

SISTEMAS SOLARES TERMOSIFÓNICOS Y SU APLICACIÓN EN LA ZONA ECUATORIAL

Celso Recalde

Escuela Superior Politécnica de Chimborazo – Ecuador. crecalde672000@yahoo.es.

Revisión por Jenny Orbe



imagen ilustrativa

RESUMEN

Se presenta una variedad de propuestas existentes en la bibliografía sobre modelación, optimización y pruebas para dispositivos solares tipo termosifón, considerando la posible aplicación en el diseño de dispositivos que se adecuen a la geofísica de la zona ecuatorial. La particular inclinación con que los rayos solares caen en la zona ecuatorial hace necesario el compilar un abundante marco teórico que se adecue a esta realidad. Aprovechar los avances actuales en sistemas solares termosifónicos pasivos, presentados principalmente en forma de metodologías varias para la obtención de: ángulo de inclinación óptimo, orientación del colector, diseño, construcción, predicción del comportamiento de los dispositivos, familiarizarse con las propuestas de pruebas de comportamiento de los dispositivos en captación y transferencia de energía en diversas aplicaciones, así como conocer el comportamiento de la convección libre en diversos casos, la modelización del efecto termosifón en tubos al vacío y en tubos de cobre con diversas características, dan los lineamientos a seguir para una propuesta innovadora de un dispositivo termosifón pasivo para la zona ecuatorial.

Palabras clave: Termosolar, termosifón, Ecuador, modelos, energía alternativa

SUMMARY

The paper presents existing proposals in the literature on modeling, optimization and Thermosiphon solar devices testing, considering the possible application in the design of devices that fit the equatorial geophysics. The angle that the sun's rays fall in the equatorial makes it necessary to build a theoretical framework that fits this reality. Harness advances of current Thermosiphon passive solar systems, present mainly in the form of several methodologies to obtain: optimum tilt angle, collector orientation, design, construction, performance prediction, as well as familiar with the behavioral testing of devices in collection and energy transfer in various applications. Know the behavior of free convection Thermosiphon effect modeling with vacuum tubes and copper tubes with different characteristics. Provides guidelines to follow for an innovative proposal regarding passive Thermosiphon device for equatorial.

Keywords: termosolar, termosiphon, Ecuador, models, alternative energy.

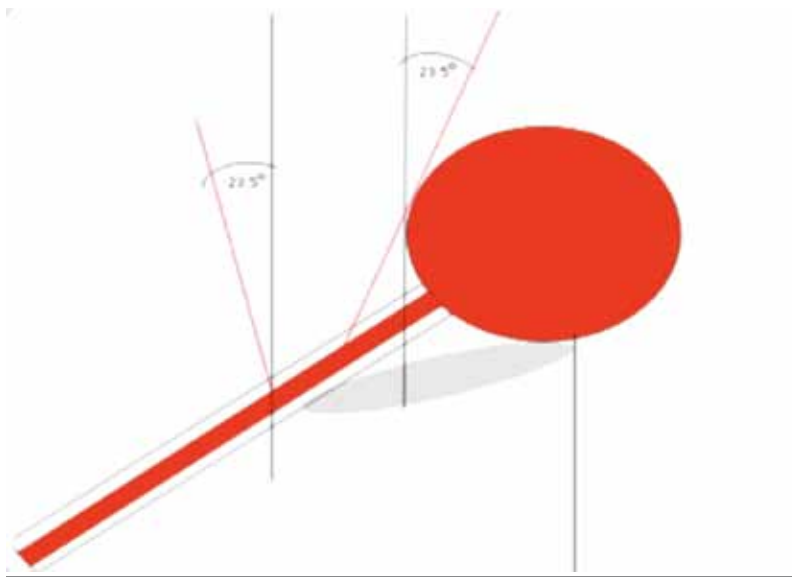


Figura 1. Muestra rango de oscilación rayos solares en Ecuador.

Justificación

La búsqueda e implementación de fuentes energéticas renovables a nivel global y regional se ha convertido en política del gobierno ecuatoriano (Plan Nacional de Desarrollo SENPLADES 2010), los planes de desarrollo local (Concejo Provincial de Chimborazo Plan para el Buen Vivir 2009) guardan coherencia con las tendencias globales (Protocolo Kioto, Rio de Janeiro, Cancún, etc.) y buscan mecanismos para que estas tecnologías se socialicen y a futuro se masifiquen mitigando las emisiones de carbono a la atmósfera. Sin embargo, se debe considerar el aprovechar las ventajas comparativas que tenga cada lugar, para el diseño de los sistemas energéticos (*Solar engineering of thermal processes*, autor John Duffie and William Beckman, 2006), aprovechando las condiciones geográficas y resolviendo problemas particulares como el caso de Ecuador (latitud 0).

Los sistemas termo solares en su mayor parte han sido desarrollados en los países de latitudes media y altas, pensando en sus condiciones geofísicas predominantes, lo cual ha dado lugar a la creación de sistemas termosolares con geometrías particulares que optimizan la captación de la radiación solar. En estos países dependiendo del hemisferio se observa el Sol de manera permanente al sur o al norte. En Ecuador la radiación es casi perpendicular con pequeñas oscilaciones al norte y al sur (Estudio potencial eólico y solar del

Cantón Riobamba, ESPOCH CONESUP, 2007).

Se han desarrollado por más de 50 años calentadores solares domésticos ambientalmente amigables para regiones de latitudes medias y altas, sin embargo, no han podido ser comercialmente competitivos respecto a los dispositivos a gas o eléctricos (Diario el Comercio Quito 2005), por lo que se busca nuevos diseños con iguales o mejores prestaciones que las unidades convencionales, para la zona ecuatorial principalmente sistemas pasivos (termosifónico).

En los sistemas solares pasivos compactos tradicionales la ubicación del tanque acumulador es en la parte superior del sistema con lo cual se facilita la convección del fluido de trabajo, pero esta solución para la latitud 0, tiene el inconveniente de producir sombra sobre el colector lo cual conlleva a la disminución de su área efectiva de captación y además hace estos sistemas menos compactos. Por este motivo se propone el hacer un nuevo diseño de dispositivo que elimine o minimice esta realidad.

Marco teórico

En Ecuador no existe una normativa para el uso de dispositivos termosolares. El Ministerio de Energía para mitigar en algo esta situación está usando normativas europeas, como requisito que deben cumplir los proveedores. Por tanto, la necesidad de establecer métodos de prueba para analizar el comporta-

miento de los sistemas solares termosifónicos se hace urgente.

El Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad Nacional de Taiwán en el año 1991¹, propuso un método de evaluación del comportamiento térmico de los sistemas termosifónicos. Se sugiere que para calificar el desempeño general se debe incluir: (1) Prueba de la eficiencia del sistema durante la fase de recolección de energía y (2) prueba de pérdida en el sistema de enfriamiento durante la fase de refrigeración. Ambas actividades proponen se realicen al aire libre. La prueba de pérdidas en refrigeración se realiza inmediatamente después de la prueba de eficiencia.

Con este fin se emplea un modelo semiempírico de la eficiencia del sistema con una variable $(T_i - T_a) / H_t$ se deduce al correlacionar los resultados de las pruebas de eficiencia diaria, mientras se usa un modelo simple de primer orden con un tiempo de enfriamiento constante TC para evaluar el parámetro de pérdida en la fase de enfriamiento. Se propone un método de prueba y un sistema experto diseñado para realizar pruebas al aire libre. Se muestra que se obtiene muy buena correlación del modelo de eficiencia del sistema y los parámetros obtenidos del sistema pueden ser utilizados para valorar el rendimiento térmico en la fase de recolección de energía, mientras que el comportamiento térmico en la fase de enfriamiento es evaluado examinando la constante de tiempo TC del modelo de pérdida en enfriamiento.

T_i = Temperatura inicial del tanque, °C.

T_a = Temperatura promedio ambiente, °C.

H_t = Irradiación total diaria incidente sobre el colector inclinado, MJ/m² día.

Sin embargo, para el testeo de los dispositivos termosolares, se debe considerar la metodología desde el diseño, donde los estudios numéricos de termosifón inclinado en convección natural

1 HUANG, B.; Du, S. "A Performance Test Method of Solar Thermosiphon Systems".

delinean la geometría final. Un artículo interesante lo escribió 1992 F. O. Gaa y otros². Analizan numéricamente el problema del flujo en un colector solar de tubos al vacío. Plantea el dispositivo con geometría cilíndrica, la parte superior conectada a un reservorio a temperatura constante. Debido al calentamiento del tubo se establece un flujo a circulación natural, donde el fluido frío del reservorio entra al termosifón calentándose, y el fluido más cálido sale por la parte superior. Se supone que el fluido está limitado por paredes sólidas a acepción de la parte superior. El calentamiento del tubo se ha simplificado suponiendo una temperatura uniforme en la superficie superior de la pared curva, con una temperatura uniforme diferente en la pared inferior. El fluido ingresa al termosifón desde el reservorio suponiendo que tiene la temperatura del reservorio. El extremo cerrado del cilindro se supone adiabático. El dominio de la solución está restringida a cilindros con condiciones límites modelados para un extremo superior abierto. La formulación del potencial vector-vorticidad de las ecuaciones de conservación en coordenadas cilíndricas esta aproximado por el método de diferencias finitas y resueltas por ADI. Las soluciones han sido obtenidas para agua ($Pr=6.5$) y numero de Rayleigh en el rango de 1000 a 500000. Se han considerado las dimensiones del cilindro (longitud/radio) de 4 y 10.

En el 2001 Khanafer y otros en la *International Journal of Heat and Mass Transfer*, presentan un trabajo sobre condiciones de frontera reales para flujos impulsados por flotabilidad y la transferencia de calor en recintos bidimensionales con los extremos abiertos³. Se realiza una representación precisa de las condiciones reales de contorno para una amplia gama de parámetros en la abertura plana de una estructura de dos dimensiones abierta en los extremos. Las condiciones de frontera reales presentes están correlacionadas con el número de Rayleigh, de Prandtl y la relación del

aspecto de la geometría con extremos abiertos. El procedimiento numérico se basa en el método de los residuos ponderados de Galerkin con formulación de elementos finitos. Se presentan comparaciones exhaustivas entre la investigación usando condiciones de frontera reales con el modelo de extremos cerrados y los resultados computacionales confirman la exitosa implementación del modelo propuesto. La aplicación de esta representación reduce las principales dificultades asociadas con las condiciones a extremos abiertos, con resultados en ahorro de CPU y memoria. El trabajo presenta el modelado básico y genérico de un conjunto de condiciones de contorno reales en la apertura del plano para varias aplicaciones de interés práctico.

Otro trabajo interesante sobre la convección libre de un cilindro semicircular vertical e inclinado a diferentes orientaciones, presentado en el 2003 en la revista de Ingeniería de Alejandría⁴, se estudia experimentalmente a diferentes orientaciones la transferencia de calor por convección libre desde la superficie exterior de un cilindro semicircular vertical e inclinado. Los experimentos se desarrollaron para estudiar el efecto de los ángulos de inclinación y orientación del cilindro semicircular en la distribución de temperatura de la pared, los coeficientes local y promedio de transferencia de calor, el número de Nusselt local y promedio para una amplia gama de números de Grashof. Además, se obtuvieron en una forma adimensional las correlaciones para el coeficiente de transferencia de calor por convección libre de un cilindro semicircular vertical e inclinado en función de: número de Rayleigh, ángulo de inclinación y ángulo de orientación del cilindro. Los experimentos se realizaron con el cilindro semicircular en cuatro ángulos de inclinación: $\alpha=0^\circ, 30^\circ, 45^\circ$ y 60° medidos desde la vertical. Se investigaron para cada inclinación del cilindro semicircular tres orientaciones diferentes: (1) la parte plana del cilindro semicircular hacia arriba ($\theta=0^\circ$), (2) la parte plana del cilindro semicircular vertical ($\theta=90^\circ$), y (3) la parte plana del cilindro semicircular hacia abajo ($\theta=180^\circ$). Los experimentos se ejecutaron con

flujo de calor constante. Los resultados mostraron que (i) el promedio del número de Nusselt aumenta como el ángulo de inclinación del cilindro semicircular (medido a partir de la vertical) aumenta para las tres diferentes orientaciones del cilindro, y (ii) en algunas inclinaciones de los cilindros, el número de Nusselt es mayor para la orientación $\theta=90^\circ$ que el de la orientación $\theta=0^\circ$, que a su vez es superior a la de $\theta=180^\circ$. Se han desarrollado correlaciones para predecir el promedio del número de Nusselt para el cilindro semicircular en función del número de Rayleigh, el ángulo de inclinación y el ángulo de orientación de los cilindros. Se encontró concordancia entre la tendencia de los resultados y la existente en la literatura.

Un trabajo similar presenta la escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad de *New South Wales*, Australia, se estudia la transferencia de calor y el flujo en termosifones abiertos inclinados⁵, describe la estructura del flujo de un termosifón cilíndrico inclinado y la transferencia de calor por convección libre en el extremo abierto de un colector solar de tubos de vacío. La estructura de flujo fue visualizado por el tinte azul de timol y partículas marcadoras de flujo (reoscopicas). Los perfiles de temperatura se miden con un termopar con registrador. Durante el calentamiento uniforme del tubo se observó una región estancada significativa en la parte inferior del tubo, la cual disminuye con el aumento de la temperatura de la pared. Para el caso de la diferencial de calentamiento de la mitad superior del tubo de sección transversal, a la mitad inferior con temperatura superior, no había región estancada. Cuando la mitad superior se calienta a una temperatura inferior que la mitad inferior había una región significativa del movimiento celular en el extremo inferior del tubo. Una región de recirculación inactiva en un colector solar de tubo de vacío y en otros termosifones abiertos puede disminuir la efectividad de la transferencia de calor a través del extremo abierto del tubo.

Paitoonsurikarn y Lovegrove estudian numéricamente las pérdidas por convección natural en colectores sola-

2 GAA, F.; BEHNIA, L.; MORRISON G. "A Numerical Study of Natural Convection in an Inclined Thermosiphon with an Open Top".

3 KHANAFER, K.; VAFAI, K. "Effective Boundary Conditions for Bouyancy-driven Flows and Heat Transfer in Fully Open-Ended Two-dimensional Enclosures".

4 NADA, S.; MOWAD, M. "Free convection from a vertical and inclined semicircular cylinder at different orientations".

5 BEHNIA, M.; MORRISON, G.; PARAMASIVAM S. "Heat Transfer and Flow in Inclined Open Thermosiphons".

res tipo cavidad en sistemas de energía solar térmica, especialmente para aplicaciones de alta concentración. La convección natural contribuye con una fracción significativa de la pérdida de energía, sus características por lo tanto, necesitan ser entendidos para ser eficazmente minimizada y mejorar la eficiencia del sistema. Se investiga la influencia en la pérdida por convección de la geometría de la cavidad y la inclinación a través de la abertura. Se utilizó el paquete Computacional de Dinámica de Fluidos "Fluent 6.0" para tres casos geoméricamente diferentes de receptores. Los resultados de pérdida de calor calculado muestran una dependencia no lineal con el ángulo de inclinación y cualitativamente buena aproximación con los cálculos propuestos por diferentes modelos empíricos. El modelo Clausing (1981) muestra la predicción más cercana de los resultados numéricos y experimentales a pesar de su uso original es en sistemas de recepción central de gran escala.

Morrison L. estudió el comportamiento de calentadores de agua solares de tubos al vacío⁶ con coeficientes de pérdida de calor mucho menores que los colectores de placa plana estándar, por lo tanto tienen perspectivas para suministrar calor a temperaturas superiores a 100° C. El comportamiento de los colectores de tubos de vacío también puede ser superior a los colectores de placa plana que operan a menor temperatura, debido a la favorable respuesta al ángulo de incidencia, mayor eficiencia en los períodos de baja irradiación y a la temperatura ambiente. Presenta los resultados de tres años de seguimiento de una serie de sistemas solares de agua caliente sanitaria que incorpora colectores solares de tubos de vacío. Colectores tubulares de vacío a ciclo forzado (bombeo) y termosifónicos con sistemas solares de calentamiento de agua estándar de placa plana.

En el 2000 la revista *international Heat and Mass Transfer*⁷ hace un análisis de flujos impulsados por flotabilidad y

de la transferencia de calor de celdas abiertas: con eliminación de límites ampliados. Se centra en obtener una representación precisa de las condiciones de contorno reales en el lado abierto de estructuras abiertas de dos y tres dimensiones. La aplicación de esta representación reduce las muy complicadas condiciones de contorno abierto a un dominio cerrado y resulta en un sustancial ahorro del uso de CPU y memoria. El procedimiento numérico utilizado en este trabajo se basa en el método de ponderación residual de Galerkin con formulación de elementos finitos. Las comparaciones entre la investigación utilizando las correlaciones del modelo cerrado propuesto y los resultados computacionales valida la aplicación del modelo propuesto. Los resultados presentados en este trabajo constituyen una forma innovadora para describir correctamente las condiciones de frontera en el lado abierto de un contorno abierto.

En el 2007 en ScienceDirect se presentó el diseño, construcción y predicción del comportamiento de un colector solar integrado al techo usando análisis de elementos finitos⁸, es una aplicación diferente pero de mucha actualidad. El colector solar fue diseñado integrado al techo buscando fácil construcción, eficiencia energética, integración funcional, comportamiento, sostenible, confiable, flexible, mejor costo efectivo, eficaz. Se desarrollada una estrategia de construcción del colector y asegurar la calidad, facilidad y repetitividad de manufactura. Se desarrollaron modelos con elementos finitos tridimensionales para evaluar el comportamiento termal del colector solar integrado al techo. El modelo fue usado para predecir el conjunto de variables óptimo usadas al construir un confort térmico adecuado. En el modelo se consideró la conducción acoplada a la convección forzada, se desarrollaron los modos de radiación térmica de transferencia de calor de onda larga. Para propósitos demostrativos, se modeló en la localidad de Blacksburg. Los resultados mostraron que el colector integrado al techo tiene un comportamiento térmico aceptable

para suplir aproximadamente el 85% del calentamiento en el espacio construido y los requerimientos de agua caliente.

El camino solar en el cielo y la posición de los colectores define la cantidad de radiación captada y por tanto son parámetros que definen la posición óptima de los dispositivos, esto es un requerimiento previo al diseño de un sistema de conversión basado en el sol, conocer la orientación óptima y la inclinación de la superficie al pico de energía solar colectada⁹. En muchas partes del mundo, sin embargo, no siempre son disponibles los datos de radiación solar para la superficie de interés. El artículo presenta una aproximación numérica para calcular la radiación solar sobre los planos inclinados integrados a mediciones de la distribución de radiación en el cielo. La radiación anual total obtenida a diferentes inclinaciones de las superficies mostrando varias orientaciones y la radiación solar mensual a la óptima inclinación de la superficie y fue determinado tres planos verticales hacia el este, sur y oeste. Las salidas de energía y la eficiencia fueron simuladas usando un paquete computacional. Los beneficios ambientales en término de reducción de gases efecto invernadero e implicaciones de costo fueron también considerados. Busca dar información técnica para diseños ingenieriles y evaluación de los sistemas fotovoltaicos los cuales pueden contribuir al ambiente, energía y aspectos económicos.

En el 2010 se presentan simulaciones numéricas de transferencia estable de calor por convección natural en un tubo de entrada simple a 3 dimensiones sujetas a un nano fluido¹⁰. En este trabajo, la simulación numérica tri dimensional del flujo de convección natural constante y la transferencia de calor son estudiadas en un tubo de entrada simple con ingreso de calor no uniforme. Aparte de otras aplicaciones, sirve como modelo simplificado de un tubo

6 MORRISON G. "Performance of Evacuated Tubular Solar Water Heaters".

7 KHANAFER, K.; VAFAI K. "Buoyancy-driven flow and Heat Transfer in open-ended Enclosures: Elimination of the Extended Boundaries.

8 HASSAN, M.; BELIVEAU, Y. "Design, construction and performance Prediction of Integrated solar roof collectors using finite element analysis".

9 LI, D.; LAM, T. "Determining the Optimum Tilt Angle and Orientation for Solar Energy Collection Based on Measured Solar Radiance Data".

10 SHAHI, M.; HOUSHANG, A. "Numerical Simulation of Steady Natural Convection Heat Transfer in a 3-dimensional single-ended tube subjected to a nanofluid".

solar de vacío de vidrio con entrada simple para calentar agua. Se supone que el extremo cerrado del tubo es adiabático y la abertura del tubo será sometido a nano fluidos de cobre y agua. Se deducen las ecuaciones en coordenadas cilíndricas que gobiernan el fenómeno basándose en el modelo conceptual. Las ecuaciones se han aproximado por medio del método de volumen de control finito (FVM), utilizando en el arreglo el algoritmo SIMPLE. El estudio ha sido llevado a cabo para la fracción de volumen sólida $0 \leq \phi \leq 0,05$ y flujo de calor máximo $100 \leq q_m \leq 700$ metros cuadrados. Teniendo en cuenta que el flujo impulsado en el tubo se ve influido por las dimensiones y el ángulo de inclinación del tubo solar, los patrones de flujo y la distribución de temperatura cuando el tubo se coloca en diferentes orientaciones se presentan en diferentes planos de corte transversal y secciones longitudinales.

Se presenta en el 2009 revista internacional *Thermal Sciences* un trabajo sobre enfriamiento por convección natural inestable de un tanque de almacenamiento de agua con fluido de gases de combustión¹¹. El proceso de enfriamiento por convección natural en cavidades cilíndricas es un fenómeno que tiene lugar en varias aplicaciones tales como en sistemas de energía solar. Se estudia experimental y numéricamente un tanque de almacenamiento con un conducto con gas de combustión durante su proceso de enfriamiento a largo plazo. El dominio computacional incluye dos líquidos, es decir, el agua en el tanque y el aire en la chimenea, y dos capas externas e internas de acero separados por material de poliuretano como aislamiento. En este trabajo, el análisis numérico y experimental del campo de temperaturas en el interior del tanque al someterse a un proceso de enfriamiento por convección externa con coeficiente constante de transferencia de calor por convección. Los perfiles de temperatura de aire y agua a lo largo de líneas verticales se obtienen experimentalmente y numéricamente, para un período de refrigeración de 90 h. El análisis numérico se realiza utilizando

11 HMOUDA, I.; RODRIGUEZ, C.; BOUDEN, C.; OLIVA, A. "Unsteady natural convection cooling of a water storage tank with an internal gas flue".

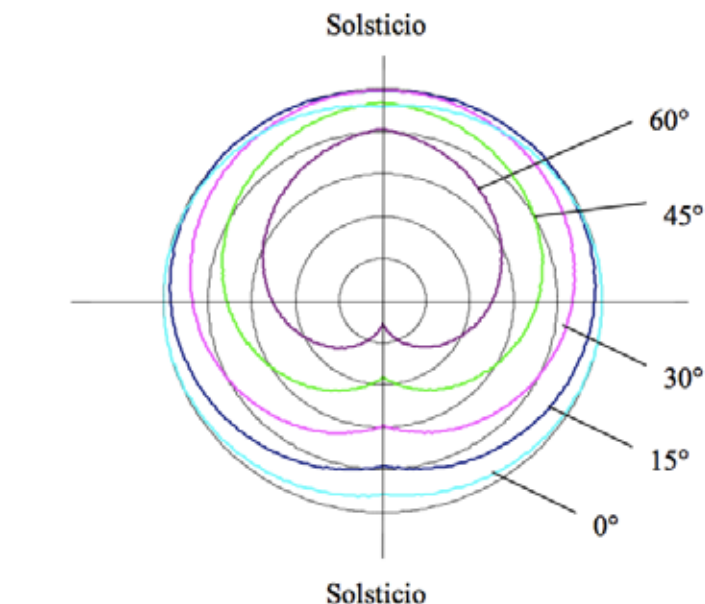


Gráfico N° 1. Simulación colector orientado al Norte en Ecuador con diversas inclinaciones.



Imagen N°1. Dispositivo con 15° de inclinación, instalado en Pulinguí, Ecuador

un código específico de CFD (*Computational Fluid Dynamics*) desarrollado para este trabajo, un dominio de simetría axial se ha considerado. Por último, se proporciona una descripción detallada de los fenómenos que ocurren en la parte interna del agua del durante el dominio del proceso de enfriamiento.

En el 2009 en Rourkela India, se planteó un análisis CFD de la convección natural en un diferencial cerrado de calor¹² El control térmico se logra ampliamente en muchos sistemas aplicando el proceso de convección natural por su bajo coste, fiabilidad y fácil manteni-

12 KUMAR, S.; "CDF Analysis of Natural Convection in Differentially Heated Enclosure".

miento. Las aplicaciones típicas incluyen los intercambiadores de calor, refrigeración de equipos electrónicos y los reactores nucleares, chimeneas solares y muros Trombe en el sector de la construcción, etc. Estudios numéricos y experimentales de los flujos de convección natural en dos canales dimensionales, en las dos secciones finales abiertas a las condiciones ambientales, han sido ampliamente reportados en la literatura, pero la mayoría de ellos son tratados en situaciones idealizadas. Código CFD de la convección natural con propiedades variables y las condiciones de deslizamiento se presentan en el trabajo. El 2D, simulaciones laminar se obtienen mediante la resolución de las ecuaciones que gobiernan un fluido. Se consi-

dera que las variaciones de temperatura no son tan altas y la aproximación de Boussinesq se aplica. Este último lleva a la simplificación del sistema de ecuaciones. Los resultados calculados para el número de Nusselt, la velocidad y perfiles de temperatura y velocidad de transferencia de calor están directamente comparados con las propuestas en la bibliografía, dejando por lo tanto la validación del procedimiento numérico empleado.

Estudio Numérico de convección mixta en un canal con una cavidad abierta llena de un medio poroso¹³, convección mixta en cavidades abiertas rellenas con un material poroso con una pared calentada con flujo de calor uniforme es estudiada numéricamente. Las configuraciones investigadas son: un canal horizontal con una cavidad en la pared inferior (cavidad en forma de U), un canal vertical, con una cavidad en la pared (cavidad en forma de C). Una investigación a dos dimensiones el estado de equilibrio se lleva a cabo con el fin de evaluar los principios naturales y comportamiento básico de los flujos que se presentan empleando el modelo de Darcy-Brinkman extendido Forchheimer. Los resultados se obtienen para dos números de Reynolds y dos números de Richardson. Algunos comportamientos diferentes se observan entre las dos configuraciones geométricas en términos del patrón de flujo en la cavidad abierta y los perfiles de temperatura de la pared.

Es importante conocer el comportamiento térmico transitorio de un tanque solar vertical de almacenaje con un manto intercambiador de calor en Operación no flujo¹⁴ de un sistema doméstico, se ha investigado numéricamente en el modo de carga. Se supone que el tanque está inicialmente lleno de agua fría. En un instante de tiempo, el fluido caliente sale del colector, se inyecta de manera uniforme en la parte superior del intercambiador de calor de manto y después de la transferencia de calor con

13 BOUNOMO, B.; FOGLIA, G.; MANCA, O.; NARDINI, S. "Numerical study on Mixed Convection in a Channel with an open Cavity Filled with Porous Media".

14 BARZEGAR, A.; DEHGHAN, A. "Transient Thermal Behavior of a Vertical Solar Storage Tank with a Mantle Heat Exchanger During No-Flow Operation".

el fluido dentro del tanque, retirándose de la parte inferior del intercambiador de calor. Las ecuaciones de conservación en coordenadas cilíndricas y en condiciones de eje-simétricos se han utilizado de acuerdo con la geometría investigada. Se han discretizado las ecuaciones que gobiernan empleando el método de volúmenes finitos y el Algoritmo SIMPLE se ha utilizado para el acoplamiento entre las ecuaciones de movimiento y presión. El modelo bajo número de Reynolds (LRN) $k-\omega$ se utiliza para el tratamiento de la turbulencia en el fluido. En primer lugar, se investigaron el comportamiento transitorio térmico del tanque de almacenamiento de calor y el proceso de formación de la estratificación térmica en el tanque de almacenamiento de calor. Entonces, la influencia de Número de Rayleigh en el tanque de almacenamiento de calor, el número de Reynolds en el intercambiador de calor de manto y la posición vertical del manto en el flujo, los campos térmicos y la formación de la estratificación térmica fue investigado. Se encuentra que para valores mayores del número de Rayleigh, una estratificación térmica más adecuada se establece en el interior del tanque. También se advierte que el aumento de la velocidad entrante del fluido a través del intercambiador de calor de manto provoca una formación más rápida de la estratificación térmica. Un rendimiento térmico superior se logró cuando el intercambiador de calor de manto se coloca en la mitad de la altura del tanque de almacenamiento.

Existe una gran variedad de estudios presentados a través de artículos, tesis, etc., que presentan la problemática relacionada con la aplicación de la energía termosolar, y se muestra que un cambio de condiciones, de dispositivo o de aplicación implica un esfuerzo teórico científico previo a la construcción de un prototipo y su posible aplicación en dispositivos comerciales. Los algoritmos y principios físico matemáticos son similares, de donde previa a una aplicación masiva de la energía termosolar en Ecuador obliga a un esfuerzo académico científico-tecnológico en que las instituciones de educación superior y los centros de investigación, desarrollo e innovación deben implementar esta línea de trabajo.

La posición geofísica de Ecuador hace

que países con similares problemáticas sean pocos y es el único con sistemas ecológicos con actividad antropogénica importante a alturas superiores a 2000 msnm. El camino del sol en el cielo es casi perpendicular oscilando levemente de sur a norte y viceversa (-23.5° a 23.5°) con una importante área tropical, pero también subtropical y alto andino, es decir con una variación climática muy grande.

Estas condiciones ambientales, geofísicas y geográficas corresponden a condiciones físicas y de frontera diferentes a las encontradas en la mayoría de papers estudiados, lo que implica que en base de los mismos principios fisicomatemáticos con algoritmos similares a los mostrados en las publicaciones se podrían proponer nuevos prototipos que funcionen bajo las condiciones propias de Ecuador.

El problema más evidente se muestra en la inclinación de los colectores solares existentes en el mercado ecuatoriano que en general están a 45° o más respecto a la horizontal lo que hace que en el caso de colectores orientados hacia el norte se observa que a cero grados la radiación es máxima, pero los calefones de circulación natural pueden presentar problemas de estratificación del fluido. Con 15 grados se pierde alrededor del 3% promedio, con diferencias máximas de sólo el 15%.

A inclinación de 45° conlleva una pérdida promedio del 27% con respecto a la inclinación de 15°, mostrándose que hay una pérdida máxima que llega hasta el 55%.

Reconocimiento

A la Fundación Climate and Development Italia por impulsar el desarrollo científico en la ESPOCH, como una continuación del trabajo de los primeros docentes italianos de las carreras de Doctorado en Química, Física y Matemática.

Conclusiones

Es necesario desarrollar algoritmos que modelen dispositivos de captación de energía solar térmica horizontales o con pequeñas inclinaciones en Ecuador.

Construir prototipos para la zona Ecuatorial que validen y sirvan para ajustar los modelos y simulaciones teóricas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1]. HUANG, B.; Du, S. "A Performance Test Method of Solar Thermosyphon Systems". *Journal of Solar Energy Engineering*. 1991, vol 113, p.172-179
- [2]. GAA, F.; BEHNIA, Leong; MORRISON G. "A Numerical Study of Natural Convection in an Inclined Thermosyphon with an Open Top". 11th *Australasian Fluid Mechanics Conference*. 1992. p. 339-342.
- [3]. GRAHAM L.; INDRA B. and MASUD B., "Heat Transfer in Evacuated Tubular *Solar Collectors*". School of Mechanical and Manufacturing Engineering University of New South Wales Australia 2000.
- [4]. KHANAFER, K.; VAFAI, K. "Effective Boundary Conditions for Bouyancy-driven Flows and Heat Transfer in Fully Open-Ended Two-dimensional Enclosures". *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2002. Vol 45, p. 2527-2538
- [5]. NADA, S.; MOWAD, M. "Free convection from a vertical and inclined semicircular cylinder at different orientations". *Alexandria Engineering Journal*. 2003, vol 42, núm. 3, p. 273-282.
- [6]. BEHNIA, M.; MORRISON, G.; PARAMASIVAM S. "Heat Transfer and Flow in Inclined Open Thermosyphons". *School of Mechanical Engineering University of New South Wales Kensington, Sydney NSW, Australia*, p. 7-14.
- [7]. PAITONSURIKARN S. AND LOVEGROVE K. "Numerical Investigation of Natural Convection Loss in Cavity-Type Solar Receivers". *Australian and New Zealand Solar Energy Society*. 2002. p. 1-6.
- [8]. MORRISON G. "Performance of Evacuated Tubular Solar Water Heaters". *School of Mechanical and Industrial Engineering University of New South Wales, Australia*, p. 108-115.
- [9]. KHANAFER, K.; VAFAI K. "Buoyancy-driven flow and Heat Transfer in open-ended Enclosures: Elimination of the Extended Boundaries". *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2000. vol. 43. núm. 2000, p. 4087-4100.
- [10]. HASSAN, M.; BELIVEAU, Y. "Design, construction and performance Prediction of Integrated solar roof collectors using finite element analysis". *Construction and Building Materials*. 2007. vol. 21. núm. 3, p. 1069-1078.
- [11]. LI, D.; LAM, T. "Determining the Optimum Tilt Angle and Orientation for Solar Energy Collection Based on Measured Solar Radiance Data". *International Journal of Photoenergy*. 2007. vol 2007. p. 1-9
- [12]. REBHI, M; SELLAM, M; BELGHACHI, A; KADRI, B. "Conception and Realization of Sun Tracking System in the South-West of Algeria". *Applied Physics Research*. 2010. vol. 2. núm. 1, p. 66-75.
- [13]. SHAHI, M.; HOUSHANG, A.. "Numerical Simulation of Steady Natural Convection Heat Transfer in a 3-dimensional single-ended tube subjected to a nanofluid". *International Communications in Heat and Mass Transfer ScienceDirect*. 2010. vol. 37. núm. 2010, p. 1535-1545.
- [14]. HMOUDA, I.; RODRIGUEZ, C.; BOUDEN, C.; OLIVA, A. "Unsteady natural convection cooling of a water storage tank with an internal gas flue". (*uncorrected proof*) *International Journal of Thermal Sciences Elsevier*. 2009. vol. 37. núm. 2010, p. 1535-1545.
- [15]. KUMAR, S.; "CDF Analysis of Natural Convection in Differentially Heated Enclosure". *Department of Mechanical Engineering Natural Institute of Technology*. 2009. p. 1-40.
- [16]. BARZEGAR, A.; DEHGHAN, A. "Transient Thermal Behavior of a Vertical Solar Storage Tank with a Mantle Heat Exchanger During No-Flow Operation". *Journal of applied Fluid Mechanics*. 2009. vol 2. núm. 2010, p. 55-69.
- [17]. BOUNOMO, B.; FOGLIA, G.; MANCA, O.; NARDINI, S. "Numerical study on Mixed Convection in a Channel with an open Cavity Filled with Porous Media". 5th *European Thermal-Sciences Conference, Then Netherlands*. 2008. p. 1-8.