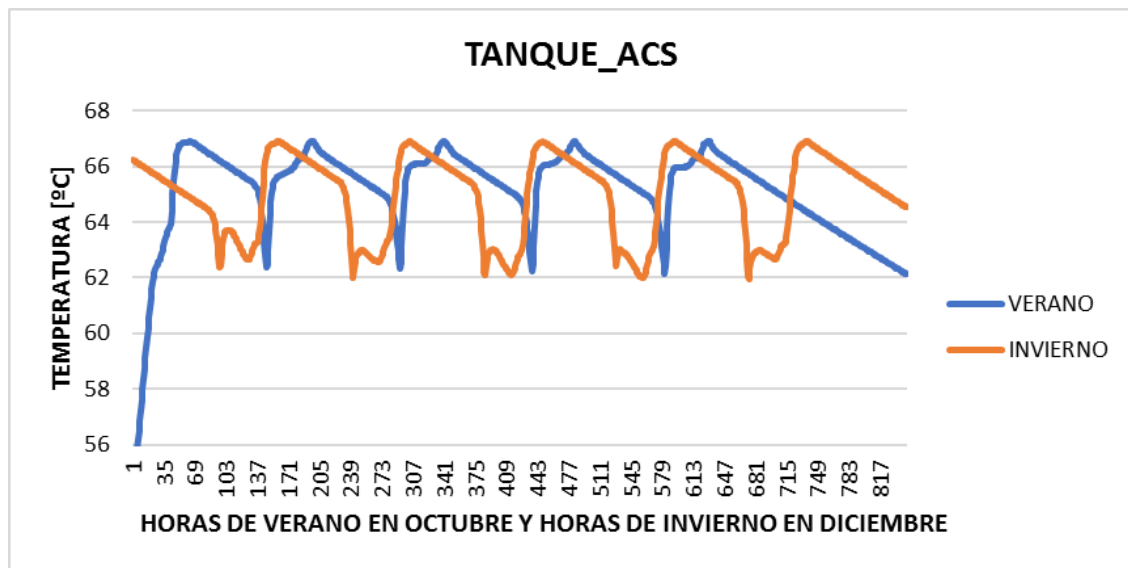


Figura 72. Comparación temperatura tanque ACS entre época de alta y baja demanda. Fuente: *Elaboración propia con datos de TRNSYS.*

Finalmente, el tanque del panel será el que proporcione mayores diferencias ya que, los paneles proporcionarán gran parte del agua caliente en épocas de verano alcanzándose mayores temperaturas en el tanque, mientras que en época de baja radiación el tanque no logrará alcanzar temperaturas superiores a los 40°C.

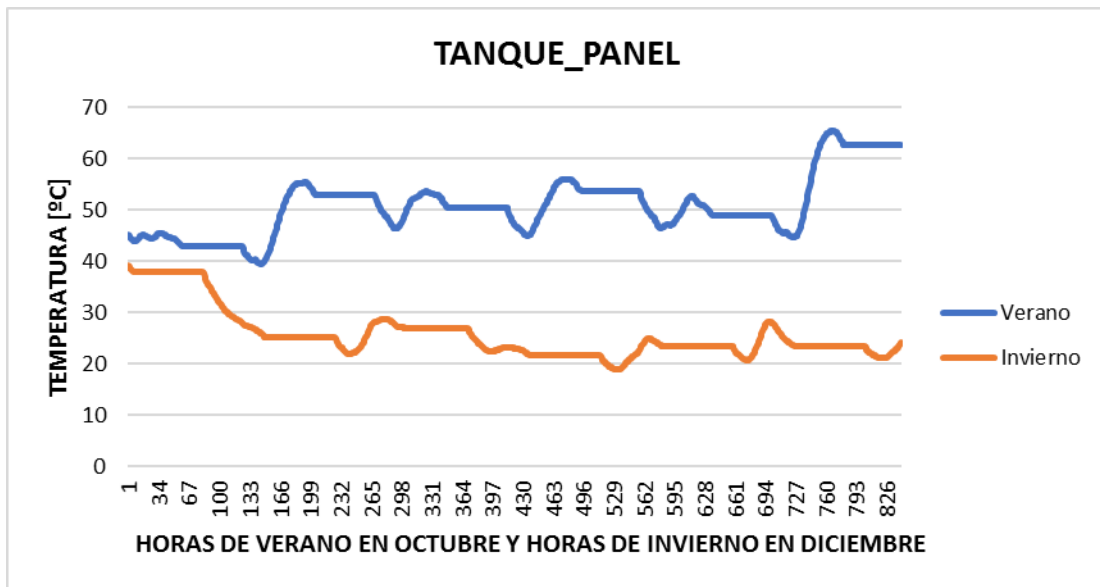


Figura 73. Comparación temperatura tanque de panel entre época de alta y baja demanda. *Fuente: Elaboración propia con datos de TRNSYS.*

9 TOMA DE DECISIONES

El objetivo de esta parte del proyecto es obtener la instalación óptima que se adapte a las necesidades del centro y que cumpla la normativa vigente en la edificación. A continuación, se presentan los distintos cálculos y análisis que se han hecho para hacer la elección. Entre estos se pueden encontrar el cálculo del coste de ciclo de vida o el coste de la inversión inicial, la obtención del consumo de energía primaria y las correspondientes curvas de distribución con todas las combinaciones. También se presenta el estudio de la zona de posibles óptimos, y finalmente un análisis de otras zonas como puede ser la de las combinaciones menos apropiadas.

9.1. Coste de Ciclo de Vida

El coste de ciclo de vida de toda la instalación es el coste total de los equipos durante toda la vida de estos, considerando una vida útil de 30 años. Se vuelve a aplicar en este caso la misma ecuación de CCV:

$$CCV[\text{€}] = \text{Sobrecoste} + (C_{op} + C_{mant}) \cdot \sum_{k=1}^{30} \frac{1}{(1+0.03)^k}$$

En la nueva instalación del edificio cuenta con paneles solares, una caldera de condensación y nuevos tanques, con lo que el CCV total se define de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} CCV_{\text{Instalación}}[\text{€}] = & \text{Sobrecoste}_{\text{Caldera}} + (C_{op_{\text{Caldera}}} + C_{mant_{\text{Caldera}}}) \cdot \sum_{k=1}^{30} \frac{1}{(1+0.03)^k} + \\ & \text{Sobrecoste}_{\text{PanelesSolares}} + (C_{op_{\text{PanelesSolares}}} + C_{mant_{\text{PanelesSolares}}}) \cdot \sum_{k=1}^{30} \frac{1}{(1+0.03)^k} + \\ & \text{Sobrecoste}_{\text{Tanques}} + (C_{op_{\text{Tanques}}} + C_{mant_{\text{Tanques}}}) \cdot \sum_{k=1}^{30} \frac{1}{(1+0.03)^k} \end{aligned}$$

El coste de mantenimiento de la instalación será un porcentaje sobre el coste de inversión inicial o sobrecoste de esta. Este valor se considerará de un 1.7%.

- CALDERA:

La inversión inicial en la caldera de condensación viene definida con la siguiente curva:

$$y = 114.74 \cdot X^{0.8676}$$

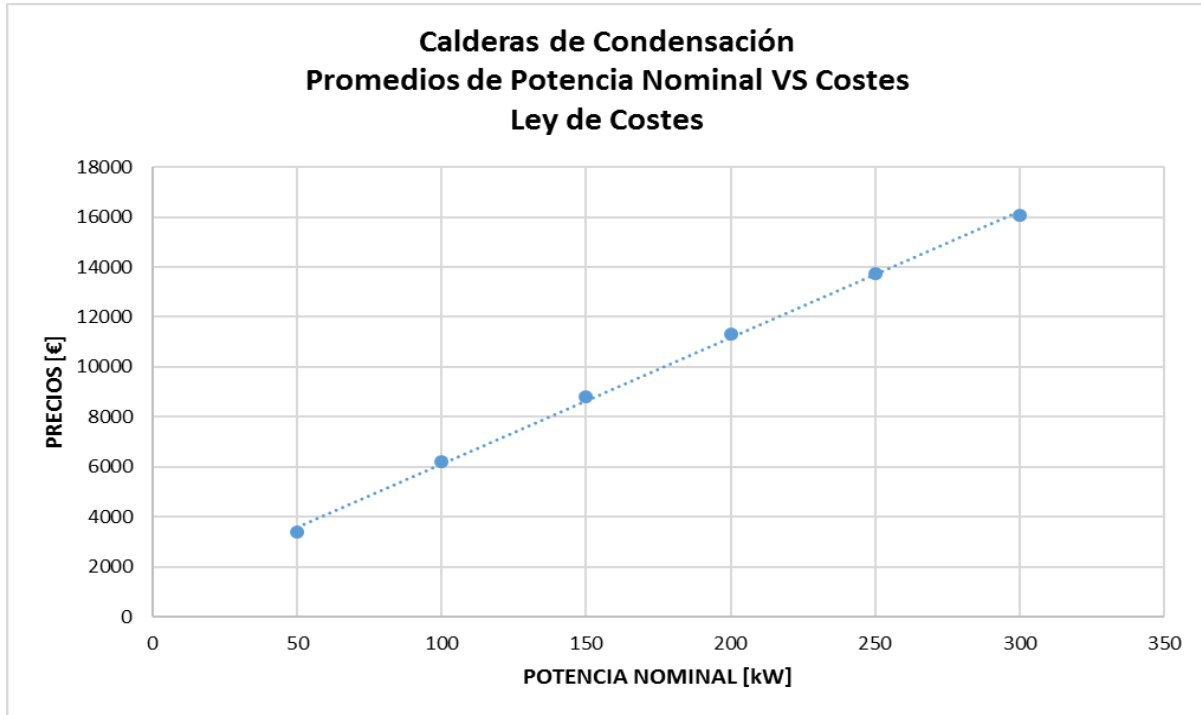


Figura 74. Costes de inversión de la caldera de condensación. Fuente: Temario de la asignatura ADE.

La inversión inicial depende de la potencia nominal de la caldera como indica la curva representada en la Figura 75, pero también dependerá del rendimiento de esta. Para ver cómo afecta el precio en función del rendimiento se han estudiado varios catálogos y finalmente el coste de inversión inicial ha quedado de la siguiente manera:

$$Costes_{invers_{inicial}}[\text{€}] = (114.74 \cdot Pnom^{0.8676}) + (114.74 \cdot Pnom^{0.8676}) \cdot (\eta_{combina} - \eta_{mínimo}) \cdot 10.5$$

Siendo 10.5 el porcentaje que aumenta el precio de una caldera al aumentar su rendimiento en un 1%. [29][30]

Los costes de operación se definen como:

$$Costes_{oper}[\text{€}] = Consumo_{Caldera} \cdot Precio_{GasNatural}$$

Los costes de mantenimiento se calculan proporcionales al coste de inversión:

$$Costes_{manten}[\text{€}] = Inversión_{Inicial} \cdot 0.017(\%CI)$$

- PANEL SOLAR:

La inversión inicial del panel solar viene definida con la siguiente curva:

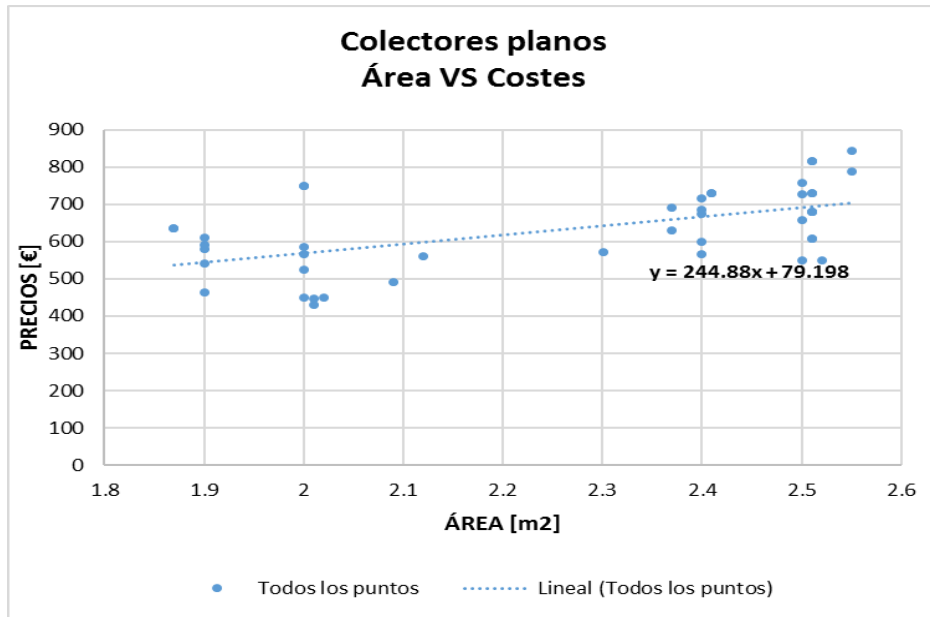


Figura 75. Costes de inversión de los colectores planos. Fuente: Temario de la asignatura ADE

Los colectores no tienen gastos de operación debido a que el recurso que usan es gratuito: la luz solar.

Los costes de mantenimiento se calculan proporcionales al coste de inversión:

$$Costes_{manten}[\text{€}] = Inversión_{Inicial} \cdot 0.017(\%CI)$$

- TANQUES:

La inversión inicial de los tanques viene definida con la siguiente curva:

$$y = 11.112 \cdot X^{0.7917}$$

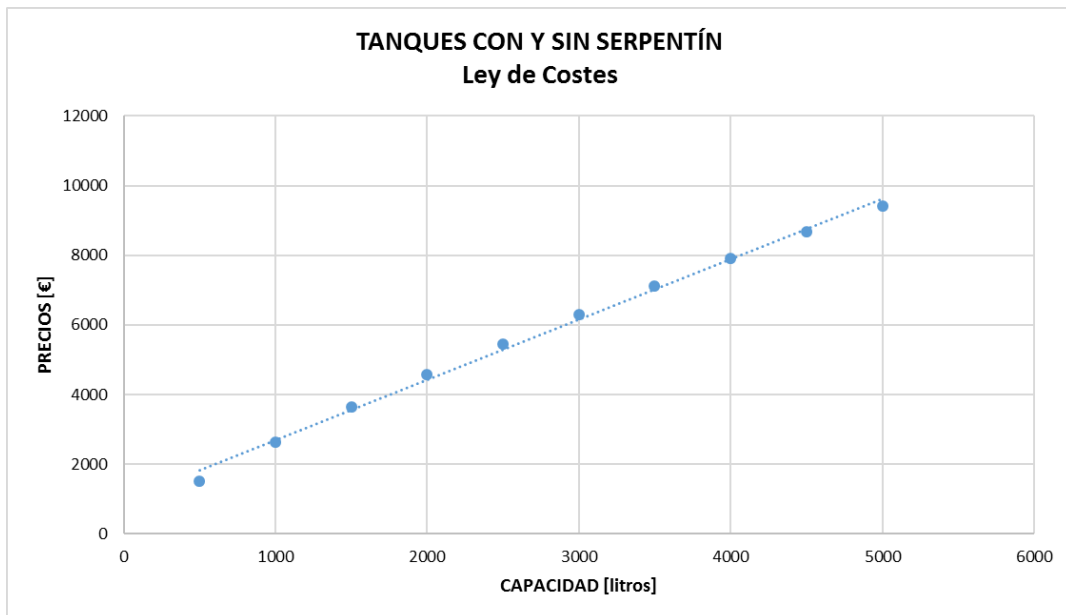


Figura 76. Costes de inversión de los tanques. Fuente: Temario de la asignatura ADE

Los tanques no tienen costes de operación pues no necesitan del consumo de ningún recurso para almacenar.

Los costes de mantenimiento se calculan proporcionales al coste de inversión:

$$Costes_{manten}[\text{€}] = Inversión_{Inicial} \cdot 0.017(\%CI)$$

9.2. Consumo de energía primaria

Considerando las combinaciones propuestas anteriormente para el dimensionamiento de la instalación y teniendo en cuenta la definición de Coste de Ciclo de Vida (CCV) aquí expuesta, se graficará una curva de distribución donde se estudie el CCV de cada combinación junto con el consumo de energía primaria de la misma. Este consumo se planteará en distintas versiones, diferenciando la parte renovable y la no renovable. El gas natural de la caldera es casi al completo no renovable, con un pequeño porcentaje de renovabilidad. Por otro lado, están los colectores que son renovables en su totalidad. Es así entonces que se tendrán dos consumos: el consumo de energía primaria no renovable y el consumo de energía primaria total.

9.2.1. Normativa relativa al consumo de energía

Para obtener los datos de consumo de energía primaria tanto no renovable como total, se han necesitado los correspondientes factores de paso que indica la normativa. El RITE establece en el apartado 2 de la IT 1.2.2 un procedimiento alternativo para la verificación de la exigencia de eficiencia energética de las instalaciones térmicas en los edificios. Dicho procedimiento será alternativo al simplificado propuesto en el apartado 1 de la misma instrucción IT. Además, consistirá en la adopción de soluciones alternativas, entendidas aquellas que se apartan parcial o totalmente de las propuestas en esta sección, basadas en la limitación directa del consumo energético de la instalación térmica diseñada. Se podrán adoptar soluciones alternativas, siempre que se justifique documentalmente que la instalación térmica proyectada satisface las exigencias técnicas de esta sección porque sus prestaciones son, al menos, equivalentes a las que se obtendrían por la aplicación directa del procedimiento simplificado. Para ello se evaluará el consumo energético de la instalación térmica completa o del subsistema en cuestión, mediante la utilización de un método de cálculo y su comparación con el consumo energético de una instalación térmica que cumpla con las exigencias del procedimiento simplificado. El cumplimiento de las exigencias mínimas se producirá cuando el consumo de energía primaria y las emisiones de dióxido de carbono de la instalación evaluada, considerando todos sus sistemas auxiliares, sea inferior o igual que la de la instalación que cumpla con las exigencias del procedimiento simplificado. Por lo tanto, los coeficientes de paso permiten justificar documentalmente las instalaciones alternativas a las propuestas por la normativa vigente [31].

El DB-HE define los conceptos de energía primaria y energía final del siguiente modo:

La energía final es energía tal y como se utiliza en los puntos de consumo. Es la que compran los consumidores, en forma de electricidad, carburantes u otros combustibles usados de forma directa. Energía primaria es energía suministrada al edificio procedente de fuentes renovables y no renovables, que no ha sufrido ningún proceso previo de conversión o transformación. Es la energía contenida en los combustibles y otras fuentes de energía e incluye la energía necesaria para generar la energía final consumida, incluyendo las pérdidas por su transporte hasta el edificio, almacenamiento, etc. [31].

$$\text{Energía primaria} = \text{Energía final} + \text{Pérdidas en transformación} + \text{Pérdidas en transporte}$$



Figura 77. Obtención de energía final a partir de energía primaria. Fuente: Código Técnico en la edificación. Ahorro de energía. [4]

En la Figura 78, se verán los coeficientes de paso considerados y más adelante una vez elegida la instalación óptima, se expondrán los valores límites según la normativa y se comprobará si la instalación está dentro de estos límites o no.

La caldera, que funciona con gas natural, tiene un alto porcentaje de no renovabilidad, prácticamente todo su consumo será no renovable. Por otro lado, el panel será 100% renovable.

| Factores de paso de Energía Final | | | |
|--|---|--|---|
| Energético | a Energía Primaria Total (kWhEP/kWhEF) | a Energía Primaria No Renovable (kWhEPNR/kWhEF) | a Emisiones de CO2 (kgCO2/kWhEF) |
| Electricidad | 2.368 | 1.954 | 0.331 |
| Gasoleo calefaccion / Fuel-oil | 1.182 | 1.179 | 0.311 |
| GLP | 1.204 | 1.201 | 0.254 |
| Gas Natural | 1.195 | 1.190 | 0.252 |
| Carbon | 1.084 | 1.082 | 0.472 |
| Biomasa no densificada | 1.037 | 0.034 | 0.018 |
| Biomasa densificada (pelets) | 1.113 | 0.085 | 0.018 |

Figura 78. Factores de paso de energía final. Fuente: HULC.

9.3. Curvas de distribución

9.3.1. Comparación de curvas de CCV

Como se ha explicado en 8.5.1 se han propuesto dos simulaciones:

- Simulación 1: Se dimensionan los equipos de la parte de calefacción, caldera (potencia y rendimiento), tanque calefacción (volumen) y el tanque de ACS (volumen).
- Simulación 2: Se dimensiona la parte del panel: área de paneles y tanque del panel (volumen).

Es en las siguientes gráficas donde se pueden ver plasmadas las combinaciones de las distintas propuestas simuladas. Se generarán entonces dos curvas distintas. Estarán en azul cada una de las combinaciones propuestas y en naranja se encuentra representada la instalación original.

Las gráficas que generen las combinaciones serán cuatro (Figura 79, Figura 80, Figura 81 y Figura 82). Una primera que representa la Tabla 23, que tendrá la mayoría de las combinaciones y una segunda que cuenta con las combinaciones restantes. Por otro lado, la Figura 81 y Figura 82, serán similares a las anteriores, pero teniendo en cuenta el consumo de energía primaria total.

En esta primera Figura 79 se representan el CCV frente al consumo de energía no renovable de la simulación 1. Se puede observar la distribución de las combinaciones alcanzándose un mínimo en la curva. Además, se ha representado también la situación de demanda reducida con instalación original, para ubicar la situación de partida.

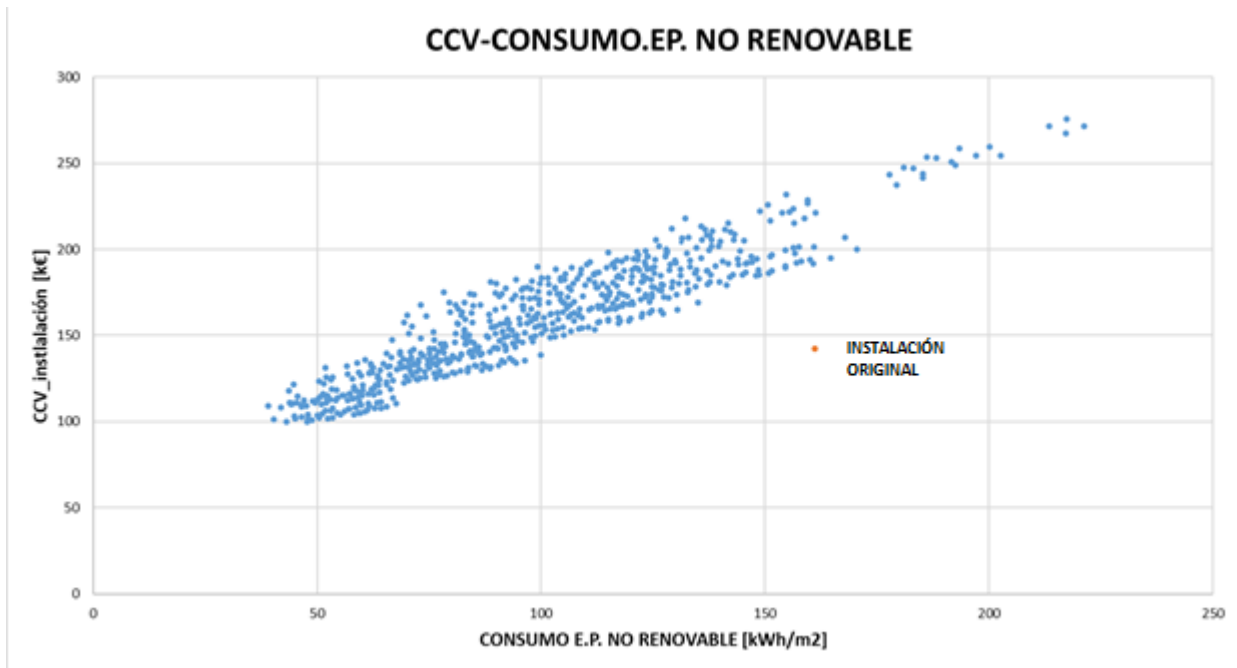


Figura 79. Combinaciones para primera simulación, consumo no renovable. *Fuente: Elaboración propia.*

En la Figura 80 están representadas las combinaciones de la simulación 2. En esta curva es mucho más clara la curva, se puede ver más claramente donde se alcanza el mínimo. Como se puede ver, de nuevo, está representada la situación de demanda reducida e instalación original.

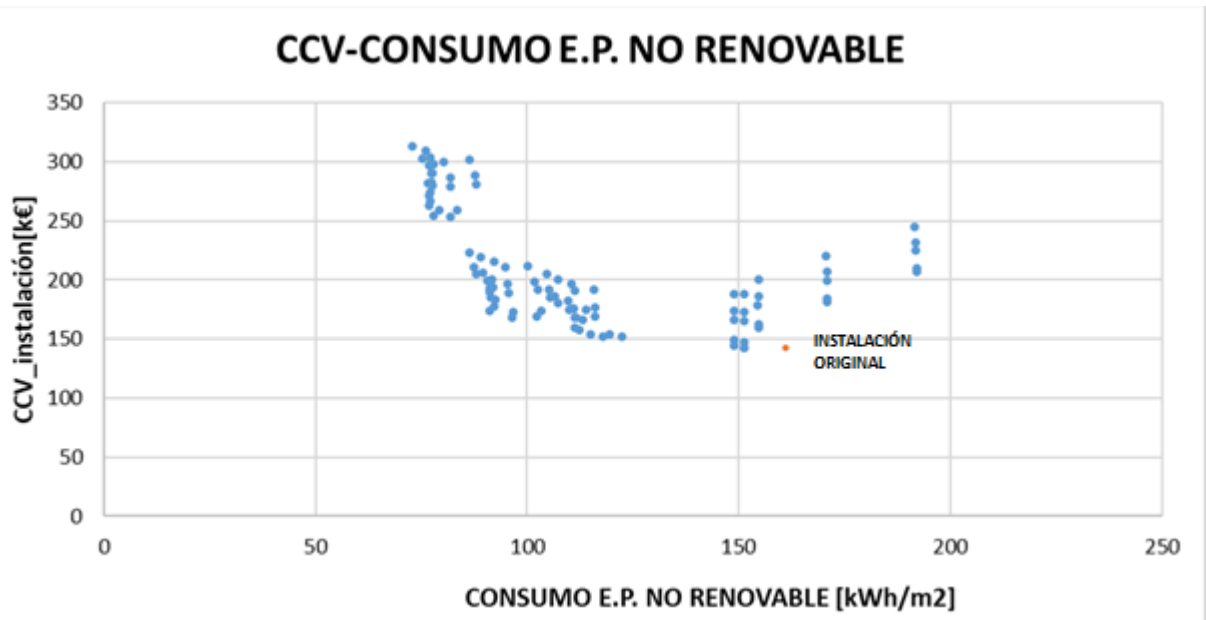


Figura 80. Combinaciones para la segunda simulación, consumo no renovable. *Fuente: Elaboración propia.*

En las Figura 81 y Figura 82 vuelven a estar representadas ambas simulaciones (1 y 2), pero en este caso el CCV está representado frente al consumo de energía primaria total (renovable y no renovable). Las curvas que se definen son muy parecidas a las anteriores pues el único cambio es el aumento del consumo en todas las combinaciones pues se le ha añadido el consumo de energía renovable.

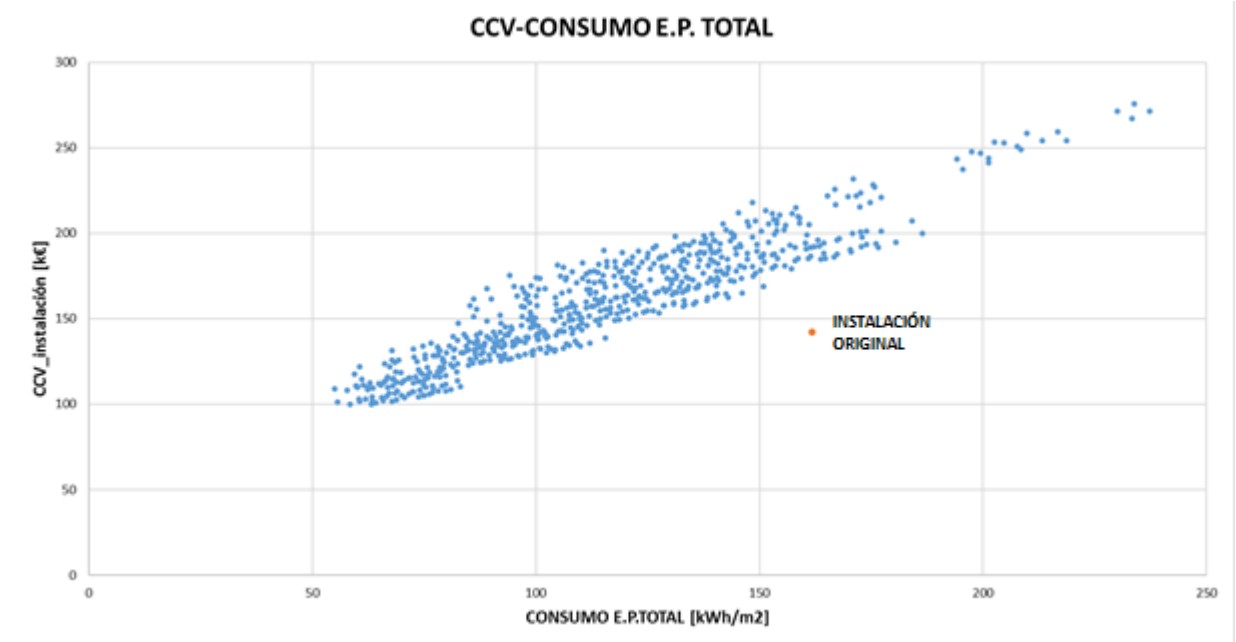


Figura 81. Combinaciones para la primera simulación, consumo energía primaria total. Fuente: Elaboración propia.

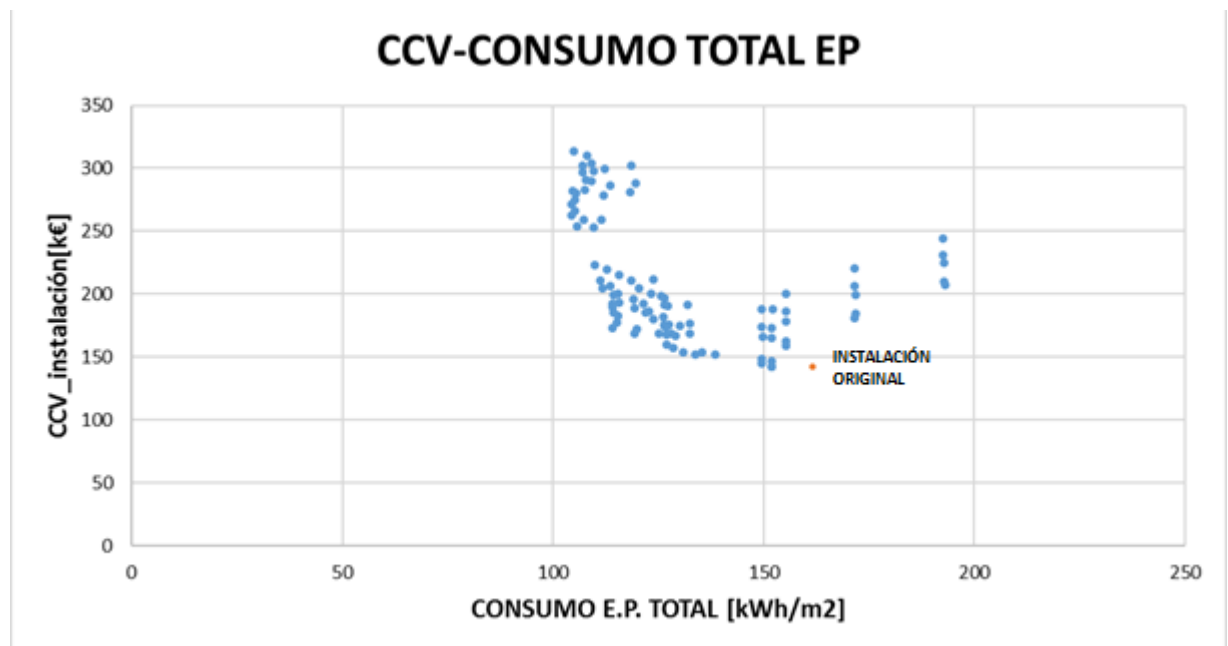


Figura 82. Combinaciones para la segunda simulación, consumo total. Fuente: Elaboración propia.

Al tener dos simulaciones y por lo tanto dos curvas a estudiar, se ha decidido mezclarlas para ver si tienen sentido y relación los resultados obtenidos en ambas. En la Figura 79 se puede ver entonces como quedarían ambas simulaciones combinadas. Se puede apreciar que la Figura 80 de combinaciones no contiene la combinación óptima. Esto se debe a que se ha simulado con una caldera de potencia nominal fija de 40kW. Se elegirá por lo tanto el óptimo de la primera simulación, donde se fijó un área de 100 m². Se descarta entonces la curva que genera la segunda simulación y se estudiará en profundidad sólo la primera. Se hará una comprobación para ver qué puntos son los que hacen cruzarse a las dos gráficas y aunque ya una de las curvas esté descartada, se verifica que ambas están igual calculadas y que no se ha escapado ningún al estudiarlas y que se ha hecho bien al compararlas.

En la Figura 83 se combinan ambas simulaciones. Se ve claramente que hay una zona donde las combinaciones de las dos simulaciones se cruzan, por lo que se va a comprobar si tienen características comunes esas combinaciones.

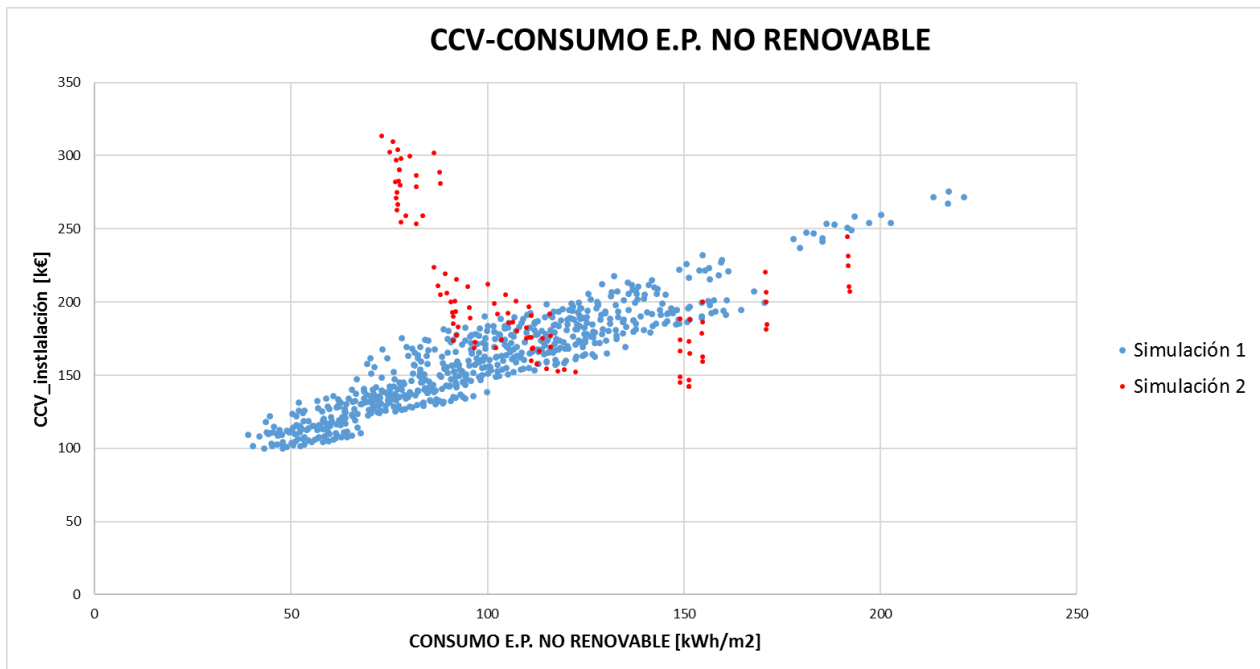


Figura 83. Mezcla de combinaciones, consumo no renovable. *Fuente: Elaboración propia.*

Como se sabe que la simulación 2 (rojo), tiene fijada la potencia de la caldera a 40kW, lo que se ha hecho es filtrar en la simulación 1 (azul), las combinaciones con esta potencia. Se ha elegido filtrar esa variable, porque es una variable cuyo valor es bastante decisivo. Se filtran en amarillo las combinaciones de la simulación 1 con potencia 40Kw y se obtiene lo siguiente:

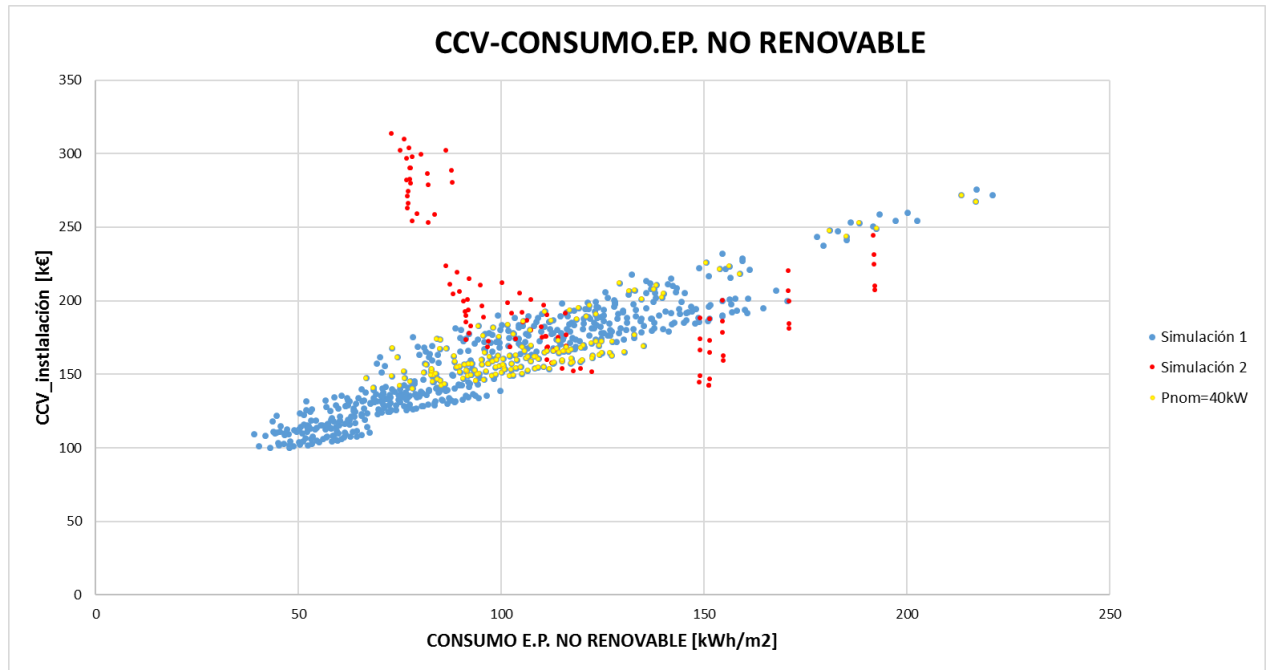


Figura 84. Mezcla de combinaciones, filtrando en simulaciones 1, la potencia de 40kW. Fuente: Elaboración propia.

Se obtiene que las combinaciones amarillas se encuentran en la zona donde se cruzan ambas curvas, lo que era de esperar si los cálculos estaban bien hechos.

Se quiere hacer una nueva comprobación, pero con otro parámetro. En este caso se pretende fijar el área en la curva de la segunda simulación. Como la primera simulación tiene fijada el área en 100 m² se decide fijar con esta misma área la segunda simulación. Se obtienen filtradas en amarillo estas combinaciones.

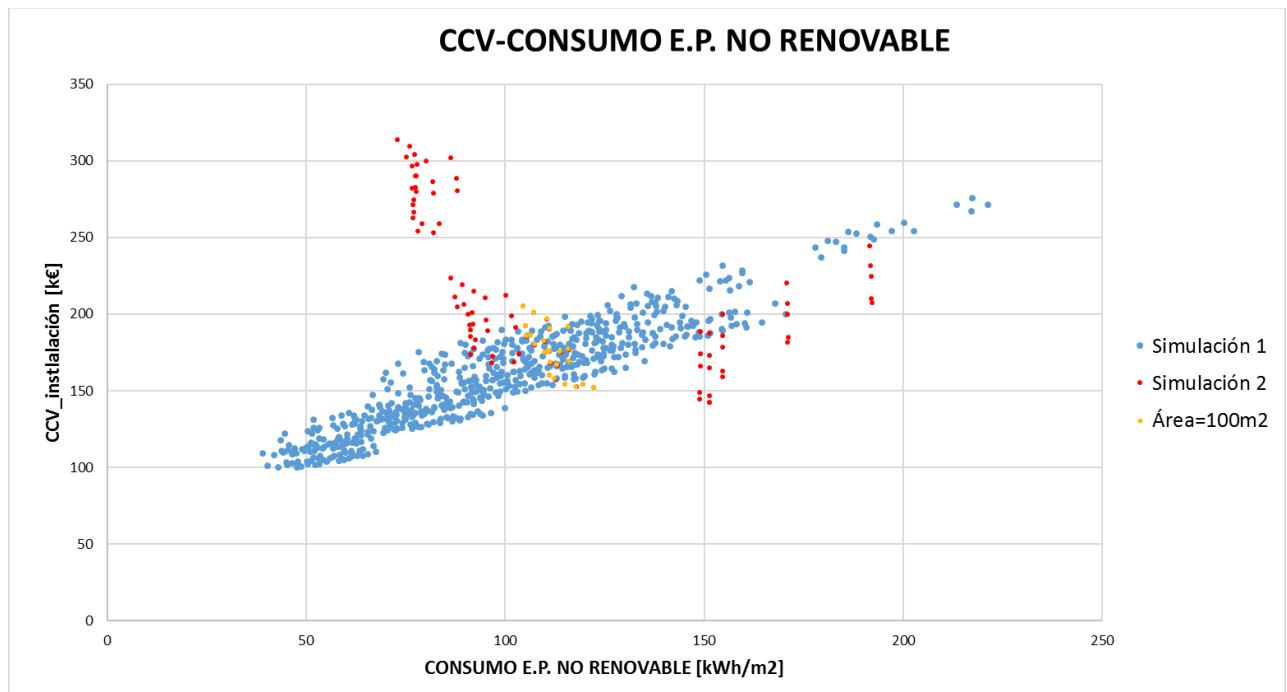


Figura 85. Mezcla de combinaciones, filtrando en simulaciones 2, el área de 100 m². Fuente: Elaboración propia.

Vuelven a aparecer las combinaciones amarillas en la zona de cruce, por lo tanto, se verifica entonces que ambas curvas están igual calculadas y no hay ningún detalle que se haya escapado. Por lo tanto, se pueden comparar y se puede descartar la curva de simulaciones 2 y a partir de ahora como se ha mencionado se buscará la combinación óptima en simulaciones 1. A partir de estas dos simulaciones, se podría plantear, una tercera simulación en la que se fijase una potencia de caldera más baja y así trabajar con áreas de panel más grandes con posibilidades para estar en la zona de óptimos. De esta manera se obtendrían también mayores porcentajes de renovables cubriendo ACS. Sin embargo, se decide continuar y trabajar con esta primera simulación ya mencionada y estudiada.

9.3.2. Curvas de CCV filtradas

Una vez se ha descartado la curva de la simulación 2, se pretende estudiar en detalle la curva que contiene los casos óptimos. Para empezar el estudio se ha considerado filtrar con colores cada una de las variables, según el valor en cada combinación. Es decir, si filtramos por rendimiento, a cada valor del rendimiento le corresponderá un color. Por ello, cada combinación que tenga dicho rendimiento aparecerá del correspondiente color. Esto se ha aplicado para cada una de las variables, generándose así una gráfica para cada variable a dimensionar. Con las siguientes gráficas lo que se pretende es estudiar en detalle cómo se agrupan las combinaciones y ver que valores han sido más acertados y cuáles menos a la hora de realizar la simulación. Las gráficas que se van a mostrar a continuación serán las de consumo de energía primaria no renovable, que son las que se van a estudiar en detalle.

En la Figura 86 se ha filtrado el rendimiento, se puede ver en cada color cada uno de los valores propuestos. Se aprecia en la zona donde estará el mínimo que las combinaciones destacan por ser las de más altos rendimientos.

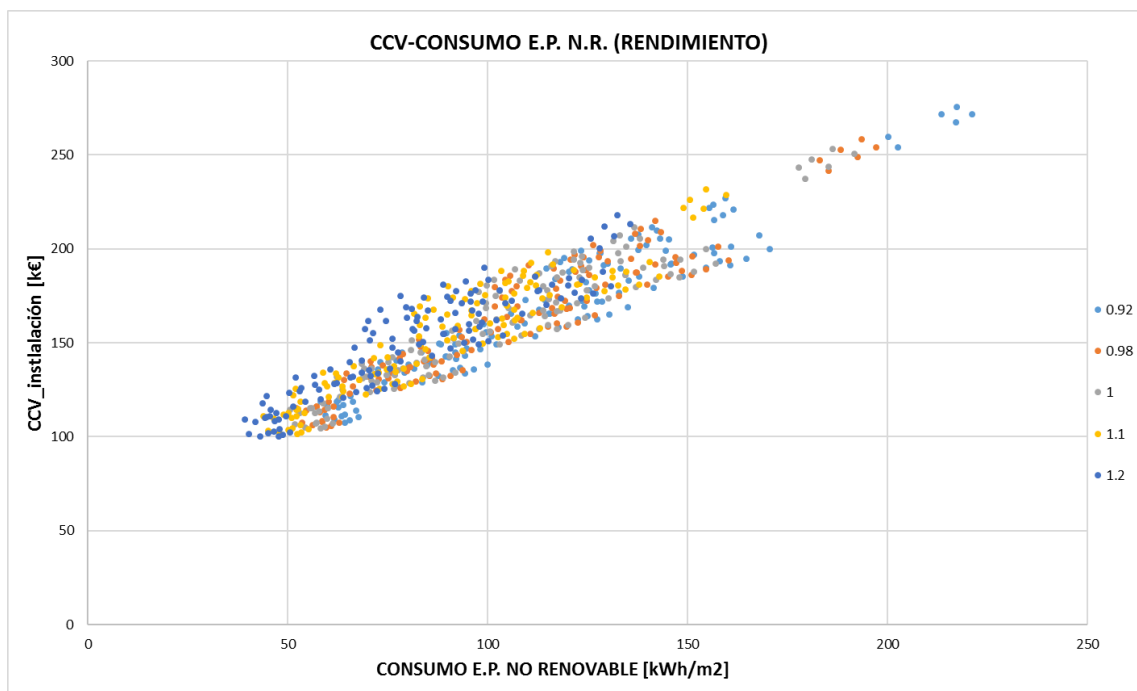


Figura 86. Combinaciones filtradas por rendimiento nominal de la caldera. Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 87 se ha filtrado por potencia nominal de la caldera. De las filtraciones que se han probado, esta puede ser la más clara a la hora de determinar que la combinación óptima tendrá una potencia de 20kW.

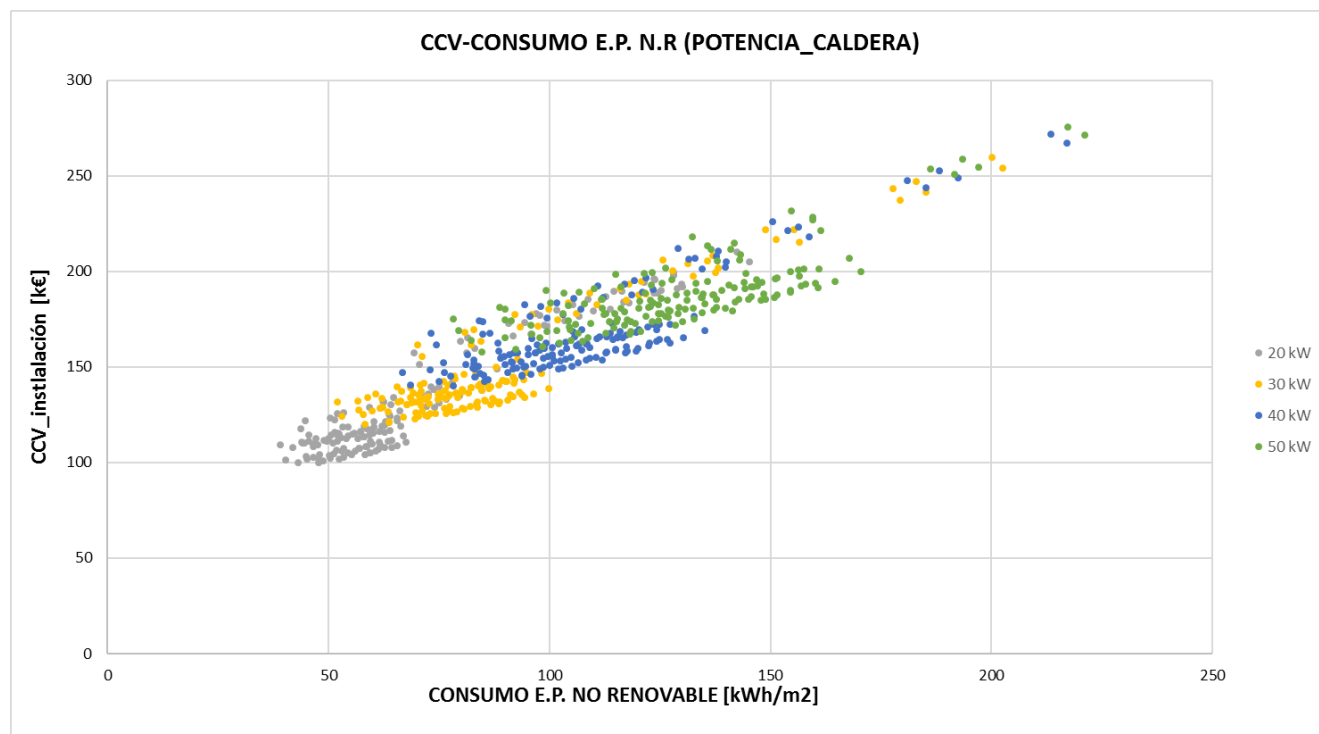


Figura 87. Combinaciones filtradas por potencia nominal de la caldera. Fuente: Elaboración propia.

En las siguientes combinaciones se han filtrado los volúmenes de los tanques entre los distintos valores propuestos. Estas dos últimas gráficas son menos orientativas a la hora de ver claro si algún volumen es decisivo. Aun así, en la Figura 88 se pueden comentar algunos resultados que llaman la atención. Se puede observar claramente que el tanque de calefacción de mayor tamaño no se encuentra en la zona de óptimos, siendo él que darían lugar a menores consumos. Esto ocurre debido a que el cambio de volumen de los tanques se hace manteniendo una potencia nominal de la caldera constante, perjudica el fcp y por lo tanto aumento el consumo. Es por ello que, el volumen del tanque de calefacción y la potencia nominal deberían estar dimensionados de la mano para no dar lugar a que la instalación trabaje con bajos valores de fcp.

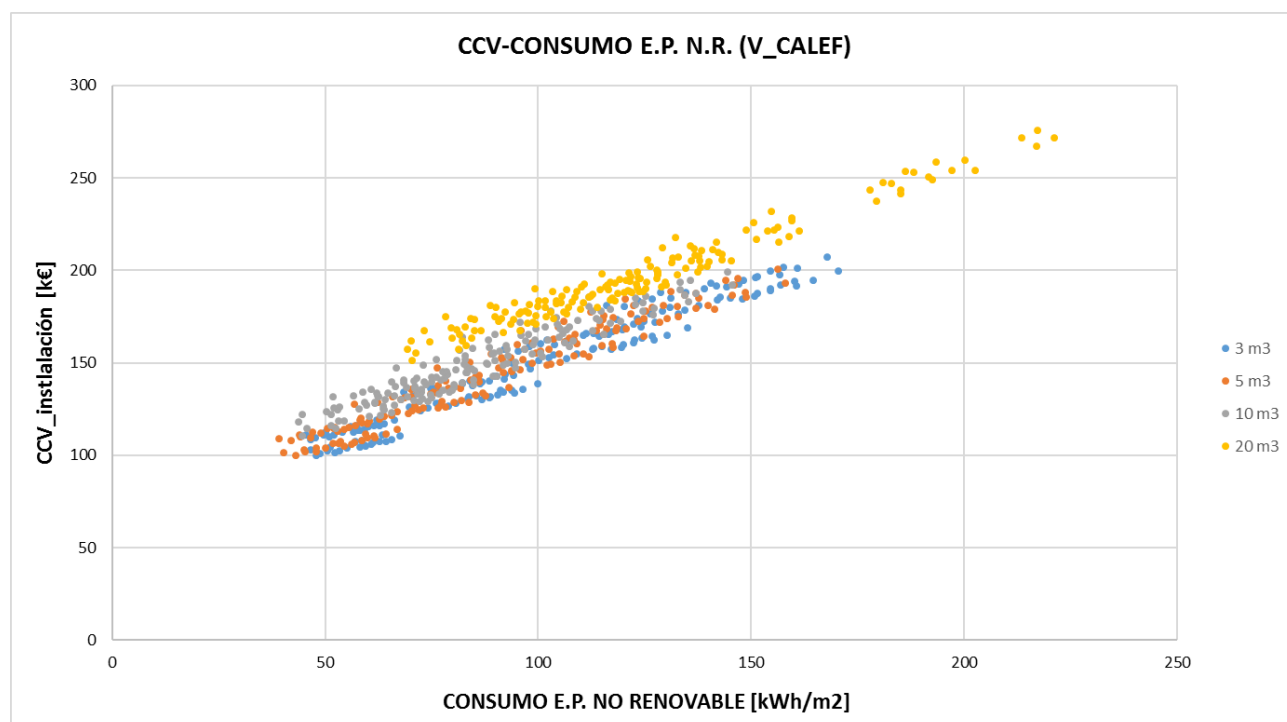


Figura 88. Combinaciones filtradas por volumen del tanque de calefacción. Fuente: Elaboración propia.

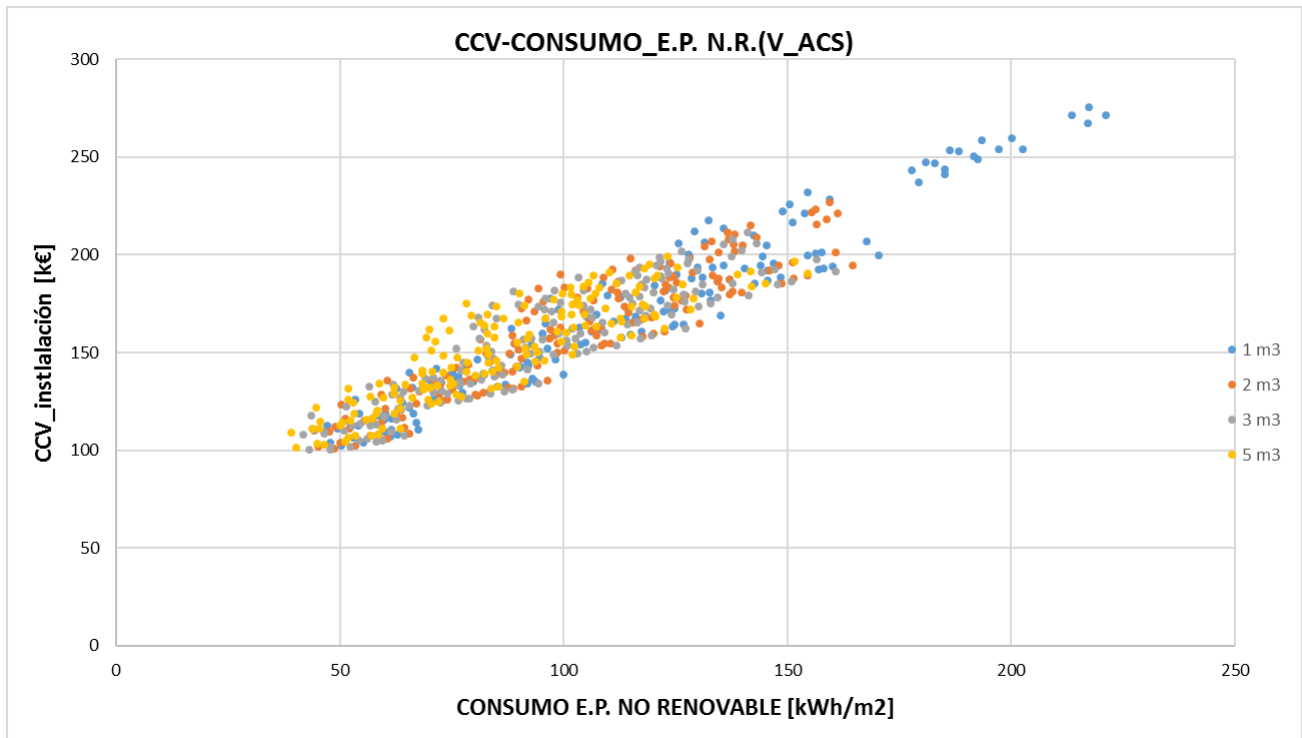


Figura 89. Combinaciones filtradas por volumen del tanque de ACS. Fuente: Elaboración propia.

Después de haber analizado las curvas en detalle, no hay un mínimo claro. Es por ello, que se ha decidido hacer dos estudios más que se expondrán a continuación. El primero de los estudios será ver los sobrecostos de las combinaciones para ayudar a la hora de elegir el óptimo. El segundo estudio se basará en hacer un filtro en las gráficas de CCV para ver las características que tienen en común las combinaciones que se encuentran en la zona de óptimos.

9.4. Otros análisis de las curvas

9.4.1. Comparación de curvas de Sobrecoste

Para hacer un mejor estudio de las combinaciones y para ayudar a la elección del óptimo, se han calculado los sobrecostos de las combinaciones. Con las curvas de inversión inicial que se explicaron en el apartado 9.1. Coste de Ciclo de Vida se obtienen los sobrecostos de toda la instalación para cada combinación. Se han graficado tanto sobrecostos respecto a consumo de energía primaria no renovable, como energía primaria total.

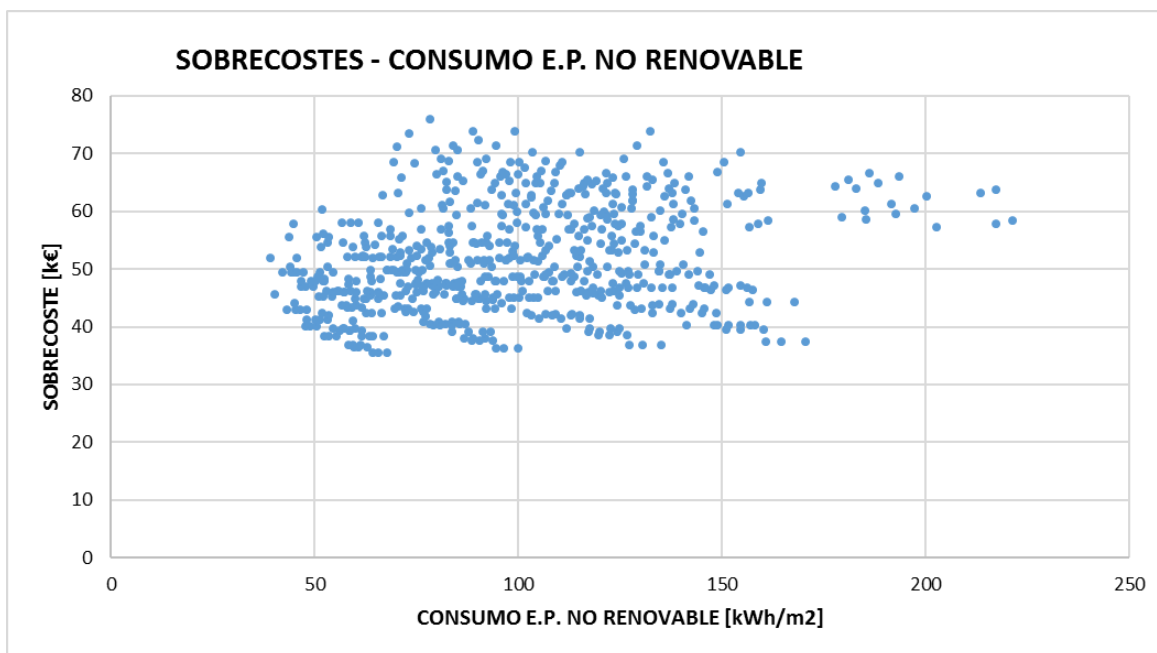


Figura 90. Sobrecostes combinaciones simulación 1, consumo no renovable. Fuente: Elaboración propia.

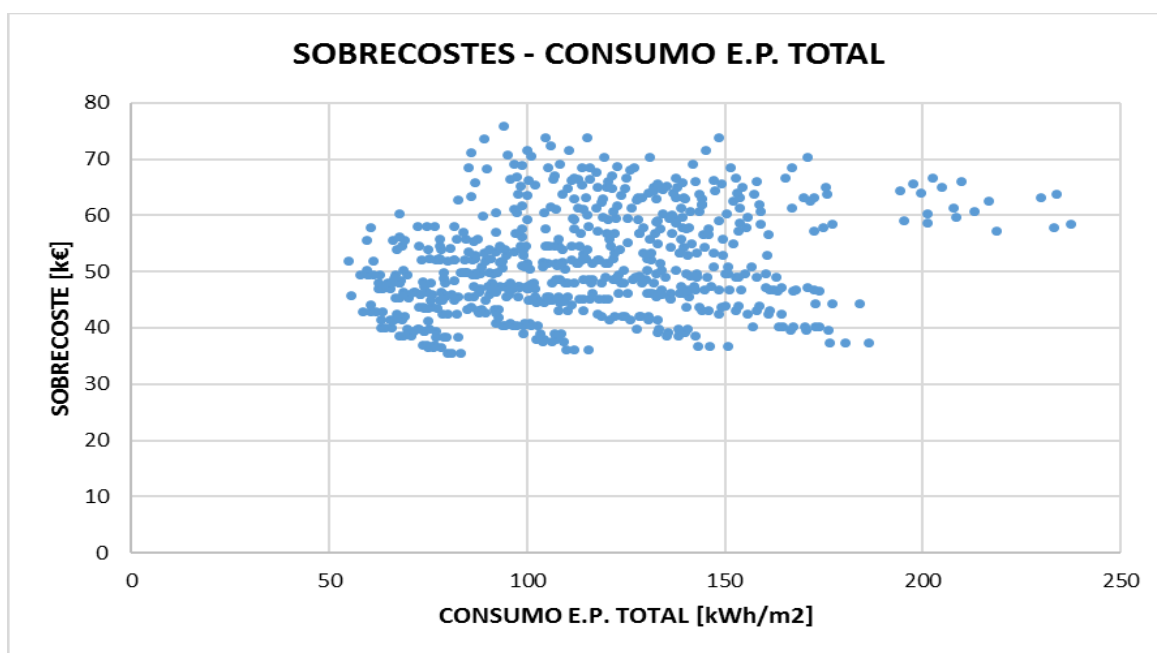


Figura 91. Sobrecostes combinaciones simulación 1, consumo total. Fuente: Elaboración propia.

9.4.1.1. Curvas de Sobrecoste filtradas

Además, se han vuelto a aplicar los filtros de colores para ver en detalle si apoyan los óptimos por los que apostaba el coste de ciclo de vida de las combinaciones. En las siguientes figuras se pueden sacar algunos comentarios, aunque alguna de las gráficas no aportarán nada nuevo, pero si sirven para reafirmar la elección del óptimo y que no haya detalle que se escape.

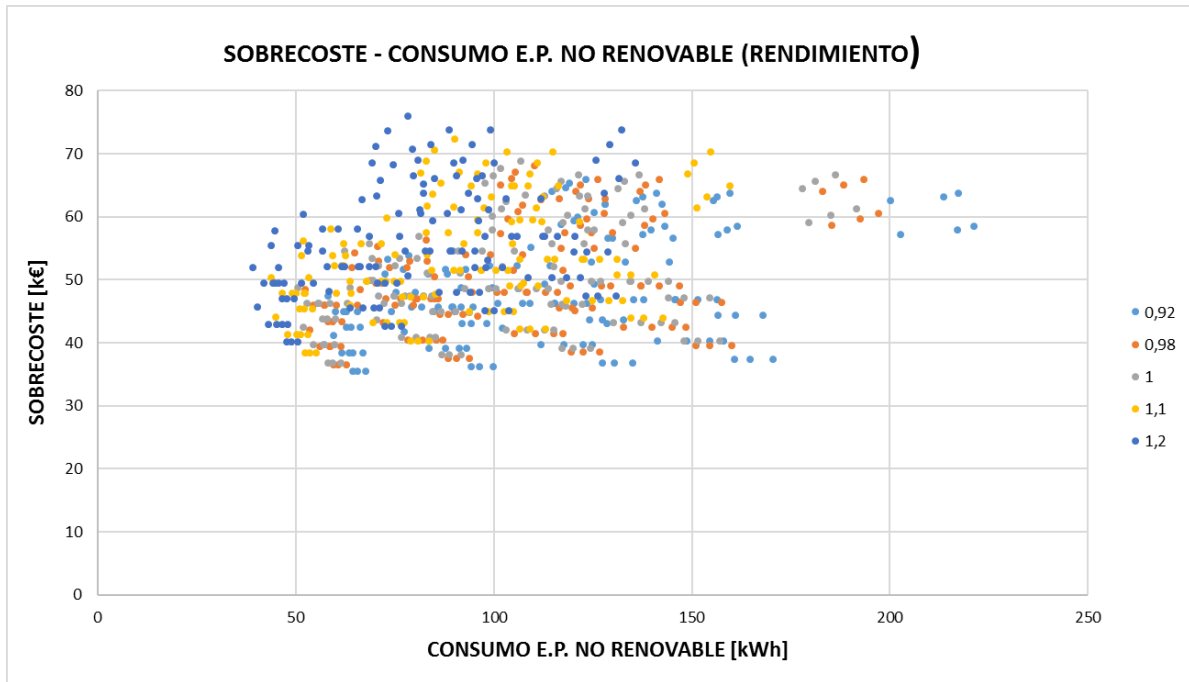


Figura 92. Combinaciones sobrecoste filtradas por rendimiento. Fuente: Elaboración propia.

Una de las cosas que los sobrecostes confirman es que las combinaciones de potencia nominal 20kW son las óptimas, porque además de estar en la zona del mínimo en la curva de CCV también lo está en la curva de sobrecoste.

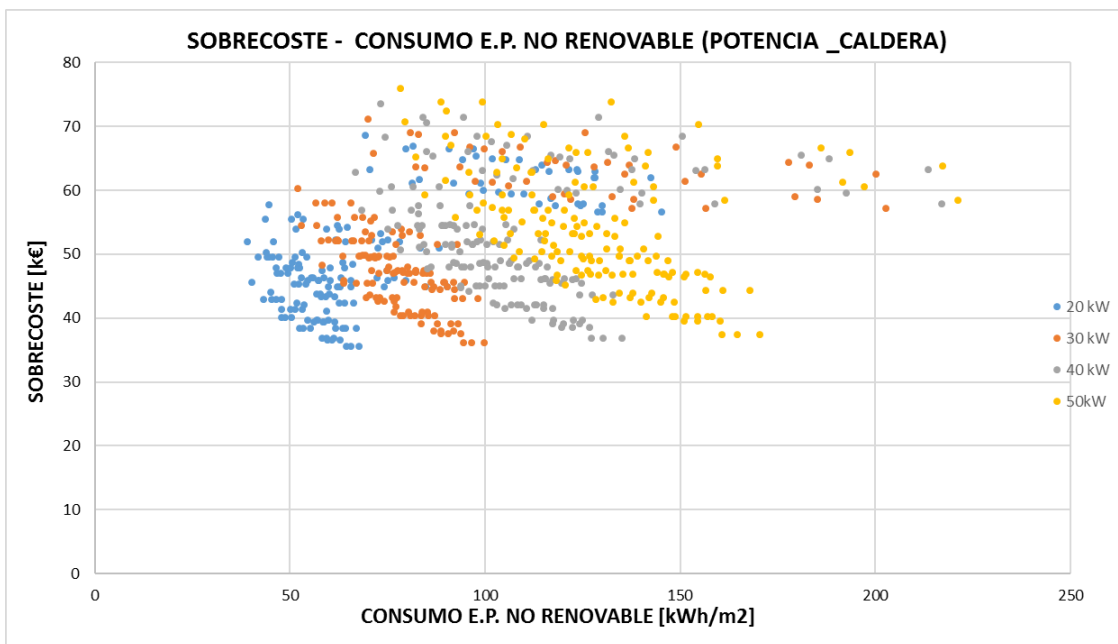


Figura 93. Combinaciones sobrecoste filtradas por potencia nominal de la caldera. Fuente: Elaboración propia.

En Figura 94 se vuelve a ver la situación de la Figura 88, pues altos volúmenes generan altos consumos como se ha comentado en dicha figura.

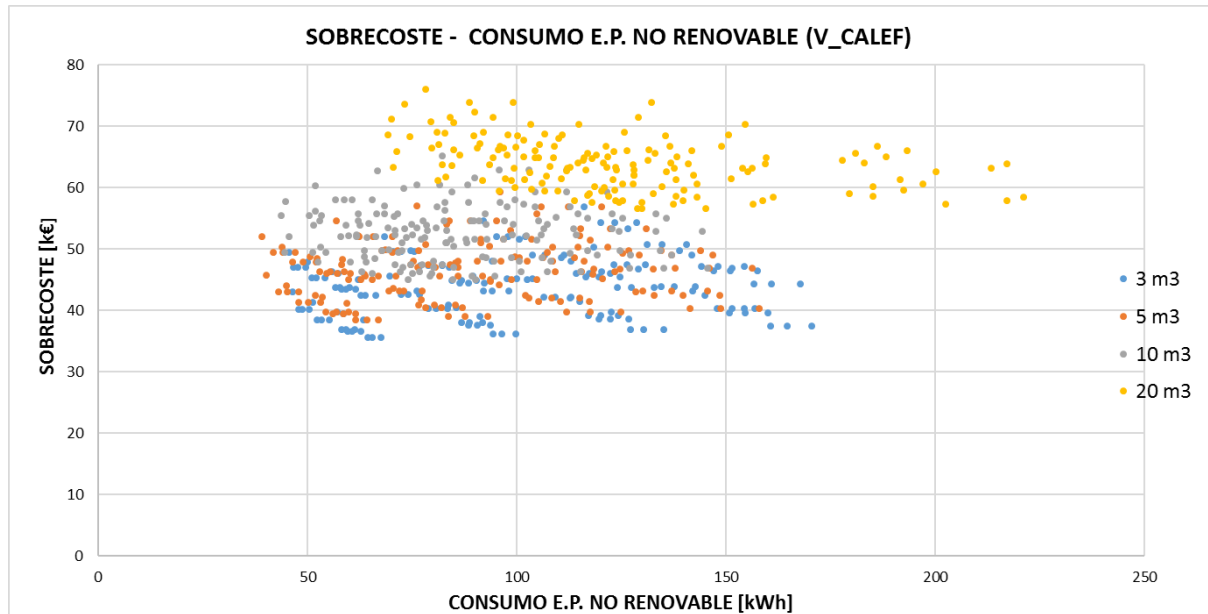


Figura 94. Combinaciones sobrecoste filtradas por volumen tanque calefacción. Fuente: Elaboración propia.

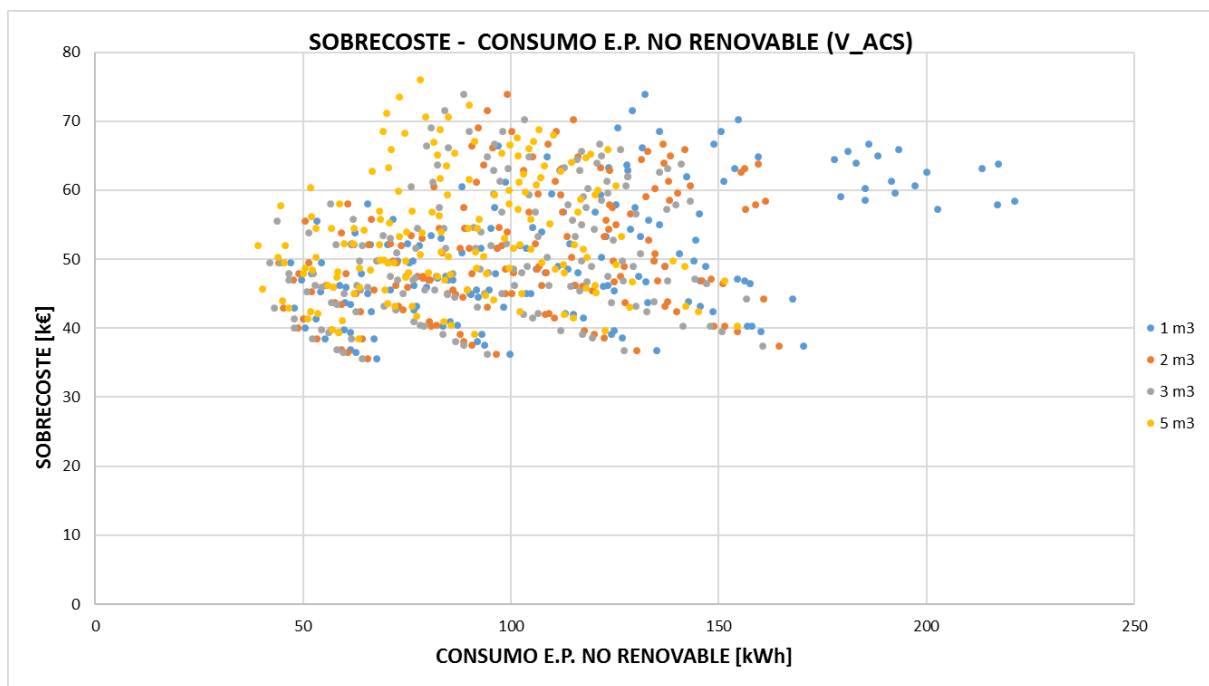


Figura 95. Combinaciones sobrecoste filtradas por volumen tanque ACS. Fuente: Elaboración propia

9.4.2. Zona de óptimos

Mediante programación en Excel, se ha hecho un segundo estudio en detalle de las combinaciones. Con este estudio se ha querido ver qué tienen en común las combinaciones de la zona de óptimos. Se ha considerado que estarán en la zona de óptimos todas las combinaciones cuyos CCV estén por encima del 5% sobre el CCV mínimo. Por el lado del consumo, se han considerado zona de óptimos las combinaciones cuyos consumos de energía primaria estén por encima del 20% sobre la combinación de CCV mínimo. Se han obtenido así, 15 casos que cumplen estos requisitos, un 2.3% del total. Es por ello, que la zona de óptimos se caracteriza por:

- El 100% de los casos de esta zona tienen potencia nominal de caldera: 20 kW.
- El 53% de los casos se caracterizan por tener el rendimiento más alto y el 47% poseen el segundo valor de rendimiento más elevado.
- Con los tanques de calefacción ocurre lo mismo que con el rendimiento, todos los casos se dividen en dos grupos prácticamente iguales, entre los dos volúmenes más pequeños, de 3 y 5m³.
- Para el volumen de ACS se encuentran los casos más repartidos entre los distintos valores propuestos, no es decisiva esta variable.
- El volumen del tanque del panel tiene el 100% de los casos en el valor más pequeño (5m³).

En resumen, la zona de óptimos se caracteriza por las potencias de caldera más pequeñas, los rendimientos más altos y los volúmenes más pequeños de calefacción y del panel y se puede ver reflejado en la Tabla 25.

| P_NOMINAL | | RENDIM_CALD | | V_CALEF | | V_ACS | | V_PANEL | |
|-----------|------|-------------|------|---------|------|-------|------|---------|------|
| 20000 | 100% | 0.92 | 0% | 3 | 53% | 1 | 20% | 5 | 100% |
| 30000 | 0% | 0.98 | 0% | 5 | 47% | 2 | 27% | 10 | 0% |
| 40000 | 0% | 1 | 0% | 10 | 0% | 3 | 27% | 0 | 0% |
| 50000 | 0% | 1.1 | 47% | 20 | 0% | 5 | 27% | 0 | 0% |
| | | 1.2 | 53% | | | | | | |
| | 100% | | 100% | | 100% | | 100% | | 100% |

Tabla 25. Características de los óptimos. Fuente: Elaboración propia.

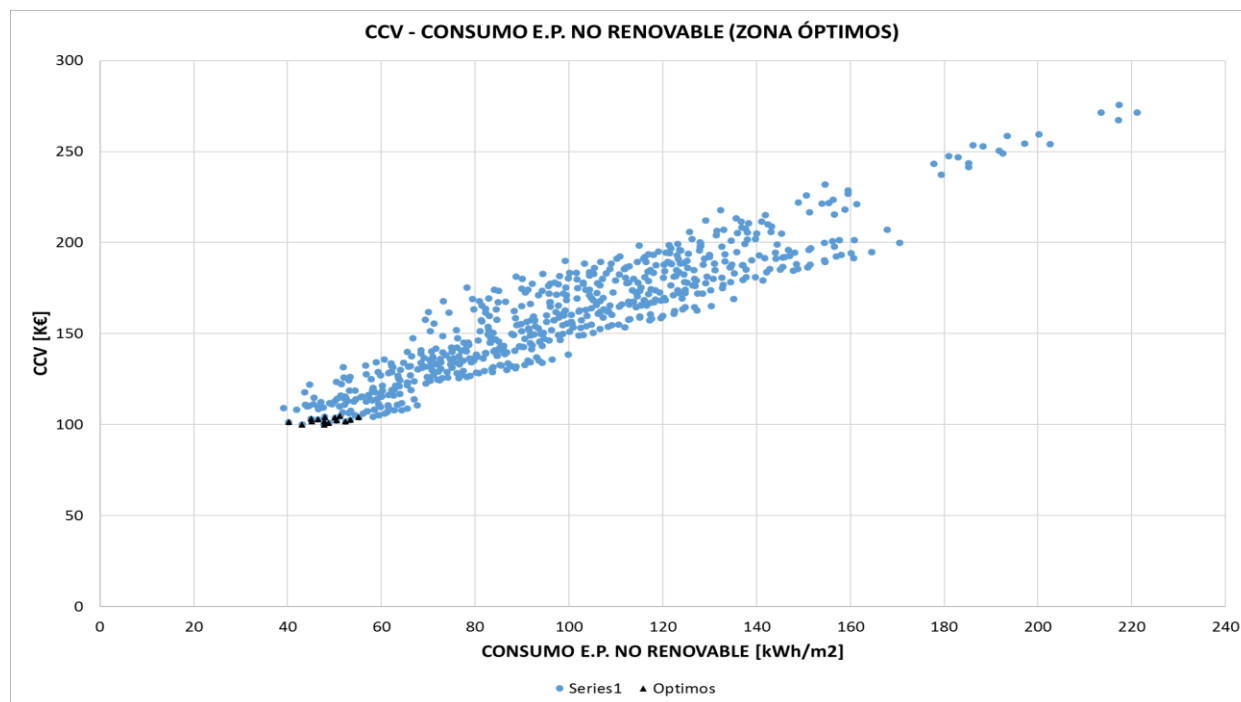


Figura 96. Combinaciones con serie de óptimos. Fuente: Elaboración propia.

9.4.3. Zona de combinaciones menos apropiadas

Si se sitúan en la curva de distribución “CCV – Consumo energía primaria no renovable” los puntos:

- Demanda original, instalación antigua
- Demanda reducida, instalación Antigua

Se puede ver en la Figura 97 que hay una zona de combinaciones que se encuentran entre ambos. Se ha procedido a hacer un estudio en detalle para ver que tienen en común estas combinaciones señaladas.

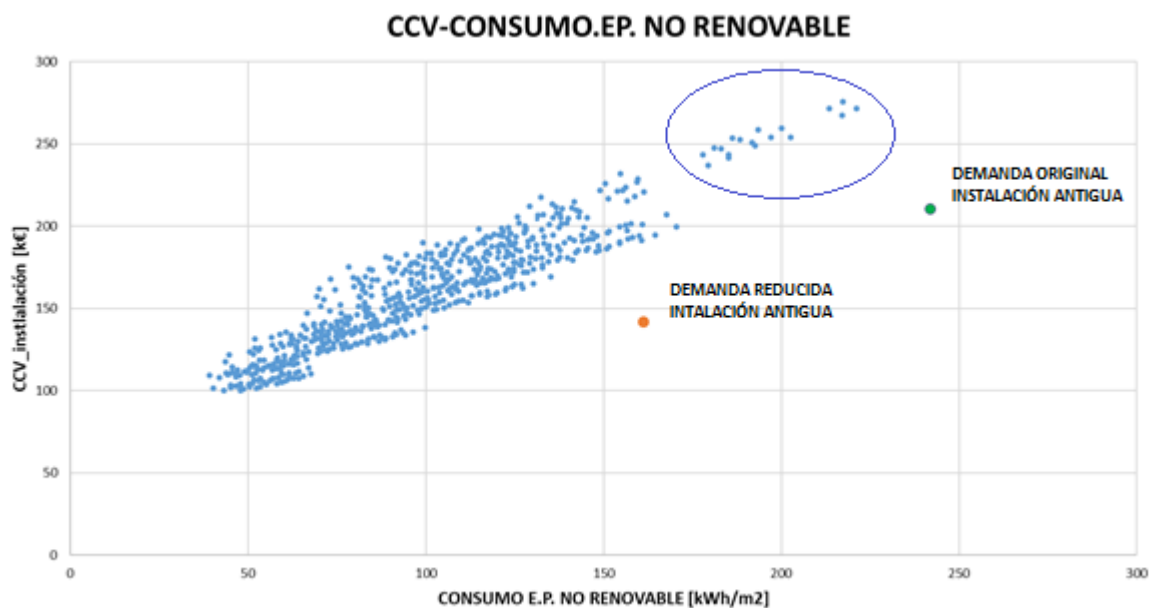


Figura 97. Combinaciones con casos de instalación antigua. Fuente: Elaboración propia.

Como se puede apreciar en Figura 98, estas combinaciones tienen en común que todos tienen un volumen de ACS de 1 m³, el menor volumen de ACS de los propuestos. Este volumen lo que consigue es que el tanque se tenga que calentar continuamente, porque puede almacenar muy poca agua y mantiene el calor mucho menos tiempo que uno mayor. Además, también tiene en común que son combinaciones de grandes potencias lo que hace dar lógica a esos altos consumos y poco rendimiento que también contribuye al aumento del consumo. Por otro lado, que sean altas potencias de caldera, influirá en los altos costes de CCV.

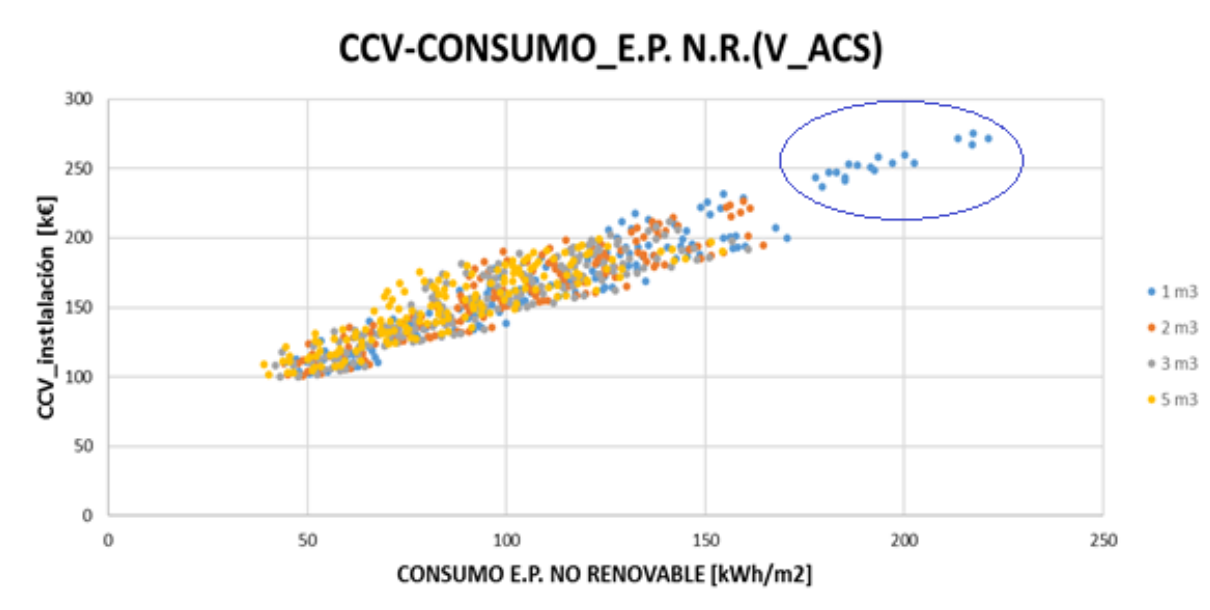


Figura 98. Combinaciones con filtro en volumen ACS. Fuente: *Elaboración propia.*

10 INSTALACIÓN ÓPTIMA

El camino del progreso no es ni rápido ni fácil.

-Marie Curie

10.1. Características combinación óptima

Finalmente, y una vez se ha estudiado en detalle la curva de combinaciones mediante distintos procedimientos, se puede elegir una combinación óptima que dé lugar a la instalación definitiva y con ello a la situación definitiva del edificio. En las siguientes dos gráficas (Figura 99 y Figura 100) se ven de nuevo los puntos de la curva de combinaciones. Se ha hecho zoom, despreciando las combinaciones menos apropiadas, pues la instalación óptima no será elegida de entre estas. Además, así se podrá visualizar mejor la curva de combinaciones, en concreto la zona de óptimos. Se puede ver en la Figura 100 y Figura 102 señalada la combinación seleccionada para la nueva instalación.

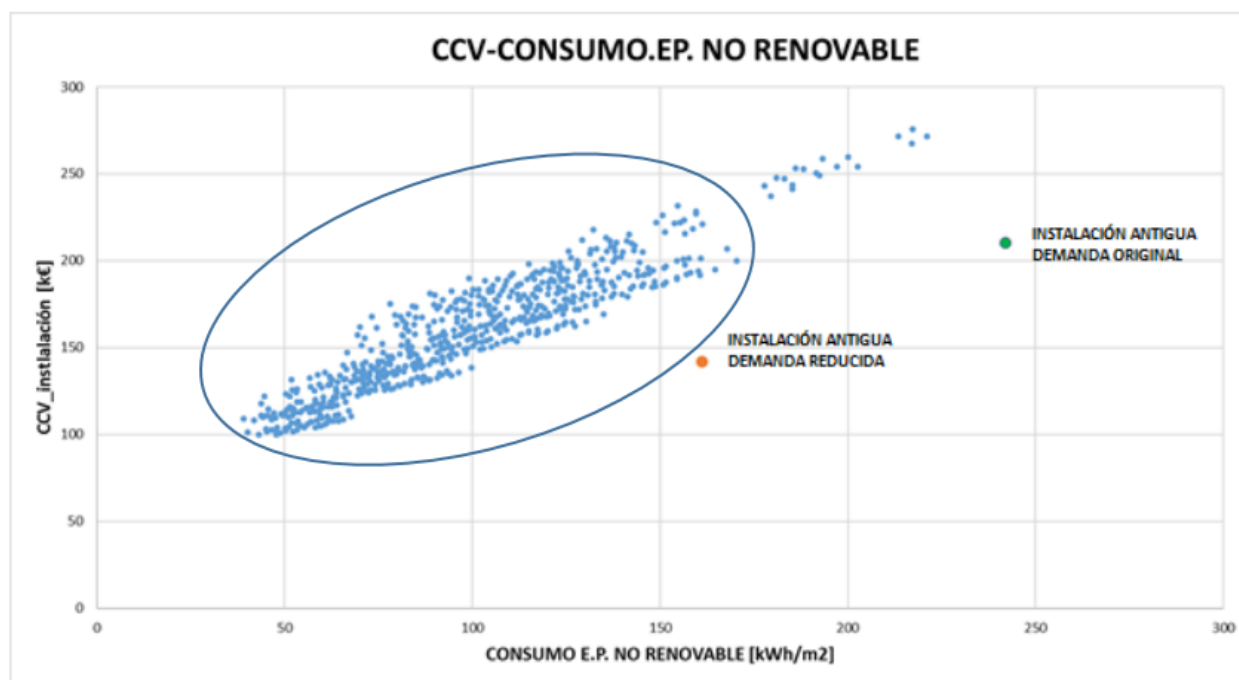


Figura 99. Combinaciones consumo no renovable. *Fuente: Elaboración propia.*

En la Figura 100 se señala en rojo la combinación elegida como óptima, es aquella de menor CCV de todas. Se elige este óptimo porque es el de menor CCV, aunque haya otras combinaciones con menor consumo y mayor CCV. Solo quedará ver si se comprueba las limitaciones de consumo para señalarla como definitiva.

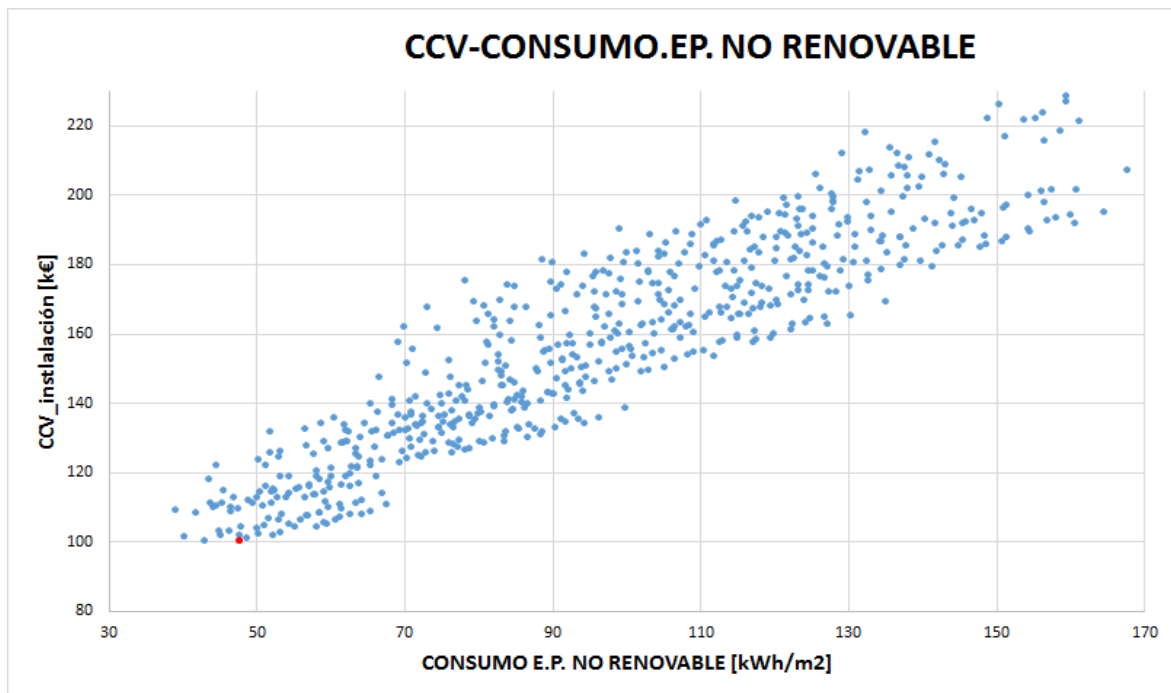


Figura 100. Zoom combinaciones consumo no renovable. *Fuente: Elaboración propia.*

Esta combinación seleccionada tiene las características presentadas en la Tabla 26, y como se puede comprobar coinciden en su mayoría con las cualidades que tenían en común las combinaciones de la zona de óptimos.

| CASO | POTENCIA_NOM | RENDIMIENTO_NOM | V_CALEF | V_ACS | V_PANEL | ÁREA_PANEL |
|------|--------------|-----------------|------------------|------------------|------------------|--------------------|
| 133 | 20kW | 1.2 | 3 m ³ | 3 m ³ | 5 m ³ | 100 m ² |

Tabla 26. Características caso óptimo. *Fuente: Elaboración propia*

Se va a señalar también en rojo la combinación óptima en la Figura 101, la cual compara el sobrecoste con el consumo de energía primaria no renovable. Para verlo de nuevo más en detalle, se hará zoom, simplificando la gráfica al despreciar las combinaciones menos apropiadas.

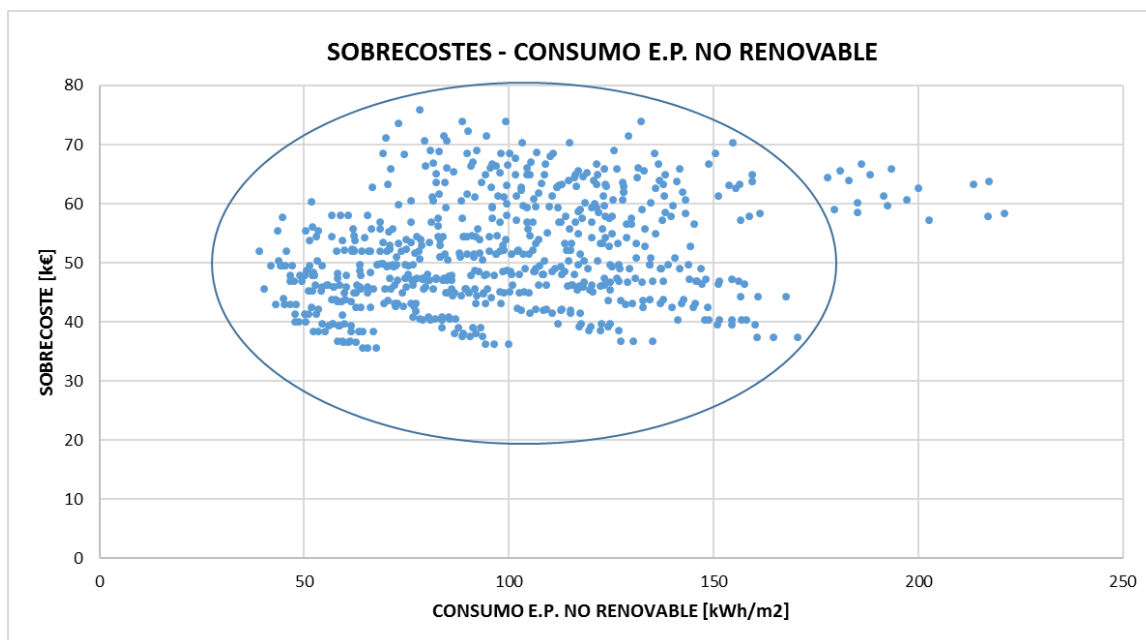


Figura 101. Combinaciones sobrecoste con consumo no renovable. Fuente: Elaboración propia.

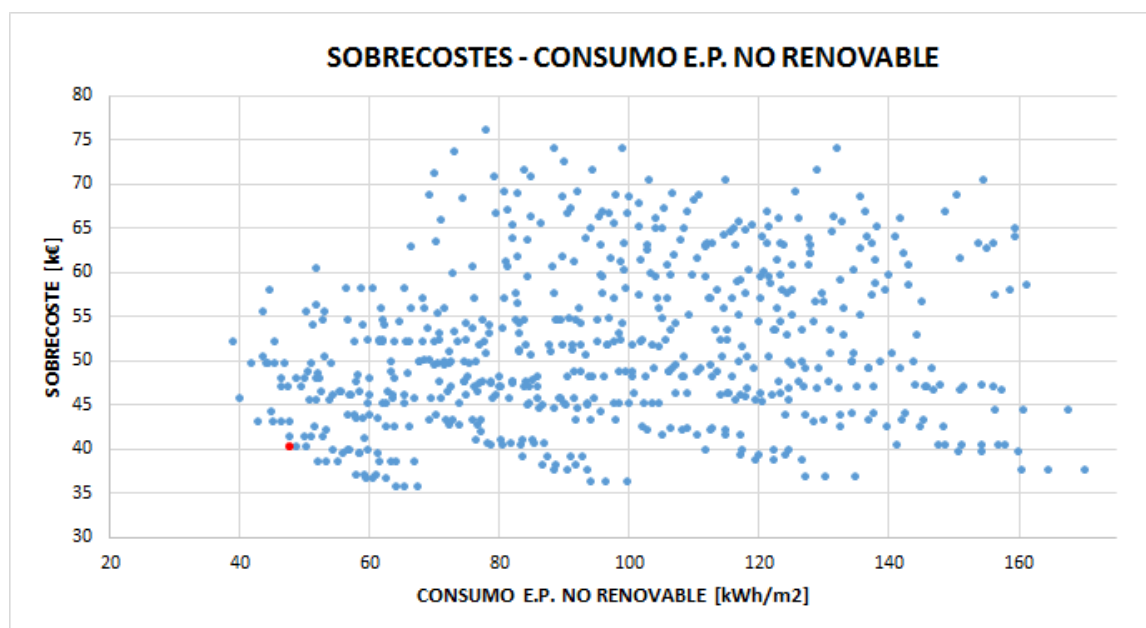


Figura 102. Zoom combinaciones sobrecoste con consumo no renovable. Fuente: Elaboración propia.

10.2. Cumplimiento de la normativa

El óptimo se caracteriza por un consumo de energía primaria no renovable de 47.8 kWh/m² y un consumo de energía primaria total de 63.2 kWh/m². Se conseguiría así una reducción del consumo total de un 61% pues se partía de 161.14 kWh/m² en la situación de demanda reducida e instalación original. El CCV de la combinación óptima es de 100.03 k€ y el sobrecoste es de 40.07 k€. Con el área de 100 m² se cubre un 32.69 % del ACS, es decir no se cumpliría el mínimo exigido del 50 % según la normativa. La combinación cuenta con un total 35 horas no cubiertas al año. Pero lo que más interesa es saber si se cumplen los límites según la normativa vigente. Como se explicó en el apartado 7.5.1 la instalación propuesta debe cumplir las exigencias mínimas de consumo de energía primaria para que sea válido el proyecto. Para conocer los límites del centro simplemente se requieren los datos de zona climática en invierno y el nivel de fuentes internas. Como se sabe el centro se ubica en Jaén, zona climática C4, y al nivel de fuentes internas le corresponde un valor de 6.44 W/m². El DB-HE tiene por lo tanto los siguientes valores como limitaciones:

Tabla 3.1.b - HE0
Valor límite $C_{ep,nren,lim}$ [kw·h/m²·año] para uso distinto del residencial privado

| Nivel de carga interna CFI [W/m ²] | Zona climática de invierno | | | | | |
|---|----------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|
| | α | A | B | C | D | E |
| Baja, CFI < 6 | 100 | 85 | 80 | 65 | 50 | 40 |
| Media, $6 \leq CFI < 9$ | 135 | 120 | 110 | 100 | 85 | 75 |
| Alta y muy alta, $9 \leq CFI$ | 160 | 145 | 135 | 125 | 110 | 100 |
| En territorio extrapeninsular se multiplicarán los valores de la tabla por 1,40 | | | | | | |

Figura 103. Límites para consumo energía primaria, no renovable. Fuente: DB-HE. [4]

Tabla 3.2.b - HE0
Valor límite $C_{ep,tot,lim}$ [kw·h/m²·año] para uso distinto del residencial privado

| Nivel de carga interna CFI [W/m ²] | Zona climática de invierno | | | | | |
|---|----------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|
| | α | A | B | C | D | E |
| Baja, CFI <= 6 | 200 | 190 | 185 | 175 | 165 | 155 |
| Media, $6 <= CFI < 9$ | 230 | 220 | 215 | 205 | 195 | 185 |
| Alta y muy alta, CFI >= 9 | 265 | 250 | 245 | 235 | 225 | 215 |
| En territorio extrapeninsular se multiplicarán los valores de la tabla por 1,25 | | | | | | |

Figura 104. Límites para consumo energía primaria total. Fuente: DB-HE. [4]

Para verificar si el consumo del edificio supera los límites hay que añadir tanto el consumo de iluminación como el de refrigeración, como se ve en la siguiente fórmula:

$$Cons_{E,P} = Cons_{CALEF} + Cons_{REFRIG} + Cons_{ILUM} + Cons_{ACS} \left[\frac{kWh}{m^2} \right]$$

En la Figura 105 se puede ver para consumo no renovable las combinaciones que cumplen la limitación de consumo, quedando a la izquierda las combinaciones que están por debajo del valor límite y a la derecha las combinaciones que están por encima del límite y por lo tanto no cumplen la norma. Se puede ver que ni la situación inicial ni la demanda reducida cumple la normativa. Por otro lado, en la Figura 106 se puede ver la gráfica que considera el consumo total y su correspondiente limitación. En este caso hay más combinaciones que cumplen la normativa y por ejemplo la situación de “instalación antigua y demanda reducida” también cumple la normativa.

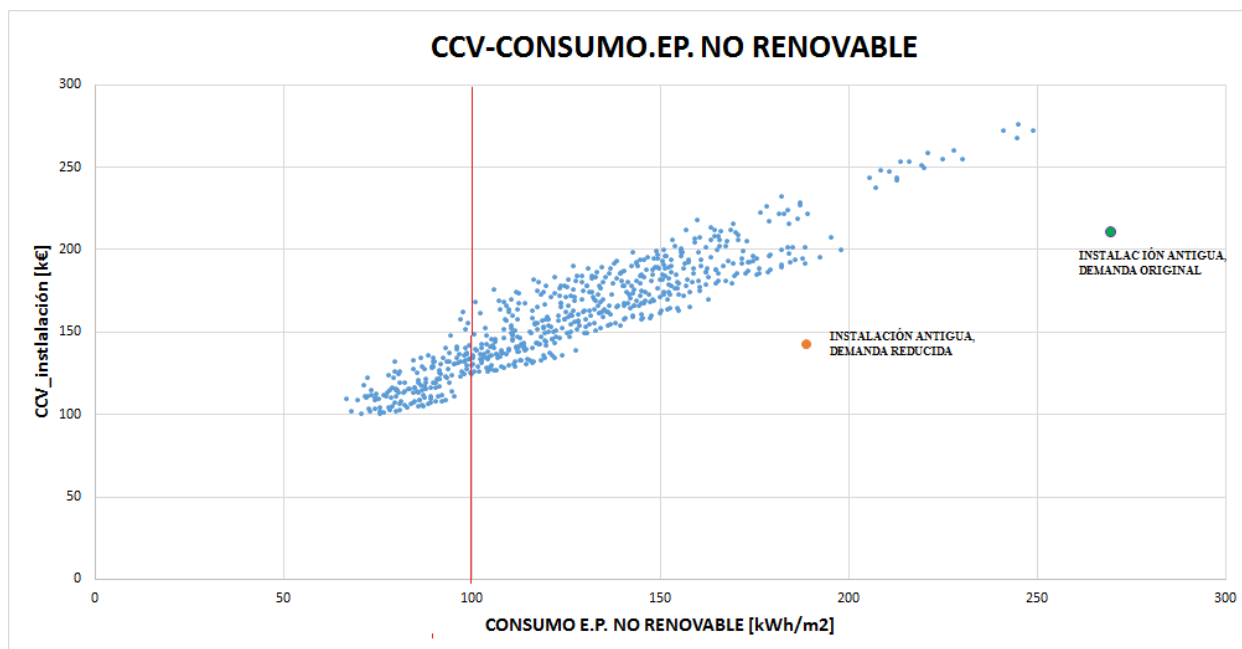


Figura 105. Limitación por normativa aplicada a combinaciones, consumo no renovable. Fuente: Elaboración propia.

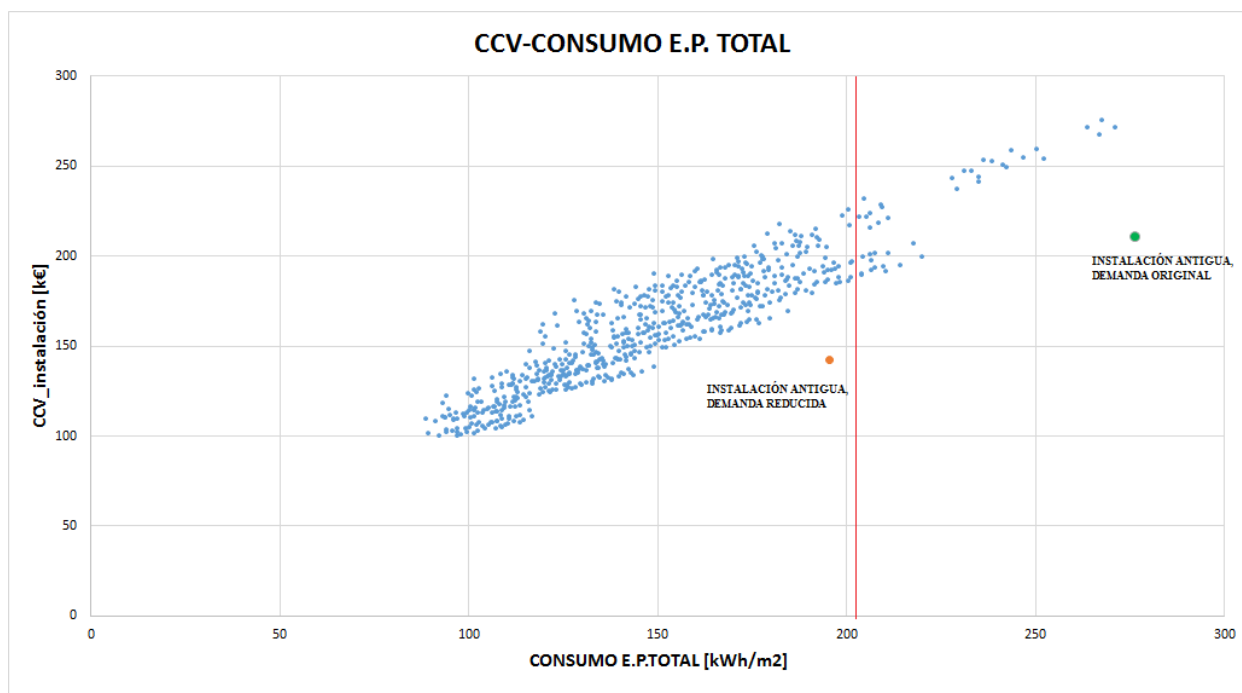


Figura 106. Limitación por normativa aplicada a combinaciones, consumo total. Fuente: Elaboración propia.

Se obtienen así unos valores de 75.6 kWh/m² de consumo no renovable y un consumo de 96.9 kWh/m² de consumo total para la combinación óptima. Ambos valores están por debajo de los límites del Código Técnico. Si se desglosan estos valores, se tiene que:

$$Cons_{CALEF.NR} + Cons_{ACS.NR} = 47.8 \text{ kWh/m}^2$$

$$Cons_{CALEF.TOT} + Cons_{ACS.TOT} = 63.2 \text{ kWh/m}^2$$

La parte de consumo de refrigeración se considerará a partir del sistema de referencia, ya que la instalación diseñada no tiene generación de frío. Partiendo de la demanda reducida en refrigeración a 4.7 kWh/m^2 y dividiendo este valor entre un EER de 2, se obtiene el consumo de refrigeración. Se le aplica un factor de paso para electricidad obtenido de la Figura 78. Este factor de paso es de $1.95 \text{ kWh}_{EP,NR}/\text{kWh}_{EF}$ y $2.37\text{kWh}_{EP}/\text{kWh}_{EF}$ da lugar al siguiente consumo de refrigeración.

$$Cons_{REFRIG.NR} = 4.59 \text{ kWh/m}^2$$

$$Cons_{REFRIG.TOT} = 5.57 \text{ kWh/m}^2$$

Para el consumo de iluminación tenemos el dato obtenido en 4.2.2. Demanda de iluminación. Considerando un rendimiento de 100% el consumo es de 11.88kWh/m^2 . Se debe aplicar de nuevo el factor de paso de electricidad para tener la energía primaria en iluminación, $1.95 (\text{kWh}_{EP,NR}/\text{kWh}_{EF})$ y $2.37\text{kWh}_{EP}/\text{kWh}_{EF}$. Se obtiene así el siguiente consumo en iluminación.

$$Cons_{ILUM.NR} = 23.21 \text{ kWh/m}^2$$

$$Cons_{ILUM.TOT} = 28.13 \text{ kWh/m}^2$$

Por lo tanto, tras comprobar los valores límites y ver que la combinación elegida está dentro de los límites, se terminaría aquí el propósito del proyecto.

11 CONCLUSIONES

Cada vez la normativa con respecto a la eficiencia energética es más exigente. El alto nivel de vida en el que vivimos ha llevado a que la reducción del consumo sea necesario para alargar los años de vida de nuestro planeta. Los objetivos de reducir emisiones, aprovechar energías limpias o controlar y reducir el consumismo que nos rodea, son necesarios para la simple supervivencia.

Las exigencias de la normativa para buscar edificios eficientes llevan a la actualización y mejora de las instalaciones de climatización y por supuesto al mejor diseño de los edificios. Nuevos equipos, con menos pérdidas, con nuevos materiales y con nuevas técnicas. El avance de la tecnología está relacionado directamente con la eficiencia de esta.

En este proyecto, se ha tenido como objetivo principal la rehabilitación de un colegio (zona climática C4), siguiendo la normativa actual y se han hecho distintas propuestas para mejorar la situación actual del centro. La primera medida buscaba una reducción de demanda del propio edificio y por ello planteaba la mejora de las transmitancias térmicas de los muros, ventanas, reducción del factor solar, mejora de puentes térmicos y mejora tanto de la ventilación diaria del edificio como de la nocturna. Esta primera propuesta de mejora ya llevaría al edificio a alcanzar clase de eficiencia A, respecto a demanda. Se conseguiría reducir la demanda en un 87%.

Tras esta primera medida, se ha hecho una segunda, planteando la sustitución de la instalación de climatización del centro por una de menor consumo. Para el diseño de esta instalación se ha utilizado TRNSYS, un software muy adecuado para diseñar, optimizar, y hacer un análisis detallado y transitorio de instalaciones de climatización en paso de tiempo corto.

Se propone la implantación de una caldera de condensación para cubrir la demanda de calefacción y a su vez esta nueva caldera, servirá de apoyo a la demanda de ACS del centro. Por otro lado, el principal equipo generador encargado de cubrir la demanda de ACS serán paneles solares. Además, estos paneles solares aportarán la renovabilidad a la instalación. A través de esta propuesta se reducirá un 61% del consumo total con respecto a la instalación original.

Finalmente, para la elección de la alternativa óptima en ambas medidas, se ha estudiado el coste de ciclo de vida de las distintas propuestas, pues es la mejor forma de saber que se va a invertir en un proyecto de rehabilitación adecuado. Esta combinación óptima deberá cumplir las limitaciones de consumo según el Código Técnico, tanto en el caso de consumo de energía primaria no renovable como de energía primaria total.

Gracias a todo ello, se han obtenido unas condiciones de confort que pueden ser combinadas con el consumo casi nulo, al fin y al cabo, el propósito de este Trabajo de Fin de Grado.

REFERENCIAS

[1] Consejo Superior de Colegios de Arquitectos de España: Edificios de consumo de energía casi nulo (Nzeb): un gran reto del sector de la construcción en Europa, Artículo publicado en la sección del CSCAE en la revista Habitat Futura nº57, 2015

Disponible en: <https://www.cscae.com/index.php/es/conoce-cscae/area-tecnica/todas-las-noticias43/3543-edificios-de-consumo-de-energia-casi-nulo-nzeb-un-gran-reto-del-sector-de-la-construccion-en-europa>

[2] Agencia Estatal Boletín Oficial del Estado, DOUE nº 208, 2016

Disponible en: <https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=DOUE-L-2016-81405>

<https://www.boe.es/doue/2016/208/L00046-00057.pdf>

<https://www.boe.es/buscar/pdf/2007/BOE-A-2007-2007-consolidado.pdf>

[3] Remica, 2018 :2018 será un año clave para la implantación de edificio EECN

Disponible en: <https://remicaserviciosenergeticos.es/blog/implantacion-edificios-eecn/>

[4] Documento Básico HE. Ahorro de Energía.

Disponible en: https://www.apabcn.cat/Documentacio/areatecnica/legislacio/CTE_DB_HE.pdf

[5] Ministerio para la Transición Ecológica. Energía y desarrollo sostenible (n.a)

Disponible en:

<https://energia.gob.es/desarrollo/EficienciaEnergetica/RITE/Paginas/InstalacionesTermicas.aspx>

[6] Ministerio de Energía, Turismo y Agenda Digital: La energía en España, 2016

Disponible en: <https://ceiden.com/wp-content/uploads/2018/01/La-Energ%C3%ADa-en-Espa%C3%B1a-2016.pdf>

[7] IDAE: Consumo de Energía Final, 2018

Disponible en: <http://sieeweb.idae.es/consumofinal/bal.asp?txt=2016&tipbal=t>

[8] Ayuntamiento de Sevilla, auditoria Novotec, 2018

[9] Construmática: Metaportal de Arquitectura, Ingeniería y Construcción. España: Zonas climáticas por provincia.

Disponible en:

https://www.construmatica.com/construpedia/Espa%C3%B1a:_Zonas_Clim%C3%A1ticas_por_Provincia

[10] ARQTECAS: Creando espacios, Como mejorar la eficiencia energética de los edificios antiguos, 2018.

Disponible en: <https://www.arqtecas.es/como-mejorar-la-eficiencia-energetica-de-los-edificios-antiguos/>

[11] Guía sobre Gestión de la Demanda Energética del Edificio, Madrid 2014.

Disponible en: <https://www.fenercom.com/pdf/publicaciones/Guia-sobre-Gestion-de-la-Demanda-Energetica-del-Edificio-fenercom-2014.pdf>

[12] Temperatura del agua de red en capitales de provincia de España. Guía suelo solar, 2008.

Disponible en: <https://suelosolar.com/guiasolares/acs/temph2oes.asp>

[13] Jiménez Sánchez, G.G. Estudio de alternativas para rehabilitación energética: Aplicación a manzana cerrada en Parque Alcosa (Sevilla), US; 2016.

- [14] Arquitectura y Energía. El confort térmico (n.a.)
Disponible en: <http://www.arquitecturayenergia.cl/home/el-confort-termico/>
- [15] Wikipedia, 2019: Climatización
Disponible en: <https://es.wikipedia.org/wiki/Climatizaci%C3%B3n>
- [16] Romero Rodríguez, L; Análisis de la reducción de consumos energéticos en un edificio al integrar un sistema fotovoltaico y de micro-generación mediante TRNSYS, US; 2014.
- [17] PFC: Diseño de una instalación solar térmica con aplicaciones de ACS, calefacción y climatización para un edificio situado en Segovia. Vanesa Martínez Martínez, 2011
Disponible en: <https://core.ac.uk/download/pdf/30044276.pdf>
- [18] Termosolar, 2012 ¿Cómo funciona un calentador solar?
Disponible en: <http://www.termosolar.com.uy/index.php/productos/calentadores-como-funciona>
- [19] Usos Energía Solar. Community blog
Disponible en: <http://usosenergiasolar.energia-rural.com/>
- [20] TuAndCo, 2014: Cómo funciona una caldera de condensación
Disponible en: <https://www.tuandco.com/aprendeymejora/como-funciona-una-caldera-de-condensacion>
- [21] Tecnología Junkers en condensación, 2018
Disponible en: https://www.junkers.es/usuario_final/productos/explicacion_tecnologias/condensacion/condensacion
- [22] TuAndCo, 2014: Cómo funciona un acumulador de agua caliente
Disponible en: <https://www.tuandco.com/aprendeymejora/como-funciona-un-acumulador-de-agua-caliente/>
- [23] LAPESA Documento. Prevención de la legionelosis en instalaciones de ACS
- [24] HidroDiselec: Bombas de circulación, 2015
Disponible en: <https://www.diselec.es/material-de-fontaneria/calefaccion/bombas/>
- [25] Calener GT- Grandes Edificios Terciarios -Manual de curvas (IDAE); 2009
- [26] TRNSYS 16 MANUAL. Volume 4: Input Output Parameter Reference; 2007
- [27] López Sánchez, M; Dimensionado óptimo de instalaciones de producción de calor y frío de un hotel en zona costera, US; 2018.
- [28] Mantilla J.A, Casallas M.A, 2015. Diseño de un tanque de almacenamiento de agua caliente sanitaria, utilizando materiales de bajo costo.
- [29] Catálogo Precios Saunier Duval, 2019
Disponible en: <https://www.saunierduval.es/downloads/tarifa-saunier-duval/2019-3/tarifa-sd-marzo2019-1413149.pdf>
- [30] Catálogo Tarifa Baxi, 2019.
Disponible en: https://cdn.baxi.es/-/media/websites/baxies/cat_baxi2019.pdf
- [31] Certificados Energéticos. Coeficientes de paso (RITE) de energía final a primaria y emisiones de CO₂
Disponible en: <https://www.certificadosenergeticos.com/coeficientes-de-paso-rite-energia-final-primaria-emisiones-co2>

