

Influencia de los materiales cerámicos en colectores solares de placa plana para precalentamiento de agua en procesos agroindustriales

Leonardo Alonso,^{1*} Mario Bernal,² Gabriel Camargo²

¹Universidad de los Llanos, Villavicencio, Colombia.

²Universidad Libre de Colombia, Bogotá, Colombia.

*Autor para correspondencia: lalonso@unillanos.edu.co

RESUMEN

El uso de materiales cerámicos en colectores para uso de energía solar térmica se ha incrementado últimamente. Se determinaron las diferencias presentadas entre diferentes cerámicas fabricadas a 3626 y 5222 psi instaladas en dos colectores de área efectiva de 0,36 m². El objetivo este tipo de colectores es lograr eficiencia energética para empresas agroindustriales que usan agua a temperatura cercana a su punto de ebullición a presión atmosférica. El colector está constituido por una matriz de cerámica que cumple la función de absorber la energía solar y un contenedor de acero inoxidable aislado donde el agua es almacenada. Los experimentos fueron a nivel de laboratorio a 400, 500, y 750 W/m² en un simulador de radiación solar. Un completo análisis desde la perspectiva de la segunda y la primera ley de la termodinámica fue hecho para calcular la eficiencia del colector solar. Los resultados mostraron que la eficiencia global del colector solar de matriz cerámica fue de 59 % a 400 W/m² con cerámica compactada a 5222 psi.

Palabras clave: Colector solar integrado, análisis energético y exergético, matriz cerámica, agroindustria.

Editora: Pataquiva-Mateus, A.Y.

Citation: Alonso, L., Bernal, M. & Camargo, G. (2015). Influencia de los materiales cerámicos en colectores solares de placa plana para precalentamiento de agua en procesos agroindustriales. *Revista Mutis 5(2); págs 55-66.*

Received: September 23, 2015. **Accepted:** December 3, 2015. **Published on line:** December 31, 2015.

Copyright: ©2015 Alonso *et al.* This is an open-access article, which permits unrestricted use, distributions and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

Competing Interests: The authors have no conflict of interest.

Influence of ceramic materials on solar storage collector used to preheat water in agro-industrial processes

ABSTRACT

The uses of ceramic materials in solar collectors for passive application of solar energy have been increasing lately. This paper deals with an experimental study of an inexpensive solar storage collector to provide hot water. The purpose of using this type of collector is to achieve energy efficiency for agribusinesses that need water at temperatures near its boiling point at atmospheric pressure. The solar collector is

constituted by two different ceramic absorber matrix manufactured at 3626 and 5222 psi pressing pressures, which perform the function of absorb and store the solar thermal energy. The second element in the collector is an isolated stainless steel container where water is stored. The experiments were carried out within an indoor environment at 400, 500 and 750 W/m² in a solar radiation simulator. An energy and exergy analysis were done to calculate efficiency of the solar collectors. The results show that the overall efficiency of the solar collector is 59% at the lowest radiation and ceramic compacted at 5222 psi.

Keywords: Ceramic matrix, Energy and exergy studies, Integrated Solar storage collector, agribusiness.

INTRODUCCIÓN

Es notoria a nivel mundial la tendencia en la utilización de energías alternativas a cambio de los combustibles fósiles. En primer lugar, porque los combustibles fósiles como el gas y el petróleo, son recursos que a corto plazo no pueden ser renovados y la demanda de energía a nivel mundial está en constante crecimiento. Dentro de este consumo, los edificios consumen un tercio del total de la energía ofrecida en países desarrollados y un cuarto en países en desarrollo (Pinel, Cruickshank, Beausoleil-Morrison, and Wills, 2011).

El calentamiento del agua con energía proveniente del sol permite un importante ahorro de energía y ayuda a cuidar el medio ambiente. Una de las posibilidades de aprovechamiento alternativo de la energía son los captadores solares para precalentamiento de agua en industrias. El calentamiento solar a través de colectores solares planos logra elevar la temperatura del agua a temperaturas superiores a 75 °C, que es la necesaria para pasteurizaciones lentas, por lo que se puede aplicar en procesos industriales que necesitan agua a dichas temperaturas o como un sistema de precalentamiento para procesos posteriores de evaporación, disminuyendo así los gastos energéticos.

En este análisis experimental se promueve como componente de innovación el uso de materiales cerámicos en el aprovechamiento energético, a diferencia de los sistemas tradicionales que capturan la energía y la entregan al agua; aquí se pretende usar la ma-

triz cerámica como componente que permite capturar, conducir y aislar la energía al interior de la matriz donde se ubica el contenedor de agua. Bougiatioti y colaborador plantean que es necesario utilizar los edificios y especialmente sus techos en todos los centros urbanos, ya que representan extensas superficies en las que los sistemas activos solares pueden estar integrados (Bougiatioti & Michael, 2015).

Xiao *et al.* Resaltan el potencial arquitectónico de este tipo de colectores y los bajos costos de la cerámica, la expresión “bajo costo” no solo significa la baja inversión en materiales para coleccionar la energía solar, sino también una vida útil más larga (Sun, Sun, Li, Wang, He, & Wang, 2014).

Zhang y colaboradores reportan un importante incremento en los estudios relacionados con fachadas solares térmicas activas, denominadas ASTF por sus siglas en inglés (Zhang *et al.*, 2015). Dichos estudios dejan preguntas de investigación que tienen que ver con: diseño, dimensionamiento y optimización de la estructura global de los colectores y del diseño de los componentes de manera individual; métodos de medición experimental; ahorro de energía, y evaluación del desempeño económico y ambiental.

Colombia tiene ventajas geográficas por estar en el trópico, para la implementación de este tipo de equipos de bajo costo, ya que tiene una disponibilidad promedio multianual de energía solar de 1.643 kWh/m²/año (UPME, Ideam, 2005) y una demanda mensual de energía eléctrica que ha aumentado considerablemente en las últimas décadas, siendo un promedio de 5.166,89 GWh, con una capacidad real de generación de 5.310 GWh (UPME, 2005). Además, en el país existen leyes que fomentan el uso racional y eficiente de la energía dentro de las que se destacan la Ley 697 de 2001 (Ley URE, uso racional de la energía) el decreto 3683 de 2003 y la Ley 1715 de 2014 que tiene por objeto promover el desarrollo y la utilización de las fuentes no convencionales de energía; lo anterior genera un régimen legal para el desarrollo de estas tecnologías en Colombia.

El objetivo de este trabajo fue construir dos prototipos de colectores integrados en los que se utilizaron dos tipos de cerámica, compactados a 3626 y 5222 psi. Con los equipos construidos y funcionales, se adaptaron sistemas de adquisición de datos. Los datos obtenidos fueron validados mediante análisis estadísticos

y posteriormente, después de comprobados, los resultados se analizaron mediante los programas Design Expert y Excel. Con los resultados del análisis exergético se pudo conocer qué aspectos del diseño y del proceso son susceptibles de mejorar, con lo que se puede aumentar aún más la eficiencia energética de la innovación propuesta.

Se compararon las eficiencias de los dos colectores con las de calentadores solares de agua convencionales, que normalmente cuentan con un captador metálico y un tanque de almacenamiento.

Nomenclatura				
Dimensión	Descripción	Unidades	Sufijo o letra griega	Descripción
Ac	Área de la superficie transparente frontal del colector	(m ²)	η	Eficiencia térmica del colector
Ma	Masa de agua en el tanque (fluido de transferencia)	(Kg)	η_0	Eficiencia instantánea
Mc	Masa del colector (cerámica)	(Kg)	η_{II}	Eficiencia exergética
Tf	Hora de finalización	(H)	$\tau\alpha$	Eficiencia instantánea
Ti	Hora de iniciación	(H)	α_0	Considera efectos del umbral
FR	Factor de transferencia de calor		α_1	Capacidad de la cerámica para captar y convertir la radiación solar
Tw	Temperatura del agua	(K, °C)	α_2	Tiene que ver con las pérdidas de calor del sistema durante el día
TA	Temperatura del absorbedor	(K, °C)	QA	Radiación solar absorbida
Te	Temperatura del ambiente	(K, °C)	Qs	Calor acumulado
Tm	Temperatura promedio del intervalo ΔT	(K, °C)	Qu	Calor útil
Ts	Temperatura aparente del sol	(K, °C)	Qp	Calor perdido
T0	Temperatura de salida	(K, °C)	UL	Coefficiente de pérdida de calor
Tin	Temperatura de entrada	(K, °C)	Exe	Exergía de entrada
ΔT	Diferencia de temperatura entre un tiempo inicial y un tiempo final	(K, °C)	Exs	Exergía almacenada
G	Irradiancia solar global sobre el plano del colector	(W/m ²)	ExD	Exergía destruida

ANÁLISIS ENERGÉTICO Y EXERGÉTICO

Se pretende analizar desde la primera y la segunda ley de la termodinámica los datos obtenidos en los ensayos experimentales usando el método propuesto por Hazami y colaboradores, pero con la modificación de material cerámico en lugar de concreto (Hazami, Kooli, Lazâar, Farhat, & Belghith, 2010).

La primera ley ha sido ampliamente usada en prácticas de ingeniería y es la base para los balances de

energía que son aún más comunes en análisis de rendimiento.

En este análisis energético, para evaluar el Colector Solar Integrado de Matriz Cerámica (CSIMC), es esencial conocer el grado con el que la radiación solar incidente es transformada en calor y transferida al fluido caloportador, es decir, la eficiencia energética del colector. El modelo teórico utilizado para el estudio del CSIMC consiste en un balance energético en el colector cuyas variables pueden observarse en la figura 1.

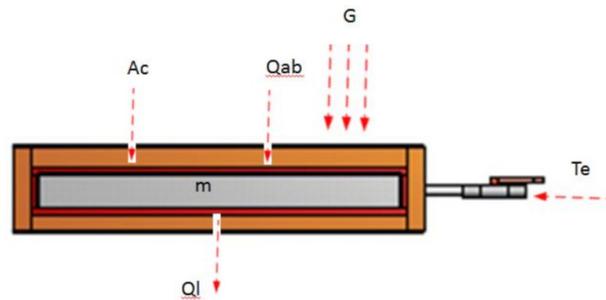


Figura 1. Esquema de las variables analizadas en un CSIMC.

Análisis energético

En el balance energético se tuvieron en cuenta la temperatura inicial y final del agua, teniendo presente la temperatura del medio ambiente. Cabe anotar que el proceso se manejó en un sistema totalmente estacionario, sin flujo del fluido caloportador.

$$[Q \text{ absorbida}] = [Q \text{ acumulada}] + [Q \text{ utilizable}] + [Q \text{ perdida}] \quad [Q \text{ absorbida}] = [Q \text{ acumulada}] + [Q \text{ utilizable}] - [Q \text{ perdida}] \quad (1)$$

$$[Q \text{ absorbida}] = Q_A(W) = \eta_0 G A_c \quad (2)$$

En la ecuación (2), η_0 es la fracción de la radiación solar absorbida por la matriz cerámica, G es la radiación solar expresada en W/m^2 y A_c es el área del colector expresada en m^2 .

$$[Q \text{ acumulada}] = Q_s(W) = M_c C_{pc} \frac{dT_A}{dt}; \quad (3)$$

En la ecuación (3), se multiplica la masa de la matriz por el calor específico de la cerámica que es la que lo acumula, expresado en kJ/kgK , por la variación de la temperatura del absorbente con respecto al tiempo.

$$[Q \text{ utilizable}] = Q_u(W) = \alpha_0 + \alpha_1 G + \alpha_2 (T_{e,pr} - T_w) \quad (4)$$

Esta expresión representa el incremento de la energía calorífica utilizable de la recolectada por el CSIMC *versus* la radiación solar diaria. α_1 es una característica propia del material utilizado y representa la capacidad de la cerámica para captar y convertir la radiación solar. Por otro lado, α_2 tiene que ver con las pérdidas de calor del sistema durante el día $T_{e,pr}$ (es la temperatura promedio del medio ambiente y T_w es la temperatura del agua en un instante determinado), y α_0 considera efectos del umbral.

$$[Q \text{ perdida}] = Q_p(W) = U_c A_c (T_{A,pr} - T_e) \quad [Q \text{ perdida}] = Q_p(W) = U_c A_c (T_{A,pr} - T_e) \quad (5)$$

El término U_c es el coeficiente de pérdida de calor, que se puede hallar teóricamente con la ecuación (6) o gráficamente cuando se halla la eficiencia instantánea y dentro de este coeficiente ya están incluidas las pérdidas térmicas por la cubierta superior, los laterales y la parte inferior del colector solar.

El coeficiente U_c es calculado teóricamente por:

$$U_c = \frac{M_c C_{pc}}{A_c \Delta t} \ln \frac{T_i - T_{e,pr}}{T_f - T_{A,pr}} \quad (6)$$

La eficiencia, basada en la primera ley de la termodinámica, para un sistema como el que se está analizando, que es estacionario es definida como el cociente entre la energía acumulada y la radiación solar incidente en el área del colector.

$$\eta_1 = \frac{Q_s}{GA_c} \quad (7)$$

Eficiencia instantánea

Usando el método propuesto por la norma técnica colombiana 4368 de eficiencia energética para sistemas de calentamiento de agua con energía solar y componentes, la eficiencia instantánea (estado cuasi estable) en un colector solar, se define como la relación entre la potencia útil promedio extraída del colector y el flujo incidente promedio de la radiación solar en la apertura bajo condiciones específicas en estado cuasi estable, durante un período de tiempo especificado (5 a 10 min). Como las condiciones de radiación de los experimentos fueron cuasi estables se aplicó la eficiencia instantánea durante 4 horas.

El estado cuasi estable describe el estado de las pruebas del colector solar, cuando la tasa de flujo y la temperatura del fluido de transferencia de calor que entran al colector son substancialmente constantes y las variaciones en la temperatura de salida del fluido de transferencia de calor son debidas solamente a pequeñas variaciones del flujo incidente de la radiación solar, en la apertura del colector.

El factor de conversión η_0 o coeficiente tau (τ), alfa (α) efectivo de un colector es la eficiencia instantánea del colector cuando la temperatura media del fluido es igual a la temperatura del aire ambiente bajo condiciones específicas en estado cuasi estable (Icontec, 1997).

La definición de la eficiencia instantánea η_0 es:

$$\dot{q}_0 = Q_u / G \cdot A_c = m \cdot c_p \cdot (T_m - T_e) / G \cdot A_c = \text{energía útil} / \text{energía incidente} \quad (8)$$

Los parámetros, masa (m), calor específico (C_p) del colector se deben conocer, mientras que la temperatura promedio del intervalo ΔT (T_m), la temperatura ambiente (T_e), el área del colector (A_c) y la radiación

sola (G) se deben medir experimentalmente. La energía útil (Q_u) también se puede definir como la diferencia entre la energía absorbida (Q_a) y las pérdidas del colector (Q_p).

Si toda la radiación solar absorbida y convertida en calor es transferida al líquido (factor de transferencia de calor $FR = 1$), se tiene que:

$$Q_u = Q_a - Q_p = \tau \cdot \alpha \cdot G \cdot A_c - U_p \cdot A_c \cdot (T_m - T_e) \quad (9)$$

Al dividir por ($G \cdot A_c$), obtenemos la ecuación:

$$\eta_0 = \tau \cdot \alpha = (T_m - T_e) / G \quad (10)$$

Que se conoce como la ecuación característica de la eficiencia instantánea del colector de placa plana y se puede graficar en forma de una recta en un gráfico $\eta_0 = (T_m - T_e) / G$.

En la interpretación matemática de esta recta, $\tau \cdot \alpha$ es la intersección con la ordenada η_0 y F_R mientras que U_L es la pendiente de la curva:

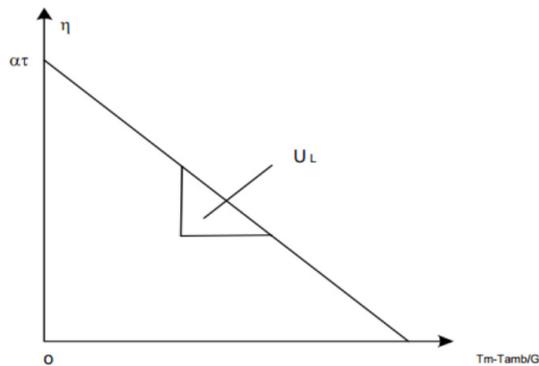


Figura 2. Curva característica de la eficiencia instantánea de un colector solar de placa plana en función a las condiciones operativas T_m , T_e y G .

Análisis exergético

La segunda ley involucra la reversibilidad o irreversibilidad de los procesos, esta ley afirma que además de

cantidad, los procesos termodinámicos también tienen calidad, es decir, la cantidad de energía que se puede extraer como trabajo útil, también llamada exergía o energía disponible. Los datos exergéticos son más completos y adaptados a la realidad ya que establecen los límites teóricos de operaciones ideales.

Los análisis convencionales de energía basados únicamente en la primera ley de la termodinámica ignoran completamente la calidad de la energía y no toman en cuenta las temperaturas en las que el calor sensible es almacenado. Para almacenar energía a las temperaturas más altas posibles y con el mínimo de pérdidas de calor es necesario hacer un análisis basado en la primera y segunda ley de la termodinámica, por eso se realizó también este análisis para tener un diagnóstico claro del comportamiento de los dos sistemas de captación solar y la degradación de la calidad de la energía durante el proceso.

En forma general el balance de exergía se expresa como:

$$\sum \dot{Ex}_e = \sum \dot{Ex}_{\text{aim}} + \sum \dot{Ex}_{\text{salida}} + \sum \dot{Ex}_{\text{perdida}} + \sum \dot{Ex}_{\text{destruida}} \quad (11)$$

Por el tipo de sistema utilizado en el presente proyecto se considera que por no presentarse flujo durante la determinación experimental la exergía de salida es cero.

El total de la velocidad de exergía que entra REx_e incluye:

La velocidad de exergía entrante en el flujo de agua según está dada como (Hazami *et al*, 2010):

$$\sum \dot{Ex}_e(\text{agua}) = mC_p(T_e - T_e - T_e \ln \frac{T_e}{T_A}) + \frac{m\Delta P_e}{\rho} \quad (12)$$

Que en el caso del presente proyecto es cero ya que no hay flujo de entrada ni de salida porque el sistema es cerrado.

La velocidad de exergía en la radiación solar absorbida considerando el rendimiento óptico asumiendo al sol como un recurso térmico infinito según Hazami y colaboradores, es dada por:

$$\sum \dot{Ex}_e(\text{absorbida}) = \eta_0 GA_c (1 - \frac{T_e}{T_s}) \quad (13)$$

Donde T_s representa la temperatura aparente del sol y es el 75 % de la temperatura del cuerpo negro del sol (Hazami *et al*, 2010).

La velocidad de exergía almacenada está dada por la exergía almacenada en la cerámica y el agua ya que el sistema no tiene flujo de entrada/salida, por lo tanto, el agua también cumple la función de almacenamiento:

$$\sum \dot{Ex}_s = M_{\text{arcilla}} C_{p,\text{arcilla}} (T_{A,t_2} - T_{A,t_1}) (1 - \frac{T_{\text{entorno}}}{T_A}) \quad (14)$$

$$\sum \dot{Ex}_s = M_{\text{agua}} C_{p,\text{agua}} (T_{w,t_2} - T_{w,t_1}) (1 - \frac{T_{\text{entorno}}}{T_w}) \quad (15)$$

La velocidad de exergía de salida en el flujo de agua que es igual a cero debido a la ausencia de flujo de salida:

$$\sum \dot{Ex}_0 = mC_p(T_0 - T_a - T_a \ln \frac{T_0}{T_e}) + \frac{m\Delta P_0}{\rho} \tag{16}$$

La velocidad de exergía perdida por el calor desde el captador hacia el ambiente se tiene como:

$$\sum \dot{Ex}_L = U_L A_C (T_A - T_e) (1 - \frac{T_e}{T_A}) \tag{17}$$

Por otro lado, la velocidad de destrucción de energía incluye dos términos:

El primero es causado por la diferencia de temperatura entre la cerámica y el sol.

$$\sum \dot{Ex}_D (\Delta T_{AS}) = -\eta_0 G A_c T_e (\frac{1}{T_A} - \frac{1}{T_s}) \tag{18}$$

Y el segundo es causado por la diferencia de temperatura entre la superficie de la cerámica y el fluido (agua):

$$\sum \dot{Ex}_D (\Delta T_{Aw}) = -mC_p T_e (\ln \frac{T_0}{T_{in}} - \frac{T_0 - T_{in}}{T_A}) \tag{19}$$

La eficiencia exergética del colector solar define el incremento de la exergía del fluido sobre la exergía de la primera radiación por la fuente de radiación. Considerando la definición de eficiencia exergética, la ecuación de la segunda ley de la eficiencia del CSPP (está dada por:

$$\eta_{II} = 1 - \frac{\sum \dot{Ex}_D}{\sum \dot{Ex}_e \text{ (absorbida)}} \tag{20}$$

EXPERIMENTACIÓN Y REGISTRO DE DATOS

Se toma como base para la construcción de los prototipos, el tamaño comercial de la cerámica de pasta blanca. Ya que la radiación puede ser expresada en W/m², los resultados obtenidos podrán ser extrapolados a diferentes dimensiones de colectores. En el mercado se encuentran cerámicos de pasta roja y porcelanatos de pasta blanca de 15 cm x 15 cm a 60 cm x 60 cm y con base en el mayor tamaño de la cerámica comercial, se construyó una caja en acero inoxidable de 2 mm de espesor, con una capa de poliuretano interna de 25 mm a los lados, y una pestaña para la sujeción del vidrio también de 25 mm, lo que ofrece un área efectiva de captación de 557 mm x 557 mm = 0,3102 m², como se describe en la figura 3.

El espesor de cada uno de los materiales utilizados fue, de abajo para arriba, 2 mm de lámina metálica de acero inoxidable, 40 mm de aislante, 40 mm de tanque de almacenamiento, 9 mm de cerámica, 29 mm de espacio vacío y 2 mm de vidrio.

El diseño se basó en disminuir al máximo las pérdidas de energía y maximizar la absorción de la radiación solar, por lo que para los aislantes se tuvo en cuenta la norma NTC 2774 (Icontec, 1990), para los restantes materiales las normas NTC 2461 (Icontec, 2004) y NTC 4368 (Icontec, 1997).

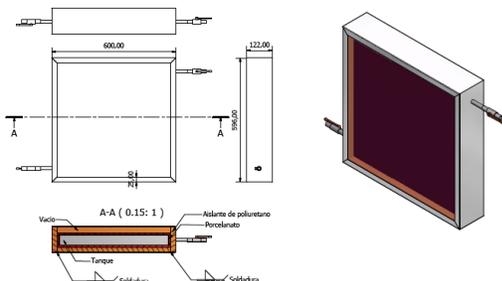


Figura 3. Plano general del calentador, diseño de los autores.



Figura 4. Colectores terminados.

Inicialmente el montaje se llena con agua (12,25 l) y se colocan los colectores simultáneamente en la cámara, paralelos al panel de radiación y distantes de este 50 cm.



Figura 5. Panel con los bombillos que simulan la radiación solar.

Se instalan los termopares en ambos colectores, tomando simultáneamente los datos durante toda la prueba experimental. Se procede a encender el panel de radiación (calibrado a la radiación deseada previamente por el equipo datalogger LI-1400) con todas las

condiciones dadas iniciales (para tres experimentos de 400 W/m^2 , 500 W/m^2 y 750 W/m^2). Se instala el sistema de control y adquisición de temperaturas y se procede el encendido del panel de radiación durante 2 horas; luego de transcurrido ese tiempo, se procede a apagar el panel de radiación, dejando enfriar al natural, tomando datos continuamente hasta completar 2 a 3 horas más.

Este mismo procedimiento se hace para cada experimento comenzando desde las condiciones iniciales.

MATERIALES

Cubierta: se utilizó vidrio común de 2 mm de espesor.

Placa de absorción: para el presente estudio se escogieron dos tipos de materiales cerámicos denominados gres rojo (3626 psi) y gres porcelánico (5222 psi), productos fabricados por Colcerámica S. A. Corona, que son ampliamente utilizados en el sector de la construcción como acabados en pisos interiores o exteriores para fachadas de edificios.

Las condiciones de producción se muestran en la tabla 1.

Tabla 1 Condiciones de producción de las dos matrices cerámicas.

Material	Presión de prensado	Espesor	T° cocción	Peso	Porosidad
	psi	m	°C	kg/m ²	%
Gres rojo	3626	0,078	1160	17	8
Gres porcelánico	5222	0,095	1120	20,5	0,5

Para efectos de analizar el comportamiento térmico obtenido en los experimentos se han determinado mediante la técnica de fluorescencia de rayos X, las proporciones de los principales óxidos. Estudios realizados por laboratorios especializados en materiales se encuentran relacionados en las tablas 2 y 3.

Es de esperar desde el punto de vista de la transferencia de calor, que el material con mayor contenido de óxidos de hierro sea más conductor, de otro lado una menor porosidad indica que el material debe ser más denso y por lo tanto un comportamiento de un sólido verdadero, desde el punto de vista energético la mayor porosidad debe reflejar mayor eficiencia en la conducción del calor, de esta manera el gres porce-

lánico tiene una mayor conductividad térmica comparada con el gres rojo.

La mayor densidad del material gres porcelánico se obtiene en el proceso de prensado, como lo observado en la tabla de propiedades de producción, la presión de prensado es de 5222 psi mientras que en gres rojo es de 3636 psi.

Aislante térmico: el poliuretano es un material fácil de conseguir, se encuentra comercialmente como spray expandible, como químicos básicos para ser mezclados o en láminas preformadas. Para este proyecto se escogió el poliuretano, por su baja conductividad térmica y su facilidad de aplicación en los espacios laterales y el espacio posterior de la caja.

Tabla 2. Proporción de óxidos en la cerámica de pasta blanca fabricada a 5222 psi.

Composición química cerámica blanca			
Referencia	2060/06	Fecha de recepción	27/07/2006
Identificación de material	Muestra 148-06 UFSCAR		
Determinaciones	%		
Humedad	0,7		
P.F.:	5,14		
SiO ₂	69,19		
Al ₂ O ₃	15,59		
Fe ₂ O ₃	5,91		
TiO ₂	0,86		
CaO	0,33		
MgO	0,86		
K ₂ O	1,59		
Na ₂ O	0,19		
P ₂ O ₅	0,15		
BaO	0,07		

Tabla 3. Proporción de óxidos en el gres rojo fabricado a 3626 psi.

Composición química gres rojo	%
SiO ₂	71,6
Al ₂ O ₃	18,4
Fe ₂ O ₃	0,53
TiO ₂	0,87
CaO	1,71
MgO	0,85
Na ₂ O	1,97
K ₂ O	3,33
P ₂ O ₅	0,03
SO ₃	0,07
MnO	0,007
PPI de 110°C a 1000°C	0,3

Caja, uniones y selladores: para la construcción de la caja se utilizó lamina de acero inoxidable 304 calibre 18, y válvula de ½ pulgada para la entrada y salida del agua al prototipo.

Tanque de almacenamiento: fue construido también en lámina de acero inoxidable 304 calibre 18 con uniones de soldadura.

Todas las mediciones de los dos tipos de cerámicas realizadas diariamente parten desde la temperatura ambiente de la cámara de prueba (17 °C) y con una temperatura de agua interna de 16 °C en el colector cerámico.

El tiempo total de la práctica está en 5 horas, solo variando entre experimento diario la radiación emitida por el equipo panel lumínico del laboratorio de Plantas Térmicas y Energías renovables de la Universidad Nacional de Colombia sede Bogotá.

El panel de radiación se enciende durante 2 horas iniciales y luego se apaga. Se siguen tomando las me-

diciones hasta que se alcanzan las condiciones iniciales o hasta que haya transcurrido más del tiempo de prendido del panel (3 horas).

RESULTADOS

Eficiencia energética

Específicamente en el estudio que se está realizando, los datos registrados como calor acumulado (Q_s) fueron analizados desde el punto en el que la temperatura del agua supera la temperatura del ambiente, y los datos de radiación solar absorbida (Q_A), o calor absorbido si se registran desde el tiempo cero, hasta que se apaga la fuente de radiación (figura 6).

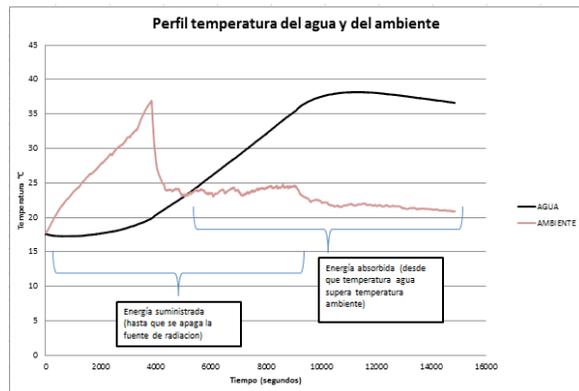


Figura 6. Perfil de temperaturas del agua y del ambiente.

Las eficiencias energéticas obtenidas se resumen en la tabla 4.

Tabla 4. Eficiencias energéticas.

RESUMEN EFICIENCIAS ENERGÉTICAS		
	W	%
Blanca	400	59
	500	34
	750	13
Roja	400	41
	500	26
	750	15

Analizando las eficiencias obtenidas, y teniendo en cuenta que al tener dos prototipos, en los que la única diferencia es el material del elemento captador y que la toma de los datos se realizó simultáneamente,

se resaltan los resultados de la cerámica pasta blanca fabricada a 5222 psi.

Eficiencia instantánea

Según lo estipulado por la norma técnica colombiana de eficiencia energética: sistemas de calentamiento de agua con energía solar y componentes NTC 4368, se tomaron los datos de los experimentos únicamente en el lapso de 5,58 minutos en intervalos de 55 segundos.

Se hallaron las eficiencias instantáneas en cada uno de esos momentos especificados, mediante la aplicación de la ecuación (10) en la que se determina la relación $\tau \cdot \alpha$. A continuación se grafica la eficiencia Vs $\tau \cdot \alpha$ (figura 7).

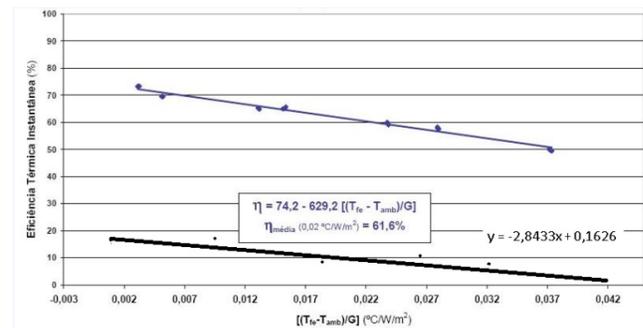


Figura 7. Eficiencia instantánea del colector solar de placa plana comparado con el colector solar de la Pontificia Universidad Católica de Minas Gerais, de la compañía multinacional TRANSSSEN.

Con base en la figura 7 se deduce la siguiente ecuación de la recta:

$$y = -2.8433X + 0.1626 \quad (20)$$

Así, al comparar término a término, se identifican los siguientes valores:

$$\eta_0 = \tau\alpha = 0.1626 \quad (21)$$

Que es el punto de corte de la curva y representa la eficiencia instantánea, por lo tanto la eficiencia instantánea del equipo del experimento “cerámica blanca a 400 w” es 16,26 % y más adelante será considerada como la eficiencia óptica; y el término

$$F_R U_L = -2.8433 \quad (22)$$

Donde U_L es el coeficiente global de pérdidas de calor y será determinante para ser utilizado posteriormente en el análisis exergético.

El mismo procedimiento fue aplicado a los 5 experimentos y se encontraron las eficiencias instantáneas

de cada uno. Las cuales son relacionadas en la tabla 5.

Tabla 5. Resultados de las eficiencias instantáneas y los coeficientes globales de pérdidas.

	Eficiencias instantáneas η_0				Coeficiente global de pérdidas de calor $F_R U_L$			
	400 W/m ²	500 W/m ²	750 W/m ²	TRANSEN	400 W/m ²	500 W/m ²	750 W/m ²	TRANSEN
CERÁ MICA								
Blanca %	16,2	NA	1,1	61,6	-2,8	NA	-10,7	-6,2
Roja %	14	1,5	1		-4,1	-0,2	-0,01	

Se puede observar que los coeficientes globales de pérdidas de calor son negativos ya que corresponden a la pendiente de la recta de la gráfica de regresión lineal donde se encontró la eficiencia instantánea. Con el propósito de hacer el comparativo energético de los resultados de las eficiencias térmicas instantáneas (tabla 5) se utilizó como base la eficiencia instantánea de un colector analizado en la Pontificia Universidad Católica de Minas Gerais, de la compañía multinacional TRANSEN.

Eficiencia exergética

Se utilizaron las ecuaciones desde la (11) a la (20) y se pudo determinar la exergía absorbida por el captador, por el material cerámico, almacenada por el agua, la que se perdió hacia el ambiente, y la exergía destruida, como insumos para llegar a obtener la eficiencia exergética de cada uno de los procesos. La tabla 6 resume las eficiencias de cada una de los ensayos.

Tabla 6. Resultado de las eficiencias exergéticas.

RESUMEN EFICIENCIAS EXERGÉTICAS		
	W	%
Blanca	400	18,03
	500	*
	750	12,04
Roja	400	21,32
	500	1,5
	750	1,23

* Debido a un corte en el fluido eléctrico que generó errores en la toma de datos de la eficiencia en la cerámica blanca a 500 W, esta no fue tenida en cuenta.

CONCLUSIONES

Los prototipos diseñados y construidos para este proyecto, cumplen con la función de calentar agua, a temperaturas suficientes para uso agroindustrial, sin necesidad de tanque de almacenamiento, como lo demuestra el incremento de la temperatura del agua que se evidencia en la figura 6 donde se constata el incremento de la temperatura del fluido después de que ha finalizado el proceso de radiación. Los resultados permiten aseverar que los valores de la eficiencia instantánea son menores que los reportados para el colector solar de placa plana comercial con el que se comparó el prototipo diseñado y construido. La eficiencia del proceso para las dos matrices disminuye al incrementarse el nivel de radiación. La cerámica blanca compactada en su fabricación a 5222 psi exhibe, en términos generales, una mayor eficiencia global que la roja compactada a 3626 psi. La eficiencia global más alta es la del sistema de cerámica blanca, que fue fabricada a una mayor presión (3636 psi), sobre todo bajo condiciones de radiación solar de 400 W. Según el análisis exergético, la exergía destruida es de un 53 % del de la exergía absorbida, lo que indica que los materiales de construcción (aislante y vidrio) de los prototipos deben ser mejorados. Los resultados de la eficiencia exergética muestran, en todos los casos, valores menores de los obtenidos para la eficiencia energética, indicando que el aprovechamiento real de la energía útil es bajo.

La exergía que se destruye entre el material cerámico y el agua, es superior a la exergía almacenada en el agua, este resultado muestra que existen inconvenientes en el diseño del contacto entre el material cerámico y el contenedor del agua.

RECOMENDACIONES

Una profundización mayor en el estudio de sistemas integrados como el CSIMC en Colombia ofrece posibilidades económicas de aprovechar la energía del sol en empresas agroindustriales. Se recomienda hacer un análisis energético con flujo de agua en el colector, así como realizar el mismo ensayo bajo las condiciones ambientales exteriores donde otras variables como el viento y la radiación de albedo podrían influir. Finalmente, se recomienda conducir ensayos de presión a los prototipos construidos.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al doctor en Ingeniería Fabio Emiro Sierra, profesor asociado de la Universidad Nacional de Colombia, director del grupo de investigación Mecanismos de Desarrollo Limpio y Gestión Energética GRIN, al profesor Gerardo Ardila Duarte quien validó estadísticamente los datos tomados para determinar la confiabilidad de los mismos, y a la Universidad Libre de Colombia por su apoyo financiero.

REFERENCIAS

- Bougiatioti, F., & Michael, A. (2015). The architectural integration of active solar systems. Building applications in the Eastern Mediterranean region. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 47, 966-982..
- Icontec. (1990). Sistemas de Calentamiento de Agua con Energía Solar y Componentes. Santafé de Bogotá D. C.: Icontec - NTC 2774.
- Icontec. (1997). Sistemas de Calentamiento de Agua con Energía Solar y Componentes. Santafé de Bogotá D. C.: Icontec - NTC 4368.
- Icontec. (2004). Colectores solares de placa plana para calentamiento de agua de consumo doméstico. Santafé de Bogotá D. C.: Icontec - NTC 2461.
- Hazami, M., Kooli, S., Lazâar, M., Farhat, A., & Belghith, A. (2010). Energetic and exergetic performances of an economical and available integrated solar storage collector based on concrete matrix. *Energy Conversion and Management*, 51(6), 1210-1218.
- Pinel, P., Cruickshank, C. A., Beausoleil-Morrison, I., & Wills, A. (2011). A review of available methods for seasonal storage of solar thermal energy in residential applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(7), 3341-3359.
- UPME, I. (2005). Atlas de radiación solar de Colombia. Bogotá D. C.: Unidad de Planeación Minero Energética, Ministerio de Minas y Energía.
- Sun, X. Y., Sun, X. D., Li, X. G., Wang, Z. Q., He, J., & Wang, B. S. (2014). Performance and building integration of all-ceramic solar collectors. *Energy and Buildings*, 75, 176-180.
- Zhang, X., Shen, J., Lu, Y., He, W., Xu, P., Zhao, X., ... & Dong, X. (2015). Active Solar Thermal Facades (ASTFs): From concept, application to research questions. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 50, 32-63.