

Energía Solar Térmica para Producción de ACS en Centros Educativos: Dimensionamiento y Verificación Normativa con CHEQ4 en Cáceres, España

Solar Thermal Energy for Domestic Hot Water Production in Educational Buildings: Sizing and Regulatory Verification with CHEQ4 in Cáceres, Spain

Mayra Alejandra Pacheco Cunduri¹, José Luis Cortés Llanganate¹, Michael Alejandro Garcés Ponce², Ivan Marcelo Ortiz Parra², María Rosa Cunduri Cunduri²

Cita:

Pacheco Cunduri, M. A., Cortés Llanganate, J. L., Garcés Ponce, M. A., Ortiz Parra, I. M., & Cunduri Cunduri, M. R. (2026). Energía solar térmica para producción de ACS en centros educativos: dimensionamiento y verificación normativa con CHEQ4 en Cáceres, España. *TESLA Revista Científica*, 6(1), e704.

<https://doi.org/10.55204/trc.v6i1.e704>

Recibido: 15/01/2026

Revisado: 22/01/2026 al 20/03/2026

Corregido: 08/04/2026

Aceptado: 16/04/2026

Publicado: 23/04/2026

Licencia:

Los contenidos de este artículo están bajo una licencia Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0). Los autores conservan los derechos morales y patrimoniales de sus obras.

The contents of this article are under a Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) license. The authors retain the moral and patrimonial rights of their works.

¹ Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (ESPOCH), Facultad de Informática y Electrónica, Riobamba, Ecuador.

² Investigadores independientes, Riobamba, Ecuador.

¹ mayra.pacheco@esPOCH.edu.ec; ¹ jcortes@esPOCH.edu.ec; ² maicolgarces04@hotmail.com;

² vanchos_mop@hotmail.com; ² mariacunduri@yahoo.es

ORCID: ¹ 0000-0002-6133-7809; ¹ 0000-0002-3228-2669; ² 0009-0001-3407-2980;

² 0009-0006-4142-2498; ² 0009-0007-0449-7818

Resumen: La descarbonización de edificios de uso colectivo exige soluciones renovables técnicamente maduras para la producción de agua caliente sanitaria (ACS). El objetivo fue dimensionar un sistema solar térmico centralizado para un centro educativo de 280 alumnos en Cáceres, España, y verificar su cumplimiento con el Código Técnico de la Edificación (CTE-HE4). Se aplicó la metodología normativa y la herramienta CHEQ4 para calcular la demanda, seleccionar los captadores y dimensionar los circuitos primario y secundario, acumuladores, intercambiador, vasos de expansión, bombas y sistema de apoyo. La solución requiere 24 captadores planos GAMESA SOLAR 5000S, con 50,38 m² de superficie, orientación sur e inclinación de 39,28°. El sistema alcanza una fracción solar anual del 67 %, registra pérdidas por sombras del 1,56 %, utiliza 3.500 L de acumulación primaria y una caldera de apoyo de 133,23 kW. Los resultados superan el mínimo exigido por el CTE-HE4 y confirman la viabilidad técnica del diseño para centros educativos en climas mediterráneos.

Palabras clave: Energía solar térmica; agua caliente sanitaria; captadores solares planos; fracción solar; CTE-HE4; dimensionamiento hidráulico.

Abstract: The decarbonisation of collective-use buildings requires technically mature renewable solutions for domestic hot water (DHW) production. This study aimed to size a centralized solar thermal system for a school with 280 students in Cáceres, Spain, and verify compliance with the Spanish Technical Building Code (CTE-HE4). The regulatory methodology and CHEQ4 software were applied to estimate demand, select collectors, and size the primary and secondary circuits, storage tanks, heat exchanger, expansion vessels, pumps, and backup system. The proposed solution requires 24 GAMESA SOLAR 5000S flat-plate collectors, providing 50.38 m² of collection area, south orientation, and a 39.28° tilt. The system achieves a 67 % annual solar fraction, with 1.56 % shading losses, 3,500 L of primary storage, and a 133.23 kW backup boiler. The results exceed the minimum CTE-HE4 requirement and confirm the technical feasibility of the design for educational buildings in Mediterranean climates.

Keywords: Solar thermal energy; domestic hot water; flat-plate solar collectors; solar fraction; CTE-HE4; hydraulic sizing.

INTRODUCCIÓN

La transición energética hacia fuentes renovables representa uno de los desafíos más relevantes del siglo XXI frente al cambio climático y el agotamiento de los combustibles fósiles. En el sector de la edificación, el consumo de energía para producción de agua caliente sanitaria (ACS) representa entre el 15 % y el 25 % del consumo térmico total de los edificios residenciales y de uso colectivo (Kalogirou, 2014). La energía solar térmica constituye una de las alternativas más maduras tecnológicamente para cubrir esta demanda, con décadas de desarrollo y una base instalada que, según el Informe Solar Heat Worldwide de la Agencia Internacional de Energía (IEA), alcanzó los 560 GWth a nivel mundial al cierre de 2023, equivalente a más de 800 millones de m² de colectores en operación (Weiss & Spörk-Dür, 2024). La producción anual de energía térmica solar ascendió a 456 TWh en ese mismo año, evitando la emisión de 158,4 millones de toneladas de CO₂ (Weiss & Spörk-Dür, 2024).

En el contexto español, el Código Técnico de la Edificación (CTE), a través de su Documento Básico de Ahorro de Energía, Sección HE4 (Ministerio de Fomento, 2013), establece la contribución solar mínima obligatoria para la producción de ACS en edificios nuevos y en rehabilitaciones significativas. Dependiendo de la zona climática y de la demanda total de ACS, esta contribución oscila entre el 30 % y el 70 % de la demanda anual (Ministerio de Fomento, 2013). Cáceres, localidad de referencia del presente estudio, se clasifica dentro de la zona climática IV, con una irradiación global horizontal media anual de aproximadamente 5,0 kWh/(m²·día), lo que la convierte en un emplazamiento especialmente favorable para el aprovechamiento de la energía solar térmica (García-Fuentes et al., 2018). Según el análisis normativo de Aranda-Usón et al. (2019), España se estructura en 14 zonas climáticas y el CTE-HE4 exige fracciones solares que oscilan entre el 30 % y el 70 %, siendo la zona de Cáceres una de las de mayor potencial solar del territorio.

Los centros educativos representan un caso de uso particular dentro del espectro de los edificios de uso colectivo, caracterizados por perfiles de demanda de ACS heterogéneos que combinan consumo general de alumnado, duchas de instalaciones deportivas y cocinas de comedor escolar (Pavlović et al., 2019). Esta heterogeneidad plantea retos específicos de dimensionamiento que han sido abordados en la literatura técnica de forma limitada, con mayor énfasis en edificios residenciales o industriales.

Pavlović et al. (2019) analizaron el rendimiento energético de sistemas solares para producción de ACS en edificios educativos en Sarajevo, concluyendo que el consumo real de agua caliente en estos establecimientos es frecuentemente inferior a los valores prescritos por la normativa, lo que puede conducir a sobredimensionamientos del sistema si no se realiza un análisis detallado de la demanda.

Entre los distintos tipos de captadores solares disponibles en el mercado, los captadores planos o de placa plana (*flat-plate collectors*, FPC) son los más empleados en instalaciones de ACS de baja y media temperatura (40–80 °C), gracias a su madurez tecnológica, bajo coste de mantenimiento y amplia disponibilidad comercial (Kumar & Verma, 2026). Su principio de funcionamiento se basa en la absorción de la radiación solar incidente mediante una placa absorbente de alta absorptividad, la transferencia de calor al fluido caloportador que circula por tubos en contacto con la placa, y la reducción de pérdidas térmicas mediante una cubierta de vidrio y un aislamiento posterior (Duffie & Beckman, 2013). El rendimiento de un captador plano se caracteriza mediante su curva de rendimiento, que relaciona la eficiencia térmica con el parámetro reducido de temperatura (T^*), definido como el cociente entre la diferencia temperatura media del fluido menos temperatura ambiente, y la irradiancia incidente.

El dimensionamiento de sistemas solares térmicos para ACS ha sido objeto de numerosas publicaciones científicas que proponen metodologías simplificadas o detalladas para determinar el área de captación y el volumen de acumulación óptimos. O'Hegarty et al. (2014) presentaron un procedimiento simplificado para el dimensionamiento de sistemas solares adaptado a las metodologías de evaluación energética de edificios en Reino Unido e Irlanda, identificando las limitaciones de los métodos normativos estándar. Por su parte, Tian y Zhao (2013) realizaron una revisión exhaustiva del estado del arte en captadores solares y almacenamiento térmico, destacando que el volumen de acumulación y el área de captación son los parámetros más influyentes en el rendimiento global del sistema. La regla práctica más ampliamente adoptada, y recogida en el CTE-HE4, establece una relación entre 45 y 75 L de acumulación por m² de captación, lo que permite un primer dimensionamiento previo al cálculo detallado (Ministerio de Fomento, 2013).

En el ámbito normativo español, la herramienta oficial para la verificación del cumplimiento del CTE-HE4 en instalaciones de ACS es el programa CHEQ4, desarrollado por el Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE). CHEQ4 implementa el método de cálculo f-chart adaptado a las condiciones climáticas españolas, permitiendo estimar la fracción solar mensual y anual de una instalación a partir de los parámetros del captador, el volumen de acumulación, la demanda de ACS y los datos climáticos de la localidad (IDAE, 2012). El método f-chart fue desarrollado originalmente por Klein et al. (1976) y ha sido ampliamente validado para el cálculo de fracciones solares en sistemas de calefacción solar de baja temperatura, siendo reconocido en la literatura como uno de los métodos de cálculo más robustos para este tipo de aplicaciones (Duffie & Beckman, 2013).

El diseño del circuito hidráulico de una instalación solar térmica centralizada comprende el dimensionamiento de tuberías, bombas de circulación, intercambiador de calor, vasos de expansión y sistema de apoyo. El dimensionamiento correcto del intercambiador de calor entre el circuito primario (fluido caloportador con anticongelante) y el secundario (agua de consumo) es crucial para minimizar las pérdidas de temperatura y maximizar la eficiencia global del sistema (Streicher, 2008). El uso de propilenglicol como anticongelante en el circuito primario es la práctica habitual en instalaciones ubicadas en zonas con riesgo de heladas, dado su carácter no tóxico y su amplia disponibilidad comercial (Peuser et al., 2005). El Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios (RITE, Real Decreto 1027/2007, modificado por RD 238/2013) establece los criterios de diseño, instalación y mantenimiento aplicables a las instalaciones de ACS solar en España, incluyendo los requisitos de protección contra la legionela mediante el diseño del acumulador de apoyo con temperatura mínima de 60 °C (Ministerio de Industria, 2013).

La orientación e inclinación del campo de captadores, así como el análisis de las sombras proyectadas por obstáculos próximos, son factores determinantes en el rendimiento anual de la instalación. Para emplazamientos en el hemisferio norte, la orientación óptima es el sur geográfico (azimut 0°) y la inclinación óptima para maximizar la captación anual es igual a la latitud del lugar, criterio recogido en el CTE-HE4 (Ministerio de Fomento, 2013). El cálculo de la distancia mínima entre filas de captadores para evitar sombreados mutuos en el período crítico (solsticio de invierno, horas centrales del día) es un requisito de diseño fundamental que afecta directamente a la distribución espacial del campo y a la utilización de la superficie de cubierta disponible (Duffie & Beckman, 2013). Lizana et al. (2017) señalan que en el clima mediterráneo, con alta irradiancia y largo período de insolación, los sistemas solares térmicos bien diseñados pueden alcanzar fracciones solares de entre el 55 % y el 75 % para aplicaciones de ACS, lo que los posiciona como una de las alternativas más competitivas frente a sistemas basados en combustibles fósiles.

A pesar de la relevancia del sector educativo como consumidor de energía y de la clara normativa española que obliga al uso de energía solar para ACS, la literatura científica presenta una escasez de casos de estudio documentados con detalle para instalaciones de esta tipología en España. La mayoría de los trabajos publicados se centran en edificios residenciales o en estudios de viabilidad económica comparativa, sin abordar en profundidad el proceso completo de dimensionamiento hidráulico conforme al RITE y al CTE-HE4. El presente trabajo busca cubrir este vacío mediante la presentación de un caso de estudio completo y reproducible, con todos los cálculos justificados, que puede servir de referencia metodológica para proyectistas e investigadores que aborden problemas similares en el ámbito del sur de Europa.

En este contexto, el objetivo del presente artículo es presentar el dimensionamiento detallado de un sistema solar térmico centralizado para ACS en un centro educativo ubicado en Cáceres (España) con 280 alumnos y una demanda de 3.105 L/día, abarcando: (a) la estimación de la demanda de ACS conforme al CTE-HE4; (b) la selección y caracterización del captador solar plano; (c) el diseño del campo de captadores con análisis de sombras; (d) el dimensionamiento completo del circuito hidráulico primario y secundario, incluyendo bombas, intercambiador, acumuladores y vasos de expansión; (e) el dimensionamiento del sistema de apoyo; y (f) la verificación de la fracción solar anual mediante CHEQ4, confirmando el cumplimiento de la normativa.

METODOLOGÍA

La metodología seguida se estructura en cuatro etapas secuenciales. En primer lugar, se estimó la demanda diaria de ACS conforme a los criterios del Documento Básico de Ahorro de Energía, Sección HE4 del Código Técnico de la Edificación (CTE-HE4), considerando una ocupación del 100 % durante todo el año y los tres focos de consumo del edificio: alumnado general, duchas del gimnasio y comedor escolar. En segundo lugar, se seleccionó el captador solar plano más adecuado a partir del catálogo de equipos certificados disponible en CHEQ4, priorizando modelos con rendimiento óptico η_0 superior a 0,75. En tercer lugar, se dimensionaron todos los componentes del circuito hidráulico primario y secundario —tuberías, bombas de circulación, intercambiador de calor de placas, acumuladores, vasos de expansión y caldera de apoyo a gas natural— aplicando las restricciones de velocidad y aislamiento establecidas en el Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios (RITE, RD 238/2013), y seleccionando los equipos comerciales a partir de los catálogos de los fabricantes Lapesa, Wilo, Salvador Escoda S.A. y Bentone. Finalmente, se realizó la verificación energética de la instalación mediante el programa oficial CHEQ4, herramienta desarrollada por el Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE) que implementa el método f-chart adaptado a las condiciones climáticas españolas, obteniendo la fracción solar mensual y anual y confirmando el cumplimiento del CTE-HE4 para la zona climática de Cáceres.

2.1 Enfoque de la investigación

El presente trabajo se enmarca en una investigación de carácter aplicado con enfoque cuantitativo, orientada a la resolución de un problema de ingeniería real: el dimensionamiento de una instalación solar térmica centralizada para la producción de ACS en un edificio de uso educativo. El estudio adopta un diseño no experimental de tipo descriptivo-proyectual, dado que no se interviene sobre variables controladas en laboratorio sino que se aplica una metodología de cálculo normativa sobre los parámetros reales del edificio y su emplazamiento geográfico. La unidad de análisis es el sistema solar térmico en su conjunto, entendido como un sistema hidráulico-energético integrado por subsistemas interdependientes: campo de captadores, circuito primario, circuito secundario y sistema de apoyo cuyo dimensionamiento correcto determina el cumplimiento de los requisitos energéticos y normativos establecidos por el CTE-HE4 y el RITE. El alcance del estudio es el dimensionamiento completo de todos los componentes principales de la instalación y la verificación de la fracción solar anual mediante herramienta oficial, sin incluir el análisis económico ni la simulación dinámica horaria, los cuales se proponen como líneas de trabajo futuro.

2.2 Unidades de análisis

La unidad de análisis principal del estudio es el sistema solar térmico centralizado dimensionado para el centro educativo, compuesto por el conjunto de subsistemas que intervienen en la captación, almacenamiento, transferencia y distribución de la energía solar para la producción de ACS. Cada subsistema constituye a su vez una unidad de análisis específica con sus propios parámetros de entrada, criterios de selección y restricciones normativas: el campo de captadores solares planos, caracterizado por su área total, inclinación, orientación y configuración hidráulica; el circuito primario, definido por el tipo de fluido caloportador, el caudal de diseño, el diámetro de tubería y las pérdidas de carga; el circuito secundario, con sus correspondientes parámetros hidráulicos y térmicos; los acumuladores de energía, dimensionados en función de la demanda diaria de ACS; el intercambiador de calor de placas, que vincula ambos circuitos; los vasos de expansión, calculados para las condiciones de presión y temperatura extremas del sistema; y la caldera de apoyo a gas natural, dimensionada para garantizar el suministro continuo de ACS independientemente de las condiciones de irradiación solar. El emplazamiento geográfico (Cáceres, latitud 39,28° N) constituye también una unidad de análisis contextual determinante, ya que la irradiación solar disponible, la temperatura mínima histórica y la zona climática normativa condicionan directamente el dimensionamiento del sistema.

2.3 Técnicas de recolección

La recolección de datos se realizó a partir de tres fuentes principales. En primer lugar, los datos del edificio y sus usuarios (número de alumnos, número de duchas diarias y número de comidas servidas en el comedor) fueron obtenidos directamente del enunciado del proyecto, constituyendo los parámetros de entrada para el cálculo de la demanda de ACS conforme a las tablas de dotaciones del CTE-HE4. En segundo lugar, los datos climáticos del emplazamiento (latitud, temperatura mínima histórica, irradiación solar mensual y temperatura media del agua de red) fueron extraídos de las bases de datos integradas en el programa CHEQ4, el cual incorpora información meteorológica validada para todas las localidades españolas recogidas en el atlas climático del IDAE. En tercer lugar, las características técnicas de los equipos seleccionados (captadores solares, acumuladores, intercambiador de calor, vasos de expansión, bombas de circulación y caldera de apoyo) fueron obtenidas de los catálogos comerciales oficiales de los fabricantes Gamesa Solar, Lapesa, Salvador Escoda S.A., Wilo y Bentone, garantizando que todos los valores utilizados en los cálculos corresponden a equipos reales disponibles en el mercado español. La herramienta CHEQ4 actuó simultáneamente como fuente de datos climáticos y como instrumento de verificación energética, ejecutando el método f-chart con los parámetros de la instalación dimensionada para obtener la fracción solar mensual y anual del sistema.

2.4 Procesamiento y análisis de la información

El procesamiento de la información se llevó a cabo de forma secuencial, siguiendo el orden lógico de dependencia entre los subsistemas de la instalación descrito en el apartado 2.1. En una primera etapa, se calculó la demanda diaria de ACS aplicando las dotaciones unitarias establecidas en el CTE-HE4 para cada foco de consumo del edificio, obteniendo el volumen total de agua caliente requerido a 60°C como parámetro de partida del dimensionamiento. A partir de este valor, se determinó el volumen de acumulación del circuito primario aplicando la regla de proporcionalidad establecida en la normativa (45–75 L/m² de captación), y se seleccionó el acumulador comercial de capacidad inmediatamente superior al valor calculado. Con el volumen de acumulación definido, se realizó una verificación preliminar en CHEQ4 para confirmar que la combinación captador-acumulación seleccionada

era capaz de alcanzar la fracción solar mínima exigida, antes de proceder al dimensionamiento hidráulico detallado. En una segunda etapa, se dimensionaron las tuberías de ambos circuitos aplicando las restricciones de velocidad máxima del RITE, calculando las pérdidas de carga mediante la ecuación de Darcy-Weisbach y estimando las pérdidas en accesorios como el 30 % de las pérdidas en tramos rectos. Las propiedades termofísicas del fluido caloportador del circuito primario —mezcla agua-propilenglicol al 30 %— se determinaron a partir de la temperatura mínima histórica de Cáceres, aplicando un margen de seguridad de 5°C sobre dicha temperatura para establecer la temperatura de congelación de diseño. En una tercera etapa, se dimensionaron los vasos de expansión de ambos circuitos aplicando la ecuación de Schl  pfer para vasos cerrados de membrana, considerando las temperaturas extremas de trabajo y las presiones de llenado y tarado de las válvulas de seguridad. Finalmente, toda la información procesada fue integrada en el programa CHEQ4 para la verificación energética global de la instalación, obteniendo los valores de fracción solar mensual y anual que confirman el cumplimiento del CTE-HE4.

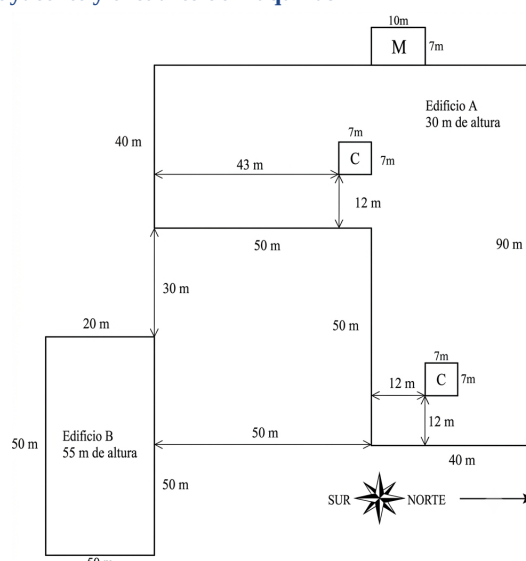
RESULTADOS

3.1 Diagnóstico del escenario base

El centro educativo objeto de estudio se encuentra ubicado en la ciudad de Cáceres, España, localidad situada a una latitud de 39,28   N, clasificada dentro de la zona climática IV según el CTE-HE4, con una temperatura mínima histórica de -6  C y una temperatura media del agua de red de 14,1  C, datos que condicionan directamente tanto la selección del fluido caloportador del circuito primario como el cálculo de la demanda energética anual de la instalación. El edificio alberga un total de 280 alumnos en régimen presencial completo, y presenta tres focos diferenciados de consumo de agua caliente sanitaria: el consumo general del alumnado, las duchas del gimnasio escolar con 45 usuarios diarios, y el comedor escolar con 130 comidas servidas por día. En cuanto a la configuración física del emplazamiento, la instalación solar se proyecta sobre la cubierta del edificio A, en cuyas proximidades se encuentra el edificio B (de 20  50 m de planta y 55 m de altura) que constituye el principal obstáculo generador de sombras sobre el campo de captadores, junto con los cuartos de ascensores ubicados en la propia cubierta del edificio A, con una altura de 3,5 m. La Figura 1 muestra la planta del emplazamiento con la disposición del edificio A, el edificio B adyacente y el cuarto de máquinas M, tal como se tomó como referencia para el análisis de sombras.

Figura 1

Planta del edificio A con el edificio B adyacente y el cuarto de máquinas M



Nota: Elaboración propia.

3.2 Cálculo de la demanda de agua caliente sanitaria

La estimación de la demanda diaria de ACS constituye el parámetro de partida de todo el proceso de dimensionamiento, ya que de él dependen directamente el volumen de acumulación, el área de captación y la potencia del sistema de apoyo. El cálculo se realizó conforme a las dotaciones unitarias establecidas en el Documento Básico HE4 del Código Técnico de la Edificación (Ministerio de Fomento, 2013), considerando una ocupación del 100 % durante todos los días del año, hipótesis conservadora que garantiza que la instalación sea capaz de satisfacer la demanda máxima potencial del edificio en cualquier período del año.

El centro educativo presenta tres focos diferenciados de consumo de ACS. El primero corresponde al consumo general del alumnado, con una dotación de 4 L por alumno y día para los 280 alumnos del centro, lo que supone una aportación de 1.120 L/día. El segundo foco lo constituyen las duchas del gimnasio escolar, con una dotación de 21 L por ducha y día para 45 usuarios diarios, resultando en 945 L/día. El tercer foco es el comedor escolar, con una dotación de 8 L por comida y día para 130 comidas servidas diariamente, que aporta 1.040 L/día. La suma de las tres contribuciones arroja una demanda total de ACS de 3.105 L/día a 60  C, que constituye el valor de diseño de la instalación. La Tabla 1 presenta el desglose completo del cálculo.

Tabla 1**Demanda diaria de agua caliente sanitaria del centro educativo**

Espacio / Uso	Nº de usuarios	Dotación unitaria	Demanda parcial (L/día)
Alumnado general	280 alumnos	4 L/alumno·día	1.120
Duchas gimnasio	45 duchas/día	21 L/ducha·día	945
Comedor escolar	130 comidas/día	8 L/comida·día	1.040
TOTAL	—	—	3.105

Nota: Elaboración propia con base en CTE-HE4 (Ministerio de Fomento, 2013).

3.3 Selección del captador solar y verificación preliminar con CHEQ4

La selección del captador solar plano constituye una decisión técnica de primer orden, dado que sus características ópticas y térmicas condicionan directamente el número de unidades necesarias, el caudal de diseño del circuito primario y, en última instancia, la fracción solar anual alcanzable por la instalación. El proceso de selección se realizó a partir del catálogo de captadores certificados disponible en la base de datos del programa CHEQ4, aplicando dos criterios de filtrado principales: en primer lugar, un rendimiento óptico η_0 superior a 0,75, valor a partir del cual Kalogirou (2014) establece que los captadores planos presentan un comportamiento eficiente en climas mediterráneos de alta irradiación; y en segundo lugar, una superficie de captación unitaria elevada, con el objetivo de minimizar el número de unidades del campo y reducir la longitud y complejidad del circuito hidráulico primario.

El captador seleccionado es el modelo GAMESA SOLAR 5000S del fabricante Gamesa Solar, cuya ficha técnica se muestra en la Tabla 2. Se trata de un captador solar plano de alto rendimiento con cubierta de vidrio solar de baja reflectancia, absorbedor selectivo de cobre con tratamiento superficial de alta absorptividad ($\alpha > 0,95$) y carcasa de aluminio anodizado con aislamiento trasero de lana mineral. Sus parámetros de rendimiento, determinados conforme a la norma ISO 9806:2017 mediante ensayo en laboratorio acreditado, son los siguientes: rendimiento óptico $\eta_0 = 0,798$, coeficiente de pérdida de calor lineal $a_1 = 3,93 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ y coeficiente de pérdida de calor cuadrático $a_2 = 0,013 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^2)$. El área de apertura del captador es de $2,099 \text{ m}^2$ y el volumen de fluido interno es de $1,85 \text{ L}$ por unidad. La curva de rendimiento del captador en función del parámetro reducido de temperatura $T^* = (T_m - T_a) / G$ se presenta en la Figura 3, donde se aprecia que para valores típicos de operación en instalaciones de ACS ($T^* \approx 0,04\text{--}0,06 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$), el captador mantiene rendimientos superiores al 65 %, lo que confirma su idoneidad para la aplicación proyectada.

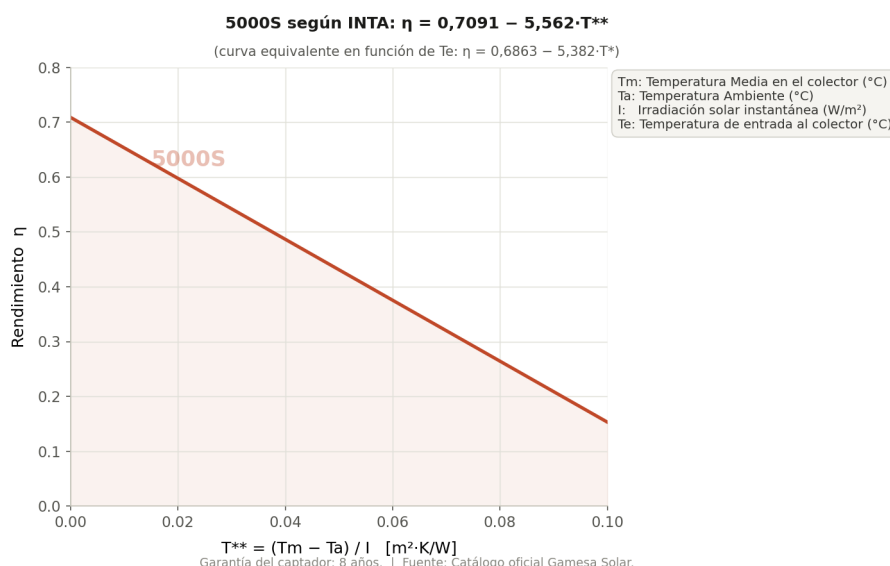
Tabla 2**Ficha técnica del captador GAMESA SOLAR 5000S**

<i>Ficha Técnica — Captador Solar GAMESA SOLAR 5000S</i>	
<i>Dimensiones exteriores: (1.050 × 2.120 × 86,2 mm)</i>	<i>Superficie útil de captación: 2,2 m²</i> <i>Superficie total del captador: 2,25 m²</i> <i>Peso en vacío: 38 kg</i> <i>Capacidad del captador: 1,85 L</i>
<i>Caja del captador</i> <i>Cobertura transparente: (Cristal templado) Aislamiento transparente bajo vidrio (TIM):</i>	<i>Aluminio anodizado</i> <i>Transmisividad: 89,90 %</i> <i>Espesor: 4 mm</i> <i>Material: Acetato de celulosa</i> <i>Geometría: Panel de abeja</i> <i>Espesor: 15 mm</i>
<i>Aislamiento térmico: Fibra de vidrio con film de aluminio</i>	<i>Parte posterior: 35 mm</i> <i>Marcos laterales: 15 mm</i>
<i>Absorbedor selectivo</i>	<i>Recubrimiento absorbente: NiOx / Ni</i> <i>Tratamiento de la superficie: Sputtering</i> <i>Absortividad: 95 % (±2)</i> <i>Emisividad: 7 % (±2)</i> <i>Material de las bandas: Aluminio con tubos de cobre</i>
<i>Tubos del absorbedor</i>	<i>Material: Cobre</i> <i>Número de tubos: 7</i> <i>Diámetro externo/interno: 12/10 mm</i> <i>Unión por embutición tubos y banda absorbente</i>
<i>Tubos colectores</i>	<i>Material: Cobre</i> <i>Diámetro externo: 22 mm</i>

Nota: Catálogo oficial del fabricante Gamesa Solar.

Con carácter previo al dimensionamiento detallado del circuito hidráulico, se realizó una verificación energética preliminar mediante CHEQ4 introduciendo únicamente los parámetros esenciales de la instalación: el captador GAMESA SOLAR 5000S, el volumen de acumulación del circuito primario fijado inicialmente en 3.500 L en aplicación de la regla de proporcionalidad del CTE-HE4 (entre 45 y $75 \text{ L}/\text{m}^2$ de captación), y los datos climáticos de Cáceres extraídos automáticamente de la base de datos del programa. El resto de parámetros de la instalación —intercambiador, circuito secundario, sistema de apoyo— se introdujeron con

Figura 2
Curva de rendimiento del captador GAMESA SOLAR 5000S (η vs. T)



Nota: Fuente: Catálogo del fabricante / Certificado de ensayo ISO 9806:2017.

los valores por defecto del programa, dado que en esta fase el objetivo no es obtener un resultado definitivo sino verificar que la combinación captador-acumulación es viable antes de invertir tiempo en el diseño hidráulico detallado.

El resultado de la verificación preliminar arrojó una fracción solar anual provisional superior al 60 %, umbral mínimo exigido por el CTE-HE4 para la zona climática de Cáceres, confirmando que la configuración propuesta es técnicamente viable y autorizando la continuación del proceso de dimensionamiento. La Figura 3 muestra la pantalla de resultados de CHEQ4 correspondiente a esta verificación preliminar, con el indicador de cumplimiento normativo en estado positivo.

Figura 3
Resultados de CHEQ4 correspondiente a la verificación preliminar de la instalación, mostrando la fracción solar anual obtenida y el indicador de cumplimiento del CTE-HE4



Nota: Fuente: Elaboración propia mediante CHEQ4 (IDAE, 2012).].

3.4 Dimensionamiento del campo de captadores

El número de captadores solares necesarios se determinó a partir de la superficie de captación teórica, calculada aplicando la regla de proporcionalidad establecida en el CTE-HE4, que fija una relación de entre 45 y 75 litros de acumulación por metro cuadrado de área de captación. Tomando como referencia el valor más restrictivo (75 L/m²) para garantizar el cumplimiento de la fracción solar mínima, y partiendo del volumen de acumulación del circuito primario de 3.500 L, se obtuvo una superficie de captación teórica de referencia de 46,67 m². Dividiendo este valor entre el área de apertura del captador seleccionado (2,099 m²/unidad), se obtuvo un número teórico de 22,23 captadores, que se redondeó al número entero superior de 24 unidades, garantizando así el cumplimiento holgado de la fracción solar mínima exigida. Con esta configuración, el área real de captación asciende a 50,38 m² y el caudal de diseño del circuito primario resulta de 2.518 L/h, obtenido como producto del área real por el caudal unitario recomendado de 50 L/(h·m²).

Los 24 captadores se distribuyen en 4 filas de 6 unidades conectadas en paralelo entre sí. Esta configuración equilibra las

pérdidas de carga en el circuito primario, garantizando un caudal uniforme a través de todas las unidades y evitando el fenómeno de circulación preferencial que puede producirse en instalaciones con filas de desigual longitud (Streicher, 2008). La longitud de cada fila es de 6,3 m, obtenida como producto del número de captadores por fila (6) por el ancho de cada unidad (1,050 m). La Tabla 3 presenta un resumen completo de los parámetros del campo de captadores.

Tabla 3

Parámetros de diseño del campo de captadores

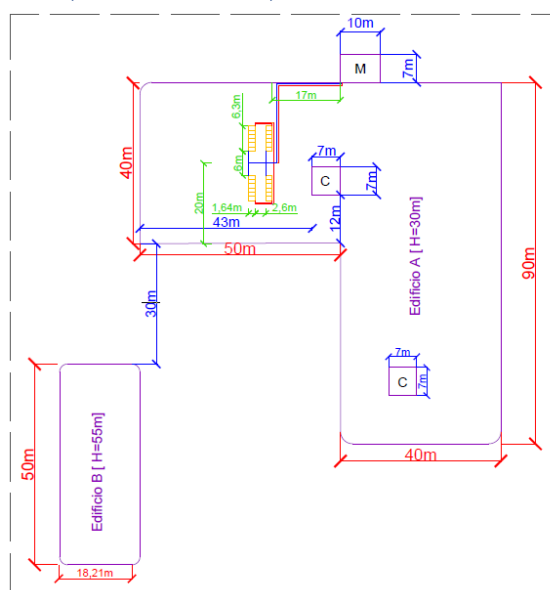
Parámetros de diseño del campo de captadores	
Sección A — Dimensionamiento por regla de oro (CTE-HE4)	
Parámetro	Valor
Volumen de acumulación primaria [L]	3.500
Relación L/m ² (CTE-HE4)	75
Área de captación teórica [m ²]	46,67
Área de apertura del captador seleccionado [m ²]	2,099
Nº de captadores teórico	22,23
Nº de captadores adoptado	24
Área de captación real [m ²]	50,38
Caudal de diseño Q [L/h]	2.518
Sección B — Configuración geométrica del campo	
Parámetro	Valor
Largo del captador [m]	2,12
Ancho del captador [m]	1,05
Grosor del captador [m]	0,0862
Nº de filas	4
Nº de captadores por fila	6
Longitud de fila [m]	6,3
Inclinación β [°]	39,28
Orientación	Sur (azimut 0°)
Sección C — Separación entre filas de captadores	
Parámetro	Valor
Inclinación β [°]	39,28
Altura solar mínima h_0 [°]	27,22
Altura proyectada del captador Z [m]	1,34
Distancia horizontal captador d_2 [m]	1,64
Separación mínima entre filas d_1 [m]	2,60
Distancia total entre filas ($d_1 + d_2$) [m]	4,24

Nota: Elaboración propia.

En cuanto a la orientación e inclinación del campo, los captadores se orientan hacia el sur geográfico (azimut 0°), por ser el emplazamiento en el hemisferio norte, maximizando así la captación de radiación solar directa a lo largo del año. La inclinación fija adoptada es de 39,28°, valor coincidente con la latitud geográfica de Cáceres, que según Duffie y Beckman (2013) constituye el ángulo óptimo para maximizar la producción anual de energía en instalaciones de ACS con captación fija sin seguimiento solar. La Figura 4 muestra el esquema en planta del campo de captadores sobre la cubierta del edificio A.

Figura 4

Esquema en planta del campo de captadores (4 filas × 6 unidades)



Nota: Fuente: Elaboración propia.

La separación mínima entre filas de captadores se calculó para garantizar la ausencia de sombreado mutuo durante las horas centrales del día (entre las 10 h y las 14 h solares) en el período más desfavorable del año, correspondiente al solsticio de invierno. La altura solar mínima en ese período para la latitud de Cáceres es $h_0 = 50,72^\circ$ sobre el horizonte en el mediodía solar, pero para el cálculo de separación entre filas se utiliza la altura solar a las 10 h y 14 h solares en el solsticio de invierno, que resulta de $h = 27,22^\circ$. La altura del captador proyectada sobre la vertical es $Z = 1,34$ m, siendo L la longitud del captador y β su ángulo de inclinación. A partir de estos valores, la separación mínima entre filas d_1 es 2,60 m. Esta distancia garantiza que ninguna fila proyecte sombra sobre la fila posterior durante las horas de mayor producción energética en el período crítico del año.

3.5 Análisis de sombras

El análisis de sombras se realizó mediante la herramienta de cálculo Excel normalizada, configurada con los parámetros de orientación e inclinación del campo de captadores ($\beta = 39,28^\circ$, $\alpha = 0^\circ$). El campo de captadores se posicionó en la zona central de la cubierta del edificio A, lo más alejado posible de los muretes perimetrales de 1,55 m de altura, con el fin de minimizar el impacto de las sombras sobre la instalación. Como resultado de esta disposición, el único obstáculo que proyecta sombra significativa sobre el campo es el edificio B adyacente al colegio, de 20×50 m de planta y 55 m de altura, descartándose los cuartos de ascensores C y el cuarto de máquinas M como generadores de sombra relevante dada la distancia y posición relativa respecto al campo.

Para el cálculo de las coordenadas angulares de los puntos de sombra se tomó como punto de referencia el centro geométrico del campo de captadores. Los cuatro vértices del edificio B que definen el perfil de sombra proyectado sobre el campo (denominados A, B, C y D) se determinaron a partir de sus coordenadas geográficas relativas (X, Y, Z) respecto al punto de referencia, calculando para cada uno el azimut y la elevación angular correspondientes. La Tabla 4 presenta los resultados de este cálculo.

Tabla 4

Coordenadas angulares de los puntos de sombra del edificio B sobre el campo de captadores

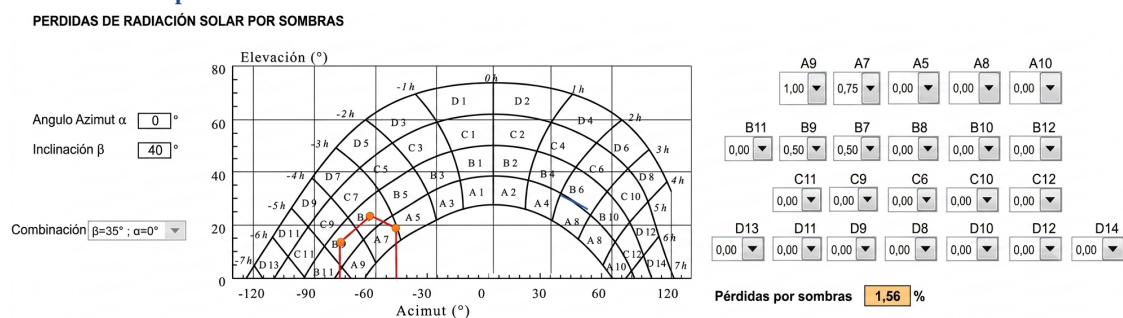
Punto	Coordenadas geográficas (X, Y, Z) [m]	Azimut [$^\circ$]	Elevación [$^\circ$]
A	(-50 ; 30 ; 25)	-59,03	23,20
B	(-50 ; 50 ; 25)	-45,00	19,47
C	(-100 ; 50 ; 25)	-63,43	12,60
D	(-100 ; 30 ; 25)	-73,30	13,46

Nota: Elaboración propia.

Una vez introducidas las coordenadas angulares de los cuatro vértices en la herramienta de cálculo, el programa determinó el área del diagrama de trayectoria solar afectada por la sombra del edificio B y calculó las pérdidas energéticas anuales asociadas. El porcentaje de pérdidas por sombras obtenido es del 1,56 %, valor que cumple ampliamente con el límite máximo del 10 % establecido por el CTE-HE4 para instalaciones de ACS. Este resultado confirma que la disposición del campo de captadores adoptada es correcta y que el impacto de las sombras externas sobre la producción anual de energía es mínimo. La Figura 5 muestra el diagrama de trayectoria solar con la representación de la sombra proyectada por el edificio B sobre el plano de captadores.

Figura 5

Pérdidas de radiación solar por sombras



Nota: Fuente: Elaboración propia.

3.6 Diseño del circuito primario

El fluido caloportador del circuito primario es una mezcla de agua y propilenglicol al 30 %, concentración determinada a partir de la temperatura mínima histórica de Cáceres (-6°C) aplicando un margen de seguridad de 5°C , lo que fija la temperatura de congelación de diseño en -11°C . Las propiedades termofísicas del fluido a 60°C son: $\rho = 1,002$ g/cm 3 , $\mu = 0,9$ centipoise y $c_p = 0,95$ kcal/(kg $\cdot^\circ\text{C}$).

El dimensionamiento de las tuberías se realizó mediante la gráfica de pérdidas de carga en tubería de cobre para agua a 45°C , con factores de corrección a 60°C , respetando las restricciones del RITE: velocidad entre 0,3 y 2,5 m/s y pérdida de carga máxima de 40 mmca/m. El circuito queda configurado en seis tramos con los diámetros y caudales indicados en la Tabla 5. Las pérdidas en accesorios se estimaron como el 30 % de las pérdidas en tuberías. Las pérdidas de carga totales del circuito primario ascienden a 4.838,67 mmca.

Tabla 5

Parámetros hidráulicos del circuito primario

Tramo	Caudal [L/h]	Caudal [m³/h]	Longitud [m]	Diámetro [mm]
A. Caudales en captadores y tramos principales [L/h]				
Captador	104,95	—	—	—
Fila	629,7	—	—	—
Total	2.518,8	2,52	—	—
B. Tramos del circuito primario				
1-2	2.518,8	2,52	69,14	42
2-3	1.259,4	1,26	4,24	25
3-4	629,7	0,63	3,50	22
2-4	629,7	0,63	7,74	22
4-5	1.259,4	1,26	14,94	25
5-6	2.518,8	2,52	67,00	42
C. Volumen total del circuito primario				
Volumen en tuberías [L]			214,50	
Volumen en captadores (1,85 L × 24) [L]			44,40	
Volumen intercambiador [L]			5,00	
VOLUMEN TOTAL DEL CIRCUITO PRIMARIO [L]			263,90	
D. Vaso de expansión del circuito primario				
Presión mínima [bar]			4,87	
Presión máxima [bar]			8,00	
Coefficiente Cpre			2,873	
Volumen nominal calculado [L]			190,85	
Modelo seleccionado — capacidad [L]			220SMR — 200 L	

Nota: Elaboración propia.

El intercambiador de calor seleccionado es un equipo de placas de acero inoxidable modelo M3FG de 28 placas (Salvador Escoda S.A.), con una potencia de 30.225,6 W y pérdidas de carga de 2,06 mca. La bomba de circulación primaria se seleccionó del catálogo Wilo para el punto de operación $Q = 2,52 \text{ m}^3/\text{h}$ y $H = 4.838,67 \text{ mmca}$, verificando que el punto de funcionamiento se encuentra dentro de la curva característica del equipo.

El acumulador del circuito primario es el modelo MVV3500 RB de Lapesa (3.500 L), seleccionado conforme a la regla de proporcionalidad del CTE-HE4. El vaso de expansión se dimensionó a partir del volumen total del circuito primario (263,90 L: 214,50 L en tuberías + 44,4 L en captadores + 5 L en intercambiador), con presión mínima de 4,87 bar, presión máxima de 8 bar y $C_{pre} = 2,873$, obteniéndose un volumen nominal de 190,85 L. El modelo seleccionado es el 220SMR de Salvador Escoda S.A. (200 L).

3.7 Diseño del circuito secundario

El dimensionamiento del circuito secundario siguió la misma metodología aplicada en el circuito primario. El caudal de diseño se estableció un 20 % superior al del circuito primario, resultando en $3.022,56 \text{ L/h}$ ($3,02 \text{ m}^3/\text{h}$). El fluido circulante es agua limpia, dado que el circuito secundario no está en contacto con el campo de captadores. Conforme a las tablas de diámetros mínimos recomendados en función del caudal y a la gráfica de pérdidas de carga con factores de corrección a 60°C , se seleccionó una tubería de DN 42 mm con aislamiento interior de 35 mm. Las pérdidas en accesorios se estimaron igualmente como el 30 % de las pérdidas en tuberías, y las pérdidas en el intercambiador son las mismas que las del circuito primario. Las pérdidas de carga totales del circuito secundario ascienden a $2.206,17 \text{ mmca}$. La Tabla 6 resume los parámetros hidráulicos del circuito secundario.

Tabla 6

Parámetros hidráulicos del circuito secundario

Parámetro	Unidad	Valor
A — Parámetros generales del circuito secundario		
Caudal de diseño		3.022,56 L/h (3,02 m³/h)
Diámetro de tubería		DN 42 mm
Aislamiento tubería interior		35 mm
Pérdidas de carga totales		2.206,17 mmca
Fluido circulante		Agua limpia (sin anticongelante)
B — Acumulador de apoyo		
Consumo horas punta (70 % diario)		2.173,5 L
Modelo seleccionado		MVV2500 RB — Lapesa
Capacidad nominal		2.500 L
C — Vaso de expansión del circuito secundario		
Volumen en tuberías		11,08 L
Volumen acumulador primario		3.500 L
Volumen acumulador de apoyo		2.500 L
Volumen total del circuito secundario		6.011,08 L
Presión mínima		1,5 bar
Presión máxima		3,7 bar
Temperatura máxima (protección legionela)		70°C

Parámetro	Unidad	Valor
Coefficiente C_{pre}		2,14
Volumen nominal calculado		257,27 L
Modelo seleccionado — capacidad		350SMR — Salvador Escoda S.A. — 300 L

Nota: Elaboración propia.

La bomba de circulación del circuito secundario se seleccionó del catálogo Wilo para el punto de operación $Q = 3,02 \text{ m}^3/\text{h}$ y $H = 2.206,17 \text{ mmca}$, verificando el punto de funcionamiento dentro de la curva característica del equipo.

El acumulador de apoyo se dimensionó asumiendo que el consumo en horas punta corresponde al 70 % del consumo diario total: $V_{\text{apoyo}} = 3.105 \times 0,7 = 2.173,5 \text{ L}$. El depósito comercial seleccionado es el modelo MVV2500 RB de Lapesa (2.500 L), de capacidad superior al valor calculado.

El vaso de expansión del circuito secundario se calculó a partir del volumen total del circuito (6.011,08 L: 11,08 L en tuberías + 3.500 L acumulador primario + 2.500 L acumulador de apoyo), con presión mínima de 1,5 bar, presión máxima de 3,7 bar, temperatura máxima de 70°C (protección contra legionela) y $C_{pre} = 2,14$, obteniéndose un volumen nominal de 257,27 L. El modelo seleccionado es el 350SMR de Salvador Escoda S.A. (300 L). Todos los equipos fueron seleccionados a partir de sus fichas técnicas comerciales, verificando que los valores nominales superen los calculados.

3.8 Dimensionamiento del sistema de apoyo

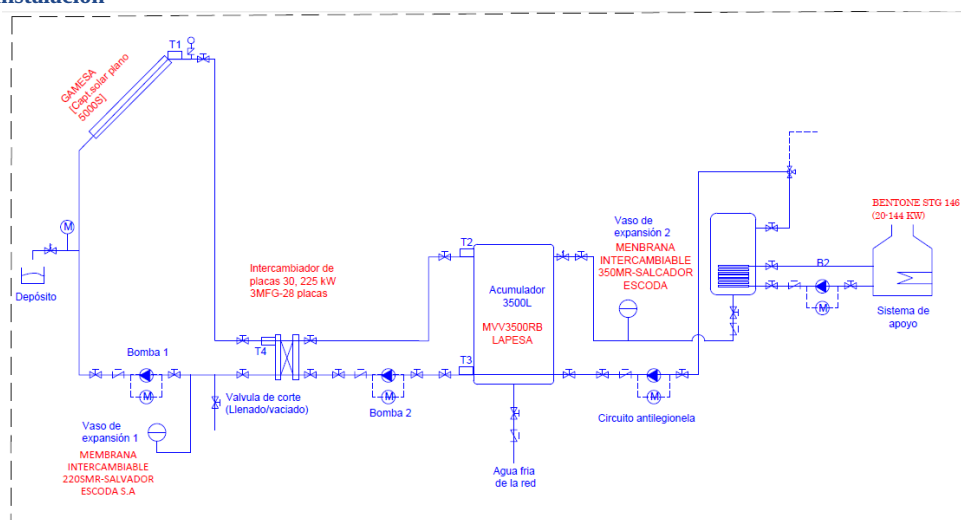
El sistema de apoyo tiene como función garantizar el suministro continuo de ACS a 60°C en los períodos en que la aportación solar es insuficiente para cubrir la demanda, especialmente en los meses de invierno. Su dimensionamiento parte del criterio de que la caldera debe ser capaz de elevar la temperatura de todo el volumen del acumulador de apoyo (2.500 L) desde la temperatura media del agua de red de Cáceres ($14,1^\circ\text{C}$) hasta los 60°C en un tiempo máximo de una hora, conforme a las exigencias del RITE en materia de protección contra la legionela. Aplicando la ecuación de potencia térmica con un calor específico del agua de $4,18 \text{ kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$, la potencia mínima requerida es: 133,23 kW

El equipo seleccionado a partir de su ficha técnica comercial es el quemador de gas de pequeña potencia BENTONE STG 146 de la marca Salvador Escoda S.A., con un rango de modulación de 23,5 a 144 kW, que satisface ampliamente la potencia mínima requerida. El quemador opera con gas natural y dispone de sistema de control Siemens, monitorización por ionización y válvula de bola integrada, cumpliendo con la normativa europea EN 676.

3.9 Resultados del sistema y verificación con CHEQ4

El diseño final de la instalación integra todos los subsistemas dimensionados —campo de captadores, circuito primario con intercambiador de calor, circuito secundario con acumuladores y sistema de apoyo— en un esquema hidráulico centralizado que cumple con los requisitos técnicos y normativos establecidos por el CTE-HE4 y el RITE, cuyo esquema completo se presenta en la Figura 6.

Figura 6
Diseño final de la instalación



Nota: Fuente: Elaboración propia.

Con todos los componentes dimensionados —campo de captadores, circuitos primario y secundario, acumuladores, intercambiador, vasos de expansión y sistema de apoyo— se procedió a la configuración completa de la instalación en el programa CHEQ4.2 para obtener la verificación energética definitiva y generar el certificado oficial de cumplimiento del CTE-HE4. El proceso de configuración se realizó en cinco pasos secuenciales.

En primer lugar, se seleccionó la localidad de Cáceres (provincia de Cáceres, zona climática IV, latitud $39,28^\circ$, altura 439 m), con una irradiación media mensual que oscila entre $8,6 \text{ MJ}/\text{m}^2$ en enero y $29,1 \text{ MJ}/\text{m}^2$ en julio, y una temperatura media del agua de red de $14,1^\circ\text{C}$. Se seleccionó la tipología de instalación con consumo múltiple totalmente centralizada. A continuación,

se introdujo la demanda total de ACS de 3.105 L/día con una ocupación del 100 % durante todos los meses del año. En la pestaña Solar/Apoyo se configuró el captador GAMESA SOLAR 5000S (Gamesa Solar, certificación NPS 15311), con 24 unidades, orientación 0° (sur), inclinación 39,28°, pérdidas por sombras del 1,56 % y área total de captación de 50,38 m². Se introdujo un porcentaje de anticongelante del 30 %, una longitud equivalente total del circuito primario de 124 m distribuida en 6 tramos, y se seleccionó una caldera convencional de gas natural como sistema de apoyo. Finalmente, se introdujo el volumen total de acumulación de 3.500 L.

La Figura 7 muestra las pantallas de configuración del programa con los parámetros de la instalación completa introducidos.

Figura 7
Configuración de la instalación solar térmica en CHEQ4

The figure displays five screenshots of the CHEQ4 software interface, showing the configuration of a solar thermal installation. The screenshots are labeled CHEQ4, CHEQ4, CHEQ4, CHEQ4, and CHEQ4.

Screenshot 1 (Top Left): General location and climate data. Province: Cáceres, Municipality: Cáceres, Zone climática: Zone IV, Latitud: 38° 28'. A table shows monthly radiation (Rad), red temperature (T.Red), and ambient temperature (T.Amb) from January to December. The average radiation is 18.0 MJ/m², and the average red temperature is 14.1 °C.

Screenshot 2 (Top Right): Consumption settings. Consumo Único: Aplicación. Consumo Múltiple: Viviendas: 14, Dormitorios: 3, Personas: 58.0, Litros/día: 1.333. Demanda calculada (l/día a 60 °C): 3.046. Consumo total (l/día a 60 °C): 3.105.

Screenshot 3 (Middle Left): Installation type selection. Options include: Instalación con sistema proliferado, Instalación con todo centralizado, Instalación con intercumulador, Instalación con apoyo distribuido, Instalación con intercambiador independiente, and Instalación con acumulador distribuido. The selected option is "Instalación con todo centralizado".

Screenshot 4 (Middle Right): Collector and circuit parameters. Captadores: Gamesa Solar, 5800 S, 24 units. Datos de ensayo: Acea (m²): 2.989, a1 (W/m²K): 0.794, a2 (W/m²K): 4.4, K30 (W/m²K): 0.017, K30 (W/m²K): 12, K30 (W/m²K): 0.01, K30 (W/m²K): 100.25211. Campo de captadores: N.º captadores: 24, Captadores en serie: 1, Pérdidas sombras (%): 1.56, Orientación (°): 0, Inclinación (°): 39.28, Área total captadores (m²): 50.38. Circuito primario/secundario: Caudal prim. (l/h): 3.667, Anticongelante (%): 30, Long. equival. (m): 197, Diám. tubería (mm): 31, Exp. aislante (mm): 45, Aislante: genérico.

Screenshot 5 (Bottom Left): Results summary. Volumen de acumulación: Volumen total (l): 3500, Vel/Área (l/m²): 69.48, Aislante: genérico. PISCINA COBERTA: Altura (m):, Apertura diaria (h):, Superficie lámina (m²):, Humedad relativa (%):. Resultados: Cumple.

Screenshot 6 (Bottom Right): Results summary. Volumen Contribución: Enero A: 24, 200.0%, Febrero B: 0, 0.00%, Marzo C: 0, 8.00%, Noviembre: 0, 90.0%, Diciembre: 0, 100.0%, Promedio: 0, 100.0%. Solar fraction: 72%. Cumple.

Nota: Fuente: Elaboración propia.

Los resultados obtenidos por CHEQ4 confirman que la instalación diseñada cumple los requerimientos de fracción solar mínima exigidos por el CTE-HE4, alcanzando una fracción solar anual del 67 %, valor que supera en 7 puntos porcentuales el mínimo normativo del 60 % para la zona climática IV de Cáceres. La Tabla 7 presenta el resumen de los resultados energéticos anuales globales obtenidos de CHEQ4.

Tabla 7
Resultados energéticos anuales de CHEQ4

Parámetro energético	Valor anual
Fracción solar anual [%]	67
Demanda neta [kWh]	60.392
Demanda bruta [kWh]	69.767
Aporte solar [kWh]	46.769
Consumo auxiliar [kWh]	24.608
Reducción de emisiones de CO ₂ [kg]	10.096

Nota: Elaboración propia.

La FIGURA 8 muestra el gráfico de resultados de CHEQ4 con la evolución mensual de la fracción solar, la aportación solar, la demanda bruta y el consumo auxiliar a lo largo del año. Se observa el comportamiento estacional característico de un

emplazamiento mediterráneo: la fracción solar alcanza valores próximos al 100 % en los meses de verano (junio–agosto), período en que la aportación solar supera ampliamente la demanda, mientras que en los meses de invierno (diciembre–enero) la fracción solar desciende hasta valores en torno al 35–40 %, justificando la necesidad del sistema de apoyo dimensionado.

Figura 8
Gráfico de resultados mensuales de CHEQ4



Nota: Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, el programa CHEQ4 generó el certificado oficial que acredita el cumplimiento de los requerimientos del CTE-HE4 (FIGURA 9). El certificado confirma los parámetros del sistema verificado: captador 5000S de Gamesa Solar (NPS 15311), 24 unidades, pérdidas por sombras del 1,6 %, orientación 0° e inclinación 38,3°, caudal primario de 3.627 L/h, porcentaje de anticongelante del 30 %, longitud del circuito primario de 197 m, sistema de apoyo de caldera convencional a gas natural y volumen de acumulación de 3.500 L.

Figura 9
Certificado oficial generado por CHEQ4 confirmando que la instalación solar térmica especificada CUMPLE los requerimientos mínimos del CTE-HE4



Nota: Fuente: Elaboración propia.

DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos en el presente estudio confirman la viabilidad técnica y normativa del sistema solar térmico centralizado diseñado para el centro educativo de Cáceres. La fracción solar anual del 67 %, verificada mediante CHEQ4, supera en 7 puntos porcentuales el mínimo del 60 % exigido por el CTE-HE4 para la zona climática IV, lo que proporciona un margen de seguridad que garantiza el cumplimiento normativo incluso en años con irradiación solar por debajo de la media histórica. Este resultado es coherente con los valores reportados por Lizana et al. (2017) para instalaciones de ACS solar bien dimensionadas en el sur de España, que sitúan las fracciones solares alcanzables entre el 55 % y el 75 % en climas mediterráneos, y con los datos del informe Solar Heat Worldwide de la IEA, que identifica la zona mediterránea como una de las más favorables del mundo para el aprovechamiento de la energía solar térmica (Weiss & Spörk-Dür, 2024).

La selección del captador GAMESA SOLAR 5000S con rendimiento óptico $\eta_0 = 0,798$ se justifica plenamente a la luz de la literatura técnica. Kalogirou (2014) establece que los captadores planos con η_0 superior a 0,75 son los más adecuados para instalaciones de ACS en climas con alta irradiación, criterio que el captador seleccionado supera con holgura. Asimismo, Kumar y Verma (2026) señalan que los captadores planos de última generación presentan coeficientes ópticos entre 0,75 y 0,85, rango en el que se encuadra el modelo utilizado, lo que confirma que la elección realizada corresponde al estado del arte de la tecnología disponible comercialmente en el mercado español.

El dimensionamiento del campo de captadores —24 unidades en 4 filas de 6, con inclinación de 39,28° e igual a la latitud del emplazamiento— sigue el criterio de maximización de la captación anual recomendado por Duffie y Beckman (2013) para instalaciones con captación fija sin seguimiento solar. Las pérdidas por sombras del 1,56 %, muy por debajo del límite normativo del 10 %, confirman que la posición adoptada del campo en la cubierta del edificio A, alejada de los muretes perimetrales y del edificio B adyacente, es correcta y representa una buena práctica de diseño que otros proyectos similares deberían considerar.

Respecto al dimensionamiento hidráulico, la metodología seguida basada en el RITE y en criterios ampliamente aceptados

en la práctica de proyectistas, como la estimación de pérdidas en accesorios como el 30 % de las pérdidas en tuberías (Streicher, 2008) produce resultados coherentes y conservadores. La elección del propilenglicol al 30 % como fluido caloportador, frente al etilenglicol, responde a criterios de seguridad alimentaria especialmente relevantes en el contexto de un centro educativo con cocina escolar, siguiendo las recomendaciones de Peuser et al. (2005).

Una limitación del presente estudio es que la verificación energética se realizó exclusivamente mediante CHEQ4, sin complementarla con herramientas de simulación dinámica horaria como TRNSYS o EnergyPlus, que permitirían una evaluación más precisa del comportamiento transitorio del sistema en episodios de sobrecalentamiento estival o de demanda punta. Adicionalmente, el análisis económico período de retorno, VAN y TIR no fue objeto de este trabajo, aunque constituye un paso necesario para la toma de decisiones en el contexto real de un proyecto de ingeniería (Duffie & Beckman, 2013). Como líneas de trabajo futuro, se propone la monitorización experimental de la instalación durante al menos un ciclo anual completo para contrastar los valores de fracción solar simulados con los medidos, siguiendo la metodología propuesta por García-Fuentes et al. (2018).

CONCLUSIONES

El sistema solar térmico centralizado diseñado para el centro educativo de Cáceres cumple plenamente con los requisitos del CTE-HE4, alcanzando una fracción solar anual del 67 %, valor que supera en 7 puntos porcentuales el mínimo normativo del 60 % exigido para la zona climática IV. Las pérdidas por sombras del edificio B adyacente son del 1,56 %, ampliamente por debajo del límite del 10 % establecido por la normativa, lo que valida la posición adoptada para el campo de captadores en la cubierta del edificio A.

La configuración de 24 captadores planos GAMESA SOLAR 5000S, distribuidos en 4 filas de 6 unidades con una inclinación de 39,28° y orientación sur, resulta técnica y espacialmente viable para la cubierta disponible, garantizando la ausencia de sombreado mutuo entre filas mediante una separación mínima de 2,60 m. El área real de captación de 50,38 m² satisface la regla de proporcionalidad del CTE-HE4 para el volumen de acumulación primaria de 3.500 L.

El dimensionamiento conservador de todos los componentes hidráulicos —tuberías, intercambiador de placas M3FG (30.225,6 W), bombas Wilo, acumuladores MVV3500 RB y MVV2500 RB, vasos de expansión 220SMR (200 L) y 350SMR (300 L), y caldera de apoyo BENTONE STG 146 (133,23 kW requeridos, 144 kW disponibles) garantiza la operación segura y continua del sistema en las condiciones más desfavorables del emplazamiento, incluyendo la protección contra heladas mediante propilenglicol al 30 % y la protección contra la legionela mediante el diseño del acumulador de apoyo a 60°C, conforme al RITE.

La metodología aplicada, basada en el CTE-HE4 y el RITE y verificada mediante CHEQ4, es completamente reproducible y transferible a proyectos similares en centros educativos del sur de Europa con climatología mediterránea análoga. El aporte solar anual de 46.769 kWh, con una reducción de emisiones de 10.096 kg de CO₂, evidencia el potencial de descarbonización del sector educativo mediante la integración de energía solar térmica, sector con perfil de demanda diurna especialmente favorable para este tipo de instalaciones.

Como líneas de trabajo futuro se proponen: el análisis de viabilidad económica mediante el cálculo del período de retorno, VAN y TIR; la simulación dinámica horaria con TRNSYS para una validación más detallada del comportamiento estacional; y la monitorización experimental de la instalación para contrastar los valores simulados con datos reales medidos.

FINANCIACIÓN

La investigación fue financiada completamente por los autores.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no existe conflicto de intereses relacionado con esta investigación.

CONTRIBUCIÓN DE AUTORÍA

En concordancia con la taxonomía CRediT, los autores declaran las contribuciones indicadas en la siguiente matriz.

Tabla 8

Contribución de autoría según taxonomía CRediT

Participar activamente en:	Autor 1	Autor 2	Autor 3	Autor 4	Autor 5
Conceptualización	X	X	X	X	X
Análisis formal	X	X	X	X	X
Adquisición de fondos	X	X	X	X	X
Investigación	X	X	X	X	X
Metodología	X	X	X	X	X
Administración del proyecto	X	X	X	X	X
Recursos	X	X	X	X	X
Redacción – borrador original	X	X	X	X	X
Redacción – revisión y edición	X	X	X	X	X
Discusión de los resultados	X	X	X	X	X
Revisión y aprobación de la versión final del trabajo	X	X	X	X	X

Nota: X indica participación activa del autor.

REFERENCIAS

- Código Técnico de la Edificación (CTE). (2013). *Documento Básico HE Ahorro de Energía, Sección HE4: Contribución solar mínima de agua caliente sanitaria*. Ministerio de Fomento, Gobierno de España.
- Duffie, J. A., & Beckman, W. A. (2013). *Solar Engineering of Thermal Processes* (4th ed.). John Wiley & Sons. <https://doi.org/10.1002/9781118671603>
- García-Fuentes, M. A., de Torre, C., & González, A. (2018). Monitoring of solar thermal systems performance in Spain: A case study. *Energy Procedia*, 155, 422–431. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2018.11.059>
- Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE). (2012). *Guía técnica: Condiciones climáticas exteriores de proyecto*. IDAE.
- ISO 9806. (2017). *Solar energy (Solar thermal collectors) Test methods*. International Organization for Standardization.
- Kalogirou, S. A. (2014). *Solar Energy Engineering: Processes and Systems* (2nd ed.). Academic Press / Elsevier. <https://doi.org/10.1016/C2011-0-07038-2>
- Klein, S. A., Beckman, W. A., & Duffie, J. A. (1976). A design procedure for solar heating systems. *Solar Energy*, 18(2), 113–127. [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(76\)90015-1](https://doi.org/10.1016/0038-092X(76)90015-1)
- Kumar, G., & Verma, S. K. (2026). Critical review on thermal performance enhancement techniques for flat plate solar collectors. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*. <https://doi.org/10.1177/09544089241228105>
- Lizana, J., Ortiz, C., Soltero, V. M., & Chacartegui, R. (2017). District heating systems based on low-carbon energy technologies in Mediterranean areas. *Energy*, 120, 397–416. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.11.096>
- Ministerio de Fomento. (2013). *Código Técnico de la Edificación. Documento Básico HE Ahorro de Energía, Sección HE4: Contribución solar mínima de agua caliente sanitaria*. Gobierno de España.
- Ministerio de Industria, Energía y Turismo. (2013). *Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios (RITE)*. Real Decreto 238/2013. Boletín Oficial del Estado.
- O'Hegarty, R., Kinnane, O., McCormack, S. J., & Bruton, K. (2014). A simplified procedure for sizing solar thermal systems. *Energy Procedia*, 57, 2324–2333. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.10.244>
- Pavlović, D., Belošević, S., Đorđević, O., & Kupusinac, A. (2019). Solar-based system for hot water preparation in school building. *E3S Web of Conferences*, 116, 00060. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201911600060>
- Peuser, F. A., Remmers, K.-H., & Schnauss, M. (2005). *Solar Thermal Systems: Successful Planning and Construction*. Solarpraxis AG / James & James.
- Streicher, W. (2008). Simulation of solar thermal systems. En H. Kaltschmitt, W. Streicher & A. Wiese (Eds.), *Renewable Energy: Technology, Economics and Environment* (pp. 249–281). Springer.
- Tian, Y., & Zhao, C. Y. (2013). A review of solar collectors and thermal energy storage in solar thermal applications. *Applied Energy*, 104, 538–553. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.11.051>
- Weiss, W., & Spörk-Dür, M. (2024). *Solar Heat Worldwide: Global Market Development and Trends 2023*. IEA Solar Heating and Cooling Technology Collaboration Programme. <https://www.iea-shc.org/solar-heat-worldwide>