



REVISTA CIENTÍFICA TRIMESTRAL DE CUBASOLAR

**REVISTA CIENTÍFICA de las  
FUENTES RENOVABLES de ENERGÍA**

**25**



<b>Compensación de la potencia reactiva en sistemas de baja tensión mediante bancos de capacitores fijos, utilizando algoritmos genéticos.....</b>	<b>1</b>
<b>Determinación experimental de la conductividad térmica de arenas para moldes de fundición.....</b>	<b>11</b>
<b>Estimación de la demanda en sistemas eléctricos de baja tensión en condiciones de desbalance.....</b>	<b>18</b>
<b>El programa Aspen Plus, una herramienta para llevar a cabo la integración energética en los procesos industriales.....</b>	<b>27</b>
<b>Laboratorio virtual sobre ciclos de potencia.....</b>	<b>38</b>
<b>Modelo matemático y solución analítica del funcionamiento de un destilador solar de bandeja.....</b>	<b>46</b>

# Compensación de la potencia reactiva en sistemas de baja tensión mediante bancos de capacitores fijos, utilizando algoritmos genéticos

## Compensation of reactive power in low-voltage systems by means of banks of stationary capacitors, using genetic algorithms

*Por M.Sc. Ing. Davel Borges Vasconcellos\*,  
Dr. CT. Ing. Ignacio Pérez Abril\*\*,  
M.Sc. Ing. Alfredo González Digón\*  
e Ing. Herschell Iglesias García\*\*\**

*\* Universidad de Camagüey, Cuba.*

*\*\* Universidad Central Marta Abreu de Las Villas, Cuba.*

*\*\*\* Empresa COPEXTEL, Camagüey, Cuba.*

*Tel.: (53 32) 261456.*

*e-mail: davel.borges@reduc.edu.cu*

### Resumen

La eficiencia energética de un sistema eléctrico depende en gran medida de la compensación de potencia reactiva que se realice. Una de las vías más empleadas para ello es la utilización de bancos de capacitores en calidad de compensadores. Una óptima selección de estos, presupone tres aspectos: la selección de la capacidad de los bancos, el tipo de compensador que se debe utilizar, así como su ubicación en el sistema eléctrico de baja tensión. En la mayoría de la literatura especializada estos aspectos son tratados a través de métodos independientes. Sin embargo, desde el punto de vista técnico cada uno depende del resto y todos tienen una implicación económica, lo que obliga a la necesidad de su consideración de forma conjunta (en un mismo problema de optimización). Existen referencias de métodos que consideran los tres aspectos de manera conjunta, basados en la programación matemática, pero estos presentan limitantes debido a que no pueden representar todos los efectos de la compensación y se basan en técnicas de programación continua, siendo éste un problema de optimización complejo, de espacio de búsqueda discreto. En tal sentido, hemos desarrollado un método con el empleo de los algoritmos genéticos que posibilita una formulación más exacta del problema. El método ha sido programado con ayuda del MATLAB, versión 7.5 (R2007b), utilizando las estructuras de programación de Genetic Algorithm and Direct Search Toolbox. La efectividad del mismo se muestra en un ejemplo real de aplicación al sistema eléctrico de baja tensión de una instalación hotelera del Grupo Cubanacán, en la provincia de Camagüey.

**Palabras clave:** Potencia reactiva, algoritmos genéticos, capacitores fijos.

### Abstract

The energy efficiency of an electrical system greatly depends on the compensation of the reactive power. The most commonly used way to do it is the use of banks of capacitors as compensators. An optimal selection of the capacitors includes three aspects: the selection of the capacity of the bank, the type of compensator that should be used, as well as its position in the low-

voltage electrical system. In most of the specialized literature these aspects are treated using independent methods. However, from the technical point of view they are interdependent one from each other and they all have an economic implication, what implies the need of considering them in a joint way (in the same optimization problem). There are references of methods that consider the three aspects conjointly, based on mathematical programming, but these present limitations because they cannot represent all the effects of the compensation and are based on techniques of continuous programming, being this a complex problem of optimization, of space of discrete search. In such sense, we have developed a method with the use of genetic algorithms that makes possible a most exact formulation of the problem. The method has been programmed using MATLAB, version 7,5 (R2007b), utilizing the programming structures of Genetic Algorithm's and Direct Search Toolbox. The effectiveness of it is shown in its application to a real example to the low-voltage electrical system hotel facility of Grupo Cubanacán, in the province of Camaguey.

**Passwords:** Reactive power, genetic algorithms, stationary capacitors.

## Introducción

Se puede definir como sistema eléctrico a la infraestructura formada por el conjunto de medios electrotécnicos encargados de la generación, transporte y consumo de la energía eléctrica [León, 2001b].

Como es conocido, este proceso en la casi generalidad de los casos se realiza en forma de corriente alterna trifásica, debido, entre otras, a las ventajas que esto reporta en cuanto a la capacidad de los medios electrotécnicos y a la reducción de las pérdidas en sentido general.

Sin embargo, esta transferencia de energía trae aparejada de forma perjudicial la existencia en mayor o menor medida de fenómenos de desfase [León, 2001a], que se manifiestan en estos sistemas, teniendo tres orígenes fundamentales:

- La presencia de elementos almacenadores de energía (inductores y capacitores).
- La presencia de elementos no lineales (electrónicos por lo general).
- El desbalance del sistema (en las fuentes y/o los receptores eléctricos).

Estos fenómenos limitan la capacidad de los sistemas e incrementan las pérdidas de energía, ocasionando gastos innecesarios, con un impacto nocivo en el medio ambiente.

La cuantificación de cada fenómeno se realiza mediante una potencia de desfase o no activa (potencia reactiva, potencia de distorsión armónica y potencia de asimetría, respectivamente) [IEEE, 2000], existiendo en la literatura métodos para compensar o limitar sus efectos negativos, a través principalmente de dispositivos externos de compensación, de manera individual o conjunta (sólo encontrado en el caso de la compensación de la potencia reactiva y de distorsión armónica).

De esos tres fenómenos, sin dudas la compensación de la potencia reactiva es el más conocido, por ser el más tratado en la literatura especializada.

Sin embargo, aún en este caso los métodos de compensación basados en la selección y ubicación de dispositivos externos en el caso de los sistemas eléctricos de baja tensión no aseguran una solución óptima, sobre todo cuando se trata de sistemas con alto predominio de carga monofásica, del sector terciario principalmente.

Teniendo como premisas que:

1. La compensación de potencia reactiva para sistemas eléctricos de baja tensión del sector terciario constituye un problema de optimización complejo con espacio de búsqueda discreto.
2. Para la solución de este tipo de problemas los algoritmos genéticos han demostrado ser eficaces.

Se puede conformar la hipótesis siguiente:

Un modelo de compensación de potencia reactiva para sistemas eléctricos de baja tensión del sector terciario, basado en la técnica de algoritmo genético, debe dar mejores resultados, en relación con los métodos tradicionalmente empleados, por lo que nos trazamos como objetivo general de la investigación obtener un método de compensación de potencia reactiva con bancos fijos, que resulte en la selección y ubicación de bancos de capacitores, para sistemas eléctricos de baja tensión del sector terciario, basado en la técnica de algoritmo genético.

## **Desarrollo**

### **Aspectos de la compensación de potencia reactiva**

El problema de la compensación de potencia reactiva en sistemas eléctricos de baja tensión, exige tres aspectos como parte del procedimiento:

- La selección de la magnitud de la compensación, que condiciona la potencia de compensación necesaria del dispositivo ( $CkVAR$ ).
- La selección del tipo de compensación, que condiciona el tipo de dispositivo (fijo o variable) con sus parámetros técnicos.
- La ubicación óptima de la compensación, que condiciona la localización de los dispositivos de compensación.

En la casi totalidad de la literatura consultada sobre el tema, estos aspectos son abordados a través de métodos independientes; sin embargo, desde el punto de vista técnico cada uno de ellos depende del resto y todos tienen una implicación económica, lo que obliga a la necesidad de su consideración de forma conjunta (en un mismo problema).

En la mayoría de las aplicaciones prácticas se determina el punto de ubicación de la compensación y el tipo que se debe emplear (fija o variable), bajo criterios muchas veces empíricos basados generalmente en el costo de la inversión y la experiencia del proyectista, y después, a partir de allí, se seleccionan los

parámetros de los dispositivos que se deben emplear aplicando métodos desarrollados por la literatura para tales efectos.

En los últimos años se han logrado métodos que tienen en cuenta los tres aspectos de forma conjunta, basados en una función no lineal de optimización, con restricciones lineales, que se resuelve aplicando la programación matemática continua no lineal [Pérez, 1994; González, 2002].

Sin embargo, la programación matemática continua no lineal presenta las limitaciones siguientes:

1. La necesidad de expresar los efectos de la compensación a través de un modelo matemático, implica que no se puedan considerar todos los efectos posibles, reduciendo la exactitud de la solución.
2. La solución del problema (capacidad de compensación) se expresa a través de números reales y luego es necesario un proceso de estandarización, por cuanto los dispositivos se fabrican con valores de capacidades estándares.
3. La gran cantidad de variables en el proceso de optimización dificulta de manera significativa la solución del método, con demoras en las corridas (por su funcionamiento secuencial), e incluso dificultades de convergencia si el problema (función objetivo y espacio de búsqueda definido por las restricciones) no es cuidadosamente esbozado.

Resumiendo, podemos decir que el método de selección de la compensación de potencia reactiva parte de un problema de optimización complejo porque son múltiples los efectos que se pueden lograr, con la imposibilidad de representarlos todos a través de un modelo matemático preciso.

Por su parte, el espacio de búsqueda del problema es discreto, ya que los valores de unidades capacitadoras que se deben ubicar responden a estándares de fabricación. Ante esta dificultad nos planteamos la solución del problema de compensación de potencia reactiva, aplicando algoritmo genético.

### **Los algoritmos genéticos**

Los algoritmos genéticos fueron introducidos en los años sesenta y actualmente forman parte de la familia de procedimientos de optimización basados en la inteligencia artificial [Goldberg, 1989].

Es una técnica de búsqueda basada en la teoría de la evolución de Darwin, que funciona análogo al proceso de cruzamiento biológico de cromosomas que comparten información genética para crear un nuevo individuo. Al final, llegan a obtener un individuo de alta adaptación, lo que en el argot matemático no significa una solución óptima, pero sí la «mejor solución».

Los algoritmos genéticos se diferencian de los algoritmos de optimización tradicionales, dentro del cual se encuentra la programación matemática, en cuanto a que [Fogel, 1995]:

- Son algoritmos estocásticos. Dos ejecuciones distintas pueden dar dos soluciones distintas.
- Son algoritmos de búsqueda múltiple, de los cuales es posible obtener varias soluciones.
- La convergencia es poco sensible a la población inicial. No existen restricciones en el espacio de búsqueda.
- Son algoritmos intrínsecamente paralelos, capaces de operar simultáneamente con varias soluciones, lo que asegura por lo general un funcionamiento más rápido en las corridas.
- Resultan menos afectados por los máximos locales (falsas soluciones).

Por todo lo anterior, los algoritmos genéticos se han empleado de forma satisfactoria en diferentes ciencias para la solución de problemas de optimización complejos de espacio de búsqueda discretos, por lo que resultan ser una eficaz herramienta para la solución del problema de compensación de potencia reactiva en los sistemas eléctricos de baja tensión.

### **Modelo de cargas eléctricas**

Los modelos tradicionales de las cargas eléctricas usados en los modelos de optimización se basan en utilizar un patrón de comportamiento expresado en un gráfico de cargas (de potencia, activa, reactiva, corriente, etc.), que se obtiene como resultado de mediciones eléctricas con analizadores de redes en el mejor de los casos, durante un ciclo productivo o de servicios característicos de la instalación; por lo general en 24 horas, con intervalos de medición constantes, mayores o iguales a una hora.

En el modelo de cargas eléctricas elaborado para su utilización con algoritmo genético, se establecen temporadas de comportamiento regular de la carga y adicionalmente se ajustan los valores de potencia activa y reactiva de gráficos de carga, a los valores de energía activa y reactiva mensual, respectivamente, utilizados para la facturación del servicio eléctrico.

### **Optimización de la compensación de potencia reactiva a partir del algoritmo genético**

Un problema de optimización es aquel que busca maximizar (o minimizar) una función con un número determinado de variables, estando los valores sujetos a ciertas limitaciones (restricciones).

A partir del problema real se formula el problema aproximado, el cual posteriormente es modelado matemáticamente y resuelto aplicando algún algoritmo de optimización conocido.

En este caso se pueden considerar todos los efectos de la compensación de potencia reactiva:

- Inversión de las unidades capacitadoras ( $Kt$ ).
- Incremento de los gastos de pérdidas de energía activa de las unidades capacitadoras ( $Cp$ ).

- Incremento de los gastos de amortización de las unidades capacitadoras ( $Ca$ ).
- Mejora del factor de potencia, incluida la reducción de pérdidas de energía activa en el sistema ( $Bfp$ ).
- Liberación de cargas (si fuese necesario).

*Análisis y planteamiento del problema:*

Determinar la cantidad de unidades de compensación de cada capacidad disponible que conformarán un banco fijo de capacitores simétricos para compensar la potencia reactiva en el sistema eléctrico de baja tensión, de modo que se obtenga el máximo de valor actual neto.

*Construcción del modelo matemático*

Como variables de decisión del problema se considerarán las cantidades de unidades de compensación de cada capacidad disponibles para formar el banco. Para esto, cada cromosoma tendrá una cadena de genes cuya posición representa la representación binaria de la cantidad de unidades. Como función de adaptación (*Fitness*) se toma el VAN, añadiendo una función de penalización (*Penal*) incrementada por una cantidad suficientemente grande. Esto se debe a que durante la implementación posterior lo que se logra es minimizar la función.

La función de penalización se compone de la suma de penalizaciones especificadas cuando se cumplen las condiciones siguientes:

- La potencia reactiva de compensación que se debe ubicar en algún nodo ( $X_j$ ), es mayor que el mayor valor de potencia reactiva de cualquier nodo para cualquier estado de carga ( $Q_j$ ).
- La potencia reactiva de compensación total ( $X_t$ ) es mayor que el mayor valor de potencia reactiva de cualquier nodo para cualquier estado de carga ( $Q_j$ ).
- El menor valor de la tensión efectiva en cualquier nodo para cualquier estado de carga ( $V_{j\text{mín}}$ ) es menor que la mínima tensión permisible.
- El mayor valor de la tensión efectiva en cualquier nodo para cualquier estado de carga ( $V_{j\text{máx}}$ ) es mayor que la máxima tensión permisible.

Expresado matemáticamente, se necesita minimizar la función *Fitness*:

$$Fitness = -VAN + Penal = -Kt + (Bfp - Cp - Ca) \sum_{j=1}^n \frac{1}{(1+TD)^j} + 10^7 \times Penal$$

Sujeto a:

$$Penal = \sum_{\substack{j=1 \\ X_j > Q_j}}^{n-1} (X_j - Q_j)^2 + \sum_{\substack{j=1 \\ X_t > Q_j}}^{n-1} (X_t - Q_j)^2 + \sum_{\substack{j=1 \\ V_{j\text{mín}} < V_{\text{mín}}}}^{n-1} (V_{j\text{mín}} - V_{\text{mín}})^2 + \sum_{\substack{j=1 \\ V_{j\text{máx}} > V_{\text{máx}}}}^{n-1} (V_{j\text{máx}} - V_{\text{máx}})^2$$

*Programación del procedimiento de solución del problema*

Con ayuda del MATLAB, versión 7.5 (R2007b), se programó el modelo, utilizando las estructuras de programación de Genetic Algorithm and Direct Search Toolbox, teniendo en cuenta el empleo de una estructura de algoritmo

genético simple para una población de 1 000 individuos por generación, con el criterio de parada para un número máximo de generaciones, de 50.

*Programación del procedimiento de solución del problema*

El pseudocódigo del algoritmo genético se plantea:

- [Inicio] Generar una población aleatoria de  $n$  (1 000) cromosomas, expresados en el vector fila binario  $x$ , de longitud  $n \text{ nodos} \times n \text{ estados} \times n \text{ bit genes}$ .
- [Fitness] Evaluar la función *Fitness* para cada cromosoma  $x$  de la población.
- [Nueva población] Crear una nueva población, repitiendo los siguientes pasos hasta que se cumpla la condición de parada, en este caso por el número de generaciones preestablecido en el algoritmo (50).
- [Selección] Seleccionar dos cromosomas padres de una población de acuerdo a su *Fitness*.
- [Crossover] Con un porcentaje de cruzamiento (80%), crear una nueva descendencia.
- [Mutación] Con un porcentaje de mutación, modificar la nueva población.
- [Aceptar] Colocar los nuevos descendientes en la nueva población.
- [Reemplazar] Usar la nueva población generada para una futura corrida del algoritmo.
- [Test] Si la condición de salida se satisface (generación es mayor que 50), parar y retornar la mejor solución (cromosoma  $x$ ) para la población actual.
- [Loop] Regresar al paso 2.

**Aplicación práctica**

El método propuesto se aplicó en la selección de la compensación de potencia reactiva en el sistema eléctrico de un hotel del Grupo Cubanacán, de la provincia de Camagüey, teniendo en cuenta la disponibilidad de unidades capacitoras trifásicas fijas de compensación (Fig. 1).

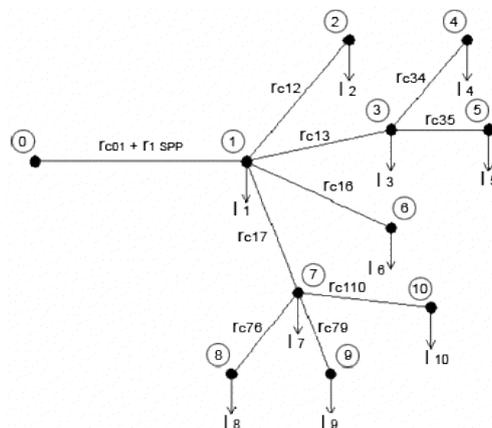


Fig. 1. Algoritmo genético utilizado.

Con ayuda de un analizador de redes trifásico marca TES 3600 se obtuvieron mediciones de la potencia activa y reactiva por fase y trifásica, en los 10 nodos del sistema, con intervalos de 30 minutos. Esto se realizó para dos temporadas turísticas de un mismo año.

Adicionalmente, se tomaron los parámetros de los elementos del sistema y se consideraron los costos de inversión de los capacitores comercializados por la empresa COPEXTEL Camagüey.

También fueron considerados los gastos de facturación de ese año de explotación de la instalación. Se establecieron doce casos de pruebas a escala en condiciones de frontera para comprobar la efectividad del algoritmo. En cada caso se realizaron 10 corridas para comprobar la convergencia. Los resultados en condiciones de frontera fueron los esperados con un alto porcentaje de convergencia en el algoritmo, lo que comprueba la efectividad del método (Fig. 2).

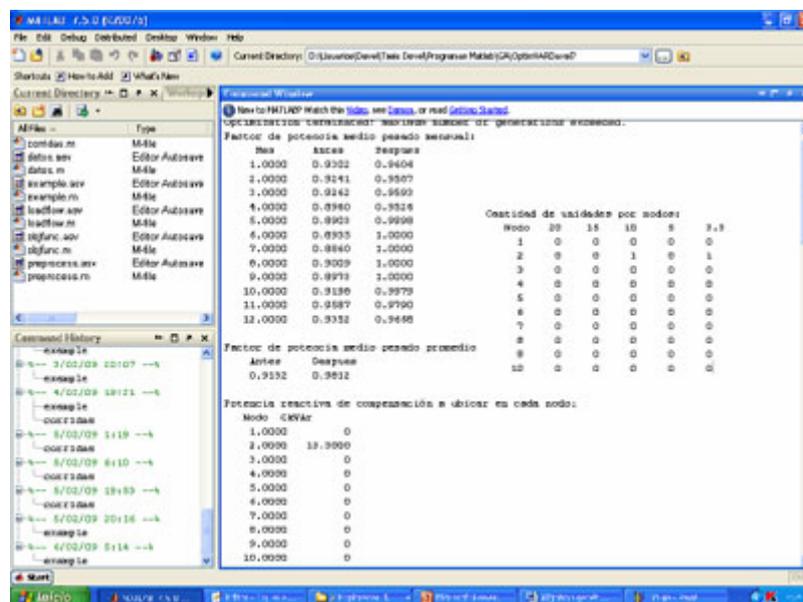


Fig. 2. Una de las ventanas del software utilizado.

Finalmente se corrió el algoritmo considerando todos los efectos como parte del modelo.

Teniendo en cuenta todos los efectos, la compensación fue de 13,3 CkVar (10x1+3,3x1) a ubicarse en el nodo 2, que resulta el tercero de mayor importancia en cuanto al valor de la impedancia de la trayectoria, pero uno de los de mayor carga.

Como resultados se obtuvieron las consideraciones siguientes:

- Dentro de las entradas del VAN, sigue siendo el mayor atractivo económico de la compensación los beneficios que se obtienen por la mejora del factor de potencia medio pesado, regulado en la resolución

de facturación del servicio eléctrico. Cuando estos beneficios no se tienen en cuenta, la compensación no resulta económica.

- Por su parte, las salidas del VAN quedan determinadas en primera instancia por los gastos de explotación en los años considerados. En menor medida, los costos de inversión influyen en las salidas del VAN.

Este último resultado invalida la posibilidad de despreciar como efecto los gastos de explotación de las unidades capacitoras, lo cual es una práctica usual en algoritmos tradicionales empleados con estos fines.

## Conclusiones

El método de compensación de potencia reactiva propuesto resulta más efectivo en la solución del problema de optimización, que los métodos tradicionalmente empleados, debido a que:

- Posibilita una formulación más exacta y sencilla de los efectos de la compensación.
- No es necesaria la desestimación de efectos como los gastos de las unidades capacitoras que pueden modificar los resultados.
- Asegura un espacio de búsqueda discreto, idóneo para este tipo de problema, dada la estandarización en la fabricación de las unidades de compensación.
- Es posible de aplicar con facilidad a partir de la Genetic Algorithm and Direct Search Toolbox del MATLAB, que aparece en versión 7 y superior.

## Recomendaciones

- Incorporar al método propuesto el empleo de bancos de capacitores variables.
- Incorporar al método propuesto el diseño de los filtros para la compensación de la distorsión armónica en los sistemas eléctricos de baja tensión.

## Bibliografía

- FOGEL, D. *Evolutionary Computation*. USA: IEEE Press, 1995.
- GOLDBERG, DAVID E. *Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning*. USA: Addison-Wesley Publishing Company, Inc., 1989.
- GONZÁLEZ QUINTERO, J. A. «*Compensación de la potencia reactiva en sistemas contaminados con armónicos*». Tesis de doctorado. Universidad Central Marta Abreu de Las Villas, 2002.
- IEEE Std 1459-2000. *Standard Definitions of the Measurement of Electric Power Quantities under Sinusoidal, Non sinusoidal, Balanced or Unbalanced Conditions*. USA: 2000.
- LEÓN MARTÍNEZ, V. «*Fenómenos de desfase en los sistemas eléctricos*». CD-ROM Primera Conferencia Internacional de Energía y Medio Ambiente. Camagüey: Universidad de Camagüey, 2001a.

\_\_\_\_\_. *Ineficiencias de los sistemas eléctricos. Efectos, cuantificación y dispositivos de mejora de la eficiencia*. España: Ed. Universidad Politécnica de Valencia, 2001b.

PÉREZ ABRIL, IGNACIO. «*Compensación de potencia reactiva en sistemas industriales mediante bancos de capacitores*». Tesis de doctorado. Universidad Central Marta Abreu de Las Villas, 1994.

## Determinación experimental de la conductividad térmica de arenas para moldes de fundición

### Experimental determination of the thermal conductivity of sands for molds of foundry

*Por José Gandón Hernández\*,  
Surmaily Cebada García\* y Francisco Mondelo García\*\**

*\* Facultad de Ingeniería Química,  
Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría (CUJAE), La Habana, Cuba.*

*\*\* Departamento de Metalurgia (UDM), Facultad de Ingeniería Mecánica, Instituto  
Superior Politécnico José Antonio Echeverría (CUJAE), La Habana, Cuba. e-mail:  
gandon@quimica.cujae.edu.cu*

#### Resumen

Utilizando una modificación del método experimental del cilindro en estado estacionario, se determinó la conductividad térmica de seis arenas de moldeo. Los resultados pueden utilizarse para modelar el fenómeno de la transferencia de calor por conducción en moldes de arenas y machos, siendo la conductividad térmica la propiedad termofísica que caracteriza este modo de transporte. Se relacionó esa propiedad con la temperatura; un elemento poco encontrado en la literatura especializada. Se comprobó que la humedad y la presencia de aditivos químicos influyen marcadamente en la conductividad térmica de las mezclas. Los resultados obtenidos se vinculan con el balance económico de la operación de fundición, ya que la selección adecuada de los materiales, debido a sus propiedades aislantes, permite mejorar la calidad de los productos, aumentar la productividad y al mismo tiempo contribuye al ahorro de energía o combustibles durante el vertido o conformación de piezas fundidas. La fundición de metales es una gran fuente de contaminación ambiental, por lo que cualquier ahorro al utilizar las arenas, incluso como refractario o en los moldes (cáscara, cera perdida, moldes de arena, coquillas metálicas prevestidas), es una contribución directa al cuidado del medio ambiente y al no incremento del efecto invernadero.

**Palabras clave:** Conductividad térmica, conducción del calor, arenas para fundición, ahorro de energía

#### Abstract

The thermal conductivity of six molding sands was determined utilizing a modification of the experimental method of the cylinder in a stationary state. The results can be used for modeling the phenomenon of heat transfer by heat conduction in molds of sands and machos, being heat conduction the thermo-physical property that characterizes this transport phenomenon. This property was linked with temperature something not often found in the specialized literature. It was verified that humidity and the presence of chemical additives greatly influence thermal conductivity of mixtures. The results obtained are related to the cash flow of the operation of the foundry, since the adequate selection of the suitable materials, due to its insulating properties, allow improving the quality of the products, increasing productivity and at the same

time contributes to the saving of energy or fuels during the conformation of metal casting. A foundry is a great source of pollution, which is why any saving when using sands, even as refractory or in the molds (shell, waste wax, sand molds, pre-coated metal shells), it is a direct contribution to caring the environment and reducing greenhouse effect.

**Keywords:** Thermal conductivity, heat transfer, foundry sands, energy saving

## Introducción

El conocimiento de las propiedades físicas de las arenas para moldes de fundición resulta determinante en la selección adecuada de los materiales y los espesores utilizados, los que a su vez condicionan la calidad del producto y la productividad del proceso de fabricación. Entre esas propiedades se destacan la conductividad térmica, la difusividad térmica y el calor específico.

La conductividad térmica de un material poroso, pulverulento o granular, no está determinada, de ahí que se utilice el término conductividad térmica aparente o equivalente, ya que la ley de Fourier se estableció para un sólido homogéneo e isótropo [Incropera, 2006].

Las arenas para moldes de fundición pueden resultar en apariencia similares; sin embargo, pueden diferenciarse apreciablemente en cuanto al valor de su conductividad térmica. Estas no se utilizan tal y como provienen de la naturaleza, sino que son mezclas preparadas generalmente en base a una arena sílice, con aglutinantes, aglomerantes, aditivos y agua, con el objetivo de emplearlas en la elaboración de moldes y machos para la fabricación de piezas fundidas.

Las características del espesor del molde están estrechamente vinculadas con las propiedades termofísicas y especialmente con la conductividad del material utilizado para la confección del mismo; ese espesor, conjuntamente con el de la pieza que se va a fundir, influye en su velocidad de enfriamiento.

En los procesos de fundición existen dos factores que son sumamente importantes en el control de la calidad y la productividad de las piezas fundidas: el tiempo de cristalización y el tiempo de solidificación, ambos determinan el denominado tiempo de desmoldeo de la pieza fundida [Guillén, 2005].

En el caso de piezas rodeadas con un espesor de capa de molde pequeño y una conductividad térmica alta, se logran obtener velocidades altas de cristalización y solidificación, ya que la transferencia de calor es más intensa y se garantiza una estructura de metal sólido más fina y homogénea dentro de los límites permisibles; además, se elevan las propiedades mecánicas de la pieza fundida.

Es conveniente que los moldes de arena presenten una estructura, composición química y propiedades físicas que garanticen su homogeneidad, pues de ellas depende también la calidad de las piezas terminadas.

Disminuyendo el tiempo de enfriamiento de las piezas y manteniendo la calidad, se puede garantizar un aumento de la productividad, la cual influye directamente en el balance económico y la disminución de los gastos vinculados directamente a la producción.

Debido a la poca información disponible en la literatura técnica sobre esa propiedad termofísica de las arenas y al desarrollo progresivo de las diferentes mezclas de moldeo, es que cada vez resulta más importante la vía experimental para determinar su conductividad en las diferentes variantes en que son utilizadas.

### **Objetivo**

Determinar los valores de conductividad térmica de diferentes arenas de moldeo en función de la temperatura.

### **Materiales y métodos**

En este trabajo se estudiaron seis muestras de arenas suministradas por el Departamento de Metalurgia (UDM), de la Facultad de Ingeniería Mecánica, del Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría (CUJAE).

### **Materiales investigados**

Las características de las arenas se muestran en la tabla 1.

*Tabla 1. Características de las arenas*

<b>Arenas</b>	<b>Clasificación</b>	<b>Descripción</b>
Arena 1: MH4	Cuarzosa	Arena de retorno regenerada de los procesos autofraguantes (arena-resina).
Arena 2: MH2	Cuarzosa	Arena negra de retorno para mezcla.
Arena 3: MH1	Cuarzosa	Arena nueva sílice.
Arena 4: MH3	Cuarzosa	Arena nueva sílice para mezcla de arena-resina.
Arena 5: MH10	Cuarzosa	Arena de retorno o relleno recuperada de mezcla de silicato, con aditivos residuales de polvo de carbón y/o dioxido de hierro rojo.
Arena 6: MH7	Arcillosa	Arena arcillosa recuperada y quemada resecada.

### **Métodos**

Los métodos experimentales utilizados para la determinación de la densidad, humedad, granulometría y conductividad térmica de las muestras fueron: para densidad y humedad se utilizaron técnicas gravimétricas; y para la granulometría, el análisis físico o tamizado. La conductividad térmica se determinó mediante una adaptación del método del cilindro en estado estacionario [Gandón y Verdecia, 1988].

La solución de la ecuación diferencial de energía para estado estacionario con flujo unidireccional de calor sin generación interna, permite obtener la ecuación de trabajo del método:

$$k = \left( \frac{\ln(r_o / r_i)}{2 \cdot \pi \cdot L} \right) \frac{Q}{(T_i - T_o)} \quad (1)$$

Donde:

$k$ : Conductividad térmica, W/(m.K).

$Q$ : Flujo de calor, W.

$L$ : Longitud, m.

$r_o$ : Radio exterior, m.

$r_i$ : Radio interior, m.

$T_o$ : Temperatura exterior, K.

$T_i$ : Temperatura interior, K.

Para realizar el experimento se debe garantizar que la muestra del material sea conformada como un cilindro hueco con un radio interior igual al radio exterior del elemento calefactor, y con una longitud igual a la del cilindro.

El calor disipado se fija por el investigador y las temperaturas se miden mediante termopares situados de forma conveniente en la muestra.

El tiempo de experimentación está determinado por el requerimiento de que sea alcanzado el estado estacionario, y se determina de forma práctica cuando se aprecia que las temperaturas no varían entre una observación y otra. En este método la precisión de los instrumentos utilizados es la adecuada con un error inferior a 7% en las mediciones de la conductividad térmica, donde el aporte mayor al error se debe a la forma de medir la diferencia de potencial o voltaje [Valdés, 1995].

## Resultados experimentales

Los valores experimentales obtenidos para las diferentes arenas pueden apreciarse en la figura 1.

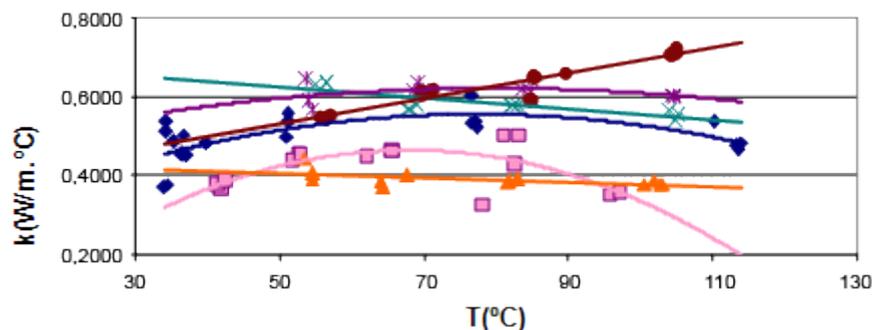


Fig. 1. Relación entre la conductividad térmica y la temperatura.

En la figura 1 se observa un comportamiento similar a lo reportado por Midea y Shah [2002], para un rango de temperatura entre 0 y 120 °C, pues para esas arenas la tendencia es que la conductividad térmica varía en función de la temperatura, no manteniendo en todos los casos el mismo comportamiento, ya que como puede observarse en algunos casos, la conductividad térmica se incrementa hasta un valor determinado y después disminuye, y en otros puede aumentar o disminuir continuamente.

En todo este análisis no se ha tenido en cuenta el tipo de aglutinante y los aditivos utilizados en las mezclas, debido a que no se dispone de información sobre los cambios y transformaciones que pueden sufrir esos productos en la etapa inicial del proceso.

Debido a las limitaciones y características de la instalación experimental utilizada, sólo se trabajó en un rango de temperatura de 30 a 110 °C de forma general, por lo que no se pudo analizar la zona de cambio de tendencia, ya que ésta se alcanza a temperaturas superiores, lo que no permite realizar un análisis de la influencia de los diferentes mecanismos de la transferencia de calor dentro de esos materiales.

Debe señalarse que, como se ha expresado anteriormente, las mezclas se compactan para conformar los moldes y los machos; es por eso que, teniendo en cuenta las experiencias que se tienen en cuanto al efecto de la compactación sobre otros materiales similares, es de esperar que los valores de la conductividad térmica se modifiquen con relación a los obtenidos en estos experimentos. También se pueden producir cambios en las tendencias, pues cambiará la morfología de las muestras [*Fundición...*, 2007].

### **Importancia económica**

La industria de la fundición es fundamental para la construcción de máquinas y piezas, donde los moldes de arenas y machos juegan un papel importante, además de tener un gran peso en la calidad del producto terminado.

Debido a la influencia que tienen las arenas de moldeo y los espesores utilizados sobre las propiedades de la pieza que se quiere obtener, es que se determina experimentalmente la conductividad térmica para garantizar la selección adecuada. Teniendo en cuenta estos aspectos se puede lograr la optimización del proceso de producción y garantizar la calidad del producto, lo que conlleva a un ahorro económico ya que disminuyen los gastos vinculados a la producción, además de aumentar la productividad de la fábrica, lo que influye directamente en el balance económico.

Conjuntamente con la elaboración de los moldes y machos, se puede aprovechar la capacidad de los hornos para de esta forma aumentar el porcentaje de coladas, lo que contribuye al ahorro de energía, que a su vez es un ahorro de combustible.

### **Impacto medioambiental**

Los procesos de fundición y fabricación de piezas tienen una repercusión directa sobre el medio ambiente, ya que en ellos se liberan al medio partículas

muy finas que constituyen una agresión al entorno; además, el empleo de aglutinantes en las mezclas provoca el desprendimiento de vapores y gases que pueden contaminar el medio laboral y el ambiente. Por eso es necesario aplicar medidas e ideas que puedan ayudar a eliminar o reducir al máximo el grado de contaminación.

Es importante señalar que controlando las condiciones organizativas de producción, y empleando la tecnología adecuada, se logra contribuir al ahorro de energía, que conlleva a un ahorro de electricidad y a su vez a un ahorro de combustible, siendo este último aspecto de gran importancia, ya que está estrechamente relacionado con la emisión de gases contaminantes a la atmósfera [Colás, *et al.*, 2005].

## **Conclusiones**

- Los valores de conductividad térmica obtenidos, aunque son preliminares, se encuentran dentro del intervalo reportado por la literatura.
- El contenido de humedad en la arena aumenta el valor de la conductividad térmica.
- La presencia de polvo de carbón y polvo de hierro rojo incrementa el valor de la conductividad térmica en las mezclas de moldeo.
- Las arenas que no contienen aglutinantes y aditivos en su composición presentan los valores más bajos de conductividad térmica.
- El alto contenido de arcilla presente en la arena provoca valores elevados de conductividad térmica.
- Los resultados obtenidos sirven de punto de partida para modelar los fenómenos de la transferencia de calor en los moldes de arenas y machos.
- La selección adecuada del tipo de arena influye directamente en la calidad del producto y en el balance económico.

## **Reconocimiento**

Debido a la importancia de los resultados y a su novedad, este trabajo constituye el punto de partida para un proyecto de investigación que se desarrollará entre las facultades de Ingeniería Mecánica e Ingeniería Química de la CUJAE.

## **Bibliografía**

COLÁS JUAN A.; MIGUEL DÍAZ, ORLANDO ÁLVAREZ Y RAISA TEUTELÓ. *Impacto de emisiones gaseosas en calderas de tubos de fuego*. La Habana: Centro de Investigaciones del Petróleo (CEINPET), abr., 2005.  
*Fundición y colado de materiales*.  
<http://www.Monografías.com/Trabajos7/fuco/fuco.shtml>. (10.03.2007).

GANDÓN HERNÁNDEZ, J. Y RAMÓN E. VERDECIA LORENZO. «Equipo para la medición de la conductividad térmica de sólidos». Séptima Conferencia Científica de la CUJAE. La Habana: Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría (CUJAE), 1988.

GUILLÉN, REINIER. *Controles y reciclajes en los materiales empleados en las mezclas de moldes y machos arena-resina, para piezas fundidas*. La Habana: Unidad Docente Metalúrgica (UDM), Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría (CUJAE), 2005.

Incropera, F. *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, 4ta edition. USA: John Willey and Sons Inc., 2006.

MIDEA T. AND J. V. SHAH. *Mold Material Thermophysical Data*. AFS Transactions 02-080, 2002.

VALDÉS, CECILIA. «Importancia de las mediciones para la determinación de la conductividad térmica de sólidos». Trabajo de diploma para optar por el título de Ingeniero Químico. La Habana: Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría (CUJAE), 1995.

## **Estimación de la demanda en sistemas eléctricos de baja tensión en condiciones de desbalance**

### **Demand Estimation in low-voltage electrical systems under conditions of unbalance**

*Por M.Sc. Alfredo González Digón,  
M.Sc. Davel Borges Vasconcellos  
y Dr. Vicente León Martínez  
Departamento de Ingeniería Eléctrica,  
Facultad de Electromecánica, Universidad de Camagüey, Cuba.  
e-mail: alfredo.digon@reduc.edu.cu*

#### **Resumen**

En el trabajo se exponen las consideraciones generales de las asimetrías en los sistemas eléctricos de baja tensión y las causas que las provocan, así como los efectos indeseables que ocasionan. A partir de las investigaciones actuales es posible modelar la asimetría como una componente de potencia no activa. Este concepto aplicado a un método propuesto por los autores para la estimación de la demanda durante la etapa de proyecto de los sistemas, posibilita una mayor exactitud en la determinación de la misma, lo cual es presentado a manera de ejemplo en una aplicación práctica.

**Palabras clave:** Potencia de asimetría, asimetrías, desbalances de los sistemas eléctricos, estimación de la demanda en sistemas eléctricos.

#### **Abstract**

The paper exposes the general considerations of the asymmetries in the low-voltage electrical systems and the causes that provoke them, as well as the undesirable effects they cause. Applying current research it is possible to model the asymmetry as a component of non-active power. This concept applied to a method proposed by the authors for the estimation of the demand during the project stage of the systems, makes possible a more exact determination of it, which is shown as an example in a practical application.

**Keywords:** power of asymmetry, asymmetries, unbalances of the electrical systems, estimation of the demand in electrical systems.

#### **Introducción**

La falta de simetría es una de las ineficiencias más importantes que pueden presentar los sistemas eléctricos. A pesar de ello, y hasta el momento presente, esta ineficiencia no ha suscitado demasiada preocupación, al considerarse que las técnicas de corrección hoy en día utilizadas son suficientes para limitar sus efectos a valores no peligrosos. Desgraciadamente, esas suposiciones no siempre se cumplen y los efectos de las asimetrías pueden llegar a ser tan graves, en ocasiones, como para dejar fuera de servicio a buena parte de la red eléctrica [León, 1997].

Un sistema eléctrico es simétrico cuando lo son sus generadores, líneas y receptores. Un generador o un receptor activo (motor) trifásico es balanceado cuando sus f.e.ms. tienen el mismo valor eficaz y están desfasadas  $120^\circ$  entre sí, y las impedancias de sus bobinas son exactamente iguales. Las líneas de transporte o distribución y los receptores pasivos son simétricos o balanceados cuando cada una de sus fases es igual a las demás.

En rigor, no existe ningún sistema eléctrico que verifique todas esas condiciones, ya que no existen en la naturaleza dos elementos que sean exactamente iguales y esas diferencias son incrementadas en los procesos de fabricación; por tanto, todos los sistemas eléctricos son, en mayor o menor medida, desbalanceados o asimétricos, siendo los receptores eléctricos los causantes mayoritariamente de las ineficiencias por asimetría [León, 1997]. Esto da la medida de la necesidad de considerar los efectos de las asimetrías a la hora de estimar la demanda eléctrica, como parte de la realización de un proyecto de sistema eléctrico de baja tensión.

Los métodos actuales que tradicionalmente se utilizan para tales fines no incluyen este importante aspecto, por lo que los resultados de la carga de cálculo resultan erróneos, lo que se traduce en la elevación de los gastos de inversión y explotación de los sistemas.

## **Desarrollo**

### **Definiciones. Causas de los desbalances**

Las asimetrías presentan dos orígenes definidos:

- Como resultado de la diferencia de tensiones (en módulo o ángulo) en las fuentes generadoras trifásicas de los sistemas eléctricos (asimetría de tensiones).
- Como resultado de la diferencia de corrientes (en módulo o ángulo) en los elementos de transmisión y receptores de los sistemas eléctricos (asimetría de corrientes).

Lo más usual a nivel industrial es la presencia de una fuente de tensiones simétricas en la entrada, alimentando un sistema trifásico que se compone de receptores trifásicos y monofásicos, estos últimos no siempre uniformemente distribuidos en las fases del sistema, por lo que se pueden presentar desbalances de corrientes como resultado del desbalance de cargas. Sin embargo, el hecho de que circulen corrientes de diferente valor por fase provoca que haya desiguales caídas de tensión en éstas, y, por tanto, desiguales tensiones en los receptores. Es decir, el desbalance de cargas (o corrientes) conduce, necesariamente, a una asimetría en las tensiones de los receptores.

Las causas de los desbalances pueden ser varias e incluso combinarse. Entre las fundamentales se encuentran [León, 2001]:

1. Conexión de cargas monofásicas en redes trifásicas.
2. Bancos de transformadores en estrella y delta abierta alimentando cargas apartadas.
3. Operación bajo falla de equipos de corrección del factor de potencia.
4. Impedancias asimétricas en las redes de alimentación.
5. Falta de fase en algunos puntos del sistema.
6. Fallas monofásicas a tierra no identificadas.
7. Desperfectos en los empalmes, uniones y contactos.
8. Transposición incompleta de las líneas de transmisión.
9. Fuente de suministro inestable o desbalanceada.

### **Efectos de las asimetrías en los sistemas eléctricos**

Las asimetrías en los sistemas eléctricos industriales son perjudiciales y en forma general pueden ocasionar [León, 2001]:

1. Aumento de las pérdidas de potencia y energía eléctrica activa en los elementos del sistema y, por ende, del costo de la energía eléctrica: Esto se debe a la circulación de una componente de corriente cuyo valor eficaz ocasiona pérdidas en los elementos del sistema por efecto Joule.
2. Incremento del calentamiento de todos los elementos de la red eléctrica industrial: Como resultado de lo anterior, se producen calentamientos innecesarios en el sistema.
3. Aumento de las caídas de tensión: Las corrientes no activas de asimetría que circulan por los elementos del sistema (principalmente líneas y transformadores) incrementan las caídas de tensión y, por ende, disminuye la tensión en los receptores eléctricos.
4. Limitación de la capacidad de los elementos del sistema eléctrico hasta llegar a los receptores: La capacidad del sistema se ve limitada por la presencia de las potencias no activas y sus corrientes asociadas, sin que ello contribuya a la transferencia de energía útil.
5. Sobredimensionamiento de los elementos del sistema eléctrico hasta llegar a los receptores: Desde el punto de vista del diseño, los elementos del sistema deben sobredimensionarse para que soporten las potencias y corrientes no activas.
6. Incremento de la posibilidad de averías y encarecimiento de los costos de inversión y explotación del sistema.
7. Aumento de los costos externos de la generación eléctrica: Debido a que la generación en nuestro país es mayoritariamente a través de plantas termoeléctricas, cuyos residuos son altamente contaminantes del medio ambiente.

Adicionalmente, se pueden presentar en los receptores efectos indeseables que afectan el funcionamiento y su vida útil.

## Modelación de los desbalances en los sistemas eléctricos lineales

Tradicionalmente, la potencia aparente en sistemas eléctricos lineales desbalanceados ha sido considerada a partir de dos corrientes principales:

Según la teoría de Steinmetz [1987]: Como la potencia fasorial, en la cual intervienen las potencias activas y reactivas diferentes de cada fase:

$$S = \sqrt{\left(\sum_x P_x\right)^2 + \left(\sum_x Q_x\right)^2} = \sqrt{(P_a + P_b + P_c)^2 + (Q_a + Q_b + Q_c)^2} \quad \left( \begin{array}{l} 1 \\ \end{array} \right)$$

Según la teoría de Budeanu [Czarnecky, 1987]: Como la potencia aritmética, suma de las potencias aparentes de cada una de las fases:

$$S = \sum_x S_x = S_a + S_b + S_c \quad \left( \begin{array}{l} 2 \\ \end{array} \right)$$

Sin embargo, ambas consideraciones resultan inexactas, a la luz de las investigaciones actuales. Los efectos del desbalance en sistemas eléctricos lineales pueden ser modelados a partir de la consideración de una potencia de asimetría con cualidades propias, que se suma ortogonalmente a las potencias activa y reactiva, formando un tetraedro de potencias, tal y como se muestra en la figura 1.

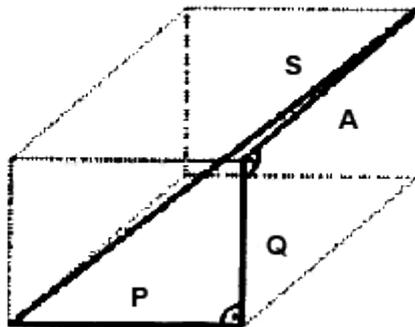


Fig. 1. Tetraedro de potencias.

Matemáticamente esto puede ser expresado como [IEEE, 2000]:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2 + A^2}$$

(  
3  
)

Donde:

S: Potencia aparente efectiva.

P: Potencia activa de secuencia positiva.

Q: Potencia reactiva de secuencia positiva.

A: Potencia de desbalance.

### Estimación de la demanda eléctrica en sistemas de baja tensión, considerando los efectos del desbalance de corriente

Cuando se proyectan sistemas eléctricos de baja tensión, no siempre resulta posible lograr un desbalance de corrientes admisible como resultado de un reparto equitativo de los receptores monofásicos en el sistema trifásico. Cuando los desbalances exceden de los valores permisibles, la estimación de la demanda por métodos convencionales (a partir de la potencia aparente geométrica del modelo de Steinmetz, o de la potencia aparente aritmética del modelo de Budeanu) no logra los resultados esperados.

Resulta entonces indispensable el uso de las definiciones actuales de la potencia eléctrica y su adaptación a la estimación de la demanda eléctrica. Precisamente, proponemos un método basado en estas definiciones, para estimar la demanda eléctrica de un grupo de receptores, con desbalances de corrientes, que consta de los pasos siguientes:

1. *Determinar las potencias activas de cálculo de cada fase (Pca, Pcb y Pcc):*

$$P_{ca} = \frac{1}{3} * \sum_{i=1}^{n_{3\phi}} p_{n3\phi(i)} * K_{da(i)} + \sum_{i=1}^{n_{ao}} p_{nao(i)} * K_{da(i)} + \sum_{i=1}^{n_{ab}} p_{nab(i)} * K_{p[ab]x(i)} * K_{da(i)} + \sum_{i=1}^{n_{ac}} p_{nac(i)} * K_{p[ac]x(i)} * K_{da(i)}$$

$$P_{cb} = \frac{1}{3} * \sum_{i=1}^{n_{3\phi}} p_{n3\phi(i)} * K_{da(i)} + \sum_{i=1}^{n_{bo}} p_{nbo(i)} * K_{da(i)} + \sum_{i=1}^{n_{ab}} p_{nab(i)} * K_{p[ab]y(i)} * K_{da(i)} + \sum_{i=1}^{n_{bc}} p_{nbc(i)} * K_{p[bc]y(i)} * K_{da(i)}$$

$$P_{cc} = \frac{1}{3} * \sum_{i=1}^{n_{3\phi}} p_{n3\phi(i)} * K_{da(i)} + \sum_{i=1}^{n_{co}} p_{nco(i)} * K_{da(i)} + \sum_{i=1}^{n_{bc}} p_{nbc(i)} * K_{p[bc]z(i)} * K_{da(i)} + \sum_{i=1}^{n_{ca}} p_{nca(i)} * K_{p[ca]z(i)} * K_{da(i)}$$

Donde:

$p_{n3\phi}(i)$ : Potencia activa nominal de los receptores trifásicos conectados al sistema.

$p_{nxy}(i)$ : Potencia activa nominal de los receptores monofásicos conectados a las fases x,y del sistema.

$K_{da}(i)$ : Coeficiente de demanda de potencia activa de los receptores.

$K_{p[xy]x}(i)$ : Coeficiente de referencia de potencia activa de los receptores conectados a las fases x,y referido a la fase x.

2. Determinar las potencias reactivas de cálculo de cada fase (Qca, Qcb, Qcc):

$$\left. \begin{aligned} Q_{ca} &= \frac{1}{3} * \sum_{i=1}^{n_{3\phi}} qc_{3\phi(i)} + \sum_{i=1}^{n_{ao}} qc_{nao(i)} + \sum_{i=1}^{n_{ab}} qc_{ab(i)} * Kq[ab]_a(i) + \sum_{i=1}^{n_{ac}} qc_{ac(i)} * Kq[ac]_a(i) \\ Q_{cb} &= \frac{1}{3} * \sum_{i=1}^{n_{3\phi}} qc_{3\phi(i)} + \sum_{i=1}^{n_{bo}} qc_{nbo(i)} + \sum_{i=1}^{n_{bc}} qc_{nbc(i)} * Kq[bc]_b(i) + \sum_{i=1}^{n_{ab}} qc_{nab(i)} * Kq[ab]_b(i) \\ Q_{cc} &= \frac{1}{3} * \sum_{i=1}^{n_{3\phi}} qc_{3\phi(i)} + \sum_{i=1}^{n_{co}} qc_{nco(i)} + \sum_{i=1}^{n_{bc}} qc_{nbc(i)} * Kq[bc]_c(i) + \sum_{i=1}^{n_{ac}} qc_{nac(i)} * Kq[ac]_c(i) \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Donde:

$qc_{3\phi}(i)$ : Potencia reactiva de cálculo de los receptores trifásicos conectados al sistema.

$qc_{xy}(i)$ : Potencia reactiva de cálculo de los receptores monofásicos conectados a las fases x,y del sistema.

$Kq[xy]_x(i)$ : Coeficiente de referencia de potencia reactiva de los receptores conectados a las fases x,y referido a la fase x.

Las potencias reactivas de cálculo de los receptores individuales pueden ser obtenidas a partir de su potencia activa de cálculo y la tangente del ángulo correspondiente al factor de potencia del receptor.

3. Determinar la potencia de asimetría de cálculo de cada fase.

La potencia de asimetría de cálculo ( $A_c$ ) puede determinarse como:

$$A_c = \sqrt{(P_{ca} - P_{cb})^2 + (P_{cb} - P_{cc})^2 + (P_{cc} - P_{ca})^2 + (Q_{ca} - Q_{cb})^2 + (Q_{cb} - Q_{cc})^2} \quad \left( \begin{array}{l} 6 \\ \end{array} \right)$$

4. Determinar la carga de cálculo del grupo de receptores.

La carga de cálculo del grupo de receptores (potencia activa, reactiva, aparente, corriente y factor de potencia, respectivamente) puede determinarse a partir de las expresiones siguientes:

$$\left. \begin{aligned} P_c &= P_{ca} + P_{cb} + P_{cc} \\ Q_c &= Q_{ca} + Q_{cb} + Q_{cc} \\ S_c &= \sqrt{P_c^2 + Q_c^2 + A_c^2} \\ I_c &= \frac{S_c \times 10^3}{\sqrt{3} \times U} \\ \cos\phi &= \frac{P_c}{S_c} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

## Ejemplo de estimación de la demanda eléctrica a partir de la metodología propuesta

A manera de ejemplo se seleccionó el proyecto eléctrico de la Pizarra General de Distribución (PGD) de la sala operativa del Combinado Cárnico de la provincia de Camagüey. La PGD se compone de dos pizarras: fuerza (PF) y alumbrado (PA), cuyo diagrama monolineal con los datos de los receptores se muestra en la figura 2 y la tabla 1.

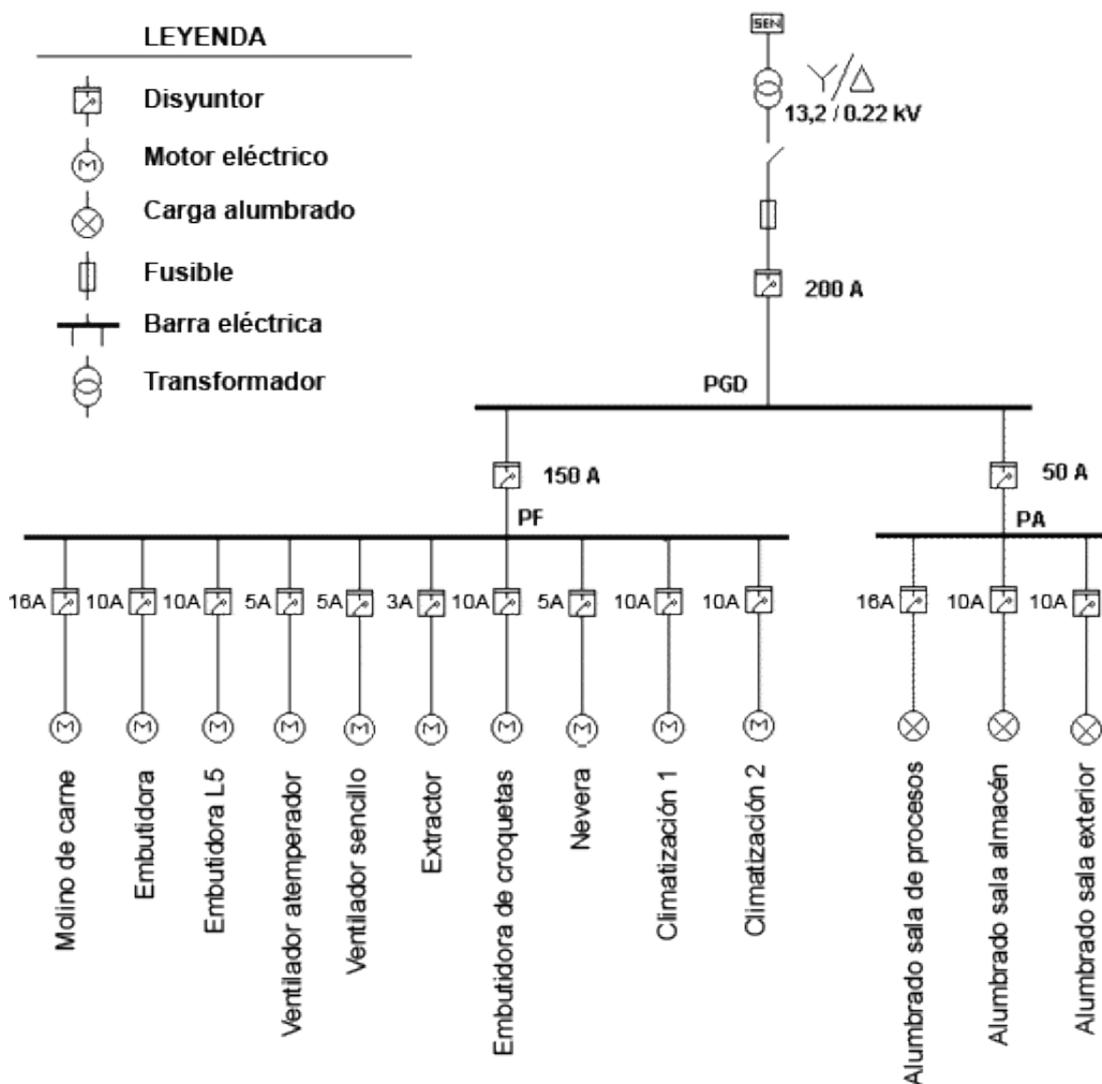


Fig. 2. Diagrama monolineal del ejemplo de aplicación.

Tabla 1. Datos de los receptores

Descripción	Kua, pu	Kda, pu	Cosφn, pu	Pn, kW	Un, V	Fases
Molino de carne	0,7	0,8	0,81	4	220	ABC
Ebutidora	0,65	0,9	0,8	4,5	220	ABC
Ebutidora L-5	0,65	0,9	0,8	4,5	220	ABC

Ventilador atemperador	0,7	0,8	0,81	4	220	ABC
Ventilador sencillo	0,7	0,8	0,76	3	220	ABC
Extractor	0,7	0,8	0,73	2,2	220	ABC
Embutidora de croqueta	0,65	0,9	0,81	7,5	220	ABC
Nevera	0,69	0,8	0,83	3	220	ABC
Climatización 1	0,69	0,8	0,83	2	220	AB
Climatización 2	0,69	0,8	0,83	2	220	AB
Alumbrado sala de proceso	0,8	0,9	0,9	3,7	220	AB
Alumbrado almacén	0,8	0,9	0,9	2,5	220	AB
Alumbrado exterior	0,8	0,9	0,9	2,5	220	AB

Se realizó la estimación de la demanda eléctrica a partir del método de la potencia media, el coeficiente de máximo  $K_m$  y el de no coincidencia de máximo  $K_{nc}$  (representado en la tabla 1 como Tradicional), que es uno de los más utilizados en las empresas de proyectos para este tipo de aplicación y que utiliza el modelo de potencia aparente de Steinmetz, así como a partir del método propuesto por los autores, que considera el efecto de la potencia de asimetría, según las definiciones actuales de la potencia eléctrica.

En cada caso, se obtuvieron los valores de la carga de cálculo en la pizarra de fuerza (PF), alumbrado (PA) y a nivel general (PGD) (Tabla 2).

*Tabla 2. Resultados obtenidos por ambos métodos*

Método	Grupo	Pc, kW	Qc, kVAr	Ac, VAa	Sc, kVA	Ic, A	Cosφc
Tradicional	PF	33,40	28,50	-	43,90	115,00	0,76
	PA	13,38	8,64	-	15,90	41,70	0,84
	PGD	51,64	36,78	-	63,40	166,00	0,81
Propuesto	PF	31,04	23,1	3,3	38,83	102	0,8
	PA	7,8	1,8	6,8	10,5	27,6	0,74
	PGD	38,79	24,92	10,1	47,2	123,9	0,82

## Conclusiones

La no consideración de la potencia de asimetría en las expresiones de estimación de la demanda trae aparejado errores en los resultados, que se traducen en incremento de las inversiones. En sistemas desbalanceados la carga de cálculo a partir del método propuesto es menor, a pesar de considerar el efecto de la potencia de asimetría y de que todos los receptores operaban de

forma simultánea. Si aceptamos que la experiencia práctica plantea que los métodos tradicionales tienden a la sobreestimación para este tipo de sistemas, entonces se puede concluir que, según resultado del método propuesto, se puede lograr una mayor exactitud en la determinación de la carga de cálculo.

La variación de los factores de asimetría en la aplicación no traen diferencias sustanciales en los resultados de la carga de cálculo por el método propuesto, aunque es conocido por la literatura que los métodos tradicionales se vuelven más inexactos, incrementando los valores de la carga de cálculo, en la medida en que se incrementa el grado de asimetría.

## **Bibliografía**

CZARNECKY, L. S. «What is Wrong with Budeanu Concept of Reactive and Distorsion Power and Why it Should Be Abandoned», *IEEE Transaction on Instrumentation and Measurement*, v. 36 No. 3, pp. 834-837, 1987.

IEEE Trial-Use Standard Definitions of the Measurement of Electric Power Quantities under Sinusoidal, Non sinusoidal, Balanced or Unbalanced Conditions. IEEE Std 1459-2000. /IEEE Power Engineering Society. New York: Published by the institute of electrical and Electronics Engineers, inc., 3 Park Avenue, 10016-5997, 2000.

LEÓN MARTÍNEZ, VICENTE. «Método integral para la mejora de la eficiencia y la calidad en el suministro de la energía eléctrica en baja tensión». Tesis Doctoral. España: Universidad Politécnica de Valencia, 1997.

\_\_\_\_\_. *Eficiencia en los sistemas eléctricos. Efectos, cuantificación y dispositivos de mejora de la eficiencia*. España: Ed. Universidad Politécnica de Valencia, (306), 2001.

STEINMETZ, C. P. *Theory of Alternating Current Phenomena*. Estados Unidos: Mac Graw. 1987.

## **El programa Aspen Plus, una herramienta para llevar a cabo la integración energética en los procesos industriales**

### **The program Aspen Plus, a tool to carry out energy integration in industrial processes**

*Por Dra. Yenlys Catá Salgado, Dr. Sc. Erenio González Suárez,  
Dra. Meilyn González Cortes y Dra. Gabriela Corsano  
Centro de Análisis de Procesos, Facultad Química-Farmacia,  
Universidad Central de Las Villas Marta Abreu, Cuba.  
e-mail: yenlys@uclv.edu.cu*

#### **Resumen**

El presente trabajo se realizó con el objetivo de brindarles a los especialistas una herramienta para el análisis global de los procesos, sobre todo si se tiene una estrategia dentro de las fábricas para aumentar la eficiencia energética a partir de las bondades que ofrece la integración energética. Se analizan las posibilidades de integración de calor en varias plantas industriales ubicadas en la provincia de Cienfuegos y se muestran las ventajas que ofrece el software Aspen Plus. La estrategia desarrollada permitió detectar las principales deficiencias en los procesos y su repercusión sobre el medio ambiente. Se parte de aplicar el análisis Pinch energético para la propuesta de las posibles variantes que se deben ejecutar en las plantas, para lograr el propósito deseado. Se emplearon métodos de síntesis de procesos, utilización de técnicas de optimización para obtener las alternativas más viables desde el punto de vista técnico y ambiental, para un posterior análisis económico a través de métodos dinámicos.

**Palabras clave:** Aspen Plus, integración de calor, Método de Pellizco.

#### **Abstract**

The present paper was carried out with the objective of giving the specialists a tool for the global analysis of the processes, above all if there is a strategy in the factories to increasing energy efficiency from the benefits that energy integration offers. The possibilities of integration of heat in several industrial plants located in the province of Cienfuegos are analyzed and the advantages that Aspen Plus software offers are shown. The strategy developed allowed detecting the main deficiencies in the processes and their impact on the environment. The starting point is the application of the Pinch energy analysis for the proposal of the possible variants that should be executed in the plants, to achieve the desired purpose. Methods of processes synthesis and techniques of optimization were used to obtain the most viable alternatives from the technical and environmental points of view, for a later economic analysis through dynamic methods.

**Keywords:** Aspen Plus, integration of heat, Pinch Method

## **Introducción**

Las crisis energéticas de los años setenta despertaron la preocupación acerca de la duración de los recursos energéticos que abastecen al mundo, poniendo interrogantes sobre cuál podría ser el futuro de la sociedad humana, las fuentes energéticas que la sostendrían y las perspectivas de crecimiento económico.

La integración de procesos se ha convertido en una herramienta muy útil para disminuir los consumos de energía y alcanzar significativos ahorros en costos y utilidades. Las herramientas de análisis de procesos desarrolladas son técnicas de diseño genéricas, sistemáticas y de uso sencillo, tienen como base el tratamiento de programación matemática, se trabaja con funciones objetivos, modelos matemáticos y el tratamiento termodinámico, en el cual se encuentra el análisis de Pellizco, específico para los estudios energéticos.

Por lo antes expuesto, nuestro objetivo general es utilizar el software Aspen Plus en el análisis de la integración energética en la Papelera Damují y lograr un análisis más detallado de las modificaciones propuestas en la empresa.

## **Métodos utilizados y condiciones experimentales**

En este epígrafe se abordarán los pasos a seguir para utilizar el Aspen Plus en la integración de procesos. Entre los paquetes que contiene ese software se encuentra el Aspen Pinch para la integración energética, y de allí que nos centraremos en la estrategia a seguir para su utilización en un caso de síntesis de proceso.

## **Desarrollo de la estrategia de integración de procesos utilizando el Aspen Plus**

Después de realizar un estudio detallado de varios trabajos [Bonachea, 2004; González, 2004], en los que se aplicaron herramientas de integración de procesos a diferentes casos de estudio, se plantea la siguiente estrategia general en siete pasos, y posteriormente se explicará con detalles la utilización del Aspen Plus en los pasos más importantes de la misma. Los pasos a tener en cuenta para llevar a cabo esta estrategia general son:

1. Plantear con claridad el problema que se debe resolver.
2. Identificar las corrientes intermedias y residuales que pueden ser utilizadas dentro de la misma planta o intercambiadas a otra.
3. Analizar las características energéticas de la fábrica, priorizando la etapa de generación de vapor y energía.
4. Reunir los datos requeridos para la aplicación de las herramientas de integración de procesos, necesarios para resolver el problema específico.
5. Estudio de la integración de procesos para reducir el consumo energético en la planta como fase inicial.
6. Estudio de la integración de procesos para la minimización de residuales en la planta.
7. Aplicar la metodología de diseño para la minimización del consumo energético y reducción de residuales a partir de las mejores alternativas económicas.

En este caso no se es categórico cuando se plantea que se lleve a cabo la integración energética antes que la material. La prioridad está dada por el objetivo fundamental del caso de estudio donde se lleva a cabo la investigación.

Como nuestro objetivo fundamental es la integración energética con el uso del Aspen Plus, se ha propuesto una estrategia de trabajo que ayudará a los usuarios a aplicar esta herramienta de una forma más fácil.

Paso cinco: Estudio de la integración de procesos para reducir el consumo energético en la planta como fase inicial; como ya se mencionó anteriormente, se utiliza dentro del Aspen Plus un paquete llamado Aspen Pinch, el cual permite realizar el análisis energético de los procesos en estudio. A continuación se presenta una guía de pasos con el objetivo de facilitar el estudio de casos, con el uso de esta herramienta:

- I. Crear un nuevo proyecto.
- II. Plantear el problema que se debe resolver.
- III. Obtención de las curvas compuestas.
- IV. Obtención de las curvas compuestas grandes.
- V. Obtención del diseño de la red de intercambio de calor.
- VI. Análisis de los datos económicos.

### **Análisis energético en la Papelera Damují**

En la Papelera existen pérdidas en las tomas de vapor de los cilindros secadores de la máquina de papel y, teniendo en cuenta que en esta sección es donde se consume la mayor cantidad de vapor, dichas pérdidas pueden ser significativas en el análisis económico global de la fábrica.

En la Planta de pulpa: Se emanan a la atmósfera vapores de alto contenido energético, perdiéndose de esta forma el valor calórico de este flujo.

La energía en el licor negro: El licor negro es un efluente de la planta de pulpa, que tiene una alta temperatura y un alto contenido energético que no es aprovechable.

Planta de fuerza: Se produce la purga continua, que es una corriente de vapor que se pierde continuamente en la planta de generación de vapor, teniendo un gran valor calórico y una alta temperatura.

### **Resultados y discusión**

En nuestro trabajo se toma como referencia el análisis realizado por [González, 2004; Huang, and Chien, 2008] en la Papelera Damují, ubicada en la provincia de Cienfuegos, con el objetivo de determinar si existen diferencias significativas en los resultados obtenidos al utilizar esta nueva herramienta.

## Análisis energético en la planta de fuerza. Aplicación de la tecnología Pinch

En este caso se realiza el análisis sólo en la planta de fuerza, ya que es aquí donde existen las mayores potencialidades para el ahorro de vapor, de forma tal que pueda ser destinado al resto del proceso y aumentar así su eficiencia energética. En la misma pueden identificarse varios requerimientos de calentamiento de flujos; por ejemplo, se necesita calentar el agua de alimentación a la caldera, el combustible, se calienta también el condensado que es recuperado de la sección de secado de la máquina de papel. Para comenzar el análisis se identifican los flujos fríos y calientes en la planta de fuerza y se escoge un  $\Delta t = 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ , según lo recomendado por [González, 2004] para este tipo de industria; con ello se obtuvo un Pinch en  $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ , donde se requiere de un servicio adicional de calentamiento solamente, para lograr nuestro objetivo, siendo el valor de  $Q_{\text{Hmin}} = 2\ 905\text{ kW}$ . Después se obtiene el diagrama de las curvas compuestas para los flujos fríos y calientes, así como el de las curvas compuestas grandes, que se muestran en las figuras 1 y 2, respectivamente.

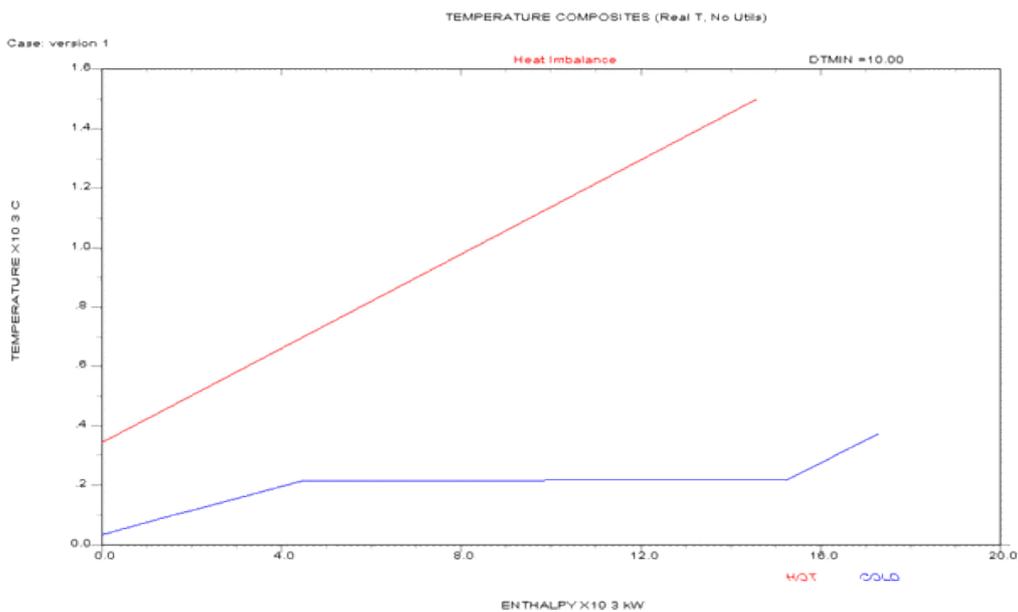


Fig. 1. Diagrama de las curvas compuestas de los flujos fríos y calientes.

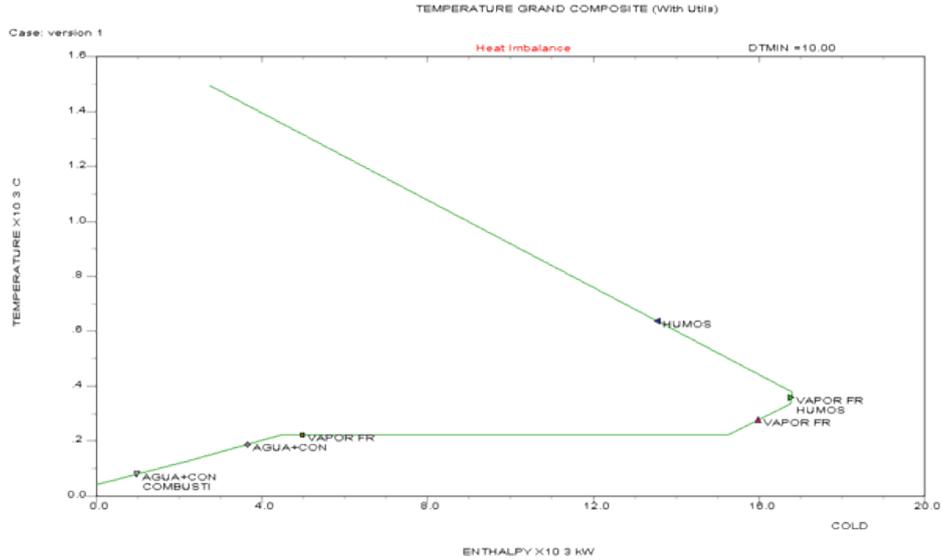


Fig. 2. Diagrama de las curvas compuestas grandes de los flujos fríos y calientes.

### Aplicación del método Pinch en la variante que utiliza la purga para el calentamiento de los flujos fríos

Para reducir las pérdidas, se incluye un flujo externo para realizar el calentamiento del combustible y el agua de alimentación a la caldera. Lo anterior puede implementarse incluyendo en el análisis, como flujo caliente, el flujo de una purga que de forma continua es vertida al medio en este sistema. A partir de este análisis se obtienen nuevamente las curvas compuestas de los flujos fríos y calientes para esta nueva variante (Fig. 3).

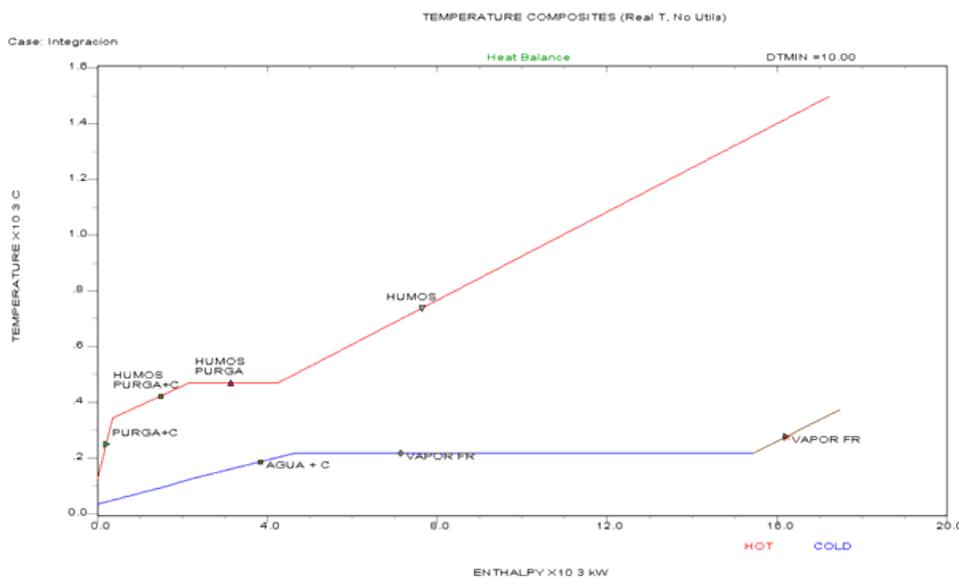


Fig. 3. Curva de composición de los flujos fríos y calientes.

En la figura 3 se pueden observar otras de las ventajas que ofrece el simulador, en el cual se puede incluir, dentro de cada tramo de las curvas, el nombre de cada corriente. Se utilizó el mismo DT que en la variante anterior, obteniendo un Pinch de 40 °C. En este caso sólo se puede trabajar con requerimientos calientes en la curva compuesta fría. Después pasamos a obtener las curvas compuestas grandes, que tienen como objetivo principal determinar dónde será transferido el calor entre las utilidades y el proceso, y dónde este último puede satisfacer su propia demanda de calor, así como el lugar apropiado para los equipos del proceso. En la figura 4 se muestran en color rojo las utilidades, y la curva verde representa el proceso.

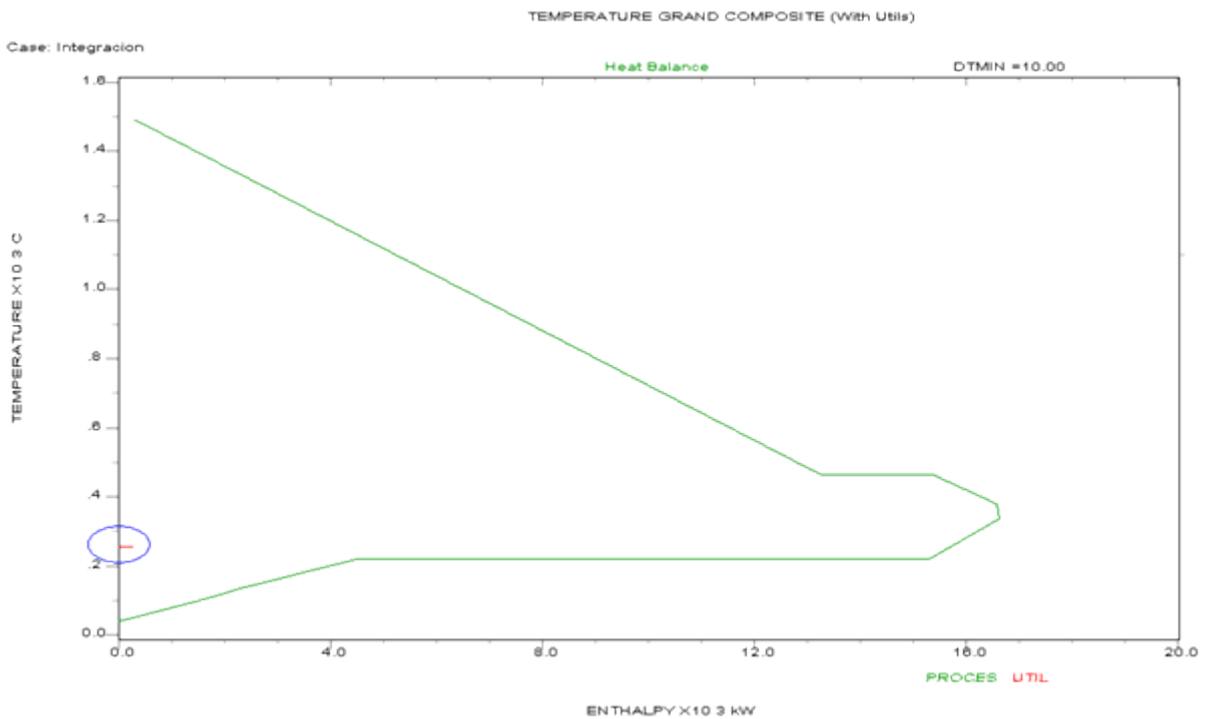


Fig. 4. Curva compuesta grande para la variante donde se incluye la purga.

Posteriormente corresponde encontrar una estructura de la red que minimice el consumo de energía. Mediante el diagrama de rejilla se facilitan la determinación de los niveles mínimos de recuperación de calor, y los consumos mínimos de utilidades. Primeramente se deben analizar los intervalos necesarios para determinar el área total mínima teniendo en cuenta las necesidades de áreas en cada intervalo, que es calculada a través de la ecuación 1:

$$A_{\min} = \sum_1^{\text{intervalo}} \frac{1}{\Delta T_{me}} * \sum_1^{\text{corriente}} \frac{q_i}{h_i} \quad [m^2] \quad (1)$$

Donde:

$\Delta T_{me}$ : Media logarítmica de la diferencia de temperatura, °C.

$q_i$ : Carga por equipo, W/m<sup>2</sup>.

$h_i$ : Coeficiente de cada corriente, W/m<sup>2</sup>-°C.

El Aspen Pinch realiza el cálculo; esta información se puede obtener mediante el reporte del diseño de la red de intercambio de calor. El área total mínima de intercambio es de 229,7 m<sup>2</sup>. Después se pasa a determinar el número mínimo de equipos para esta red en el proceso de integración, el que queda definido por la ecuación 2, que se presenta a continuación:

$$\begin{matrix} \text{Número de} \\ \text{Intercambiadores} \\ \text{Arriba del Pinch} \end{matrix} = \begin{matrix} \text{Números de} \\ \text{intercambiadores} \\ \text{Debajo del Pinch} \end{matrix} + \begin{matrix} \text{Número} \\ \text{intercambiadores} \end{matrix} \quad (2)$$

Para este caso de estudio el número mínimo de intercambiadores es 8. A partir de aquí estamos listos para la construcción del diagrama de rejillas, el cual se muestra en la figura 5.

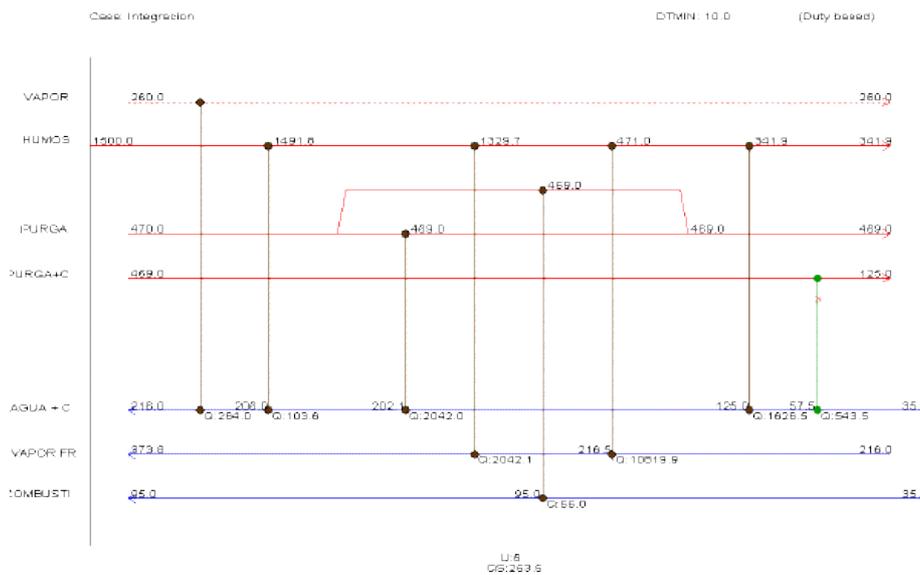
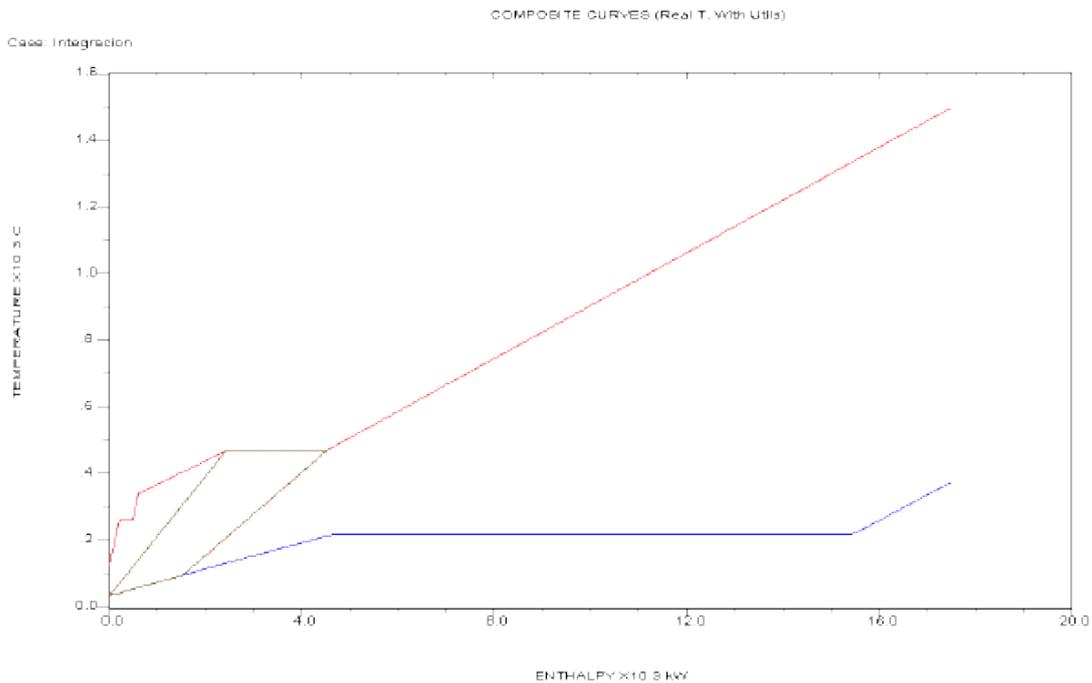


Fig. 5. Representación del diagrama de rejilla para la planta de fuerza.

La figura 5 es muy útil para el tecnólogo, ya que se visualiza cómo se lleva a cabo el intercambio del calor entre las corrientes (explicaremos solamente la corriente que se incluye en esta modificación, que es la purga). En este caso la purga se divide para calentar completamente la corriente de combustible desde 35 hasta 95 °C; el resto de la corriente es utilizada para calentar la corriente de agua+condensado desde 125 hasta 202 °C. Además, se puede observar que sólo se utiliza vapor para calentar la corriente de agua+condensado desde la temperatura de 206 hasta 216 °C.

Posteriormente se determinó el área total real de intercambio de calor para el diseño propuesto, donde se obtuvieron los mejores resultados en la variante con aprovechamiento de la corriente de mayor capacidad térmica, con 13% de área en exceso por encima del área total mínima. Estos resultados se pueden observar también dentro del reporte ofrecido por el Aspen Pinch, donde se detalla cómo es calculada el área total requerida para este diseño propuesto, que es de 260 m<sup>2</sup>.

También, mediante las opciones que nos ofrece el simulador, podemos ver el intercambio de calor dentro de la curva compuesta de los flujos fríos y calientes en cada equipo propuesto en la red, es decir, la fuerza impulsora (Fig. 6).



*Fig. 6. Intercambio de calor dentro de la curva compuesta de los flujos fríos y calientes por el equipo 7.*

Después de aplicar el método se realiza la propuesta de cómo quedará el diagrama flujo de los intercambiadores (Fig. 7).

En el trabajo de [González, 2004] sólo se llega hasta el análisis de las curvas compuestas grandes, viendo que es posible ahorrar utilidades, pero no se propone la forma en que se llevará a cabo considerando los equipos intercambiadores de calor. En el diagrama de flujo de la planta de fuerza, en las condiciones actuales, se puede observar que existen cinco intercambiadores de calor, de los cuales sólo se puede usar uno, el representado por el número ocho.

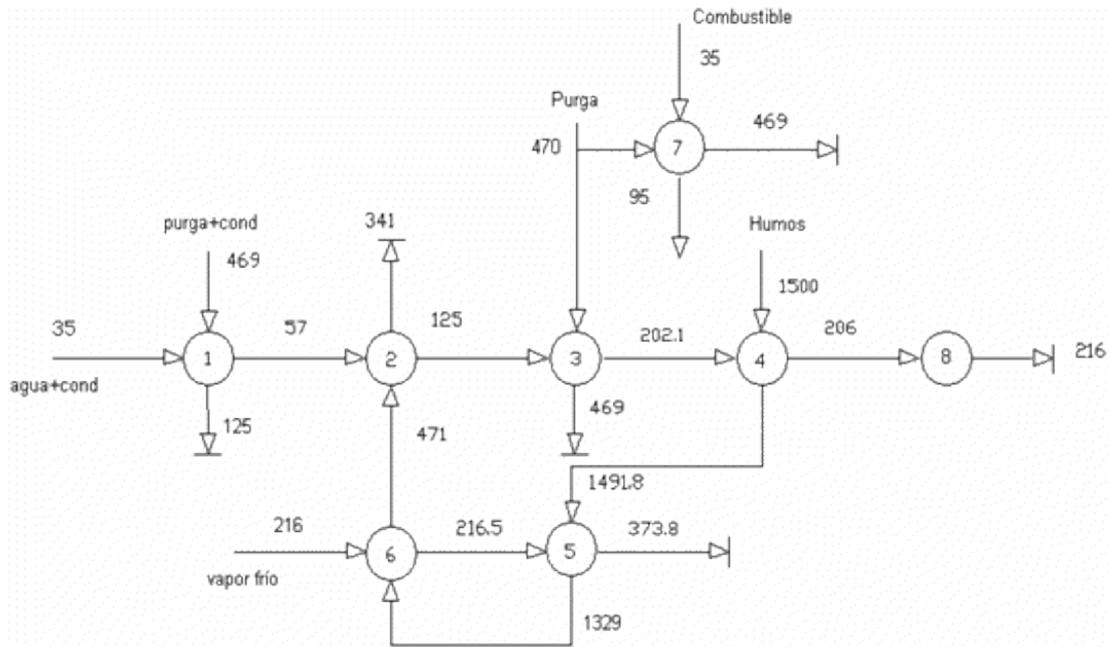


Fig. 7. Diagrama de flujo de los intercambiadores con la propuesta de utilizar el flujo de purga.

A partir de los resultados obtenidos, se analiza la repercusión que tiene esta variante en el aspecto económico.

### Análisis económico de la variante propuesta

Se comenzará por el análisis económico de la red de intercambio de calor. Estos resultados son calculados automáticamente por el Aspen Pinch. A continuación se muestra la tabla 1 con el resumen de los costos de los intercambiadores.

Tabla 1. Costo de los intercambiadores dentro de la red de intercambio de calor propuesta para la nueva variante

No equipo	Nomenclatura	Corrientes	Costo de inversión, \$
1	HX2	Purga+condensado	15 291,19
		Agua+condensado	
2	HX7	Humos	15 509,95
		Agua+condensado	
3	HX9	Purga	15 750,10
		Agua+condensado	

4	HX16	Humos	15 021,74
		Agua+condensado	
5	HX14	Humos	15 221,97
		Vapor frío	
6	HX11	Humos	16 126,02
		Vapor frío	
7	HX5	Purga	15049,07
		Combustible	
Costo total de inversión			107 970,04

Después se continúa el análisis haciendo una comparación de los costos energéticos de las dos variantes, teniendo en cuenta que la empresa trabajará 300 días al año, las 24 horas:

*Variante 1: situación actual en la planta de fuerza*

Consumo de vapor = 20 916,2 kg/h.

Consumo de agua para la alimentación de la caldera: 1 795,4 kg/h.

Costo energético = 1 057 945 \$/a

*Variante 2: Uso de la purga para el calentamiento de las corrientes en la planta de fuerza*

Consumo de vapor = 570,96 kg/h.

Consumo de agua = 43,5 kg/h

Costo energético = 28 831,38 \$/a

Ahorro en costos energéticos: Costo energético variante 1 – Costo energético variante 2

= 1 057 945 \$/a – 28 831,38 \$/a = 1 029 114,5 \$/a.

Tiempo de recuperación: Inversión / Ganancia = 107 970, 04 \$ /1 029 114,5 \$/a = 0,1 año.

Con ello podemos exponer que es factible llevar a cabo la inversión para disminuir los consumos energéticos en la planta de fuerza de la Papelera Damují.

## Conclusiones

1. Se demuestran las ventajas que ofrece, para el análisis energético en los procesos, el uso del simulador Aspen Pinch en el caso de estudio, en la Papelera Damují, a través de la obtención de un mayor volumen de información, efectividad y rapidez.
2. Se logra un ahorro considerable de energía en la planta de fuerza cuando se utiliza la purga para el calentamiento del combustible y el agua de alimentación a la caldera, lo que reporta un beneficio para la fábrica de 142 \$/h.

3. Con el diseño de la red de intercambio de calor propuesta se logra aumentar la eficiencia energética en el proceso, a pesar de las inversiones que se deben ejecutar, y se demuestra que es factible a partir del tiempo de recuperación de la inversión.

### **Bibliografía**

- AMANN, J. M.; M. KANNICHE AND C. BOUALLOU. «Natural Gas Combined Cycle Power Plant Modified into an O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> Cycle for CO<sub>2</sub> Capture», *Energy Conversion and Management*, 50 (3): 510-521, Mar., 2009.
- BONACHEA, M. «Análisis de la posibilidad de integración en un complejo de fábricas de azúcar-papel-alcohol-torula». Trabajo de diploma. Universidad Central de Las Villas Marta Abreu (UCLV), 2004.
- Castier, M. « Pinch Analysis Revisited: New Rules for Utility Targeting », *Applied Thermal Engineering*, 27 (8): 1653-1656, Jun., 2007.
- FRANCESCHIN, G.; A. ZAMBONI, F. BEZZO AND A. BERTUCCO. «Ethanol from Corn: a Technical and Economical Assessment Based on Different Scenarios», *Chemical Engineering Research and Design*, 86 (5): 488-498, May, 2008.
- GONZÁLEZ, M. «Impacto global de una tecnología más limpia en la fabricación de papel para ondular». Tesis presentada en opción al Grado Científico de Doctor en Ciencias Técnicas. Universidad Central de Las Villas Marta Abreu (UCLV), 2004.
- HUANG, H. J. AND I. L. CHIEN. «Choice of Suitable Entrainer in Heteroazeotropic Batch Distillation System for Acetic Acid Dehydration», *Journal of the Chinese Institute of Chemical Engineers*, 39 (5): 503-517, Sep., 2008.

## Laboratorio virtual sobre ciclos de potencia

### Virtual laboratory on power cycles

*Por Osvaldo Gozá León, Dianet Hernández Sainz  
y Lourdes Zumalacárregui de Cárdenas  
Facultad de Ingeniería Química, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría  
(CUJAE),  
La Habana, Cuba.  
e-mail: ogoza@quimica.cujae.edu.cu*

#### Resumen

En este trabajo se presentan los aspectos fundamentales y las experiencias relacionadas con el desarrollo e implementación de un laboratorio virtual sobre ciclos de potencia que ha sido impartido durante dos cursos en la asignatura de Termodinámica Técnica, del tercer año de la carrera de Ingeniería Química, como apoyo en el proceso de enseñanza. La primera parte del Laboratorio se dedica a la descripción de las instalaciones donde se efectúan ciclos de potencia y de fenómenos relacionados con el impacto que dichas instalaciones tienen en el medio ambiente. Para ello se utiliza un grupo grande de imágenes encontradas en Internet que ilustran, tanto en esquemas como de forma animada, el funcionamiento de once tipos de instalaciones. La segunda parte del Laboratorio se dedica a la simulación de ciclos de potencia con el programa CyclePad, bajado de Internet, y se estudia el efecto que tienen diversas variables en el ciclo de vapor con recalentamiento y el ciclo combinado. Este Laboratorio tuvo gran aceptación por parte de los estudiantes, quienes pudieron comprender de forma integral con mayor claridad y profundidad, mediante la simulación, los aspectos energéticos y medioambientales relacionados con la operación de las plantas con ciclos de potencia.

**Palabras clave:** Laboratorio virtual, ciclos de potencia, simulación, medio ambiente.

#### Abstract

In this paper we present the key aspects and experiences related to the development and implementation of a virtual laboratory on power cycles that has been imparted during two courses on Technical Thermodynamics, on the third year of Chemical Engineering career, as a support in the teaching-learning process. The first part of the Laboratory is dedicated to the description of the facilities where power cycles and phenomena related to the environmental impact that the aforementioned facilities have. For this purpose we used a large group of images found on Internet that illustrate, both in diagrams as well as in animations, the functioning of eleven types of facilities. The part of the Laboratory is dedicated to the simulation of power cycles using the software CyclePad downloaded from Internet, in order to study the effect of several variables in the steam-driven cycle with reheating and the combined cycle. This Laboratory had great acceptance from the students, who understood in a comprehensive way with more clarity and depth, by means of simulation, the

energy and environmental aspects related to the operation of the plants with power cycles.

**Keywords:** Virtual laboratory, power cycles, simulation, environment.

## Introducción

En esta experiencia se presentan los aspectos fundamentales relacionados con un laboratorio simulado sobre ciclos de potencia, impartido por primera vez en la asignatura de Termodinámica Técnica, del tercer año de la carrera de Ingeniería Química, en el que se combina la simulación con la energía y el medio ambiente.

La asignatura de Termodinámica Técnica tiene entre sus objetivos instructivos realizar, a nivel productivo, análisis termodinámicos a diferentes sistemas reales, como ciclos de potencia y de refrigeración. Por su contenido, esta asignatura aporta un grupo de conceptos fundamentales para el análisis energético en las industrias de procesos, y puede contribuir con fuerza a una estrategia educativa ambiental a través de las temáticas relacionadas con generadores de vapor, ciclos combinados y refrigeración, en las que se abordan los impactos medioambientales de los gases de combustión y los refrigerantes.

El programa de la disciplina no sólo carece de un enfoque ambiental, sino que no menciona el uso de la computación en el sistema de habilidades; y aunque se refiere en las indicaciones metodológicas, no se menciona el uso de simuladores de procesos. Sobre esta base, y dada la importancia del uso de la computación, se emprendió ya hace varios cursos un trabajo metodológico dirigido a superar estas insuficiencias.

Internet ofrece la posibilidad de acceder a un grupo variado de programas de computación que se pueden aplicar en la asignatura de Termodinámica Técnica. De estos software, dos excelentes programas «freeware» que son de gran utilidad en la impartición de esta asignatura, son el complemento de Excel TPX y el simulador de ciclos termodinámicos CyclePad [Gozá, 2002]; ambos programas se encuentran entre los valorados como herramientas informáticas utilizables en el currículo de Ingeniería Química [Gozá y Ameneiros, 1999; Gozá, 2007]. Desde el curso 2000-2001 esos programas están siendo utilizados exitosamente en las clases prácticas y los laboratorios en las computadoras utilizadas en la asignatura.

La Simulación de Procesos es una potente herramienta utilizada para el análisis de procesos en las industrias. En la solución de problemas de ahorro de energía, se ha reconocido que las aplicaciones de la simulación son tan amplias como el mismo campo de la energía. De aquí la conveniencia de su introducción como herramienta para el análisis en la asignatura de Termodinámica Técnica.

CyclePad es un programa de simulación estacionaria de ciclos termodinámicos, tanto de ciclos de potencia (de vapor y de gas) como de ciclos de refrigeración.

Con el uso de este programa se ha logrado que ya en tercer año el estudiante se enfrente a un simulador de procesos del tipo modular secuencial, lo que facilita significativamente la integración de los conceptos fundamentales de Termodinámica asociados a la evaluación de ciclos y con ello el análisis de esos sistemas.

Como un escalón superior en el desarrollo de las clases en las computadora utilizadas en la asignatura, en el curso 2006-2007 se concibió e impartió por primera vez un laboratorio simulado sobre ciclos de potencia, con una amplitud y nivel de complejidad en el análisis significativamente mayores a los anteriores [Gozá, *et al.*, 2008].

Dada la importancia que en el momento tecnológico actual tienen el uso eficiente de la energía y su impacto en el medio ambiente, se decidió que dicha actividad estuviera dirigida a ampliar los aspectos energéticos y medioambientales que el estudiante debe conocer, apoyándose para ello en la simulación y en las posibilidades que brinda Internet para obtener información gráfica.

El laboratorio simulado tiene como objetivo general:

- Integrar los aspectos energéticos y medioambientales relacionados con la operación de las instalaciones con ciclos de potencia.

Y como objetivos específicos:

- Ilustrar gráficamente las características de las instalaciones donde se efectúan ciclos de potencia, así como fenómenos relacionados con el impacto que dichas instalaciones tienen en el medio ambiente, y
- Simular la operación de un ciclo de vapor y de un ciclo combinado, cuantificando los consumos de combustible y agua.

## **Materiales y métodos**

La primera parte del laboratorio se dedica a la descripción de las instalaciones donde se efectúan ciclos de potencia, y de los fenómenos relacionados con el impacto que dichas instalaciones tienen en el medio ambiente. Para ello se utiliza un grupo de imágenes de Internet que ilustran, tanto en esquemas como de forma animada, el funcionamiento de las siguientes centrales: térmica convencional de carbón, de cogeneración mediante biomasa, hidroeléctrica, eólica, fotovoltaica, solar térmica, de ciclo combinado, de gasificación con ciclo combinado, incineradora de residuos sólidos urbanos y nuclear. De esta manera se familiariza al estudiante no sólo con las centrales convencionales de generación de potencia, sino también con aquellas que utilizan fuentes renovables de energía, y se destacan las ventajas que éstas tienen con relación al impacto sobre el medio ambiente.

Posteriormente se profundiza específicamente en la central térmica convencional de carbón y en la central de ciclo combinado.

Se escogió la central térmica convencional de carbón por dos razones. Primeramente, porque se pudo encontrar en Internet un sitio Web excelente dedicado por entero a recursos para la enseñanza de ciclos de potencia, del cual se pudieron tomar muchas fotos de calidad sobre los equipos fundamentales que se usan en esta instalación, así como esquemas y animaciones que ilustran el funcionamiento de las distintas secciones de la planta.

Utilizando el Macromedia Flash MX fue posible modificar convenientemente estas animaciones, las que con el uso del Microsoft PowerPoint son integradas a una presentación que las combina con las fotos de los equipos.

La segunda razón consiste en que este tipo de planta tiene un impacto negativo sobre el medio ambiente, ilustrándose entonces mediante animaciones fenómenos provocados por el uso de combustible fósiles, como son el efecto invernadero y el calentamiento global.

Durante la actividad docente también son explicados otros fenómenos, como la destrucción de la capa de ozono y la relación con el ciclo hidrológico del agua.

La segunda parte del laboratorio se dedica a la simulación con CyclePad de ciclos de potencia. Primero se aborda el ciclo de vapor con recalentamiento, según el cual opera la central térmica convencional de carbón, estudiándose el efecto que tienen el sobrecalentamiento, el recalentamiento y la disminución de la irreversibilidad en la expansión de la turbina, sobre el rendimiento térmico de la instalación.

## **Resultados y discusiones**

En la figura 1 se muestra el esquema de la central térmica convencional de carbón, y la figura 2 muestra la vista descriptiva correspondiente a este mismo tipo de planta, editada con Macromedia Flash MX.

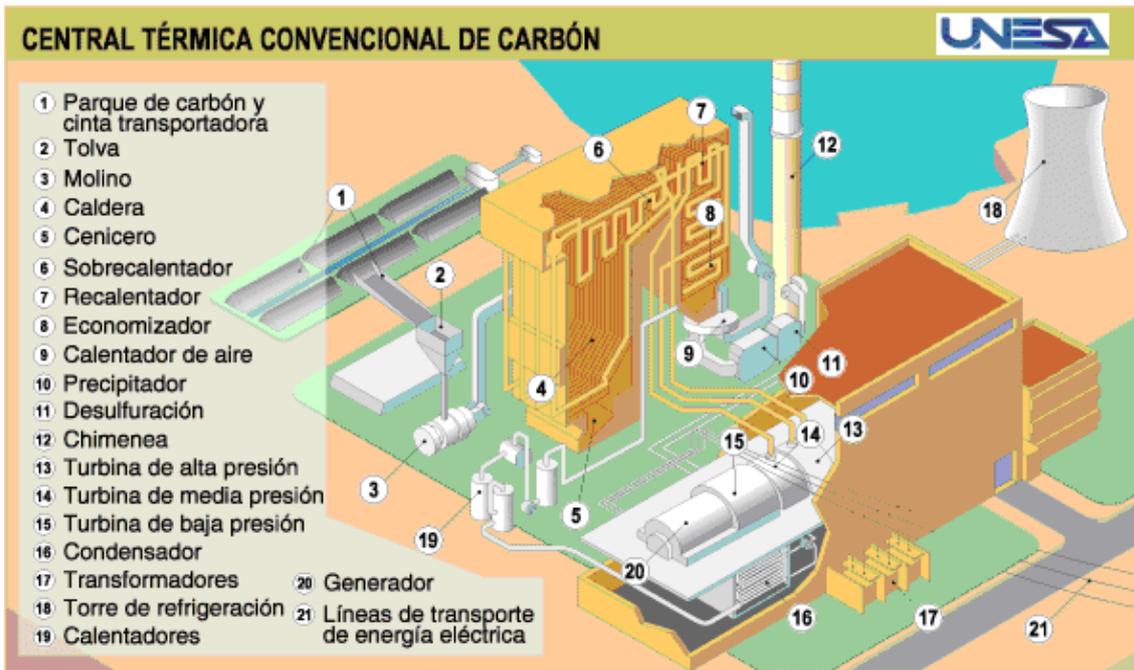


Fig. 1. Esquema de la central térmica convencional de carbón.

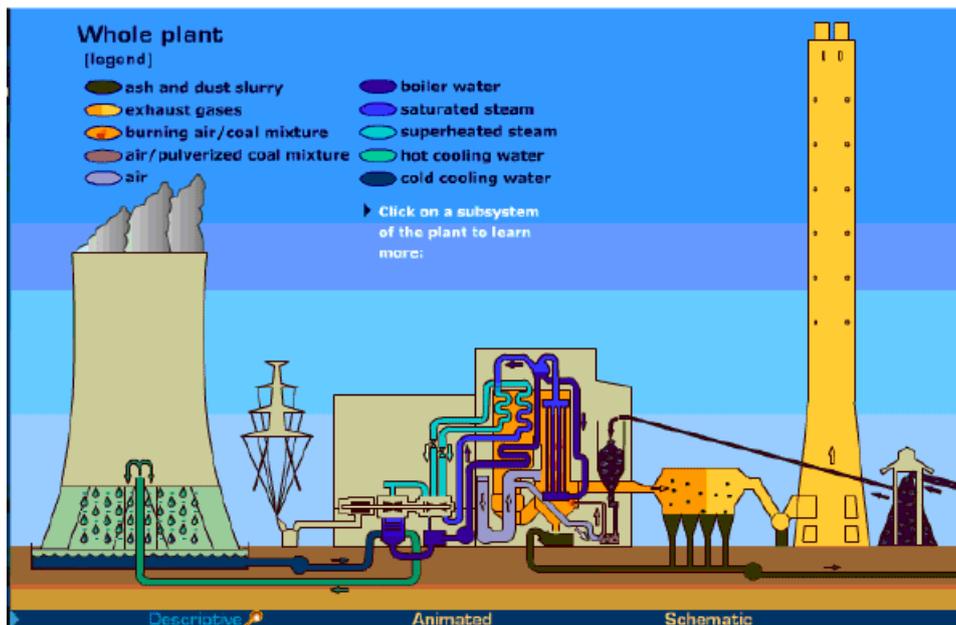


Fig. 2. Vista descriptiva de la animación editada con Macromedia Flash MX.

En la figura 1 se pone énfasis en la comprobación de la ubicación de los equipos auxiliares del generador del vapor, sobrecalentadores, recalentadores, economizadores y calentadores de aire, cuyas características más relevantes se estudian en clases anteriores.

En la figura 3 se muestra el ciclo de vapor con recalentamiento simulado con CyclePad. Esta actividad debe ser realizada por el alumno de forma independiente, en el aula, dado que ya ha sido ejercitada en una clase práctica anterior.

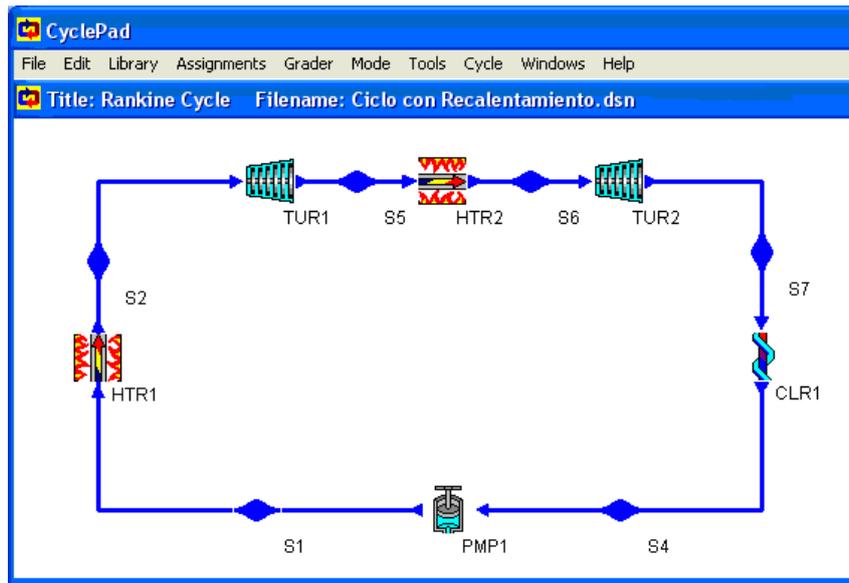


Fig. 3. Esquema del ciclo con recalentamiento en el simulador CyclePad.

Se logra cuantificar el efecto favorable que tienen estos factores en términos de reducción del consumo de carbón en el generador de vapor y, por tanto, de emisiones de contaminantes a la atmósfera, y de reducción del consumo de agua de enfriamiento en los condensadores, estableciéndose entonces el vínculo con los fenómenos medioambientales anteriormente ilustrados.

Para realizar esta evaluación, la información obtenida mediante la simulación con CyclePad es suministrada a una hoja de cálculo de Microsoft Excel confeccionada con ese fin. En la figura 4 se muestra su estructura. De esta manera el estudiante logra integrar la simulación con aspectos energéticos y medioambientales.

Del análisis de la figura 4 se aprecia que es posible verificar que el rendimiento térmico aumenta al sobrecalentar el vapor del ciclo Rankine básico, así como al recalentar el vapor en la magnitud dada. Este incremento es de 7,1 y 8,8%, respectivamente. A la vez, se comprueba el incremento con respecto al Rankine básico, de la calidad del vapor de salida, lo cual es beneficioso tanto para los efectos de transferencia de calor como para reducir el desgaste de los materiales [Cengel y Boles, 2006].

	A	B	C	D	E
1	Ciclo simulado		Rankine ideal (patrón)	Rankine con sobrecalentamiento	Recalentamiento ideal
2	Rendimiento térmico	Valor	37.08	39.72	40.33
3		Incremento	-	2.64	3.25
4		Incremento, %	-	7.1	8.8
5	Calidad en escape de la turbina	Valor	0.6747	0.7946	0.9385
6		Incremento, fracción	-	0.1199	0.2638
7		Incremento, %	-	17.8	39.1
8	Flujo másico de vapor, kg/h	Valor	373749	284396	235050
9		Disminución, kg/h	-	89353	138699
10		Disminución, %	-	23.9	37.1
11	Calor absorbido, MW	Valor	267.4	250.2	246.7
12		Disminución, MW	-	17.2	20.7
13		Disminución, %	-	6.4	7.7
14	Calor rechazado, MW	Valor	-168.3	-150.8	-147.2
15		Disminución, MW	-	17.5	21.1
16		Disminución, %	-	10.4	12.5
17	Flujo másico de combustible, kg/h	Valor	46719	35550	29381
18		Disminución, kg/h	-	11169.1	17337.4
19		Disminución, %	-	23.9	37.1
20	Flujo másico de agua de enfriamiento, kg/h	Valor	7236900	6484400	6329600
21		Disminución, kg/h	-	752500	907300
22		Disminución, %	-	10.4	12.5
23	Flujo másico de CO2 emitido a la atmósfera, kg/h	Valor	154171	117313	96958
24		Disminución, kg/h	-	36858	57213.34
25		Disminución, %	-	23.9	37.1

Fig. 4. Hoja de cálculo de Microsoft Excel confeccionada.

Como parte de la política de ahorro de combustible se aprecia la disminución del flujo de combustible requerido, lo cual tiene un efecto tanto económico como medioambiental. Al disminuir el flujo de combustible que se va a quemar, disminuye el volumen de los gases producto de la combustión. Estos gases contienen principalmente CO<sub>2</sub>, CO, SO<sub>2</sub> y NO<sub>x</sub>, además de N<sub>2</sub> y O<sub>2</sub>. En la figura 4 se observa que esa reducción del gas de efecto invernadero CO<sub>2</sub>, es de 37,1%.

Por otra parte, en las industrias se requiere la disminución del consumo del recurso agua, y en este análisis se aprecia cómo el flujo de agua de enfriamiento se reduce en 12,5% al ser menor la energía calorífica rechazada en el foco frío.

Un análisis similar se realiza para los ciclos combinados, en el que se demuestra el incremento en el rendimiento térmico que presenta ese tipo de ciclo y de ahí lo conveniente de su introducción en el país. La presentación del caso permite informar al estudiante acerca de los avances que se pueden obtener mediante la instalación del ciclo combinado en Cuba.

Este Laboratorio tuvo gran aceptación entre los estudiantes, quienes pudieron comprender con mayor claridad y profundidad, de forma integral mediante la simulación, los aspectos energéticos y medioambientales relacionados con la operación de las plantas con ciclos de potencia.

Dada la gran cantidad de información contenida en este Laboratorio, tanto en forma de texto como gráfica, durante su impartición en forma presencial no se abordan todos los contenidos, quedando por parte de los estudiantes su

estudio posterior; de esta manera la actividad constituye una vía para reforzar el proceso de enseñanza-aprendizaje de forma independiente, usando las posibilidades que brindan las nuevas tecnologías de la información. Asimismo, de la forma en que el Laboratorio fue concebido, éste puede ser utilizado como un apoyo en la modalidad de enseñanza semipresencial.

## Conclusiones

Se concibió e impartió por primera vez un laboratorio simulado sobre ciclos de potencia en la asignatura de Termodinámica Técnica, del tercer año de la carrera de Ingeniería Química, en el que se combinan la simulación con la energía y el medio ambiente, y se tiene como resultado la virtualización de contenidos como apoyo a la educación energética y medioambiental del estudiante de Ingeniería Química. Dada la forma en que se concibió, puede ser utilizado tanto en la enseñanza presencial como en la semipresencial.

## Bibliografía

CENGEL, Y. AND M. BOLES. *Thermodynamics: An Engineering Approach*. 5 ed. London: Mc Graw Hill. 2006.

GOZÁ, O. «Consideraciones acerca del uso de las herramientas informáticas en la carrera». *Comisión de Carrera de la Facultad de Ingeniería Química*. La Habana: Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría (CUJAE), 17 de enero de 2007.

\_\_\_\_\_. *Software de Termodinámica Técnica en Internet*. Monografía registrada en el CENDA, el 1 de marzo de 2002. Registro 08855-8855.

GOZÁ, O. Y J. AMENEIROS. «La Computación en la enseñanza de la Ingeniería Química», *Segundo Taller Internacional de Análisis de Procesos en la Ingeniería Química TIAP99*, La Habana: Facultad de Ingeniería Química, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría (CUJAE), abr., 1999.

GOZÁ, O.; L. ZUMALACÁRREGUI Y C. MORÓN. «Experiencias en la Informatización y Virtualización de la Carrera de Ingeniería Química en el ISPJAE». Publicación electrónica en las Actas del VI Congreso Internacional de Educación Superior, Universidad 2008. La Habana: feb., 2008.

## **Modelo matemático y solución analítica del funcionamiento de un destilador solar de bandeja**

### **Mathematical model and analytical solution of the functioning of a solar tray distiller**

Por Susana Fonseca Fonseca, Eider Miranda Perdomo y Alonso Torres Ten  
*Centro de Investigaciones de Energía Solar (CIES),  
Micro 3, Reparto Abel Santamaría, 90100, Santiago de Cuba, Cuba.*  
*Tel.: (53) (226) 671131 y 671346.*  
*Fax.: (53) (226) 671131.*  
*e-mail: alonso660@yahoo.com*

#### **Resumen**

En el presente trabajo se realiza la modelación matemática para simular el comportamiento térmico de un destilador solar de bandeja, mediante un sistema de tres ecuaciones diferenciales ordinarias del cual se obtiene su solución, la que permite conocer los valores de la temperatura en la cubierta, el agua que se va a destilar y la bandeja del destilador a través del día, así como se puede determinar también el volumen de agua destilada. Se realiza la validación experimental del modelo propuesto. El trabajo permite el estudio del comportamiento térmico del equipo bajo diferentes condiciones climáticas y características constructivas, utilizando un software.

**Palabras clave:** Destilación, destilador solar de bandeja, modelo matemático, fuentes renovables de energía, solución analítica.

#### **Abstract**

The present paper presents the mathematical modeling that simulates the thermal behavior of a solar tray distiller, by using a system of three ordinary differential equations whose solution is obtained which also allows knowing the values of the temperature in the cover, the water to be distilled and the tray of the distiller throughout the day. The volume of the water distilled can be also determined. The experimental validation of the proposed model is carried out too. The paper enables to study, by using software, the thermal behavior of the equipment under different meteorological conditions and construction characteristics.

**Keywords:** Distillation, solar tray distiller, mathematical model, renewable energies, analytical solution.

#### **Introducción**

Si bien es cierto que más de tres cuartas partes de la superficie del planeta Tierra están cubiertas por agua, también es cierto que sólo un pequeño porcentaje de ésta es potable. Muchas regiones sufren serios problemas de disponibilidad de agua apta para el consumo; para que el agua sea potable, en muchas ocasiones es necesario retirar gran parte de las sales presentes. La

desalinización de agua por vía solar es una solución posible para la producción de agua potable o agua destilada, en regiones de alta insolación, principalmente en zonas rurales.

La purificación de fluidos, específicamente la desalinización y destilación del agua para consumo humano y animal, utilizando la radiación solar, es una técnica ya desarrollada con ventajas económicas, principalmente por el ahorro de electricidad y petróleo, y la posibilidad de disponer del abasto de agua desalinizada in situ, con el consiguiente ahorro de los gastos de transportación y todos los inconvenientes inherentes a esa actividad.

Actualmente se conocen diversos tipos de destiladores solares, entre los que se destacan los que utilizan el efecto invernadero, por ser éste uno de los procedimientos más sencillos y económicos de obtención de agua destilada. Para predecir el comportamiento de cualquiera de esos dispositivos, antes de su construcción resulta necesario realizar su modelación matemática y simulación numérica.

En la literatura se encuentran numerosos trabajos dedicados al estudio de estos dispositivos, tanto desde el punto de vista experimental, como a través de simulaciones numéricas, procurando analizar cuáles factores influyen más significativamente en la eficiencia de un destilador solar. La mayor parte de los trabajos se basan en Dunkle [1961] y Cooper [1973], quienes para calcular la eficiencia realizaron un balance de energía en el sistema, empleando un coeficiente de transferencia térmica global entre la superficie del agua y la cubierta.

Existen diversas tecnologías y materiales para el diseño y construcción de esos equipos, observándose una tendencia mundial en el uso de materiales de bajo costo y fácil adquisición; ello ha conllevado a la utilización de materiales que aún sin presentar una conductividad térmica tan elevada como los metales, funcionan adecuadamente en destiladores solares, y en muchos casos la masa por unidad de área de la bandeja de esos equipos no es pequeña, por lo que el término de acumulación de energía se hace significativo. Esta característica hace que en la modelación del comportamiento de esos equipos sea necesario, para una mejor aproximación a la realidad, tener en cuenta el término de acumulación de energía en la bandeja del destilador solar.

El presente trabajo tiene por objetivo establecer un modelo matemático para el cálculo de las temperaturas en las diferentes regiones del destilador, con vistas a caracterizar su funcionamiento dinámico desde el punto de vista térmico, así como predecir su productividad y validar dicho modelo experimentalmente.

## **Materiales y método**

Un destilador solar tipo caseta, llamado también convencional, consiste en un recipiente poco profundo, de forma comúnmente rectangular o cuadrada, con el fondo de color negro u oscuro. Este recipiente, aislado térmicamente por el fondo y costados, contiene el agua que se desea evaporar. El sistema consta de una cubierta de material transparente (vidrio o algún plástico) a la radiación

solar, la cual tiene una inclinación hacia uno o varios canales de recolección del agua destilada.

En un destilador solar de caseta ocurren diversos procesos térmicos que caracterizan su funcionamiento. Dicho funcionamiento se realiza como sigue: de la radiación solar incidente en la cubierta del destilador solar, una pequeña parte es absorbida y otra es reflejada por el vidrio, gran parte atraviesa el vidrio y es absorbida por el agua y el material del fondo del destilador. La energía absorbida calienta el agua que se va a destilar y el fondo del destilador, el cual transfiere gran parte de su energía en forma de calor a la masa de agua, la cual eleva su temperatura, por lo que aumenta el movimiento de sus moléculas. Ese movimiento se hace más intenso a medida que aumenta la temperatura del agua, lo que provoca que una parte de las moléculas deje la superficie del agua por evaporación e incremente la humedad del aire cercano a la superficie del agua, lo que genera corrientes convectivas dentro del destilador. La transferencia del vapor de agua del evaporador al condensador se lleva a cabo por difusión y por la convección del aire húmedo. El aire húmedo y caliente sube hacia la cubierta de vidrio, donde parte del vapor de agua se condensa y resbala hacia el canal de recolección, ya como agua destilada.

Los procesos físicos de transferencia de calor y masa que tienen lugar en un destilador solar tipo invernadero, se representan en la figura 1.

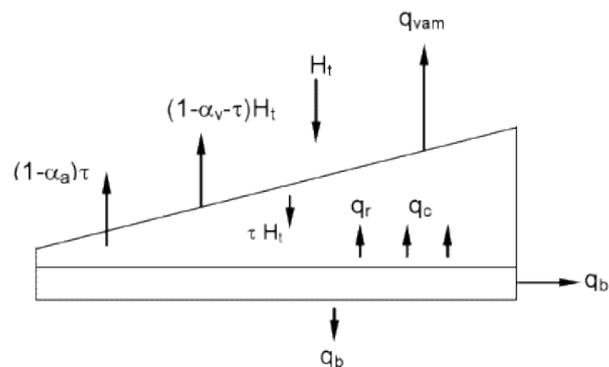


Fig. 1. Relaciones de flujos de calor en un destilador solar.

Para realizar el planteamiento del modelo se hacen las consideraciones siguientes:

- No existen fugas de vapor en el equipo.
- Las superficies del agua y la cubierta se consideran paralelas.
- La viscosidad, conductividad y calor de vaporización se consideran constantes.
- Se considera que no existen gradientes de temperatura en las direcciones vertical ni horizontal en la bandeja, el agua y la cubierta.
- Las temperaturas de la cubierta de vidrio, tanto externa como interna, son aproximadamente las mismas.

- Las características ópticas de transmitancia, reflectancia, absorbencia y emitancia se suponen constantes. Esto se considera válido, ya que aunque dichas características varían de acuerdo con el ángulo de incidencia del Sol, lo hacen de una manera insignificante para nuestros objetivos.
- La irradiancia solar se simula por una función sinusoidal.

Para la modelación del comportamiento térmico del destilador solar es necesario conocer la temperatura en las tres regiones del equipo. A partir de la diferencia de temperaturas entre el agua y la cubierta es posible calcular el volumen de agua destilada.

Para determinar las temperaturas en las tres regiones del equipo se parte del balance de energía en cada una de ellas, es decir, en la bandeja, en el agua que se va a destilar y en la cubierta.

A partir de las consideraciones anteriores, se plantearon las siguientes ecuaciones de balance de energía (para el día solar):

*Balance de energía en la cubierta:*

La variación de energía de la cubierta en un intervalo de tiempo determinado, está dada por la diferencia entre la energía captada y la energía entregada por ella en el mismo intervalo de tiempo, y se expresa por:

$$M_g C_{cp} (dT_g / dt) = (\tau_1 H_s) + [h_1 (T_w - T_g)] - [h_2 (T_g - T_a)] \quad (1)$$

*Balance de energía en el agua:*

La variación de energía de la masa de agua que se va a destilar en un intervalo de tiempo determinado, está dada por la diferencia entre la energía captada y la energía entregada por ella en el mismo intervalo de tiempo, y se puede expresar por:

$$M_w C_{pw} (dT_w / dt) = (\tau_2 H_s) + [h_3 (T_b - T_w)] - [h_1 (T_w - T_g)] \quad (2)$$

*Balance de energía en el recipiente (bandeja):*

La variación de energía del recipiente que contiene el agua que se va a destilar en un intervalo de tiempo determinado, está dada por la diferencia entre la energía captada y la energía entregada por él en el mismo intervalo de tiempo, y se puede expresar por:

$$M_b C_{pb} (dT_b / dt) = (\tau_3 H_s) + [h_3 (T_b - T_w)] - [h_4 (T_b - T_a)] \quad (3)$$

Donde la radiación solar se calcula como sigue [Fonseca, et al., 1993]:

$$H_s = (\pi / 2T_s) [H_t \text{sen}(\pi/T_s)t] \quad (4)$$

Una vez planteadas las ecuaciones diferenciales de balance de energía, resolviendo este sistema de ecuaciones diferenciales ordinarias mediante el software Mathematica 5.0, se obtuvieron las soluciones generales de aquellas. Las expresiones obtenidas fueron las que se muestran a continuación (para el día solar).

*Expresión matemática para determinar la temperatura en la cubierta del destilador solar:*

$$Tg[t] = ta[t] + (V_1 e^{-v0 t} + V_2 e^{-v01 t} + V_3 e^{-v02 t} - V_4 \text{Cos}(V_5 t) + V_5 \text{Sin}(V_6 t)) \quad (5)$$

*Expresión matemática para determinar la temperatura en el agua que se va a destilar en el destilador solar:*

$$Tw[t] = ta[t] + (Ag_1 e^{-Ag0 t} + Ag_2 e^{-Ag01 t} + Ag_3 e^{-Ag02 t} - Ag_4 \text{Cos}(Ag_5 t) + Ag_5 \text{Sin}(Ag_6 t)) \quad (6)$$

*Expresión matemática para determinar la temperatura en la bandeja del destilador solar:*

$$Tb[t] = ta[t] + (Ba_1 e^{-Ba0 t} + Ba_2 e^{-Ba01 t} + Ba_3 e^{-Ba02 t} - Ba_4 \text{Cos}(Ba_5 t) + Ba_5 \text{Sin}(Ba_6 t)) \quad (7)$$

Nota: Las variables se han declarado en la Simbología (al final del artículo). El volumen de agua destilada puede ser calculado mediante la expresión:

$$V = [A_1 * h_{ev} * (T_a - T_v)] / \rho_a * \lambda \quad (8)$$

Donde:

$A_1$ : Área del destilador, m<sup>2</sup>.

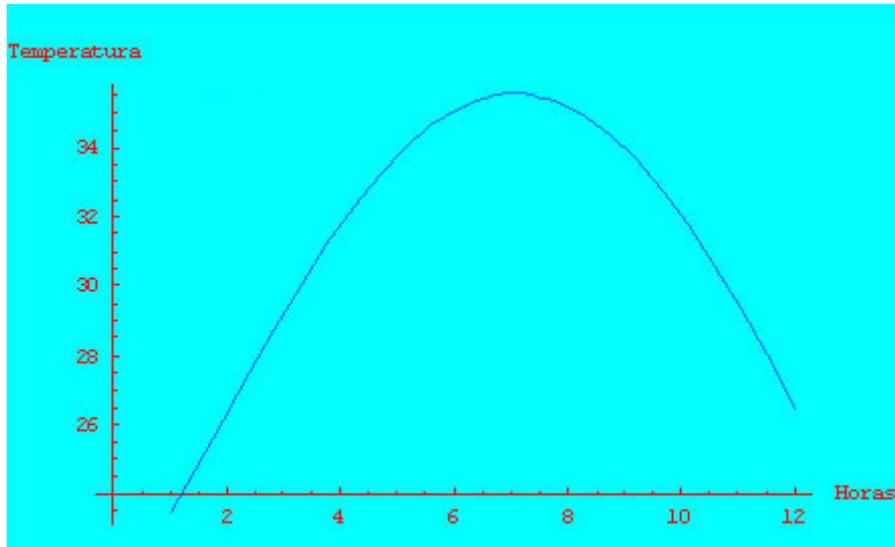
$h_{ev}$ : Coeficiente de transferencia de calor por evaporación del agua, kJ/hm<sup>2</sup>°C

$\rho_a$ : Densidad del agua, kg/m<sup>3</sup>.

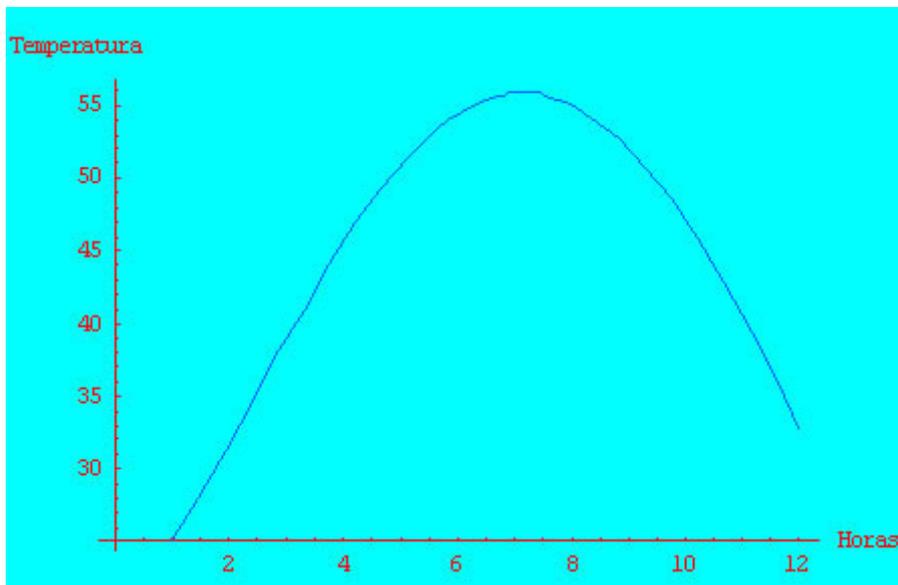
$\lambda$ : Calor latente de vaporización del agua, kJ/kg.

## Ensayos experimentales y análisis de resultados

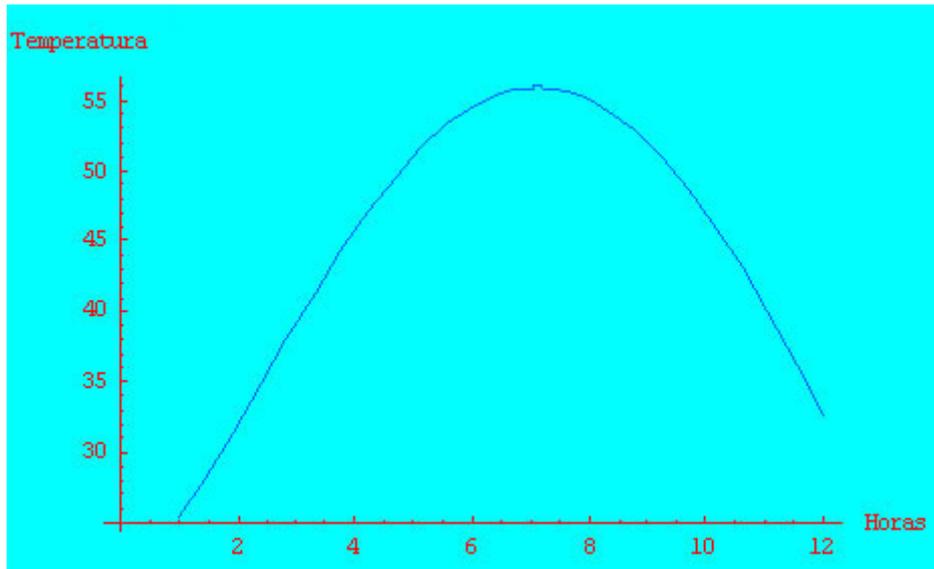
El modelo encontrado mediante la solución analítica del sistema de ecuaciones diferenciales utilizando el software profesional Mathematica 5.0, fue ejecutado en este programa, obteniéndose los resultados que se muestran en las figuras 2, 3, 4 y 5.



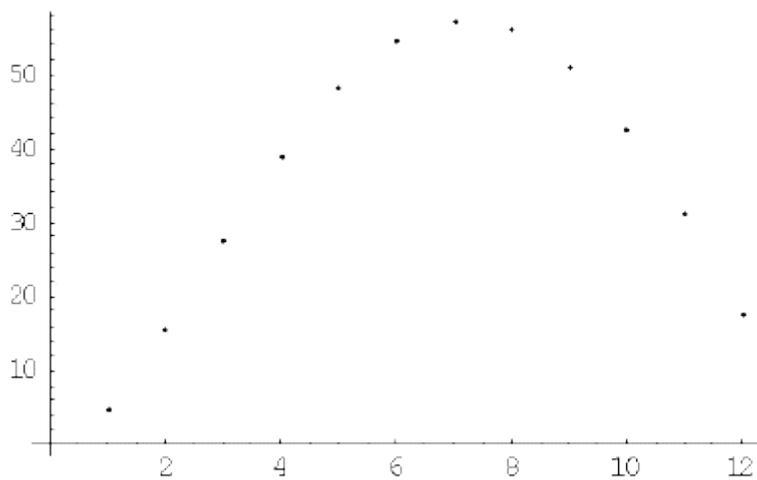
*Fig. 2. Temperatura calculada en el vidrio.*



*Fig. 3. Temperatura calculada en el agua.*



*Fig. 4. Temperatura calculada en la bandeja.*



*Fig. 5. Volumen de agua destilada, calculado de forma horaria.*

La validación experimental del modelo planteado se realizó en un equipo construido en el Centro de Investigaciones de Energía Solar (CIES). Los datos de radiación solar, temperatura ambiente y velocidad del viento se registraron por la Estación Actinométrica del propio Centro.

Se utilizaron termorresistencias de platino y termómetros de columna líquida de mercurio con intervalo de 0 a 100 °C y clase de precisión de 1 °C, y una probeta graduada para medir el volumen de agua destilada.

En las figuras se ilustran los valores calculados y experimentales de la temperatura de la cubierta de vidrio y del agua, así como la productividad horaria a lo largo del día solar.

El modelo sigue la misma tendencia con relación a las medidas experimentales. En las figuras con datos obtenidos teórica y experimentalmente, las temperaturas máximas se alcanzan alrededor del mediodía solar, lo que responde a los picos de irradiación solar.

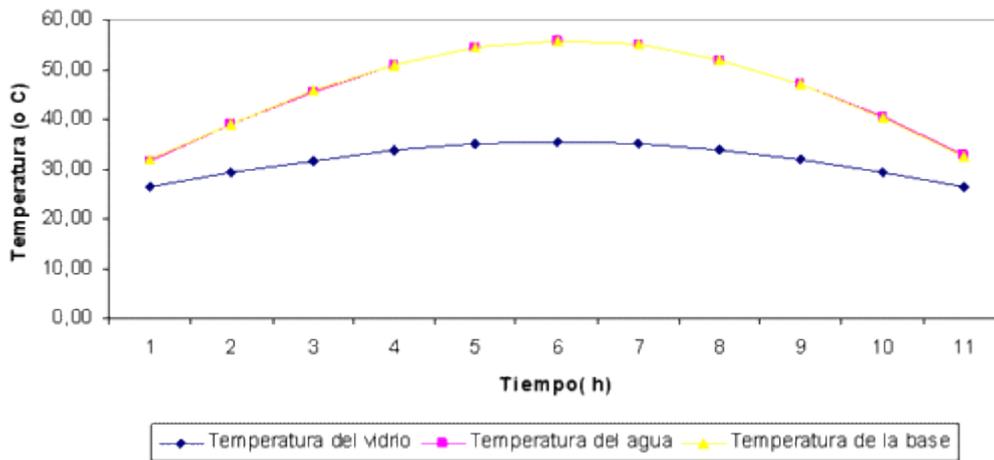


Fig. 6. Temperaturas calculadas en las diferentes partes del destilador solar.

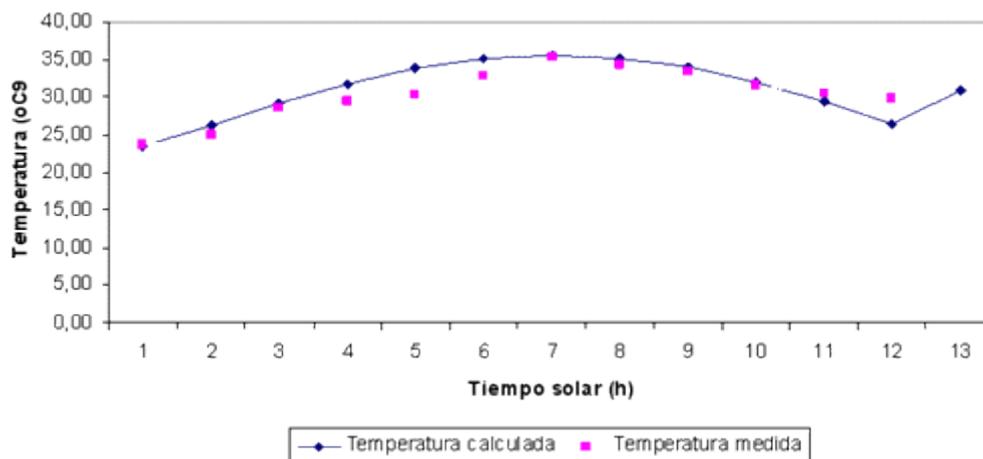


Fig. 7. Temperaturas calculadas y medidas en el vidrio.

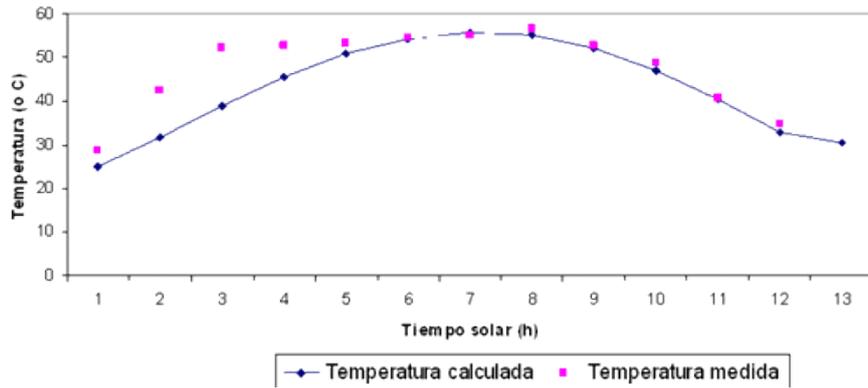


Fig. 8. Temperaturas calculadas y medidas en el agua.

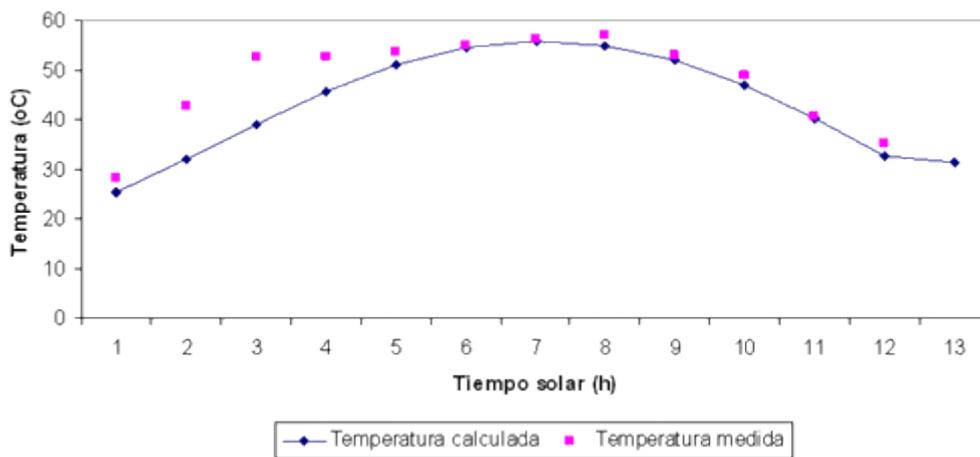


Fig. 9. Temperaturas calculadas y medidas en la bandeja.

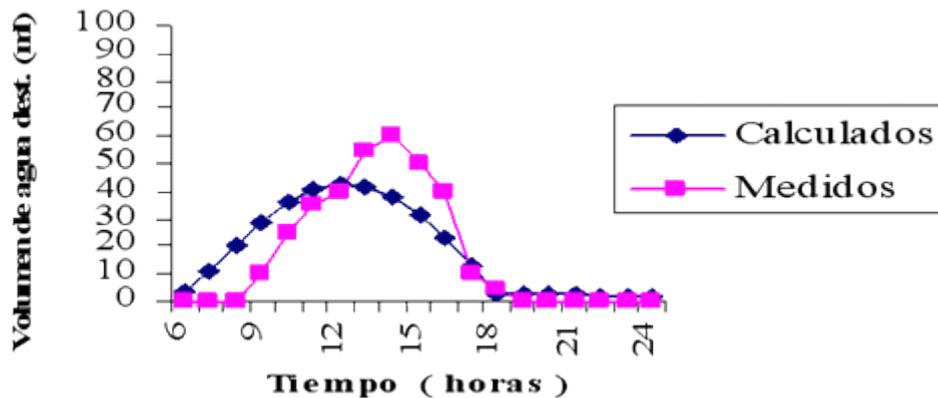


Fig. 10. Volumen medido de agua destilada.

En las figuras 7, 8 y 9 el modelo se ajusta mejor en las horas cercanas al mediodía solar, lo cual se debe a que para este intervalo la temperatura ambiental estimada (sumando de la variable calculada), se aproxima más al valor experimental; de igual forma, para ese período la irradiancia solar calculada por la función sinusoidal se ajusta mejor a los datos experimentales,

mientras que para las primeras horas de la mañana y últimas de la tarde, la radiación real incidente es algo inferior a los valores estimados por el modelo, debido a intermitencias naturales (nubosidad) que influyeron mayormente en ese período.

El error relativo asociado a las temperaturas teóricas y resultados experimentales para la temperatura del vidrio estuvo en el orden de 10%, presentando el mayor valor en horas de la mañana; para la temperatura del agua el error relativo estuvo en el orden de 20%, alcanzando la mayor desviación igualmente en las primeras horas de la mañana. El error relativo asociado al pronóstico de la productividad total, estuvo en el orden de 10%.

## Simbología

$M_g, M_w, M_b$ : Masa del vidrio, del agua y de la bandeja, respectivamente, kg.

$C_{pg}, C_{pw}, C_{pb}$ : Calor específico del vidrio, del agua y de la bandeja, respectivamente, kJ/kgK.

$T_g, T_w, T_b$ : Temperatura del vidrio, del agua y de la bandeja, respectivamente, °C.

$\tau_1$ : Coeficiente de absorción del vidrio.

$\tau_2$ : Fracción de energía solar incidente que es absorbida por el agua.

$\tau_3$ : Fracción de energía solar incidente que es absorbida por la bandeja.

$H_g$ : Radiación solar incidente en el vidrio, kJ/m<sup>2</sup>.

$h_1$ : Coeficiente de transferencia de calor agua-vidrio, kJ/hm<sup>2</sup>K.

$h_2$ : Coeficiente de transferencia de calor vidrio-ambiente, kJ/hm<sup>2</sup>K.

$h_3$ : Coeficiente de transferencia de calor bandeja-agua, kJ/hm<sup>2</sup>K.

$h_4$ : Coeficiente de transferencia de calor bandeja-ambiente, kJ/hm<sup>2</sup>K.

$H_t$ : Radiación solar diaria, kJ/m<sup>2</sup>.

$T_a$ : Temperatura ambiente, °C.

$t$ : Tiempo, h.

$T_s$ : Duración del día solar, h.

$\alpha, \beta, \gamma, \zeta, \varphi, \alpha_1, \beta_1, \gamma_1, \zeta_1, \varphi_1, \alpha_2, \beta_2, \gamma_2, \zeta_2, \varphi_2$ : Coeficientes calculados por el método de fracciones simples para calcular la Transformada de cada término de la solución.

$p, q$ : Coeficientes obtenidos de agrupar las variables del modelo de entrada.

## Conclusiones

1. Se obtuvo un modelo matemático que permite el cálculo de las principales variables que caracterizan el funcionamiento dinámico de un destilador solar tipo caseta.

2. La evaluación experimental del destilador valida la aproximación de los resultados teóricos, para un error relativo asociado a las temperaturas teóricas y resultados experimentales, entre 10 y 20 %. El error relativo asociado al pronóstico de la productividad y resultados experimentales, estuvo en el orden de 10%.

## Bibliografía

- ACHILOV, B. M AND V.U. CHUGUNKOV. «Calculating the Temperature Regimes of Solar Still», *Applied Solar Energy*, v. 17, No. 2, 1981.
- BARRERA, C. E.; J. M. GONZÁLEZ, *et al.* «Comparación de resultados de modelos teóricos y experimentales de destiladores solares», *Memorias de la IX Semana Nacional de Energía Solar*, 1985.
- BROVNIKOV, G. N., *et al.* «Determining the Thermal Losses to the Atmosphere from a Solar Still», *Applied Solar Energy*, v. 15, No. 4, 1979.
- CASANOVA, J. G.; M. SOLÍS, *et al.* «Simulación de los procesos térmicos en un destilador solar tipo caseta», *Memorias de la IX Semana Nacional de Energía Solar*, 1985.
- CLARK, J. A. «The Steady-State Performance of a Solar Still», *Solar Energy*, v. 44, No. 1, pp. 43-49, 1990.
- Céspedes Hinojosa. Transformada de Laplace.
- COOPER, P. I. «Digital Simulation of Experimental Solar Still Data», *Solar Energy*, No. 14, 1973.
- DUNKLE, R. V. «Solar Water Distillation: The Roff Type Still and Multiple Effect Diffusion Still», *International Development in Heat Transfer*, Conference at Denver, ASME, pp. 895-902, 1961.
- MASSIPE, J. R.; S. FONSECA, *et al.* «Simulación numérica del destilador solar de cascada», *Rev. Tecnología Química*, v. XI, No. 1, 1990.
- MALIK, M. A., *et al.* *Solar Distillation*. Gran Bretaña: Pergamon Press, 1982.
- MURRAY R., SPIEGEL. *Applied Differential Equations*. Second edition.
- «Producción de agua potable para pequeños grupos humanos», *Memorias de las I Jornadas Iberoamericanas de Energía Renovable*. Santa Cruz de la Sierra, Bolivia: Centro Iberoamericano de Formación, AECY, 1999.
- FONSECA, S., *et al.* «Simulación numérica del destilador solar de cascada en régimen estacionario», *Rev. Tecnología Química*, año XIV, No. 1, 1993.
- FONSECA, S., *et al.* «Modelación matemática de un destilador solar construido con materiales de la construcción civil», *Rev. Tecnología Química*.

**Eco Solar** es una publicación científica electrónica trimestral para los especialistas de las fuentes renovables de energía. Se dedica a la promoción de temas relacionados con la energética, las energías alternativas, la física ambiental, la arquitectura bioclimática, el impacto sobre el medio ambiente la educación ambiental, la termoconversión, la eficiencia energética, y las energías de origen hidráulico, fotovoltaico, eólico, solar, biomasa y ciencias relacionadas.

**DIRECTOR GENERAL:**

Dr. Luis Bérriz Pérez.

**DIRECTOR:**

Lic. Manuel Álvarez  
González.

**EDITOR:**

Lic. Alejandro Montecinos  
Larrosa.

**CORRECCIÓN:**

M Sc. Roberto Manzano  
Díaz.

Ing. Jorge Santamarina

**DISEÑO ELECTRÓNICO:**

D.I. Antonio Romillo Polaino.

**TRADUCCIÓN:**

Lic. Lázaro O´Farril Lazo.

**CONSEJO ASESOR:**

Dr. Luis Hernández (Energía fotovoltaica)

Dr. Conrado Moreno Figueredo (Energía  
eólica)

Lic. Bruno Henríquez Pérez (Física  
ambiental)

Dr. Jorge Luis Paretas (Energía hidráulica)

Dr. Dania González Couret (Arquitectura  
bioclimática)

Dr. Jorge Guardado (Biomasa)

Dr. Sergio Corp Linares (Energía solar  
térmica)

Lic. Leonor Turtós Carbonell (Impacto  
ambiental)

Lic. Alejandro Montecinos Larrosa (Energía  
humana)

Lic. Ricardo Bérriz Valle (Educación  
ambiental)



**SOCIEDAD CUBANA PARA LA PROMOCIÓN  
DE LAS FUENTES RENOVABLES DE ENERGÍA Y EL RESPETO  
AMBIENTAL**

Calle 20 no. 4113, esquina a 47, Miramar, Playa,  
Ciudad de La Habana, Cuba. Código Postal: 11300.

Teléfono: (537) 205-9949.

Apartado postal: 6611, CP: 10600, Ciudad de La Habana, Cuba.

e-mail: [editora@cubasolar.cu](mailto:editora@cubasolar.cu)

<http://www.cubasolar.cu>