

Capítulo 6

Calentamiento de agua en albercas con energía solar térmica una alternativa para obtener energía asequible y no contaminante

Maximiliano Rivera-Mendoza¹

maxrivera56@hotmail.com

Alejandro Garza Galicia²

biogas2005@hotmail.com

Virgilio Zúñiga Grajeda¹

virgilio.zuniga@academicos.udg.mx

Belkis Sulbarán-Rangel¹

Belkis.sulbaran@academicos.udg.mx

<https://doi.org/10.61728/AE20252007>



¹ Centro Universitario de Tonalá Universidad de Guadalajara

² Universidad del Valle de Atemajac Campus Guadalajara

Resumen

La energía es el elemento clave del desarrollo moderno y los combustibles fósiles son actualmente la principal fuente de energía consumida en todo el mundo y esto no es sostenible. La demanda de energía se ha incrementado debido al crecimiento demográfico y al crecimiento de las urbes; debido a esto, la sociedad y la economía dependen significativamente de la energía disponible. Esto ha hecho que en los últimos años el planeta haya incrementado su temperatura, debido a que gran parte de la energía consumida proviene de la combustión de hidrocarburos, que ocasionan la emisión de gases de efecto invernadero, los efectos de estos sobre la salud, así como la actividad del ser humano ha incrementado la deforestación de grandes extensiones de selvas y bosques, dejando un futuro incierto y desolador, es por eso, que la utilización de energías renovables, como la energía solar, que sustituyan el uso de combustibles de fósiles sea una alternativa viable y benéfica para el medioambiente. El aumento de la eficiencia general de la conversión y el uso de energía renovables es una opción. Además, explorar nuevos sistemas con una mejor utilización de los recursos renovables puede ser una posible opción sostenible futura. Es importante incrementar el estudio e investigación de la energía renovable, principalmente para reemplazar el uso de la energía producida por la combustión de hidrocarburos, debido a que la reserva de estos combustibles está decreciendo. En el marco del cumplimiento de los objetivos de desarrollo sostenible, esta investigación tiene como objetivos mostrar los conceptos básicos sobre los fenómenos termodinámicos que implica el uso de energía solar térmica para el calentamiento de agua en albercas, con el fin de visualizar a esta energía como una alternativa para garantizar el acceso a una energía asequible, segura y sostenible.

Introducción

La energía termosolar es también una alternativa técnica y económicamente factible para el calentamiento de agua, cuando se diseña de manera adecuada, ya que se han reportado casos de fracaso debido a que no se consideraron variables termodinámicas para suplir la necesidad energética con esta tecnología y han resultado no rentables (Escobedo-Bretado, Nájera-Trejo y Martín-Domínguez, 2015; Lugo, Morales, Best, Gómez, y García-Valladares, 2019). Se han reportado varias publicaciones en donde han desarrollado expresión analítica para la eficiencia de sistemas de calentamiento compuestos por colectores, una bomba y un intercambiador de calor (Starke, Cardemil y Colle, 2018; Tiwari y Sharma, 1991). Otros estudios se han dedicado al cálculo del flujo de evaporación de agua en albercas abiertas (Asdrubali, 2009), al desarrollo de simulación dinámica para evaluar el comportamiento térmico del calentamiento de la alberca (Ratajczak y Szczechowiak, 2020).

En cuanto a albercas abiertas o al aire libre, han reportado modelos matemáticos con el uso de herramientas computacionales como el TRNSYS para simular el rendimiento de una calefacción solar (Lugo et al., 2019) con validación de los modelos utilizando los valores del coeficiente de evaporación y el coeficiente de la relación entre la evaporación y el calor perdido por convección (Zsembinszki, Farid y Cabeza, 2012). En otra investigación se propone una estructura híbrida que integre modelos termodinámicos para albercas y redes neuronales artificiales (RNA) (Santos, Zárate y Pereira, 2013). Así como se han presentado análisis del comportamiento transitorio de la temperatura del agua en una alberca municipal, realizando balances de energía acoplados en estado cuasi-dinámico (Dorantes, Hincapié y Muñoz, 2015). Los resultados en albercas abiertas muestran que, en general, el modelo tiene un comportamiento aceptable en el rango de 21 a 26°C, con un máximo error de 1°C, y no es suficientemente aceptable para temperaturas arriba de 28°C (Haaf, Luboschik y Tesche, 1994). También se han investigado modelos analíticos para el cálculo de sistemas de calentamiento solar para albercas abiertas y cerradas desarrollados para la misma alberca para determinar la mejor manera para su uso, para todo el año en albercas de medidas similares (Fahmy, Farghally y Ahmed, 2014).

De acuerdo con lo antes expuesto, en esta investigación se desarrollan los conceptos básicos del análisis termodinámico de un sistema de producción de energía solar térmica para mantener la temperatura de un flujo continuo en una instalación hidráulica como una alberca. A pesar de los múltiples beneficios que tiene la energía solar, en la actualidad no se utiliza eficientemente debido a altos costos de inversión inicial y a la falta de análisis integral de todos los componentes del sistema (Lugo et al., 2019) antes de su implementación; por tanto, es importante hacer un análisis termodinámico del sistema que producirá energía térmica para el calentamiento de agua y así hacerlo más eficiente (Chow, Bai, Fong y Lin, 2012; Dongellini, Falcioni, Martelli y Morini, 2015; D. Katsaprakakis, 2019). La energía solar es una energía renovable amigable con el medioambiente, ya que no genera contaminación, está disponible durante las horas del día y, mediante el uso de diferentes componentes, puede ser utilizada con eficiencia para el calentamiento del agua necesaria para una instalación hidráulica (D. A. Katsaprakakis, 2015). Por tanto, en este capítulo se presenta una recopilación de información sobre los principios termodinámicos para la evaluación del calentamiento de agua en una alberca y las recientes tendencias en el modelado de variables para fomentar el uso de la energía solar térmica como una alternativa para obtener energía asequible y no contaminante.

Principios termodinámicos para la evaluación del calentamiento de agua en una alberca

La climatización de albercas de forma eficiente ha tomado relevancia por la necesidad de protección del medioambiente y ahorro de energía. Ha aumentado con el paso del tiempo debido al desarrollo de nuevas tecnologías. Las investigaciones en la materia pueden reducirse a tres grandes temas, basados en su contribución y principios termodinámicos. Primero, mejoras, si la investigación sugiere adaptaciones al sistema existente. Segundo, modelado, si ello ofrece nuevos modelos analíticos que mejoren y/o describan mejor el fenómeno relevante respecto al cálculo y diseño del sistema de calentamiento de la alberca. Verificación, si con ello se estudia y verifica cada modelo. Además, la investigación puede

ser categorizada basada en el objeto de estudio, a saber, albercas abiertas, cerradas o la investigación de ambas (abiertas y cerradas).

Tomando la información de Auer, T. (1996) de software TRNSYS-TYPE 344, el principio físico básico supone que el agua en una alberca se mezcla idealmente para que la primera ley de la termodinámica se pueda expresar con la ecuación (1).

$$\frac{dH}{dt} = \sum (Q_{\text{entrada}} - Q_{\text{salida}}) \quad (1)$$

Dónde:

dH/dt = cambio de entalpía en el agua de la alberca en el tiempo

Q_{entrada} = flujo de calor hacia el agua de la alberca

Q_{salida} = flujo de calor desde el agua de la alberca.

También se puede suponer que un líquido es incompresible y que la densidad y la conductividad térmica son constantes. La Ec. 12 se puede expresar como la ecuación (2):

$$\rho_{\text{agua}} * C_{P \text{ agua}} * V_{\text{Alberca}} * \frac{dH}{dt} = \sum (Q_{\text{Entrada}} - Q_{\text{salida}}) \quad (2)$$

Dónde:

ρ_{Agua} = densidad del agua

$C_{P \text{ agua}}$ = calor específico de agua

V_{Alberca} = volumen de la alberca

Al elaborar el modelo, se supuso además que hay una cantidad constante de agua en la alberca. La Figura 1 muestra una vista esquemática de todos los flujos de calor presentes en una alberca.

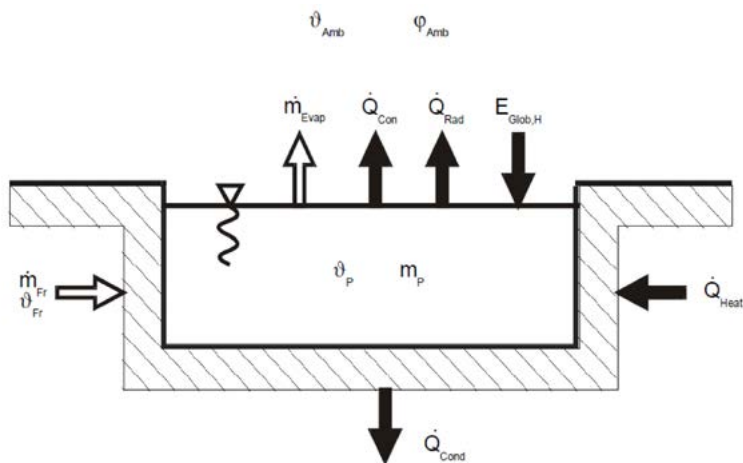


Figura 1. Tomado de tasas de flujo másico y de calor de una alberca en intercambio del ambiente (Auer, 1996)

El intercambio de calor con el entorno incluye lo siguiente:

- Tasa de flujo de calor por evaporación
- Tasa de flujo de calor por convección.
- Tasa de flujo de calor por radiación de onda corta.
- Tasa de flujo de calor por radiación de onda larga
- Pérdida de calor por suministro de agua dulce.
- Tasa de flujo de calor por calentamiento
- Conducción térmica al suelo.

La tasa de flujo de calor al suelo es insignificante para esta evaluación. Las albercas interiores normalmente están rodeadas de salas de ingeniería en el sótano con temperaturas ambiente generalmente superiores a 30 ° C, de modo que la tasa de flujo de calor es prácticamente cero. Para las albercas al aire libre, este aspecto puede ignorarse porque, por un lado, solo tiene una influencia menor en la evaluación general de la energía (<1 %) y, por otro, porque no se puede calcular con precisión ($Q_{cond} = f$ (aislamiento térmico, composición del suelo)).

En la siguiente sección, cada tasa de flujo de calor se calcula en detalle.

Cálculo de la tasa de flujo de calor por evaporación

La pérdida de calor por evaporación se puede calcular sobre la base de la tasa de flujo másico evaporado con la ecuación (3).

$$Q_{Evap} = m_{Evap} * \Delta h_{Evap} \quad (3)$$

La tasa de flujo másico evaporado se puede determinar con una fórmula para el cálculo de una fuerza motriz. La fuerza impulsora es la diferencia en la presión del vapor de agua entre la superficie del agua y los alrededores, y se supone que una capa directamente sobre la superficie del agua, a la temperatura del agua de la alberca, tiene una humedad relativa del 100%. Para una alberca cubierta, la tasa de flujo másico evaporado se puede calcular con la ecuación (4).

$$m_{Evap} = \varepsilon * A_{total} * (p_{Sat}(v_P) - p_{St}(v_{Amb})) \quad (4)$$

La presión de vapor en condiciones ambientales se puede calcular utilizando la humedad relativa determinada por la ecuación (5).

$$p_{Sat} = \varphi_{Amb} * p_{Sat}(v_{Amb}) \quad (5)$$

La relación de evaporación para una alberca al aire libre se basa en una fórmula empírica, por la cual el coeficiente de evaporación total y la entalpía de evaporación se combinan para que el caudal de calor por evaporación se pueda calcular con la ecuación (6).

$$Q_{Evap} = A_{Evap} * \alpha_{Evap} * (p_{Sat}(v_P) - p_{St}(v_{Amb})) \quad (6)$$

El coeficiente de evaporación modificado se puede calcular con la ecuación (7).

$$\alpha_{Evap} = 50.58 + 66.9 * w_{Amb}^{0.5} \quad (7)$$

Cálculo de la tasa de flujo de calor por convección

La tasa de flujo de calor por convección se puede calcular sobre la base de la fórmula de Newton, ecuación (8).

$$Q_{Con} = \alpha * A_{total} * (v_P - v_{Amb}) \quad (8)$$

Según las mediciones de Biasin, la fórmula de Lewis para la transferencia de masa y calor se puede usar para albercas cubiertas, de modo que la relación entre el calor y los coeficientes de transferencia de masa se puede determinar con la ecuación (9) (Biasin, 1987).

$$\frac{\alpha}{\beta} = c_{pl} * p_l * \left(\frac{a}{St} \right) \quad (9)$$

El coeficiente de transferencia de calor para una alberca al aire libre se puede calcular sobre la base de la ecuación (10).

$$\alpha = 3.1 + 4.1 * w_{Amb} \quad (10)$$

Cálculo de la tasa de flujo de calor por radiación de onda larga

La tasa de transferencia de calor por intercambio de radiación de onda larga con las paredes (albercas cubiertas) o el cielo (albercas al aire libre) se puede calcular sobre la base de la ley Stefan-Boltzmann. Para la alberca cubierta, se puede suponer que la alberca está completamente cerrada, y para la alberca al aire libre, suponemos que la superficie del “cielo” es grande en comparación con la de la alberca. Por lo tanto, en ambos casos, la tasa de flujo de calor por radiación de onda larga se reduce a la

tasa de flujo de calor a un radiador completo. Por lo tanto, la relación se puede expresar mediante la ecuación (11).

$$Q_{Rad} = A_{total} * \varepsilon_w^* * \sigma * (T_p^4 - T_X^4) \quad (11)$$

Donde X puede representar tanto la Pared como el Cielo. Las constantes tienen los siguientes valores:

$$\varepsilon_w^* = 0.9$$

$$\sigma = 5.67 * 10^{-8} \frac{W}{m^2 * K^4}$$

Cálculo de la pérdida de calor por suministro de agua dulce

La pérdida de calor por el suministro de agua dulce se puede calcular utilizando la primera ley de la termodinámica bajo el supuesto de un líquido incompresible con la ecuación (12).

$$Q_{Fr} = m_{Fr} * c_{p,W} * (v_p - v_{Fr}) \quad (12)$$

Cálculo de la tasa de flujo de calor por ganancia térmica de onda corta

La ganancia térmica de onda corta de la radiación solar total en una superficie horizontal para una alberca al aire libre se puede calcular con la ecuación (13).

$$Q_{Sol} = \varepsilon_w^* * A_{total} * E_{Glob,H} \quad (13)$$

La ganancia térmica de onda corta para una alberca cubierta debe determinarse de manera diferente.

Cálculo de la transferencia de flujo de calor de la calefacción auxiliar

De manera análoga a la pérdida de calor por el suministro de agua dulce, la tasa de flujo de calor del calentamiento auxiliar se puede calcular con la ecuación (14).

$$Q_{Entrada} = m_{In} * c_{p,W} * (v_p - v_{In}) \quad (14)$$

Cálculo de energía almacenada

Para un balance energético completo, se debe considerar la diferencia de temperatura entre las condiciones iniciales y finales. La energía almacenada se puede calcular con la ecuación (15).

$$dE = m_p * c_{p,w} * (v_{p,0} - v_p) \quad (15)$$

Pérdida de calor de una alberca cubierta

Si la superficie del agua de una alberca está cubierta, la pérdida de calor se reduce, principalmente porque la cubierta evita la evaporación. La Figura 2 muestra una vista esquemática de todos los flujos de calor. La tasa de flujo de calor para una superficie de agua cubierta se reduce a una parte convectiva, una tasa de flujo de calor de onda corta y de onda larga que da como resultado una temperatura dada en la parte superior de la cubierta.

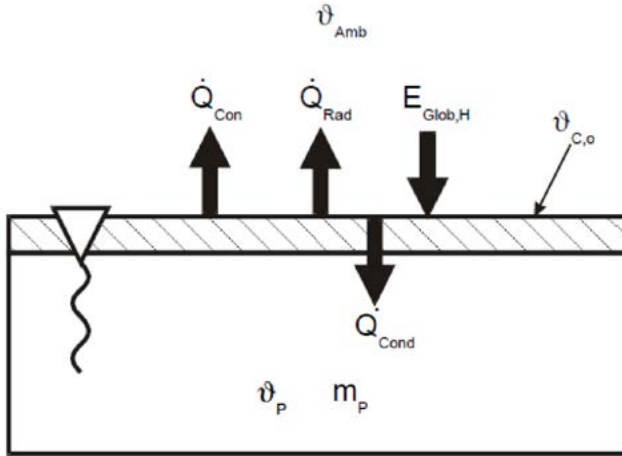


Figura 2. Tomado de tasas de flujo de calor de una cubierta de alberca (Auer, 1996).

Se supone que se forma un perfil de temperatura estacionario en cualquier momento, debido a la masa de la cubierta. Por lo tanto, el equilibrio térmico lento de la cubierta se puede reducir a la ecuación (16).

$$Q_{Entrada} = m_{In} * c_{p,W} * (v_p - v_{In}) \quad (14)$$

Con respecto a la temperatura en la parte superior de la cubierta, cada flujo de calor se puede expresar con las ecuaciones (17), (18) (19) y (20):

$$Q_{Con} = \alpha * A_{Cov} * (v_{C,0} - v_{Amb}) \quad (17)$$

$$Q_{Rad} = A_{Cov} * \varepsilon_{Cov}^* * \sigma * (T_{C,0}^A - T_X^A) \quad (18)$$

$$Q_{Cond} = \frac{\lambda_{Cov}}{\delta_{Cov}} * A_{Cov} * (v_{C,0} - v_p) \quad (19)$$

$$Q_{Sol} = A_{Cov} * \varepsilon_{Cov}^* * E_{glob,H} \quad (20)$$

Modelado de variables para el calentamiento de agua en una alberca

Las albercas cubiertas y al aire libre están sujetas a entornos muy diferentes, lo que conduce a diferentes pérdidas y ganancias de calor. Se han determinado las principales características de contorno que afectan al calentamiento de las albercas cubiertas o al aire libre (Tabla 1).

Tabla 1. *Mecanismos de pérdidas y ganancias pasivas de calor de albercas cubiertas y al aire libre (Dannemand, Furbo, Heller, Andersen, y Madsen, 2017)*

Alberca al aire libre	Alberca cubierta
Las ganancias solares son directas	Poca o nula ganancia solar directa
Depende de condiciones de humedad del aire ambiente; esto genera grandes pérdidas por evaporación	La humedad es controlada y las pérdidas por evaporación afectan por el clima interior
La temperatura del ambiente es igual a pérdidas o ganancias por convección	La temperatura del aire interior está relativamente cerca de la piscina. Existe baja transferencia de calor por convección.
El viento natural genera grandes pérdidas por convección	Se tienen tasas de ventilación controladas con poca velocidad del aire; pueden ocasionar pequeñas pérdidas de calor por convección.
Las bajas temperaturas del cielo influyen en pérdidas por radiación infrarroja	Superficies de estructuras de edificios circundantes cerca de la temperatura de la piscina podrían influir de manera muy baja en las pérdidas por radiación infrarrojos.
Cuando llueve se agrega agua más fría y puede ocasionar perdidas	Puede haber pérdidas por mezcla de agua más fría cuando se agrega para rellenar la alberca.

A continuación se presentan investigaciones sobre metodologías aplicadas a la estimación de necesidades de energía del calentamiento de albercas y la adopción de estrategias de conservación de energía para albercas cubiertas, al aire o abiertas y mixtas (Dannemand et al.; Jimenez, Carrillo y Alvarado, 2015).

Albercas cubiertas

Tiwari G. N. y Sharma S. B. 1991 desarrollaron una expresión analítica para la eficiencia de sistemas de calentamiento compuestos por colectores, una bomba y un intercambiador de calor (Tiwari y Sharma, 1991). Asdrubali F. 2009 calculó el flujo de evaporación de agua en albercas abiertas usando investigación experimental con varias condiciones de temperatura, humedad relativa y velocidad del aire. Para controlar esas variables, los rangos de evaporación del agua, obtenidos por un modelo matemático sugerido en este artículo, fueron comparados contra otros modelos. El modelo que tuvo la mayor concordancia fue el que tenía valores con validez experimental; aunque la evaluación del coeficiente k en la ecuación para calcular el rango de evaporación tenía un error de aproximadamente 10 %, representando 7 % del total de la pérdida de calor (Asdrubali, 2009). Ratajczak et al. 2020 desarrolló un sistema de simulación dinámica para evaluar el comportamiento térmico del calentamiento de la alberca. Los autores propusieron dividir la alberca en diferentes zonas y realizaron un análisis complejo del consumo de energía eléctrica y térmica del sistema de ventilación de acuerdo con el algoritmo de control de unidades propuesto, utilizando datos climáticos de Polonia. Debido al clima de Polonia, la energía solar no se incluye en los cálculos, ya que no sería eficiente hacerlo (Ratajczak y Szczechowiak, 2020).

Albercas abiertas o al aire libre

Lugo et al. 2019 presentó un modelo matemático desarrollado en TRNSYS para simular el rendimiento de una calefacción solar. El sistema fue para una alberca al aire libre en regiones con un clima cálido. Para ello, se desarrolló un nuevo type de TRNSYS. El modelo fue validado usando datos experimentales recolectados de una alberca al aire libre de 53.8 m³ en Cuernavaca, Morelos, México. Los datos utilizados para confirmar los componentes del modelo y el modelo completo se recopilaron entre marzo de 2016 y junio de 2017. Esta alberca está ubicada en un hotel rodeado de árboles y vegetación que provocan sombra en la

superficie de la alberca durante todo el día, reduciendo así la ganancia de calor de radiación solar directa. El modelo se desarrolló y validó en una ecuación con un factor de sombreado para la alberca y considerando las variaciones en la temperatura de la alberca. Para evaluar las pérdidas por evaporación, se probaron seis correlaciones empíricas obtenidas de la literatura. Encontraron que el modelo reproducía adecuadamente la temperatura de la alberca en diferentes condiciones de trabajo, y que esto puede ser una herramienta valiosa para generar un análisis técnico y económico de los sistemas de calefacción solar en albercas al aire libre para regiones con condiciones climáticas similares (Lugo et al., 2019).

Otro trabajo interesante fue el reportado por Dorantes et al., 2015, en el cual se llevó a cabo un análisis del comportamiento transitorio de la temperatura del agua en una alberca municipal, utilizando como medio de calefacción un campo de colectores de tubos concéntricos no presurizados, instalado en la ciudad de Sogamoso. Colombia. En esta investigación se han realizado dos balances energéticos acoplados en estado cuasi-dinámico. El primer balance fue tomando el volumen de control de un tanque de almacenamiento térmico, conectado a los colectores de tubos concéntricos, y el segundo balance fue sobre el volumen de control, la propia alberca, tomando datos meteorológicos reales y condiciones de trabajo necesarias y típicas para operar un sistema de calentamiento térmico común de agua en una alberca. Llegaron a un modelo físico-matemático que describe el comportamiento térmico real de todo el sistema. También realizaron un estudio de sensibilidad del sistema a partir de los resultados para determinar las variables que influyen en el equilibrio del sistema termodinámico y determinar bajo qué circunstancias el modelo es capaz de simular de manera real el comportamiento térmico del agua de la alberca (Dorantes et al., 2015).

En otra investigación, Santos et al. 2013 propone una estructura híbrida que integre modelos termodinámicos para albercas y redes neuronales artificiales (RNA). La RNA recibe información del clima de las regiones donde las albercas serán instaladas. La variación de la temperatura ambiente de la ciudad fue determinada analíticamente y comparada con las medidas meteorológicas en un tiempo en 2011 para el mismo día y localización, mostrando que los valores de la temperatura ambiente

fueron calculados con una variación máxima de 2 °C por validación; tres procesos fueron tomados en cuenta (Santos et al., 2013).

Por otro lado, cuando el clima es bueno y la temperatura del agua es tibia, para alcanzar un nivel confortable, los materiales de cambio de fase tienen el efecto de reducir la temperatura por la absorción de exceso de calor. Similarmente, en otra investigación proponen un modelo numérico para albercas con un balance de energía que considera el volumen del agua y el número de nadadores por día. Para la validación del modelo, es necesario definir el valor del coeficiente de evaporación (a, b) y el coeficiente de la relación entre la evaporación y el calor perdido por convección (cv), simulado usando TRYNSYS (Zsembinszki et al., 2012). Anteriormente, Haaf W. et al., 1994, había desarrollado y validado un modelo para albercas abiertas con una mínima superficie y profundidad de 100 m y 0.5 m, respectivamente. Los resultados muestran que, en general, el modelo tiene un comportamiento aceptable en el rango de 21 a 26°C, con un máximo error de 1°C, y no es suficientemente aceptable para temperaturas arriba de 28°C (Haaf et al., 1994).

Albercas mixtas

Se ha investigados modelos analíticos para el cálculo de sistemas de calentamiento solar para albercas abiertas y cerradas desarrollados para la misma alberca para determinar la mejor manera para su uso, para todo el año en albercas de medidas similares. En el criterio del área de colección, cinco métodos se ofrecen para estimar cantidad correcta de colección. Los resultados demostraron que la implementación de sistemas híbridos diésel-solar proveen mayor eficiencia y economía, si se usa una cubierta (Fahmy et al., 2014).

Conclusiones

La energía del sol se puede utilizar directamente para calentar espacios y agua, procesos industriales, secado de alimentos y tratamiento de aguas residuales, entre otros usos. Cuando los colectores solares se combinan con enfriadores de absorción o adsorción, la energía solar también se puede utilizar para enfriar. Los sistemas solares de calentamiento de agua en casas unifamiliares y viviendas multifamiliares representan el mayor uso de calor solar térmico, casi el 90 por ciento de la capacidad instalada en 2018, mientras que las redes de calefacción de distrito, los procesos industriales y la calefacción y refrigeración de espacios representan solo el 4 por ciento. Los calentadores de agua solares pueden reducir sustancialmente las facturas de energía al tiempo que crean empleos e industrias locales.

La energía solar térmica también tiene un gran potencial para la climatización, ya que la mayor demanda de refrigeración coincide con el mayor potencial solar. Pero el uso de la energía solar térmica para tales fines requiere el apoyo de proyectos de investigación y demostración para superar las barreras técnicas. Si bien es altamente competitivo en costos en función del ciclo de vida, según la región y la aplicación, la mayoría de los sistemas solares térmicos tienen altos costos iniciales. Las políticas de apoyo efectivas incluyen incentivos fiscales y financieros como préstamos, subvenciones, créditos fiscales o subsidios, combinados con objetivos, mandatos y códigos de construcción para aumentar el tamaño del mercado, así como esfuerzos de concienciación pública para aumentar el interés y la demanda.

Referencias

- Asdrubali, F. (2009). A scale model to evaluate water evaporation from indoor swimming pools. *Energy and Buildings*, 41(3), 311-319. doi:<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2008.10.001>
- Auer, T. (1996). *TRNSYS-TYPE 344. Assessment of an indoor or outdoor swimming pool*. In *TRANSSOLAR* (Ed.), Strategies for energy efficient design and thermal comfort in buildings. Energietechnik GmbH.
- Biasin, K. (1987). *Die Wasserverdunstung nichtbenutzter Becken im Hallenbad*. Fortschritt-Bericht, VDI-Reihe. VDI-Verlag, 19(17).
- Chow, T. T., Bai, Y., Fong, K. F., & Lin, Z. (2012). Analysis of a solar assisted heat pump system for indoor swimming pool water and space heating. *Applied Energy*, 100, 309-317. doi:10.1016/j.apenergy.2012.05.058
- Dannemand, M., Furbo, S., Heller, A., Andersen, C. A., & Madsen, H. (2017). *Heating of indoor swimming pools by solar thermal collectors in summerhouses in Denmark*. 39.
- Dongellini, M., Falcioni, S., Martelli, A., & Morini, G. L. (2015). Dynamic Simulation of Outdoor Swimming Pool Solar Heating. *Energy Procedia*, 81, 1-10. doi:<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.12.053>
- Dorantes, R., Hincapié, Z., & Muñoz, B. (2015). *Estudio teórico-experimental del comportamiento térmico de una piscina calentada con energía solar*. Memoria del Congreso XXXIX Semana Naional de Energía Solar 2015. doi:10.13140/RG.2.1.4670.3449
- Escobedo-Bretado, J. A., Nájera-Trejo, M., & Martín-Domínguez, I. R. (2015). *Análisis técnico-económico de un sistema de calentamiento solar para una alberca semi-olímpica en la ciudad de Durango, mediante simulación dinámica en TRNSYS*. Paper presented at the XXXIX Semana Nacional de Energía Solar, Mexico.
- Fahmy, F. H., Farghally, H. M., & Ahmed, N. M. (2014). Swimming Pool System Based on Geothermal Energy in Egypt. *Journal of Next Generation Information Technology(JNIT)*, 5(1), 27-40.
- Haaf, W., Luboschik, U., & Tesche, B. (1994). Solar swimming pool heating: Description of a validated model. *Solar Energy*, 53(1), 41-46. doi:[https://doi.org/10.1016/S0038-092X\(94\)90603-3](https://doi.org/10.1016/S0038-092X(94)90603-3)

- Jimenez, S. A., Carrillo, V., & Alvarado, M. A. (2015). *Swimming Pool heating systems: A review of applied models*. 2015, 10(19), 10. doi:10.18180/tecciencia.2015.19.4
- Katsaprakakis, D. (2019). Introducing a solar-combi system for hot water production and swimming pools heating in the Pancretan Stadium, Crete, Greece. *Energy Procedia*, 159, 174-179. doi:10.1016/j.egypro.2018.12.047
- Katsaprakakis, D. A. (2015). Comparison of swimming pools alternative passive and active heating systems based on renewable energy sources in Southern Europe. *Energy*, 81, 738-753. doi:10.1016/j.energy.2015.01.019
- Lugo, S., Morales, L. I., Best, R., Gómez, V. H., & García-Valladares, O. (2019). Numerical simulation and experimental validation of an outdoor-swimming-pool solar heating system in warm climates. *Solar Energy*, 189, 45-56. doi:10.1016/j.solener.2019.07.041
- Ratajczak, K., & Szczechowiak, E. (2020). Energy consumption decreasing strategy for indoor swimming pools – Decentralized Ventilation system with a heat pump. *Energy and Buildings*, 206, 109574. doi:https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.109574
- Santos, E. T., Zárate, L. E., & Pereira, E. M. D. (2013). Hybrid thermal model for swimming pools based on artificial neural networks for southeast region of Brazil. *Expert Systems with Applications*, 40(8), 3106-3120. doi:https://doi.org/10.1016/j.eswa.2012.12.026
- Starke, A. R., Cardemil, J. M., & Colle, S. (2018). Multi-objective optimization of a solar-assisted heat pump for swimming pool heating using genetic algorithm. *Applied Thermal Engineering*, 142, 118-126. doi:https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.06.067
- Tiwari, G. N., & Sharma, S. B. (1991). Design parameters for indoor swimming-pool heating using solar energy. *Energy*, 16(6), 971-975. doi:https://doi.org/10.1016/0360-5442(91)90049-R
- Zsembinszki, G., Farid, M. M., & Cabeza, L. F. (2012). Analysis of implementing phase change materials in open-air swimming pools. *Solar Energy*, 86(1), 567-577. doi:https://doi.org/10.1016/j.solener.2011.10.028