

IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE CALEFACCIÓN SOLAR TÉRMICO: ANÁLISIS ENERGÉTICO Y ECONÓMICO
IMPLEMENTATION OF A SOLAR THERMAL HEATING SYSTEM: ENERGY AND ECONOMIC ANALYSIS

Juan Pablo Vargas Bautista, Pablo Yampasi Espejo, Xerxes Tirado Villarroel y Andrés Patzi

Centro de Investigaciones Ópticas y Energías (CIOE)

Universidad Privada Boliviana

jp Vargas@upb.edu

(Recibido el 15 de mayo 2016, aceptado para publicación el 15 de julio 2016)

RESUMEN

El siguiente trabajo presenta la implementación de un sistema de calefacción solar térmico que usa tubos al vacío para el calentamiento de un fluido térmico, aprovechando la energía solar como fuente primaria de energía. La energía almacenada en el fluido es utilizada para climatizar un ambiente de una superficie de 45.5 m². El sistema se desarrolló con el objetivo de determinar la factibilidad tanto técnica como económica para su implementación en regiones de clima frío en Bolivia. El sistema cuenta con un colector solar de tubos al vacío que se conecta mediante tuberías a un intercambiador de calor tipo radiador. Se usó una bomba para la circulación del fluido caliente del colector al radiador y un ventilador para acelerar la transferencia de calor en el ambiente a climatizar. El sistema de calefacción cuenta con un termostato para el control de la temperatura ambiente para optimizar la energía solar disponible y el consumo de energía eléctrica de la bomba de agua y ventilador de aire. Con la implementación del sistema de calefacción, se consiguió aumentar la temperatura del ambiente de prueba a la temperatura deseada en 3 horas de funcionamiento, en el tiempo restante, el colector solar térmico almacenó la energía solar disponible en el tanque de agua para usarlo al día siguiente. Se comparó el sistema de calefacción solar con un calefactor eléctrico (4 kW) bajo las mismas condiciones de operación. Se estimó un ahorro en energía eléctrica mensual de 163.1 kWh/mes con el sistema de calefacción solar que se traduce a un ahorro económico estimado de 23.4 \$US/mes. Al reducir el consumo de energía eléctrica también se reduce la emisión de gases de efecto invernadero (G.E.I.) en 81.5 kg de CO₂/mes. Para el presente caso de estudio, el tiempo en el que se puede recuperar la inversión del sistema de calefacción solar térmico respecto al calefactor eléctrico es de 5.3 años. Como un parámetro importante se tiene que un metro de colector solar térmico de tubo al vacío puede calentar un ambiente de 16.5 m².

ABSTRACT

This work presents the implementation of a solar heating system that uses thermal vacuum tubes to heat a thermal fluid: Solar energy is used as a primary energy source. The stored energy is used to heat a room with an area of 45.5 square meters. The system was developed in order to determine both technical and economic feasibility and for its implementation in cold regions in Bolivia. The system features a solar collector vacuum tube which is connected by pipes to a heat exchanger. A pump is used for circulating the hot fluid to the heat exchanger, a fan is used to heat the cold air in the room and to accelerate the heat transfer process in the heat exchanger. The solar heating system has a thermostat to control the temperature in the room, to optimize the available solar energy and to reduce the electric consumption of the water pump and air fan. The solar heating system was able to reach the desire temperature in the room in 3 hours, the rest of the time the thermal collector stored the remaining solar energy in the water tank that will be used the next day. An electric heating system of 4 kW was used to heat the same room under the same conditions as the solar heating system. As a benefit, a monthly electricity savings of 163.1 kWh was achieved with the solar heating system that represents an estimated cost savings of 23.4 \$US of electricity. By reducing power consumption, gas emissions greenhouse was also reduced in 81.5 kg CO₂. For this specific case of study and considering the solar heating system is working all year, a payback time of 5.3 years can be obtained. As an important parameter, one square meter of solar thermal evacuated tubes can heat a room of 16.5 m².

Palabras Clave: Calefacción Solar Térmica, Energías Solar Térmica, Eficiencia Energética, Tecnologías Sustentables.

Keywords: Solar Heating Systems, Solar Thermal Energy, Renewable Energies.

1. INTRODUCCIÓN

Muchos de los sistemas de calefacción usados para climatizar ambientes en épocas de frío utilizan un calefactor eléctrico que consiste en una resistencia eléctrica que calienta un fluido y este calor es disipado al ambiente que se quiere calentar mediante convección natural. Una alternativa tecnológica a los sistemas tradicionales son los sistemas de calefacción que utilizan energía solar como fuente primaria de energía. Esta tecnología permite disminuir el consumo de energía eléctrica, tener ahorros económicos y reducir los gases de efecto invernadero [1]. La energía solar es una fuente de energía renovable obtenida a partir del aprovechamiento de la radiación electromagnética procedente del sol y a

partir de esta energía se puede aplicar a diferentes tecnologías que convierten y aprovechan la energía solar, por ejemplo generación de energía eléctrica a partir de paneles fotovoltaicos, generación de energía térmica a través de colectores solares térmicos [2].

Los sistemas de calefacción solar térmica están compuestos mayormente de tres equipos principales: colectores solares térmicos, tanque de almacenamiento e intercambiador de calor. La Figura 1 muestra el calefactor eléctrico y el calefactor solar, como se observa el calefactor solar necesita más componentes para poder funcionar lo que hace que su inversión sea mayor al calefactor eléctrico, sin embargo el beneficio que se tiene como se mencionó anteriormente, es el ahorro que se genera al reducir el consumo eléctrico.



Figura 1 - Calefactor eléctrico radiante (a) y calefactor solar térmico (b).

Varios investigadores han realizado estudios sobre diferentes tecnologías que pueden ser utilizadas para calefacción solar térmica en diferentes condiciones climatológicas y geográficas [3] [4]. Jamar *et al.* [1] presentan un resumen de los últimos desarrollos y avances en sistemas de calefacción solar térmica y las diferentes configuraciones que se puede aplicar (ver Figura 2). Bellos *et al.* [5] presentan un artículo donde evalúa la parte técnica y económica de bombas de calor y sistemas de calefacción solar para ambientes mediante simulación.

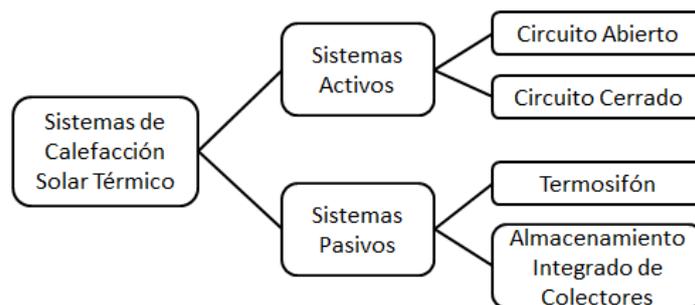


Figura 2 - Configuraciones para calefacción solar térmica [3].

Abd-ur-Rehman *et al.* [6] investigó mediante simulación computacional, sistemas de calefacción solar pasivos para Arabia Saudita donde evalúa y optimiza desde el punto de vista técnico y económico los diferentes componentes del sistema, en sus conclusiones menciona que es importante determinar la radiación solar disponible para obtener altos valores de fracción solar que permitan que el proyecto sea factible económicamente. Camargo *et al.* [7] presentó el desarrollo de un software para dimensionar sistemas de calefacción solar térmica de circulación natural y forzada que permite elegir entre tubos al vacío y colectores de placa plana.

En Bolivia se cuenta con instalaciones de sistemas de calefacción solar térmica [8], pero no se cuenta con un reporte o análisis de su eficiencia y operación que permitan determinar su factibilidad técnica y económica. Además, el potencial de energía solar en Bolivia demuestra que dos terceras partes del país se encuentran en la franja de mayor radiación solar (ver Figura 3). La mayor radiación solar diaria media anual se presenta en la región del altiplano, seguido por los

valles y con menor potencial el trópico. Las regiones del altiplano y de los valles interandinos reciben una alta tasa de radiación solar entre 5 y 6 kWh/m².día, dependiendo de la época del año. En la zona de los llanos la tasa de radiación media se sitúa entre 4,5 y 5 kWh/m².día. La tasa de radiación entre la época de invierno y verano no representa diferencias que sobrepasen el 25% a diferencia de otras regiones del mundo que se encuentran en latitudes mayores como Alemania o España [9]. La UPB ha desarrollado sistemas de control para la medición de radiación solar en sistemas fotovoltaicos [10] que podrían ser aplicados en los sistemas de calefacción solar térmicos.

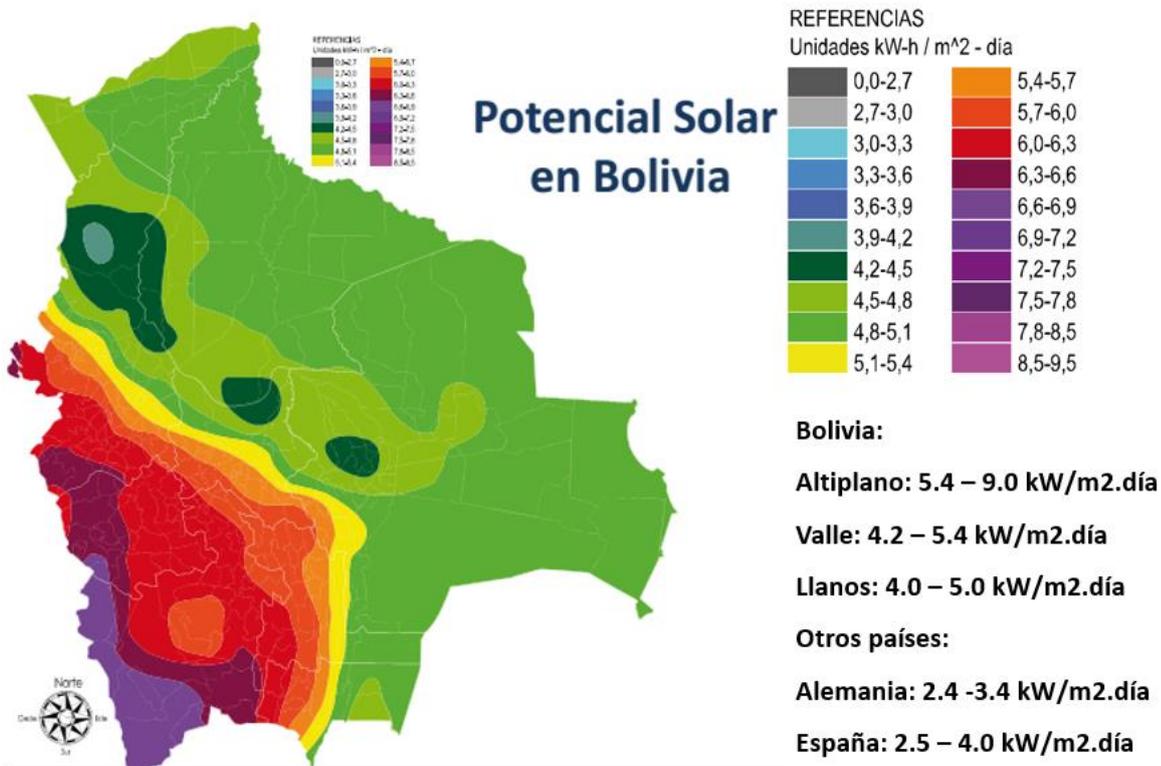


Figura 3 - Potencial de energía solar promedio anual en Bolivia [5].

Según datos de energética al 2013 [8] se tiene alrededor de 3000 sistemas termosolares instalados en ciudades y área rural de Bolivia, los cuales mayormente proveen de agua caliente para uso sanitario, desplazando así a las duchas eléctricas.

Los calefactores solares térmicos pueden ser aplicados e implementados en las regiones del altiplano boliviano (La Paz, Oruro, Potosí, parte de Tarija, Cochabamba y Sucre) donde se requiere de calentamiento de ambientes a lo largo del año. Anteriormente se desarrolló un sistema de calefacción solar utilizando concentradores solares en la Universidad Privada Boliviana [11], pero no se presenta un esquema sobre los componentes del sistema de calefacción, no se reporta resultados de la radiación solar disponible, de la energía solar aprovechada y menos del calor transferido al ambiente, solo se reporta datos de temperatura alcanzada en el tanque de almacenamiento.

Por lo tanto, el presente artículo tiene como objetivo el análisis experimental desde un punto de vista energético y económico de un sistema de calefacción solar térmico instalado en un ambiente de la Universidad Privada Boliviana, Campus Cochabamba (Latitud 17.4° Sud y Longitud 66.1° Oeste). Además, este sistema contará con un sistema de control (termostato) que hará más eficiente su funcionamiento y operación.

2. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE CALEFACCIÓN SOLAR TÉRMICO

Se instaló un sistema de calefacción solar térmico para poder evaluar su funcionamiento. El ambiente a climatizar tiene un área superficial de 45.5 m² y una altura de 2.9 m. Las paredes son de ladrillo visto de 11 cm de espesor de pared, el piso es de cerámica, cuenta con dos puertas de acceso de madera cada una de 9 m² y todas las ventanas son de doble vidrio para un mejor aislamiento térmico del ambiente, el área total de las ventanas es de 3.5 m² (ver Figura 4).

La Figura 5 muestra el esquema de instalación del sistema y sus diferentes componentes. Se utiliza colectores solares de tubo al vacío para aprovechar la energía del sol y calentar el agua que se encuentra en el tanque, mediante el uso de una bomba de baja potencia se hace circular el agua caliente a través de un intercambiador de calor tipo compacto (radiador de auto) donde se retira el calor gracias a un ventilador que impulsa el aire frío a través del radiador, el aire se calienta hasta alcanzar la temperatura deseada que se regula mediante el uso de un termostato. Al alcanzar la temperatura de operación, el termostato desconecta la bomba de agua y el ventilador. De esta manera se tiene un mejor control del sistema de calefacción y un ahorro de energía tanto eléctrica como térmica.



(a) (b)
Figura 4 - Vista frontal (a) y vista tridimensional (b) del ambiente a climatizar.

Para obtener los datos de temperatura se colocaron 6 termopares tipo K, 2 termopares en la entrada y salida del radiador para medir la temperatura del agua, 2 termopares antes y después del ventilador para medir la temperatura del aire del ambiente, 1 termopar en la parte exterior del ambiente y finalmente 1 termopar en el interior del ambiente (ver Figura 6). Los datos son almacenados en una computadora mediante un adquirente de datos de la marca Omega.

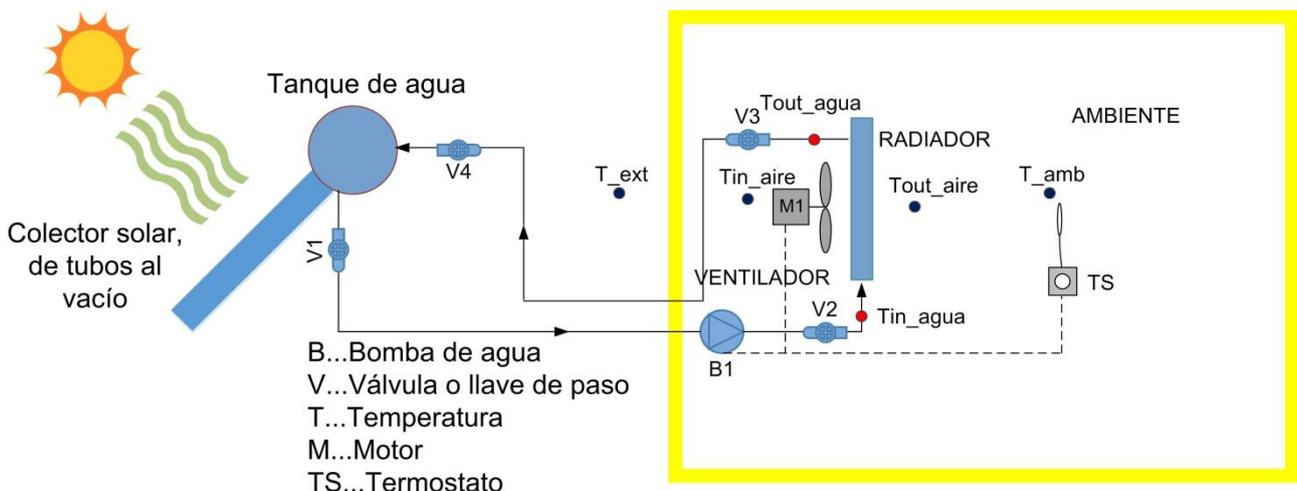


Figura 5 - Esquema del sistema de calefacción solar térmico.

Gracias al avance tecnológico, los colectores solares de tubo al vacío pueden alcanzar mayor rendimiento que los colectores planos convencionales [12], se logra reducir las pérdidas de calor que se producen por convección y conducción entre la superficie captadora y el cristal exterior a través del aire existente entre ellos.

La Figura 6 muestra el funcionamiento del principio de tubo al vacío "heat pipe". La radiación incide sobre la superficie del tubo. El tubo absorbe el calor que transmite al fluido caloportador, el cual se evapora y sube hasta el intercambiador de calor, donde cede el calor al agua de consumo y baja por el tubo para empezar el ciclo.

La creciente demanda, la experiencia y las nuevas tecnologías de fabricación de los tubos de vacío a nivel mundial, han permitido que en la actualidad, los colectores de tubo de vacío sean más competitivos con los tradicionales colectores planos. Además, en los modelos "heat pipe", el agua no circula por el colector, eliminando el problema de las corrosiones y las incrustaciones del agua [12].

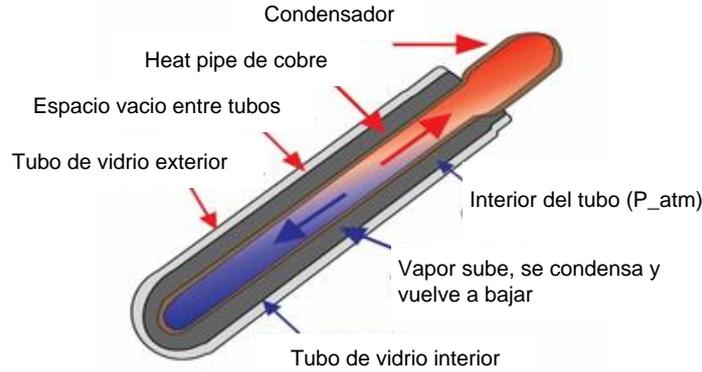


Figura 6 - Características del colector solar térmico de tubo al vacío "heat pipe".

La Figura 7 muestra los componentes básicos que se tiene en el colector solar térmico de tubos al vacío utilizado en el presente artículo (Sunrain TZ58/1800-20C) con 20 tubos al vacío, un área de absorción de radiación solar de 2.75 m² y con una capacidad de almacenamiento de 200 litros, los tubos al vacío tienen una inclinación de 30° al norte.



Figura 7 - Componentes del colector solar térmico de tubo al vacío Sunrain instalado.

Para el intercambio de calor se utilizó un radiador de automóvil que se adecuó para que funcione con el sistema de calefacción solar térmico, de la misma manera se utilizó una bomba de agua Grundfos de bajo consumo de energía eléctrica (75W) con un flujo máximo de 52 lt/min para hacer circular el agua cliente del colector al radiador (ver Figura 8a). Se utilizó un ventilador de bajo consumo de energía eléctrica (39W) para transferir el calor del agua caliente al aire del ambiente (ver Figura 8b).



Figura 8 – Vista del radiador, la bomba de agua (a) y del ventilador de aire (b) del sistema de calefacción solar térmico.

La Figura 9 muestra el termostato utilizado y su funcionamiento interno para la conexión y desconexión de la corriente eléctrica que alimenta al ventilador de aire y la bomba de agua del sistema de calefacción. El termostato cuenta con una perilla regulable donde se elige la temperatura a ser controlada, es decir la temperatura ambiente de confort, para el caso de invierno entre 19-21 °C con una humedad relativa entre el 40% al 50% [13].

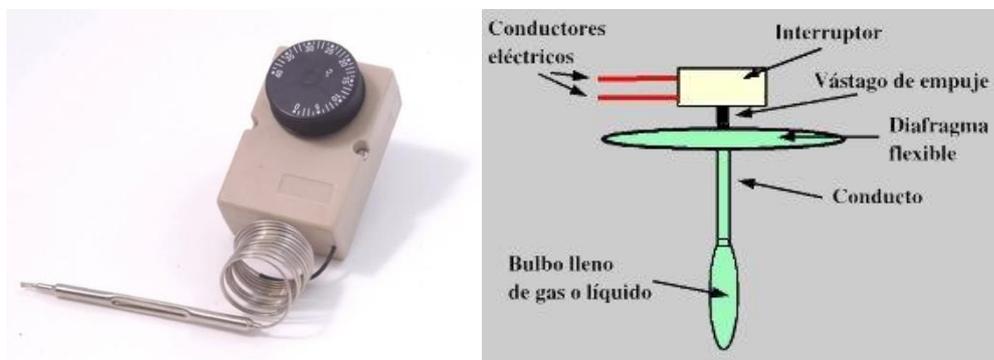


Figura 9 - Termostato utilizado en el sistema de calefacción solar térmico.

3. MODELO MATEMÁTICO PARA EL ANÁLISIS ENERGÉTICO

El calor solar se obtuvo midiendo la radiación solar disponible en un tiempo dado medido mediante un piranómetro y el área de absorción del colector solar térmico, se utilizó la ecuación (1):

$$Q_{sol} = G * A \quad (1)$$

donde Q_{sol} es la calor disponible del sol en W, G es la radiación solar horizontal en W/m^2 , A es el área del colector solar térmico en m^2 .

Para evaluar el calor que se entrega al radiador del colector solar térmico, se utilizó la ecuación (2).

$$Q_{ag} = \dot{m}_{ag} \cdot C_{p_{ag}} \cdot \Delta T \quad (2)$$

donde Q_{ag} es el calor del agua que se calienta en el colector solar térmico en W, \dot{m}_{ag} es el flujo másico del agua que circula por el radiador en kg/s, $C_{p_{ag}}$ es el calor específico del agua en kJ/kg.K, y ΔT es la diferencia de temperatura del agua a la entrada y salida del radiador en °C.

El flujo másico de agua se obtuvo utilizando la ecuación (3) y (4), se obtuvo los datos experimentales del volumen (V), tiempo (t) y temperatura del agua a la salida del radiador para obtener la densidad (ρ).

$$\dot{V} = V/t \quad (3)$$

donde \dot{V} es el flujo volumétrico de agua en m^3/s , V es el volumen del agua en m^3 , y t es el tiempo en s .

$$\dot{m}_{ag} = \rho \dot{V} \quad (4)$$

donde ρ es la densidad del agua en kg/m^3 .

Para calcular el calor que se obtiene del radiador se utilizó la ecuación (5).

$$Q_{air} = \dot{m}_{air} \cdot C_{p_{air}} \cdot \Delta T \quad (5)$$

donde Q_{air} es el calor del aire que se calienta en el radiador en W, \dot{m}_{air} es el flujo másico del aire que circula a través del radiador en kg/s, $C_{p_{air}}$ es el calor específico del aire en kJ/kg.K, y ΔT es la diferencia de temperatura del aire a la entrada y salida del radiador en °C.

Para medir el flujo másico del aire que pasa a través del radiador se utilizó un anemómetro para medir la velocidad del aire y la ecuación (6),

$$\dot{m}_{air} = \rho \cdot Vel \cdot A \quad (6)$$

donde ρ es la densidad del aire en kg/m^3 , Vel es la velocidad del aire a través del radiador en m/s medido con un anemómetro, A es el área de transferencia de calor por donde pasa el aire a través del radiador en m^2 .

La eficiencia térmica del sistema de calefacción solar se evalúa con la ecuación (7).

$$Eff = Q_{air}/Q_{sol} \tag{7}$$

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para la presentación de resultados se realizó pruebas experimentales en los meses de junio y julio de 2016 (época de invierno). La Figura 10 muestra los datos de la radiación solar y el calor disponible de un día de invierno (13/07/2016). Los datos de radiación solar se obtuvieron con un piranómetro [10], el calor disponible del sol se obtuvo utilizando la ecuación (1).

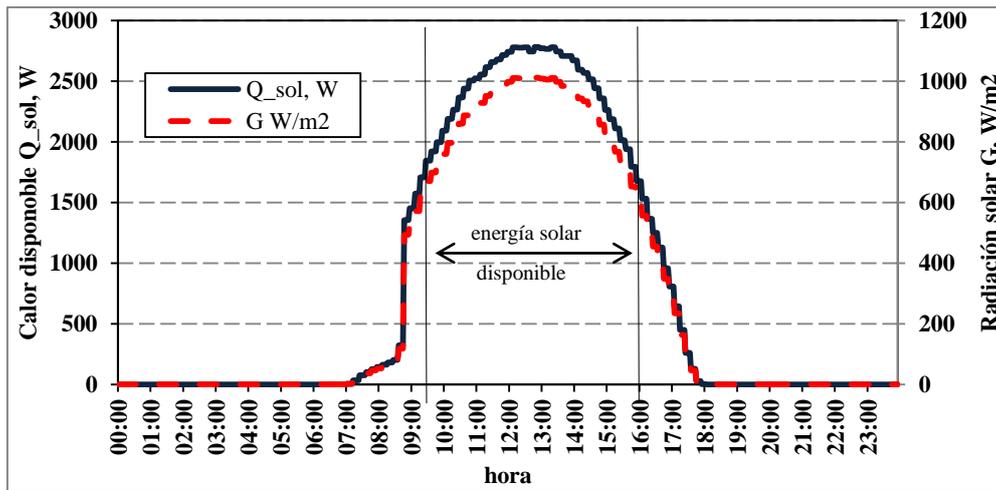


Figura 10 - Datos de radiación solar térmica y el calor disponible de un día de invierno¹.

Se observa que la radiación solar disponible para ese día en particular fue de 7.03 kWh/m^2 .día, lo que significa una energía solar disponible en el colector solar térmico de 19.33 kWh/día . Por la ubicación del colector solar térmico, en época de invierno, el sol empieza a incidir sobre el colector solar a partir de las 9.30 a.m. y termina a las 4:00 p.m. debido a las sombras que generan los edificios y árboles del lugar (ver Figura 11). Es decir, en el día de evaluación, se tuvo 6.05 kWh/m^2 .día de radiación solar (86% del total disponible) y 16.6 kWh/día en el colector solar térmico.



Figura 11 - Energía solar perdida debido a sombras en el colector solar térmico por la mañana (a) y por la tarde (b)

En la Figura 12 se puede observar el comportamiento de la temperatura en función del tiempo. La temperatura del exterior varió de una mínima de $6 \text{ }^\circ\text{C}$ (7:30 a.m.) a una máxima de $26 \text{ }^\circ\text{C}$ (4:00 p.m.). Bajo estas condiciones el sistema de calefacción empezó a funcionar a las 9 a.m. cuando el ambiente tenía una temperatura de $16 \text{ }^\circ\text{C}$ y el exterior de $11 \text{ }^\circ\text{C}$. El sistema de calefacción solar térmico tardó 3 horas en alcanzar la temperatura requerida en el ambiente de $19.5 \text{ }^\circ\text{C}$. A partir de ese momento el ventilador de aire y la bomba de agua dejaron de funcionar. El agua caliente en el

¹ Últimas mediciones experimentales realizadas el 13/07/2016

radiador varió de una máxima de 40.8 °C a 31 °C con una diferencia promedio de 1.8 °C respecto a la temperatura de salida. El aire caliente fluctuó de una máxima de 36 °C al inicio a una mínima de 29 °C al final del funcionamiento del sistema de calefacción solar térmico. A partir de ese momento no fue necesario el funcionamiento del sistema de calefacción ya que como se observa en la gráfica, la temperatura ambiente subió hasta los 22.7 °C alcanzado a las 6 p.m. debido al aumento de la temperatura exterior que alcanzó los 26 °C a las 4 p.m. La energía solar disponible que se tuvo de 12:00 a 16:00 se aprovechó para calentar el agua en el tanque de almacenamiento para usarlo el día siguiente.

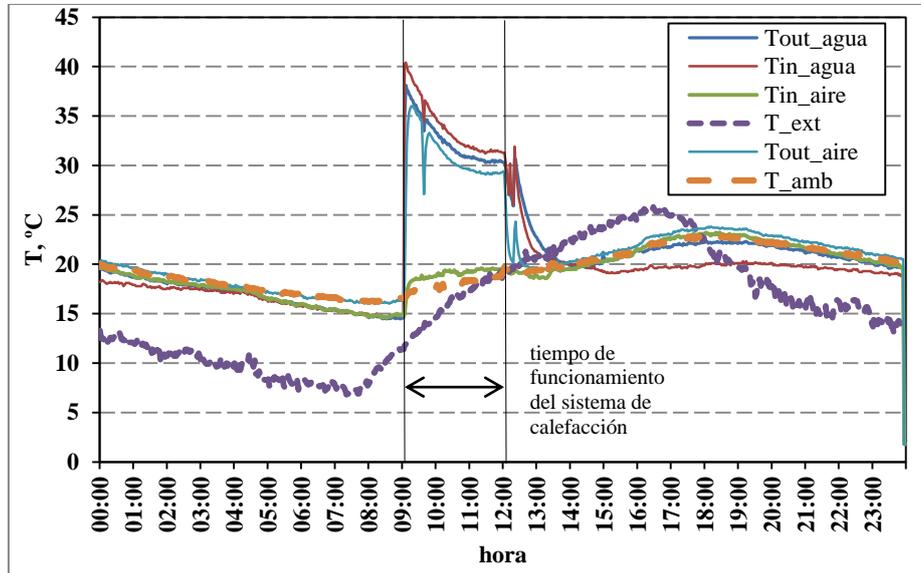


Figura 12 - Datos de la temperatura en función del tiempo.

Si no se tuviera el sistema de calefacción, el ambiente alcanzaría la temperatura deseada (19.5 °C) a las 3:30 p.m. considerando la misma evolución de la temperatura exterior y radiación solar del día que se realizó el análisis.

Con los datos de temperatura y las ecuaciones (2-6) se puede obtener al calor aprovechado para el calentamiento del agua que circula por el colector solar térmico y del aire del ambiente que circula a través del radiador (ver Figura 13). En este caso el flujo másico de aire a través del radiador fue de 0.066 kg/s y el flujo másico de agua fue de 0.2 kg/s. Se observa que la energía solar disponible en el periodo de funcionamiento (3 horas) fue de 9.06 kWh, de los cuales 4.77 kWh fue aprovechado por el agua y 3.33 kWh de energía térmica fueron entregados al ambiente a través del aire caliente. Utilizando la ecuación (7) se tuvo una eficiencia térmica del sistema de calefacción solar de 36.8% para las 3 horas de operación. La energía restante (5.73kWh) se pierde en el colector solar térmico y tanque de almacenamiento (4.29 kWh), en las tuberías que están sin aislar y en el radiador (1.44 kWh).

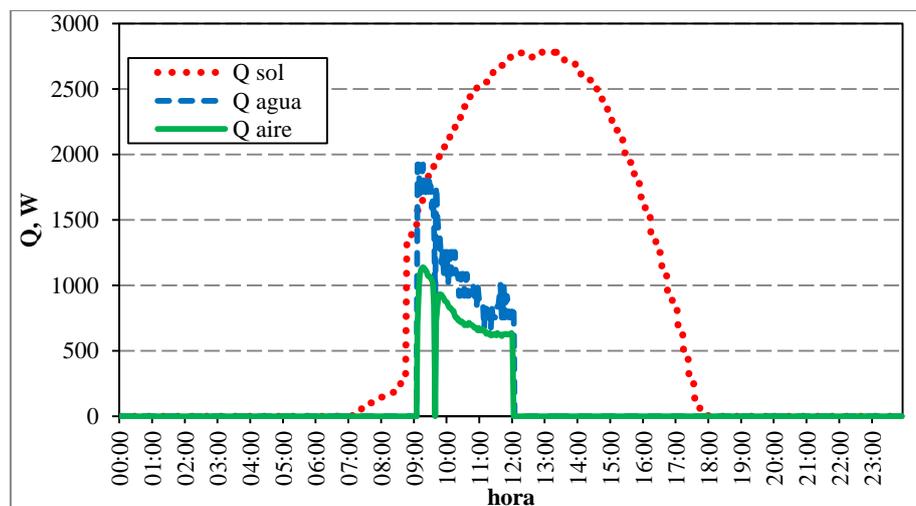


Figura 13 - Calor disponible del sol y calor aprovechado en el ambiente en función del tiempo.

La Figura 14 muestra la variación de la eficiencia del sistema de calefacción solar térmica en función del tiempo. La eficiencia fue alta al inicio (74%) ya que se tenía el agua más caliente que fue almacenado el día anterior, a medida que pasó el tiempo se fue retirando calor a través del aire caliente y la eficiencia fue disminuyendo hasta un 24%.

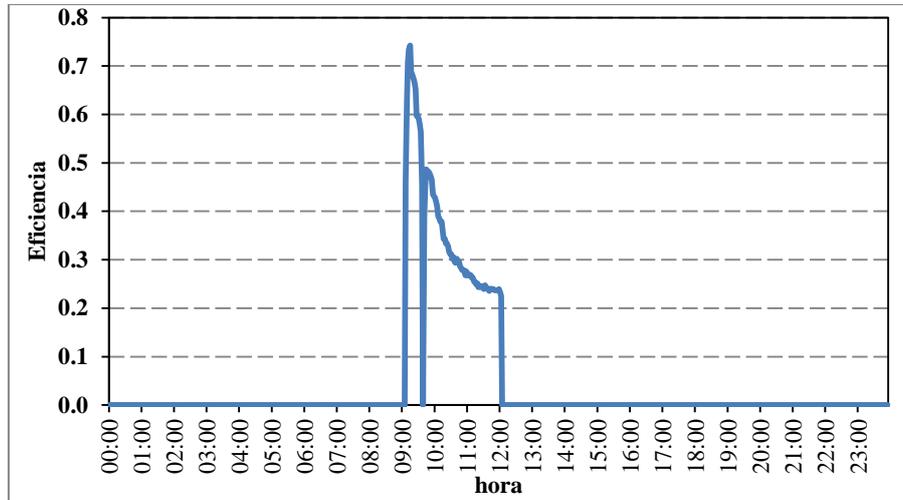


Figura 14 - Eficiencia del sistema de calefacción solar térmico.

La Figura 15 presenta un resumen del balance de energía y el consumo eléctrico del ventilador de aire (40 W) y la bomba de agua (77 W) del sistema de calefacción solar térmica que se tuvo en el día que se eligió para su análisis. La potencia del ventilador y de la bomba fue medida experimentalmente con un multímetro donde se midió la corriente y el voltaje. Si se considera el consumo de energía eléctrica de la bomba de agua y del ventilador de aire en el balance de energía se tendría una eficiencia del 35.3%.

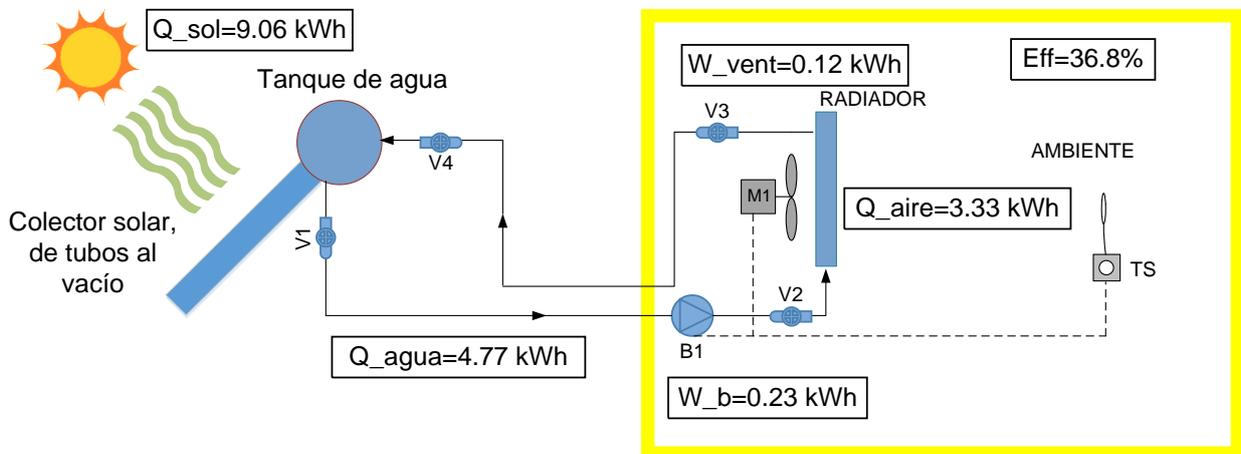


Figura 15 - Balance de energía del funcionamiento del sistema de calefacción solar térmico.

Debido a las características del ventilador (potencia, tamaño), del área disponible del radiador (0.227 m^2), solo se aprovechó 0.1 m^2 , por lo que se recomienda realizar un análisis de transferencia de calor en el radiador para determinar el área de transferencia de calor óptimo, la potencia y tamaño del ventilador, también se sugiere aislar las tuberías para evitar pérdidas de calor en el sistema de calefacción. También se sugiere realizar un análisis en la eficiencia del colector solar térmico de tubo al vacío donde se obtuvo una eficiencia del 52.6% siendo que para el nivel de temperatura obtenido se debería tener eficiencias superiores al 60% en tecnologías "heat pipe" [2]. Se recomienda realizar un análisis de cargas térmicas del ambiente para determinar si el calor provisto por los el radiador es el adecuado. Finalmente, se debe mejorar el sistema de control ya que se puede optimizar el tiempo de calentamiento controlando el funcionamiento del sistema de calefacción en las horas donde se tienen bajas temperaturas entre las 2:00 a.m. y 7:00 a.m.

4.1. Análisis económico

Para poder realizar un análisis económico, se hizo la comparación del sistema de calefacción solar térmico con un sistema de calefacción eléctrico marca DeLonghi de 2 kW (ver Figura 1a). Se debe mencionar que fue necesario utilizar dos de estos sistemas para poder calentar todo el ambiente en el mismo tiempo del sistema de calefacción térmico, esto se debe a que el sistema de calefacción eléctrico utiliza aceite térmico que calienta el ambiente por radiación y convección natural, mientras que el sistema de calefacción solar térmico utiliza un ventilador que acelera el proceso de transferencia de calor por convección forzada.

Para calcular la energía térmica y eléctrica se utiliza las siguientes ecuaciones:

$$E.E. = Pot \cdot t_{op} \quad (8)$$

$$E.T. = Q \cdot t_{op} \quad (9)$$

donde $E.E.$ es la energía eléctrica consumida por el ventilador y por la bomba en kWh, t_{op} es el tiempo de operación de los equipos en h , $E.T.$ es la energía térmica en kWh.

La Tabla 1 presenta el análisis de costos, ahorro energético y económico obtenido del sistema de calefacción solar comparado con el calefactor eléctrico. Se observa que el sistema de calefacción eléctrico consume 240 kWh/mes mientras que el sistema de calefacción solar solo consume 7 kWh/mes.

TABLA 1 - COMPARACIÓN DEL SISTEMA DE CALEFACCIÓN SOLAR CON EL SISTEMA DE CALEFACCIÓN ELÉCTRICO

	Calefactor Solar	Calefactor Eléctrico
Costo Equipos		
Colector	1,527	n.a.
Bomba de agua Grundfos	60	n.a.
Ventilador de aire Ulix	20	n.a.
Calefactor eléctrico	0	206.5
Radiador	50	0
Termostato	50	0
Inversión [US\$]	1,707.0	206.5
Capacidades de los Equipos		
Potencia Resistencia [kW]	0	4
Potencia Bomba [kW]	0.077	0
Potencia Ventilador [kW]	0.040	0
Potencia eléctrica, [kW]	0.117	4
Condiciones de Operación		
Tiempo de operación [hr/día]	3	3
Tiempo de operación [días/mes]	20	20
Tiempo de operación total [hr/mes]	60	60
Consumo de Energía		
Energía Térmica [kWh/mes]	66.6	0
Energía Eléctrica ventilador [kWh/mes]	2.4	0
Energía Eléctrica bomba [kWh/mes]	4.6	0
Energía Eléctrica resistencia [kWh/mes]	0	400
Energía Térmica. total [kWh/mes]	66.6	0
Energía Eléctrica total [kWh/mes]	7.0	240
Costos unitarios		
Costo Energía Eléctrica [Bs/kWh]	0.7	0.7
Costos de operación		
Costo Energía Eléctrica total [Bs/mes]	4.91	168
Costo Energía Eléctrica total [US\$/mes]	0.7	24.1
Producción G.E.I [kg CO ₂ /mes]	2.5	84.0

La Tabla 2 muestra el ahorro energético y económico mensual obtenido en el sistema de calefacción solar térmico comparado con el calefactor eléctrico, la diferencia entre la inversión del sistema de calefacción solar térmico y del

caleafactor eléctrico es de 1500 U\$D, el ahorro económico obtenido es de 163.1 Bs/mes (23.4 U\$D/mes), la reducción de G.E.I. que para este caso es de 81.5 kg CO₂/mes y un periodo de recuperación de la inversión de 5.34 años considerando que el sistema de calefacción solar térmico tendrá un funcionamiento continuo a lo largo del año. Por ejemplo para climas como La Paz, Oruro, Potosí que tienen temperaturas bajas a lo largo del año donde se necesita calefacción de manera continua en ambientes como hospitales donde se tiene que controlar la temperatura ambiente.

Se debe mencionar que los costos de los equipos y precio de la energía eléctrica son aproximados obtenidos del mercado local y sirven como una referencia, no se considera costos de instalación, inflación ni costos de mantenimiento. Los resultados pueden variar de acuerdo a condiciones del ambiente a climatizar, por ejemplo superficie, orientación, materiales de las paredes y techo, tipo y área de ventanas y puertas, ocupantes, infiltraciones, entre otros [13].

TABLA 2 - AHORRO, REDUCCIÓN DE G.E.I. Y PERIODO DE RECUPERACIÓN DEL SISTEMA DE CALEFACCIÓN SOLAR

Descripción	Valor
Ahorro E.E [kWh/mes]	233
Ahorro Económico [Bs/mes]	163.1
Ahorro Económico [\$US/mes]	23.4
Reducción G.E.I [kg CO ₂ /mes]	81.5
Retorno de inversión [años]	5.34

5. CONCLUSIONES

Se realizó el análisis energético y económico de un sistema de calefacción solar térmico de tubos al vacío para un ambiente de 45.5 m², con ventanas de doble vidrio. Se utilizó un radiador para calentar el aire del ambiente utilizando un ventilador de bajo consumo eléctrico y una bomba para la circulación del agua. Se evaluó experimentalmente el funcionamiento del sistema para un día de invierno. Se logró calentar el ambiente a la temperatura deseada (de 16 °C a 19.5 °C) en un tiempo de 3 horas de funcionamiento (de 9 a.m. a 12 p.m.) del sistema de calefacción solar. Si no se tuviera el sistema de calefacción solar, el ambiente alcanzaría la temperatura deseada solo a las 3:30 p.m., considerando la misma evolución de la temperatura exterior y radiación solar del día que se realizó el análisis.

Como resultados se obtuvo una eficiencia térmica del sistema de calefacción solar de 36.8%. La baja eficiencia se debe a las pérdidas de calor que se tienen en el colector solar térmico, en las tuberías y la baja potencia del ventilador de aire ya que el radiador tiene una mayor capacidad de intercambio de calor. Se comparó el funcionamiento de este sistema con un sistema de calefacción eléctrico de un total de 4 kW de potencia eléctrica para climatizar el mismo ambiente. Tomado en cuenta las condiciones de operación de cada sistema, costos de energía y costos de inversión, se obtuvo un ahorro estimado de energía eléctrica de 23.4 kWh/mes con el sistema de calefacción solar térmico, que representa un ahorro económico de 23.4 \$US/mes y una reducción estimada de G.E.I. de 81.5 kg CO₂/mes. Bajo estas condiciones y asumiendo un uso constante a lo largo del año del sistema de calefacción, se tiene una recuperación de la inversión de 5.3 años.

Con la instalación de un termostato en el sistema de calefacción solar térmico, se logró controlar adecuadamente la temperatura del ambiente, haciendo que la bomba y el ventilador reduzcan su funcionamiento, permitiendo el uso eficiente del calor obtenido del sol y reduciendo el consumo de energía eléctrica. Se necesitó aproximadamente 2.76 m² de área de absorción de energía solar térmica para climatizar un ambiente de 45.5 m² en 3 horas, es decir por cada metro cuadro de colector solar térmico se puede climatizar 16.5 m² de superficie.

6. BIBLIOGRAFÍA

- [1] A. Jamar, Z. Majid, W. Azmi, M. Norhafana and A. Razak, "A review of water heating system for solar energy applications," *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol. 76, pp. 178-187, 2016.
- [2] J. A. Duffie and W. A. Beckman, *Solar engineering of thermal processes*, John Wiley and Sons, Inc, 2013.
- [3] A. Allouhi, A. Jamil, T. Kousksou, T. El Rhafiki, Y. Mourad and Y. Zeraouli, "Solar domestic heating water systems in Morocco: An energy analysis," *Energy Conversion and Management*, vol. 92, pp. 105-113, 2015.
- [4] X. Yang, H. Li and S. Svendsen, "Energy, economy and exergy evaluations of the solutions for supplying domestic hot water from low-temperature district heating in Denmark," *Energy Conversion and Management*, vol. 122, pp. 142-152, 2016.

- [5] E. Bellos, C. Tzivanidis, K. Moschos and K. A. Antonopoulos, "Energetic and financial evaluation of solar assisted heat pump space," *Energy Conversion and Management*, vol. 120, pp. 306-319, 2016.
- [6] H. M. Abd-ur-Rehman and . F. A. Al-Sulaiman, "Optimum selection of solar water heating (SWH) systems based on their comparative techno-economic feasibility study for the domestic sector of Saudi Arabia," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 62, pp. 336-349, 2016.
- [7] C. E. Camargo Nogueira, M. L. Vidotto and F. Toniazzo,, "Software for designing solar water heating systems," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 58, pp. 361-375, 2016.
- [8] Energética, "Energía para el desarrollo," [Online]. Available: <http://www.energetica.org.bo/>. [Accessed June 2016].
- [9] N. R. Canada, "RETScreen," [Online]. Available: <http://www.nrcan.gc.ca/energy/software-tools/7465>. [Accessed July 2016].
- [10] J. P. Vargas-Bautista and G. Navia A., "Development of a control system to measure the efficiency and characteristic curve I-V in real time of a solar PV system using Labview® and Arduino," *Investigación & Desarrollo*, vol. 1, no. 15, pp. 49-64, 2015.
- [11] O. Ormachea and D. Loza, "Desarrollo de un sistema de calefacción de ambientes mediante colectores solares y tubos al vacío," in *XV Congreso Ibérico y X Congreso Iberoamericano de Energía Solar*, Vigo, Galicia, 2012.
- [12] F. A. Peuser, K.-H. Remmers and M. Schnauss, *Solar Thermal Systems: Successful Planning and Construction*, Michigan, USA: Earthscan, 2002.
- [13] T. A. Reddy, . J. F. Kreider, P. S. Curtiss and A. Rabl, *Heating and Cooling of Buildings: Design for Efficiency*, CRC Press, 2009.