



REVISTA CIENTÍFICA TRIMESTAL DE CUBASOLAR

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

29



Soluciones técnicas para la instrumentación y el control de un túnel de viento para la optimización de los generadores eólicos de pequeña potencia que se proyectan fabricar en Cuba.....	1
Diseño de un prototipo de refrigerador solar por adsorción, empleando carbón activado/metanol	9
Factibilidad de implementación de un sistema híbrido autónomo con celda de combustible PEM para electrificar localidades rurales en Cuba	19
TELENUL, SCADA de Supervisión y Telecontrol de Redes de Distribución, diseñado para recerradores y seccionalizadores NULEC.....	35
Fundamentos del secado neumático vorticial de bagazo de caña	45
Rediseño de los quemadores de la Unidad 3, de la CTE «10 de Octubre», para quemar combustible nacional	55

Soluciones técnicas para la instrumentación y el control de un túnel de viento para la optimización de los generadores eólicos de pequeña potencia que se proyectan fabricar en Cuba

Technical solutions for the instrumentation and control of a wind tunnel utilized for the optimization of small-scale wind generators planned to be manufactured in Cuba

Por M.Sc. Beatriz Reyes Collado y Dr. Luis Jerónimo García Faure**

** Centro de Estudio de Eficiencia Energética,
Facultad de Ingeniería Mecánica, Universidad de Oriente, Cuba.
e-mail: betty@ceefe.uo.edu.cu*

Resumen

En este artículo se exponen los trabajos realizados para dar solución a la instrumentación y puesta a punto de un túnel de viento, como tarea del Centro de Estudio de Eficiencia Energética, de la Universidad de Oriente, dentro del Programa Eólico Nacional, donde se pretenden ensayar varios perfiles aerodinámicos, con el objetivo de diseñar una metodología para proyectar palas aerodinámicas de generadores eólicos de pequeña potencia, en condiciones de optimización, para medio y bajo potenciales eólicos. Además, se ha desarrollado la metodología de trabajo con el objetivo de, mediante la teoría de los modelos, predecir el comportamiento de los prototipos a escala real.

Palabras clave: Energía eólica, perfiles aerodinámicos y túnel de viento

Abstract

This paper presents the work carried out to solve the instrumentation and fine tuning of a wind tunnel, a task of the Center Energy Efficiency Studies, at Universidad de Oriente, as part of the National Wind Energy Program, with the purpose of testing several aerodynamic profiles, with the objective of designing a methodology to project aerodynamic blades of small wind generators, under optimized conditions, for medium and low wind energy potentials. In addition, the work methodology

has been developed with the objective of predicting the behavior of real scale prototypes by means of model theory.

Keywords: Wind energy, aerodynamic profiles, wind tunnel

Introducción

La energía eólica es la fuente renovable que mayor crecimiento ha venido experimentando en los últimos años. Este crecimiento exponencial hace pensar que para el 2030, más de 25% de la energía eléctrica mundial será producida por máquinas eólicas [DEWI, 2005]. Los mayores fabricantes se encuentran en la Comunidad Europea, seguida por Estados Unidos y China.

Cuba prioriza las fuentes renovables de energía dentro de sus líneas de desarrollo, y dentro de éstas a la energía eólica, para lo cual se ha elaborado un plan a mediano y largo plazos, que prevé alcanzar unos 400 MW instalados para el 2025 [www.cubaenergia.cu].

Para cumplir con este objetivo, se creó el Grupo Eólico Nacional, que tiene entre sus principales acciones la confección del mapa eólico, la determinación de las zonas de alto potencial eólico, el desarrollo de parques eólicos, el proyecto y construcción de generadores eólicos de media potencia (10-20 kW), y el proyecto y construcción de generadores eólicos de baja potencia (1-2 kW).

Dentro de este Grupo, el Centro de Estudio de Eficiencia Energética (CEEFE), de la Universidad de Oriente, está trabajando en la confección de una metodología para el proyecto de palas aerodinámicas de generadores eólicos de pequeña potencia, en condiciones de optimización, para medio y bajo potenciales eólicos, que aporten soluciones a casos aislados que no tengan posibilidad de conectarse al Sistema Electroenergético Nacional (SEN).

Para dar cumplimiento a esta tarea, el CEEFE se propuso estudiar varios modelos de palas que pudieran ser utilizados en aerogeneradores que trabajen en condiciones de medio y bajo potenciales eólicos. El principal inconveniente encontrado es la no existencia de condiciones idóneas del laboratorio para el estudio de la aerodinámica de las palas, por lo que el CEEFE se propuso poner en funcionamiento un túnel de viento, construir una pala diseñada por Félix Rodríguez (Felito) y obtener sus perfiles aerodinámicos, además de confeccionar la guía de laboratorio desde el punto de vista docente e investigativo.

Desarrollo

A partir de estudios previos realizados a palas construidas, y siguiendo la teoría del trazado de los perfiles, se ha podido comprobar que para el caso de los pequeños aerogeneradores existen algunas divergencias en cuanto a la selección de los perfiles aerodinámicos, y la teoría del gradiente de torcimiento de la pala.

Existe una diferencia marcada entre la geometría de las palas de los grandes aerogeneradores y las del pequeño aerogenerador experimental construido por Félix Rodríguez, innovador de la provincia de Sancti Spíritus. En las primeras, es mayor el gradiente de torcimiento a lo largo de la pala, no así en el pequeño aerogenerador, que prácticamente no varía; además, se demuestra que la relación largo-ancho también difiere.

Por estas razones, se hace necesario el estudio detallado de la geometría de los perfiles aerodinámicos y de la ley del gradiente de torsión de las palas, para garantizar alto par de arranque con elevado valor de la relación:

$$\lambda = \text{Velocidad periférica} / \text{Velocidad del aire}$$

Para estos estudios aerodinámicos se requiere del uso del instrumento denominado túnel de viento, o túnel aerodinámico. El túnel de viento es una herramienta de investigación desarrollada para determinar los efectos del movimiento del aire alrededor de objetos sólidos [fluidos.eia.edu.co]. La mayoría de los túneles de laboratorio para ensayos aerodinámicos tienen secciones de prueba de dimensiones reducidas, que no permiten determinar la característica de las palas en funcionamiento.

Puesta a punto del túnel de viento y su instrumentación

El CEEFE cuenta dentro de sus laboratorios con un túnel de viento, en el que se pueden ensayar modelos de palas de hasta 0,3 m de diámetro, con lo cual es posible medir la potencia y caracterizar el comportamiento de sus principales parámetros.



Fig. 1. Túnel de viento para la caracterización de perfiles y palas.

Características del túnel de viento:

- Ciclo abierto.
- Cámara de ensayos: 35 x 35 cm de sección y 60 cm de largo.
- Velocidad máxima de operación en la cámara de ensayos: 20 m/s.

- Ventilador de potencia 30 kW, $\cos\phi = 0,89$, $n = 2\ 900$ rpm.
- Cono de reducción 1:6.

Instrumentos de medición con que cuenta el túnel de viento:

- Anemómetro.
- Balanza de dos componentes.
- Dispositivo para determinar la potencia que entrega la pala.

Este túnel de viento clasifica como de baja velocidad, alcanzando un máximo de 20 m/s en la sección de ensayo [ksnnsplarc.nasa.gov].

Como parte del trabajo llevado a cabo, se procedió a la recuperación y puesta a punto del túnel de viento y sus instrumentos [Pereira, 2008].

La recuperación del túnel consistió en:

1. Dar mantenimiento al túnel y restablecer su alimentación eléctrica.
2. Calibrar y adaptar el anemómetro de cazoletas.
3. Recuperar y calibrar la balanza de dos componentes.
4. Diseñar y montar un dispositivo para medir la potencia de la pala.

Dada la necesidad de conocer la curva de eficiencia y potencia contra velocidad del viento, se hizo necesaria la construcción de un dispositivo, al cual, instalándole un modelo a escala de una pala, se pudieran obtener dichos resultados, con el objetivo de realizar después una selección adecuada [Pereira, 2008].

En la figura 2 se muestra el conjunto pala-generator trifásico; a la salida del mismo se colocaron tres resistencias conectadas en delta de 1 K Ω , como se indica en el esquema de la figura 3.



Fig. 2. Dispositivo para medir la potencia.

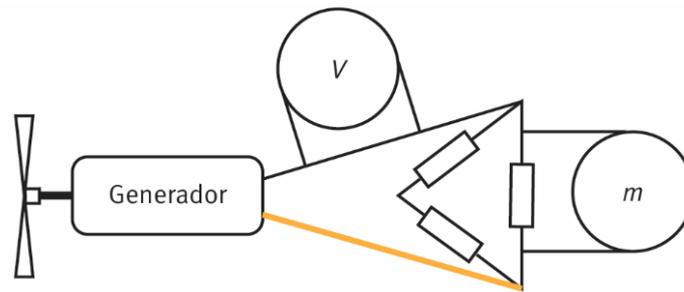


Fig. 3. Esquema del dispositivo para determinar la potencia.

Confección de la guía de laboratorio

En la guía de laboratorio se propone una metodología a seguir para la realización del análisis aerodinámico de las palas, con dos fines: uno docente-metodológico y otro científico-investigativo. La práctica se basa en la teoría del análisis de perfiles aerodinámicos inmersos en una corriente de aire, donde se obtendrá el comportamiento aerodinámico de los perfiles al variar el ángulo de ataque.

Se aporta una explicación exhaustiva del funcionamiento del túnel de viento y de las técnicas a seguir para estudiar el flujo de aire real alrededor de la geometría de los perfiles, empleando la balanza de dos componentes y el piezómetro múltiple, así como determinar la fuerza de arrastre y de sustentación, y la comparación con los resultados teóricos, que también deben tener en cuenta el número de Reynolds y el número de Mach [Abigail, 2008].

Construcción de la pala diseñada por Félix Rodríguez y obtención de sus perfiles aerodinámicos

Para el análisis de la aerodinámica de las palas en aerogeneradores que operan en condiciones de medio y bajo potenciales, se escogió como primer modelo a ensayar, la pala construida por Félix Rodríguez, por encontrarse instalada y funcionando en más de 76 aerogeneradores, con la consideración de que el procedimiento para su construcción no cumple con las normas de los perfiles aerodinámicos desarrollados por la NACA, ni Göttingen, ni Gost.

Dichas palas son elaboradas de forma artesanal, a partir de un tablón de madera de aproximadamente 3 x 0,20 x 0,05 m. El estudio de las características aerodinámicas de la pala fue llevado a cabo por secciones, para lo cual ésta fue cortada. Una de las particularidades de la pala es que el borde de ataque no es de forma redondeada como el de los perfiles estandarizados, sino que termina en forma afilada, lo que suele ofrecer un

mayor rendimiento. También es útil señalar que la pala mantiene constante su ancho, y solamente llegando a sus extremos se estrecha.

Como la pala no fue construida atendiendo a la metodología tradicional, se cortó en diferentes secciones para analizarla aerodinámicamente, y de ahí se constató que los perfiles no son los mismos para cada sección, sino que existe una pequeña variación en cuanto a la curvatura del extradós, por lo que se procedió a la tarea de realizarle la tabla numérica a cada sección, para que su construcción resultara lo más fácil posible.

En la tabla 1 se exponen los parámetros geométricos de los perfiles de cada una de las secciones [Abigail, 2008].

Tabla 1. Parámetros geométricos de los perfiles de cada sección

Sección	C	C_{max}	e	XC_{max}
1-1l	205	14	28	82
2-2l	205	14,5	29	82
3-3l	205	15	30	82
4-4l	205	14,25	28,5	82
5-5l	167	13,5	27	83,5

En la tabla 2 se presentan los valores obtenidos para cada sección, según la nomenclatura de los perfiles NACA de cuatro cifras.

Tabla 2. Valores para cada sección según la nomenclatura de los perfiles NACA de cuatro cifras

Sección	(C_{max} / c) 100, %	(XC_{max} / c) 100, %	(e / c) 100, %	NACA
1-1l	6,9	4	13,7	4412
2-2l	7,07	4	14,1	4415
3-3l	7,3	4	14,6	4415
4-4l	6,95	4	13,9	4412
5-5l	6,6	5	16,1	4415

Por todo lo antes expuesto, se puede concluir que:

- En todos los perfiles, la máxima flecha de la línea de curvatura media, se encuentra entre 6,6 y 7,3% desde el borde de ataque.
- La distancia desde el borde de ataque hasta la posición de la máxima flecha de la línea de curvatura media en décima de la cuerda, es de 4% medido desde el borde de ataque; sólo en la sección 5-5I se encuentra en 5%.
- El espesor máximo, en tanto por ciento de la cuerda, oscila entre 13,7 y 16,1%. Vale destacar que los perfiles, atendiendo a su geometría, se clasifican en plano-convexo, ya que el extradós es de forma convexa; y el intradós, plano.

Después de analizar cada uno de los perfiles, se comprueba que éstos no se encuentran dentro de los estandarizados NACA de cuatro cifras, no obstante lo cual sus características aerodinámicas son excelentes.

Conclusiones

1. Para poder garantizar el proyecto en condiciones de optimización, referido a las palas de los generadores de pequeña potencia que se prevé sean fabricados en Cuba, se ha dado solución a la instrumentación y puesta a punto del túnel de viento.
2. Se pudo determinar que el modelo ensayado posee excelentes características aerodinámicas, a pesar de que la geometría de su perfil difiere notablemente de los perfiles que generalmente son seleccionados para palas de generadores eólicos, por lo que se recomienda que ésta sea protegida legalmente (el perfil aerodinámico y la relación de aspecto).

Recomendaciones

1. Construir una plantilla para la construcción de la pala en gran escala.
2. Comparar los perfiles con otras series de perfiles estandarizados (Göttingen).
3. Desde el punto de vista de su resistencia mecánica, las palas de madera soportan satisfactoriamente las tensiones correspondientes a velocidades de viento del orden de 20 m/s. Para su introducción a escala industrial, y que sea estética y económicamente competitiva, resulta conveniente cubrirla mediante una capa de resina sintética, con la cual se aumentaría su resistencia y se protegería contra las inclemencias del tiempo.
4. Realizar el cálculo de fatiga a la pala para determinar su tiempo de vida útil, empleando el método de los elementos finitos (MEF).

5. Determinar la zona de máximas tensiones y el tamaño crítico de la grieta, empleando el MEF.

Bibliografía

- ABIGAIL ROJAS, EMIGDIO. (2008). «Desarrollo teórico y preparación de perfiles para la realización de ensayos en el túnel de viento», Trabajo de Diploma. Tutor: M.Sc. B. Reyes. Santiago de Cuba: Universidad de Oriente, 2008.
- BEATÓN SOLER, PEDRO. (1987). *Bombas, ventiladores y compresores*. La Habana: Ediciones ISPJAM, 1987.
- COLECTIVO DE AUTORES. (1983). *Libro de energía renovable educativo*. IGOPAT-CREE, sept., 2003.
- DÉSSIRÉ LE, GOURIERÉS. (1983). *Energía eólica. Teoría. Conceptos y cálculos prácticos de las instalaciones*. Ed. Masson, 1983.
- DEWI. (2005). *Análisis de información y documentación sobre energía eólica en Cuba y recomendaciones para el desarrollo de un Programa de Energía Eólica*. Informe final. DEWI-SO 0508-021. 19 de octubre de 2005. <http://fluidos.eia.edu.co/hidraulica/articulosos/flujodegases/tuneldeviento/tuneldeviento>.<http://ksnsp.larc.nasa.gov/webtext.cfm?unit=windtunnel>.<http://www.cubaenergia.cu>.
- LEIVA VIAMONTE, GUILLERMO. (2006). «Reflexiones preliminares sobre condiciones específicas a considerar en la selección de aerogeneradores para parques eólicos en Cuba», Diplomado de energía eólica para la generación eléctrica. La Habana: CETER, 2006.
- PEREIRA PEÑA, JOSÉ RAÚL (2008). «Puesta a punto del túnel de viento e instrumentación para ensayos de perfiles aerodinámicos». Trabajo de Diploma. Tutor: M.Sc. B. REYES. Santiago de Cuba: Universidad de Oriente, 2008.
- RODRÍGUEZ, FÉLIX. Consultas al diseñador del aerogenerador.
- SÁNCHEZ, MAURO. Consultas al Técnico del Centro Investigación Energía Solar (CIES).
- STREET, ROBERT. ELEMENTOS DE MECÁNICA DE FLUIDOS. LA HABANA: EDICIÓN Revolucionaria.
- VELÁSQUEZ, ARTURO. Comportamiento aerodinámico de cuerpos fuselados y perfiles alares.

Diseño de un prototipo de refrigerador solar por adsorción, empleando carbón activado/metanol

Design of a prototype of adsorption solar refrigerator, using activated activated carbon/methanol

Por Ing. Esp. Mariela Sánchez Díaz y Dr. Juan José González Bayón***
Universidad Nacional Experimental Francisco de Miranda,
Santa Ana de Coro, Falcón, Venezuela.*

*** Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría (CUJAE),
La Habana, Cuba.e-mail: jjgbayon@ceter.cujae.edu.cu*

Resumen

El prototipo diseñado tiene tres principales componentes: el colector solar-generador-adsorbedor, el condensador y el evaporador. Las dimensiones del prototipo se establecieron en función de producir 3 kg de hielo, considerando la temperatura ambiente de 30 °C, la temperatura máxima de generación de 90 °C, la presión de condensación y evaporación en 22 kPa y 8,55 kPa, respectivamente, y la relación de equilibrio propuesta por - Astakhov. Como resultado se obtuvo un equipo compacto con un área de colector solar de 0,374 m², dentro de la cual se deben introducir 5 tubos de acero inoxidable, de 76 mm de diámetro externo, realizando la sección anular mediante una malla, con un diámetro externo de 30 mm, y la cantidad de carbón activado deberá ser de 7,5 kg, el cual irá distribuido a razón de 1,5 kg por el tubo. Por otro lado, la cantidad de metanol será de 2,25 kg, el área del condensador de 0,214 m² y del evaporador de 0,24 m², y la cámara de enfriamiento tendrá un volumen de 60 L. Para las conexiones se empleará una tubería de acero inoxidable de 30 mm de diámetro externo, 5 válvulas de paso rápido, una válvula de presión y cinco termocuplas tipo K.

Palabras clave: Refrigerador solar, adsorción y carbón activado/metanol

Abstract

The prototype designed has three main components: the solar collector-generator-adsorber, the condenser and the evaporator. The dimensions of the prototype were established in order to produce 3 kg of ice, considering an ambient temperature of 30 °C, a maximum generation temperature of 90 °C, the condensation and evaporation pressures at 22 kPa and 8.55 kPa, respectively, and the balance ratio proposed by Astakhov. As a result it was obtained a compact equipment with a solar collector area of 0.374 m². Five stainless steel tubes of 76 mm in external diameter must be enclosed in this area, making the annular section by means of a wire mesh, with an external

diameter 30 mm, and the amount of activated carbon should be 7.5 kg, which will be distributed at a proportion of 1.5 kg per tube. On the other hand, the amount of methanol will be 2.25 kg, the condenser area is 0.214 m² the area of evaporator 0.24 m² and the cooling chamber will have a volume of 60 L. For the connections, it will be used a 30 mm external diameter stainless steel pipe, 5 quick-pass valves, a pressure valve and five type K thermocouples.

Keywords: Solar refrigerator, adsorption and activated carbon/methanol

Introducción

El uso pasivo de la energía solar implica capturar la energía proveniente del Sol a través de un colector solar, el cual tendrá una estructura y área según sea el uso que se le vaya a dar. Como consideraciones generales, se establece el ángulo de inclinación (β), la transmitancia de la cubierta transparente (τ), la absorbancia (α), la radiación solar, la orientación (en este caso hacia el Sur, debido a las coordenadas geográficas) y el azimut del colector (γ). En cuanto a su aplicación, existen suficientes fundamentos científicos sobre el calentamiento de agua (sistemas sanitarios), el calentamiento de aire (secado) y en menor grado para la producción de frío, en los que el colector no sólo debe captar la radiación durante el día, sino que debe liberar, a partir de un momento determinado, el calor absorbido, para así asegurar la producción de frío en la cámara del refrigerador. El coeficiente de desempeño (COP, Coefficient of Performance) del refrigerador va a depender de la eficiencia del colector.

Existe una gran diversidad de métodos de producción de frío, los cuales en su mayoría están basados en la extracción de calor de un cuerpo o un espacio por intermedio de la absorción de aquél por un fluido (refrigerante), el cual a su vez, y de manera espontánea, cambia su estado de agregación, mediante evaporación, fusión, sublimación, etc., cuyas transiciones se desarrollan a bajas temperaturas [Pilatosky y Best, 2002].

En este trabajo, el método empleado es el de vaporización a través de un sistema de sorción, basado en la adsorción, que consiste en el uso de un par adsorbente/adsorbato, que debe cumplir con ciertas características en dependencia del punto hasta el que se desea enfriar.

La zeolita/agua es el mejor par empleado para climatizar, mientras que el par carbón activado/metanol y carbón activado/amoníaco son mejores para la producción de hielo [Anyanwu, 2005].

El par carbón activado/metanol es el seleccionado para este trabajo, ya que el refrigerante (metanol) presenta ventajas debido a: evapora a temperaturas muy por debajo de 0 °C, su entalpía de vaporización es significativa (1 200 kJ/kg, para -5 °C), no es tóxico, es de bajo costo y

existe disponibilidad. Además, se consiguen COP más elevados que para los otros pares de adsorbentes/adsorbatos. Ello puede verificarse en la figura 1.

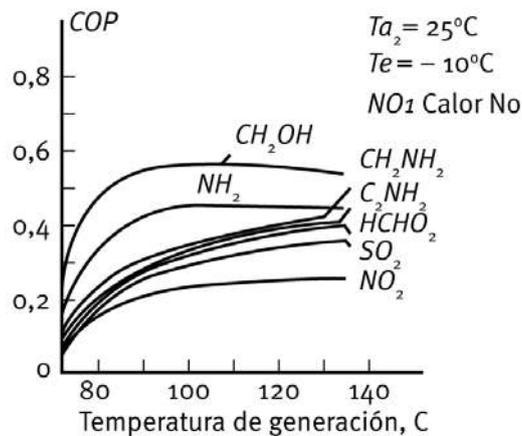


Fig. 1. COP para diferentes refrigerantes (3).

A nivel mundial se han realizado diversos proyectos [Anyanwu, 2004; Lemini, 2005; Anyanwu, 2003; Buchter, 2002; Li, *et al.*, 2001, y Leite, 2000], que han empleado el carbón activado/metanol como par de trabajo. Cada uno de dichos proyectos ha variado el tamaño del equipo, ya que dependía del propósito del mismo (cantidad de hielo a producir); así como también de los elementos empleados para su construcción y la forma y el acople de cada uno de esos elementos. En la figura 1 se puede observar el ciclo de refrigeración por adsorción, donde resaltan las principales partes que constituyen el refrigerador.

En la figura 2 se representa un ciclo de adsorción sencillo, donde se muestran las principales partes del refrigerador.

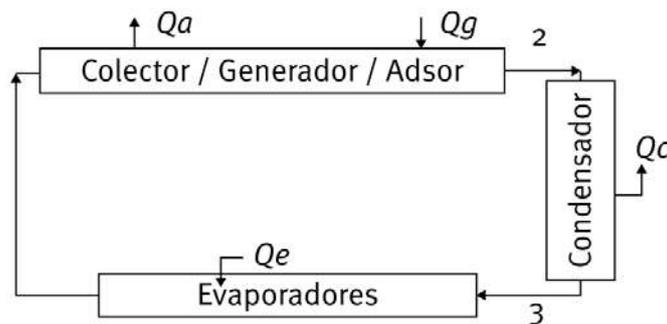


Fig. 2. Esquema simple de un refrigerador por adsorción.

Anyanwu [2004], Lemini [2005], Anyanwu [2003], Buchter [2002], Li, *et al.* [2001] y Leite [2000], también emplean colectores planos, encontrándose como variante la cubierta del mismo y la forma en que

colocan el carbón activado dentro del colector. Otras investigaciones, como Boubakri [2002], presenta el colector acoplado con el condensador, mientras Huizhong, *et al.* [2008] presentan un equipo totalmente distinto a los primeros trabajos, denominándolo tubo de enfriamiento, aunque sin dejar de trabajar con el par carbón activado/metanol.

El ciclo del sistema se representa en un diagrama de ClausisClapeyron. Para ello se deben conocer las líneas isosteras del par adsorbente/adsorbato seleccionado, lo que no es otra cosa que la relación de equilibrio de este par para diferentes condiciones de presión y temperatura. En 1987, Pons y Grenier realizaron este estudio, y ha sido asumido por diversos autores [Anyanwu, 2004], lo que puede observarse en la figura 3.

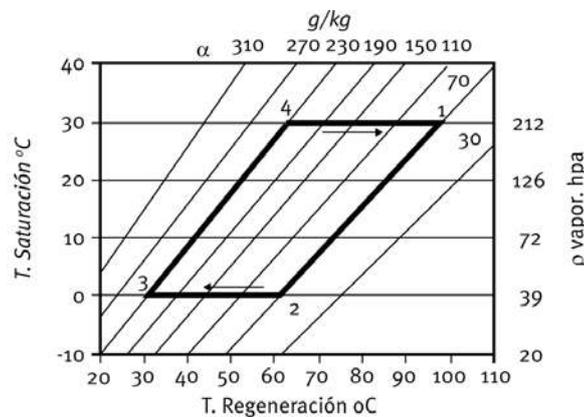


Fig. 3. Isosteras del par carbón activado AC-35/metanol.

En la figura 3 no sólo se muestran las isosteras para este par, sino que también se ha trazado el ciclo que se lleva a cabo en el proceso, el cual se describe a continuación. En las primeras horas de la mañana, el colector empieza a captar la radiación solar, produciéndose un calentamiento isostérico, representado de 3-4; una vez que alcanza la presión de condensación, el metanol pasa al condensador, esto se representa de 4-1; la energía recibida en estas dos etapas conforma el calor de generación (Q_g). Posteriormente, cuando el colector empieza a rechazar calor, se produce un enfriamiento isostérico, disminuye la presión (1-2), y una vez que se alcanza la presión dispuesta en el evaporador, comienza la absorción de calor en la cámara de enfriamiento del equipo, proceso que se ve representado en 2-1; y, simultáneamente, se va adsorbiendo nuevamente el metanol en el carbón activado. El calor liberado en estas dos últimas etapas se denomina calor de adsorción (Q_a), quedando listo el colector para un nuevo ciclo, siendo el proceso netamente intermitente.

Se debe señalar que el ciclo presentado en la figura 3 representa lo que ocurre en el colector-generator-adsorbedor, mientras se está produciendo el frío en el equipo; en otras palabras, el colector solar es el que gobierna en el sistema completo, de tal manera que es el que promueve se alcancen las presiones de condensación y evaporación en el equipo.

La máxima adsorción del metanol en carbón activado es de 300 g/kg, y en la mayoría de los proyectos se requiere 20 kg de masa adsorbente/área de captación [Ramos, 2002].

Es importante destacar la eficiencia de estos colectores, así como también los COP que se han alcanzado en los diferentes estudios. Esto se expone en la tabla 1.

Tabla 1. Valores de los parámetros en la actualidad, según el tipo de colector empleado

Parámetros	Colectores de placa	Colectores de alto desempeño
Eficiencia del colector	40-50	50-60
COP	0,3-0,4	1,0-1,2
COPSolar	0,12-0,2	0,5-0,7

Materiales y métodos

Para llevar a cabo el diseño del colector solar, fue necesario realizar una serie de acciones, desglosadas en etapas.

Etapas I. Documentación técnica. Se realiza una revisión exhaustiva de sistemas de producción de frío, sobre todo los basados en la adsorción. Se consultaron textos y numerosos artículos publicados en revistas científicas, lo que permitió consolidar los parámetros de diseño del colector solar.

Etapas II. Diagnóstico de los parámetros de diseño. Para poder dimensionar el colector, fue necesario conocer lo que se persigue con el refrigerador. En este caso, las bases del diseño del refrigerador están orientadas a la producción de 3 kg de hielo, ya que lo que se desea es obtener un prototipo. Por otro lado, se establecieron las condiciones de operación en el condensador y en el evaporador, según las condiciones climatológicas del estado de Falcón, así como también las propiedades del refrigerante y el equilibrio del par carbón activado/metanol mostrado en la figura 3. Se reportan los valores siguientes:

Temperatura ambiente promedio: 30 °C.
 Radiación solar promedio: 13 MJ/m².
 Temperatura en el condensador: 35 °C.
 Temperatura en el evaporador: -5 °C.
 Presión en el condensador: 22 kPa.
 Presión en el evaporador: 8,55 kPa.
 Temperatura máxima de generación: 90 °C.

Etapa III. Dimensionamiento del colector. Una vez conocidos los criterios de diseño del equipo, se procedió a determinar las dimensiones del equipo correspondiente al área de captación: masa de metanol y masa de carbón activado.

Resultados y discusiones

El metanol que debe circular a través del sistema, se determina una vez conocido el calor que debe absorber el evaporador. Este último se obtiene al determinar la energía necesaria para producir 3 kg de hielo, la cual es de 1 379,58 kJ.

El calor en el evaporador viene expresado por (1):

$$Q_{evap} = m_{met} \cdot h_{fg} (-5\text{ °C}) \quad (1)$$

Donde:

Q_{evap} : Calor que absorbe el evaporador, kJ.

m_{met} : Masa de refrigerante (metanol), kg.

h_{fg} : Calor latente de vaporización, kJ/kg.

El calor latente de vaporización del metanol a -5 °C, es de 1 215,69 kJ/kg [Perry, 2001], y en el $Q_{evap} = 1\ 379,58$ kJ, de la ecuación (1) se despeja la masa de refrigerante, siendo necesario 1,13 kg de metanol para el proceso.

Por otro lado, se conoce que:

$$m_{met} = m_{ads} (X_3 - X_2) \quad (2)$$

Donde:

m_{ads} : Masa de adsorbente (carbón activado), kg.

Se estableció el ciclo ideal del proceso a las condiciones planteadas en la etapa 2, obteniéndose la capacidad de adsorción (X) para cada una de las etapas. ($X_3 = X_4$ y $X_1 = X_2$); por tanto, al despejar m_{ds} de la ecuación (2), se obtienen 7 kg de carbón activado. Por otro lado, se conoce que la máxima capacidad de adsorción del metanol en carbón activado, es de 300 g/kg [Leite, 2000], lo que implica que para la cantidad determinada de carbón activado se adsorberían 2,1 kg de metanol. Trabajando con un factor de

seguridad de 15%, la cantidad de metanol será de 2,250 kg; y la de carbón activado, 7,5 kg.

Para determinar el área del colector (A_c), se debe conocer el calor en el proceso de generación (3-4 y 4-1), denominado Q_g , y la radiación que llega al colector solar. Esta última se obtuvo de la estación meteorológica de Coro, del estado de Falcón, para el 2007. Dicho valor es el que se reporta en la etapa anterior, y es tomado sobre una superficie horizontal. El colector tendrá una inclinación de 12° , por lo que la irradiación sobre esta superficie inclinada se determina por la expresión siguiente:

$$I_{total} = I_{DN} \left\{ \frac{\cos\theta_z}{\sin(\alpha)} \cos(\theta) + c \frac{1 + \cos(\beta)}{2} + \rho [c + \cos(\alpha)] \frac{1 - \cos(\beta)}{2} \right\} \quad (3)$$

Donde:

I_{total} : Irradiación sobre una superficie inclinada, MJ/m².

I_{DN} : Radiación directa, J/m².

ρ : Reflectancia, adimensional.

α : Ángulo de la altura del Sol, grados.

θ_z : Azimut del Sol, grados.

θ : Azimut del colector, grados.

C : Constante, adimensional.

Al determinar todos los componentes de la ecuación, se obtuvo una $I_{total} = 14,7$ MJ/m².

El calor de generación se obtiene a partir de las ecuaciones (4) y (5):

$$Q_{34} = (m_{ads} \cdot Cp_{ads} + m_{ads} \cdot X_1 \cdot Cp_{met} + m_{mt} \cdot Cp_{mt}) (T_4 - T_3) \quad (4)$$

Donde:

Q_{34} : Calor adsorbido isostéricamente, kJ.

Cp_{met} : Calor específico del metanol, kJ/kg.°C.

X_1 : Relación inicial masa de adsorbente/masa de adsorbato, adimensional.

$Cp_{adsorbato}$: Calor específico del adsorbato, kJ/ kg.°C.

m_{mt} : Masa de las partes metálicas, kg.

Cp_{mt} : Calor específico de las partes metálicas, kJ/kg.°C.

T_4 : Temperatura final de adsorción, °C.

T_3 : Temperatura inicial de desorción, °C.

$$Q_{34} = m_{adz} \cdot Cp_{met} (T_3 - T_4) + m_{adz} \cdot Cp_{adsorbato} \cdot \int_{x_1}^{x_2} x \cdot [T(x, Pc) - T_A] \cdot dx + m_{mt} \cdot Cp_{mt} (T_1 - T_2) + m_{ads} (x_4 - x_1) \lambda_{ad} \quad (5)$$

Donde:

λ_{ad} : Calor de desorción, kJ/kg.

Al sumar los resultados obtenidos al aplicar las ecuaciones (4) y (5), se obtuvo que el calor de generación es de 2,2 MJ.

El área del colector solar se determina mediante la ecuación (6):

$$A = \frac{Q_r}{\eta \cdot I_{total}} \quad (6)$$

Donde:

η : Eficiencia del colector solar, adimensional.

En la tabla 1 se presentó el rango de cómo oscila la eficiencia. Para este estudio se asumió una eficiencia de 40%. Con estos valores, Q_g e I_{total} , se obtiene que el área del colector será de 0,374 m².

En la mayoría de los proyectos se requieren 20 kg de masa adsorbente/área de captación [Leite, 2000]; por tanto, al verificar con los valores obtenidos anteriormente, se tiene una relación de 20,05, pudiendo de una manera u otra validar los resultados obtenidos.

Por otro lado, con los resultados obtenidos se puede determinar el COP solar, el cual viene expresado por la ecuación (7):

$$COP_{solar} = \frac{Q}{A \cdot I_{total}} \quad (7)$$

Al aplicar la ecuación (7), se obtiene un COP solar de 0,25, un poco por debajo del que se reporta en la tabla 1, para la eficiencia de 40%, pero bastante cercano y, por tanto, aceptable.

Por otro lado, el adsorbente va colocado dentro de unos tubos en un espacio anular; dichos tubos van colocados dentro del colector, el que a su vez debe estar aislado. En la figura 4 se realiza una representación de los tubos, así como también de sus dimensiones.

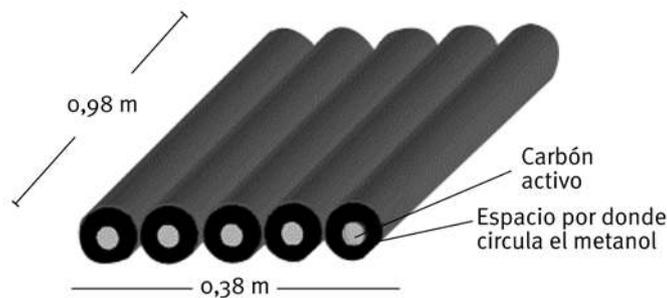
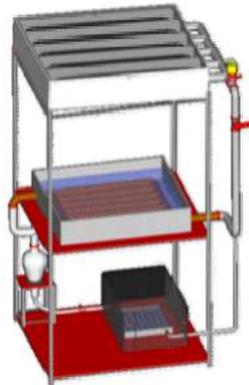


Fig. 4. Especificaciones de los tubos.
Fuente: Elaboración propia

El material de los tubos es de acero inoxidable, de 76 mm de diámetro externo; se conforma la sección anular con una malla metálica, ocupando un diámetro de 30 mm. El carbón activado irá en la sección anular, colocándose 1,5 kg por tubo, para así cubrir la cantidad total de carbón activado.

Los tubos mostrados en la figura 4, van dentro de una caja rectangular, siendo la cubierta superior un vidrio de 3 mm de espesor; los laterales y el fondo de la caja serán de láminas galvanizadas y estarán provistas de un sistema de aislamiento para minimizar las pérdidas de energía en el sistema.

El equipo estaría conformado como se presenta en la figura 5.



Conclusiones

Para la producción de 3 kg de hielo, en un refrigerador solar por adsorción empleando el par carbón activado/metanol, ubicado en el estado Falcón, el colector plano debe tener 2,25 kg de metanol y 7,5 kg de carbón activado. El carbón activado será distribuido en cantidades iguales de 1,5 kg en 5 tubos de acero inoxidable de longitud de 0,98 m, los cuales serán colocados uno al lado del otro, ocupando una longitud total de 0,38 m, cubriendo así el área de captación necesaria para el sistema, la cual es de 0,374 m². Adicionalmente, se reporta el COP teórico para el sistema, el cual es de 0,25.

Bibliografía

ANYANWU, E. E. (2003). «Design, Construction and Test Run of a solidAdsorption Solar RefrigeratorUsingActivatedCarbon/Methanol, as Adsorbent/AdsorbatePair», en *EnergyConversion and Management*, 44: 2879-2892, 2003.

ANYANWU, E. E. (2004). «Review of Solid Adsorption Solar Refrigeration II: An Overview of the Principles and Theory», en *Renewable Energy*, 45:1279-1295, 2004.

ANYANWU, E. E. (2005). «Thermodynamic Design Procedure for Solid Adsorption Solar Refrigerator», en *Renewable Energy*, 30: 81-96, 2005.

BOUBAKRI, A. (2002). «A New Conception of an Adsorptive Solar-Powered Ice Maker», en *Renewable Energy*, 28: 831-842, 2003.

BUCHTER, F. (2002). «An Experimental Solar-Powered Adsorptive Refrigerator Tested in Burkina-Faso», en *International Journal of Refrigeration*, 26: 79-86, 2003.

HUIZHONG, Z., *et al.* (2008). «Mechanical and Experimental Study on Freeze Proof Solar Powered Adsorption Cooling Tube Using Active Carbon/Methanol Working Pair», en *Energy Conversion and Management*, 49: 2434-2438, 2008.

LEITE, A. (2000). «Refrigerador solar para producción de hielo usando carbón activado-metanol». (En línea). Consultado el 10 de octubre de 2006, en www.riraas.net/documentos.htm.

LEMINE, F. (2005). «Building and Experimentation of a Solar Powered Adsorption Refrigerator», en *Renewable Energy*, 30: 1989-2003, 2005.

LI, M., *et al.* (2001). «Experimental Study on Dynamic Performance Analysis of a Flat-Plate Solar Solid-Adsorption Refrigeration for Ice Maker», en *Renewable Energy*, 27: 211-221, 2002.

PERRY, R. (2001). *Manual del Ingeniero Químico*. Séptima Edición. Volumen I, 2-261. Ed. McGrawHill, 2001.

PILATOWSKY, I. Y R. BEST (2002) «Introducción a los métodos de producción de frío» (en línea). Centro de Investigación de Energía, Universidad Autónoma México. Extraído el 10 de octubre de 2006, en http://www.riraas.net/documentacion/CD_03/PONENCIA01.pdf.

RAMOS, R. (2002). «Diseño de un prototipo experimental de refrigerador solar». (En línea). Centro de Energías Renovables. Lima, Perú. Consultado el 10 de octubre de 2006

Factibilidad de implementación de un sistema híbrido autónomo con celda de combustible PEM para electrificar localidades rurales en Cuba

Feasibility of implementation of an autonomous hybrid system with PEM fuel cell to supply electricity to rural communities in Cuba

*Por Yamir Sánchez Torres**

** Centro de Estudio de Tecnologías Energéticas Renovables (CETER),
Instituto Superior Politécnico José Antonio Echevarría (CUJAE),
Marianao, La Habana, Cuba.
Tel: (537) 2663638.
e-mail: yamir@ceter.cujae.edu.cu*

Resumen

El uso de celdas de combustible PEM para la producción de energía eléctrica en sistemas autónomos, está estrechamente ligado con la producción y almacenamiento de hidrógeno. Esto, eventualmente unido a las fuentes renovables de energía, forma un sistema ecológicamente limpio y sustentable. En varios países subdesarrollados existen localidades que no cuentan con electricidad y que disponen de importantes potenciales energéticos renovables no explotados, en los cuales se puede diseñar un sistema híbrido autónomo para electrificar dichas poblaciones. En este trabajo se presenta el esquema de un sistema híbrido autónomo con celda de combustible PEM, para la producción de hidrógeno y electricidad, con el objetivo de electrificar zonas rurales alejadas de la red eléctrica nacional en Cuba. Se calculó la demanda eléctrica de la zona y el potencial energético disponible, y después, mediante el uso de los programas informáticos de modelación y simulación HOMER, PVSYST y ENERGYPLUS [MATLAB; HOMER; PVSYST], se determinó la variabilidad del potencial eólico y fotovoltaico con las horas del día y las estaciones climáticas a lo largo de un año, así como su efecto en la producción de hidrógeno y electricidad. Se comprobó que, incluso para los más adversos escenarios, se satisface la demanda energética actual necesaria. En el trabajo se muestra detalladamente el comportamiento del sistema y se evidencia la no afectación del entorno, y ello corrobora la factibilidad de la electrificación y el aumento del bienestar de los pobladores de la localidad.

Palabras clave: Sistemas híbridos, celda de combustible PEM, Matlab, HOMER, PVSYST, simulación y modelación

Abstract

The use of PEM fuel cells for the production of electricity in stand alone systems is closely linked to the production and storage of hydrogen. The production of hydrogen using renewable energy sources creates an ecologically clean and sustainable energy system. In several developing countries there are locations that with no access to electricity service and account with important renewable energy potentials not exploited, in which a stand alone hybrid system can be designed to provide electricity to these populations. This paper presents the scheme of a stand alone hybrid system with a PEM fuel cell, for the production of hydrogen and electricity, aimed at supplying with electricity communities in Cuban rural areas located far from the national electricity grid. The power demand of the area and the available energy potential were calculated, and using the modeling and simulation software HOMER, PVSYST and ENERGYPLUS [MATLAB; HOMER ; PVSYST], it was determined the hourly and seasonal variability of the wind and photovoltaic potentials throughout the year, as well as its effects on the production of hydrogen and electricity. The research demonstrated that the current energy demand is meet even in the most adverse scenarios.

The paper also shows in details the behavior of the system and its environmental benignity, which confirms the feasibility of this method for supplying the community with electricity and the increase in the well-being of the local inhabitants.

Keywords: Hybrid systems, PEM fuel cell, Matlab, HOMER, PVSYST, simulation and modeling

Introducción

El acceso al servicio eléctrico es una de las mayores aspiraciones de la población rural cubana, debido a su marcada influencia sobre las condiciones de vida. Actualmente existen 1 422 asentamientos no están conectados al Sistema Electroenergético Nacional (SEN), con una población de 154 212 habitantes y 62 221 viviendas. En la provincia de Holguín, base de este trabajo, existen 378 asentamientos sin conectar al SEN. Del total de asentamientos, 144 se abastecen mediante tendederas, 124 no están electrificados, 108 se alumbran mediante plantas diésel y dos por medio de hidroeléctricas [Rodríguez]. Aunque la población sin este servicio no representa una fracción significativa del total nacional, solamente alrededor de 4%, constituye, sin embargo, un sector sensible dentro de la sociedad, por lo que su electrificación sigue siendo un objetivo de alta importancia, según lo demuestra el reciente Programa Nacional de Electrificación de Escuelas y Consultorios Médicos Rurales en estas localidades, emprendido por el Estado Cubano. No obstante los esfuerzos

realizados, y debido a las características topográficas y demográficas (baja densidad de población), en provincias como Santiago de Cuba, Holguín, Guantánamo y Granma, la tasa de electrificación es mucho menor que la media nacional. Por otra parte, la generación local con grupos electrógenos diésel ha demostrado no ser viable en lugares remotos y de difícil acceso.

Una alternativa que ha ido cobrando prestigio por su probada eficacia, es el uso de las fuentes renovables de energía (FRE), entre las que ocupa un lugar destacado la fotovoltaica (FV), con la más alta adaptabilidad a las condiciones demográficas, geográficas y climáticas del país [Moreno, 2006]. También es utilizada la energía del viento en aquellos lugares donde existe el recurso eólico; en este caso se utilizan micro y miniturbinas, con menos de metro y medio de diámetro [Soltura y Roque].

En Cuba, ambos sistemas, eólico y fotovoltaico, han dado pruebas suficientes de ser rentables y eficientes para la generación de electricidad. Teniendo en cuenta que se reciben, como promedio, 5 kWh de energía solar por metro cuadrado de superficie diariamente, se puede aprovechar hasta 10% de la misma utilizando paneles fotovoltaicos. De forma similar, el viento puede ser considerado como una fuente de energía viable en muchos lugares del país, alcanzando velocidades promedio de 7 y 10 m/s [Sarmiento, 2006].

Si se toma como ejemplo un viento sostenido de 10 m/s durante 6 horas, éste puede generar una energía eléctrica de 800 Wh/m²día. Se debe destacar que, en este caso, la superficie se refiere al área de barrido de las aspas del aerogenerador: un aerogenerador de 2,1 m de diámetro de las palas, marca Swift Rooftop, como el que se emplea en este trabajo, cubre un área de barrido de 3,53 m² (ver Fig. 8).

Actualmente, los proveedores de estos sistemas están conscientes de que el uso de los sistemas híbridos en nuestro país es lo más adecuado; es decir, están de acuerdo en el uso de las energías fotovoltaica y eólica, simultáneamente, pues en muchos sitios los recursos solares y eólicos se complementan: los fuertes vientos del invierno se compensan con los largos y soleados días del verano. De esta forma, los diseñadores pueden reducir el tamaño de diseño de cada componente de la instalación [Soltura y Roque].

Recientemente, el Instituto de Meteorología concluyó el proyecto «Evaluación del potencial eólico de Cuba», y se comenzó un proceso de prospección eólica de cinco sitios seleccionados (Santa Cruz del Norte, Loma Colorada, cayo Sabinal, Tumbadero y punta de Maisí), con la participación de especialistas del Centro de Estudio de Tecnologías

Energéticas Renovables (CETER), el Instituto de Meteorología (INSMET) y el Ministerio de la Industria Básica (MINBAS) [Moreno, 2006].

Pequeños sistemas híbridos son desarrollados en centros de estudios universitarios, como el CETER, como puede verse en la figura 1, con fines docentes. Este sistema consta de 8 paneles de 37 W cada uno, un regulador de carga para 24 V, 2 baterías de 12 V y 200 Ah, y un inversor para entregar 110 V(CA), 60 Hz, 900 W y un aerogenerador de 50 W [Soltura y Roque].



Fig. 1. Sistema híbrido eólico-fotovoltaico con fines docentes, instalado en el Centro de Estudio de Tecnologías Energéticas Renovables (CETER).

Producto de la experiencia adquirida en las instalaciones docentes y demostrativas desarrolladas, el país ha podido resolver numerosas necesidades de electrificación en zonas aisladas de la red. Aplicaciones tales como el Programa de Electrificación Fotovoltaica a las Casas Consultorios del Médico de la Familia en las montañas y zonas rurales remotas, con centenares de instalaciones funcionando, varios hospitales de montaña, escuelas con internado, círculos sociales y poblados, confirman lo favorable de esta solución.

Igualmente, se sabe que pasada la barrera de los 50 USD del barril de petróleo, la producción de energía eléctrica empleando celdas fotovoltaicas de silicio y aerogeneradores, se ha hecho no sólo mucho más rentable, sino también ecológicamente mucho más conveniente, al dejar de emitir considerables cantidades de CO₂ al entorno.

Por otra parte, a medida que se vaya desarrollando la industria fotovoltaica cubana, y disminuyéndose los costos de fabricación de los paneles, podrá ampliarse el campo de utilización de estos sistemas; asimismo, existen varios proyectos de colaboración para la producción de micro y miniaerogeneradores [Soltura y Roque].

Un argumento que pudiera esgrimirse contra la energía solar fotovoltaica y la eólica, es la intermitencia en la generación. En la solar, este factor se presenta alternativamente en el ciclo día-noche y las estaciones del año, así como por los días nublados. La energía eólica tiene fluctuaciones y promedios de velocidades diferentes para cada mes del año, por cuya razón, en aplicaciones aisladas, debe existir una reserva de energía para varios días.

Hasta hoy, este aspecto ha sido solucionado mediante el empleo de baterías, y su capacidad energética se mide a partir del número de días de autonomía, o lo que es lo mismo, los días que el sistema puede seguir funcionando sin necesidad de ser reabastecido por la fuente primaria. Empleando baterías para el almacenamiento de la energía, esos sistemas han dado buenos resultados; no obstante, últimamente las pilas de combustible funcionando con hidrógeno emergen como una solución muy provechosa para ser empleada en el almacenamiento de energía a más largo plazo, y la tecnología ha madurado al punto de ser un producto comercialmente viable. Esto se debe a algunas desventajas que presentan las baterías en comparación con las pilas de combustible: en el caso de las baterías, éstas almacenan la energía entre sus placas, por lo que la cantidad de energía almacenada depende de su volumen, el cual, por razones prácticas de manipulación, no puede ser muy grande; en cambio, las pilas de combustible consumen los reactantes de una fuente externa, la cual puede ser tan grande como se necesite. La batería consume la energía depositada en su interior a pesar de no estar trabajando, y es por ello que la degradación de las baterías es más rápida; por su parte, las pilas de combustible funcionan cuando se les necesite, mientras tanto, se encuentran en reposo. Las altas temperaturas son un problema para el trabajo eficiente de las baterías, pero no ocurre así en las pilas.

Las pilas de potencia inferior a 1 kW son muy atractivas para el suministro de potencia a equipos que operan en lugares remotos o aislados, en los que se requiere de fuentes de alimentación fiables y con tiempos de operación largos, a fin de minimizar los costes de mantenimiento y/o sustitución de dichas fuentes. La alta densidad de potencia de las pilas permite tiempos de operación más largos que los de las baterías convencionales.

El propósito de este trabajo es presentar evidencias de la posibilidad del empleo de las pilas de combustible en los sistemas híbridos situados en las localidades cubanas alejadas del SEN, teniendo en cuenta las posibilidades de las FRE presentes en la zona de Holguín, donde existen 378 asentamientos sin conectar al SEN, y haciendo uso de programas informáticos que permiten simular, optimizar y realizar análisis diversos del comportamiento de diferentes sistemas híbridos.

Condiciones experimentales

La información de la variable fuerza del viento se obtuvo a partir de los datos que registra la Estación Meteorológica de Cabo Lucrecia, ubicada a 4 m sobre el nivel medio del mar, y a 19 km al NNE de la ciudad de Banes, en la provincia de Holguín. Sus coordenadas son: latitud, 21°04'02'' Norte, y longitud, 75°37'3'' Oeste. Se utilizó para la medición de los datos climatológicos un anemómetro M-49 de fabricación rusa, ubicado a 10 m de altura sobre la superficie, en buen estado técnico, aunque la cercanía al mar impone que se le realicen mantenimientos periódicos.

Se utilizó una base de datos climáticos trihoraria, creada durante cinco años, de 1994 a 1998, compuesta por 14 608 observaciones de la fuerza del viento, referidas a la Estación Meteorológica de Cabo Lucrecia, codificada y validada por la Organización Meteorológica Mundial (OMM) como la número 78365, que indica que pertenece al bloque 78 de la Asociación Regional IV, identificada en el área del Caribe con el número 365. Para la digitalización y corrección de estos datos se utilizaron los software Eolo 1 y Eolo 2 [Moreno, 2006].

En general, puede decirse que los potenciales de viento altos se hallan desplazados hacia la zona costera, con puntos muy notables en áreas montañosas. Según los resultados obtenidos a partir de la base de datos estudiada, los vientos medios son de 17 km/h (4,7 m/s), condición favorable para obtener energía eléctrica a partir del viento utilizando máquinas de baja capacidad. El recurso solar con que cuenta la zona es de 5 kWh/m² al día [Sarmiento, 2006], muy similar en todo el territorio nacional y con poca variación durante las estaciones de verano e invierno.

Resultados y discusión

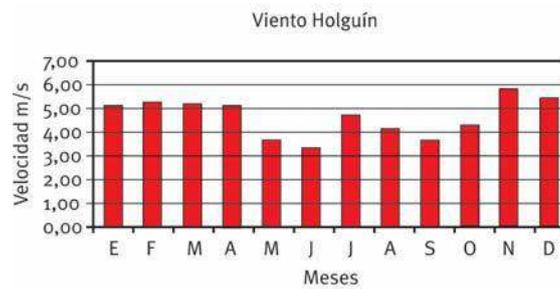


Fig. 2. Distribución por meses de las velocidades del viento en la zona.

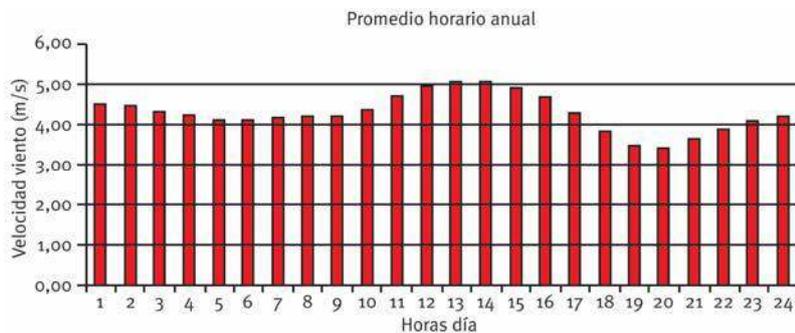


Fig. 3. Distribución horaria de las velocidades del viento en la zona.

Las figuras 2 y 3 muestran que los valores más altos del viento se reportan en los meses de la temporada invernal, coincidiendo con el paso de los sistemas frontales sobre la región. Como promedio anual, los horarios de viento máximo se encuentran entre las 11:00 a.m. y las 5:00 p.m., desafortunadamente, coincidiendo ello con las horas del día de mayor incidencia solar (Fig. 4), por lo que ambas fuentes de energía se solapan. En la figura 5 se puede apreciar la existencia de abundante radiación solar durante todo el año.

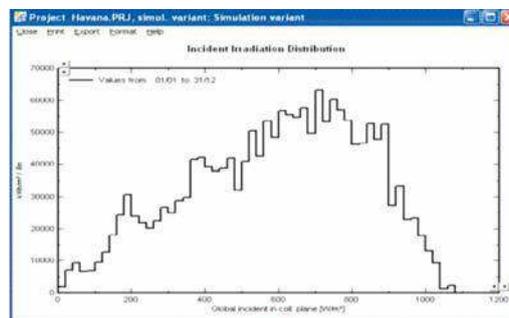


Fig. 4. Distribución horaria de la incidencia solar en la zona en un día típico. Software PVSYST.

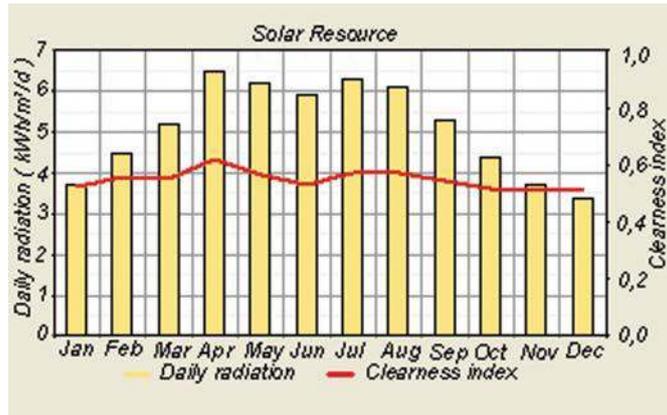


Fig. 5. Distribución anual de la incidencia solar en la zona. Software HOMER.

El promedio mensual de días con calma, es de 5; febrero y marzo poseen históricamente la menor cantidad de períodos con calmas (3 días), mientras que los de menor promedio de velocidad del viento, mayo, junio y septiembre, reportan 7 días con viento en calma.

Conociendo solamente los días con calma y los valores medios (obviamente alterados por los días en que no se reporta viento) no basta para llegar a la conclusión de las verdaderas posibilidades existentes en el territorio en función del uso de la energía eólica; se necesita, además, conocer hasta qué punto los vientos cumplen con la condición de encontrarse, durante gran parte del tiempo, con velocidades iguales o superiores a 2,3 m/s (9 km/h), teniendo en cuenta que esta es la velocidad del viento para que arranque la turbina seleccionada en este trabajo (ver Fig. 8).

Se aplica la función de densidad de probabilidad de Weibull. Esta función permite conocer la probabilidad para que el viento tenga una velocidad de «v» en un período determinado.

$$P(v) = \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k} \quad (1)$$

Donde:

K: Factor de forma, adimensional.

C: Factor de escala, m/s.

V: velocidad del viento, m/s.

Estimación del factor k:

$$k = \left(\frac{\sigma}{V_m} \right)^{-0.185} \quad (2)$$

Donde:

σ : Desviación estándar.

V_m : Velocidad media promedio, m/s.

Estimación del factor c :

$$c \cong \frac{V_m}{c_0 + c_1 X + c_2 X^2 + c_3 X^3 + c_4 X^4} \quad (3)$$

Donde:

$C_0 = 0,886259184149$

$C_1 = 0,00852888014766$

$C_2 = 0,0257748943765$

$C_3 = -0,002117760028167$

$C_4 = 0,000664358428$

$x = 4 (1+1/k) - 6$

Densidad de la potencia del viento:

$$WPD = 0,5 \rho \sum_{v_x=1}^{v_x=15} v_x^3 P(v_x) \quad (4)$$

Donde:

ρ : Densidad del aire.

$P(v)$: Probabilidad de tener una velocidad del viento «v» durante el año.

Haciendo uso de las anteriores ecuaciones, y con la base de datos de los valores de viento horarios para cada día, se llega a los resultados promedio siguientes (Tabla 1):

Tabla 1. Análisis de los datos del viento en la zona

Variable	Promedio anual	Presencia en el año
V	4,64 m/s	
σ	0,8176	
k	1,38	
c	4,20 m/s	

P_m	140,2 W/m ²	
$V_{5m/s}$	0,39	142 días
$V_{7m/s}$	0,13	47 días
$V_{10m/s}$	0,000077	40 minutos
$V_{15m/s}$	0,000017	9 minutos



Fig. 6. Densidad de potencia del viento en la zona.

Al procesar los datos, obtuvimos que durante 142 días del año (39%), el viento puede ser aprovechado óptimamente, o sea, con velocidades alrededor de 5 m/s. En la figura 7 se puede apreciar la probabilidad de que el viento en la zona se encuentre por encima de los 9 km/h, velocidad mínima para que arranque el aerogenerador.



Fig. 7. Porcentaje de vientos medios mensuales superiores a 12 km/h.

Una vez medidas y estudiadas las variables, se utilizaron las herramientas informáticas de valoración de sistemas híbridos, con las que se pueden analizar y evaluar numerosas opciones, así como su factibilidad, de una manera simple, y obtener una configuración óptima del sistema requerido. Se identificó y comprobó que el paquete de software que más se ajusta a las necesidades antes descritas, es el HOMER, ayudado además por los sistemas PVSYS y Matlab [MATLAB; HOMER; PVSYS], para el procesamiento de los datos.

Una de las características principales por las que se identifica a HOMER, es que resulta una herramienta útil para determinar el menor costo de la energía generada (\$/kWh). Esto es realizado mediante simulaciones de cada hora de funcionamiento, analizando los costos del ciclo de vida útil. También realiza análisis de sensibilidad para evaluar el impacto de un cambio en cualquiera de los parámetros de entrada, y proporciona resultados anuales, de cada hora, en forma tabular y gráfica.

Se pretende modelar un sistema híbrido autónomo alejado de la red, mediante el empleo de un aerogenerador de 1 kW, 2 kW de paneles fotovoltaicos, un electrolizador de 1 kW, un tanque de hidrógeno de 2 kg y una celda de combustible de 1 kW. Aunque hasta la fecha las baterías han sido el único dispositivo de almacenamiento de energía utilizado en estos sistemas; en este trabajo se recurre al uso de celdas de combustible, debido a las ventajas mencionadas anteriormente.



Turbine

Rated power output

Annual power supplied

CO₂ displacement/annum

Product life	Upwind horizontal axis 1,5 kW*
Generator	Up to 2000 kWh**
Rotor	1,4 tonnes***
Mast	20 years
Mounting system	Brushless PMG
Cut in speed	2,1 m moulded carbon fibre
Acoustic emissions	Bespoke aluminium
EMI (electromagnet emissions)	(to BS1387 ISO65)
	2,3 m/s
Grid connection	Custom designed brackets
Safety, electrical and reliability standards	<35dB (A) (across all wind speeds)
(independently verified)	CE certified (BS EN 6100)
	G83 certified
	BS EN 61400-2/BS7671
	& BS 5769-7

*Rated wind speed: 12,5 m/s

** Dependant on siting of turbine

***Substituting end-user electricity with a single 1,5 kW rooftop

RETScreen@International

Fig. 8. Características del aerogenerador Swift Rooftop.

Las celdas de combustible convierten la energía química del combustible (hidrógeno en el caso de las celdas PEM) directamente en electricidad. La celda de combustible que posee mejores cualidades para ser usada en sistemas autónomos pequeños, como los abordados en este trabajo, son las tipo PEM, cuyo nombre proviene del Inglés, membrana de intercambio protónico (Proton Exchange Membrane).

Estas celdas generan corriente directa similar a las baterías. Estos dispositivos prácticamente no necesitan mantenimiento y su vida útil ya excede las 30 000 horas de operación. Actualmente se comercializan múltiples modelos de celdas de combustibles del tipo PEM, para su empleo en pequeños sistemas autónomos de generación de electricidad (algunos de ellos se muestran en la figura 9). Para este trabajo se tuvo en cuenta la celda T1000, de la marca ReliOn, la cual se comercializa a gran escala con buenos resultados, desde hace varios años.

Una vez estudiado el potencial eólico y fotovoltaico de la zona, se analizó la demanda energética que se va a satisfacer, mediante el sistema híbrido configurado. La misma será de 3,5 kWh al día, tal y como lo muestra la figura 10, y debido a que se generará corriente alterna, de 120 V y 60 Hz, es preciso usar un convertor a corriente alterna.

Tabla 2. Modelos de celdas de combustible del tipo PEM.

	Cellkraft (sweden)	P21 (Germany)	ReliOn (USA)	Plug Power (USA)	Idatech (USA)
					
Model	S-Series	Premion T	T-1000	GenCore	ElectraGen
Effect	50W / 500W / 1kW* / 2kW	3kW	1kW	5kW	5kW
Dim (wxdxh)	470x513 x280 mm	667x483 x470 mm	325x482 x595 mm	1120x660 x610 mm	600x600 x1200 mm
Weight	28 kg	93 kg	54 kg	227 kg	226 kg

Voltage	-45 VDC to -55 VDC (adj.)	-44 VDC to -57 VDC (limit)	24 alt 48 VDC	-46 VDC to -60 VDC (adj.)	-46 VDC to -54 VDC (limit)
Ambienttemp.	-330C to 460C	-50C to 45 0C	00C to 460C	-400C to 460C (elect. heating)	-400C to 500C (goal)
Placing	Indoor**	Indoor**	Indoor**	Outdoor	Outdoor
Noiselevel	<60 dBA @ 1m	<55 dBA @ 1m	<53 dBA @ 1m	<60 dBA @ 1m	<60 dBA @ 1m

* Data for 1kW system

** Outdoorcabinetoption.

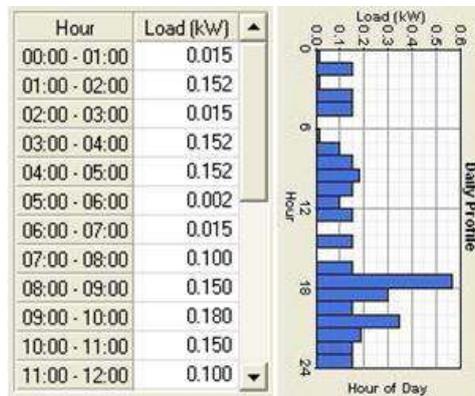


Fig. 10. Comportamiento horario de la carga horaria de 3,5 kWh. Programa HOMER.

Con la utilización del programa HOMER, se disminuyen los costos inherentes al diseño y desarrollo (proyecto de ingeniería) de los sistemas híbridos, dado que no es necesario crear físicamente un prototipo para validar dicho diseño; y una sola persona puede manejar en la computadora el paquete de cómputo.

Luego de correr los datos en el programa, se obtienen los resultados esperados: con este diseño de sistema híbrido es posible cumplir con la demanda, así como almacenar abundante hidrógeno en el tanque. Los resultados de la simulación son los siguientes (Figs. 11 y 12):

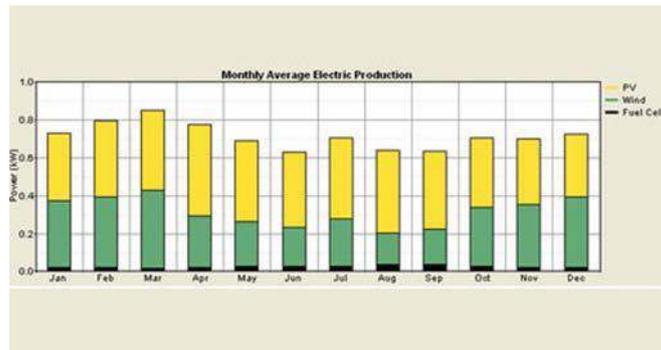


Fig. 11. Producción anual de electricidad por componente. Programa HOMER.

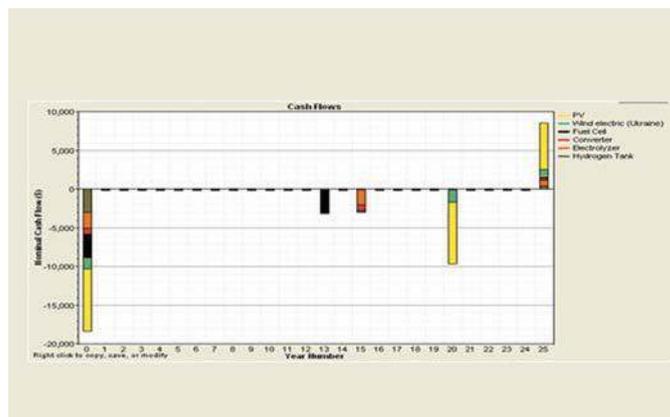


Fig. 12. Comportamiento del flujo de caja del proyecto en 25 años. Programa HOMER.

Entre los resultados de sensibilidad que nos ofrece el HOMER, tenemos que la configuración Wind-Fuel cell es factible si el promedio de velocidad del viento supera los 6 m/s. En este caso la velocidad del viento es de 4,7 m/s, y debido a esto resulta más factible la configuración Wind-FV-Fuel cell.

En la figura 11 se puede observar la producción de electricidad de cada componente en el año: 56% de la energía es suministrada por los paneles fotovoltaicos, 40% por la turbina eólica y 4% por la celda de combustible; o sea, 96% de la energía se abastece sin necesidad del funcionamiento de la celda de combustible.

En la figura 12 se representa el análisis económico del proyecto, estimado en 25 años. En ese período se considera que la celda de combustible dure 13 años, y 20 años los paneles y el aerogenerador. El costo del sistema es de \$23.600,00, aproximadamente. El programa HOMER tiene en cuenta también la evaluación del comportamiento de cada componente del sistema, y su acoplamiento. Los resultados se corrieron con el programa Matlab, dando como resultado que el electrolizador de 1 kW produce

170 L/h de H₂ y 85 L/h de O₂ a 5 bar, consumiendo 1 kWh del sistema aerogenerador-panel fotovoltaico. El consumo de la celda es de 0,045 kg de H₂/h, ó 0,7 sL/h para 0,06 kg/kWh, con 50% de eficiencia. El electrolizador cumple satisfactoriamente las necesidades de la celda.

Conclusiones

Actualmente, diversos factores están impulsando la investigación y el desarrollo de formas alternativas de energía, con el objetivo de reemplazar el uso de combustibles fósiles. En este trabajo se muestran los avances tecnológicos logrados hasta la fecha en el desarrollo de las tecnologías de aprovechamiento de las fuentes renovables de energía, para la electrificación de comunidades aisladas. Se ha querido enfatizar en la posibilidad de introducir la tecnología de celdas de combustible PEM como una posibilidad viable en la electrificación rural en Cuba, cumpliendo con una demanda promedio, típica de cualquier hogar cubano. Aplicando los software de modelación correspondientes, se observa la posibilidad de que el sistema satisfaga la demanda en todo el período analizado.

El mundo ya se ha trazado una meta en cuanto al hidrógeno y las celdas de combustible; ya hoy en día se comercializan sistemas eficientes y rentables con hasta cien mil horas de MTBF, lo que nos lleva a plantearnos la necesidad de definir un escenario futuro óptimo y adecuado para esta tecnología. Dada la capacidad de investigación existente en el país en esta materia, resulta atractivo analizar la alternativa de adelantar este paso y comenzar antes de que se produzcan los cambios, a fin de prever la aparición de un nuevo paradigma que, como muchos otros, cambiará la forma de hacer las cosas en el mundo.

Bibliografía

HOMER. Modelo computacional para evaluar opciones de diseño de sistemas híbridos remotos conectados y no conectados a la red eléctrica. <https://analysis.nrel.gov/homer/>

MATLAB (abreviatura de MATrixLABoratory, «laboratorio de matrices»). Software matemático que ofrece un entorno de desarrollo integrado (IDE) con un lenguaje de programación propio. Está disponible para las plataformas Unix, Windows y Apple Mac OS X. www.mathworks.es/products/matlab

MORENO FIGUEREDO, CONRADO. «Producción de electricidad con pequeños aerogeneradores», en *Energía y tú*, (33): 2006. ISSN 1028-9925.

PVSYST. Software para el estudio, simulación y análisis de datos para sistemas fotovoltaicos. <http://www.pvsyst.com/ch/>

RODRÍGUEZ GÁMEZ, MARÍA. «Integralidad de las fuentes renovables de energía para la electrificación rural». Santiago de Cuba: Centro de investigaciones de Energía Solar.

SARMIENTO SERA, ANTONIO. «Sistema híbrido eólico-fotovoltaico», en *Energía y tú*, (33): 2006. ISSN 1028-9925.

SOLTURA MORALES, ROLANDO Y ALFREDO ROQUE RODRÍGUEZ. *Mapa eólico de Cuba*. La Habana: *Instituto de Meteorología (INSMET)*, del Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente (CITMA), Cuba.

TELENUL, SCADA de Supervisión y Telecontrol de Redes de Distribución, diseñado para recerradores y seccionalizadores NULEC

TELENUL, SCADA of Supervision and Telecontrol of Distribution Grids, designed for reclosers and sectionalizers NULEC

*Por Lic. María Elena Otero Durán**

** Empresa de Ingeniería y Proyectos para la Electricidad (INEL), Cuba.
e-mail: mel@inel.une.cu*

Resumen

Los recerradores y seccionalizadores automáticos de industrias NULEC, son interruptores trifásicos para montar en postes y uso a la intemperie; están equipados con un gabinete de control que garantiza una protección avanzada, registro de eventos y comunicación local y remota. A petición de la Dirección de Distribución de la Unión Nacional Eléctrica (UNE), se desarrolló TELENUL, un sistema SCADA para supervisar y telecontrolar las redes de distribución, mediante la utilización de los interruptores NULEC adquiridos en el país. La utilización de TELENUL en los despachos de distribución mejorará el funcionamiento de las redes eléctricas y contribuirá al ahorro energético, ya que permitirá trabajar sobre la calidad de la energía a partir de la información obtenida; facilitará la operación y contribuirá al ahorro de tiempo y combustible, al permitir actuar sobre las redes sin necesidad de trasladarse físicamente al lugar, y ayudará a un rápido aislamiento de las fallas, lo que reducirá los daños.

Palabras clave: Ahorro energético, redes de distribución, calidad de la energía, recerradores, seccionalizadores y SCADA

Abstract

The reclosers and automatic sectionalizers of NULEC industries are three-phase switches for pole mounting and outdoor use. They are equipped with a control cabinet that guarantees advanced protection, event log and local and remote communication. At the request of the Distribution Directorate of the National Electric Union (UNE), TELENUL was developed, a SCADA system for monitoring and telecontrol of the distribution grids, by using the NULEC switches purchased in the country. The use of TELENUL in the distribution dispatches will improve the operation of the electrical grids and will contribute to energy saving, since it will allow working on the quality of the energy based on the information obtained. It will also facilitate the operation and will contribute to the saving of time and fuel, allowing acting

on the grids without the need of physically moving to the place, and will help to a quick isolation of the faults, which will reduce the damages.

Keywords: Energy saving, distribution grids, energy quality, reclosers, sectionalizers and SCADA

Introducción

Desde hace algunos años la Unión Nacional Eléctrica de Cuba ha estado adquiriendo, para su uso en las redes de distribución, recerradores y seccionalizadores automáticos de industrias NULEC. Ambos pertenecen a la familia de dispositivos de distribución de NULEC, que pueden ser operados por control remoto.

Existe un software (WSOS), creado y desarrollado por Industrias NULEC, que sirve para manipular y configurar diferentes parámetros de esos equipos, ya sea un recerrador o un seccionalizador. Este software es muy potente y eficaz para su uso por el personal técnico de comunicaciones y protecciones de los despachos de distribución eléctrica, pero no es la herramienta necesaria para los despachadores, los cuales deben disponer de un software SCADA que les permita conocer rápidamente el estado de todos los interruptores de la red, y poder interactuar con ellos de forma remota, a través de ordenes de control como, por ejemplo, abrir o cerrar un interruptor en una situación de operación específica.

A petición de la Dirección de Distribución de la UNE, en la Empresa INEL se elaboró un proyecto de investigación y desarrollo cuyo objetivo final consistió en la confección de un sistema SCADA para supervisar y telecontrolar las redes de distribución, mediante la utilización de los interruptores NULEC adquiridos en el país.

El trabajo se realizó en varias etapas:

- Estudio del protocolo DNP3 [Smith y McFadyen (a); Smith y McFadyen (b); Smith y Copps; Smith] y programación de un driver para establecer comunicación con el gabinete de control de los interruptores NULEC.
- Pruebas de comunicación remota mediante el uso de radio.
- Diseño y programación del SCADA.

Durante el desarrollo del trabajo fue necesario la revisión y estudio de variada bibliografía sobre temas tales como: documentación del protocolo DNP3 [Smith y McFadyen (a); Smith y McFadyen (b); Smith y Copps; y Smith], principios básicos de transmisión de datos por radio y

características de los dispositivos NULEC [Nulec Industries... (a); Nulec Industries... (b)].

Los resultados obtenidos fueron satisfactorios, y actualmente la Dirección de Distribución de la Unión Eléctrica cuenta con TELENUL, SCADA que permite telecontrolar y supervisar de forma remota los interruptores NULEC instalados en sus subestaciones y redes de distribución. Este sistema está actualmente en proceso de implantación total en el Despacho de Distribución de Ciudad de La Habana, y se está utilizando parcialmente en los despachos de Colón y Villa Clara, se espera su futura generalización, en la medida en que se vaya asegurando el soporte de comunicación necesario para su aplicación.

Materiales y métodos

Los recerradores y seccionadores automáticos de industrias NULEC, son interruptores trifásicos para montar en postes y uso a la intemperie [Nulec Industries (b)]. En el país se han introducido tres series:

- Serie U (recerrador).
- Serie N (recerrador).
- Serie RL (seccionador).

Las tres series tienen en común el gabinete de control y comunicaciones, que contiene un control electrónico que monitorea al interruptor y provee las funciones de protección, registro de eventos y capacidad de comunicación. En la figura 1 se muestran las tres series y el gabinete de control.

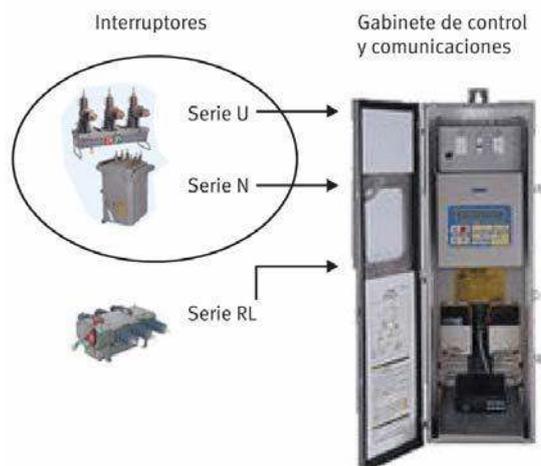


Fig. 1. Series de interruptores NULEC y gabinete de control.

La electrónica del gabinete de control incorpora las funciones de un relé de protección por sobrecorriente, un relé de protección sensible por falla a tierra, un relé de recierre y una unidad terminal remota (UTR).

Adicionalmente, la electrónica mide la corriente de línea, la tensión, la potencia activa y reactiva y las corrientes de falla, y posee un contador de energía. El módulo de control y protección del gabinete (CAPM), viene equipado de fábrica con el protocolo de comunicación DNP3 [Smith y McFadyen (a); Smith y McFadyen (b); Smith y Copps; Smith], a través del cual es posible obtener de forma remota toda la información que se procesa.

Para el presente trabajo se tuvieron en cuenta todas las posibilidades que brinda el gabinete de control y las ventajas de utilizar el protocolo de comunicación DNP3 [Smith y McFadyen (a); Smith y McFadyen (b); Smith y Copps; Smith]. El desarrollo de la nueva tecnología comenzó precisamente con el estudio de este protocolo, y el diseño y programación de un driver que permitiera establecer comunicación con el gabinete de control, de forma tal que se pudieran interpretar los datos recibidos y codificar los datos enviados; posteriormente se realizaron pruebas de comunicación remota mediante el uso de radio, para garantizar la calidad de dicha transmisión remota, y finalmente se procedió al diseño y programación del SCADA.

Para las pruebas de comunicación remota mediante el uso de radio, fue de vital importancia la participación de la Organización Básica Eléctrica Territorial de Colón (OBET Colón), la cual aportó la experiencia y la colaboración de uno de sus técnicos en el tema de las comunicaciones, así como los medios físicos de comunicación (radios y antenas). También fue importante el apoyo brindado por la OBE Habana y la OBE Ciudad de La Habana, las cuales facilitaron gabinetes de control para las pruebas y ajuste del software; y, en el caso de Ciudad de La Habana, también prestó sus instalaciones para realizar pruebas en tiempo real.

Resultados

Como resultado de todo el trabajo realizado, actualmente se cuenta con TELENUL, SCADA de supervisión y telecontrol de redes de distribución, diseñado especialmente para recerradores y seccionalizadores NULEC, completamente configurable y que permite trabajar con toda la información procesada por el gabinete de control.

Entre las principales prestaciones que brinda TELENUL están:

1. Poseer un potente gestor de comunicaciones, que permite:
 - Solicitar información y recibir respuestas de múltiples tipos de datos en un solo mensaje.
 - Excelente detección y recuperación de errores.
 - Recibir en la respuesta sólo los datos que han cambiado.
 - Trabajar por prioridad los diferentes grupos de datos.
 - Recibir respuestas no solicitadas.
 - Recibir datos de eventos con marcas de tiempo (adjuntas).

2. Obtener informaciones procesadas por el gabinete de control, tales como:
 - El estado del interruptor (abierto o cerrado) y otros indicadores importantes para la operación.
 - Los eventos de avería.
 - Los valores de las corrientes y voltajes de fase, potencias y contador de energía (kWh).
 - El estado técnico del interruptor y el gabinete de control (vida útil de los contactos, número de operaciones del interruptor, estado de la batería, etcétera).

3. Permitir actuar sobre las redes sin necesidad de trasladarse físicamente al lugar, para realizar acciones tales como:
 - Abrir o cerrar el interruptor.
 - Modificar condiciones de trabajo.
 - Modificar el tipo de protección activada ante una avería.

4. Contar con un ambiente amigable a través de un menú que permite recorrer todas las opciones de manera fácil y rápida.
5. Mostrar toda la información procesada a través de tablas de reportes y gráficos, que pueden ser visualizados en el monitor de la computadora, o impresos.
6. Alertar sonora y visualmente ante eventos de alarma.
7. Contar con un potente tratamiento de datos históricos.
8. Proteger el sistema mediante claves de acceso que limiten la ejecución de determinadas acciones por personal no autorizado.

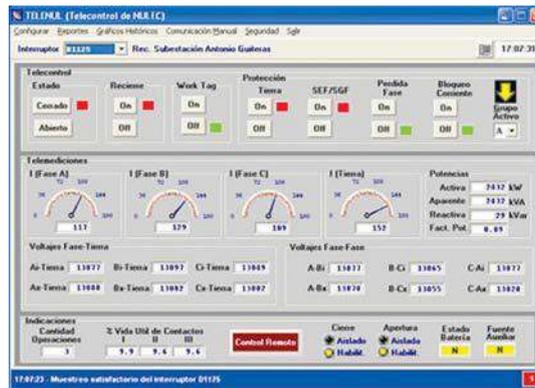


Fig. 2. Pantalla principal de TELENUL

En la figura 2 se muestra la pantalla principal de TELENUL, cuyas características de operación son las siguientes:

- Contiene un menú a partir del cual se pueden recorrer todas las opciones.
- La información se refiere siempre al interruptor que se seleccione del conjunto de interruptores configurados.
- Se actualiza la información en tiempo real sobre el estado de las variables telecontroladas y el valor de las telemediciones de parámetros eléctricos, así como otras indicaciones importantes para la operación del despacho.
- En la sección de telecontrol se aplican las órdenes remotas, como por ejemplo, abrir o cerrar el interruptor, o cambiar un esquema de protección. Estas órdenes están protegidas mediante claves de acceso que limitan su ejecución por personal no autorizado.

TELENUL es un producto completamente configurable, cuenta con varias opciones muy fáciles de actualizar y que permiten personalizar el SCADA con un mínimo de esfuerzo, según las características del lugar donde se instale. Está provisto de un potente sistema de reportes que se alimenta de los valores históricos almacenados en archivo. Los reportes pueden ser visualizados e impresos, y contienen información muy valiosa sobre el comportamiento del sistema eléctrico. Cuenta con seis tipos de reportes:

- Eventos analógicos.
- Eventos binarios.
- Operación.
- Telemediciones.
- Consumo en kWh.
- Comunicación.

El reporte de «Eventos analógicos» recoge todos los cambios significativos de las variables analógicas medidas (parámetros eléctricos y otros valores analógicos de operación). A través de este reporte se puede conocer el comportamiento real en el tiempo de todas las variables analógicas, con el verdadero rango de variación. El patrón de cambio significativo lo determina el valor de banda muerta, que se le configura a cada variable en el gabinete de control.

El reporte de «Eventos binarios» recoge todos los cambios de estado de las variables binarias controladas. A través de este reporte se pueden conocer todas las averías o situaciones anormales que han ocurrido, con el detalle del tiempo real de las mismas.

El reporte de «Operación» recoge todas las acciones de telecontrol realizadas (abrir o cerrar un interruptor, modificar condiciones de trabajo, modificar el tipo de protección etc.). A través de este reporte se pueden conocer las acciones realizadas en el transcurso de la operación del sistema eléctrico, quedando registrado en el mismo el responsable de cada una.

El reporte de «Telemediciones» recoge los valores periódicos de los parámetros eléctricos medidos (corrientes, voltajes y potencias), por medio del cual se puede conocer el valor de los parámetros eléctricos en diferentes instantes de tiempo; la periodicidad con que se almacenan estos valores es configurable y depende del período de muestreo seleccionado.

El reporte de «Consumo en kWh» recoge la energía eléctrica consumida por hora y diaria, y permite conocer el comportamiento del consumo eléctrico de forma detallada, en el rango de tiempo que se desee.

El reporte de «Comunicación» recoge los errores que ocurran en la transmisión de datos, y se puede conocer el comportamiento de las comunicaciones.

Todos los reportes se solicitan por rango de tiempo, lo cual permite precisar con detalles la información que se desea consultar; también se pueden filtrar los datos mostrados por diferentes conceptos.

En la figura 3 se muestra un reporte por pantalla de eventos binarios, obtenido a partir de datos reales procesados por TELENUL, en un rango de tiempo seleccionado.

Fecha	Hora	Interruptor	Evento
02/12/2005	11:19:52	F504	Autocierre desactivado
02/12/2005	11:20:41	F504	Autocierre activado
03/12/2005	11:09:52	F504	Datos de memoria validos
03/12/2005	11:21:57	F504	Interruptor abierto
03/12/2005	11:21:57	F504	Interruptor abierto
03/12/2005	11:21:57	F504	Apertura por operador
03/12/2005	11:21:57	F504	El interruptor está en bloqueo
03/12/2005	11:21:57	F504	La fase E1 está muerta
03/12/2005	11:21:57	F504	La fase C1 está muerta
03/12/2005	11:21:57	F504	La fase A1 está muerta
03/12/2005	11:21:57	F504	Todas las fases del lado de carga están muertas
03/12/2005	11:23:34	F504	Corriente de 2.5A o mas por lo menos en una fase
03/12/2005	11:23:34	F504	Interruptor cerrado
03/12/2005	11:23:34	F504	Interruptor cerrado
03/12/2005	11:23:34	F504	D El interruptor está en bloqueo
03/12/2005	11:23:34	F504	D Apertura por operador
03/12/2005	11:23:34	F504	La fase E1 está viva
03/12/2005	11:23:34	F504	La fase A1 está viva
03/12/2005	11:23:34	F504	La fase C1 está viva
03/12/2005	11:23:34	F504	Todas las fases del lado de carga están vivas

Fig. 3. Reporte de eventos binarios.

TELENUL permite también visualizar e imprimir la información de los parámetros eléctricos a través de gráficos, que pueden mostrar valores históricos almacenados en archivos, o información de tiempo real. Los gráficos tienen varias posibilidades de trabajo, tales como:

- Scroll.
- Zoom.
- Obtener el valor exacto para un punto seleccionado.
- Activar o desactivar la representación de parámetros cuando existen más de uno en un mismo gráfico.
- Poner o quitar rejillas.

En la figura 4 se muestra un gráfico de las corrientes de fase y tierra, en un rango de tiempo seleccionado.

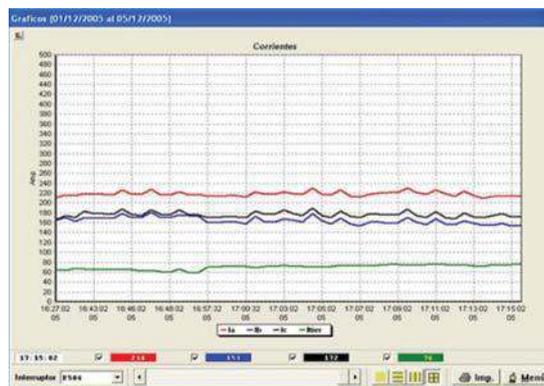


Fig. 4. Gráfico de las corrientes de fase y tierra.

TELENUL cuenta, además, con:

- Un sistema de aviso que alerta en forma sonora y visual la ocurrencia de un evento de alarma, o la reposición al estado normal de operación.
- Comunicación manual, independientemente del período de muestreo y los mensajes no solicitados, para actualizar de forma inmediata la información de un interruptor seleccionado.
- Opciones de seguridad, que protegen la operación del sistema a través de claves (Administrador, Usuarios).

Conclusiones

Los recerradores y seccionalizadores NULEC son dispositivos que actualmente existen en grandes cantidades en el país, y se siguen adquiriendo; los mismos tienen una gran importancia para el buen funcionamiento de las subestaciones de media tensión y las líneas de distribución de energía eléctrica. La posibilidad de poder controlar y supervisar de forma remota estos dispositivos, tiene un efecto técnico-económico considerable, ya que:

- Permite trabajar sobre la calidad de la energía, a partir de los datos de tiempo real e histórico que se obtienen de la información procesada por el gabinete de control.
- Facilita la operación y contribuye al ahorro de tiempo y combustible, al permitir actuar sobre las redes sin necesidad de trasladarse físicamente al lugar.
- Permite una rápida localización y aislamiento de la falla, lo cual reduce los daños y el tiempo de traslado de las cuadrillas, y contribuye al restablecimiento más rápido del suministro, por lo que se mejora la calidad del servicio.
- Garantiza un monitoreo constante de las corrientes y las tensiones de línea.

Desde que comenzó la introducción en el país de los recerradores y seccionalizadores NULEC, uno de los intereses principales de la Unión Eléctrica fue garantizar que los mismos se pudieran monitorear y controlar de forma remota, para garantizar un uso más eficiente y elevar la calidad de los servicios. TELENUL brinda la oportunidad de contar con un producto nacional que permite satisfacer el cumplimiento de esos propósitos.

Bibliografía

- NULEC INDUSTRIES A SCHNEIDER ELECTRIC COMPANY (A). «DNP3 Protocol Technical Manual for Automatic Circuit Reclosers and Load Break Switches».
- NULEC INDUSTRIES A SCHNEIDER ELECTRIC COMPANY (B). «Manuales Técnicos, Serie-U, Serie-N, Serie-RL».
- SMITH, MALCOLM. «DNP V3:00 Transport Functions».
- SMITH, MALCOLM Y JIM MCFADYEN (A). «DNP V3.00 Application Layer Protocol Description».
- SMITH, MALCOLM Y JIM MCFADYEN (B). «DNP V3.00 Data Link Layer Protocol Description».
- SMITH, MALCOLM Y MICHAEL COPPS. «DNP V3:00 Data Object Library».

Fundamentos del secado neumático vorticial de bagazo de caña

Fundamentals of bagasse vortical pneumatic drying

Por M.Sc. Eugenio Bombino Matos,
Dr. Guillermo Roca Alarcón* y Dr. René Lesme Jaén*
* Centro de Estudio de Eficiencia Energética (CEEFE),
Cuba.e-mail: bombino@ceefe.uo.edu.cu*

Resumen

Se presentan los fundamentos teóricos necesarios para la aplicación del movimiento vorticial al secado neumático del bagazo de caña, con el objetivo de mejorar sus características como importante fuente renovable de energía, materia prima y alimento animal, entre otras aplicaciones. Se presenta una síntesis del análisis teórico para el desarrollo del modelo matemático, a partir de un modelo físico basado en la interacción de las fuerzas consideradas. Después se procede a la construcción de un modelo en escala de laboratorio, mediante el cual se definen las bases para el desarrollo de la modelación, a través de la cual se simula el proceso investigado a diferentes escalas, mediante la aplicación de la Teoría de la Semejanza, y se comparan los resultados con mediciones experimentales relacionadas con el secado neumático del bagazo para diferentes condiciones y capacidades.

Palabras clave: Secado neumático vorticial, bagazo de caña y eficiencia energética

Abstract

The theoretical foundations necessary for the application of the vortical movement to the pneumatic drying of sugarcane bagasse are presented in this paper, with the objective of improving its properties as an important renewable energy carrier, raw material and animal food, among other applications. A synthesis of the theoretical analysis for the development of the mathematical model is presented here, using a physical model based on the interaction of the forces considered. The next stage of the procedure is the construction of a laboratory scale model, which is used to define the bases for the development of the modeling process, through which the investigated process is simulated at different scales, applying the Theory of Similarity, and the results are compared with experimental measurements related to the pneumatic drying of bagasse for different conditions and capacities.

Keywords: vortical air drying, bagasse and energy efficiency

Introducción

En Cuba, las biomásas de origen agroforestal son abundantes en numerosos lugares, y no se aprovechan completamente; entre el bagazo y la paja de caña, las cáscaras de arroz y el café, así como el aserrín, astillas y residuos forestales, se pueden producir cada año alrededor de 400 000 toneladas equivalentes de petróleo, lo que representa 10%, aproximadamente, de la producción anual de petróleo crudo y gas acompañante del país.

El bagazo se considera el subproducto no maderable más importante del mundo y tiene un alto valor energético, además de su potencialidad para otros usos. La necesidad de secar el bagazo está dada con vistas a su ahorro, para mejorar sus características como materia prima y para su almacenamiento, ya que el mismo tiene utilidad para una amplia gama de procesos, que van desde la industria de derivados, hasta la generación de electricidad. En el presente trabajo se presentan los estudios que se realizan con vistas a obtener una herramienta teórica que permita lograr mejores resultados en los procesos neumáticos de tratamiento y manipulación de esta importante biomasa sólida, como aporte en el uso de los recursos renovables cubanos. En el mundo, la tendencia en el secado de bagazo, desde los años 80 del siglo pasado, es el secado neumático; sin embargo, estos secadores presentan la gran desventaja de sus grandes dimensiones, por lo que uno de los principales objetivos de este trabajo se enfoca hacia la determinación de esas dimensiones, y así contribuir a hacerlas más ventajosas y atractivas.

Materiales y métodos

El modelo físico del proceso objeto de estudio, consiste en el movimiento de una capa de partículas en forma de espiral ascendente por el espacio anular entre dos cilindros, y su modelación matemática se realizó considerando la superposición de dos campos de flujo, moviéndose entre dos cilindros concéntricos como límites de frontera. La superposición de un campo plano circular horizontal, y otro axial recto vertical, produce la resultante que describe el movimiento vorticial ascendente en el espacio anular comprendido entre los cilindros mencionados, según se representa en la figura 1, donde se muestra el modelo físico con las fuerzas consideradas, que según Bombino, Roca y Lesme [2003] son:

1. Fuerza de resistencia frontal \bar{F}_r .
2. Fuerza del peso \bar{F}_g .
3. Fuerza de empuje \bar{F}_A .
4. Fuerza de fricción partículas-pared \bar{F}_1 .

5. Fuerza de fricción gas-pared \overline{F}_{gp} .
6. Fuerza centrífuga \overline{F}_c .

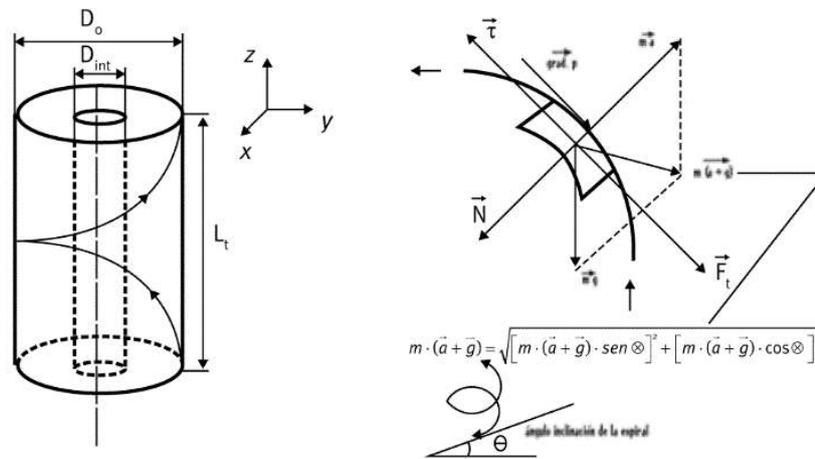


Fig. 1. Modelo físico de las fuerzas consideradas durante el movimiento en espiral, en el espacio anular entre dos cilindros concéntricos.

La fuerza centrífuga constituye una característica intrínseca de la componente giratoria del movimiento vorticial, y se encuentra dirigida en la dirección de la normal N de la tangente a la trayectoria.

En forma escalar se obtiene, para las tres dimensiones del espacio, un sistema de tres ecuaciones diferenciales de segundo grado y de segundo orden, teniendo en cuenta las fuerzas consideradas, lo que no tiene solución analítica y se resuelve mediante la aplicación del método numérico RungeKutta de cuarto orden, con el objetivo de simular el proceso de secado neumático vorticial.

Se construyó un modelo en escala de laboratorio para reproducir el proceso, teniendo en cuenta los criterios de semejanza para apoyar la modelación.

Criterios constructivos de un modelo construido en escala del laboratorio para generar el movimiento vorticial

Debido a que no se encontraron reportes de equipos similares al propuesto en este trabajo, para el tratamiento y manipulación del bagazo de la caña de azúcar, se parte de los estudios realizados en los equipos que más se aproximan al principio de funcionamiento del mismo, que son los hidrociclones y los gasociclones.

Estudiar en un modelo de laboratorio el movimiento vorticial, para su aplicación al secado neumático, resulta una necesidad debido a lo complejo que sería construir una instalación de este tipo, con mayor escala. Por ello,

se decidió construir un modelo de laboratorio en el que se pudiera reproducir el movimiento en espiral de las partículas de bagazo, para posibilitar su estudio.

El modelo construido se compone de dos cilindros concéntricos, entre los cuales se produce un flujo anular en forma de vórtice de una mezcla bifásica, debido a sus características geométricas y de entrada y salida tangenciales al equipo, y a que el cilindro interior funciona como elemento direccionador del flujo.

Para aplicar la semejanza geométrica, se tiene que garantizar que se mantengan las relaciones entre las principales dimensiones del equipo, así como las que definen las condiciones de entrada y salida para cualquier capacidad. Esto se definió de la forma siguiente:

$$(L_{To} / D_o) = 3,05; D_o = 2D_{int}; (D_o / h_e) = 1,8; (D_o / l_e) = 5$$

Donde:

L_{to} : Altura del equipo.

D_o : Diámetro exterior.

h_e : Altura del orificio de las toberas de entrada y salida.

l_e : Ancho del orificio de las toberas de entrada y salida.

Una condición necesaria para la semejanza dinámica de dos flujos, es la igualdad del Re y el Eu en los dos flujos, cuando se han utilizado los parámetros del flujo y las medidas geométricas convenientes, según Shames [1978].

La relación de diámetros se escogió de forma tal que el diámetro exterior (D_o) sea el doble del interior (D_{int}), lo que garantiza que la relación (D_{eq}/D_{int}) sea siempre igual a 1, debido a que, como se demuestra, para el caso de cilindros concéntricos $D_{eq} = D_o - D_{int}$, entonces $D_{eq} = D_{int}$; y, por tanto, el Re puede escribirse de la forma siguiente:

$$Re_m = Re_p = \frac{\left(\frac{W}{\varepsilon} - Va\right) \cdot \left(\frac{d_p}{D_{eq}/D_{int}}\right)}{\nu} = \frac{\left(\frac{W}{\varepsilon} - Va\right) \cdot (d_p)}{\nu}$$

Donde:

$(W / \varepsilon) - Va$: Velocidad de desplazamiento de las partículas.

ν : Viscosidad cinemática del fluido.

d_p : Diámetro de las partículas.

ε : Porosidad.

Va : Velocidad de arrastre.

De esta manera, manteniendo la relación de diámetros se garantiza la igualdad del Re del modelo, con el Re del prototipo, para cualquier

dimensión que cumpla con las relaciones de semejanza geométrica establecidas, para un determinado diámetro de partículas. Al variar las dimensiones del prototipo, manteniendo la proporción entre las magnitudes geométricas, así como de entrada y salida, la diferencia total de presiones en el prototipo ΔP_p resultará diferente a la del modelo ΔP_m , y le corresponderá una corriente semejante, que puede representarse de forma general, según Mijeev [1979], por la ecuación (1):

$$f(Re, Eu) = 0 \quad (1)$$

Teniendo en cuenta que, partiendo de la semejanza geométrica y la semejanza cinemática, se puede garantizar la semejanza dinámica.

Según el Tercer Teorema de la Semejanza, las condiciones necesarias y suficientes para que dos procesos sean semejantes se dan cuando son iguales los números determinantes de semejanza; de este modo, la condición $Re_p = Re_m$ determina la similitud de las corrientes.

La identidad de los números de semejanza a determinar, $Eu_p = Eu_m$, se obtiene como consecuencia de la semejanza ya establecida.

Así, por ejemplo, en el movimiento vorticial estudiado puede asegurarse la particularidad de movimiento, también dando la diferencia total de presiones en los extremos de la instalación, mientras que la velocidad de la corriente y el gasto estarán en función del proceso y, en este caso, como determinante intervendrá lo que se considera por algunos autores otro número de semejanza:

$$\sqrt{Eu \cdot Re} = \sqrt{\frac{\Delta p}{\rho \cdot \left(\frac{W}{\varepsilon} - Va\right)^2}} \cdot \frac{\left(\frac{W}{\varepsilon} - Va\right) \cdot \left(\frac{dp}{D_{int} \cdot l_{Dint}}\right)}{v} ; \text{ Si } \frac{D_{eq}}{D_{int}} = 1, \text{ secumple;} \quad (2)$$

$$\left(\sqrt{\frac{\Delta p}{\rho}} \cdot \frac{dp}{v}\right)_m = \left(\sqrt{\frac{\Delta p}{\rho}} \cdot \frac{dp}{v}\right)_p$$

Esta relación nos permite determinar la caída de presión para las condiciones del prototipo, a partir de conocer la caída de presión medida para las condiciones del modelo, quedando finalmente de la forma siguiente:

$$\Delta p_p = \Delta p_m \cdot \left(\frac{\rho_p}{\rho_m}\right) \cdot \left(\frac{dp_m}{dp_p}\right)^2 \cdot \left(\frac{v_p}{v_m}\right)^2 \quad (3)$$

Aquí se tiene en cuenta la variación de la densidad y la viscosidad cinemática con la temperatura, para poder determinar la caída de presión

en el prototipo trabajando con gas caliente, a partir de la caída de presión medida en el modelo, funcionando con aire a temperatura ambiente.

Cuando se trabaja con un prototipo de mayor tamaño, para el cual se incrementan la longitud total del recorrido (L_{top}^*) y el diámetro equivalente del equipo ($Deqp^*$), la caída de presión para este prototipo (ΔPp^*) se puede determinar teniendo en cuenta el coeficiente de presión, en función de la caída de presión en el prototipo con gases calientes (ΔPp), la longitud total del recorrido en el prototipo con gases calientes (L_{Top}), y el diámetro equivalente del prototipo con gases calientes ($Deqp$), por la relación siguiente:

$$\frac{\Delta Pp^*}{\Delta Pp} = \frac{f \cdot \frac{L_{Top}^*}{Deqp^*} \cdot \left(\frac{W}{\varepsilon} - Va\right)^2}{f \cdot \frac{L_{top}}{Deqp} \cdot \left(\frac{W}{\varepsilon} - Va\right)^2} \quad (4)$$

Como una condición es mantener las velocidades iguales en el modelo y el prototipo, la ecuación (4) se simplifica, quedando:

$$\Delta P_p^* = \Delta P_p \cdot \frac{Deqp \cdot L_{top}^*}{Deqp^* \cdot L_{top}} \quad (5)$$

Sustituyendo (3) en (5), se obtiene finalmente:

$$\Delta P_p^* = \Delta P_m \cdot \left(\frac{\rho_f}{\rho_m}\right) \cdot \left(\frac{v_f}{v_m}\right) \cdot \frac{L_{to} \cdot Deqm}{L_{tom} \cdot Deq} \quad (6)$$

De esta forma, es posible determinar la caída de presión para diferentes condiciones de trabajo del prototipo, a partir de la caída de presión en el modelo.

En la modelación se tuvieron en cuenta, además, los criterios de Prandtl y Schmidt.

Comprobación experimental de la modelación realizada

Para comprobar la validez de los resultados obtenidos con la modelación desarrollada en este trabajo, se propuso realizar la simulación del proceso teniendo en cuenta los criterios de semejanza, y comparar los resultados experimentales obtenidos en el laboratorio, con los de instalaciones industriales con gases calientes, para diferentes capacidades.

En el laboratorio se realizaron 18 experimentos, con 6 muestras de 25 g de bagazo, de diferentes diámetros. El flujo de bagazo se fue variando en

dependencia del comportamiento de la espiral, hasta lograr una espiral «correcta», a la cual se le denominó espiral normal, y formada entre dos límites, que son: la denominada espiral lenta y la denominada espiral rápida. Ello se explica a continuación para uno de los diámetros de partículas procesadas.

Por ejemplo, para el diámetro de partículas de 0,8 mm, cuando se comenzó con un flujo de aire de 2,34 m³/min y un flujo de bagazo de 3,13 g/seg, se observaba que las partículas describían una espiral incorrecta, ya que se caían dentro del equipo; luego se fue aumentando el flujo de aire hasta que, para el valor de 2,52 m³/min, se comenzó a producir la espiral normal, en la que las partículas no se caen y demoran el mayor tiempo dentro del equipo. Por encima de este valor, comenzaba a producirse lo que se le llamó espiral rápida, en la cual las partículas permanecían menos tiempo dentro del equipo, lo que no es conveniente para el proceso de secado.

La llamada espiral normal se obtuvo en cada caso con valores del flujo que están en función de la velocidad de arrastre de las partículas.

Resultados y discusiones

En la tabla 1 y la figura 2 se muestra una síntesis comparativa de los resultados de 18 corridas experimentales, obtenidos en el laboratorio, y los simulados mediante la modelación, referentes a la velocidad requerida del gas para producir el movimiento vorticial de partículas de bagazo.

Tabla 1. Resumen comparativo de la velocidad del gas obtenida de forma experimental y teórica

dp, mm	Wexp, m/s	Wteo, m/s	μc, kg/kg	Observación
0,8	9,70	7,63	0,063	Espiral normal
1,3	10,40	8,70	0,068	Espiral normal
1,8	10,90	9,44	0,065	Espiral normal
2,2	11,60	10,85	0,085	Espiral normal
2,7	11,80	11,10	0,060	Espiral normal
3,2	12,00	11,40	0,104	Espiral normal

Leyenda:

dp : Diámetro de partículas.

W : Velocidad del gas.

μc : Concentración.

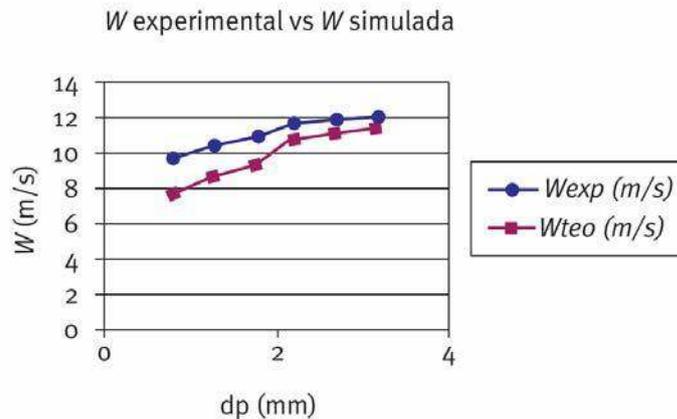


Fig. 2. Comportamiento de la velocidad requerida del gas obtenida experimentalmente y según la simulación.

Al determinar el error mediante la expresión $\sum_{f=1}^6 W_{exp} - W_{teo} / exp * 100 = 11\%$, se corrobora que el modelo teórico elaborado simula con una aproximación aceptable los valores de las mediciones realizadas en el laboratorio, con aire en condiciones atmosféricas.

Comparación con los resultados a escala de planta piloto e industrial

Se logró simular en el rango de experimentos realizados a escala de planta piloto e industrial. Se comparan los resultados de simular el secado neumático con movimiento en forma de espiral, con resultados experimentales del secado neumático, medidos en dos secadores industriales de diferentes capacidades.

Primeramente, se hace la comparación para un secador neumático industrial prototipo. La experimentación de este secador se realizó a través de 453 corridas, donde se acumularon 7 500 datos que corroboraron los resultados obtenidos en un equipo piloto por el ICINAZ. Este equipo trabajaba con una concentración promedio de $\mu c = 0,184$ kg/kg.

Se realizó la simulación para partículas industriales menores o iguales a 15 mm, que representan alrededor de 85% de las producciones de bagazo de los centrales azucareros donde se realizaron los experimentos.

Tabla 2. Valores de parámetros medidos experimentalmente en un secador neumático convencional, y simulados en un secador neumático vorticial de 7 t/h

	Gm, t/h	Do, m	Ubhi, %	Ubhf, %	Tfi, °C	Tff, °C	Lto, m	Lt, m
E	7	-	47	35	250	100	-	-
S	6,9	1,5	47	34,82	250	97,24	9,63	4,57

Leyenda:

E: Experimental.

S: Teórico de la simulación.

Lt: Altura del equipo.

Lto: Longitud del recorrido de las partículas en el secador.

Do: Diámetro exterior del equipo.

Gm: Capacidad del secador.

También se realizó la simulación para comparar con el proceso de secado neumático de un secador industrial de 20 t/h de capacidad.

Tabla 3. Valores de parámetros medidos experimentalmente en un secador neumático convencional, y simulados en un secador neumático vorticial de 20 t/h

	Gm, t/h	Do, m	Ubhi, %	Ubhf, %	Tfi, °C	Tff, °C	Lto, m	Lt, m
E	20	-	48	31	256	115	~ 28	~ 28
S	20,12	2,57	48	30,68	256	97,56	16,45	7,83

Leyenda: Ídem.

Conclusiones

1. Los resultados obtenidos demuestran que se logró la simulación del proceso de secado neumático aplicando el movimiento vorticial.
2. Se demuestra que, funcionando con este principio, se logra una reducción considerable del secador neumático porque las longitudes del recorrido de las partículas son relativamente grandes para alturas relativamente pequeñas del equipo.

3. Mediante la modelación desarrollada es posible determinar los principales parámetros de diseño, para secadores neumáticos vorticiales de diferentes capacidades.

Bibliografía

BOMBINO, M. E.; A. G. ROCA Y J. R. LESME. «Estudio teórico-práctico sobre el movimiento en espiral ascendente de partículas de biomasa», *Revista Tecnología Química* XXIII (1): 2003.

MIJEEV, M. A. E I. M. MIJEEVA. *Fundamentos de termotransferencia*. Moscú: Ed. Mir, 1979.

SHAMES, I. H. *La mecánica de los fluidos*. México: Mc Graw-Hill, 1978.

Rediseño de los quemadores de la Unidad 3, de la CTE «10 de Octubre», para quemar combustible nacional

Redesign of the burners of Unit 3, of CTE «10 de Octubre», to burn national crude oil

*Por Dr. C. Abelardo Daniel Rodríguez Arias**
** Laboratorio de Combustión INEL-UNE, Cuba.*
e-mail: abelardo@inel.une.cu

Resumen

Se presenta el rediseño de los quemadores de la Unidad 3, de la Central Termoeléctrica (CTE) «10 de Octubre», de Nuevitas, para realizar el cambio a combustible nacional, así como los principales resultados obtenidos. Los quemadores, en el diseño original, utilizaban atomización mecánica del combustible a alta presión, con riesgos de derrames cuando se depositaba coque en el asiento de la varilla de cierre. El rediseño se basó en la introducción de un atomizador asistido por vapor del tipo «Yjet», de baja presión, recomendado para combustibles pesados. La investigación se llevó a cabo directamente en esta Unidad, primero con un solo quemador y realizando corridas con atomizadores de diferentes ángulos de salida del aerosol; y, posteriormente, se transformaron los seis quemadores y se comprobaron los resultados a diferentes cargas con la Unidad en línea.

Palabras clave: Quemadores, central termoeléctrica y eficiencia energética

Abstract

The redesign of the burners of Unit 3 of the Thermal Power Plant (CTE) «10 de Octubre», in Nuevitas, is presented to make the change to national fuel, as well as the main results obtained. In the original design the burners, used mechanical atomization of the fuel at high pressure, with risks of spills when coke was deposited on the seat of the closing rod. The redesign was based on the introduction of a low pressure steam assisted atomizer type "Yjet ", recommended for heavy fuels. The investigation was carried out directly in this Unit, first with a single burner and performing runs with atomizers of different angles of exit of the aerosol; and, subsequently, the six burners were transformed and the results were checked at different loads with the Unit in line.

Keywords: Burners, thermal power station and energy efficiency

Desarrollo

La Unidad 3 de la CTE «10 de Octubre», de Nuevitas, es de fabricación eslovaca, de la firma SES TLMACE. Esta Unidad fue diseñada para producir 64 MW con fuel oil, y tiene instalados seis quemadores ICL-94 de 36,3 MWt cada uno, ubicados en posición frontal y distribuidos en dos filas de tres quemadores.

La atomización del combustible en el quemador ICL-94, en su diseño original, era de tipo mecánico con retorno, con un sistema de válvula de cierre en la punta del atomizador, que operaba con la presión del combustible. Este sistema, en ocasiones, había presentado problemas con la hermeticidad, debido a la formación de coque en la zona del asiento, lo que trajo consigo derrames de combustible en el interior del horno, que en algunas ocasiones dio lugar a combustiones secundarias. Por la peligrosidad que esto tiene durante la quema de crudo, debido a su alto contenido de volátiles, y por la necesidad de disponer de un sistema de atomización eficiente para el nuevo combustible, se estudió la posibilidad de sustituir el quemador en su conjunto, o modernizar el existente mediante su rediseño.

La oferta de los nuevos quemadores, en este caso, implicaba una inversión significativa (600 000 USD), en una unidad que por sus años de explotación, nivel de eficiencia, capacidad y obsolescencia tecnológica, no no resultaba ya atractiva ni viable para el país; por eso se solicitó al Laboratorio de Combustión del INEL hacer una propuesta que pudiera dar solución al problema.

El trabajo consistió en lograr la sustitución del atomizador mecánico con retorno, de los quemadores ICL-94, por otro con fluido auxiliar que lograra con fuel oil los mismos niveles de eficiencia en el generador que los que se alcanzan con el original, y que, además, permitiera generar la electricidad en esta Unidad con el combustible nacional.

Primera etapa experimental

Estudio del proceso de atomización del combustible

En las mediciones realizadas al atomizador original en el banco de pruebas, se pudo comprobar que la distribución del combustible era en forma de anillo hueco, definido por las fronteras de los conos del chorro que sale del atomizador (Fig. 1).

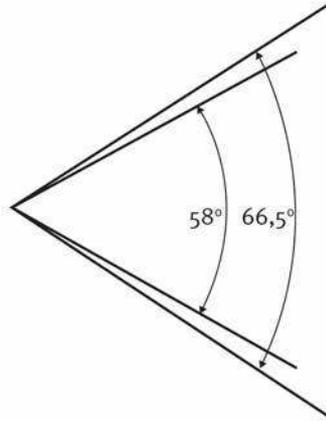
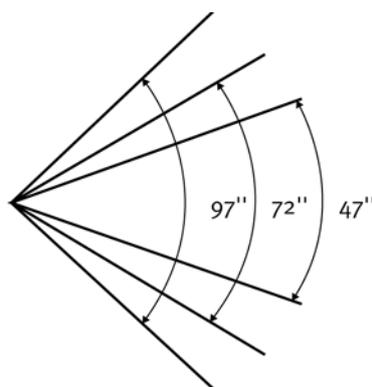


Fig. 1. Ángulo de apertura del chorro del atomizador original.

Al no existir en Cuba ninguna instalación experimental donde poder medir las corrientes específicas ($\text{g}/\text{cm}^2\text{s}$) del atomizador, ni caracterizar el aerosol, fue necesario diseñar una caña que permitiera realizar las evaluaciones con atomizadores multitoberas del tipo «Yjet». Para esto se diseñaron varios modelos de atomizadores con diferentes ángulos de apertura. Como resultado de los análisis del diseño-experimento, se construyeron atomizadores de 60° , 72° , 75° , 80° y 85° , que fueron sometidos al banco de prueba, donde se realizó una evaluación isotérmica, para comprobar su funcionamiento ulterior en un quemador con la caña experimental. La primera etapa de los experimentos con llama se realizó directamente en un quemador de la caldera, utilizando el horno como cámara de combustión experimental. Los mejores resultados se alcanzaron con el atomizador de 72° (Fig. 2), lo que indica que la distribución del combustible en la sección transversal de la llama, en este caso, presentaba características similares a las del atomizador original.



Atomizador «Yjet» de 72°

Fig. 2. Ángulo de distribución del atomizador de 72° .

En la figura 3 se muestran los ángulos de apertura de las corrientes de aire primario y secundario, y los ángulos de apertura de los chorros de combustible para el atomizador original, que logra un comportamiento similar al original (72°). Resulta interesante observar que existe una diferencia significativa en cuanto al ancho de la huella de distribución de combustible, entre el atomizador original y el de 72°; sin embargo, la concentración de combustible en la sección transversal del quemador encuentra las concentraciones de aire necesarias para lograr un adecuado mezclado en ambos atomizadores. Ello se pudo comprobar en la primera etapa experimental a partir de las observaciones visuales, estableciendo comparaciones entre las llamas del original y el propuesto, para iguales condiciones de explotación. Esto quiere decir que con este atomizador se logra un nivel de compatibilidad aceptable entre las concentraciones de aire que salen de la boca del quemador, y la distribución de combustible del aerosol. Lo anterior evidencia la importancia que tienen las mediciones de caracterización de un atomizador a la hora de realizar el diseño, o el rediseño de un determinado quemador, que lógicamente, aunque guardan cierta relación con el ángulo de apertura, el comportamiento de las corrientes específicas para un mismo ángulo puede ser muy diferente, ya que depende fundamentalmente del principio de funcionamiento del atomizador, y de las características físico-químicas del combustible.

Segunda etapa experimental

Una vez comprobado que el atomizador tipo «Yjet» de 72° cumple con los requerimientos para sustituir el mecánico con retorno, fue necesario construir siete cañas con todos los aditamentos necesarios para poder desarrollar la segunda etapa experimental. Al mismo tiempo, se estudiaron las características de flujo del nuevo atomizador, para lograr una capacidad compatible con la capacidad del quemador original.

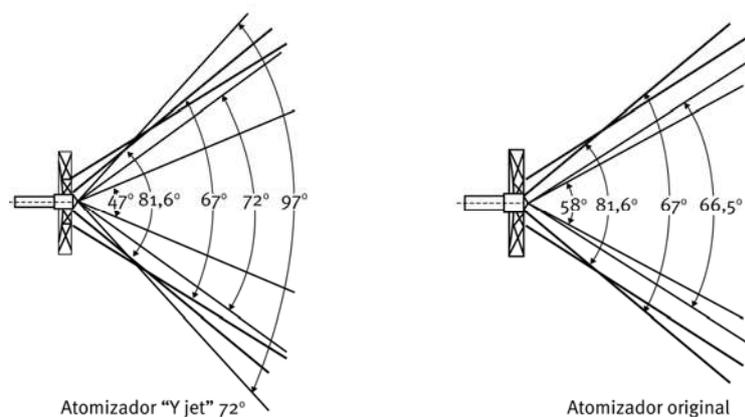


Fig. 3. Ángulos de apertura de las corrientes de aire y combustible, para el atomizador original y el propuesto (72°).

Análisis de flujo del atomizador original

El atomizador que utilizaba el quemador original era del tipo mecánico con retorno, diseñado para lograr una carga nominal de 36 MWt (3 250 kg/h) y una carga máxima de 38 MWt (3 450 kg/h), con una presión máxima de 35 kg/cm² (Fig. 4).

La figura 5 muestra el comportamiento comparativo entre el atomizador multitoberas tipo «Yjet», desarrollado por la Babcock, y las diferencias presentadas con respecto al construido en el Laboratorio de Combustión del INEL. Como se puede observar, existe diferencia en el comportamiento del flujo de combustible del atomizador construido con respecto al original, debido a los cambios practicados en el nuevo diseño; sin embargo, la calidad de la atomización presenta un comportamiento similar. Si por una parte los atomizadores tipo «Yjet» proporcionan una calidad de atomización superior, sobre todo para combustibles pesados, por otra, presentan exigencias técnicas de rigor con respecto al fluido auxiliar.

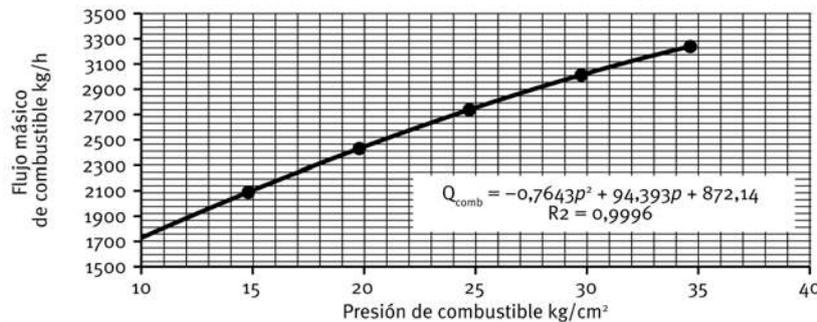


Fig. 4. Comportamiento del flujo de combustible en función de la presión de atomización (atomizador original ref. M-40).

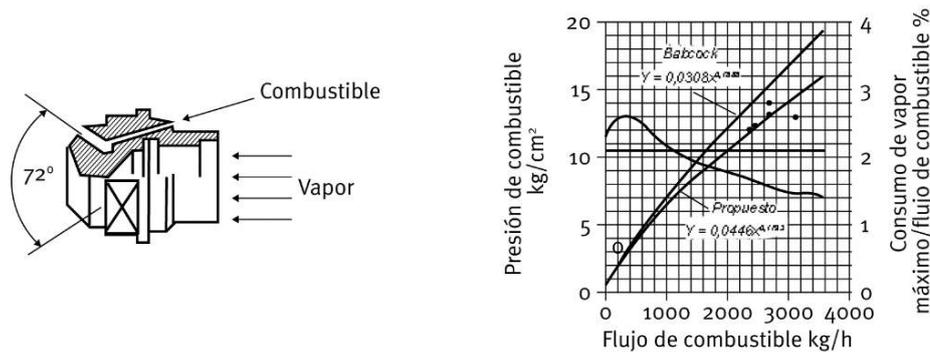


Fig. 5. Comportamiento del atomizador tipo «Yjet» utilizado para sustituir el mecánico con retorno del ICL-94.

En la tabla 1 se exponen los valores de presión y temperatura del vapor de atomización y del combustible, para garantizar el buen funcionamiento del nuevo atomizador.

La figura 6 muestra de forma comparativa el rango de las presiones de trabajo de los dos atomizadores. Como se puede observar, existe una disminución significativa del nivel de presiones requerido para lograr la misma potencia en el quemador del atomizador tipo «Yjet», con respecto al mecánico con retorno. Para lograr la potencia máxima en el quemador, el atomizador tipo «Yjet» utiliza la mitad del valor de presión requerido por el mecánico, lo que se traduce en una reducción significativa del consumo eléctrico en el sistema de bombeo de combustible, a la par que disminuye significativamente el nivel de insumo eléctrico en la generación.

Tabla 1 . Rango de regulación de los parámetros del atomizador

Parámetro	Valor mínimo	Valor máximo
Temperatura del vapor	200 °C	220 °C
Presión del vapor	10,5 kg/cm ²	12 kg/cm ²
Presión de petróleo	0,8 kg/cm ²	20 kg/cm ²

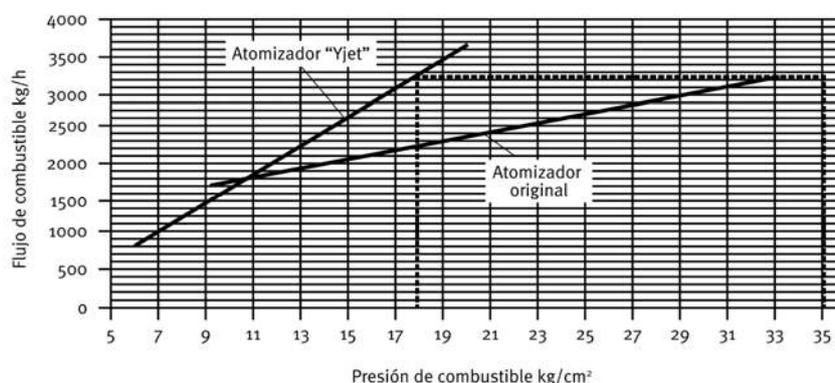


Fig. 6. Gráfico comparativo entre las presiones de trabajo de los dos atomizadores.

Resultados experimentales alcanzados durante las pruebas con fuel oil

Una vez construidas las nuevas cañas, y terminados todos los trabajos para realizar la prueba con fuel oil, el experimento se organizó en dos partes. En la primera, se procedió a «correr» la Unidad con el atomizador mecánico, y se tomaron todos los indicadores de eficiencia posibles de acuerdo a la instrumentación disponible en la caldera y el análisis de gases. Estos resultados sirvieron de línea base para el desarrollo del experimento. La

segunda parte se realizó con el nuevo sistema de atomización, con las nuevas cañas y los atomizadores asistidos por vapor.

La información gráfica que se presenta a continuación, establece un análisis comparativo de cada parámetro con la línea base.

Hay que señalar que la prueba se realizó con baja temperatura en el combustible por dificultades en su sistema de calentamiento, por lo que los resultados en ambos casos estuvieron afectados por esta condición desfavorable.

Las mejoras en el proceso de atomización, unidas a la compatibilidad alcanzada entre las corrientes específicas del atomizador propuesto y el esquema aerodinámico del quemador ICL-94, se ponen de manifiesto en las curvas de consumo de combustible con la carga (Fig. 7), en las cuales se observa una ligera tendencia a la reducción del consumo del atomizador propuesto, con respecto al original.

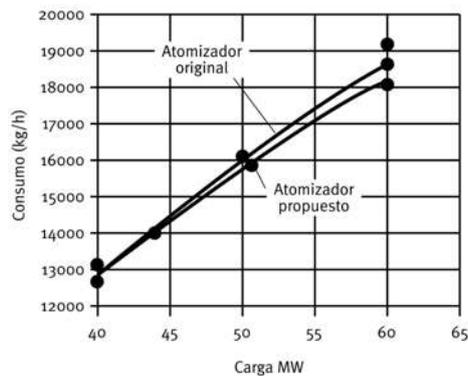


Fig. 7. Dependencia del consumo de combustible de la carga para el atomizador original y el propuesto

Lo anterior se corresponde con la eficiencia del proceso de combustión (Fig. 8), que en el caso del atomizador propuesto, para todas las cargas supera al original en más de tres puntos porcentuales.

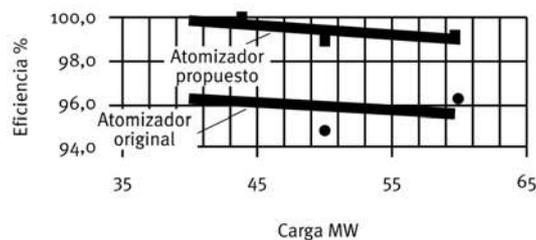


Fig. 8. Comportamiento de la eficiencia del proceso de combustión en función de la carga para el atomizador original y el propuesto.

Otro aspecto no menos importante, es que el quemador rediseñado con el atomizador propuesto, reduce las emisiones contaminantes de NOx a la salida del horno en más de 30 ppm, lo que representa una disminución aproximada de 61 mg/m³N (Fig. 9). Esto tiene una gran importancia desde el punto de vista de la protección del medio ambiente.

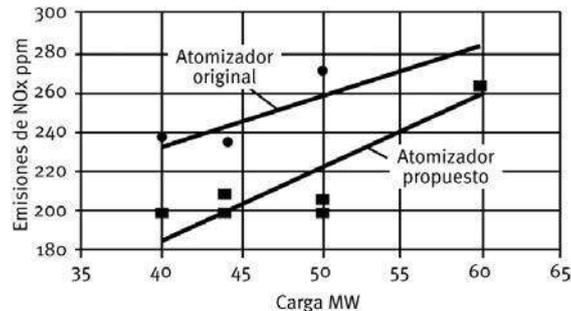


Fig. 9. Variación de las emisiones de NOx con la carga, para el atomizador original y el propuesto.

Después del rediseño, la Unidad comenzó su funcionamiento con combustible nacional, y en estos momentos ya lleva más de tres años entregando 64 MW al Sistema Electroenergético Nacional (SEN), con resultados satisfactorios y un consumo específico promedio inferior al resto de las unidades de Nuevitas.

Conclusiones

1. El rediseño realizado permitió el cambio de combustible en la Unidad 3, de la CTE «10 de Octubre», lo que significó la eliminación de la importación de quemadores equivalentes a 600 000 USD.
2. El nuevo sistema logra un incremento en la eficiencia del proceso de combustión, y una reducción en las emisiones atmosféricas con respecto al sistema original.
3. El consumo eléctrico por concepto de bombeo del combustible se redujo en 50%, lo que mejora el factor de insumo eléctrico de la generación.
4. El método científico empleado permite su aplicación en otras instalaciones con problemas similares.

Bibliografía

KULAGIN, L. V. Y M. I. ¿apellido?. *Atomizadores para la pulverización de los combustibles pesados*. ¿Ciudad, editorial, año?
 ¿Apellido, nombre?. *Cálculos térmicos de agregados de caldera (métodos normativos)*. ¿Ciudad, editorial? 1973.

DEEV, L. V. Y N. A. BALAFNICHOV. *Calderas de vapor y su mantenimiento*. Moscú: ¿editorial?, 1990.

RODRÍGUEZ ARIAS, ABELARDO D. Y LIZ B. ROSABAL PONCE. Estudio experimental sobre el funcionamiento del quemador France Thermique en su integración al horno de la caldera rusa BKZ-340-140/29M. Cienfuegos: 2001.

ADAMOV, V. A. Quema de petróleo en hornos y calderas. ¿Ciudad, editorial? 1989.

RODRÍGUEZ; A. D., LIZ B. ROSABAL PONCE Y PEDRO B. MARTÍNEZ DE VILLIERS. Teoría y práctica de los procesos de combustión. Combustibles sólidos. ¿Ciudad, editorial, año?

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:

M.Sc. Manuel Álvarez González.

EDITOR JEFE:

M.Sc. Alejandro Montesinos Larrosa.

EDITORA:

M.Sc. Madelaine Vázquez Gálvez.

CORRECCIÓN:

Ing. Jorge Santamarina Guerra

CONSEJO EDITORIAL:

Dr. Luis Bérriz Pérez.

M.Sc. Manuel Álvarez González.

Dr. Conrado Moreno Figueredo.

M.Sc. Manuel Fernández Rondón.

M.Sc. Alejandro Montesinos Larrosa.

M.Sc. Daniel López Aldama.

DISEÑO ELECTRÓNICO:

D.I. Antonio Romillo Polaino.

WEB MASTER:

M.Sc. Fernando González Prieto.

CONSEJO ASESOR:

Dra. Elena Vigil Santos.

Dr. Conrado Moreno Figueredo.

Dr. Sergio Corp Linares.

Dr. José Guardado Chacón.

Dr. Deny Oliva Merecio.

Dra. Dania González Couret.

Dr. Juan José Paretas.

Lic. Bruno Henríquez Pérez.

M.Sc. Leonor Turtós Carbonell.

M.Sc. Alejandro Montesinos Larrosa.

Lic. Ricardo Bérriz Valle.

Dr. César Cisnero Ramírez



**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

<http://www.cubasolar.cu>