

Análisis práctico, Optimización y Predimensionamiento de sistemas térmicos de frío solar impulsados por colectores lineales Fresnel en etapas tempranas de un proyecto según el tipo de edificio y zona climática

Juan José Díaz-Carrillo¹, José Antonio Fernández-Benítez²

¹Departamento de Ingeniería Energética, Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales, Universidad Politécnica de Madrid, José Gutiérrez Abascal 2, 28006 Madrid, España. Juanjose.diaz.carrillo@alumnos.upm.es

²Departamento de Ingeniería Energética, Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales, Universidad Politécnica de Madrid, José Gutiérrez Abascal 2, 28006 Madrid, España. Ja.fbenitez@upm.es

Resumen

El presente trabajo investiga el comportamiento de sistemas térmicos de frío solar accionados por colectores lineales Fresnel (STCS_LFC), considerando los efectos combinados producidos por la variación del dimensionamiento de sus principales componentes, las condiciones climáticas y la tipología del edificio, con el objetivo de generar relaciones matemáticas de amplia aplicación que sirvan para un predimensionamiento rápido y práctico de la instalación, y para la estimación de sus prestaciones energéticas. La demanda horaria de refrigeración de los edificios se estimó a través del software Design Builder, el rendimiento de los STCS_LFC se estudió utilizando una herramienta de simulación realista y las expresiones matemáticas; objetivo del estudio, se obtuvieron mediante regresiones lineales de las simulaciones realizadas. Los resultados obtenidos incluyen expresiones matemáticas basadas en la demanda de refrigeración, el área de apertura solar y el volumen del tanque, para el dimensionamiento de STCS_LFC y la estimación de sus requerimientos y consumos energéticos, por tipo de edificio y zona climática.

Palabras clave: Energía solar; Refrigeración por absorción; Colector lineal Fresnel; EES; Design Builder.

Abstract

The present work investigates the performance of solar thermal cooling systems driven by linear Fresnel collectors (STCS_LFC), considering the combined effects produced by the variation of the sizing of its main components, the climatic conditions and the typology of the building, with the objective of generating mathematical relations of wide application to be used for a quick and practical pre-dimensioning of the installation, and for the estimation its energy requirements and consumptions. The hourly cooling demand of the buildings were estimated through Design builder software, the performance of STCS_LFC was studied using a realistic simulation tool, and the mathematical expressions; objective of the study, were obtained through linear regressions of the performed simulations. The obtained results include mathematical expressions based on the cooling demand, solar aperture area and tank volume, for the dimensioning of STCS_LFC and the estimation of its energy requirements and consumptions, by building type and climatic zone.

Keywords: Solar energy; Absorption cooling; Linear Fresnel collector; EES; Design Builder.

1. Introducción

En los últimos años, la investigación en el campo de las tecnologías de refrigeración solar ha experimentado un crecimiento que se ha acelerado significativamente a partir del 2005[1], siendo los sistemas térmicos de refrigeración solar, la tecnología de mayor crecimiento desde entonces, y de la que se espera que continúe esta tendencia. De acuerdo con [2], el crecimiento de la

investigación antes mencionado, se ha debido principalmente al potencial de los sistemas térmicos de frío solar para adaptarse a diversos rangos de demanda frigorífica, lo que permitiría reducir el uso de energía convencional y con ello proteger los sistemas eléctricos nacionales de saturaciones y sobrecargas. Otros aspectos influyentes como las mejoras conseguidas en los colectores solares en cuanto a rendimiento, el menor consumo de energía convencional durante el

funcionamiento de sus componentes, el uso de refrigerantes naturales, la facilidad de almacenamiento de energía térmica y los incentivos gubernamentales, han permitido promover el interés científico y económico de este tipo de sistemas.

A día de hoy, una gran cantidad de investigaciones se han llevado a cabo en relación a los sistemas térmicos de refrigeración solar. Estos se han centrado en analizar diferentes tipos de configuraciones en términos de etapas, pares absorbente-refrigerante, medios de accionamiento, aplicaciones y capacidades de refrigeración. Sin embargo, pocos o menos habituales son aquellos estudios en los que se analizan las prestaciones de la instalación en función de los efectos del dimensionado de sus componentes principales [3], [4], [5], la influencia de las condiciones climáticas en el dimensionamiento y rendimiento de los sistemas de refrigeración solar [6]–[9] o la implementación de este tipo de tecnología por tipología de edificio [10], [11]. A pesar de las importantes aportaciones de los estudios señalados anteriormente, se ha percibido de las investigaciones realizadas hasta la fecha, un alcance específico, individual y acotado en cuanto al objeto de análisis. Es decir, no se han estudiado de forma combinada los efectos sobre el rendimiento de una instalación de frío solar, de diversos factores como la variación del dimensionamiento de sus componentes, la influencia de las condiciones climáticas y la tipología de edificio. Esto ha provocado la imposibilidad de llegar a una generalización profunda sobre la influencia multidireccional de estos aspectos, impidiendo la generación de datos/ratios o relaciones entre parámetros que puedan ser utilizados como guías de diseño en el predimensionamiento y estimación de

los requerimientos energéticos de una instalación de este tipo, en las primeras etapas de un proyecto y sin la necesidad imperiosa de diseñarlo en su totalidad.

La disponibilidad de datos, relaciones y/o criterios de amplia aplicación si bien no es 100% exacto en todas y cada una de las situaciones ni reemplaza el diseño de detalle de una instalación de este tipo, permitiría, en las primeras etapas de un proyecto, tener una visión de partida y tomar decisiones de diseño e implementación de una manera rápida, fácil y práctica. Debido a la falta de datos e información en el contexto propuesto, el presente trabajo de investigación tiene como objetivo estudiar el desempeño de sistemas térmicos de frío solar impulsados por colectores lineales Fresnel considerando la influencia combinada de los efectos producidos por la variación del dimensionamiento de sus componentes principales, las condiciones climáticas y la tipología del edificio, y con ello generar relaciones matemáticas de amplia aplicación para el predimensionamiento y la estimación de consumos y requerimientos energéticos en función del tipo de edificio, la demanda de refrigeración, el área de apertura solar y el volumen del depósito de agua caliente.

2. Métodos

En esta sección se describen todos aquellos aspectos considerados en la modelización, simulación, procesado y análisis de resultados del estudio sobre la implementación de sistemas térmicos de frío solar impulsados por colectores Fresnel en diferentes tipologías de edificios y zonas climáticas. La secuencia de actividades realizadas para lograr los objetivos

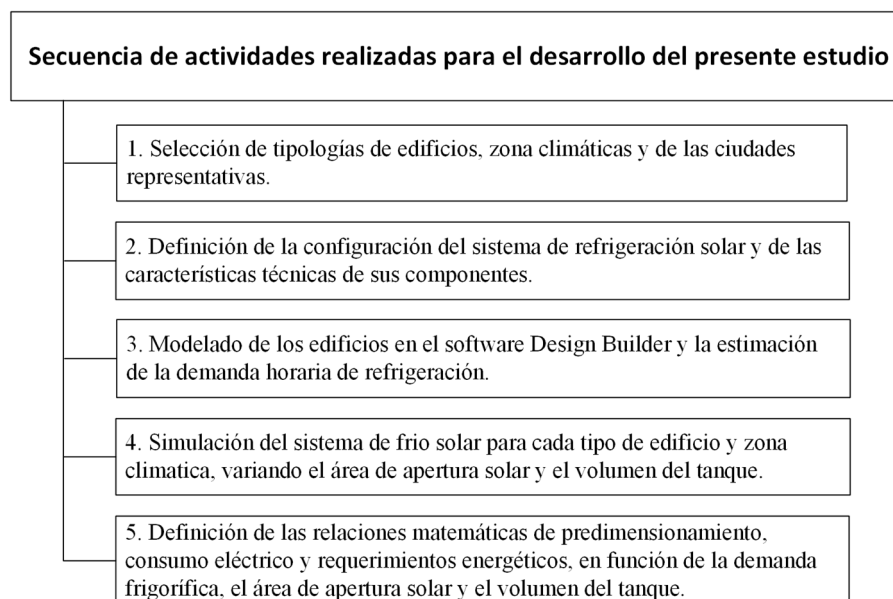


Figura 1. Diagrama de flujo de la secuencia de actividades realizadas para el desarrollo del presente trabajo de investigación. fuente: elaboración propia.

planteados en este trabajo de investigación se ilustra de manera general en el diagrama de flujo de la **Figura 1**.

2.1. Tipología de edificios

Se estudió el comportamiento térmico de sistemas térmicos de frío solar impulsados por colectores lineales Fresnel considerando su aplicación en el acondicionamiento de diferentes tipos de edificios comerciales. Las tipologías de edificación incluidas en el estudio fueron: centro comercial, supermercado y almacén. Este tipo de edificaciones han sido seleccionadas, en primer lugar, por ser parte de las soluciones constructivas comerciales más comunes y ampliamente utilizadas en la mayoría de las ciudades del mundo, y también por la falta o limitada disponibilidad de información de estudios similares en los que se haya analizado la implementación sistemas de refrigeración solar.

Los edificios comerciales seleccionados han sido modelados en base a la información de los modelos *New construction-commercial reference buildings* desarrollados por el Departamento de Energía de los EE. UU. en conjunto con tres de sus laboratorios nacionales, anteriormente conocidos como *commercial building benchmark models* [12].

La información obtenida de los modelos de edificios comerciales de referencia [12] incluía las cargas internas de la zona térmica, los horarios, los requisitos de aire primario, las propiedades de los materiales de construcción, las características de diseño y uso de los sistemas HVAC e iluminación así como otros datos claves para su modelado. Las propiedades de los materiales constructivos de los edificios y las características de los sistemas HVAC e iluminación se basan en los requerimientos de [13] de acuerdo con la zona climática del lugar donde se realiza el estudio. Los requerimientos mínimos de aire primario se basan en [14] según el tipo de espacio o tipo de edificio a tratar.

Ciudad de México (zona climática 3b). Para estas ciudades se definió la información geográfica y las condiciones anuales de diseño de refrigeración de acuerdo con la información proporcionada por la base de datos de condiciones climáticas de ASHRAE [15] correspondientes al 2017. Además, las condiciones climáticas de cada una de las ciudades mencionadas en cuanto al perfil horario anual de la radiación normal directa, temperatura de bulbo seco, humedad relativa, presión atmosférica y velocidad del viento, se obtuvieron de la base de datos del software Design Builder [16] y del software System Advisor Model (SAM) [17].

2.3. Sistema de refrigeración

El diagrama esquemático del sistema térmico de frío solar propuesto en este estudio se muestra en la **Figura 2**. Los elementos principales de este sistema son: colectores lineales Fresnel (I), un tanque de almacenamiento (III), una máquina de absorción de simple efecto LiBr-H₂O (IV) y una torre de refrigeración (VI). Los elementos complementarios del sistema propuesto son: un intercambiador de calor (II), un subsistema de suministro de energía térmica auxiliar convencional (V) y diversos elementos de distribución de agua (tuberías, grupos de bombeo y válvulas de control que interconectan los citados subsistemas).

2.4. Periodo de simulación

Se analizó el comportamiento térmico de los sistemas de frío solar anteriormente descritos en forma horaria y por un periodo de tiempo de una semana. Las condiciones climáticas de los días seleccionados para el estudio (primera semana del mes) son representativas del mes más caluroso del año para cada ciudad considerada. El mes más caluroso del año de las ciudades incluidas en el estudio, fue seleccionado de acuerdo a la información proporcionada por la base de datos de condiciones climáticas del ASHRAE [15].

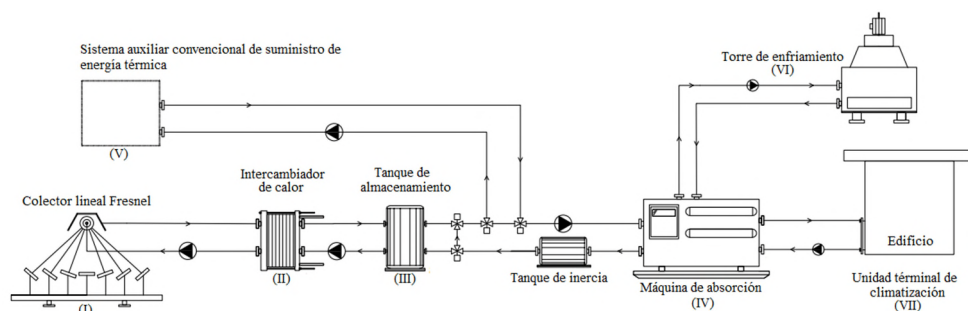


Figura 2. Diagrama esquemático del sistema térmico de frío solar propuesto. Fuente: elaboración propia.

2.2. Zonas climáticas

El estudio se realizó en tres zonas climáticas diferentes: zona climática 1 (1b), 2 (2a) y 3 (3b) según la clasificación ASHRAE. Se seleccionaron tres ciudades con condiciones climáticas representativas de cada una de las zonas climáticas incluidas en este trabajo: Riad (zona climática 1b), Tenerife Sur (zona climática 2a) y

2.5. Software

El software Design Builder [16] se utilizó para el modelado de los edificios propuestos y para la estimación de la demanda horaria de refrigeración. La simulación y análisis de los sistemas térmicos de frío solar impulsados por colectores lineales Fresnel se

llevó a cabo utilizando la herramienta de simulación realista desarrollada en el trabajo de investigación [18].

2.6. Estrategia de simulación

Para cada tipología de edificio y las distintas zonas climáticas, se simuló la implantación de un sistema térmico de frío solar impulsado por colectores lineales Fresnel en función de sus necesidades frigoríficas, variando el área de apertura solar y la capacidad del tanque de almacenamiento.

3. Resultados

En la **Tabla 1** se muestran los datos de predimensionamiento del sistema térmico de frío solar en cuanto al área de apertura solar y la capacidad del tanque de agua caliente, propuestos y utilizados para realizar las simulaciones para cada tipo de edificio y zona climática. Esta tabla también incluye el valor de la carga máxima de enfriamiento de diseño y el horario de disponibilidad u operación del sistema HVAC, para cada caso de estudio.

Los resultados de las simulaciones realizadas, reflejados en las figuras y en las tablas que se muestran a continuación, se han obtenido para el periodo de estudio indicado en la sección 2.4 y considerando la disponibilidad diaria del sistema HVAC indicada en la **Tabla 1** en función de la tipología del edificio.

Tabla 1. Condiciones de diseño.

Tipo de edificio	Zona climática	Apertura solar del sistema de captación	Volumen del tanque	Carga térmica pico de diseño	Horario de disponibilidad del sistema HVAC
		m ²			
Centro comercial	1	[368 - 552 - 920 - 1104]	2500	220	Lunes a Viernes [7-21] h
	2	[368 - 552 - 920 - 1104]		140	
	3	[184 - 276 - 368 - 552]		67	Sábado [7-22] h
Supermercado	1	[552 - 736 - 1196 - 1380]	5000	397	Lunes a Viernes [7-21] h
	2	[368 - 552 - 920 - 1104]	10000	275	
	3	[368 - 552 - 920 - 1104]	15000	160	Sábado [7-22] h
Almacén	1	[552 - 736 - 1196 - 1380]	20000	502	Lunes a Viernes [6-18] h
	2	[368 - 552 - 920 - 1104]	25000	185	
	3	[184 - 276 - 368 - 552]		75	

Fuente: elaboración propia.

3.1. Resultados de las simulaciones – Figuras

Las figuras que se presentan a continuación, muestran gráficas en tres dimensiones (ejes X-Y-Z) representadas a través de bandas de color, las cuales han sido obtenidas utilizando el modelo de ajuste bicuadrático. Las bandas de color se utilizan para representar el valor de Z en el espacio X-Y (proyección 2-D).

En estas figuras se representan los resultados de algunas variables en función del área de apertura solar (m²) y del volumen del tanque (L), para cada tipología de edificio y zona climática. Las variables representadas corresponden a la generación total de energía frigorífica (kWh), energía solar total absorbida (kWh) y energía auxiliar total requerida (kWh).

3.1.1. Resultados de las simulaciones – Figuras. Centro comercial.

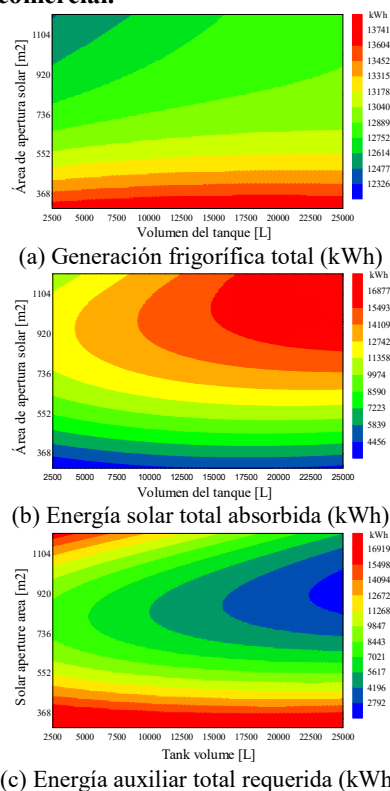


Figura 3. Resultados obtenidos - Centro comercial, zona climática 1. Fuente: elaboración propia.

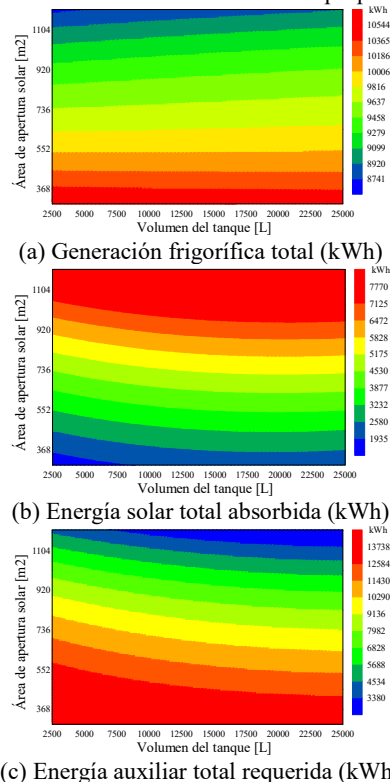


Figura 4. Resultados obtenidos - Centro comercial, zona climática 2. Fuente: elaboración propia.

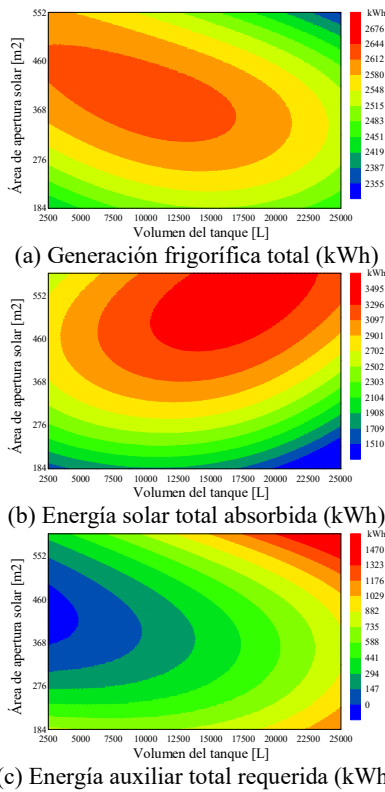


Figura 5. Resultados obtenidos - Centro comercial, zona climática 3. Fuente: elaboración propia.

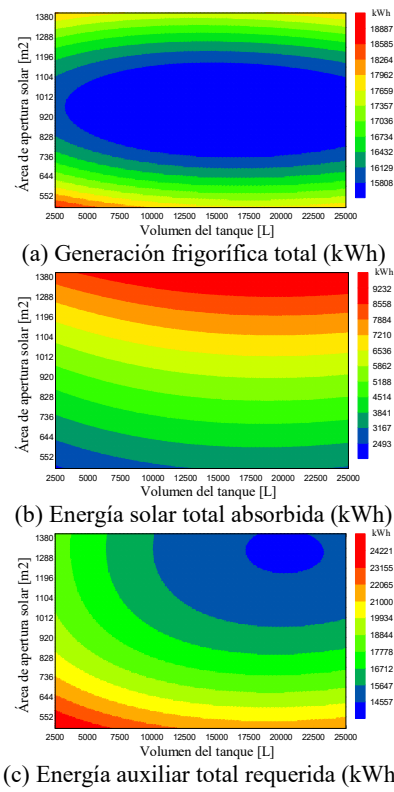


Figura 7. Resultados obtenidos - Supermercado, zona climática 2. Fuente: elaboración propia.

3.1.2. Resultados de las simulaciones - Figuras. Supermercado.

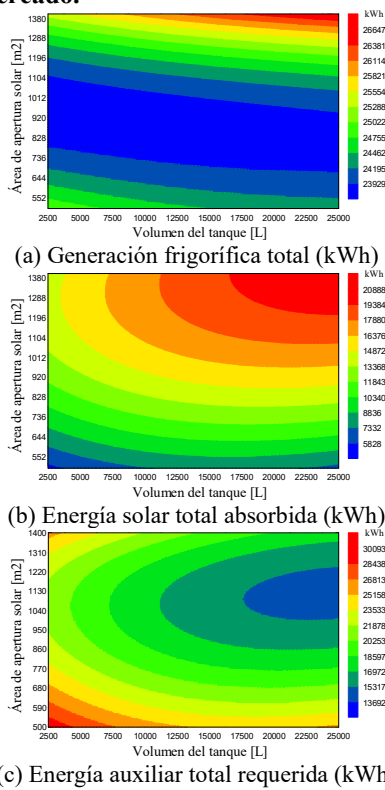


Figura 6. Resultados obtenidos - Supermercado, zona climática 1. Fuente: elaboración propia.

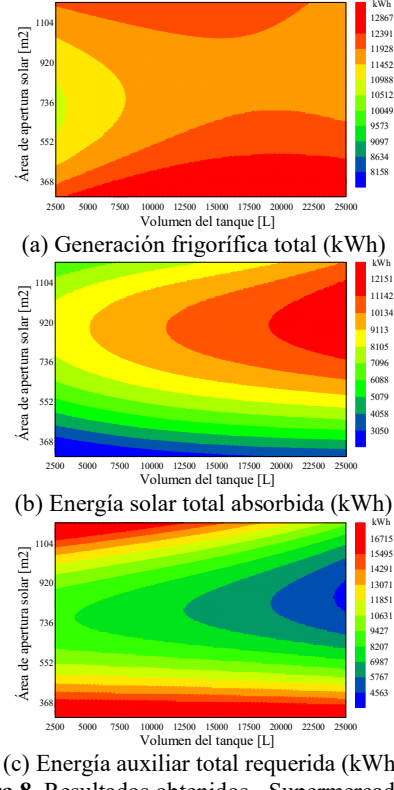


Figura 8. Resultados obtenidos - Supermercado, zona climática 3. Fuente: elaboración propia.

3.1.3. Resultados de las simulaciones - Figuras. Almacén.

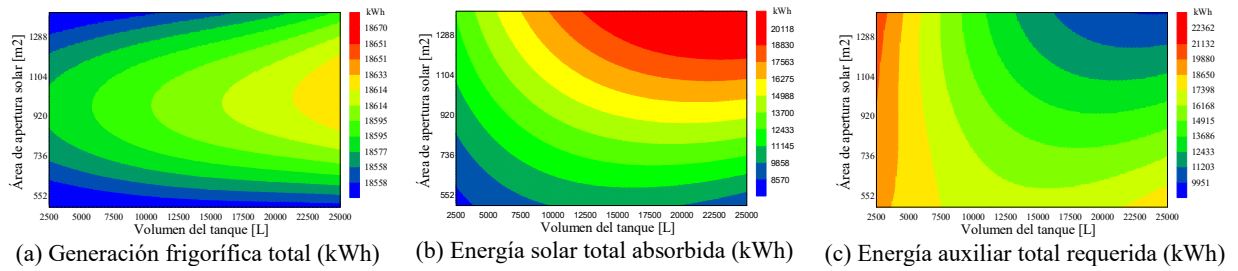


Figura 9. Resultados obtenidos - Almacén, zona climática 1. Fuente: elaboración propia.

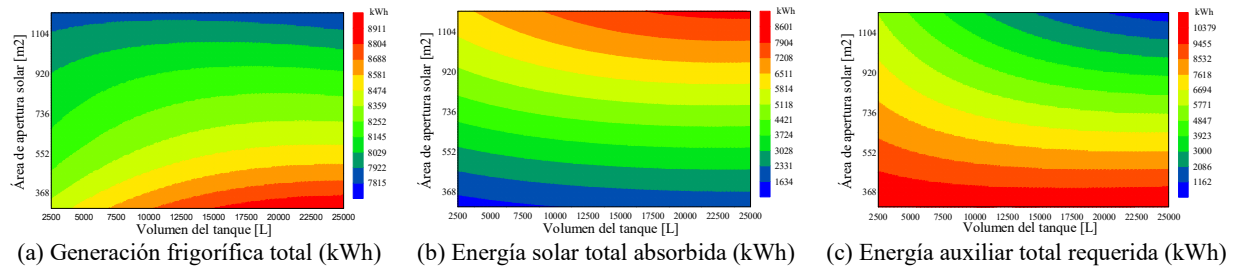


Figura 10. Resultados obtenidos - Almacén, zona climática 2. Elaboración propia.

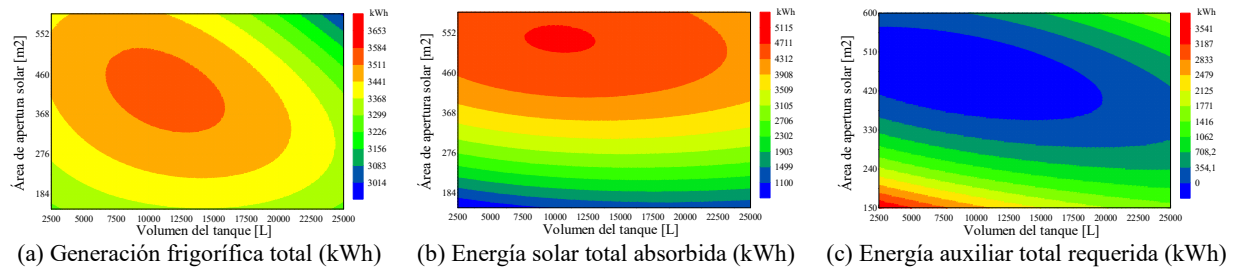


Figura 11. Resultados obtenidos - Almacén, zona climática 3. Fuente: elaboración propia.

Considerando los resultados obtenidos de las simulaciones realizadas, se han generado relaciones matemáticas de algunos parámetros ($r_{Q_{\text{capacidad}}}$ frigorífica, $r_{Q_{\text{solar}}}$ colectada, $r_{Q_{\text{solar}}}$ absorbida, $r_{E_{\text{frigorífica}}}$ generada, $r_{E_{\text{solar}}}$ colectada, $r_{E_{\text{solar}}}$ absorbida, $r_{E_{\text{consumo}}}$ eléctrico, $r_{E_{\text{auxiliar}}}$ requerida, $r_{W_{\text{evaporada}}}$) para ser utilizadas como criterios de diseño de amplia aplicación en el predimensionamiento y estimación de los consumos y de los requerimientos de energía auxiliar de los sistemas de refrigeración solar térmica en etapas tempranas de un proyecto, para diferentes tipos de edificios y zonas climáticas. Estas relaciones se han obtenido a partir de una regresión lineal múltiple y corresponden a una ecuación de forma polinomial de orden 3, como se muestra en la ecuación (1).

$$Y = a_0 + a_1X_1 + a_2X_1^2 + a_3X_2 + a_4X_2^2 + a_5X_1X_2 \quad (1)$$

Los parámetros obtenidos para ser utilizados como criterios de amplia aplicación en el diseño y análisis de este tipo de sistemas se describen a continuación:

$r_{Q_{\text{capacidad}}}$ frigorífica: ratio de capacidad frigorífica [$\text{kW}/\text{m}^2 \cdot \text{m}^3$]. A través de este valor se estima la capacidad frigorífica nominal del sistema, en

función del área de apertura solar y del volumen del tanque de agua caliente.

$r_{E_{\text{frigorífica}}}$ generada: ratio de la energía de enfriamiento promedio generada por hora [$\text{kWh}/\text{h} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{m}^3$]. A través de este valor se estima la energía de enfriamiento promedio generada por hora por el sistema de frío solar en función del área de apertura solar y la capacidad del tanque de almacenamiento.

$r_{E_{\text{solar}}}$ colectada: ratio de la energía solar promedio colectada por los colectores solares Fresnel [$\frac{\text{kWh}}{\text{h} \cdot \text{kWh}/\text{h}}$]. La energía solar promedio captada por hora de funcionamiento del sistema, se estima en función de la energía de enfriamiento promedio generada por el sistema por hora.

$r_{E_{\text{solar}}}$ absorbida: ratio de la energía solar promedio absorbida [$\frac{\text{kWh}}{\text{h} \cdot \text{kWh}/\text{h}}$]. La energía solar promedio absorbida por hora de funcionamiento del sistema, se estima en función de la energía de enfriamiento promedio generada por el sistema por hora.

Tabla 2. Coeficientes de regresión lineal para STCS_LFC - Centro comercial, zonas climáticas 1, 2 y 3.

Coeficientes de regresión lineal para STCS_LFC - Centro comercial, zonas climáticas 1, 2 y 3.									
Parámetros - zona climática 1									
Y	r_Q _{capacidad} frigorífica	r_Q _{solar} colectada	r_Q _{solar} absorbida	r_E _{frigorífica} generada	r_E _{solar} colectada	r_E _{solar} absorbida	r_E _{consumo} eléctrico	r_E _{auxiliar} requerida	r_W _{evaporada}
X ₁	Volumen_tanque [m ³]	Volumen_tanque [m ³]	Volumen_tanque [m ³]	Volumen_tanque [m ³]	Volumen_tanque [m ³]	Volumen_tanque [m ³]	Volumen_tanque [m ³]	Volumen_tanque [m ³]	Volumen_tanque [m ³]
X ₂	Demanda de frío [kW]	Apertura solar [m ²]	Apertura solar [m ²]	Apertura solar [m ²]	Apertura solar [m ²]	Apertura solar [m ²]	Apertura solar [m ²]	Apertura solar [m ²]	Apertura solar [m ²]
a ₀	0.6129254	0.285362	0.1615701	0.4060945	-0.5362912	-0.3162079	0.02082343	1.250079	4.733451
a ₁	-0.000069655	-4.80609E-05	-2.9413E-05	-4.42115E-05	5.22408E-05	2.06828E-05	-1.98348E-07	2.27685E-05	-0.000117207
a ₂	3.01002E-09	2.87657E-09	1.83228E-09	1.87515E-09	-2.57023E-10	3.33836E-10	1.51617E-11	-2.04987E-09	4.40867E-09
a ₃	-4.10231E-14	-5.53679E-14	-3.6331E-14	-2.48888E-14	3.54472E-14	2.03041E-14	-1.0037E-16	-3.15163E-14	-4.79467E-14
a ₄	-0.001012093	1.6103E-05	8.63486E-05	-0.000737005	0.001180134	0.000476925	9.4892E-05	0.002841339	0.005524994
a ₅	7.0792E-07	-1.54054E-08	-7.2239E-08	5.63151E-07	4.048E-06	3.05431E-06	-1.10273E-07	-9.24583E-06	-8.4885E-06
a ₆	-1.56798E-10	2.13808E-12	1.75687E-11	-1.43241E-10	-3.45568E-09	-2.40854E-09	4.52052E-11	6.00339E-09	4.28718E-09
a ₇	7.59735E-08	-1.07406E-10	-5.1557E-09	5.08133E-08	-8.18049E-09	3.41752E-08	4.82689E-10	-1.9042E-07	2.94187E-07
a ₈	-3.54381E-11	1.24934E-13	2.63559E-12	-2.3955E-12	6.70601E-12	-2.11854E-11	-3.36142E-13	1.15987E-10	-2.18149E-10
a ₉	-1.97388E-12	-2.0519E-14	1.16773E-13	-1.31346E-12	-7.66436E-12	-6.20059E-12	-3.91456E-14	1.32383E-11	-7.4195E-12
a ₁₀	9.20874E-16	1.5383E-17	-5.44746E-17	6.17837E-16	5.99185E-15	4.69221E-15	2.87926E-17	-9.45839E-15	5.41195E-15
Parámetros - zona climática 2									
Y	r_Q _{capacidad} frigorífica	r_Q _{solar} colectada	r_Q _{solar} absorbida	r_E _{frigorífica} generada	r_E _{solar} colectada	r_E _{solar} absorbida	r_E _{consumo} eléctrico	r_E _{auxiliar} requerida	r_W _{evaporada}
X ₁	Volumen_tanque [m ³]	Volumen_tanque [m ³]	Volumen_tanque [m ³]	Volumen_tanque [m ³]	Volumen_tanque [m ³]	Volumen_tanque [m ³]	Volumen_tanque [m ³]	Volumen_tanque [m ³]	Volumen_tanque [m ³]
X ₂	Demanda de frío [kW]	Apertura solar [m ²]	Apertura solar [m ²]	Apertura solar [m ²]	Apertura solar [m ²]	Apertura solar [m ²]	Apertura solar [m ²]	Apertura solar [m ²]	Apertura solar [m ²]
a ₀	0.6546366	0.2782229	0.1744117	0.5286562	-0.6122644	-0.4853694	0.01250523	2.713425	2.555189
a ₁	-6.92702E-05	-4.78301E-05	-3.14543E-05	-5.52821E-05	-7.34886E-06	-1.17298E-05	-7.54752E-07	6.80347E-07	-2.93417E-05
a ₂	2.91177E-09	2.90768E-09	1.93143E-09	2.31761E-09	-3.8974E-10	-1.91446E-10	3.03159E-11	8.17271E-10	8.71143E-10
a ₃	-3.81679E-14	-5.7125E-14	-3.79552E-14	-3.02115E-14	3.16552E-14	1.88165E-14	1.93578E-17	-3.43651E-14	9.24033E-16
a ₄	-0.001251332	8.97957E-05	7.54338E-05	-0.001038338	0.003765629	0.002575419	0.000149585	-0.006493131	0.003232412
a ₅	9.8486E-07	-9.1211E-08	-6.75418E-08	8.52331E-07	-4.83822E-06	-3.36955E-06	-1.99705E-07	9.40613E-06	-4.43771E-06
a ₆	-2.52272E-10	2.82947E-11	2.25791E-11	-2.38207E-10	2.63644E-09	1.85691E-09	9.57399E-11	-4.7521E-09	2.07824E-09
a ₇	8.34015E-08	-6.25438E-09	-3.41191E-09	6.62061E-08	1.0514E-07	8.89994E-08	2.71299E-09	-6.97189E-08	1.03768E-07
a ₈	-4.07144E-11	3.78673E-12	1.27895E-12	-3.158E-11	-6.54591E-11	-5.9301E-11	-1.75316E-12	2.5338E-11	-8.661E-11
a ₉	-2.15087E-12	1.82516E-13	8.01294E-14	-1.70638E-12	-3.9012E-12	-2.99058E-12	-1.10968E-13	1.88139E-12	-3.1012E-12
a ₁₀	1.04791E-15	-1.10212E-16	-2.77261E-17	8.10249E-16	2.49101E-15	1.89621E-15	7.37592E-17	-6.61796E-16	2.5444E-15
Parámetros - zona climática 3									
Y	r_Q _{capacidad} frigorífica	r_Q _{solar} colectada	r_Q _{solar} absorbida	r_E _{frigorífica} generada	r_E _{solar} colectada	r_E _{solar} absorbida	r_E _{consumo} eléctrico	r_E _{auxiliar} requerida	r_W _{evaporada}
X ₁	Volumen_tanque [m ³]	Volumen_tanque [m ³]	Volumen_tanque [m ³]	Volumen_tanque [m ³]	Volumen_tanque [m ³]	Volumen_tanque [m ³]	Volumen_tanque [m ³]	Volumen_tanque [m ³]	Volumen_tanque [m ³]
X ₂	Demanda de frío [kW]	Apertura solar [m ²]	Apertura solar [m ²]	Apertura solar [m ²]	Apertura solar [m ²]	Apertura solar [m ²]	Apertura solar [m ²]	Apertura solar [m ²]	Apertura solar [m ²]
a ₀	0.2113456	0.1406755	0.06843213	0.1718384	-1.13521	-1.085334	0.003693058	-0.01626627	2.962955
a ₁	-2.52133E-05	-2.85269E-05	-1.6188E-05	-0.000019546	-0.000256215	-0.000116277	1.76352E-07	1.24404E-05	0.000168536
a ₂	1.12807E-09	1.49311E-09	8.76118E-10	8.44476E-10	1.65818E-08	8.83123E-09	3.61649E-11	-1.87747E-09	-6.49085E-09
a ₃	-1.60654E-14	-2.56536E-14	-1.55974E-14	-1.13666E-14	-1.77234E-13	-1.08976E-13	-1.44872E-15	-3.52386E-15	4.72978E-16
a ₄	-0.000310702	9.23763E-05	0.000111312	-0.000292223	0.01170127	0.007930931	0.000245316	0.003113254	0.00630312
a ₅	1.96124E-07	-2.84858E-07	-2.32178E-07	2.14039E-07	-1.47824E-05	-9.69695E-06	-3.35742E-07	-6.85477E-06	-7.67741E-06
a ₆	-3.70308E-11	1.79675E-10	1.32993E-10	-5.03615E-11	6.12828E-09	3.96151E-09	1.43105E-10	3.63613E-09	2.69046E-09
a ₇	2.43748E-08	1.77741E-08	8.52542E-09	2.0288E-08	6.88377E-07	2.92644E-07	-3.3388E-09	-1.48286E-07	-6.33408E-07
a ₈	-1.06773E-11	-1.11156E-11	-5.93165E-12	-1.06814E-11	-4.63116E-10	-2.00223E-10	2.97825E-12	1.56646E-10	4.69094E-10
a ₉	-6.28063E-13	-4.64165E-13	-2.21442E-13	-5.86733E-13	-3.56989E-11	-1.78748E-11	8.24258E-14	1.06302E-11	2.30985E-11
a ₁₀	2.70412E-16	2.904E-16	1.55034E-16	2.87569E-16	2.4972E-14	1.2771E-14	-6.47386E-17	-8.67657E-15	-1.62777E-14

Fuente: elaboración propia.

r_E_{auxiliar} requerida: ratio de energía auxiliar requerida por hora $\left[\frac{\text{kWh}}{\text{h} \cdot \text{kWh/h}} \right]$. A partir de esta relación es posible estimar los requerimientos de energía auxiliar, en base al enfriamiento promedio generado por el sistema.

r_E_{consumo} eléctrico: ratio de consumo eléctrico $\left[\frac{\text{kWh}}{\text{h} \cdot \text{kWh/h}} \right]$. A partir de esta relación es posible estimar el consumo eléctrico total de los componentes del sistema (bomba de la máquina de absorción, bombas de subcircuito y ventiladores de la torre de enfriamiento), en base al enfriamiento promedio generado por el sistema.

r_Q_{solar} colectada: tasa máxima de transferencia de calor captado por los colectores Fresnel $[\text{kW/m}^2 \cdot \text{m}^3]$. Esta ratio permite estimar la tasa máxima de transferencia de calor que podría captarse en el mes de diseño en función del área de apertura solar y la capacidad del tanque.

r_Q_{solar} absorbida: tasa máxima de transferencia de calor absorbido por los colectores Fresnel $[\text{kW/m}^2 \cdot \text{m}^3]$. Esta ratio permite estimar la tasa máxima de transferencia de calor que podría absorberse en el mes de verano en función del área de apertura solar y la capacidad del tanque.

Variables										Parametros - zona climatica 2									
Y	r_Qcapacidad frigorifica	r_Qsolar colectada	r_Qsolar absorbida	r_Efrigorifica generada	r_Esolar colectada	r_Esolar absorbida	r_Econsumo eléctrico	r_Eauxiliar requerida	r_Wevaporada	X ₁	r_Qcapacidad frigorifica	r_Qsolar colectada	r_Qsolar absorbida	r_Efrigorifica generada	r_Esolar colectada	r_Esolar absorbida	r_Econsumo eléctrico	r_Eauxiliar requerida	r_Wevaporada
X ₁	Volumen_tanque [m ³]	Volumen_tanque [m ³]	Volumen_tanque [m ³]	Volumen_tanque [m ³]	Volumen_tanque [m ³]	Volumen_tanque [m ³]	Volumen_tanque [m ³]	Volumen_tanque [m ³]	Volumen_tanque [m ³]	X ₂	Demanda de frío [kW]	Apertura solar [m ²]	Apertura solar [m ²]	Apertura solar [m ²]	Apertura solar [m ²]	Apertura solar [m ²]	Apertura solar [m ²]	Apertura solar [m ²]	Apertura solar [m ²]
a ₀	0.307287	0.06647784	0.03070553	0.2791563	0.1205317	-0.04338998	0.02881779	1.862074	2.73949	a ₀	0.4847197	0.2943753	0.127352	0.438332	-1.652996	-1.330343	-0.007480061	3.387843	1.467507
a ₁	-3.06662E-05	-2.25205E-05	-1.38833E-05	-2.73274E-05	6.85454E-06	-4.81112E-06	7.16422E-08	-2.37971E-05	-1.16211E-05	a ₁	-5.40051E-05	-4.79274E-05	-2.42759E-05	-4.85476E-05	0.000256914	0.000137243	4.98481E-06	-8.41868E-05	0.000140757
a ₂	1.53245E-09	1.98163E-09	1.28878E-09	1.27923E-09	8.08385E-10	8.70364E-10	9.0791E-12	1.9979E-09	1.07592E-10	a ₂	2.36693E-09	2.8205E-09	2.06634E-09	-1.24657E-08	-6.81825E-09	-1.91383E-10	1.84594E-09	-3.9063E-09	-3.9063E-09
a ₃	-2.85899E-14	-5.02104E-14	-3.32671E-14	-2.20997E-14	4.20131E-15	6.43074E-16	5.84938E-17	-7.18848E-14	-1.39126E-15	a ₃	-3.22565E-14	-5.38106E-14	-3.24371E-14	-2.64951E-14	1.73411E-13	1.14454E-13	1.39044E-15	-6.18719E-14	9.69571E-15
a ₄	-0.000248324	0.000681178	0.000481209	-0.000302328	0.000527929	0.000578229	8.47949E-05	-0.002369752	0.003069385	a ₄	-0.001769456	-4.99063E-05	0.000288835	-0.00179171	0.01389426	0.01012203	0.00043377	-0.01826751	0.02245042
a ₅	1.15724E-07	-5.85178E-07	-4.04595E-07	1.80459E-07	1.26795E-06	5.47618E-07	-1.01516E-07	2.30231E-06	-4.49327E-06	a ₅	2.92845E-06	6.32327E-08	-4.72689E-07	3.09041E-06	-1.03634E-05	-1.05393E-05	-9.50105E-07	3.34754E-05	-6.01446E-05
a ₆	-4.01626E-11	1.38868E-10	9.52998E-11	-5.54015E-11	-9.63764E-10	-4.81967E-10	4.1011E-11	-6.96197E-10	2.05177E-09	a ₆	-1.74197E-09	-1.43768E-11	2.25932E-10	-1.8068E-09	-4.68212E-09	9.89155E-10	7.07114E-10	-2.0272E-08	5.0362E-08
a ₇	-3.49323E-09	-6.14436E-08	-4.25035E-08	5.91603E-09	-6.62464E-08	-1.21081E-08	-1.81791E-09	1.73548E-08	8.33985E-11	a ₇	1.18924E-07	4.11241E-09	-2.28443E-08	1.25754E-07	-8.53882E-07	-3.71381E-07	-2.40543E-08	1.02662E-07	-8.12846E-07
a ₈	1.05831E-11	3.60518E-11	2.438E-11	3.44172E-12	1.02518E-10	4.4233E-11	2.18849E-12	-8.94961E-11	1.33828E-11	a ₈	-1.09728E-10	-4.12865E-12	2.51503E-11	-1.27117E-10	9.4889E-10	3.95796E-10	2.67824E-11	-3.74793E-11	9.26059E-10
a ₉	3.56158E-13	1.77988E-12	1.21661E-12	4.06001E-14	-1.20772E-12	-1.62761E-12	4.45254E-15	1.09523E-12	6.5487E-13	a ₉	-3.18254E-12	-1.02292E-13	6.05698E-13	-3.41893E-12	2.5388E-11	8.40074E-12	7.13966E-13	8.06456E-12	1.93405E-11
a ₁₀	-4.3637E-16	-1.04282E-15	-6.97603E-16	-2.03253E-16	-9.24365E-16	-1.84237E-17	-2.72804E-17	1.43268E-15	-8.0154E-16	a ₁₀	2.9529E-15	9.87766E-17	-6.66338E-16	3.47435E-15	-2.7068E-14	-7.945E-15	-7.16501E-16	-9.26525E-15	-1.75853E-14

Fuente: elaboración propia.

Los ratios obtenidos están basados en la energía frigorífica promedio generada por el sistema térmico de frío solar por hora, operando de acuerdo con el horario de disponibilidad HVAC (por ejemplo, para el almacén, el sistema funciona de 7:00 a. m. a 6:00 p. m. de lunes a viernes). Los ratios deben ser utilizados dentro del rango de horas de operación del horario de disponibilidad HVAC estipulado, de acuerdo al tipo de edificio y considerando el rango de dimensionamiento indicado en la **Tabla 2**.

4. Conclusiones

En el presente trabajo se estudió de forma conjunta y generalizada la influencia en el rendimiento de una instalación térmica de frío solar, de los efectos de diversos factores como: condiciones climáticas, variación en el dimensionamiento de sus principales componentes y tipologías de edificios.

A partir de las simulaciones realizadas fue posible generar gráficas y expresiones matemáticas para ser utilizadas como guías de diseño en el predimensionamiento y estimación de los requerimientos energéticos de una instalación de frío solar impulsada por colectores lineales Fresnel. Estos datos y relaciones de amplia aplicación si bien no reemplazan un diseño y estudio detallado de una instalación de este tipo, permitirían, en las primeras etapas de un proyecto, tener una visión de partida y tomar decisiones de diseño e implementación de una manera rápida, fácil y práctica.

Los resultados obtenidos permiten identificar el óptimo dimensionamiento de los componentes del

sistema de frío solar para cada caso de estudio, es decir es posible seleccionar la combinación óptima de área de apertura solar - volumen de tanque de almacenamiento de agua caliente, según la tipología de edificio, zona climática y demanda de refrigeración.

Por otra parte, los resultados obtenidos permiten identificar las capacidades de los componentes del sistema de frío solar más convenientes de acuerdo a las condiciones específicas de un proyecto por ejemplo, si en el ámbito donde se instala el sistema de frío solar, se dispone de energía calorífica residual entonces el dimensionamiento más conveniente según los resultados obtenidos será el que requiera una cantidad de energía auxiliar similar a la disponible, de esta forma se optimizaría el dimensionamiento y la operación del sistema. Lógicamente, el sistema de control influye de manera significativa en el funcionamiento y operación del sistema y con ello en el propio dimensionamiento de sus componentes, si bien este aspecto queda fuera del alcance de este trabajo.

5. Referencias

- [1] K. Saikia, M. Vallès, A. Fabregat, R. Sáez, D. Boer. "A bibliometric analysis of trends in solar cooling technology". *Sol. Energy*, vol. 199, pp. 100–114, 2020 [en línea]. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X20301195>
- [2] "Vision Potential Deployment Roadmap Strategic Research Agenda Solar Heating

- and Cooling for a Sustainable Energy Future in Europe” [en línea]. Disponible en: http://www.estif.org/fileadmin/estif/content/projects/downloads/ESTTP_SRA_Revised_Version.pdf
- [3] M.H. Ahmed. “Effect of Solar Collector Area and Storage Tank Capacity on the Performance of the Absorption Chiller”. *Int. J. Renew. ENERGY Res.*, vol. 10, no. 1 2020 [en línea]. Disponible en: <https://atif.sobiad.com/index.jsp?modul=ma-kale-detay&Alan=fen&Id=1QSmOH4BYbO9RkQmCMhR>
- [4] M.H. Ahmed. “Impact of Storage Tank Size and Backup Heating Unit on a Solar Absorption Cooling System”. *Int. J. Therm. Environ. Eng.*, vol. 17, pp. 41–50, 2018 [en línea]. Disponible en: <https://iasks.org/articles/ijtee-v17-i1-pp-41-50.pdf>
- [5] A. Budania, S. Ahmad, S. Jain. “Transient simulation of a solar absorption cooling system”. *Int. J. Low-Carbon Technol.*, vol. 11, 2013 [en línea]. Disponible en: <https://academic.oup.com/ijlct/article/11/1/54/2363511>
- [6] A. Altun, M. Kılıç. “Economic feasibility analysis with the parametric dynamic simulation of a single effect solar absorption cooling system for various climatic regions in Turkey”. *Renew. Energy*, vol. 152, pp. 73–95, 2020 [en línea]. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148120300604>
- [7] A. Boero, F. Agyenim. “Modeling and simulation of a small-scale solar-powered absorption cooling system in three cities with a tropical climate”. *Int. J. Low-Carbon Technol.*, vol. 15, pp. 1–16, 2020 [en línea]. Disponible en: <https://academic.oup.com/ijlct/article/15/1/1/5707087>
- [8] Y. Agrouaz, T. Bouhal, A. Allouhi, T. Kouksou, J. A., Y. Zeraoui. “Energy and Parametric Analysis of Solar Absorption Cooling Systems in Various Moroccan Climates”. *Case Stud. Therm. Eng.*, vol. 9, 2016 [en línea]. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214157X16300454>
- [9] O. Kefi, M. Merzouk, N. Kasbadji, M. Bourouis. “Feasibility study and performance evaluation of low capacity water–LiBr absorption cooling systems functioning in different Algerian climate zones”. *Int. J. Refrig.*, vol. 82, 2017 [en línea]. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0140700717302815>
- [10] T. Mateus, A. Oliveira. “Energy and economic analysis of an integrated solar absorption cooling and heating system in different building types and climates”. *Appl. Energy*, vol. 86, pp. 949–957, 2009 [en línea]. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261908002249>
- [11] R. Lechner, S. Javed. “Life-Cycle Cost-Optimized Cooling Systems for European Office Buildings.” 2016 [en línea]. Disponible en: <https://www.lunduniversity.lu.se/lup/publication/20cfe7e8-333a-4f90-8f6e-353ea841ace6>
- [12] U.S. Department of Energy (DOE). “Comercial reference buildings”. Disponible en: <https://www.energy.gov/eere/buildings/new-construction-commercial-reference-buildings> (accedida 01 Julio, 2022).
- [13] ASHRAE. “Standard 90.1-2019 (SI Edition) - Energy Standard for Buildings Except Low-Rise Residential Buildings (ANSI Approved; IES Co-sponsored).” SI Edition. Atlanta, GA, USA: American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers, 2019.
- [14] ASHRAE. “ANSI/ASHRAE Standard 62.1-2019, Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality.” Atlanta, GA, USA: American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers, 2019.
- [15] ASHRAE. “ASHRAE climatic design conditions 2009/2013/2017”. Disponible en: <http://ashrae-meteo.info/v2.0/> (accedida 01 Julio, 2022).
- [16] DesignBuilder. “Design Builder Software Ltd - Version 5.5.0.012”. 2013. Disponible en: <https://designbuilder.co.uk/>
- [17] N. Blair *et al.* “System advisor model, sam 2014.1. 14: General description”. *NREL Rep. No. TP-6A20-61019, Natl. Renew. Energy Lab. Golden, CO*, no. February p. 13, 2014 [en línea]. Disponible en: <https://www.osti.gov/biblio/1126294-system-advisor-model-sam-general-description>
- [18] J. Diaz, J. Fernández. “Realistic Simulation Tool for practical Analysis of Solar Cooling Thermal Systems driven by Linear Fresnel Collectors”. *Rev. Ing. UC*, vol. 28, pp. 360–377, 2021 [en línea]. Disponible en: <https://www.revistas.uc.edu/ve/index.php/revinguc/article/view/48>