

12º CONGRESO IBEROAMERICANO DE INGENIERÍA MECÁNICA

Guayaquil, 10 a 13 de Noviembre de 2015

DISEÑO, FABRICACIÓN Y ESTUDIO EXPERIMENTAL DE UN SIMULADOR DE COLECTOR SOLAR DE PLACA PLANA BAJO CONDICIONES CLIMATICAS DE BRASIL PARA CONSUMO DOMESTICO DE AGUA CALIENTE.

Sandoval Rodríguez, O R*, Nassar Koury, R N°, Torres Maia, A A**

*Programa de Postgraduación en Ingeniería Mecánica, Universidad Federal de Minas Gerais, BH, Brasil,

°.**Escuela de Ingeniería, Universidad Federal de Minas Gerais, BH, Brasil.

*e-mail:ingpino@ufmg.br °e-mail: koury@demec.ufmg.br **e-mail: aamaia@ufmg.br

Palabras claves: Calentamiento de agua, colector solar, construcción, fabricación, simulación.

RESUMEN

En este trabajo, es diseñado y construido un simulador de colector solar de placa plana utilizado para el consumo doméstico en la región sudeste de Brasil. El equipamiento es construido usando resistencias eléctricas calentadoras y un módulo de conversión y control de energía eléctrica. Principalmente, es desarrollado un algoritmo computacional que tiene como objetivo determinar la relación entre la cantidad de energía solar colectada y el valor de potencia eléctrica que debe ser suministrada por las resistencias eléctricas. La variación en la potencia se obtiene mediante regulación de la tensión que polariza las resistencias a través del sistema de conversión de energía. Con esta propiedad, es posible realizar simulaciones de los perfiles típicos de insolación solar en cada día. En el estudio del simulador es utilizada la base de datos de radiación solar determinados por el análisis de imágenes de satélite del Proyecto SWERA. Los resultados mostraron que el comportamiento térmico del colector simulador es compatible con un comportamiento real de colector solar y por lo tanto, es posible utilizar este tipo de sistemas para determinar las características de funcionamiento de sistemas auxiliares a estos equipamientos, como bombas de calor, sistemas eléctricos de mejor eficiencia o sistemas de calentamiento de gas natural.

PALABRAS CLAVE: Calentamiento de agua, colector solar, construcción, fabricación, simulación.

INTRODUCCIÓN

El crecimiento de la población humana, así como la búsqueda por un acceso a mejores condiciones de vida, hacen que la demanda energética sea cada día más grande. Sin embargo, en los últimos años, otras preocupaciones han estado sobresaliendo debido a dos factores: el impacto ambiental debido a la quema de grandes cantidades de combustibles fósiles y la falta de conocimiento respecto a cómo va a satisfacerse la creciente demanda con la actual cantidad de reservas mundiales. Impulsadas por estos hechos, las organizaciones no gubernamentales están trabajando para aumentar la contribución de energías renovables y, por lo tanto, reducir el consumo de dichos combustibles, lo que contribuirá a reducir los problemas anteriormente mencionados [1]. Por otro lado, una parte significativa del total de energía producida en el mundo se utiliza para el calentamiento de agua sanitaria, donde la cuota llega a ser de 11% en los Estados Unidos de América [2], 14% en Europa [3], 24% en Brasil [4] y el 27% en China [5].

Como forma de reducir este consumo en Brasil y al mismo tiempo contribuir en el uso de fuentes alternativas de energía, están siendo utilizados dispositivos solares para realizar el calentamiento de agua principalmente usada en tareas domésticas [6]. Sin embargo, la principal restricción en el uso de estos sistemas es la falta de días soleados a lo largo del año. En función de este aspecto, este artículo diseña, fabrica y discute resultados experimentales obtenidos en un equipamiento de bajo costo que tiene como finalidad simular un colector solar y así, realizar trabajos futuros que permitan caracterizar dispositivos auxiliares para mejorar en el consumo de energía.

DISEÑO Y FABRICACIÓN

La propuesta del sistema es ilustrada en la Fig. 1, y comprende el programa computacional, un módulo denominado colector solar simulador, un control electrónico de potencia en conjunto con las resistencias eléctricas simuladoras, un sistema de aislamiento eléctrico y térmico para cada componente y un tanque de almacenamiento de agua. Durante la operación, es utilizada principalmente una comunicación entre el modulo simulador con el programa computacional proyectado para calcular y transmitir los datos solares al sistema. Este algoritmo computacional adquiere, convierte y transfiere los datos solares diarios a un valor de potencia eléctrica necesaria que debe ser proporcionada al agua, consiguiendo tener un equivalente de la radiación solar absorbida por un panel colector configurado.

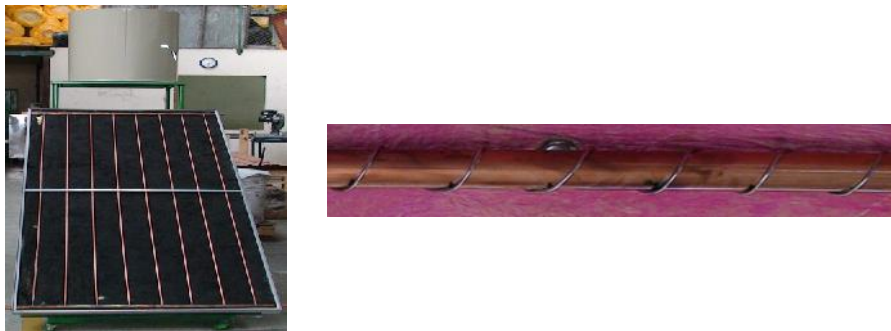


Figura 1. Estructura y configuración del equipamiento (modulo solar simulador).

Modelamiento matemático

La formulación del algoritmo computacional es desarrollada con el objetivo de usar bases de datos de radiación solar como SUNDATA [7] y red SONDA [8] entre otras bases, por eso mantiene modelamientos matemáticos consolidados en el área de la energía solar térmica.

La declinación solar es calculada por la Ec. (1) [9].

$$= 23,45^\circ \text{sen } \{360[(284 + n)/ 365]\} \quad (1)$$

Los ángulos horarios y el ángulo promedio son determinados a partir de las Ec. (2), (3) y (4), donde $Z=1$ para $4h$ [10].

$$_1 = 15(Z - 1) - 120 \quad (2)$$

$$\alpha_2 = 15Z - 120 \quad (3)$$

$$\alpha = \alpha_1 + 7.5 \quad (4)$$

El cálculo de la radiación extraterrestre sobre una superficie horizontal para un periodo entre los ángulos horarios α_1 y α_2 es definida por la Ec.(5) [11].

$$I_o = \frac{0.012 \times 3600}{\pi} G_{sc} \cos(\alpha) + 0.033 \cos(\alpha) \left\{ \cos(\alpha) \cos(\alpha_2) - \sin(\alpha) \sin(\alpha_1) \right\} + \frac{\alpha_2 - \alpha_1}{180} \sin(\alpha) \sin(\alpha) \quad (5)$$

La Ec. (6) calcula el coeficiente de distribución de las nubes para un día de cielo limpio [12].

$$k_T = I / I_o \quad (6)$$

El cálculo de las componentes de la radiación horaria es obtenido con el uso de la Ec. (7). La fracción de la radiación difusa es definida por el modelo de Erbs, Klein y Duffie [13].

$$\frac{I_d}{I} = \begin{cases} 1 - 0,09k_T; & \text{for } k_T \leq 0,22 \\ 0,9511 - 0,1604k_T + 4,388k_T^2 - 16,638k_T^3 + 12,336k_T^4; & \text{for } k_T > 0,22 \text{ e } k_T \leq 0,8 \\ 0,165; & \text{for } k_T > 0,8 \end{cases} \quad (7)$$

Para el cálculo de la proporción de la radiación directa en un plano inclinado (generalmente con la horizontal) es utilizada la Ec. (8).

$$R_b = \frac{\cos(W + \alpha) \cos(\alpha) \cos(\alpha) + \sin(W + \alpha) \sin(\alpha)}{\cos(W) \cos(\alpha) \cos(\alpha) + \sin(W) \sin(\alpha)} \quad (8)$$

Después de conocer los parámetros de la radiación solar, es necesario realizar en cada uno de los horarios del día el cálculo de la radiación absorbida por el colector solar. Para realizar este cálculo es indispensable conocer los valores de los índices de la reflexión de la radiación. Los cálculos de los ángulos de incidencia externa e interna del vidrio cuando es atravesado por la radiación directa, difusa y de albedo son obtenidos de las Ec. (9), (10), (11) e (12) respetivamente, conociendo que el índice de reflectancia del vidrio común es igual a 1,526 [11]. Los ángulos varían de acuerdo al ángulo de inclinación del colector en relación al suelo.

$$i_b = \cos^{-1} [\cos(W + \alpha) \cos(\alpha) \cos(\alpha) + \sin(W + \alpha) \sin(\alpha)] \quad (9)$$

$$i_g = 90 - 0,5788 \alpha + 0,002693 \alpha^2 \quad (10)$$

$$i_d = 59,7 - 0,1388 \alpha + 0,001497 \alpha^2 \quad (11)$$

$$I_R = \sin(i_x) / \sin(i_{2x}) \quad (12)$$

Donde x representa la posibilidad de usar la Ec (12) para cada una de las tres componentes.

Después de conocer los ángulos de incidencia es necesario evaluar la componente perpendicular y la componente paralela de la radiación no polarizada y así, obtener el promedio de estos valores. Para superficies suaves, Fresnel propuso las Ec. (13), (14) y (15) para poder determinar la reflexión de la radiación no polarizada que atraviesa desde un medio uno para un medio dos [11].

$$r_r = \sin^2(\theta_2 - \theta_1) / \sin^2(\theta_2 + \theta_1) \quad (13)$$

$$r_p = \tan^2(\theta_2 - \theta_1) / \tan^2(\theta_2 + \theta_1) \quad (14)$$

$$r = (r_r + r_p) / 2 \quad (15)$$

La transmitancia de la radiación inicialmente no polarizada es la transmitancia promedio entre los dos componentes, este parámetro es obtenido mediante el uso de la Ec. (16).

$$r = 0,5 \{[(1 - r_p) / (1 + r_p)] + [(1 - r_r) / (1 + r_r)]\} \quad (16)$$

La absorción de la radiación en un medio parcialmente transparente está descrita por la ley de Bouguer [11], Ec. (17):

$$a = e^{(-KL / \cos(\theta_2))} \quad (17)$$

Donde K varía desde 4 m⁻¹ para vidrio simple hasta 32 m⁻¹ para vidrio con alto nivel de óxido de hierro y L es la espesura de la lámina de vidrio. En este trabajo es considerado un valor estandarizado de 3 mm. La transmitancia, la reflectancia y la absorción para una cobertura simple son evaluadas en las Ec. (18), (19) y (20), y pueden ser determinadas incluyendo las pérdidas del sistema usando el método descrito por Siegel y Howell [14].

$$= a [(1 - r_r) / (1 + r_r)] \{[(1 - r_r^2) / (1 - r_r a)^2]\} \quad (18)$$

$$= r_r (1 + a) \quad (19)$$

$$= (1 - a) [(1 - r_r) / (1 - r_r a)] \quad (20)$$

Para determinar la dirección de la absorción para la radiación solar en una superficie negra de una placa plana común se utiliza el polinomio de Pettit y Sowell [15], descrito en la Ec. (21).

$$r / r_n = 1 + 1,5879 \times 10^{-3} \theta_n^2 + 2,7314 \times 10^{-4} \theta_n^3 - 2,3026 \times 10^{-5} \theta_n^4 + 9,0244 \times 10^{-7} \theta_n^5 - 1,8 \times 10^{-8} \theta_n^6 + 1,7734 \times 10^{-10} \theta_n^7 - 6,9937 \times 10^{-13} \theta_n^8 \quad (21)$$

El factor conocido como producto transmitancia-absorción, Ec. (22), debe ser considerado como una propiedad de combinación de la cobertura absorbente, en vez de ser considerado como el producto de dos propiedades específicas.

$$()_x = 1,01 (/ n) n \quad (22)$$

Por último, son desarrollados los cálculos de la potencia absorbida por la placa, Ec. (23), llamada de potencia S.

$$S = I_b R_b ()_b + I_d ()_d [(1 + \cos(\theta)) / 2] + I_g I_T ()_g [(1 - \cos(\theta)) / 2] \quad (23)$$

A partir de los valores calculados en las Ec. (24), (25), (26), (27), (28), (29) e (30) es posible realizar el cálculo de las pérdidas totales en el colector, Ec. (33).

La Ec. (25) determina las pérdidas de calor por la superficie superior del colector solar. La Ec. (28) es usada para determinar las pérdidas por la superficie inferior del colector y la Ec. (29) las pérdidas por la superficie lateral del equipamiento. Tabor [16] recomienda usar un tejido aislante lateral con espesura igual a la espesura del aislante que protege la parte inferior de la placa solar. Estas pérdidas son estimadas asumiendo que el flujo de calor es unidimensional en todo el perímetro del colector.

$$U_T = \frac{N}{\frac{C}{T_{pm}} \frac{T_{pm} - T_a}{N + f}} + \frac{1}{h_w} + \frac{(T_{pm} + T_a)(T_{pm}^2 + T_a^2)}{\frac{1}{p + 0,00591Nh_w} + \frac{2N + f - 1 + 0,133 p}{g} - N} \quad (24)$$

$$f = (1 + 0,089h_w - 0,1166h_w p)(1 + 0,07866N) \quad (25)$$

$$C = 520(1 - 0,000051 p^2) \quad (26)$$

$$e = 0,430[1 - (100 / T_{pm})] \quad (27)$$

$$U_b = k / L \quad (28)$$

$$U_e = (UA)_l / A_c \quad (29)$$

$$(UA)_l = (k / t_l) P_c t_c \quad (30)$$

Por último,

$$U_L = U_b + U_e + U_T \quad (31)$$

El calor final que es necesario a ser transmitido al agua es calculado por la Ec. (32). Este es un cálculo dinámico que necesita realizar mediciones continuas de la temperatura del fluido en la entrada del colector y medición de temperatura ambiente.

$$Q_u = A_c F_R [S - U_L (T_i - T_a)] \quad (32)$$

Donde el factor F_R es el factor de remoción de la placa colectora y es dado por la Ec. (33)

$$F_R = \frac{m C_p / A_c U_L}{1 - \frac{[S / U_L - (T_{fo} - T_a)]}{[S / U_L - (T_{fi} - T_a)]}} \quad (33)$$

El valor de potencia eléctrica es obtenido por la Ec. (34) y el valor de la cantidad de tensión de alimentación obtenido por la Ec.(35)

$$P = 450 Q_u \quad (34)$$

$$V = \sqrt{P / R} \quad (35)$$

Finalmente, el cálculo de estas variables es realizado para todos los datos de radiación solar horaria almacenados en un día de evaluación del prototipo.

Proyecto del colector solar simulado

Para realizar las simulaciones y conseguir proporcionar los datos necesarios para el modelo termodinámico del colector, son agrupadas las características de diseño de un colector solar estándar: 2,4 m² de área de colecta, una cobertura, un vidrio estándar de 3mm de espesura, índice de reflectancia y Emisividad de 1,526 y 0,88 respectivamente. La placa absorbente con pintura negra de emisividad 0,96, conductividad térmica igual a 385 W/m °C, espesura de 0,5 mm. 8 tubos de cobre con 10 mm de diámetro interno y 12 mm de separación. Aislante

térmico de lana de vidrio con espesura de 50 mm en la parte de la placa y 25 mm en la parte lateral. Por último, inclinación del colector igual a 36°.

Materiales y fabricación

Para la fabricación de las resistencias eléctricas es utilizado un hilo Kanthal de níquel-cromo con las siguientes características: Diámetro 0.912mm, composición 80% Níquel e 20% Cromo, resistividad 1.6685 $\Omega\cdot m$ e temperatura de trabajo hasta de 1200°C.

En la modulación de la potencia eléctrica, es necesario el uso de una salida analógica, un módulo convertidor de señales electrónicas y un relé de estado sólido controlador de la tensión eléctrica por ángulo de fase. Estos equipamientos en conjunto permiten la modulación de la tensión de alimentación. Así, las resistencias eléctricas contenidas en el interior de la placa solar permiten tener diferentes modulaciones de potencia eléctrica, esto con la finalidad de realizar simulaciones completas de la radiación solar en una hora determinada del día. La simulación de diferentes comportamientos de radiación diaria permite aumentar la temperatura del agua.

RESULTADOS Y DISCUSIONES

Metodología de ensayo

Para fines de comparación de los resultados es realizado el siguiente ensayo en el sistema: calentamiento del agua a través del panel colector simulador con la intensidad de diferentes radiaciones estacionales de la ciudad de Belo Horizonte – Minas Gerais en Brasil.

Para cada una de las situaciones descritas, son obtenidas las siguientes informaciones:

1. Temperatura ambiente.
2. Temperatura del agua en el colector (medida en cinco puntos)
3. Temperatura en el interior do reservatorio de agua;

Esta metodología tiene el objetivo de caracterizar el funcionamiento del sistema simulador sobre las condiciones reales de la ciudad mencionada.

Resultado y análisis

El analisis de los datos disponibles por el software Radiasol® [17] permite ilustrar en la Fig. (2) los comportamientos de la radiación global horaria promedio mensual en el plano horizontal que impacta la región, estos datos son tratados con el algoritmo computacional que incluye el modelamiento matemático y con sus resultados es posible construir la Fig. (3), que contiene las contribuciones promedio de las componentes de radiación.

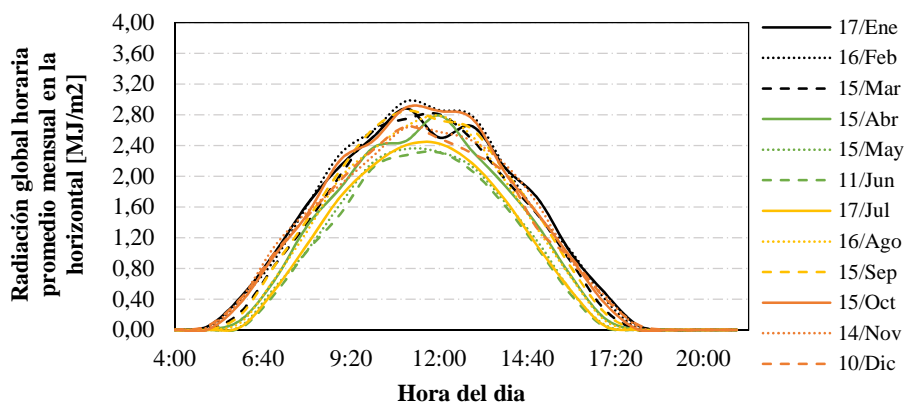


Figura 2. Radiación global horaria promedio mensual en la horizontal

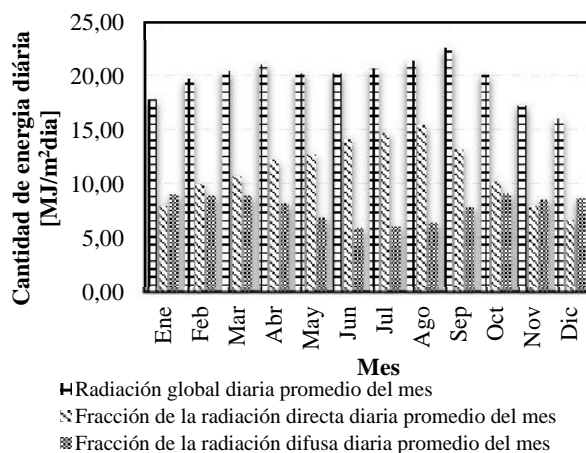


Figura 3. Radiación global, fracción difusa y fracción directa diaria promedio mensual en el plano inclinado de simulación

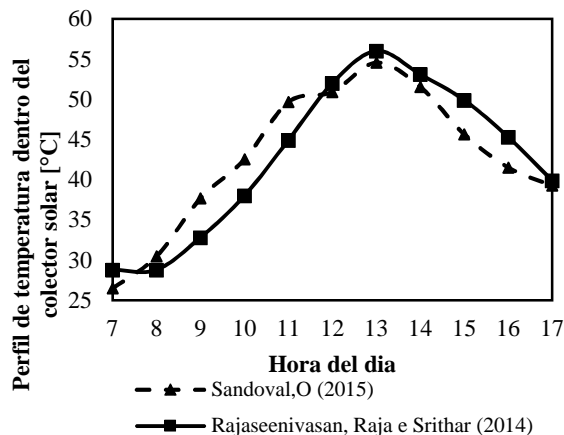


Figura 4. Comparación de la variación de la temperatura del agua dentro del colector simulador.

Los valores del índice de claridad promedio mensual son utilizados para evaluar cuantitativamente los modelos matemáticos implementados, ya que este tipo de información posibilita la comparación con valores medidos físicamente y valores encontrados en la literatura. Los valores comparados se encuentran en el Atlas Solarimétrico de Minas Gerais [18] y en la base de datos de SUNDATA [7].

Tabla 2. Índice de comparación entre los parámetros de base de datos y cálculo de la metodología de este trabajo

Mes	K_T Atlas Solarimétrico [18]	K_T SUNDATA [19]	K_T Simulado (I/I_0)	%error	U_T [MJ/m²day]
Ene	0,39	0,51	0,49	20,4/4,1	6,22
Feb	0,45	0,54	0,52	13,5/3,8	6,46
Mar	0,44	0,54	0,54	18,5/0,0	5,57
Abr	0,48	0,58	0,54	11,1/7,4	6,56
May	0,53	0,59	0,56	5,3/5,3	6,31
Jun	0,42	0,62	0,61	31,1/1,6	5,78
Jul	0,56	0,64	0,61	8,2/4,9	5,44
Ago	0,48	0,63	0,61	21,3/3,3	5,46
Sep	0,44	0,58	0,57	22,8/1,7	7,44
Oct	0,47	0,54	0,52	9,6/3,8	5,85
Nov	0,39	0,49	0,47	17,0/4,2	4,59
Dic	0,38	0,47	0,45	15,5/4,4	4,21

El análisis de la Tab (2) permite conocer que el modelamiento matemático representa bien los índices de claridad mensuales, consiguiendo así valores bastante próximos y hasta en un caso igual de los encontrados en la base de datos SUNDATA. Por otro lado, el error promedio es de 3,7% para SUNDATA y 14,5% en comparación al Atlas Solarimétrico de la empresa Cemig. Por la temperatura ambiente llegar a los límites más bajos en los meses de invierno, las pérdidas de energía aumentan, debido a que la transferencia de calor entre el ambiente y el vidrio de la cobertura es más grande. Con eso, el sistema necesita además de la energía que es usada para el calentamiento del agua una parte adicional para compensar estas pérdidas.

El comportamiento térmico horario del colector simulador es visto en la Fig. (4), y se observa la comparación del resultado de simulación del día 17 de enero con los resultados obtenidos en trabajos de investigación donde son usados colectores reales como el objetivo de tener una evaluación del comportamiento del colector simulador.

Comparando los resultados de la investigación de los autores Rajaseenivasan, Raja e Srithar [20] Se observa que el equipamiento usado en este trabajo obtuvo el comportamiento esperado donde es bastante similar al comportamiento del colector real usado por los autores. Las pequeñas diferencias pueden ser atribuidas a la diferencia de algunos parámetros en el momento del cálculo computacional, una de ellas es la latitud de Belo Horizonte y la ciudad de Tamil Nadu, en la India. También, los autores realizaron el estudio utilizando un colector horizontal diferente de este estudio donde la inclinación utilizada es 36°N.

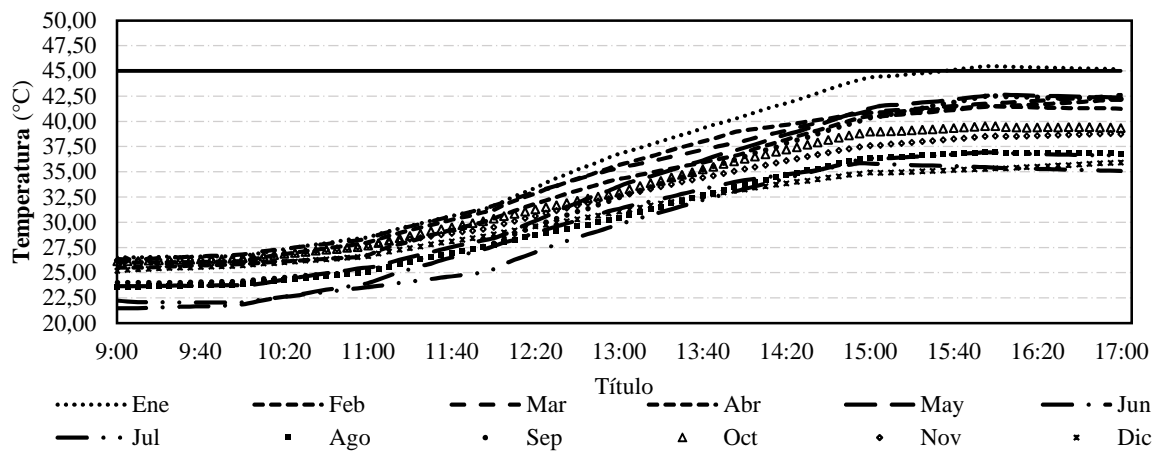


Figura 5. Temperatura en el tanque de almacenamiento (200 l) no transcurrir de la simulación

Se puede observar que la mayor mudanza de temperatura siempre ocurre entre las 11h y las 15h, ya que en ese periodo siempre se tiene la mayor disposición de energía en el colector solar. Por otro lado, se consigue determinar que en los meses de febrero, marzo, abril, mayo y septiembre la temperatura del agua se mantiene superior a 40°C, una temperatura que puede ser considerada como agradable. Las temperaturas más bajas son encontradas en los meses de junio, julio, agosto y diciembre, con temperaturas que no consiguen superar la barrera de los 37°C. La temperatura mínima es alcanzada en el mes de junio con 35°C.

CONCLUSIONES

Las pérdidas de energía solar son atribuidas principalmente a la inclinación del colector y a la baja temperatura ambiente registrada en algunos meses en la localidad.

Según esta investigación, el buen uso de la inclinación permite coleccionar una mayor cantidad de energía en los meses donde es más necesitada, este concepto ya es bastante utilizado en el campo de la energía solar donde mejoran la eficiencia de la absorción del panel en los meses de invierno.

Los resultados experimentales demostraron que mediante la simulación de los datos históricos solares en la ciudad de Belo Horizonte, enero se destaca de los otros meses del año porque en ese mes no es necesario utilizar un mecanismo de apoyo al colector, ya que con el aprovechamiento de la energía alternativa se consigue una temperatura superior a 45°C.

La temperatura alcanzada por el agua en los meses de febrero, marzo, abril, mayo y septiembre podría ser considerada como una temperatura de confort humano, concluyendo que la energía solar es un tipo de energía limpia que debería tener una mayor explotación.

REFERENCIAS

1. Ibrahim, O. et al. Review of water-heating systems: General selection approach based on energy and environmental aspects. *Building and Environment*, vol. 72, p. 259. 2014.
2. Levine, M. et al. Residential and commercial buildings. In: Cambridge University Press, C., United Kingdom and New York, NY, USA. (Ed.). *Climate Change 2007: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. 2007.
3. ADEME. Energy efficiency trends and policies in the household & tertiary sectors in the EU 27. *Agence de l'Environnement et la Maitrise de l'Energie*, the ODYSSEE/MURE project. 2009.
4. Dos Santos, M. J. et al. Solar heating systems evaluation in low-income households. *XXI SNPTEE National Seminar on Production and Electricity Transmission*. Florianópolis – SC. Brazil. 2011.
5. Zhou, N. et al. Energy use in China: sectoral trends and future outlook. *Lawrence Berkeley National Laboratory*. 2008.

6. Sandoval, O. R. et al. Comparison experimental between a conventional and a solar evaporator of a heat pump supporting a solar collector. *V Brazilian Congress of Solar Energy*. Recife - PE, Brazil. In Portuguese. 2014.
7. SUNDATA. 2015. (<http://www.cresesb.cepel.br>) Visitado 17/08/15.
8. SONDA. 2015. (<http://sonda.ccst.inpe.br/>) Visitado 17/08/15.
9. Cooper, P. I. The absorption of radiation in solar stills. *Solar Energy*, v. 12, n. 3, p. 333-346. 1969.
10. Sandoval, O. R. Development of a solar collector simulator for reproducing the operating conditions of a heat pump for domestic water heating. *Master's thesis*. Postgraduate Program of Mechanical Engineering, Federal University of Minas Gerais, Belo Horizonte - MG, Brazil. In Portuguese. 2015.
11. Duffie, J. A. y Beckman, W. A. Solar engineering of thermal processes. John Wiley & Sons. 2013.
12. Liu, B. Y. H. y Jordan, R. C. The interrelationship and characteristic distribution of direct, diffuse and total solar radiation. *Solar Energy*, v. 4, n. 3, p. 1-19. 1960.
13. Erbs, D. G., Klein, S. A. y Duffie, J. A. Estimation of the diffuse radiation fraction for hourly, daily and monthly-average global radiation. *Solar Energy*, v. 28, n. 4, p. 293-302. 1982.
14. Siegel, R. y Howell, J. R. Thermal Radiation Heat Transfer. 4nd. New York: CRC press. 2002.
15. Pettit, R. B. y Sowell, R. R. Solar absorptance and emittance properties of several solar coatings. *J Vac Sci Technol*, v. 13, n. 2, p. 596-602. 1976.
16. Tabor, H., Bull. Radiation, convection and conduction coefficients in solar collectors. *Solar Energy*, v. 3, n. Res. Council Israel 6C (3): 155-176., p. 64-64. 1959.
17. LABSOL. Laboratorio de energía solar RADIASOL2. Universidad Federal de Rio Grande del Sur. Porto Alegre - RS - Brasil: LABSOL: <http://www.solar.ufrgs.br/>. 2014
18. CEMIG. Atlas Solarimétrico de Minas Gerais. Gobierno de Minas & ANEEL. 2011.
19. CENSOLAR. Valores Medios de Irradiación Solar Sobre Suelo Horizontal. Sevilla. 1993.
20. Rajaseenivasan, T., Raja, P. y Srithar, K. An experimental investigation on a solar still with an integrated flat plate collector. *Desalination*, v. 347, p. 131-137. ISSN 0011-9164. 2014.

UNIDADES Y NOMENCLATURA

	absorbencia o poder de absorber	N	número de coberturas de vidrio, número de horas
	declinación [°]	P	potencia, perímetro [W o m]
	inclinación [°]	Q	Flujo de calor [W]
	emitancia [W m ⁻² m ⁻¹]	r	índice de reflexión
	ángulo, ángulo entre la superficie normal y la radiación incidente [°]	R	resistencia []
	reflectancia	R _B	Flujo de radiación directa sobre el plano inclinado
	transmitancia	S	Radiación solar absorbida por unidad de área [MJ m ⁻²]
	latitud [°]	t	Tiempo, espesura [s, m]
	ángulo horario [°]	T	Temperatura [K]
A	área, altitud [m ² ou m]	U _b	Pérdidas de energía en la base del colector [W]
C _p	calor específico [kJkg ⁻¹ K ⁻¹]	U _e	Pérdidas de energía en la lateral del colector [W]
e	poder emisivo [W m ⁻²]	U _L	Pérdidas totales de energía en el colector [W]
FR solar	factor de remoción de calor del colector	UT	Pérdidas de energía en la superficie superior del colector [W]
f	factor de modulación	V	Tensión eléctrica [V]
G _{sc}	constante solar [W m ⁻²]	x	longitud [m]
g	constante gravitacional [m s ⁻²]	Z	Variable del programa computacional
H	irradiación diaria [MJ m ⁻²]		
hw	coeficiente de transferencia de calor para el viento [W m ⁻² K]		
I	radiación horaria [MJ m ⁻²]		
IR	índice de refracción		
K	coeficiente de extinción [m ⁻¹]		
k	conductividad térmica [Wm ⁻² K ⁻¹]		
KT o kt	índice horario de cielo claro		
L	longitud [m]		
ṁ	flujo másico [kg s ⁻¹]		
n	día del año		