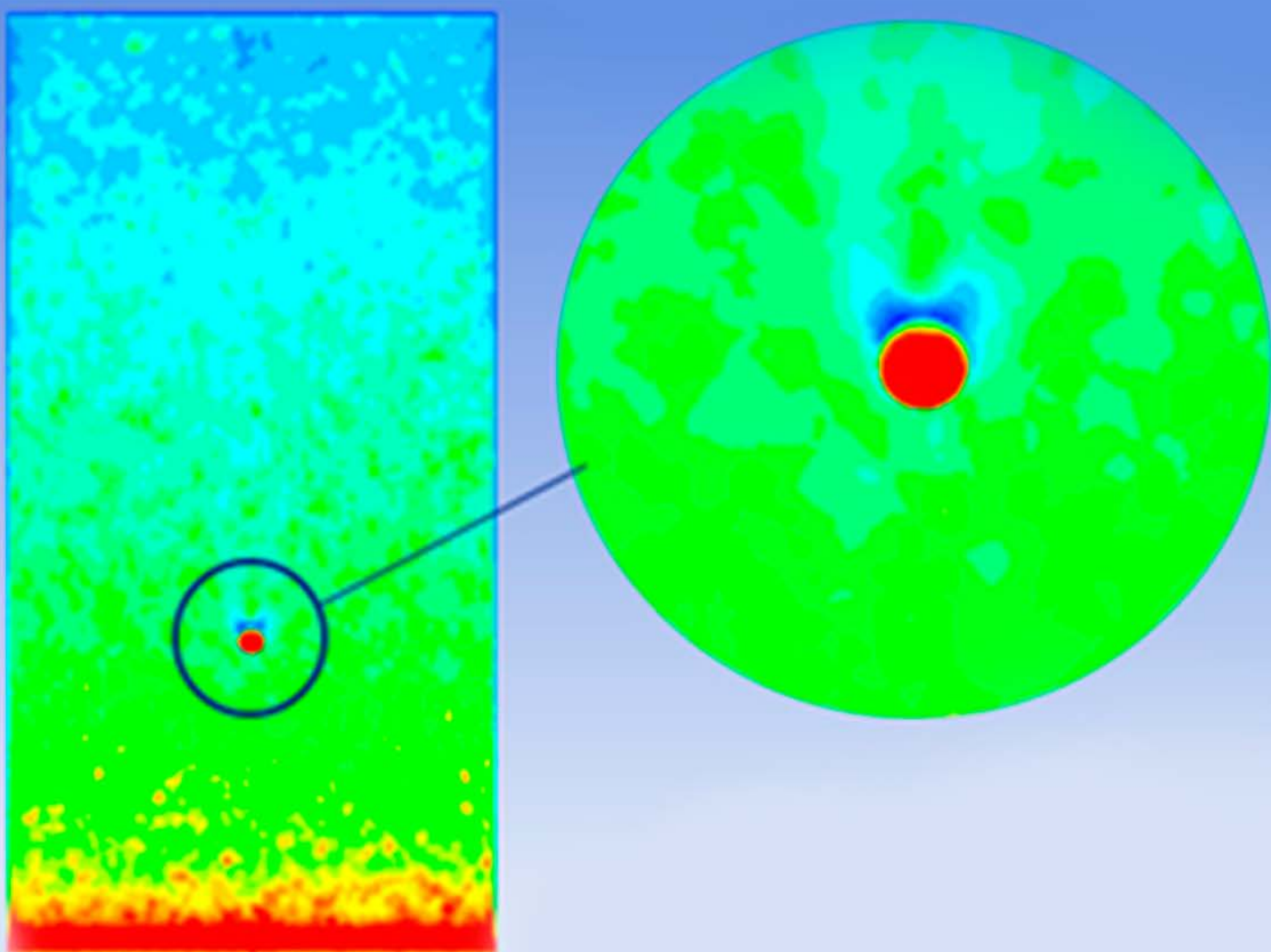




DIRECTOR GENERAL

Dr. Luis Bériz Pérez

EDITORES

Lic. Lourdes Tagle Rodríguez
Ing. Jorge Santamarina Guerra

CONSEJO EDITORIAL

Dr. Luis Bériz Pérez
M.Sc. Madelaine Vázquez Gálvez
Ing. Otto Escalona Pérez
Ing. Miguel González Royo
Ing. Dolores Cepillo Méndez

DISEÑO Y COMPOSICIÓN

Alejandro F. Romero Ávila

WEB MASTER

Jesús Guillermo Gil Delgado

RELACIONES PÚBLICAS

Mabel Blanco de la Cruz

CONSEJO ASESOR

Dra. Elena Vigil Santos
Dr. Conrado Moreno Figueredo
Dr. José Guardado Chacón
Dr. Deny Oliva Mericio
Dra. Dania González Couret
Lic. Bruno Henríquez Pérez
Lic. Ricardo Bériz Valle
M.Sc. Mario A. Arrastía Ávila

Eco Solar, no. 66 / 2018

Revista científica de las
fuentes renovables de energía
Octubre-diciembre, 2018
ISSN-1028-6004
RNPS-2220



CETER



DIRECCIÓN

Calle 20, No. 4113, e/ 18A y 47
Playa, La Habana, Cuba
TEL.: (53) 72040010; 72062061
E-MAIL: madelaine@cubasolar.cu
HTTP://www.cubasolar.cu



CONTENIDO

PÁGINA WEB PARA EL AUTOAPRENDIZAJE DE PLANTAS DE COGENERACIÓN EN LA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA.....	3
Juvenal Ccama Huillca, M.Sc. Norma González Ruda, M.Sc. Indira Ordóñez Reyes y Dr. Alberto Eduardo Calvo González	
ESTUDIO DE LOS TIPOS DE PLANTAS DE COGENERACIÓN PARA SU APLICACIÓN EN LAS INDUSTRIAS DEL PERÚ.....	7
Juvenal Ccama Huillca y Dr. Alberto Eduardo Calvo González	
INTENSIFICACIÓN DE LA TRANSFERENCIA DE CALOR EN UN INTERCAMBIADOR DE CALOR COMPACTO MEDIANTE PERTURBACIÓN DE FLUJO EN ALETAS.....	14
Ania Hernández Ruiz y M.Sc. Ing. Alberto Menéndez Pérez	
INSTALACIÓN DE TUBOS DE VIDRIO AL VACÍO DE BAJA PRESIÓN EN UN ESQUEMA ENERGÉTICO PRESURIZADO.....	19
José Raúl López Camejo e Ing. Jesús M. Iglesias Ferrer	
ESTUDIO PRELIMINAR DE ALTERNATIVA DE EMPLEO DE UNA INSTALACIÓN SOLAR TÉRMICA PARA UN HOTEL EN GUANTÁNAMO, CUBA.....	23
Eddy Frank Fernández Carballo	
DETERMINACIÓN DEL ÁNGULO DE INCLINACIÓN MÁS ADECUADO PARA CALENTADORES SOLARES PLANOS DE AIRE OPERANDO EN RÉGIMEN DE CIRCULACIÓN NATURAL EN CUBA.....	28
Lázara Rosemary Moratón Linares	

editorial
cubasolar

PÁGINA WEB PARA EL AUTOAPRENDIZAJE DE PLANTAS DE COGENERACIÓN EN LA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

Por Juvenal Ccama Huillca*, M.Sc. Norma González Ruda**, M.Sc. Indira Ordóñez Reyes*** y Dr. Alberto Eduardo Calvo González****

*Estudiante del 5to. año de la carrera de Ingeniería Mecánica, Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría.

E-mail: jhuve.ch@gmail.com

**Profesora Auxiliar, CREA, Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría.

E-mail: nruda@crea.cujae.edu.cu

***Profesora Instructor, CREA, Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría.

E-mail: iordonez@crea.cujae.edu.cu

****Profesor Titular de la carrera de Ingeniería Mecánica, Centro de Estudio de Tecnologías Energéticas Renovables, CETER, Universidad Tecnológica de la Habana José Antonio Echeverría.

E-mail: aegcalvo@ceter.cujae.edu.cu

Resumen

En este trabajo se diseñó una página web para el proceso de enseñanza-aprendizaje de la carrera de Ingeniería Mecánica de la Universidad Tecnológica de la Habana José Antonio Echeverría, referido a las plantas de cogeneración. Con ella se contribuye a la formación y desarrollo de habilidades investigativas básicas en los estudiantes mediante el autoaprendizaje. Para el diseño de la página web se utilizaron las herramientas Hotpotatoes y Excelearning, orientado por la asignatura de Pedagogía y Didáctica de la Educación Superior. Se aplicó la página web en el sistema de evaluación de dicha asignatura en el quinto año de la carrera de Ingeniería Mecánica. El grado de satisfacción expresado por los estudiantes y profesores fue muy positivo. Se valoró como muy importante el estilo de autoaprendizaje en los estudiantes de esta carrera. Basado en estos resultados se concluye que la página web propuesta constituye una aplicación de gran utilidad para el logro del objetivo en la formación del profesional, teniendo en cuenta las potencialidades educativas que brinda este recurso informático.

Palabras clave: Página web, plantas de cogeneración.

WEB PAGE FOR SELF-LEARNING OF COGENERATION PLANTS IN THE MECHANICAL ENGINEERING CAREER

Abstract

In this work a web page was designed for the teaching-learning process of the Mechanical Engineering career of the Technological University of Havana José Antonio Echeverría, referred to the cogeneration plants. With it, it contributes to the formation and development of basic research skills in students through self-learning. For the design of the website, the Hotpotatoes and Excelearning tools were used, guided by the subject of Pedagogy and Didactics of Higher Education. The web page was applied in the evaluation system of this subject in the fifth year of the Mechanical Engineering career. The degree of satisfaction expressed by students and teachers was very positive. The self-learning style of the students in this career was considered very important. Based on these results, it is concluded that the proposed web page is a very useful application for the achievement of the objective in professional training, taking into account the educational potential of this computer resource.

Key words: Web page, cogeneration plants.

Introducción

En la sociedad actual se experimenta cada día una evolución tecnológica, la que se extiende hasta la educación a nivel mundial y genera la necesidad de aplicar una transformación y actualización en los procesos de enseñanza. Este cambio se debe aplicar también a las metodologías educativas para que se incluya la utilización e interacción constante por parte de docentes y estudiantes con herramientas tecnológicas, como la página web, que permitan mejorar el desempeño tecnológico de los estudiantes generando un mayor grado de motivación hacia la adquisición de conocimientos.

Uno de los problemas que se presenta en el proceso de enseñanza-aprendizaje en las universidades es que no se profundiza en un tema determinado de una asignatura y los estudiantes no poseen los recursos necesarios para investigar sobre el tema y apropiarse de esos contenidos. Partiendo de esta necesidad el presente trabajo tiene como objetivo diseñar una página web para el autoaprendizaje de plantas de cogeneración en la carrera de Ingeniería Mecánica; de esta manera contribuir a la formación y desarrollo de habilidades investigativas básicas en los estudiantes de Ingeniería Mecánica, a partir del uso de las tecnologías de la informática y las comunicaciones (TIC) en el entorno docente.

El uso de la página web como herramienta didáctica en la enseñanza sobre las plantas de cogeneración posee un doble propósito; por un lado pretende activar e incrementar el aprendizaje de las plantas de cogeneración por parte de los estudiantes por medio del desarrollo de diferentes actividades contenidas en la página web con el fin de facilitar la adquisición y apropiación de conocimientos. Por otro lado se busca familiarizar a los estudiantes con el manejo de este tipo de páginas motivándolos y generando en ellos mayor interés por aprender a través de su propia búsqueda.

Desarrollo

TIC es toda tecnología digital destinada a facilitar la obtención de información y su almacenamiento, recuperación o, transmisión en forma digital, procesar datos y automatizar trabajos. Pero son más que canales de comunicación y deben entenderse como medios que potencian la información y la comunicación, las cuales han producido importantes transformaciones en el ámbito social, tecnológico, educativo y cultural que han determinado una manera nueva de acceder, producir y utilizar los conocimientos [Márquez, 2014].

La aplicación de nuevas estrategias de enseñanza-aprendizaje en la carrera de Ingeniería Mecánica por parte de los docentes busca favorecer las prácticas pedagógicas y generar en los estudiantes actitudes de interés, responsabilidad, participación y motivación que trasciendan hacia un aprendizaje desarrollador.

Incorporar las TIC en las clases de carrera de Ingeniería Mecánica, específicamente en el tema de plantas de cogeneración, favorece el trabajo colaborativo, desarrollo de clases interactivas, acceso de entornos de aprendizaje dinámicos y motivación hacia el aprendizaje.

El término «cogeneración» se emplea para designar la producción secuencial de energía térmica y energía eléctrica a partir de una fuente primaria de energía, estando normalmente esta producción de energía térmica y eléctrica ligada a un proceso industrial, comercial o de servicios. El atractivo fundamental de las plantas de cogeneración se basa en que tienen una óptima eficiencia en las transformaciones energéticas, con mínimos consumos de combustible primario y con un menor impacto ambiental [Fenercon, 2010].

La página web es una herramienta tecnológica que minimiza la barrera del espacio y el tiempo, creada específicamente para el estudio de una asignatura o materia universitaria. Son webs de naturaleza didáctica, ya que ofrecen un material diseñado y desarrollado específicamente para ser utilizado en un proceso de enseñanza-aprendizaje [Rodríguez, 2016]. Por tanto, los resultados se traducen en aprendizajes, con los cuales el estudiante es capaz de construir su propio aprendizaje.

Para la elaboración de la página web propuesta se hizo uso de las herramientas Hotpotatoes y Excelearning, cuya ventaja es que permiten crear contenidos didácticos para la web, sin necesidad de poseer dominio de HTML. Por ejemplo, Excelearning es un software libre que facilita incluir en sus páginas diferentes contenidos multimedia, integra distintos formatos de presentación; también posibilita exportar los proyectos a diferentes formatos. Hotpotatoes también es un software libre que permite crear ejercicios educativos de forma sencilla que posteriormente pueden realizarse a través de la web, o simplemente se pueden entrelazar con un proyecto que se esté realizando en Excelearning.

Se diseñaron los componentes del proceso de enseñanza aprendizaje: objetivo, contenido, método, medios y evaluación, para que el sistema de autoaprendizaje que se creó mediante una página web tenga una secuencia lógica para el aprendizaje del estudiante.

Diseño de la plantilla de la página web

Título: Plantas de cogeneración.

Tiempo promedio para vencer el tema: 2 horas.

Objetivo: Caracterizar los tipos de plantas de cogeneración para su aplicación en el sector industrial de manera que contribuya a la responsabilidad profesional del ingeniero mecánico.

Contenido:

- La cogeneración.
- Aplicaciones de la cogeneración.
- Arreglos de operación de los sistemas de cogeneración.
- Tipos de plantas de cogeneración.
- Aplicaciones de la cogeneración con turbina de gas.
- Aplicaciones de cogeneración con motor de gas.

Métodos y procedimientos:

- Trabajo independiente.

El estudiante tiene que interactuar con el sitio web desarrollado, donde está modelado el proceso de

autoaprendizaje sobre el tema plantas de cogeneración.

Para profundizar los conocimientos en el tema tratado, el estudiante tiene que analizar los documentos digitales mencionados en la bibliografía y de esta forma cumplir el objetivo planteado.

Medios:

- Sitio web desarrollado para abordar el tema sobre las plantas de cogeneración.
- Material audiovisual relacionado con el tema.
- Documentos digitales PDF.

¿Qué debes saber el estudiante?:

- Termodinámica: Primera ley de la termodinámica, segunda ley de la termodinámica, plantas de potencia.
- Transferencia de calor.
- Motores primarios.

Evaluación:

- Autoevaluación para el cumplimiento del objetivo (Fig. 1).



Fig. 1. Características básicas de la página web diseñada.

Resultados de la aplicación de la página web

El diseño de la página web como herramienta didáctica en la enseñanza sobre las plantas de cogeneración, parte de la elaboración de un proyecto de investigación ajustado específicamente a la asignatura de Proyecto de Ingeniería Mecánica perteneciente al cuarto año de la carrera y a las orientaciones en la asignatura de Pedagogía y Didáctica de la Educación Superior para sus fundamentos didácticos.

Entre las asignaturas de la carrera a que esta página web tributa se encuentran: Termodinámica Técnica I y II, Motores de Combustión Interna, Equipos de Transferencia de Calor, Proyecto de Plantas Térmicas, Generación, Transporte y Uso de Vapor, Gestión Energética y Motores Primarios. Para el ingeniero mecánico es importante tener dominio de los conocimientos en la utilización ade-

cuada de la energía y en las tecnologías que contribuyen a la eficiencia energética, como es el caso de las plantas de cogeneración que se presentan como una opción tecnológica que podría generar para las empresas, una serie de ahorros económicos y energéticos por encima de 30 % según algunos autores, y un menor impacto ambiental, lo que finalmente mejora el balance energético de una región o país.

La página web diseñada ha sido aplicada en la asignatura de Pedagogía y Didáctica de la Educación Superior en el quinto año de la carrera de Ingeniería Mecánica, en el grupo 52. El grado de satisfacción por parte de los estudiantes fue muy positivo con respecto al nuevo estilo de autoaprendizaje, ya que contribuyó al enriquecimiento y perfeccionamiento de los conocimientos teóricos y prácticos sobre las plantas de cogeneración que los estudiantes han aprendido de manera independiente.

Uno de los aspectos más importantes por los cuales los estudiantes consideran que la página web es una herramienta motivadora y desarrolladora del autoaprendizaje es, que otorga a los estudiantes la oportunidad de interactuar no solo con el conocimiento que están adquiriendo, sino que los acerca al uso de herramientas tecnológicas con fines pedagógicos, sin mencionar que para este grupo de estudiantes el diseño y el manejo que se dio a la página dentro de la clase significó un cambio positivo que le dio un nuevo rumbo al aprendizaje de las plantas de cogeneración.

La finalidad que tiene este trabajo es que el estudiante pueda utilizar la página web de plantas de cogeneración que se encuentra en la plataforma Moodle, para profundizar en los contenidos necesarios en la carrera la investigación.

Conclusiones

El sitio web es una herramienta valiosa que favorece la utilización de las TIC y enriquece la práctica docente dentro del proceso de enseñanza-aprendizaje; además, permite mejorar y facilitar la comprensión de conceptos y el desarrollo de habilidades que fomentan un cambio de actitud positivo en los estudiantes hacia el autoaprendizaje.

Los resultados de la aplicación de la página web diseñada en la asignatura de Pedagogía y Didáctica de la Educación Superior en el quinto año de la carrera de Ingeniería Mecánica han sido muy positivos, destacando en varios casos el interés de disponer de temas de estudio adicionales para la investigación. El trabajo con la página web le permitió a los estudiantes interactuar de una manera diferente con el contenido de forma dinámica a partir de las ayudas visuales y el trabajo con herramientas tecnológicas, las que contribuyen a que recuerden fácilmente las temáticas que se trabajan, en este caso, relacionadas con las plantas de cogeneración.

La posibilidad de retroalimentación e intercambio de información que brinda la página web, se ha convertido también en una nueva oportunidad de ganar en experiencia y de poder socializar los conocimientos acerca de varios temas, ya sean técnicos, culturales y lingüísticos, que permitan enriquecer la formación integral del ingeniero mecánico.

Recomendaciones

Continuar el diseño de páginas web en la carrera de Ingeniería Mecánica en otros contenidos de las diferentes asignaturas. Después generalizar el diseño de páginas web a otras carreras de Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría, Cujae, así como generalizar a otras universidades para contribuir a la formación y desarrollo de las habilidades investigativas en los estudiantes a través del autoaprendizaje.

Realizar páginas web que no solamente sean para el autoaprendizaje e investigación, sino como medios de apoyo al proceso pedagógico en el trabajo independiente.

Bibliografía

- CASTELLANOS, A. Y OTROS. (2001). «Estrategia docente para contribuir a la educación de valores en estudiantes universitarios: su concepción e instrumentación en el proceso docente». *La educación de valores en el contexto universitario*, CEPES-UH.
- FENERCOM (2010). *Guía de la cogeneración*. Fundación de la Energía de la Comunidad de Madrid, Dirección General de Industria, Energía y Minas de la Comunidad de Madrid. Madrid.
- FRAILE, D. (2007). *Cogeneración: Aspectos tecnológicos*. EOI Escuela de Negocios. Disponible en: http://api.eoi.es/api_v1_dev.php/fedora/asset/eoi:45276/componente45275.pdf.
- LOZANO SERRANO, M. Á. (1998). *Cogeneración*. Universidad de Zaragoza, Área de Máquinas y Motores Térmicos, Departamento de Ingeniería Mecánica. Disponible en: <http://www.sizea.gov.co/Portals/o/Gie/Tecnologias/cogeneracion.pdf>.
- Plantas de cogeneración (1ª parte)*. Madrid: energiza.org, renovetec 2012. Disponible en: <http://www.energiza.org/anteriores/energizanoviembre2012.pdf>.
- MÁRQUEZ RESTREPO, P. A. (2014). «Diseño e implementación de un sitio web como estrategia para la enseñanza-aprendizaje de la nomenclatura química inorgánica». Tesis de grado presentada como requisito final para optar por el título de Magister en Enseñanza de las Ciencias Exactas y Naturales. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Universidad Nacional de Colombia, Manizales, Colombia.
- RODRÍGUEZ ALBA, E.; Y. BUENO MONTANA ET AL. (2016). «Sitio web para el aprendizaje en la carrera de Ingeniería Mecánica». *Revista Ciencias Pedagógicas e Innovación, UPSE*. Diciembre, vol. IV, No. 2.
- RUIZ, J. E. H. (2009). «Análisis de las prestaciones de un sistema de cogeneración». Tesis Proyecto de Grado para optar por el título de Ingeniero Mecánico, Coordinación de Ingeniería Mecánica. Universidad Simón Bolívar, Sartenejas.

ESTUDIO DE LOS TIPOS DE PLANTAS DE COGENERACIÓN PARA SU APLICACIÓN EN LAS INDUSTRIAS DEL PERÚ

Por **Juvenal Ccama Huillca*** y **Dr. Alberto Eduardo Calvo González****

*Estudiante del 5to. año de la carrera de Ingeniería Mecánica, Centro de Estudio de Tecnologías Energéticas Renovables, Ceter, Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría.

E-mail: jhuve.ch@gmail.com

**Profesor Titular de la carrera de Ingeniería Mecánica, Centro de Estudio de Tecnologías Energéticas Renovables, Ceter, Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría.

E-mail: aegcalvo@ceter.cujae.edu.cu

Resumen

Este trabajo abarca el estudio de la cogeneración y sus tipos de realización en Perú y la búsqueda de industrias peruanas favorables para la cogeneración. Estos sistemas utilizan el calor residual producido durante la generación de electricidad para generar energía térmica aprovechable, permitiendo un consumo de combustible más eficiente. En Perú la cogeneración tiene un mercado incipiente en el que se han detectado barreras de carácter tecnológico que impiden su crecimiento. Sin embargo, las posibilidades para la cogeneración son muy grandes, principalmente gracias a la disponibilidad de reservas de gas natural a un precio competitivo. La aplicación de la cogeneración en el sector industrial del Perú aportaría al país mejoras al balance energético a nivel nacional, confiabilidad del sistema de suministro eléctrico y un menor impacto ambiental, así como una serie de ahorros económicos y energéticos a las empresas. Entre las industrias peruanas favorables para la cogeneración se encuentran las industrias de productos alimenticios, textiles, siderometalúrgicas, materiales de construcción, refinerías, productos químicos y farmacéuticos, y entre otras industrias que necesiten energía térmica y eléctrica en sus sistemas de producción.

Palabras clave: Cogeneración, eficiencia, industrias de Perú.

STUDY OF THE TYPES OF COGENERATION PLANTS FOR THEIR APPLICATION IN THE INDUSTRIES OF PERU

Abstract

This work covers the study of cogeneration and its types of realization, the current situation of cogeneration in Peru and the search for Peruvian industries favorable to cogeneration. These systems use the waste heat produced during the generation of electricity to generate usable thermal energy, allowing a more efficient fuel consumption. In Peru, cogeneration has an incipient market in which technological barriers have been detected that impede its growth. However, in the country the possibilities for cogeneration are very large, mainly thanks to the availability of natural gas reserves at a competitive price. The application of cogeneration in the industrial sector of Peru would contribute to the country improvement in the energy balance at national level, reliability of the electricity supply system, and a lower environmental impact, as well as a series of economic and energy savings to companies. Peruvian industries favoring cogeneration include food, textiles, sidero-metallurgical, construction materials, refineries, chemical and pharmaceutical industries, and other industries that require thermal and electrical energy in their production systems.

Key words: Cogeneration; efficiency; industries of Peru.

Introducción

Actualmente entre los nuevos desafíos que tienen las empresas se encuentran el aumento de la producción con mayor eficiencia que vaya de la mano del cuidado del medioambiente. Las plantas de cogeneración se presentan como una opción tecnológica que podría generar para las empresas una serie de ahorros económicos y energéticos por encima de 30 % según algunos autores, y un menor impacto ambiental.

Perú está aún lejos de ser eficiente energéticamente, comenzando porque el último balance de energía útil, que refleja la proporción de energía que se está usando eficientemente, data de 1998 e indica que 34 % del total de la energía producida era medianamente bien usada. Esto prácticamente significaría que 66 % de la energía se usa ineficientemente [El Comercio, 2014].

En Perú las posibilidades para la cogeneración son muy grandes, especialmente gracias a la disponibilidad de reservas de gas natural a un precio competitivo. Diversas actividades del sector industrial se pueden beneficiar, pues los costos de producción de energía eléctrica mejoran significativamente, pudiéndose vender a la red interconectada nacional el excedente de la energía eléctrica generada por el sistema de cogeneración.

Las tecnologías de cogeneración son tecnologías maduras y conocidas desde hace años, especialmente en los países más desarrollados donde su mercado ha alcanzado una gran madurez. Pero en el caso de Perú, a pesar del esfuerzo del gobierno de promover la penetración de la cogeneración como alternativa de generación en el país, según se manifiesta en el Reglamento de Cogeneración publicado en diciembre de 2005 y con modificaciones en 2006, 2007 y 2009 [TECH4CDM, 2009]; este es un mercado incipiente en el que se han detectado barreras de carácter tecnológico que impiden su crecimiento. Por ello el objetivo de este trabajo es analizar los tipos de plantas de cogeneración para su aplicación en el sector industrial de Perú.

La cogeneración

El término «cogeneración» se emplea para designar la producción secuencial de energía térmica y energía eléctrica a partir de una fuente primaria de energía, estando normalmente esta producción de energía térmica y eléctrica ligada a un proceso industrial, comercial o de servicios. El atractivo fundamental de las plantas de cogeneración se basa en que tienen una óptima eficiencia en las transformaciones energéticas, con mínimos consumos de combustible primario y con un menor impacto ambiental [RENOVETEC, 2012; Haro y Crispín, 2015].

En una central termoeléctrica tradicional normalmente se quema un combustible fósil (carbón, fuel, diésel, gas natural) para producir una energía térmica de baja calidad en forma de gases de combustión o vapor, a alta presión y temperatura. Actualmente la conversión lograda es inferior a 42 %, el resto se «tira» a la atmósfera en forma de gases de escape. Pero ocurre que la mayoría de los procesos industriales, comerciales o de servicios requieren calor a una temperatura relativamente baja, por lo que estos procesos pueden simultanear la producción de electricidad

y aprovechar ese calor residual, llegando a unos aprovechamientos energéticos que pueden oscilar entre 75 % y 90 % de la energía química contenida en el combustible [FENERCOM, 2010; RENOVETEC, 2012].

Los elementos comunes a cualquier sistema de cogeneración son los siguientes [RENOVETEC, 2012]:

- Fuente de energía primaria. Suele ser gas natural, gas oil o fuel oil.
- El motor. Es el elemento encargado de convertir energía térmica en mecánica. Dependiendo del tipo de planta, puede tratarse de turbinas de gas, de vapor o motores alternativos.
- El sistema de aprovechamiento de energía mecánica. En general suele estar formado por alternador y transformadores de tensión, pero también puede tratarse de compresores, bombas, etc., en los cuales se aprovecha directamente la energía mecánica.
- El sistema de aprovechamiento de calor. Puede tratarse de calderas recuperadoras de calor en gases de escape, calderas convencionales, secaderos o intercambiadores de calor.
- Sistemas de refrigeración. Una parte de la energía térmica contenida en el combustible no será aprovechada en la planta y debe ser evacuada. Las torres de refrigeración, los aerocondensadores o los intercambiadores suelen ser elementos habituales de estos sistemas.
- Sistema de tratamiento de agua. Tanto el sistema de refrigeración como el de aprovechamiento de calor requieren de especificaciones en las características físico-químicas del fluido que utilizan (generalmente agua), que precisa de una serie de sistemas para su tratamiento y control.
- Sistema de control, que se encarga del gobierno de las instalaciones, normalmente muy automatizadas.

Tipos de plantas de cogeneración

Cogeneración con turbina de gas en ciclo simple:

En los sistemas con turbina de gas se quema combustible en un turbogenerador. Parte de la energía se transforma en energía mecánica, que se transformará en energía eléctrica con la ayuda del alternador (Fig. 1). Su rendimiento eléctrico es normalmente inferior al de los motores alternativos, pero presentan la ventaja de permitir una recuperación fácil del calor concentrado, en su práctica totalidad, en los gases de escape, los cuales están a una temperatura de 500 °C, idónea para producir vapor en una caldera de recuperación [FENERCOM, 2010; RENOVETEC, 2012].

El sistema consta de una turbina de gas y una caldera de recuperación, generándose vapor directamente a la presión de utilización en la planta del proceso asociada a la cogeneración. Su aplicación es adecuada cuando las necesidades de vapor son importantes (>10 t/h), situación que se encuentra fácilmente en numerosas industrias (alimentaria, química, papelera). Son plantas de gran fiabilidad y económicamente rentables a partir de un determinado tamaño y si tienen un importante número de horas de funcionamiento con demanda de calor continua [FENERCOM, 2010; RENOVETEC, 2012].



Fig. 1. Planta de cogeneración con turbina de gas [Fraile, 2007].

Cogeneración con turbina de vapor

En estos sistemas (Fig. 2), la energía mecánica se produce por la expansión del vapor de alta presión procedente de una caldera convencional. Actualmente su aplicación ha quedado prácticamente limitada como complemento para ciclos combinados o en instalaciones que utilizan combustibles residuales, como biomasa y residuos [FENERCOM, 2010; RENOVETEC, 2012].

En dependencia de la presión de salida del vapor de la turbina se clasifican en turbinas a contrapresión (presión por encima de la atmosférica), y a condensación (presión por debajo de la atmosférica), y han de estar provistas de un condensador. En ambos casos se puede disponer de salidas intermedias, extracciones, haciendo posible la utilización en proceso a diferentes niveles de presión [FENERCOM, 2010; RENOVETEC, 2012].



Fig. 2. Planta de cogeneración con turbina de vapor [Fraile, 2007].

Cogeneración en ciclo combinado con turbina de gas

La denominación como ciclo combinado proviene de que se combinan dos ciclos: el de gas (ciclo Bryton de la turbina de gas) y el de agua-vapor (ciclo Rankine de la turbina de vapor) [FENERCOM, 2010; RENOVETEC 2012].

Los gases de escape de la turbina de gas atraviesan la caldera de recuperación (Fig. 3); en ella se produce vapor

de alta presión. Este vapor se expande en una turbina de vapor y produce energía eléctrica adicional. El escape de la turbina será vapor de baja presión, que puede aprovecharse como tal o condensarse en un condensador presurizado y producir agua caliente o agua sobrecalentada, que será utilizada en la industria asociada. En este tipo de ciclo, si la demanda de calor disminuye, el vapor sobrante en el escape de la turbina puede condensarse, con lo que toda la energía de los gases no se pierde, sino al menos se produce cierta cantidad de electricidad [FENERCOM, 2010].



Fig. 3. Planta de cogeneración en ciclo combinado con turbina de gas [Fraile, 2007].

Cogeneración con motor alternativo de gas o fuel en ciclo simple

Utilizan gas, gasóleo o fuel oil como combustible. En general se basan en la producción de vapor a baja presión (hasta 10 bares) o aceite térmico, y en el aprovechamiento del circuito de agua de refrigeración de alta temperatura del motor (Fig. 4). Son también adecuadas para la producción de frío por absorción. Este tipo de instalaciones es conveniente para potencias bajas (hasta 15 MW), en las que la generación eléctrica es muy importante en el peso del negocio. Los motores son la máquina térmica que más rendimiento eléctrico han alcanzado [FENERCOM, 2010].

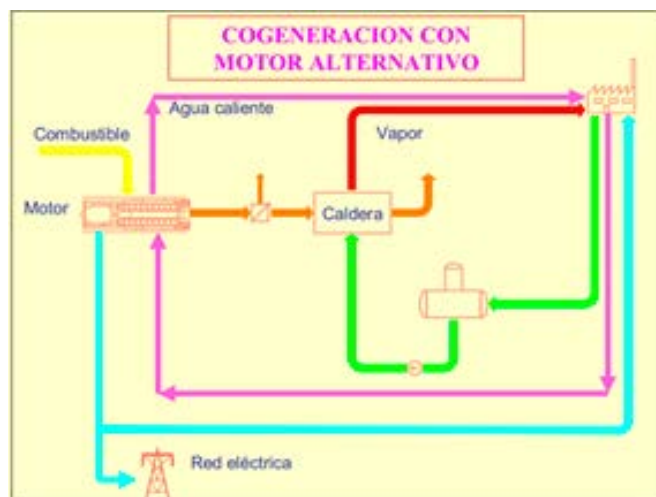


Fig. 4. Planta de cogeneración con motor alternativo [Fraile, 2007].

Cogeneración con motor alternativo de gas o fuel. Ciclo simple para aprovechamiento de gases directos

Existe la posibilidad de aprovechar directamente el calor de los gases de escape sin hacerlos pasar por una caldera. El gas de escape puede ser utilizado en aplicaciones tales como secaderos, bien aplicando directamente el gas de escape sobre el material que se debe secar o mediante un intercambiador gas-aire. Este último es el sistema representado en la Figura. 5, donde se aprovechan en cascada el calor del circuito de alta temperatura (AT) de motores y el de los gases para calentar aire. Si se toma el aire a calentar de la sala del motor, es posible recuperar además una parte del calor de radiación del motor [FENERCOM, 2010].



Fig. 5. Diagrama de proceso de planta de cogeneración con motor de gas, para generación de aire caliente [FENERCOM, 2010].

Cogeneración en ciclo combinado con motor alternativo

En este tipo de plantas el calor contenido en los gases de escape del motor se recupera en una caldera de recuperación (Fig. 6) y produce el vapor utilizado en una turbina de vapor para generar más energía eléctrica o energía mecánica. El circuito de refrigeración de alta temperatura del motor se recupera en intercambiadores, así como el calor de los gases que abandonan la sección de generación de vapor hacia la turbina de vapor, y el calor recuperado se utiliza directamente en la industria asociada a la planta de cogeneración [FENERCOM, 2010].



Fig. 6. Planta de cogeneración en ciclo combinado con motor alternativo [Fraile, 2007].

La cogeneración en Perú

Situación actual:

Actualmente en el ámbito peruano existen alrededor de seis empresas que disponen de plantas de cogeneración en sus instalaciones; todas pertenecen al sector industrial. Se cuenta con estos sistemas solo en industrias que usan fuente de energía primaria o calores residuales como en las plantas azucareras, en la refinería de zinc de Cajamarquilla, en la refinería de Ilo, en sudamericana de fibras, en la refinería La Pampilla y en la refinería de Talara [Carrillo Villena, 2008; EntornolInteligente, 2015].

Aunque no se han realizado estudios formales de potencial de cogeneración desde el año 2000, se estima que el potencial técnico está en torno a 500 MW (Tabla 1), mientras que el potencial económicamente viable podría estar sobre los 200 MW. De los diferentes sectores, el industrial es el que presenta el mayor potencial (70,8 %) [TECH4CDM, 2009].

Los costos de inversión relacionados con sistemas de cogeneración en el país se estiman entre 1000 a 1500 US\$ por kW instalado, mientras que los costos de operación y mantenimiento, utilizando gas natural, serían alrededor de 0,06 a 0,08 US\$ por kWh generado [TECH4CDM, 2009].

Marco regulatorio del sector

El marco regulatorio que afecta a las instalaciones de cogeneración está viene definido por los documentos siguientes [TECH4CDM, 2009]:

- La Ley de Concesiones Eléctricas (LCE) (1992) norma lo referente a las actividades relacionadas con la generación, transmisión, distribución y comercialización de la energía eléctrica.
- En el reglamento (1993) de la Ley se establecen los derechos y obligaciones para las entidades que desarrollan actividades de generación, como son: presentar la información técnica y económica al Comité de Operación Económica del Sistema Interconectado Nacional (COES) y al Organismo Supervisor de la Inversión en Energía y Minería (OSINERGMIN), facilitar las inspecciones técnicas, cumplir con las normas de conservación del medioambiente y del Patrimonio Cultural de la Nación, entre otras.
- El D.L. 28.832 «para asegurar el desarrollo eficiente de la generación eléctrica» fue emitido en 2006 y es la que, en orden de importancia, sigue a la LCE, ya que la modifica y perfecciona en varios puntos. La Ley recoge la problemática de déficit de generación e introduce cambios de forma de incentivar las inversiones en nueva generación. Establece respecto a los proyectos de cogeneración lo siguiente:

Se define la cogeneración como el proceso de producción combinada de energía eléctrica y energía térmica que es parte integrante de una actividad productiva, en el cual la energía eléctrica está destinada al consumo propio o de terceros.

Se define al generador como titular de una concesión o autorización de generación. En la generación se incluye la cogeneración y la generación distribuida.

Medidas para la promoción de la generación distribuida y cogeneración eficientes conectadas al SEIN, como por ejemplo, permite el uso de las redes de distribución pagando únicamente el costo incremental incurrido.

- Reglamento de Cogeneración, publicado en 2005 y con modificaciones en 2006, 2007 y 2009; establece las condiciones que deben cumplir las instalaciones de cogeneración. Algunas de sus principales disposiciones son:

Establece las definiciones de autoconsumo de potencia y energía destinada al consumo del proceso productivo, del cual forma parte integrante el proceso de cogeneración. El proceso será medido y registrado de manera independiente para efecto de las valorizaciones del COES.

Se determinan los pasos que se deben seguir para obtener la calificación como cogenerador.

Establece los valores mínimos de rendimiento eléctrico efectivo (REE) y la relación entre energía eléctrica y calor. Se presentan los valores de REE, que deben ser superados o igualados para poder acceder al gas a precio de generación.

El precio del gas natural aplicable a los cogeneradores se establece al mismo precio que para generadores eléctricos.

Las centrales de cogeneración calificadas tendrán prioridad en el despacho cuando operen en modo de cogeneración, pero no serán consideradas para la determinación del costo marginal de corto plazo.

Los cogeneradores pagarán el derecho de conexión de acuerdo solo con la excedentaria, contratada con terceros o al spot.

El cogenerador que opte por integrarse al COES podrá comercializar su potencia y energía entregada al sistema con los distribuidores, generadores y/o

clientes libres. Las transferencias que resulten de la operación económica del sistema serán liquidadas según los procedimientos del COES.

El cogenerador que no sea integrante del COES debe tener contratada la venta de la totalidad de su potencia y energía.

Barreras a la cogeneración

Barreras tecnológicas:

Las tecnologías de cogeneración son tecnologías maduras y conocidas desde hace años, especialmente en los países más desarrollados donde su mercado ha alcanzado una gran madurez. Pero en el caso de Perú, este es un mercado incipiente en el que se han detectado barreras de carácter tecnológico que impiden su crecimiento. A continuación se analizan las principales barreras detectadas [TECH4CDM, 2009]:

- Falta de proyectistas, instaladores y mantenedores capacitados. El mercado de la cogeneración en Perú es un mercado poco maduro, lo que hace que la demanda existente de los diferentes servicios asociados a estas plantas, como son los de ingeniería, instalación y mantenimiento, sea baja. Además de la escasez de servicios, también se ha detectado la escasez de proyectistas, instaladores y mantenedores calificados. Esto genera problemas técnicos en las plantas que finalmente repercuten en la confianza del usuario con respecto a estas tecnologías. Algunos de estos problemas técnicos son la falta de conocimiento tecnológico o proyectos mal definidos. Un problema típico asociado a un proyecto mal definido es que, a la hora de integrar la planta de cogeneración en las instalaciones ya existentes, no se prevé la preparación de las infraestructuras que permiten la conexión a la red eléctrica o a las que suministran el gas natural a la planta, ya que estas infraestructuras no siempre están adecuadas a los requerimientos de la nueva planta de cogeneración.

Tabla 1. Potencial efectivo de cogeneración en los sectores económicos [Carrillo Villena, 2008; TECH4CDM 2009]

Sector	Potencial Efectivo (MW)	%	Inc. EE Autog. (MWh/año)	Exp. EE (MWh/año)	Inversión (MUS\$)	Ahorro Total (MUS\$/año)	PBT (años)
Industrial	126,4	70,8	946 051	235 534	138 471	59 420	2,3
Refinero	50,9	15,3	407 795	268 935	60 577	23 965	2,5
Minero-Metalurg..	15,6	9,2	114 770	0	10 249	2794	3,7
Servicios	3,8	4,7	18 161	3680	3404	1199	2,8
Total	196,7	100,0	1 486 777	508 149	212 701	87 378	2,4

- El desconocimiento del potencial que las tecnologías de cogeneración pueden ofrecer en Perú. El último estudio del potencial que ofrecen las tecnologías de cogeneración en Perú fue realizado en el 2000. Para poder desarrollar un mercado es necesario conocer cuál es su potencial para que los diferentes actores conozcan las ventajas técnicas y de ahorro, tanto energético como económico, que ofrece la implantación de las tecnologías de cogeneración.

Otras barreras

- Incertidumbre en el suministro del gas natural. El gas natural es uno de los combustibles que más se utiliza en instalaciones de cogeneración, por lo que la incertidumbre en el suministro de este combustible supone una barrera muy importante al desarrollo de estas tecnologías. La red que abastece de gas natural al país no es suficiente para satisfacer la alta demanda existente.
- Regulatorias. La falta de un marco regulatorio adecuado es otra barrera que hay que tener en cuenta. Aunque Perú dispone, desde 2005, de un Reglamento sobre la cogeneración, éste no está consiguiendo su objetivo de desarrollar el sector de la cogeneración en el país.
- Económicas. Los altos costes iniciales de las instalaciones de cogeneración, así como los elevados períodos de amortización se presentan como una importante barrera al desarrollo de este mercado.
- Educativas e información. El desconocimiento de la tecnología por parte de los usuarios disminuye la demanda del uso de estos sistemas. En ocasiones sucede que los potenciales usuarios conocen la existencia de la tecnología, pero no tienen toda la información, por lo que existe desconfianza a la hora de usarla.

Industrias peruanas favorables para la cogeneración

La industria peruana se desarrolla principalmente en las grandes ciudades, como Lima, Trujillo, Chiclayo, Piura, Tacna, Arequipa, Cusco e Iquitos. En Lima se concentra la más extensa y variada cantidad de fábricas. Las demás ciudades de Perú tienen una industria ligera encargada de la fabricación de medios de consumo (alimentos, vestidos y artículos de uso doméstico) [Chávez Hidalgo y Chávez Ramírez *et al.* 2005].

En Perú las posibilidades para la cogeneración son muy grandes, principalmente gracias a la disponibilidad de reservas de gas natural a un precio competitivo, por lo que diversas actividades se pueden beneficiar, pues los costos de producción de energía mejoran significativamente; pudiendo vender a la red nacional el excedente de la energía eléctrica generada por el sistema de cogeneración. Entre las actividades que se podrían beneficiar de la cogeneración se encuentran [Llanos, 2015]:

- Industria de productos alimenticios elaborados a base de los recursos vegetales y animales, tales como grasas, productos de harina (fideos, galletas, pan, etc.), quesos, embutidos, conservas y bebidas.
- Industria textil, que fabrica hilos y tejidos de algodón y lana. La mayor parte de las industrias textiles se concentran en Lima.
- Industria químico-farmacéutica. Elabora productos plásticos, fibras sintéticas (rayón, poliéster), así como los medicamentos. Existen numerosas fábricas en Lima, Arequipa y Trujillo.
- Industria siderúrgica. Se localiza en Chimbote, Ica y Arequipa, transformando el acero y el hierro en alambre, tuberías, láminas, etcétera.
- Industria de materiales de construcción. Produce cemento, ladrillos, losetas, sanitarios, mármol, mayólicas y otros.
- Industria metal mecánico. Fabrica artefactos eléctricos, herramientas, puertas, ventanas, muebles metálicos y repuestos para automóviles y barcos.
- Industria de bebidas. Está bastante difundida en Perú y elabora bebidas gaseosas y bebidas alcohólicas, como cerveza, vino, pisco y champán, embotelladas o enlatadas.
- Industria papelera. El bagazo de la caña de azúcar y la pulpa de ciertas maderas son transformadas en papel, cartulina, cartón, que se utilizan en múltiples formas.
- Industria editorial. Dedicada a la elaboración e impresión de diarios, libros, revistas y otros productos.
- Industria peletera. Es la derivada de la curtiembre de los cueros, suelas, badana y gamuzas.
- Industria naval. Dedicada a la construcción y reparación de los barcos; se encuentra en el Callao.

Conclusiones

En Perú se han detectado barreras de carácter tecnológico, como falta de proyectistas, instaladores y mantenedores capacitados; desconocimiento del potencial de cogeneración en el país, entre otras, que impiden el crecimiento de las tecnologías de cogeneración.

Gracias a la disponibilidad de reservas de gas natural a un precio competitivo, en el Perú las posibilidades para la cogeneración son muy grandes. Su aplicación en el sector industrial aportaría al país mejoras al balance energético a nivel nacional, confiabilidad del sistema de suministro eléctrico, un menor impacto ambiental, así como una serie de ahorros económicos y energéticos a las empresas. Se estima que el potencial de cogeneración económicamente viable podría estar sobre los 200 MW, en la que el sector industrial es el que presenta el mayor potencial (70,8 %).

Entre las industrias peruanas favorables para la cogeneración se encuentran las industrias de productos alimenticios, textiles, siderometalúrgicas, materiales de construcción, refinerías, productos químicos y farmacéuticos, y otras industrias que necesiten energía térmica y eléctrica en sus sistemas de producción.

Recomendaciones

Desarrollar programas de capacitación por parte del gobierno, entre firmas de ingeniería europeas con experiencia en proyectos de cogeneración y las firmas de ingeniería locales.

Diseñar programas de información en el país sobre el funcionamiento y beneficios de esta tecnología, especial-

mente dirigidos a los diferentes sectores económicos en los que esta se puede aplicar.

Realizar un estudio actual sobre el potencial existente de cogeneración en Perú. Además, a la hora de diseñar un nuevo marco regulatorio se pueden tomar como ejemplos aquellos países en los que el mercado de la cogeneración está más desarrollado y por tanto también su legislación.

Bibliografía

- CARRILLO VILLLENA, A. (2008). «Eficiencia energética y administración de la demanda en el sector productivo». Lima-Perú, Ministerio de Energía y Minas, Dirección General de Electricidad, Ministerio de la Producción.
- CHÁVEZ HIDALGO, S. V. *et al.* (2005). «Historia de la Industria Nacional». Universidad de San Martín de Porres, Facultad de Ciencias Administrativas y RR.II.
- El Comercio (2014). «El Perú aún no es un buen ejemplo en el buen uso de la energía». Retrieved, 12 de junio de 2017. Disponible en: <http://elcomercio.pe/economia/mundo/peru-buen-ejemplo-buen-energia-380477>.
- Entorno Inteligente (2015). «La cogeneración aporta ahorros económicos y energéticos mayores al 30 % en las empresas.» Retrieved 18 de mayo de 2017. Disponible en: <http://www.entornointeligente.com/articulo/5470593/PERU-La-cogeneracion-aporta-ahorros-economicos-y-energeticos-mayores-al-30-en-las-empresas-29032015>.
- FENERCOM (2010). «Guía de la Cogeneración». Madrid, Fundación de la Energía de la Comunidad de Madrid, Dirección General de Industria, Energía y Minas de la Comunidad de Madrid, Madrid.
- FRAILE, D. (2007). «Cogeneración: Aspectos tecnológicos». EOI Escuela de Negocios.
- HARO LYNCH, J. F. Y R. D. CRISPIN GERMAN (2015). «Ahorro de energía primaria mediante el diseño de un sistema de trigeneración en la empresa austral group». Facultad de Ingeniería, Escuela Académico-Profesional de Ingeniería en Energía. Nuevo Chimbote- Perú, Universidad Nacional del Santa.
- LIANOS, A. (2015). «Actividades económicas en Perú». Retrieved 10 de junio de 2017. Disponible en: <http://www.reportaje.com.pe/economia-peru.html>.
- RENOVETEC (2012). «Plantas de cogeneración» (1ra. parte). Madrid, energiza.org.
- TECH4CDM (2009). «La cogeneración en Perú».

INTENSIFICACIÓN DE LA TRANSFERENCIA DE CALOR EN UN INTERCAMBIADOR DE CALOR COMPACTO MEDIANTE PERTURBACIÓN DE FLUJO EN ALETAS

Por Ania Hernández Ruiz* y M.Sc. Ing. Alberto Menéndez Pérez**

*Estudiante del 5to. año de la carrera de Ingeniería Mecánica, Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría, UTHJAE.

**Profesor del Centro de Estudio de Tecnologías Energéticas Renovables, Ceter, Facultad de Ingeniería Mecánica, Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría, UTHJAE.

E-mail: alberto@ceter.cujae.edu.cu

Resumen

En este trabajo se realiza una simulación del comportamiento de un intercambiador de calor compacto, utilizando generadores de vórtices (GV) como elementos creadores de turbulencia. Se analiza el comportamiento del coeficiente global de traspaso de calor (h), así como de la caída de presión (Δp), y se comparan estos parámetros con respecto al modelo liso (sin GV). El intercambiador tendrá aire a temperatura ambiente como fluido de entrada, mientras que la temperatura de la placa plana numérica estará por debajo de la temperatura ambiente. El estudio se realiza utilizando el software comercial, basado en volúmenes finitos, FLUENT (versión 6.2.16), construyendo el modelo primeramente en el programa GAMBIT (versión 2.2.30). Los resultados principales que se obtuvieron fueron la modelación del flujo y la transferencia de calor en el intercambiador de calor y la certificación, con elevada coincidencia del modelo liso empleado cuando se compara con los datos de la literatura. Adicionalmente se comprobó el aumento de la transferencia de calor y de la caída de presión en el modelo con GV cuando se compara con el modelo liso para diferentes números de Reynolds.

Palabras clave: Intercambiadores compactos, aleta plana, generador de vórtice.

INTENSIFICATION OF HEAT TRANSFER IN A COMPACT HEAT EXCHANGER BY FINS FLOW DISTURBANCE

Abstract

In the present I work a numerical simulation of character of the behavior of a compact heat exchanger comes true, using generators of vortexes (GV) like creative elements of turbulence. The behavior of the global coefficient of sale of heat will be analyzed (h) as well as of the pressure drop (p). And these parameters regarding compare (without GV). The exchanger will have like fluid from the start air at room temperature, while the temperature of the flat plate will rank below room temperature. The study will come true using the commercial software, based in finite volumes, FLUENT (version 6,2,16), forging the model firstly in the program GAMBIT (version 2,2,30). The main results that were obtained were the modelation of the flow and the heat transfer in the heat exchanger and the certification, with lofty coincidence, of the rude used model when he compares with the data of literature. Additionally, the increase of the transference of heat was checked and of the pressure drop in the model with GV when compares with the rude model for different numbers of Reynolds.

Key words: Compacts exchangers, flat fin, generator of vortex.

Introducción

La eficiencia energética es un tema de gran importancia en la actualidad, ya que la mayor parte de la energía con la que se mueve el mundo proviene de los recursos naturales no renovables, de ahí que aprovecharlos de la manera más idónea resulte de prioridad para los ingenieros vinculados con el tema. Este aprovechamiento de la energía en Cuba puede comenzar desde la explotación adecuada del equipo hasta su diseño óptimo. Entre las mejoras que puede recibir se considera que la manera más eficiente de aprovechar los recursos energéticos es diseñando equipos de calidad, con el fin de lograr mayor rendimiento con igual cantidad de energía a consumir, sin alterar o realizar cambios bruscos.

Mantener las condiciones deseadas en donde habitamos, o trabajar con los dispositivos necesarios, son dos ejemplos simples en los cuales pueden intervenir equipos que presenten un intercambiador de calor compacto en su estructura. Estos intercambiadores se utilizan ampliamente en el campo de la refrigeración y la calefacción, de ahí que su estudio resulte de interés.

Los intercambiadores de calor compactos son dispositivos en los cuales existe transferencia de calor entre dos o más componentes, con el fin de calentar o enfriar alguno de ellos. En este intercambio puede producirse, o no, contacto directo entre los componentes, pero cuando ocurre a través de una superficie esta juega un papel importante en el intercambiador. El coeficiente de transferencia de calor global entre las dos sustancias y el material es el principal responsable por el calor transferido.

Uno de los objetivos fundamentales de los ingenieros actualmente es tratar de incrementar los coeficientes de transferencia de calor. Los métodos para aumentar esos valores son diversos. Entre ellos se encuentran los dispositivos que aumentan el nivel de mezclado del fluido o su nivel de turbulencia. Estos métodos posibilitan mayor compacticidad de los intercambiadores de calor pues permiten mayores relaciones en el área de transferencia-volumen.

Intercambiadores de calor compactos

Los intercambiadores compactos son equipos encargados de transmitir energía en forma de calor entre dos sustancias a diferentes temperaturas y se usan generalmente cuando una de las sustancias es un gas. Los intercambiadores de calor que trabajan con gases y líquidos requieren una gran superficie de traspaso de calor en el lado de los gases, puesto que las resistencias térmicas de los gases pueden llegar a ser entre diez y quince veces la de los líquidos [Gupta, 2010]. Existen tres tipos de equipos de intercambio de calor compacto, tales son; gas-gas, líquido-líquido y líquido-gas. Cuando la cantidad de área que transfiere calor sobre el volumen que ocupa es mayor que $700 \text{ m}^2/\text{m}^3$, se dice que el equipo es compacto.

Los más comunes son los que presentan la configuración plano-aleta, espiral y tubo-aleta, aunque existen algunos que son regenerativos. Generalmente cuando se tiene una configuración tubo-aleta, por dentro de los tubos (circulares, rectangulares o elípticos) circula el líquido,

mientras que los gases se mueven por la superficie aleada. Un intercambiador de placa-aleta está conformado por una sucesión de placas delgadas selladas por juntas de goma que sirven para evitar la mezcla de los fluidos y establecer los canales de circulación del fluido. Para caracterizar el coeficiente de traspaso de calor, del lado de los gases se emplean las correlaciones del factor de Colburn (JH) y el número de Reynolds (Re).

Un intercambiador compacto es mucho mejor en la medida en que la diferencia de temperatura terminal sea menor. Para que el equipo trabaje en óptimas condiciones se debe asegurar que las aletas no tengan incrustaciones y que el espacio entre aletas no sea tan pequeño, favoreciendo así que circule el gas o que no sea tan grande como para que no se necesite de un equipo de circulación de flujo que consuma energía de la red. La manufactura y la selección del material que se debe emplear en estos equipos es un aspecto que puede resultar demasiado complejo, lo que dificulta la venta en un mercado determinado, sin importar cuán eficiente sea.

Técnicas de intensificación de transferencia de calor

Se describen un gran número de métodos para aumentar la transferencia de calor del lado del gas [Gupta, 2010]. Estos métodos están basados en alteraciones geométricas en la superficie de la aleta. Empleando generadores de vórtices, elementos que aumentan la rugosidad y aletas secundarias, entre otros, se logra modificar la estructura de los campos de flujo y de temperatura. Las técnicas o métodos de intensificación de calor es uno de los problemas fundamentales en el uso de los sistemas de intercambio de calor y pueden clasificarse en métodos pasivos y activos; la diferencia radica en que los activos requieren de energía externa mientras que los pasivos no requieren de la aplicación directa de la energía externa.

Cuando se analiza la relación entre el flujo de canal y el tubo [A.Y., T. y J. G. H., 1986], esta interacción se halla caracterizada por la formación de vórtices de herradura que se extienden sobre la zona que rodean los tubos, aumentando la transferencia de calor en la pared del tubo y en la región de la aleta sobre la cual los vórtices tienen influencia. Esta degradación de la transferencia de calor en la región posterior de los tubos puede ser disminuida, en parte, tratando de introducir el flujo principal sobre esa área poco activa. Los generadores de vórtices longitudinales han resultado muy efectivos cuando se busca este objetivo [Salviano, Daniel, Dezan y Yanagihara, 2015]. Estas técnicas han sido estudiadas por diferentes autores [Saha, Biswa y Sarkar, 2014; Sanders, 2005] y demostraron que estos generadores son muy eficientes en cuanto a mejorar la transferencia de calor sin producir grandes penalidades de presión. En la literatura [Saha, Biswa y Sarkar, 2014; C. C. W *et al.*] se encuentran disímiles modelos de generadores de vórtices, entre los cuales se destacan los del tipo alas delta, los rectangulares y los del tipo hoyuelo (*dimple*).

Simulación numérica y procedimientos

En este trabajo se realiza un estudio del comportamiento de las pérdidas de presión y del coeficiente de transfe-

rencia de calor sobre una superficie que posee una protuberancia en forma de «casquete esférico». Se investiga el patrón de flujo y transferencia de calor cuando la disposición de la protuberancia con respecto al flujo principal es variada. El objetivo es encontrar la forma y la disposición que mejores resultados produce cuando se compara contra la placa plana en condición lisa.

Los resultados futuros de este trabajo pretenden ser extendidos a superficies de intercambiadores de calor con mayor complejidad geométrica de manera que puedan tener sus superficies intensificadas utilizando este tipo de estructuras. Es de esperar que un comportamiento positivo sobre una placa plana, debidamente identificado su mecanismo, pueda ser extendido a superficies de intercambio de mayor complejidad. El resultado cuantitativo puede, de hecho, ser diferente, pero el cualitativo debe tener algún nivel de similitud.

Las herramientas básicas para el diseño del modelo geométrico, mallado y computacional de los modelos son los softwares *Autodesk Inventor 2016*, (*Geometry And Mesh Building Intelligent Toolkit*) *Gambit 2.2.30* y *Ansys Fluent 6.3.26*, respectivamente.

Para el modelo se suministra como condición de contorno el conocimiento de la velocidad de entrada del fluido en el canal y su temperatura, así como la temperatura de la superficie de los tubos. Se desprecian las posibles resistencias térmicas entre el tubo y el cuello de la aleta, con el propósito de simplificar el trabajo. La temperatura en la superficie de las aletas se determina a partir del cálculo conjugado (conducción-convección) de transferencia de calor.

Características básicas del modelo

El canal mostrado simula la circulación del flujo de aire en el intercambiador de calor compacto, posee 12 mm de ancho, 1 mm de altura y 60 mm de profundidad, y la placa con la protuberancia en forma de casquete esférico colocado en a 8 mm de la entrada del canal en el centro de la placa con un radio de 0,5 mm tiene un espesor de 0,1mm, 23 mm de profundidad, 12 mm de ancho y material de la aleta es aluminio.

La aleta sola no es suficiente para realizar la modelación de la misma, se precisa de un canal a través del cual emular la circulación del aire. El canal garantiza que la aleta quede envuelta por el fluido que circula sobre ella y junto con la aleta compone todo el dominio bajo estudio.

El canal fue construido en tres partes diferentes conectadas entre sí, con una longitud total de 98,148 mm y una altura de 2,54 mm, mientras que el ancho coincide con la mitad del espaciado transversal. Después de construida la geometría se exporta con formato CAD y archivo con extensión *.SAT (Figs. 1 y 2). La aleta, como puede observarse en la Figura 2, ha sido incluida en el centro del dominio, dividiendo así en dos regiones el canal de flujo que, a su vez, coincide con el espacio entre aletas subsiguientes.

En la Figura 2 se presenta el dominio computacional con las condiciones de frontera empleadas en la solución numérica. A continuación se resumen dichas condiciones de contorno.

- Entrada-velocidad de entrada.
- Salida-presión de salida.
- Aleta arriba-pared.
- Aleta abajo-pared.
- Entrada de aleta-pared.
- Salida de aleta-pared.
- Tubo-pared.
- Pared izquierda-simétrica.
- Pared derecha-simétrica.
- Periódica-periódica.
- Borde del tubo-pared.

En la Figura 1 puede apreciarse también las regiones por donde entra y sale el aire.

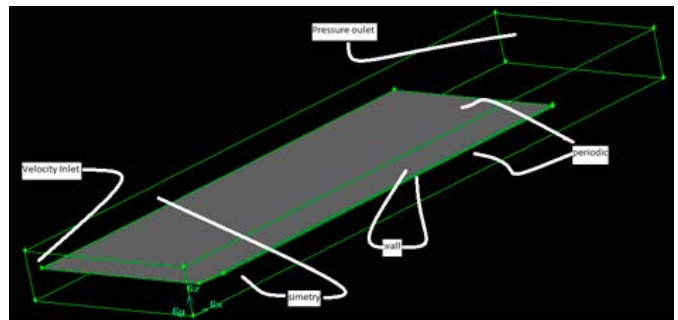


Fig. 1. Representación de las condiciones de contorno del canal y la aleta.

El modelo después de mallado y con la malla previamente suavizada en el solver se presenta en la Figura 2.

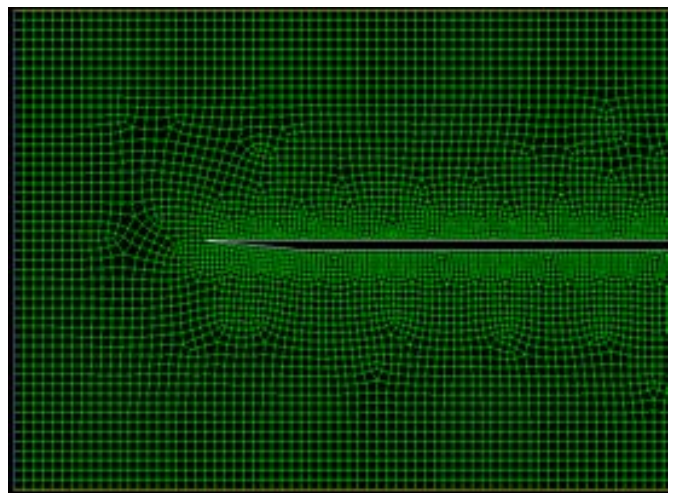


Fig. 2. Vista lateral de una sección del modelo y la malla en la región cercana a la pared de la placa.

Características del flujo

El flujo es similar estacionario, tridimensional, con los campos de velocidad y de temperatura desacoplados, incompresible y con propiedades constantes bajo las siguientes condiciones de operación:

- Presión manométrica de operación: 0 kPa.
- Densidad del aire: 1,1774 kg/m³.
- Viscosidad absoluta: 1,684*10⁻⁵ kg/m*s.
- Velocidad del flujo a la entrada: Entre 0,5 y 5 m/s.

- Temperatura del aire a la entrada del modelo: 300 K.
- Temperatura de la pared del tubo: 286 K.
- Conductividad térmica del aire: 0.0242 W/m*K.
- Calor específico a presión constante: 1006.43 J/kg*K.

Obtención del comportamiento termohidráulico del intercambiador de calor con aletas lisas y con aletas con el casquete esférico

Al comparar la placa plana de iguales condiciones se puede observar que la cantidad de calor transferido por unidad de área no se ve afectada prácticamente con la aparición del casquete como se muestra en las Figuras 3 y 4.

Comparación entre el modelo y las correlaciones

Los vórtices longitudinales generados por esta protuberancia son de pequeña magnitud, por lo que no afectan de manera significativa las condiciones termo-hidráulicas de la placa, evidenciándose en las Figuras 5 y 6 la escasa diferencia de una a otra. Esto se debe a que el volu-

men ocupado por la protuberancia es pequeño en comparación con el volumen de la placa.

Las Figuras muestra que utilizando el mencionado factor de comparación, la aleta mixta aquí estudiada presenta un comportamiento termohidráulico mejor que el de una aleta plana, al menos para las dimensiones mostradas y en el rango de velocidades estudiadas. A pesar de que la aleta con el casquete tenga un comportamiento superior, la diferencia es mínima en comparación con la aleta plana.

Conclusiones

Una vez terminado este trabajo se puede llegar a las conclusiones siguientes:

La aleta plana posee un comportamiento termohidráulico similar a la aleta que posee el casquete debido a sus dimensiones tan reducidas.

La caída de presión es leve en la aleta con el generador de vórtice, debido a que sus dimensiones son pequeñas como para generar mayor turbulencia.

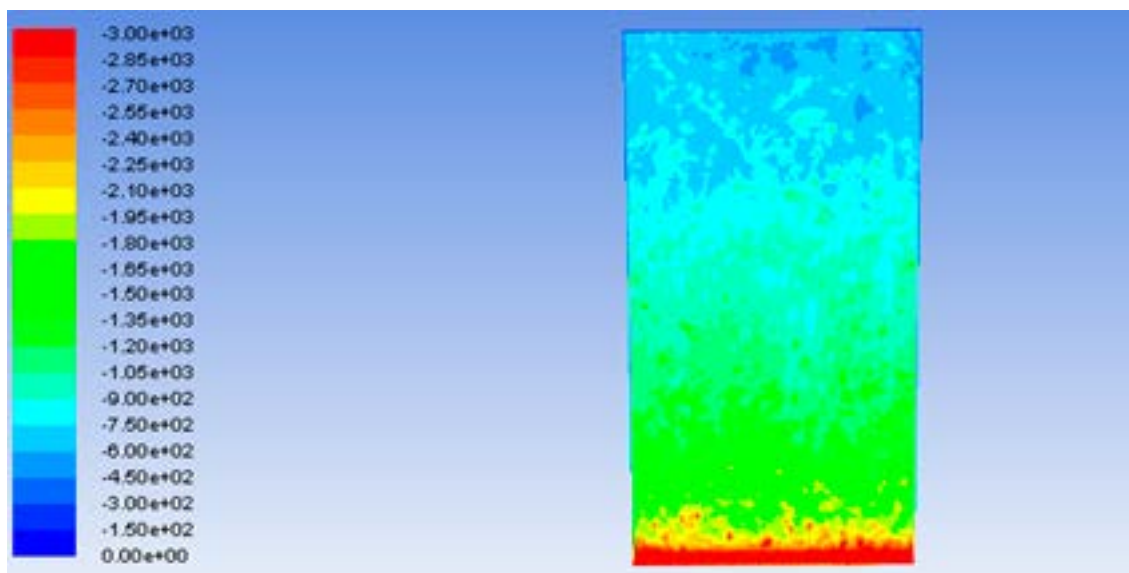


Fig. 3. Ploteo de los coeficientes de transferencia de calor en la placa plana.

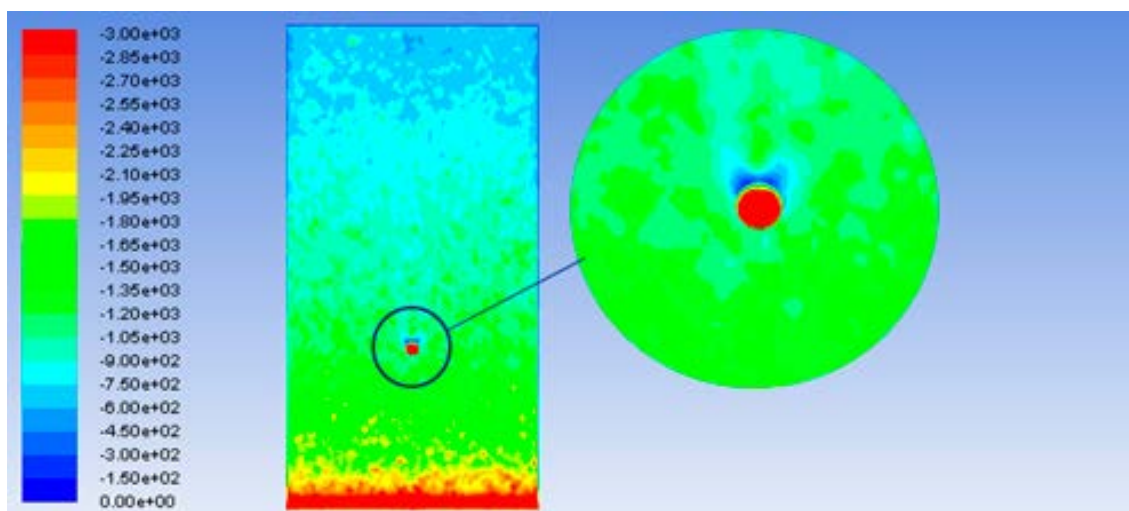


Fig. 4. Ploteo de los coeficientes de transferencia de calor en placa con el casquete esférico.

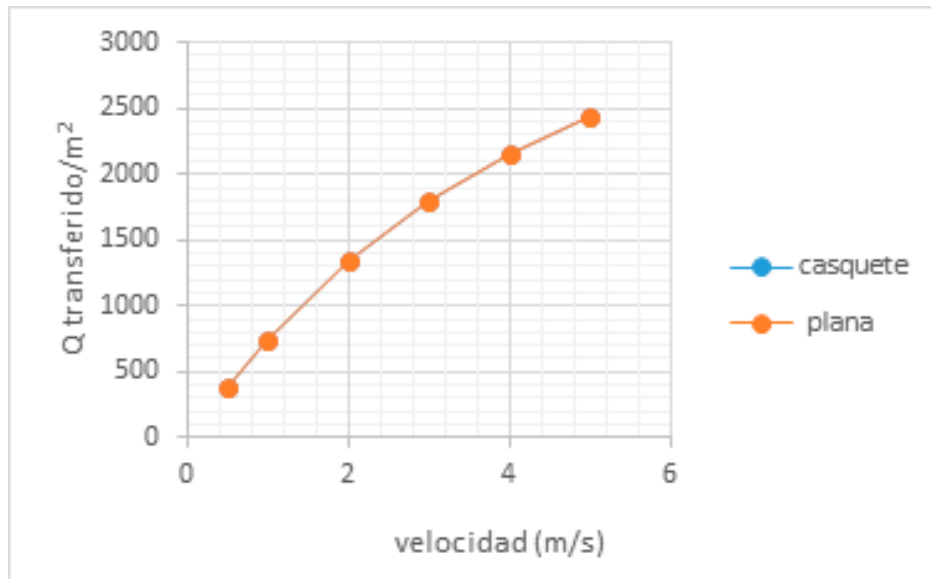


Fig. 5. Calor transferido por unidad de área v/s velocidad.

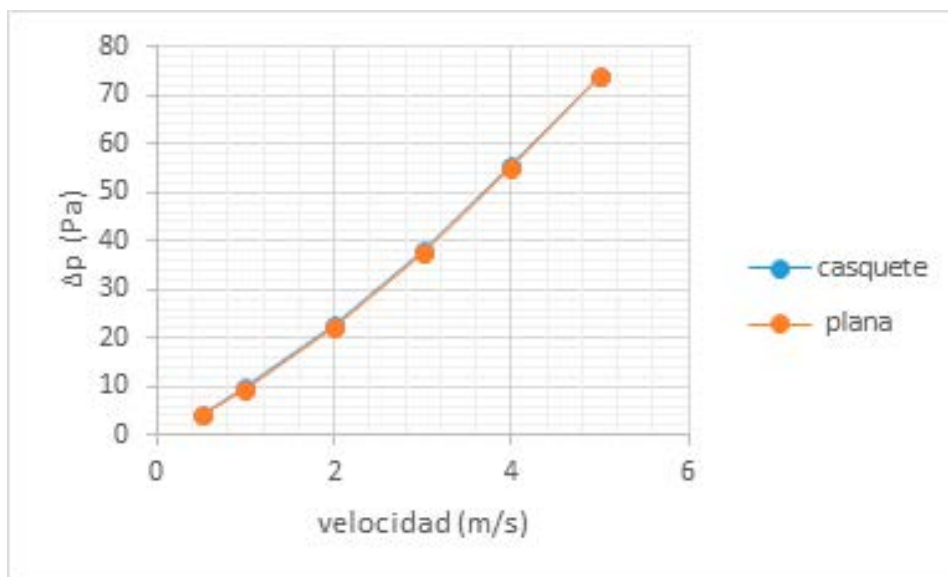


Fig. 6. Caída de presión v/s velocidad.

Bibliografía

- GUPTA, M. (2010). *Numerical study of heat transfer enhancement in a plate-fin heat exchanger using rectangular winglet type vortex generator*, in *Department of Mechanical Engineering*. National Institute of Technology.
- A. Y., T. Y J. G. H. (1986). *Heat transfer enhancement downstream of vortex generators on a flat plate*, in *Eighth International Heat Transfer Conference*. San Francisco, USA. pp. 2903–2908.
- SALVIANO, L. O.; DANIEL J. DEZAN Y J. I. YANAGIHARA (2015). «Optimization of winglet-type vortex generator positions and angles in plate-fin compact heat exchanger: response surface methodology and direct optimization». *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 82: pp. 373-387.
- SAHA, P.; G. BISWAS, y S. SARKAR (2014). «Comparison of winglet-type vortex generators periodically deployed in a plate-fin heat exchanger-A synergy based analysis». *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 74: pp. 292-305.
- AMEEL, B. ET AL. (2014). «Interaction effects between parameters in a vortex generator and louvered fin compact heat exchanger». *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 77: pp. 247-256.
- SANDERS, P. A. (2005). *Effects of Louver Length and Vortex Generators to Augment Tube Wall Heat Transfer in Louvered Fin Heat Exchangers*. Virginia Polytechnic.
- C. C., W. ET AL. (2015). *An experimental study of the air-side performance of fin-and-tube heat exchangers having plain, louver, and semi-dimple vortex generator configuration*. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 80: pp. 281-287.

INSTALACIÓN DE TUBOS DE VIDRIO AL VACÍO DE BAJA PRESIÓN EN UN ESQUEMA ENERGÉTICO PRESURIZADO

Por **José Raúl López Camejo*** e **Ing. Jesús M. Iglesias Ferrer****

*Estudiante Universitario de 5to. año. Centro de Estudio de Tecnologías Energéticas Renovables, Ceter, Facultad de Ingeniería Mecánica, Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría, UTHJAE, La Habana, Cuba.

E-mail: raulopez92@nauta.cu

**Investigador. Profesor Universitario. Centro de Estudio de Tecnologías Energéticas Renovables, Ceter, Facultad de Ingeniería Mecánica, Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría, UTHJAE, La Habana, Cuba.

E-mail: jiglesias@alastor.cu

Resumen

El trabajo presenta el cálculo de la cantidad de colectores solares de tubos de vidrio al vacío de baja presión, para incorporarlos en un esquema energético presurizado en el Hotel Patriarca, en Varadero. Después de realizar una búsqueda bibliográfica en temas referentes a la tecnología solar de calentamiento de agua a baja temperatura, y efectuar las visitas programadas a diferentes emplazamientos de colectores solares térmicos utilizados en el calentamiento de agua para distribución centralizada en objetos de obras con fines turísticos en Varadero, fueron agrupados los colectores solares acordes con su tecnología de fabricación y condiciones de explotación, según su esquema estructural-funcional, sin depender de la presión hidráulica que soporten estos equipos.

El trabajo está enfocado en los colectores solares de tubos de vidrio al vacío industrial de modelo LPC 47-1530 y a los equipos que componen este esquema estructural-funcional que permiten ser instalados en trazados hidráulicos de alta presión.

Palabras clave: Esquema energético, energía solar térmica, aporte energético solar.

INSTALLATION OF TUBES OF GLASS TO THE VACUUM OF LOW PRESSURE IN AN ENERGY OUTLINE PRESSURIZED

Abstract

The work presents the calculation of the amount of solar manifolds of tubes of glass to the vacuum of low pressure to incorporate them in an energy outline pressurized in the Patriarca Hotel, in Varadero. After carrying out a bibliographical search in persist relating to the solar technology of heating of water to low temperature and carry out the prograded visits to different emplacements of solar thermal manifolds used in the heating of water for distribution centralized in objects of works with tourist end in Varadero, permitted us group the solar manifolds according to your technology of manufacture and conditions of exploitation according to your structural-functional outline without depending of the hydraulic pressure that support these equipments.

The work is focussed in the solar manifolds of tubes of glass to the vacuum industrialist of model LPC 47-1530 and to the equipments that compose this structural-functional outline that permit be installed in hydraulic engineers sketches of high pressure.

Key words: Energy outline, solar thermal energy, contributes solar energetic.

Introducción

En el mundo continúa el aumento del consumo energético debido al crecimiento de la población y su constante demanda de energía en diferentes procesos sociales y tecnológicos; a partir de esto se han hecho búsquedas de nuevos recursos energéticos que puedan satisfacer estas

crecientes demandas. El hombre, con el propósito de mejorar y asegurar su vida, investigó y encontró nuevas fuentes de energía, como: la eólica, la geotérmica, la solar térmica y fotovoltaica y la hidráulica, entre otras; ya que estas tecnologías energéticas están llamadas a ser las únicas que nos van a abastecer energéticamente.

En Cuba se está generalizando el uso de la energía solar térmica en el calentamiento de agua para uso doméstico, social e industrial; el empleo de la energía solar térmica tiene como objetivo disminuir el consumo de portadores energéticos y de contaminantes para el medioambiente en procesos tecnológicos donde los rayos solares pueden ser la fuente de calor; ejemplo de este desarrollo tecnológico se puede apreciar en los cientos de metros cuadrados de colectores solares instalados en Varadero, donde se encuentra la mayor cantidad instalados en la provincia de Matanzas. En todas estas instalaciones turísticas se tienen instalados sistemas solares térmicos con colectores solares chinos, cuyo objetivo es utilizar los rayos solares como solución energética para el calentamiento del agua de uso sanitario. Estas instalaciones energéticas utilizan el modelo de colector solar de tecnología china con tubos de vacíos para sistemas de baja presión; están acoplados a termotanques y poseen un sistema de intercambio térmico.

El hotel Patriarca, perteneciente al grupo Empresarial GAE del Minfar, es ejemplo de esta tecnología energética, donde se alojan los turistas que visitan estas instalaciones en la playa Varadero. El objetivo de este trabajo es incorporar los colectores solares de tubos de vidrio al vacío de baja presión en un esquema energético presurizado en el hotel Patriarca, en Varadero. En el trabajo se incluye la Tabla con los resultados energéticos calculados.

Desarrollo

El concepto de una instalación solar encierra tres sistemas básicos: un sistema de captación a base de colectores solares que sea capaz de entregar la energía necesaria en el día; un sistema de almacenamiento para acumular la energía ganada, en forma de agua caliente, y suministrarla cuando se requiera a cualquier hora del día, y un sistema de calentamiento auxiliar para suplir el déficit de energía solar, pues la radiación disponible no es constante y los cálculos se efectúan para valores medios anuales. Por este motivo no resulta económico calcular una instalación solar capaz de entregar 100 % de la energía necesaria, sino que los cálculos se realizan para tener una cobertura de 60 % a 80 % [Bérriz, 2013; Sánchez, 2014].

Básicamente se distinguen dos tipos de instalaciones solares en cuanto a la forma de circular el agua por la batería de colectores: sistema termosifónico y de circulación forzada. En el primero el agua circula entre el colector y el tanque de almacenamiento por diferencia de densidad, por lo que este tiene que hallarse por encima del colector; en el segundo el agua es movida por bombas recirculadoras en un lazo cerrado, entre el termotanque y los colectores, controladas por un sistema automático [Ecured, 2011; Bérriz, 2012].

Los sistemas termosifónicos son por lo general de dimensiones pequeñas, apropiados para el suministro puntual y colocados lo más cerca posible del lugar de consumo. En hotelería son muy utilizados en cabañas. Los sistemas forzados tienen la ventaja de que el tanque almacenador puede ubicarse en cualquier lugar, y son empleados fundamentalmente en instalaciones con distribución de agua caliente centralizadas [Terra, 2007; Saravia, 2008].

Existen diversos métodos para el cálculo de un sistema térmico solar (STS). Para este trabajo se usó un documento de

Excel elaborado por el Lic. Wilfredo Pérez Bermúdez titulado «Cálculo de instalación forzada»; resulta un método factible y bastante sencillo de usar para este tipo de instalaciones.

Los datos referentes al tipo y condiciones de utilización necesarios, suministrados o asumidos para el cálculo de la instalación solar, se resumen a continuación:

Datos generales del hotel Patriarca:

- Total de habitaciones: 100.
- Porcentaje de ocupación: 70.
- Huéspedes/habitación: 1,8.
- Litros/persona: 75.
- Aporte solar: 70 %.
- Temperatura de la red: 24 °C.
- Temperatura exigida en los tanques: 55 °C.
- Otros consumos: 1000 L.

La demanda total diaria de agua caliente para un día medio con los consumos indicados es de 10 450 L.

Cálculo del número de colectores solares

El colector solar que se debe emplear (es de tubos al vacío de alta eficiencia, que cuenta con 30 tubos de 1400 mm de longitud útil y un diámetro de 47 mm unidos a un manifold recolector de acero inoxidable con aislamiento térmico de poliuretano expandido y envoltura de aluminio prelacado que ofrece un alto grado de resistencia al ambiente corrosivo, y a la vez una buena rigidez mecánica. Los tubos son de borosilicato y la superficie absorbente obtenida por bombardeo de partículas en cámaras de vacío garantiza un coeficiente de absorción en el espectro visible de 0,93 y una emisividad en el infrarrojo de 0,10 [Rojas, 2009; Rensol, 2014].

Datos:

- Temperatura media del agua de la red: 24 °C.
- Temperatura ambiente media: 25 °C.
- Radiación solar media incidente: 5 kWh/m².
- Colector solar a emplear: Industrial de tubos al vacío LPC 47-1530.
- Área de captación: 3 m².

La eficiencia térmica del colector esta descrita por la ecuación:

$$\eta = 0.76 - 2.95 \cdot \frac{(T_m - T_a)}{G} \quad 12 \setminus^* \text{MERGEFORMAT}$$

Donde:

T_m : Temperatura media del agua de la red.

T_a : Temperatura ambiente media.

G: Radiación solar media incidente.

Los sistemas de recirculación-retorno incorporan importantes pérdidas térmicas, sobre todo cuando se trata de una red extensa. Estas pérdidas fueron asumidas siendo 10 % de la demanda energética diaria. La demanda energética diaria es de un 377 kWh/día, por lo tanto las pérdidas serían 37,7 kWh/día (Fig. 1)..

El número de colectores (NC) necesarios para suplir la fracción indicada de la demanda energética es: NC = 31 colectores.



Fig. 1. Colector solar de tubos de vidrio modelo LPC 47-1540.

Componentes:

1. Tubos de vidrio.
2. Cabezal.
3. Estructura.

Los tubos de vacío están compuestos por un doble tubo de vidrio, y el vidrio interior suele llevar un tratamiento a base de metal pulverizado para aumentar la absorción de radiación. Las dimensiones de los tubos son similares a las de un tubo fluorescente, en torno a los 60 mm de diámetro y 180 cm de largo [Rojas, 2009].

Estos colectores solares son calentadores de circulación forzada a baja presión (0,5 kg/cm²), destinados a instalaciones de grandes volúmenes de agua (piscinas, tanques térmicos atmosféricos). Su eficiencia térmica es de 60 %-75 % con rangos de temperatura entre 50 °C/ 95 °C [Saravia, 2008].

La Tabla 1 muestra el comportamiento del sistema solar después de haber calculado la cantidad de colectores que hay que instalar.

La columna 3 muestra la cantidad total de energía aportada por la instalación solar en un día promedio; esto depende principalmente de la cantidad y la eficiencia de la batería de colectores solares, el área de captación y la radiación solar incidente.

La columna 4 muestra el porcentaje de ocupación en caso de hoteles, hospitales, escuelas o porcentaje de utilización del volumen de agua previsto; estos datos fueron ofrecidos por el hotelero.

La columna 5 expone la demanda energética en agua caliente para el servicio previsto y un día promedio del mes; esto depende de una serie de datos, como los siguientes: número de habitaciones, huéspedes por habitación, litros de agua por huésped, temperatura exigida, otros consumos (lavandería, cocina, etc.), pérdidas de retorno, porcentaje de ocupación y temperatura del agua en la red.

La columna 6 muestra el porcentaje de la energía de la columna 5 que se suple con energía solar para un día promedio del mes de acuerdo al % de ocupación. Es la relación que existe entre el aporte solar de la instalación y la demanda energética.

La columna 7 muestra la utilización real de la instalación en dependencia de la demanda energética y el aporte solar de la instalación. Si la instalación posee una deman-

da energética mayor que su aporte solar, la energía real que habría que utilizar sería la del aporte solar de la instalación.

La columna 8 muestra el porcentaje real de la relación de las energías de la columna 7 con la de la 5.

Tabla. Comportamiento energético del sistema solar.

MES	Rad. diaria W/m ² .dia	Aporte de la instalación solar W/m ² .dia	% Ocupación W mensual Estimado	Demanda energética KWh/día	% Cobertura Solar	Utilización real aporte solar W/m ² .dia	% Cobertura real
ENE	4.52	235.4	60.0	35.1	42.4	235.4	42.4
FEB	5.11	287.0	85.0	33.4	90.3	287.0	50.3
MAR	6.36	322.2	70.0	41.7	77.7	322.2	77.7
ABR	6.25	357.2	80.0	34.9	105.8	344.9	100.0
MAY	6.15	331.4	80.0	32.7	102.4	323.7	100.0
JUN	5.07	304.5	80.0	41.8	84.1	348.5	100.1
JUL	6.22	343.0	85.0	40.7	84.8	343.0	84.8
AUG	6.15	347.4	80.0	40.1	107.6	347.4	107.6
SEP	5.75	313.7	80.0	31.3	93.2	313.7	93.2
OCT	5.14	289.4	80.0	31.2	90.0	289.4	89.0
NOV	4.38	241.8	75.0	41.2	56.2	241.8	59.2
DIC	4.15	251.9	10.0	42.3	31.0	251.9	31.0
Total prom		1.19E+03		149.08	67.2	1.19E+03	72.8

Tabla 1. Comportamiento energético del sistema solar

Esquema estructural-funcional

Cuando el proyecto requiere agrupar varios colectores solares en módulos independientes, o en una batería (Fig. 2) de varios módulos trabajando en conjunto, siendo estos de baja presión, se seleccionó un esquema tecnológico compuesto por un sistema con tanque de inercia térmica con una correcta configuración para ser instalado en el hotel Patriarca en Varadero, con el objetivo de lograr un trazado equidistante de las redes hidráulicas y la mejor distribución de los flujos en el área del emplazamiento solar; nos referimos a las redes que suministran el agua a temperatura ambiente (ATA) desde el tanque de inercia a todos los equipos solares, así como las redes que colectan y entregan al intercambiador de placa plana. Las baterías de colectores solares en que no se logre una correcta compensación hidráulica, carecen de equipos que aportan más energía térmica solar que otros equipos en la misma batería; esto es inapropiado que suceda, pues el rendimiento global de la instalación energética disminuye y el aporte solar resulta insuficiente. Es importante definir correctamente la cantidad de equipos que hay que instalar en una batería de colectores solares trabajando en régimen forzado, pues en ocasiones se hace muy difícil lograr la compensación hidráulica y térmica del conjunto de equipos.

Esquema tecnológico

El esquema tecnológico se divide en tres partes: circuito primario, secundario y de consumo [Energiza, 2015].

El circuito primario está compuesto por un intercambiador de placa plana, las bombas de recirculación y un tanque de inercia térmica abierto a la atmósfera (Fig. 3), lo que evita que la presión del fluido afecte a la batería de colectores.

El circuito secundario no es más que el tanque solar, donde se almacena el agua caliente sanitaria (ACS), y las bombas de recirculación, tanto la de agua a alimentar como la de recirculación con el intercambiador. El circuito de consumo incluye el tanque auxiliar (Fig. 4) encargado de mantener la temperatura del ACS prevista para el consumo; este trabaja con resistencias eléctricas acopladas

al tanque auxiliar. Este circuito se usa en los días pocos soleados y durante la noche; trabaja automáticamente, ya que posee un termostato encargado de activar o desactivar las resistencias.



Fig. 2. Modelo digital de una batería de cuatro colectores solares.

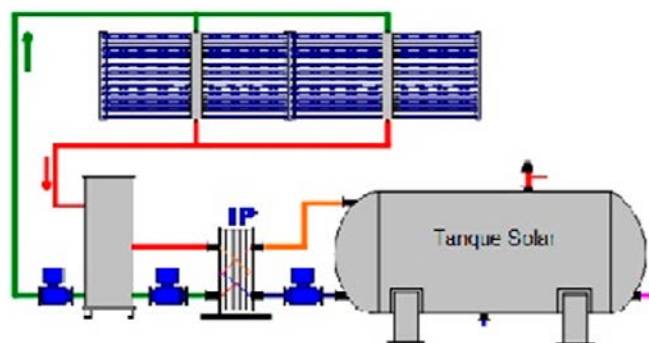


Fig. 3. Sistema con tanque de inercia térmica.

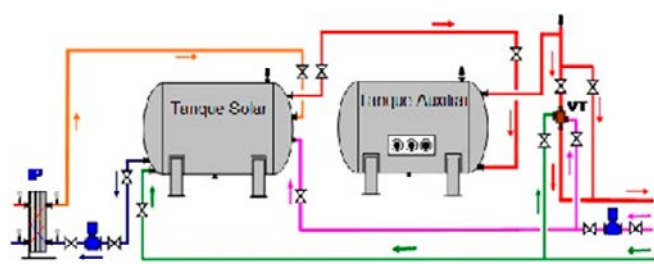


Fig. 4. Esquema simplificado de interconexión.

Después de realizar las inspecciones en los diferentes lugares y valorar las distintas zonas en el hotel Patriarca, se decidió colocar los equipos de la instalación en un área aislada donde fuera de gran facilidad la entrada del personal que atendiera estas instalaciones. La batería de colectores solares fue instalada en el techo de uno de los edificios del hotel donde se pudiera facilitar el montaje y la captación de los rayos solares para el calentamiento del ATA. Los otros equipos, dígame el tanque de inercia térmica, las bombas, el intercambiador de calor de placa plana y los tanques, tanto el solar como el auxiliar, fueron colocados en una caseta fuera del edificio en una zona donde el cliente no tuviera contacto con ellos y el personal de trabajo pudiera acceder fácilmente para verificar que la funcionalidad de los equipos fuera la correcta y en caso de mantenimiento tener una buena accesibilidad. De esta forma se determinó el área donde iban a ser emplazados los equipos para que estos sistemas solares trabajaran de forma adecuada.

Conclusiones

Se definieron los esquemas de principio estructural y funcional de los sistemas solares que trabajan en régimen forzado. Quedaron definidas también las características del modelo de colector solar LPC 47-1530 de tubos de vidrio al vacío. Se determinó la demanda total de agua a consumir en el hotel. Se definió el número de colectores solares de la instalación y el esquema estructural-funcional para la instalación solar. Se determinó el área donde sería emplazada la batería de colectores y fue definido el aporte energético solar de la instalación energética.

Bibliografía

- BÉRRIZ, L. (2012). «Calentador solar de tubos al vacío».
- BÉRRIZ, L. (2013). «Ventajas y desventajas de los calentadores solares».
- ECURED (2011). «Calentador de agua solar».
- Energiza (2015). «Sistema solar por termosifón».
- RENSOL (2014). «Colector solar industrial de tubos de vacío».
- ROJAS, C. R. B. (2009). «Los calentadores solares como una forma de fuente renovable de energía alternativa».
- SÁNCHEZ, M. A. C. (2014). «Diseño de un calentador solar de placa de calor para calentamiento de agua para uso doméstico». Universidad Nacional Autónoma de México.
- SARAVIA, L. (2008). «Colectores solares para agua caliente». INENCO, unas-CONICET Salta.
- Terra (2007). «Guía práctica de una instalación solar térmica».

ESTUDIO PRELIMINAR DE ALTERNATIVA DE EMPLEO DE UNA INSTALACIÓN SOLAR TÉRMICA PARA UN HOTEL EN GUANTÁNAMO, CUBA

Por **Eddy Frank Fernández Carballo***

*Estudiante de 5to. año de Facultad de Ingeniería Mecánica de Universidad Tecnológica de La Habana
José Antonio Echeverría, UTHJAE, La Habana, Cuba.
E-mail: efernandezc@mecamail.cujae.edu.cu; efernandezc@nauta.cu

Resumen

En el trabajo se realiza el cálculo preliminar de una Instalación solar térmica cuya finalidad es la producción de agua caliente sanitaria en un hotel ubicado en la provincia de Guantánamo, Cuba. Se efectuó primero el cálculo de la demanda energética, y después el de la fracción solar que pudiera dar dicha instalación para precisar el número de colectores solares térmicos que se necesitan y presentar un análisis económico inicial que evidenciara el ahorro que representa el uso de dicha tecnología en el hotel.

Palabras clave: Instalación solar térmica, agua caliente sanitaria, demanda energética, fracción solar.

STUDY PRELIMINARY OF ALTERNATIVE OF EMPLOYMENT OF A THERMAL SOLAR INSTALLATION FOR A HOTEL IN GUANTÁNAMO, CUBA

Abstract

The paper is about the preliminary calculation of a Thermal Solar Installation whose purpose is the production of sanitary hot water in a hotel located in the city of Guantánamo, Cuba. Making the first calculation of the energy demand, and after the solar fraction that could give this installation; to know in the number of thermal solar collectors that there are needed and to present an analysis economic initial that prove the saving that represents the use of this technology in the hotel.

Key words: Thermal Solar Installation, Dilutes Hot Sanitary, energetic demands, solar fraction.

Introducción

El continuo aumento del consumo energético en el mundo, derivado del extraordinario crecimiento de la población mundial, obliga a una constante búsqueda de nuevos recursos energéticos que puedan satisfacer dicha demanda. El uso de las fuentes renovables de energía se alza hoy como una de las principales alternativas utilizadas por los países para satisfacer esta demanda, deslizando su matriz energética de las llamadas fuentes convencionales de energía y aunando esfuerzos en aras de

buscar un desarrollo sostenible y proteger el medioambiente. De entre las posibles alternativas de fuentes renovables de energía centramos este proyecto en la obtenida directamente del Sol, específicamente en la solar térmica [Vázquez, 2006].

El objetivo de este trabajo es realizar un estudio que de forma preliminar permita conocer las necesidades energéticas de una instalación solar térmica para el calentamiento de agua sanitaria en un hotel ubicado en Guantánamo, Cuba.

Desarrollo

El uso del agua en el sector hotelero es una cuestión de considerable interés que afecta su cuenta de resultados, no solo por el gasto mensual del suministro, sino también por otras consecuencias indirectas, pues se ha comprobado que la adopción de una estrategia de responsabilidad medioambiental mejora la rentabilidad económica de los hoteles. Los turistas valoran cada vez más las variantes ambientales en la elección de su destino [Rodríguez, 2010].

Los sistemas de energía solar térmica utilizan la radiación solar para obtener agua caliente. Unas placas especiales, denominadas colectores, concentran y acumulan el calor del sol y lo transmiten al fluido que deseamos calentar [Guía práctica..., 2007].

De entre las diferentes variantes de sistemas solares térmicos desarrolladas a nivel mundial sobresalen por su aplicación, en el sector hotelero, dos sistemas fundamentales: los sistemas termosifónicos y los sistemas forzados.

Sistemas solares de circulación natural (termosifónicos)

La circulación en el circuito primario solar se efectúa por convección natural. El fluido en el captador asciende a medida que se calienta a consecuencia de la radiación solar y, al alcanzar el acumulador colocado por encima del captador, transfiere su calor y vuelve enfriado hacia el captador. Funcionan sin bombas o controles y por ello requieren de un diseño y montaje muy cuidadoso que minimice las pérdidas de carga [Corado, s/a].

Sistema solar térmico tipo forzado

Es un sistema integrado por diferentes elementos, entre los que se encuentran uno o varios colectores solares térmicos (CST), un depósito acumulador (DA) de agua caliente sanitaria (ACS), vasos de expansión, bombas de impulsión y accesorios de control (sondas, central de control, entre otros). Estos elementos pueden ser suministrados como parte de un kit (sistema prefabricado) o como componentes independientes. Esta instalación evita los defectos propios de los sistemas de circulación natural. Como inconvenientes se encuentran las necesidades de energía eléctrica, de regulación y control de la circulación [Martínez, Rodrigo, Escobar, Encina y Jiménez, 2010].

Problemática a solucionar

Se requiere suministrar agua caliente a 60 °C al sistema de aguas sanitarias de un hotel de tres estrellas y 200 camas, en Guantánamo, Cuba (Cuadro 1).

Según el criterio de consumo de ACS, para el diseño de instalaciones de este tipo se necesitan 55 L/día por cama. Después, si se espera que la instalación tenga un porcentaje de ocupación de 85 % con 1,8 huésped/habitación, se precisan 19 800 L/día=19,8 m³/día. Esta instalación se encuentra ubicada en Guantánamo, Cuba, por lo que los datos de temperatura promedio por mes y la irradiación serán los ofrecidos por la estación meteorológica de Guantánamo (Latitud: 29°) [Guía..., 2016].

Cuadro 1: Criterio de consumo de agua caliente sanitaria (ACS)

Criterio de consumo de ACS para diseño de instalaciones	
Tipo de edificio (indicador)	L/día a 60 °C (índice)
Viviendas familiares	30 por persona
Viviendas multifamiliares	22 por persona
Hospitales y clínicas	55 por cama
Hotel 4*	70 por cama
Hotel 3*	55 por cama
Hotel/Hostal 2*	40 por cama
Hosta/Pensión 1*	35 por cama
Camping	40 por emplazamiento
Residencias (ancianos, estudiantes, etc.)	55 por cama
Vestuarios/duchas colectivas	15 por servicio
Escuelas	3 por alumno
Cuarteles	20 por persona
Fábricas y talleres	15 por persona
Administrativos	3 por persona
Gimnasios	20 a 25 por usuario
Lavanderías	3 a 5 por kg de ropa
Restaurantes	5 a 10 por comida
Cafeterías	1 por almuerzo

Aplicando la ecuación para determinar la demanda energética de la instalación y siguiendo el método de cálculo F-Chart, se obtiene (Tabla 1) [LUE, 2010]:

$$q = V_{agua} \left[\frac{m^3}{día} \right] * C_p \left[\frac{kJ}{kg * ^\circ C} \right] * (t_{trab} - t_{\square}) [^\circ C] * \rho \left[\frac{kg}{m^3} \right]$$

Cálculo de la fracción solar de la instalación

Utilizando las herramientas informáticas EXCEL y Derive, para garantizar una fracción solar de 70 % en la instalación, se obtuvieron los resultados mostrados en la Tabla 3 [LUE, 2010]:

Se ha seleccionado el colector HP ESCOSOL SUNMAX 15 58/1800, ya que es resulta un modelo económico con muy buena calidad. El soporte es de aluminio, lo que garantiza simplicidad de montaje y su coste, muy competitivo respecto al de acero galvanizado. Además, están fabricados

con la tecnología más avanzada de tubos de vacío. Respecto al colector plano, tiene ventajas que lo hacen muy adecuado para este tipo de instalaciones.

Algunas de las ventajas más importantes son:

- El vacío minimiza las pérdidas por transmisión.
- Facilidad de montaje, pues al no tener agua en el sistema de captación los tubos se pueden montar en la fase final de la obra.
- La forma tubular aprovecha mejor la radiación solar.

El área de captación fue calculada con el software Derive; la fracción solar mensual real anual es 68,1 % de la demanda anual de energía (Tabla 3). El valor del área obtenido fue 130 m²; por lo tanto se necesitan $\frac{130}{2.40} = 54,10 \approx 55$ colectores del modelo especificado.

Tabla 1. Demanda energética para cada mes de la instalación hotelera

Meses	Tprom. (°C)	Ht (kWh/m ² día)	Ht (MJ/m ²)	Días (N)	Q(MJ/mes)	ΔT(s/mes)
Enero	23,3	5,28	24,552	31	94 385,8674	2 678 400
Febrero	23,6	5,86	24,612	28	84 554,8704	2 419 200
Marzo	24,1	6,37	29,6205	31	92 328,4098	2 678 400
Abril	25	6,51	29,295	30	87 110,1	2 592 000
Mayo	26,2	5,95	27,6675	31	86 927,5836	2 678 400
Junio	27,6	5,6	25,2	30	80 639,064	2 592 000
Julio	28,4	6,01	27,9465	31	81 269,5752	2 678 400
Agosto	28,5	6,01	27,9465	31	81 012,393	2 678 400
Septiembre	28	5,84	26,28	30	79 643,52	2 592 000
Octubre	28,3	5,43	25,2495	31	81 526,7574	2 678 400
Noviembre	26	5,24	23,58	30	84 621,24	2 592 000
Diciembre	24	5,03	23,3895	31	92 585,592	2 678 400
Prom	26		26,27825	30,41666667	85 550,4144	2 628 000
				Total	1 026 604,973	

Tabla 2: Fracción solar mensual y total de la instalación

Meses	D ₁	D ₂	f	f*Q(MJ)	f anual
Enero	0,69037	-0,07	0,605	57 110,30	68,1%
Febrero	0,69776	-0,05	0,610	51 542,46	
Marzo	0,85145	-0,06	0,716	66 092,09	
Abril	0,86374	-0,06	0,724	63 029,89	
Mayo	0,84472	-0,04	0,710	61 741,89	
Junio	0,80263	-0,07	0,684	55 143,47	
Julio	0,91264	-0,07	0,756	61 424,88	
Agosto	0,91554	-0,04	0,756	61 207,18	
Septiembre	0,84749	-0,03	0,711	56 649,64	
Octubre	0,82196	-0,13	0,701	57 114,99	
Noviembre	0,71569	-0,11	0,626	52 973,63	
Diciembre	0,67047	-0,08	0,591	54 759,11	
				Total	69 889,52

Tabla 3. Especificaciones técnicas del colector seleccionado (ESCOSOL)

Datos técnicos					
Modelo	SUNMAX 15/58	SUNMAX 15/58	SUNMAX 20/58	SUNMAX 24/58	SUNMAX 30/58
Material cabezal	Aluminio anodizado				
Material marco	Aluminio anodizado				
Material Heat Pipe	Cobre				
Núm. de tubos	6	15	20	24	30
Diámetro/ longitud tubos	58/1800 mm				
Área apertura	0,57 m ²	1,42 m ²	1,89 m ²	2,27 m ²	2,48 m ²
Área total	1,033 m ²	2,4 m ²	3,16 m ²	3,77 m ²	4,07 m ²
Presión máx. operativa	6 bar				
Aislamiento	Lana roca				
Conexiones	22 mm				
Medidas en mm	2030x500x105	2030x1100x105	2030x1600x105	2030x2000x105	2030x2500x105
Caudal test (área apertura)	91,5 kg/h.m ²				
Pérdida de carga (área apertura)	<13 Kpa	<13 Kpa	<14 Kpa	<16 Kpa	<20 Kpa
Peso	25 kg	40 kg	60 kg	80 kg	90 kg
Ángulo trabajo	5-90 grados				
Máx. carga nieve	6 KN/m ²				
Máx. carga viento	300 km/h				
Contraseña homolog.	GPS-8408				

Evaluación económica de la instalación

A continuación se expone el análisis económico preliminar de la instalación, teniendo en cuenta que el kWh producido de forma convencional, utilizando gas natural, cuesta alrededor de 0,14 CUC y que la demanda de energía a satisfacer es de 1 026 604,973 (Mj/mes), es decir, 9505,60 kWh, que equivale a 1330,78 CUC.

Como se pretende un ahorro real de 68,1 % de la energía por medio de la instalación solar, la energía que realmente propiciaría el equipo auxiliar es de 2851,68 kWh y su precio estaría alrededor de los 399,23 CUC, lo que supone un ahorro de 931,54 CUC por cada kWh, con el uso de la instalación solar térmica. Suponiendo que la instalación solar trabaje 8 h diarias, serían 7453,44 CUC de ahorro diario, y los mensuales rondarían los 186 336 CUC, lo que demuestra el ahorro sustancial que supondría el uso de

una instalación solar térmica en las instalaciones hoteleras existentes en el país (Fig. 1).

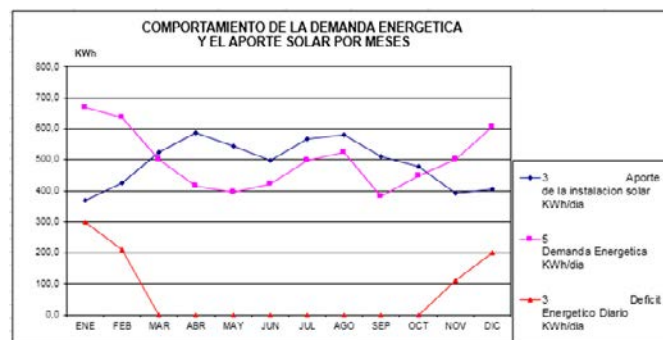


Fig. 1. Comportamiento de la demanda energética y el aporte solar.

Las líneas rojas muestran el comportamiento del déficit energético mensual, es decir, lo que tendrá que trabajar el sistema de apoyo para suplir las necesidades de agua sanitaria que la instalación solar no pueda brindar. Como se aprecia, durante casi todo el año la demanda de agua caliente sanitaria será abastecida por el sistema solar térmico.

Conclusiones

Para satisfacer la demanda de agua caliente sanitaria de un hotel de tres estrellas en Guantánamo es necesario poseer un área de 130 m^2 , donde serán ubicados 55 colectores, garantizando así una fracción solar anual de 68,1 %.

El empleo de la instalación solar térmica para este hotel en Guantánamo garantizará un ahorro de 931,54 CUC por cada kilowatt hora de energía. Esto demuestra que el uso de este tipo de tecnología en nuestro país supondrá un ahorro sustancial de combustibles convencionales y abre la puerta a futuros análisis que incluyan no solo al sector hotelero.

Bibliografía

- CORADO, J. R. d. I. C. (s/a). «Diseño la de instalaciones solares térmicas para producción de agua caliente sanitaria. Aplicación a un edificio de viviendas».
- «Guía práctica de una instalación de energía solar térmica» (2007).
- «Guía sobre energía solar térmica» (2006). Dirección General de Industria, Energía y Minas de la Comunidad de Madrid, p. 274.
- LUE, A. A. R. (2010). *Propuesta de un sistema solar térmico para la obtención de agua caliente sanitaria en un complejo deportivo*, p. 198.
- MARTÍNEZ, JUAN CARLOS; C. Y. RODRIGO ESCOBAR, SEBASTIÁN ENCINA, PABLO JIMÉNEZ (2010). *Guía de diseño e instalación para grandes sistemas de agua caliente sanitaria*. MINENERGIA/GEF/PNUD/CDT, p. 238.
- RODRÍGUEZ, G. (2010). *El gasto de agua que los hoteles no están teniendo en cuenta*. Bactery Safe System.
- VÁZQUEZ, J. S. (2006). *Proyecto de instalación energía*, p. 414.

DETERMINACIÓN DEL ÁNGULO DE INCLINACIÓN MÁS ADECUADO PARA CALENTADORES SOLARES PLANOS DE AIRE OPERANDO EN RÉGIMEN DE CIRCULACIÓN NATURAL EN CUBA

Por **Lázara Rosemary Moratón Linares***

*Estudiante de 5to. Año de la carrera de Ingeniería Mecánica. Centro de Estudio de Tecnologías Energéticas Renovables, Ceter, Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría.
E-mail: rfajardo@cubarte.cult.cu

Resumen

Este artículo expone la modelación de un colector solar plano para el calentamiento de aire operando con convección natural. El objetivo fue determinar el ángulo de inclinación máxima del colector que asegure su mayor rendimiento. Para ello se realizó la simulación del colector variando el ángulo de inclinación de 20° a 45° , buscando el de mayor eficiencia. Las simulaciones se realizaron en el software FLUENT 6.3.26 y GAMBIT 2.2.30. Después se obtuvo como conclusión principal que el ángulo de inclinación del colector igual a 45° es el más adecuado con una eficiencia de 56,47 %. Además, que existe asimetría en el perfil de velocidades del colector y que su eficiencia del mismo varía proporcionalmente con la variación del ángulo de inclinación.

Palabras clave: Colector solar plano, aire, eficiencia.

DETERMINATION OF THE BEST SOLAR AIR COLECTOR TILT WORKING IN NATURAL CONVECTION REGIME IN CUBAN CONDITIONS

Abstract

In this work was carried out the modeling of a flat solar collector for the heating of air operating with natural convection. The objective pursued is to determine the maximum angle of inclination of the collector to ensure its highest efficiency thereof. For this purpose, the collector was simulated by varying the angle of inclination from 20° to 45° , looking for the one with the highest efficiency. The simulations were performed in software FLUENT 6.3.26 and GAMBIT 2.2.30. After realizing these simulations, it was obtained as main conclusion that the angle of inclination of the collector equal to 45° is the most suitable with an efficiency of 58,9 %. In addition, there is asymmetry in the velocity profile of the collector and that the efficiency of the same varies proportionally with the variation of the angle of inclination.

Key words: Flat solar collector, air, efficiency.

Introducción

El ángulo de inclinación con que debe ser instalado un colector solar plano ha sido objeto de estudio desde hace largo tiempo. De los estudios previos se conoce, y constituyen hoy reglas prácticas en la rama del aprovechamiento

de la energía solar, que si se desea alcanzar máxima disponibilidad de energía anual la mejor inclinación de la superficie es aquella igual a la latitud del sitio donde se ubica. Para que la disponibilidad de energía sea máxima durante el verano, la inclinación de la superficie deberá ser

10° o 15° menor que la latitud geográfica; mientras que para lograr la máxima disponibilidad en invierno la inclinación debe ser de 10° a 15° mayor que la latitud del lugar. La inclinación de la superficie, no obstante, no constituye una variable crítica desde el punto de vista de disponibilidad, pues variaciones de 15° solo determinan cambios de aproximadamente 5 % en la disponibilidad de energía. Todos estos resultados corresponden a superficies con azimut 0° o 180° , en dependencia de si la superficie se halla en el hemisferio norte o sur.

El ángulo de inclinación de la superficie receptora que recibe mayor cantidad de radiación solar incidente puede no coincidir con el ángulo de inclinación que alcanza la máxima salida de energía del sistema solar. Esta diferencia se expresa claramente en sistemas de calentamiento de aire que funcionan en régimen de convección natural, pues, lógicamente, existe un ángulo de inclinación que garantiza la mayor disponibilidad de energía incidente y otro valor de ángulo de inclinación, diferente, que permite la mayor extracción de energía del sistema colector a través de la convección natural.

La evidencia de que el ángulo de inclinación que garantiza mayor disponibilidad de energía incidente no garantiza la mayor salida del sistema colector se demuestra en las localizaciones de muy baja latitud. En la latitud próxima a 0° , es decir, en regiones sobre o muy próximas al Ecuador geográfico, la inclinación debe ser de 0° si se desea una máxima disponibilidad energética durante todo el año; sin embargo, si se quisiera operar en ese lugar un colector en régimen de convección natural, no se podría porque no se establecería un flujo de salida de fluido que garantice la extracción suficiente de dicha energía.

En la literatura no existen trabajos investigativos que ofrezcan resultados sobre cuál debe ser el ángulo de inclinación más adecuado de la superficie colectora que garantice la mayor salida energética para colectores operando en régimen de circulación natural. En particular, para las latitudes correspondientes a nuestro país no existe un criterio fundamentado para la colocación de los colectores que operan en régimen de circulación natural en cuanto a la inclinación de la superficie.

Sin embargo, poder determinar cuál es el ángulo más adecuado de inclinación de los colectores de circulación natural en esta región próxima al trópico de Cáncer pudiera significar importantes reducciones de las áreas de colección que hoy se instalan, debido a los bajos rendimientos de esas instalaciones. Téngase en consideración que en condición normal el aire presenta bajos coeficientes de transferencia de calor por convección a su paso por los colectores, los cuales empeoran si no se garantiza el adecuado movimiento del fluido dentro del colector.

Materiales y métodos

Colector solar plano

Dentro de los diversos tipos de colectores solares los planos son los más comunes. Estos pueden ser diseñados y utilizados en aplicaciones donde se requiere que la energía sea liberada a bajas temperaturas, debido a que la temperatura de operación de este tipo de colector difícilmente rebasa los 100°C [Anil, 2013].

Las ventajas que podemos obtener con estos colectores con respecto a los de enfoque, que concentran la radiación solar, es que utilizan la energía solar directa y difusa, no requieren movimiento continuo para dar seguimiento al sol, prácticamente no necesitan mantenimiento y son de construcción más simple que los concentradores [Anil, 2013].

Su forma más simple consta de una lámina de vidrio o material transparente situado en la parte superior, un conducto por donde pasa el fluido que se debe calentar, una placa plana que actúa como un cuerpo negro para absorber calor y una estructura aislada térmicamente (espuma de poliuretano, poliestireno, lana de fibra de vidrio) que soporte los elementos anteriores [Ávila, J. M. M. F. y Beltrán, 2010] La Figura 1 muestra estos elementos.

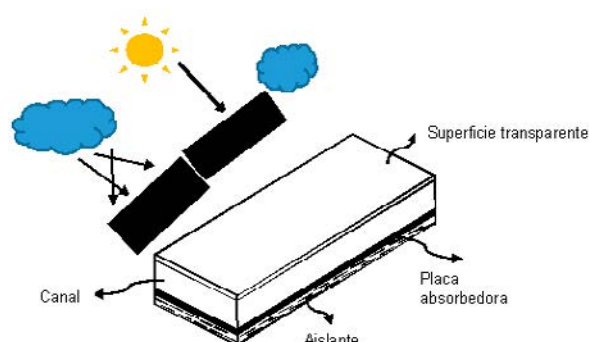


Fig. 1. Componentes de un colector solar plano.

Modelo computacional

El dominio de flujo consiste en un sector de colector solar plano para calentamiento de aire es una placa absorbidora lisa. Queda conformado como un emparedado compuesto de una placa de vidrio de $0,5\text{ cm}$ de espesor sirviendo de cobertura; descendiendo le sigue un canal de 5 cm de espesor por donde transita el aire, le sigue la placa absorbidora de $0,3\text{ cm}$ de espesor y para finalizar se encuentra una capa de material aislante de 3 cm de espesor. La longitud del colector es de 2 m y el ancho es de 20 cm .

El parámetro a estudiar será el ángulo de inclinación del colector que tomará valores de 30 , 35 , 40 , 45 , 50 y 55 grados, de forma que la circulación del aire ocurre por convección natural, ingresando por la parte inferior y saliendo por el extremo superior del colector.

Para el análisis se realizan las consideraciones siguientes:

1. El aire es un medio continuo e incompresible.
2. Las propiedades termofísicas del vidrio, de la placa absorbidora y del aislante se consideran constantes para una temperatura dentro del intervalo de operación.
3. El flujo de aire es estacionario y posee características de flujo turbulento.
4. El aislante solo intercambia calor con el ambiente exterior por convección, mientras que la cubierta de vidrio intercambia calor con el ambiente por convección y por radiación.
5. La superficie de las caras del vidrio, la placa absorbidora y del aislante correspondientes a la entrada y a la salida del aire se consideran adiabáticas.

Modelo numérico

La simulación numérica se realizó empleando un solucionador 3D, estacionario, implícito, basada en presión usando el código FLUENT 6.3. Las ecuaciones diferenciales parciales que gobiernan los procesos, es decir, las ecuaciones para la masa, la cantidad de movimiento y la energía son resueltas para la condición estacionaria. El acoplamiento presión-velocidad es llevado a cabo usando el algoritmo simple. La discretización usada para presión es el esquema Body Force Weighted, mientras que para energía, cantidad de movimiento y turbulencia se emplea un esquema UPWIND de Segundo Orden.

Para la incorporación de la radiación solar al modelo se usa el modelo de carga solar (Solar Ray Tracing) contenido en FLUENT 6.3. Se aplicó el calculador solar para determinar la irradiación solar recibida en el año, esto se realizó haciendo el análisis para el día medio de cada mes (Cuadro 1) y en las coordenadas correspondientes a 22° de latitud norte y -82° de longitud oeste.

Cuadro 1. Día medio de cada mes [Beckman, s/a]

Mes	Día
Enero	17
Febrero	16
Marzo	16
Abril	15
Mayo	15
Junio	11
Julio	17
Agosto	16
Septiembre	15
Octubre	15
Noviembre	14
Diciembre	10

Ecuaciones de flujo

Las ecuaciones que rigen los fenómenos presentes en el modelo son la de continuidad, de momentum y de energía, aparecen presentadas a continuación en coordenadas cartesianas y en notación tensorial:

Ecuación de continuidad:

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (1)$$

Ecuación de momentum:

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \rho u_i' u_j' \right] + \rho g \quad (2)$$

Ecuación de la energía:

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i T) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\frac{\mu}{P} + \frac{\mu_t}{P_t} \right) \left(\frac{\partial T}{\partial x_j} \right) \right] \quad (3)$$

Esquema numérico

Para la solución de este modelo se utilizó una malla de elementos de tipo hexaédricos, con aproximadamente 120 000 elementos (Fig. 2), los cuales incluyen el vidrio, el canal de aire, la placa absorbidora y el material aislante. Dicho mallado se realizó de forma diferenciada en cada zona de modo que se consiguió una malla más fina en la altura del canal de aire, aplicando un mallado de paso creciente partiendo desde la superficie inferior del vidrio y la superior de la placa, dirigiéndolo hacia el centro del canal de manera que se obtiene mayor precisión en las zonas de mayores gradientes.

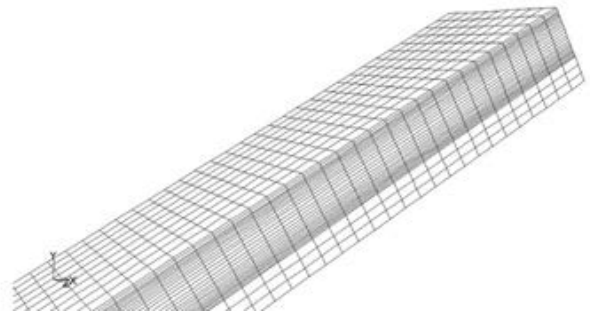


Fig. 2. Mallado del modelo.

Condiciones de contorno y parámetros de operación

Las condiciones de contorno colocadas al dominio computacional se corresponden con las condiciones de frontera físicas del colector. Las de contorno impuestas al aire fueron en la entrada del aire, *Pressure inlet*, y en la salida del aire, *Pressure outlet*. En el modelo viscoso, en las superficies de contacto entre aire-placa absorbidora y entre aire-vidrio se consideró condición de contorno de *Pared* con componentes de velocidad cero, es decir, adherencia e impermeabilidad [Koulibaly, s/a].

A todos los límites de los sólidos se les colocó condición de *Pared* con condiciones térmicas diferentes. Las superficies de entrada y las de salida del vidrio, de la placa y del aislante se tomaron *adiabáticas*. La pared inferior del aislante se consideró *pared con convección* y se impuso la temperatura del aire ambiente exterior y el coeficiente de transferencia de calor por convección. La pared superior del vidrio se consideró *pared con transferencia de calor mixta* (convección y radiación); nuevamente se impuso el coeficiente de transferencia del calor por convección, la temperatura del aire ambiente y la temperatura de radiación exterior. Las superficies límites entre el vidrio-aire, la placa absorbidora-aire y la placa absorbidora-aislante se consideran, cada una de ellas, desde el punto de vista térmico, como *pared acoplada* para considerar la transferencia de calor conjugada [Koulibaly, 2016].

A todas las superficies limitantes del ancho del dominio, superficies del lado derecho y del lado izquierdo del vidrio, del aire, de la placa y del aislante, se les aplicó condición de *simetría* [Koulibaly, 2016].

La superficie superior del vidrio está expuesta a la irradiación solar, determinada por el modelo de carga solar, y la superficie superior de la placa absorbidora recibe la radiación solar determinada por el modelo y la transparencia que se le asigne al vidrio en el modelo [Koulibaly, 2016].

El colector está compuesto por los materiales siguientes: la cubierta de vidrio, la placa absorbidora de acero y el aislante de fibra de vidrio. Las propiedades termo-físicas de dichos materiales y del fluido de trabajo, que es aire, son presentados en la Tabla 1.

Tabla 1. Propiedades termofísicas de los materiales del colector

Propiedad	Vidrio	Placa absorbidora	Aislante	Aire
Calor específico [J/kgK]	830	502,5	830	1006,43
Densidad [kg/m ³]	2200	8030	20	1,185
Conductividad térmica [W/mK]	1,15	16,3	0,1	0,0242

Entre las condiciones de operación se encuentran que la temperatura de entrada del aire al colector, que coincide con la temperatura ambiente, es 27 °C, y el efecto de la aceleración de la gravedad 9,80 m/s², actuando en la dirección negativa del eje, como es lógico. Además, para tener en consideración el efecto de variación de densidad que ocurre en el aire se emplea el modelo Boussinesq.

El modelo viscoso usado para la solución es el del flujo turbulento *k-ε* (RNG), recomendado para canales de colectores planos por [Anil, 2013].

Los criterios para la convergencia de las soluciones fueron que los residuos de la continuidad y de la velocidad en todas sus direcciones debían ser menores de 10⁻³, y en el caso de la energía los residuos debían llegar a 10⁻⁸.

Resultados

Después de realizar la simulación del colector para el rango de ángulos de inclinación de 30, 35, 40, 45, 50 y 55 grados, se obtuvieron los perfiles de temperatura y velocidad para poder comprender el comportamiento del aire dentro del colector. Se determinaron otros datos, como el flujo y la variación de temperatura, para obtener la eficiencia del colector y de esta forma definir cuál es el ángulo de inclinación más adecuado para la instalación del colector solar plano de aire, trabajando en régimen de circulación natural en Cuba.

Contorno de temperatura a lo largo del colector

Como se puede apreciar en las Figuras 3 y 4, la temperatura varía a lo largo de todo el colector, siendo menor en la entrada. El aire se va calentando en su transitar, por tanto, abandona el colector con una mayor temperatura. Esta variación también se ve afectada por el ángulo de inclinación del colector, de manera que se consigue una mayor variación de temperatura para un menor ángulo de inclinación, como es lógico, pues en esta posición recibe mayor radiación al estar más cerca del valor de la latitud. Es fácilmente perceptible que las mayores temperaturas se encuentran en la zona cercana a la placa absorbidora.

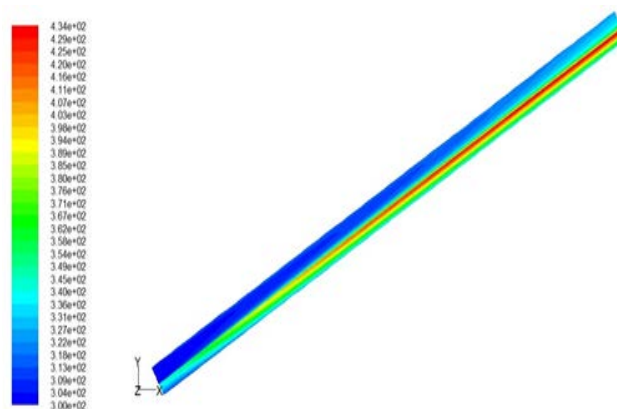


Fig. 3. Temperatura a lo largo del colector con ángulo de 30 grados.

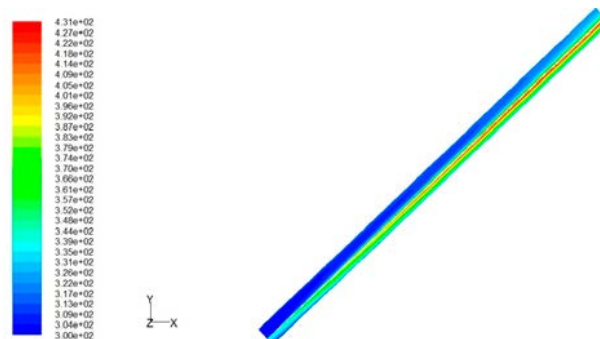


Fig. 4. Temperatura a lo largo del colector con ángulo de 45 grados.

Vectores de velocidad

En las Figuras 5 y 6 se aprecia que la velocidad va creciendo a partir de la placa absorbidora y se alcanzan las mayores velocidades en la mitad inferior del canal de aire. A partir del valor máximo de velocidad, esta va disminuyendo hasta llegar a la cubierta de vidrio. Es apreciable entonces que existe asimetría en el perfil de velocidades dentro del colector, pues las mayores velocidades se agrupan en la mitad inferior del espesor de aire.

Además, en los gráficos es posible percatarse de que la velocidad del fluido se ve afectada también por el ángulo de inclinación que posee el colector. Una mayor inclinación permite un mejor tránsito del fluido a través del canal, por otro lado, un valor más pequeño de inclinación trae como efecto que el fluido se estanque y pueda quedar estacionado contra la cubierta de vidrio.

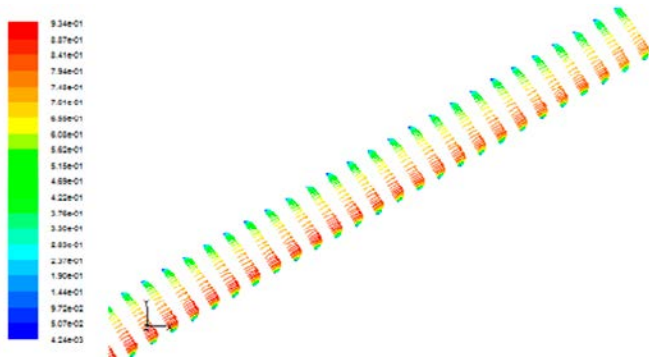


Fig. 5. Vectores de velocidad en un colector con ángulo de 30 grados.

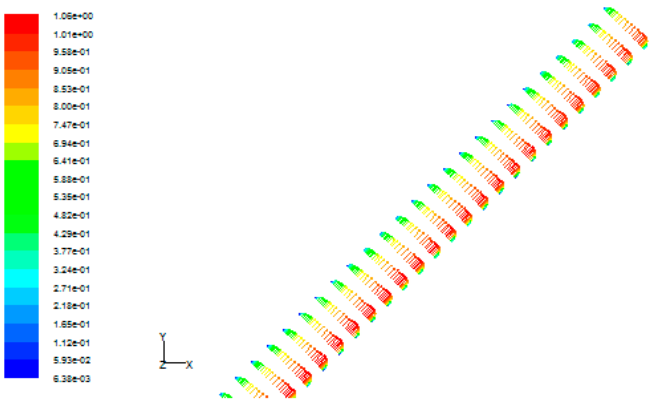


Fig. 6. Vectores de velocidad en un colector con ángulo de 45 grados.

Cálculo de la eficiencia del colector

Para la determinación del ángulo más adecuado se realiza el posprocesamiento de todos los datos obtenidos de la simulación y con ellos se procede a la determinación de la eficiencia. La eficiencia del colector se obtiene indistintamente a partir de cualquiera de las ecuaciones siguientes:

$$\eta = \frac{Q_{\text{útil}}}{Q_{\text{recibido}}} \quad (4)$$

$$\eta = \frac{m \cdot C_p \cdot \Delta T}{G_0} \quad (5)$$

Donde:

m : Flujo de aire (kg/s).

C_p : Calor específico del aire a presión constante = $1006 \text{ (J/kg} \cdot \text{K)}$.

ΔT : Variación de temperatura (K).

G_0 : Calor que llega al colector producto de la radiación (W).

Para cada valor de ángulo de inclinación se obtienen los términos $m \cdot C_p \cdot \Delta T$ y G_0 correspondientes al día medio de cada mes del año. Seguidamente se hace la pon-

deración de estos términos, que finalmente dan como resultado la eficiencia anual del colector correspondiente a ese ángulo.

Luego de realizar esta operación para cada uno de los ángulos se obtuvo que el colector que posee un mayor rendimiento tiene un ángulo de inclinación de 45° con un rendimiento de 58,9 %. Este ángulo es el más adecuado para la instalación del colector solar plano cuando se utiliza para el calentamiento de aire y está trabajando en convección natural.

La relación de eficiencias obtenidas para cada colector, según la variación de su ángulo de inclinación, se presenta en la Figura 7 a modo de resumen.

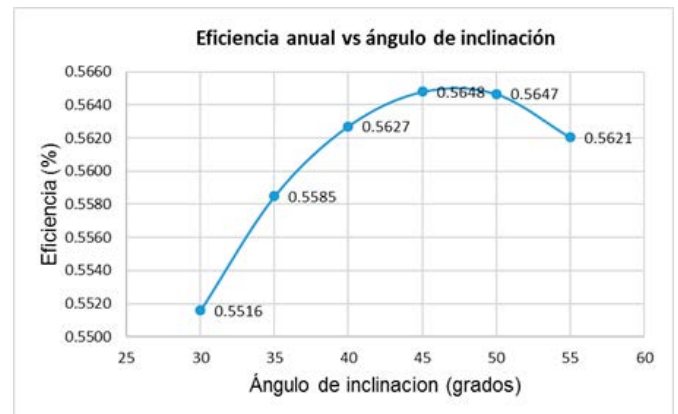


Fig. 7. Variación de la eficiencia para cada ángulo de inclinación del colector.

Conclusiones

El perfil de velocidades del colector es asimétrico, pues las mayores velocidades se encuentran en la mitad inferior del canal del colector.

La eficiencia del colector aumenta a medida que aumenta el ángulo de inclinación hasta 45° ; a partir de este existe un punto de inflexión y comienza a disminuir la eficiencia.

El ángulo de inclinación del colector más adecuado es el de 45° porque obtuvo una eficiencia de 56,5 %.

Bibliografía

- Anil SINGH YADAV, J. L. B. (2013). «Heat transfer and fluid analysis of solar air heater: A review of CFD approach». *Elsevier*. Disponible en: www.elsevier.com/locate/rser.
- ÁVILA GÓMEZ, ADRIÁN ENRIQUE; J. M. M. F., JULIO FERNANDO BELTRÁN SARMIENTO (2010). «Evaluación energética de un colector solar de placa plana de doble cubierta». *Ingeniería y Desarrollo*. Vol. 27, ISSN 0122-3461.
- BECKMAN, J. a. D. W. A. (s/a). *Solar Engineering of Thermal Processes*. Second Edition, p. 919.
- KOULIBALY, J. J. G. B. R. B. P. A. (2016). «Análisis paramétrico del desempeño térmico de colectores solares plans de aire de circulación natural». *Revista de Ingeniería Mecánica*. Cuba, vol. 19, No. 2, pp. 68-77. Disponible en: revistaim@mecanica.cujae.edu.cu. ISSN 1815-5944.