



REVISTA CIENTÍFICA TRIMESTAL DE CUBASOLAR

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

30



Caracterización de la brisa de mar y el terral en función del aprovechamiento de la energía eólica.....	1
Sobreconsumos de combustible por roce de las llamas sobre las paredes refractarias de los quemadores industriales	23
Obtención de biodiésel a partir de un residuo de la industria azucarera	31
Gasto de combustible fósil y de agua, y emisión de CO ₂ , para formar un profesional en la Universidad Agraria de La Habana (UNAH).....	50
Aporte energético-económico y ecológico de molinos de viento para el abastecimiento de agua en una unidad ganadera	56
Control de la combustión y determinación de la eficiencia de la caldera por método práctico	63

Caracterización de la brisa de mar y el terral en función del aprovechamiento de la energía eólica

Characterization of sea and land breezes depending on the utilization of wind energy

Por Magdiel Carrasco Díaz, Alfredo Roque Rodríguez*,
Mario Carnesoltas Calvo**

** Centro de Física de la Atmósfera. Instituto de Meteorología. Cuba.
e-mail: magdiel.carrasco@insmet.cu*

Resumen

Con el objetivo de determinar la influencia de la circulación de la brisa de mar y el terral en el aprovechamiento energético del viento, se analizó la información proveniente de la Torre Meteorológica de Referencia ubicada en Playa Girón, en el período lluvioso de 2007. Teniendo en cuenta la situación sinóptica imperante cada día, se dividió la muestra en tres grupos: con flujo sinóptico entrando a la costa, paralelo, y saliendo de la costa, aunque por su importancia sólo se muestran los dos primeros. Se construyeron los perfiles verticales del viento para cada muestra, y se obtuvieron los histogramas de frecuencia de la velocidad y la distribución de la frecuencia por rumbos en el nivel de 100 m. Por último, para establecer una comparación entre las muestras en el aprovechamiento energético, se calculó la densidad de potencia media del viento diaria para cada grupo. Entre los principales resultados se encontró que en presencia de la brisa de segunda especie, tanto en el terral como en la brisa de mar, la mayor densidad de potencia se alcanzó durante los días en que la influencia de dicha brisa es débil, manteniéndose la persistencia de los vientos por encima de 4 m/s, en más de 85% del día. Bajo estas condiciones sinópticas, la densidad de potencia media promedio entre los dos regímenes que se obtuvo, fue aproximadamente de 300 W/m².

Palabras clave: Brisa de mar, terral, recurso eólico

Abstract

In order to determine the influence of the circulation of sea and land breezes in harnessing wind for energypurposes, we analyzed the information gatheredby the Meteorological Reference Tower located in Playa Girón, during the rainy season of 2007. Taking into account the everyday prevailing synoptic situation, the sample was divided into three groups: synoptic flow entering the coast, parallel, and leaving the coast, although by its importance only the first two are shown. The vertical wind profiles were

obtained for each sample, and the frequency histograms of velocity and frequency distribution by bearings at the 100 m level were obtained. Lastly, in order to establish a comparison among the samples regarding their energy use, it was calculated the average power density of the daily wind for each group. Among the main results it was found that in the presence of land breeze of second type, both in land and sea breezes, the highest power density was reached during the days when the influence of this breeze is weak, maintaining the persistence of winds above 4 m/s, in more than 85% of the time per day. Under these synoptic conditions, the mean average power density between the two regimes that was obtained was approximately 300 W/m².

Keywords: Sea breeze, land breeze, wind resource

Introducción

En Cuba, a partir de la crisis energética que vive hoy el mundo, la Dirección del país decidió dar un nuevo impulso al uso de las fuentes renovables de energía, en particular a la eólica.

Se reanudaron los estudios del potencial, culminándose el mapa de potencial eólico de Cuba [Soltura, *et al.*, 2006], lo que permitió determinar que los principales lugares con las mejores características para la obtención de energía eólica se ubican en sus costas y zonas montañosas.

En cualquier zona costera, la circulación local de brisas puede cambiar el régimen del viento predominante. Los sistemas de brisas de mar y tierra en las costas cubanas presentan peculiaridades bien diferenciadas. Mientras en la costa norte (N) la brisa de mar es reforzada casi siempre por los vientos de la componente general del flujo, en la costa sur (S), el avance del frente de la brisa de mar está limitado, al no coincidir las direcciones del flujo a escala sinóptica, con el flujo de la circulación local. Pero en el caso de la brisa de tierra o terral, sucede lo inverso: en la costa N el terral se manifiesta sólo de forma leve, por una ligera inclinación de la resultante del viento hacia el segundo cuadrante este-sur (E-S), mientras que en la costa S, en horas de la noche el viento norte-este (NE) sopla con apreciable intensidad y extensión [Lecha, 1994].

Dentro del sistema de la circulación de brisas en las costas, unos de los aspectos relevantes lo constituye la formación del frente de la brisa de mar, conocido en la literatura internacional como brisa de segunda especie [Carnesoltas, 2002a]. Esta condición se genera en una escala muy local, y es parte importante dentro del grupo de componentes que conforman el viento resultante medido por las estaciones meteorológicas, principalmente las ubicadas en zonas costeras.

Cuando se presentan las condiciones de brisa de segunda especie, éstas pueden ser un inconveniente para el aprovechamiento del recurso eólico en las costas; por tal motivo, de aquí se deduce un problema a resolver: ¿Cómo el régimen de la circulación local de brisas influye en la resultante del viento?

Las descripciones de la circulación de brisa aparecen en los relatos de los libros más antiguos, pero sus definiciones con carácter científico comenzaron a principios del siglo xx. La primera definición aceptada fue presentada por Conrad [1928], quien la llamó «brisa menor de mar», definiéndola como la circulación en las inmediaciones de la costa, que precede a la brisa mayor que se desarrolla de forma gradual, tanto horizontal como verticalmente a medida que continúe el calentamiento del aire sobre tierra, bajo las condiciones de viento en calma, o muy débil. Luego Koschmieder [1941], percatándose de que tal definición no siempre se cumplía, plantea una segunda definición para la brisa, que se produce por la acumulación de aire frío sobre el mar empujado por el aire caliente que sale desde la tierra en días con un viento general de cierta intensidad.

Actualmente se reconocen ambas definiciones, puesto que ocurrirá una u otra en dependencia de la dirección del viento con respecto a la costa, y para diferenciarlas se les denomina brisa de primera especie a la que ocurre con viento débil, y de segunda especie a la que forma frente. Por su parte, la Organización Meteorológica Mundial [OMM, 1992] define la brisa de mar, la brisa de lago y la virazón, sin hacer distinción entre ellas, como «viento de las regiones costeras que sopla durante el día desde una extensión grande de agua (mar o lago) hacia tierra debido al calentamiento diurno desde el suelo»; y la brisa de tierra, el terral, el viento de la costa y el viento de tierra, como «viento de las regiones costeras que sopla durante la noche desde tierra hacia una extensión grande de agua, debido al enfriamiento nocturno del suelo».

En Cuba, varios autores en sus trabajos han tratado sobre la brisa, entre los que se pueden mencionar a Rivero [1978]; Lecha, *et al.* [1979]; Osorio y Rego, [1980]; Hernández y Elizalde [1981]; Saenz [1981]; Rey [1982]; Batista [1984]; Fernández y Pazos [1998]; Portela [2002], y Carnesoltas [1986, 2002a]. Este último autor detalla las características fundamentales de la circulación local de brisa de mar y tierra, el frente de la brisa de mar y su papel de mecanismo disparador de la convección profunda, y el frente de la brisa de tierra en la interacción con el proceso conocido en Cuba como «brisote sucio» [Carnesoltas 2002b].

Los autores mencionados han descrito la circulación local de las brisas de forma conceptual, o a partir de perfiles verticales realizados por sondeos, los cuales muestran las condiciones atmosféricas en una columna vertical

durante una hora determinada. Carrasco, *et al.* [2007], en un trabajo preliminar, mostró cómo se manifestaba este proceso tanto en la costa N como en la costa S, y la importancia de considerarlo en la estimación del recurso eólico, fundamentalmente en la elaboración de pronósticos energéticos para parques eólicos ubicados en las costas. Hasta el momento no se han podido encontrar otras referencias que profundicen en los efectos que provoca el régimen de brisas, sobre la resultante de viento en el aprovechamiento de la energía eólica.

El presente trabajo se trazó como objetivo general: Determinar la influencia de la circulación de la brisa de mar y el terral en el aprovechamiento energético; y como objetivos específicos: Evaluar de manera cuantitativa los efectos de la brisa de mar y el terral en el aprovechamiento del recurso eólico de las regiones de estudio, y establecer una metodología de trabajo aplicable a todas las zonas costeras de Cuba.

Materiales y métodos

En la investigación se tomaron los registros de la Torre Meteorológica de Referencia El Brinco, ubicada en Playa Girón (región occidental de Cuba), municipio de Ciénaga de Zapata, al Sur de la provincia de Matanzas. Esta torre se encuentra aproximadamente a 200 m de la costa, con la línea costera orientada WNW-ESE con el mar hacia el SSW (Fig. 1).



Fig. 1. Ubicación de la Torre Meteorológica de Referencia El Brinco.

Se tomaron los datos registrados cada 10 minutos para el período lluvioso (mayo-octubre) del 2007. Las variables meteorológicas que se tuvieron en consideración fueron: la rapidez del viento en los niveles de 10, 30, 50 y 100 m de altura; la dirección del viento en los niveles de 10 y 100 m, y la temperatura y la humedad relativa en el nivel de 10 m. Además, se utilizaron los mapas de reanálisis de las componentes zonal y meridional del viento (15o N con 30o N y 90o W con 70o W), así como el campo de presión en superficie (10o N con 50o N y 110o W con 50o W) a escala sinóptica (NOAA). Los horarios comprendidos fueron las 06:00 y 18:00 UTC (Coordenadas Temporales Universales, por sus siglas en Inglés), por ser

representativos para analizar las condiciones sinópticas en presencia de terral y brisa de mar, respectivamente.

Utilizando los mapas de reanálisis de las componentes zonal y meridional del viento, se determinó la dirección del régimen de viento a escala sinóptica que predominaba en la zona de estudio. A partir de la situación sinóptica imperante cada día, se dividió la muestra en dos grupos: con flujo sinóptico entrando a la costa y flujo sinóptico saliendo de la costa. Esto permitió, posteriormente, poder determinar qué tipo de brisa influía.

Para poder caracterizar el proceso en su conjunto, se elaboraron los gráficos del comportamiento de cada variable durante las 24 horas. La oscilación de la velocidad resultante del viento se obtuvo para tres niveles de medición (10, 50 y 100 m); la oscilación de la temperatura y de la humedad relativa se construyó sólo para el nivel de 10 m. Con la ayuda de estos gráficos se pudieron distinguir, sin lugar a duda, los momentos de cambios de régimen.

Como la hora de comienzo y final de la brisa no se encuentra bien definida en la literatura consultada, se decidió analizar el horario del meridiano 75° W, comprendido entre las 19:00 (día anterior) y las 09:00 horas (día en curso) para el terral, y 06:00 y 21:00 horas para la brisa de mar. Como referencia de la llegada del frente de brisa de mar sobre el punto de medición, se tomó el giro en la dirección del viento. A partir de este criterio, para poder definir el nivel de influencia de la

brisa, se elaboraron los gráficos de las componentes u y v (10 y 100 m) de la velocidad resultante del viento, obteniéndose gráficamente la dirección del vector resultante del viento cada 10 minutos.

Con la ayuda de estos gráficos se determinó el nivel de influencia de la brisa para cada caso (entrante y saliente). Con el objetivo de poder evaluar la afectación que este proceso provocó en la resultante del viento, se decidió dividir cada caso en tres subgrupos de acuerdo al nivel de influencia de la brisa sobre la resultante del viento. Para esto, en dependencia del efecto que provoca cada tipo de brisa, se tuvo en cuenta el tiempo en que la dirección del viento giró en sentido contrario al flujo general. Estos grupos son los siguientes:

- G1: Débil influencia de la brisa de mar o de tierra (0% del día con giro del viento). La circulación de brisas no afecta o tiene poca influencia en el flujo general del viento.
- G2: Moderada influencia de la brisa de mar o de tierra (menos de 50% del día con giro del viento). La circulación de brisas tiene un efecto moderado sobre el flujo general del viento.

- G3: Fuerte influencia de la brisa de mar o de tierra (más de 50% del día con giro del viento). La circulación de brisas presenta una marcada influencia sobre el flujo general del viento.

Teniendo en cuenta estos criterios, se construyeron los perfiles verticales del viento con el promedio de la velocidad resultante en los cuatro niveles de medición para cada muestra, utilizando la nomenclatura G1, G2 y G3 para los casos de brisa de segunda especie, y g1, g2 y g3 para la brisa de primera especie. A su vez, con el fin de determinar la influencia de la brisa sobre el patrón de viento en la zona de estudio, se procesaron las muestras, obteniéndose el histograma de frecuencia de la velocidad resultante y la distribución de la frecuencia por rumbos en el nivel de 100 m. Por último, para poder establecer una comparación entre las muestras en cuanto al aprovechamiento energético, se calculó la densidad de potencia media del viento en el nivel de 100 m, de acuerdo a la influencia de la brisa.

Análisis de los resultados

1. Análisis del terral

Como se planteó anteriormente, la línea costera en El Brinco tiene una orientación WNW-ESE, con el mar hacia el SSW; por tanto, para que exista un flujo sinóptico entrando a la costa, las componentes del viento deben estar desde el SE hasta el W. En ese rango, el viento estuvo 19% (36 días) de los 184 días analizados. Durante 64% (117 días) de los días, el flujo sinóptico estuvo saliendo de la costa, donde las componentes del viento estuvieron entre el NW y el E. Mientras que 17% (31 días) de los días, el flujo estuvo relativamente paralelo a la costa, con sus componentes del ESE o del WNW.

La brisa de segunda especie, o frente de brisa, por sus características de presentarse con un flujo general contrario al terral, es decir, con un flujo sinóptico entrando a la costa, es la que le ofrece más resistencia a dicho flujo, obteniéndose velocidades del viento resultante inferiores a las estimadas. Por tal motivo, en este epígrafe se comenzaron a analizar los casos donde el flujo estuvo entrando a la costa. Posteriormente se analizaron los días en que el flujo salió de la costa, para determinar si la brisa de tierra (terral) favorece al flujo sinóptico, y los efectos que origina la brisa de primera especie.

Flujo entrando a la costa

Al analizar los gráficos obtenidos de las componentes zonal (u) y meridional del viento (v), se pudieron apreciar claramente los giros del viento registrado en los instrumentos. En la figura 2 se puede observar que en las últimas horas de la noche y primeras de la madrugada (A y B), la brisa de segunda especie prevalece ante el flujo sinóptico, imponiéndose el terral. En las últimas horas de la madrugada (C) se puede apreciar un debilitamiento de la brisa provocando un giro de la dirección del viento hacia tierra, imponiéndose nuevamente el terral en las primeras horas de la mañana (D). Estas condiciones varían en dependencia de la intensidad del flujo sinóptico que prevalece en la zona y el nivel de influencia de la masa de aire del terral.

Con el objetivo de poder evaluar la afectación que provocó en la resultante del viento la brisa de tierra de segunda especie (Fbt), se decidió dividir la muestra en tres grupos de acuerdo al nivel de influencia del Fbt , teniendo en cuenta el tiempo en que la dirección del viento se encontró hacia el mar. Estos grupos son los siguientes:

- G1: Débil influencia del Fbt (0% de la noche con giro del viento hacia el mar). La brisa de tierra de segunda especie no afectó o tuvo poca influencia en el flujo general del viento.
- G2: Moderada influencia del Fbt (menos de 50% de la noche con giro del viento hacia el mar). La brisa de tierra de segunda especie tuvo un efecto moderado sobre el flujo general del viento.
- G3: Fuerte influencia del Fbt (más de 50% de la noche con giro del viento hacia el mar). La brisa de tierra de segunda especie presentó una marcada influencia sobre el flujo general del viento.

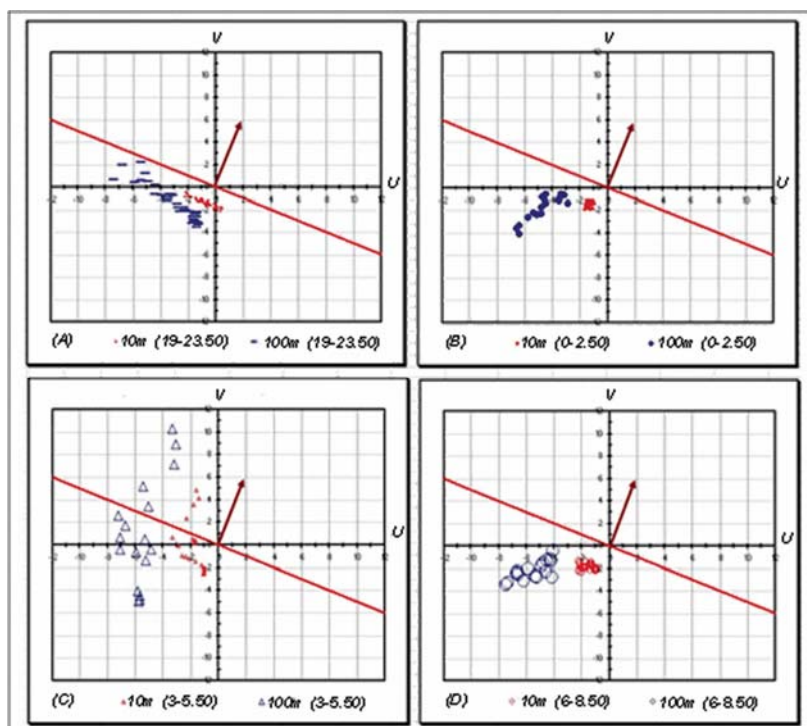


Fig. 2. Componentes zonal (u) y meridional (v) del viento correspondiente al día 15 de junio de 2007. La línea transversal indica la orientación de la costa. La flecha refleja la dirección e intensidad del vector del flujo sinóptico. En la leyenda se muestran los diferentes intervalos de tiempo, con figuras geométricas pequeñas y grandes de los niveles de 10 y 100 m, respectivamente. (A) horario comprendido entre 19:00 y 23:50 horas del día anterior, (B) horario entre 00:00 y 02:50 horas del día en curso, (C) horario entre 03:00 y 05:50 horas y (D) entre 06:00 y 08:50 horas.

De los 36 días estudiados con flujo entrante, se observaron 5 días con las características de débil influencia de la brisa de segunda especie (G1), distribuidos mayormente en junio, y sólo un día en octubre (Fig. 3). Con una influencia moderada de esta misma brisa (G2) se encontraron 16 días distribuidos entre junio y octubre. Los restantes 15 días, distribuidos de igual forma de junio a octubre, estuvieron asociados con fuerte influencia de la brisa de segunda especie (G3), encontrándose un máximo de ocurrencia en junio. Cabe destacar que en mayo no se produjo ningún día con flujo sinóptico entrando a la costa, lo que está asociado a la persistencia del régimen anticiclónico.

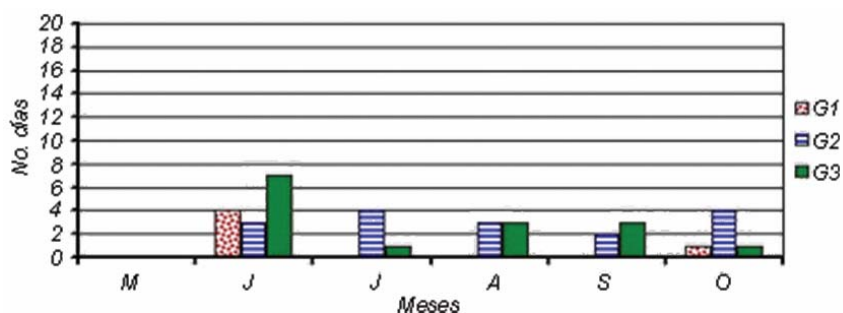


Fig. 3. Distribución de los grupos por meses.

Al analizar el perfil vertical del viento para cada nivel de influencia del *Fbt* (Fig. 4), se pudo observar una diferencia considerable entre los tres grupos. Durante los días donde la influencia del *Fbt* fue débil, los promedios de velocidad del viento fueron superiores en comparación a los días en que el *Fbt* desempeñó alguna influencia sobre la resultante del viento, con una marcada cizalladura del viento en los niveles próximos a la superficie.

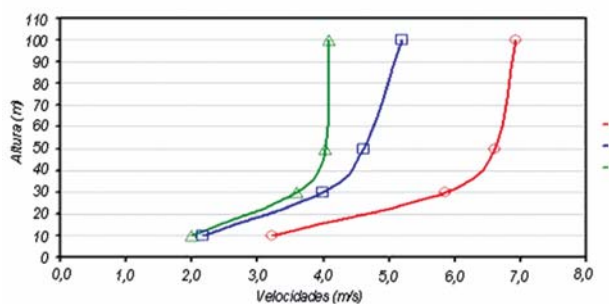


Fig. 4. Perfil vertical del viento con un flujo entrando a la costa, en dependencia de la influencia de la brisa de tierra de segunda especie, para los cuatro niveles de medición (10, 30, 50 y 100 m).

Lo anteriormente descrito se debe a que, durante los días con débil influencia, la resultante del viento se mantuvo con el mismo sentido del flujo sinóptico. Por tanto, los valores registrados estarán condicionados por las características sinópticas de cada día, sin la presencia de una componente en sentido contrario como el terral. Sin embargo, ya al presentarse cierta influencia de esta brisa, el flujo sinóptico se verá obstaculizado por una componente en sentido contrario. Al mantenerse durante más tiempo el predominio del *Fbt*, la dirección del viento se estabiliza en un mismo sentido, dependiendo los valores de la resultante del viento de la intensidad de esta masa de aire.

En el histograma de frecuencia de velocidad del viento para cada muestra (Fig. 5) se pudieron observar más claramente las diferencias entre los grupos explicados en el perfil vertical del viento. En los casos donde la

influencia del *Fbt* fue débil, las velocidades del viento en el nivel de 100 m llegaron a registrar valores hasta de 16 m/s, con un máximo de ocurrencia entre 6 y 7 m/s. Los valores por encima de 4 m/s (velocidad de arranque de los aerogeneradores) se mantuvieron más de 85% del tiempo. En estos casos, al permanecer imperando el flujo sinóptico, los registros de velocidad del viento estuvieron condicionados por las características sinópticas de cada día.

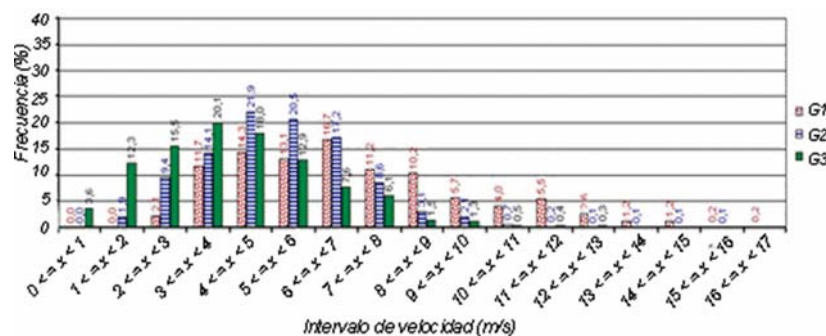


Fig. 5. Distribución de la frecuencia de la velocidad del viento en el nivel de 100 m, con respecto a los grupos analizados.

Los días en que la influencia del *Fbt* fue moderada, llegaron a registrarse valores hasta de 15 m/s, pero éstos estuvieron más concentrados por debajo de los 9 m/s, con un máximo de ocurrencia entre 4 y 5 m/s, manteniéndose los valores por encima de 4 m/s menos de 75% del tiempo. Los valores por encima de 9 m/s ocurrieron durante poco tiempo, debido a la inestabilidad que provoca la influencia del *Fbt*. Al mantenerse variando la dirección del viento, como consecuencia de la entrada y salida del frente de brisa, y no permanecer un régimen determinado durante el día, ello trae consigo que las velocidades del viento no se estabilicen, siendo esto desfavorable para el aprovechamiento de la energía eólica.

Los días en los cuales la influencia del *Fbt* fue fuerte, no se registraron valores superiores a 13 m/s, con un máximo de ocurrencia entre 3 y 4 m/s, manteniéndose los valores por encima de 4 m/s por debajo de 50% del tiempo. Al imponerse el flujo de la brisa de tierra de segunda especie al flujo sinóptico durante más tiempo en el día, ello trajo como consecuencia que las velocidades del viento no aumentaran considerablemente, pues estaban condicionadas por la relación entre la intensidad del flujo general y la brisa de tierra. Sin embargo, se mantuvieron más estables. En la distribución de la frecuencia por rumbos para cada grupo (Fig. 6), se puede observar claramente cómo varía la dirección del viento en dependencia del tipo de influencia ejercida por el flujo local detrás del *Fbt*; mientras que cuando la influencia de dicho flujo fue débil, la dirección predominante del viento se

encuentra entre los cuadrantes segundo y tercero (G1). Al presentarse una influencia moderada de la brisa, la dirección del viento varió en los cuadrantes primero, segundo y tercero (G2). Sin embargo, al establecerse el flujo después del *Fbt* durante un mayor tiempo, la mayor frecuencia de la dirección del viento se establece entre los cuadrantes primero y segundo (G3).

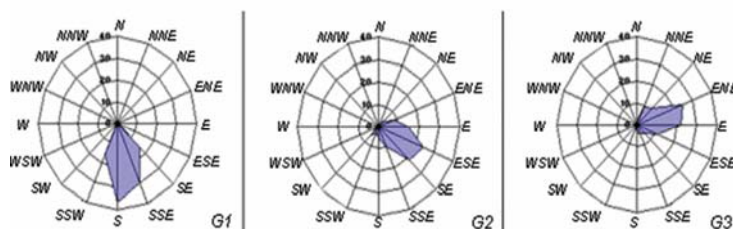


Fig. 6. Distribución de frecuencia por rumbos en función

Lo explicado anteriormente es confirmado cuando se calcula la densidad de potencia media para cada uno de estos grupos (Tabla 1). De esta forma, se obtuvo que la mayor densidad de potencia media (308 W/m^2) se pudiera alcanzar durante los días en que no hubo influencia de la brisa de tierra de segunda especie. Sin embargo, durante los días en que hubo alguna influencia de dicho flujo, los valores de la densidad de potencia media estuvieron determinados por el nivel de influencia de la brisa, obteniéndose una mayor densidad de potencia media durante los días de moderada influencia con respecto a los de fuerte influencia (120 y 80 W/m^2 , respectivamente).

Tabla 1. Densidad de potencia media obtenida para cada grupo, en W/m^2

G1	G2	G3
308	120	80

Flujo saliendo de la costa

En presencia de flujo sinóptico saliendo de la costa, la brisa de tierra tiende a incrementar la resultante del viento por encontrarse en el mismo sentido del flujo general. Por tal motivo, en este epígrafe se decidió analizar la influencia de la brisa de la forma siguiente:

- g1: Débil influencia de la brisa de primera especie (más de 50% de la noche con giro del viento hacia la tierra). La circulación de la brisa de tierra no afecta o tiene poca influencia sobre el flujo general del viento.

- g2: Moderada influencia de la brisa de primera especie (menos de 50% de la noche con giro del viento hacia la tierra). La circulación de las brisas de tierra tiene un efecto moderado sobre el flujo general del viento.
- g3: Fuerte influencia de la brisa de primera especie (0% de la noche con giro del viento hacia la tierra). La circulación de la brisa de tierra tiene una marcada influencia en el flujo general del viento.

De los 117 días con la presencia de este flujo, se encontraron 62 días con las características de fuerte influencia de la brisa (g3), distribuidos entre todos los meses, con un máximo de ocurrencia en mayo (Fig. 7). Con moderada influencia (g2) se encontraron 54 días distribuidos entre todos los meses, con un máximo de ocurrencia en mayo. Con débil influencia del terral (g1), se pudo apreciar solamente un día, registrado en septiembre.

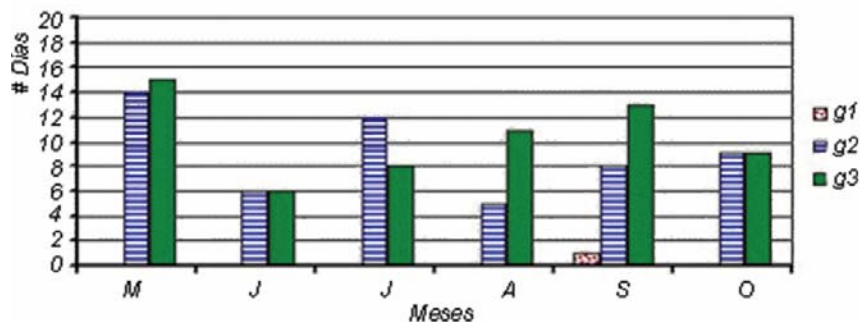


Fig. 7. Distribución de los grupos por meses

El perfil vertical del viento para estos grupos, describe una marcada diferencia entre los promedios de velocidad del viento para cada altura de medición (Fig. 8). Durante los días en que la brisa de primera especie tuvo una fuerte influencia, el flujo sinóptico se vio favorecido por ésta, registrándose promedios de velocidades del viento muy superiores con respecto a los demás grupos, y observándose una marcada cizalladura del viento entre los niveles bajos y altos. Sin embargo, en presencia de g1 y g2, el viento se comportó más débil.

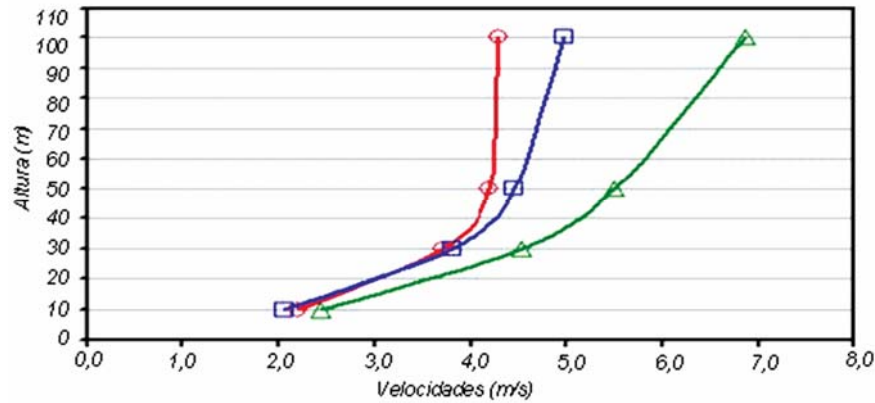


Fig. 8. Perfil vertical del viento con un flujo saliendo de la costa de El Brinco, en dependencia de la influencia de la brisa de tierra de primera especie, para los cuatro niveles de medición (10, 30, 50 y 100 m).

Al realizar la distribución de la frecuencia de la velocidad del viento teniendo en cuenta los grupos anteriores (Fig. 9), se pudo observar que con una débil influencia de la brisa de primera especie, los valores no superaron los 8 m/s, presentándose su máximo de ocurrencia entre 5 y 6 m/s, y sólo manteniéndose por encima de 4 m/s durante 60% del tiempo. De toda la muestra sólo se encontró un día con estas características, indicando su baja probabilidad.

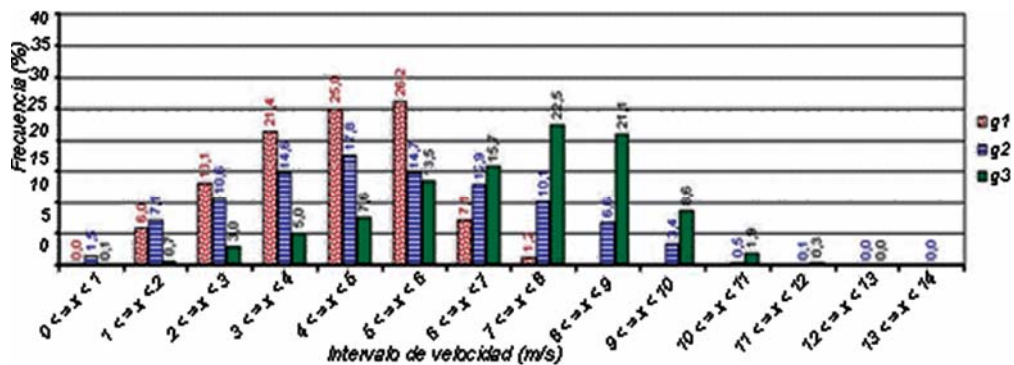


Fig. 9. Distribución de la frecuencia de la velocidad del viento en el nivel de 100 m con respecto a los grupos analizados.

Con una moderada influencia de la brisa de primera especie, se registraron valores puntuales entre 10 y 14 m/s, presentándose más concentradamente por debajo de los 9 m/s, con un máximo de ocurrencia entre 4 y 5 m/s, y manteniéndose por encima de 4 m/s durante 66% del tiempo. Con fuerte influencia de la brisa de tierra de primera especie, los valores registrados no superaron los 14 m/s, con el máximo de ocurrencia comprendido entre 7 y 8

m/s, lográndose mantener los valores por encima de 4 m/s durante 91% del tiempo. Al encontrarse el vector de la brisa de tierra en el mismo sentido que el flujo sinóptico, esto conlleva a que dicho flujo se vea favorecido por la brisa, obteniéndose valores más elevados que los previstos.

En la distribución de la frecuencia por rumbos para cada grupo (Fig. 10), se puede observar claramente cómo varía la dirección del viento en dependencia del tipo de influencia ejercida por la brisa de primera especie. El único día en que la influencia de esta brisa fue débil, el gradiente de presión era tan débil que la dirección del viento dependió totalmente de los efectos locales (g1). Al presentarse una influencia de este tipo de brisa, la dirección del viento varió entre los cuadrantes primero y segundo (g2 y g3), siendo mucho más pronunciada la frecuencia del primer cuadrante en los casos de fuerte influencia.

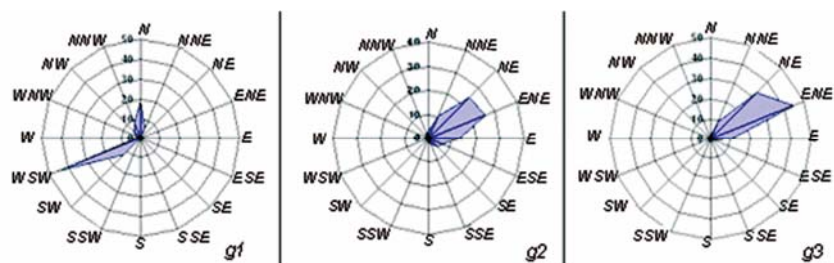


Fig. 10. Distribución de la frecuencia por rumbos en función del tipo de influencia de la brisa de tierra de primera especie.

Al igual que en los casos anteriores, se calculó la densidad de potencia media para cada uno de estos grupos (Tabla 2), de esta forma se obtuvo que la mayor densidad de potencia media (239 W/m^2) se alcanzó durante los días en que hubo fuerte influencia de la brisa de primera especie. Sin embargo, durante los días en que hubo influencia moderada de ese proceso, los rendimientos eólicos disminuyeron casi el doble, obteniéndose una densidad de potencia media de 121 W/m^2 , mientras que en el día con débil influencia de la brisa de primera especie los resultados fueron bajos, con valores de 63 W/m^2 . Estas circunstancias están originadas debido a todo lo explicado anteriormente.

Tabla 2. Densidad de potencia media obtenida para cada grupo, en W/m^2

g1	g2	g3
63	121	239

2. Análisis de la brisa de mar

De los 184 días analizados, 70% de ellos (129 días) se presentaron con flujo sinóptico saliendo de la costa. De acuerdo a la orientación que tiene la costa de El Brinco (WNW-ESE) con el mar hacia el SSW, para que se produzca este tipo de flujo, las componentes del viento deben de estar del NW al E. Con flujo entrando a la costa se presentó 19% de los días (35 días), donde las componentes del viento estuvieron entre el SE y el W. Mientras que en 11% (20 días) de los días, el flujo estuvo relativamente paralelo a la costa, con sus componentes del ESE o del WNW.

En el presente epígrafe, el orden de análisis varía con respecto al anterior, debido a que en presencia de la brisa de mar, la brisa de segunda especie se origina con un flujo sinóptico saliendo de la costa; por tal motivo, se decidió establecer el orden de análisis siguiente: Primero, los casos donde el flujo sinóptico estuvo saliendo de la costa, posteriormente con flujo paralelo, y por último, cuando el flujo estuvo entrando a la costa. Además, se mantuvo el mismo criterio empleado para dividir la muestra con respecto al tipo de influencia de la brisa de tierra para cada tipo de flujo sinóptico, con la diferencia de que, para estos casos, se analizó la brisa de mar.

Flujo saliendo de la costa

De los 129 días estudiados con flujo saliente, se observaron 17 días con las características de débil influencia de la brisa de mar de segunda especie (G1), distribuidos en mayo, agosto, septiembre, y un máximo de ocurrencia en octubre (Fig. 11). Con una influencia moderada de esta misma brisa (G2), se encontraron 49 días distribuidos durante todos los meses, con un máximo de ocurrencia en septiembre. Sin embargo, el mayor número de días (63) estuvo relacionado con una fuerte influencia de la brisa de mar de segunda especie (G3). Estas condiciones estuvieron presentes durante todo el período, con un máximo de ocurrencia en mayo.

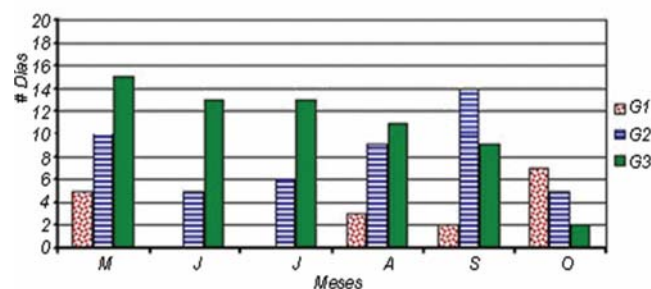


Fig. 11. Distribución de los grupos por meses.

Al analizar el perfil vertical del viento (Fig. 12) para cada nivel de influencia de la brisa de mar de segunda especie (*Fbm*), se pudo observar una diferencia considerable entre los días con débil influencia y aquellos en que se presentó alguna influencia. Durante los días donde la influencia del *Fbm* fue débil, el perfil muestra una marcada cizalladura vertical entre los niveles bajos y altos. Sin embargo, durante los días con alguna influencia de la brisa, la cizalladura no es tan pronunciada, mostrando una mayor diferencia entre los niveles de 10 y 30 m, disminuyendo con la altura. Durante los días con moderada influencia, los promedios de velocidad en los niveles altos fueron más elevados que los días con fuerte influencia. Estas diferencias pueden estar asociadas a la cercanía de torre a la costa.

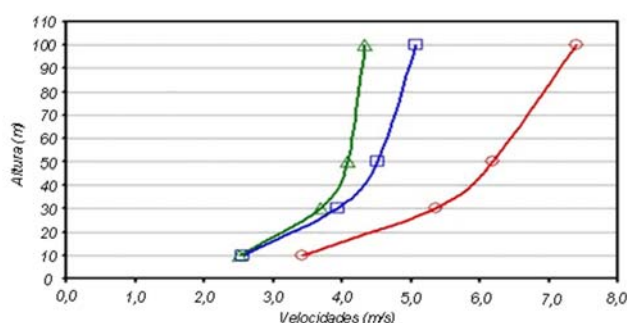


Fig. 12. Perfil vertical del viento con un flujo saliendo de la costa de El Brinco, en dependencia de la influencia de la brisa de mar de segunda especie, para los cuatro niveles de medición (10, 30, 50 y 100 m).

La distribución de la frecuencia de velocidad del viento para cada muestra (Fig. 13), mostró más claramente las diferencias expresadas anteriormente. En los casos donde la influencia del *Fbm* fue débil, llegaron a registrarse velocidades del viento en el nivel de 100 m, hasta de 13 m/s, con un máximo de ocurrencia entre 8 y 9 m/s, manteniéndose por encima de 4 m/s durante 94% del tiempo.

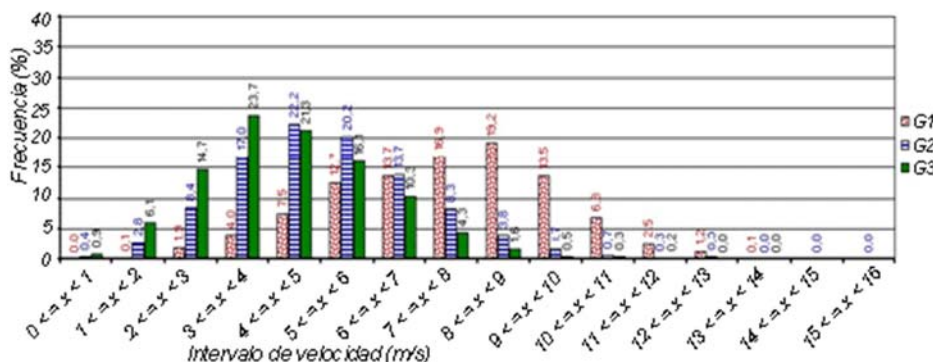


Fig. 13. Distribución de la frecuencia de la velocidad del viento en el nivel de 100 m, con respecto a los grupos analizados.

Los días en los que la influencia del *Fbm* fue moderada, llegó a registrarse un valor entre 15 y 16 m/s, pero los valores estuvieron más concentrados por debajo de los 8 m/s, con un máximo de ocurrencia entre 4 y 5 m/s; manteniéndose los valores por encima de 4 m/s durante 72% del tiempo.

Durante los días en los cuales la influencia de esta brisa fue fuerte, se registraron valores entre 10 y 14 m/s, pero fueron muy ocasionales. Las velocidades se encontraron más concentradas por debajo de los 9 m/s, con un máximo de ocurrencia entre 3 y 4 m/s, manteniéndose los valores por encima de 4 m/s durante 55% del tiempo.

En la distribución de la frecuencia por rumbos para cada grupo (Fig. 14), se pudo observar claramente cómo varió la dirección del viento en dependencia del tipo de influencia ejercida por la brisa de mar de segunda especie. Mientras que la influencia de esta brisa fue débil, la dirección predominante del viento se concentró en el primer cuadrante. Al presentarse una influencia moderada de la brisa, la dirección del viento varió entre los cuadrantes primero y segundo, siendo mayor la frecuencia hacia el primer cuadrante. Sin embargo, cuando la brisa se mantuvo más tiempo, la mayor frecuencia de la dirección del viento fue entre los cuadrantes segundo y tercero.

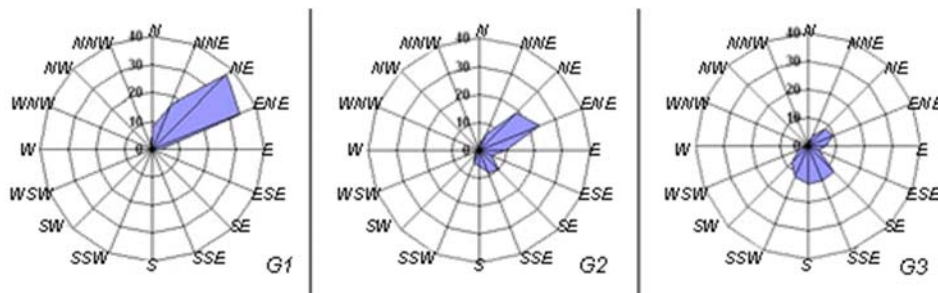


Fig. 14. Distribución de la frecuencia por rumbos en función del tipo de influencia de la brisa de mar de segunda especie.

Luego de caracterizado el efecto del *Fbm* en función del nivel de influencia, se determinó la densidad de potencia media para cada uno de los grupos (Tabla 3). La mayor densidad de potencia media (307 W/m^2) se alcanzó durante los días en que no hubo influencia de la brisa de segunda especie. Sin embargo, durante los días en que hubo alguna influencia de ese proceso, los valores estuvieron determinados por el nivel de influencia de la brisa, obteniéndose una mayor densidad de potencia media durante los días de moderada influencia con respecto a los de fuerte influencia (116 y 76 W/m^2 , respectivamente).

Tabla 3. Densidad de potencia media obtenida para cada grupo, en W/m²

G1	G2	G3
307	116	76

Flujo entrando a la costa

De los 35 días con presencia de este flujo, no se encontró ningún día con las condiciones del primer grupo (g1). Del segundo grupo (g2) se encontraron 25 días, repartidos entre junio y octubre, con un máximo de ocurrencia en octubre (Fig. 15). Se observaron 10 días con las características del tercer grupo (g3), distribuidos entre junio y septiembre, con un máximo de ocurrencia en junio. Cabe destacar que durante mayo no se produjo ningún día con flujo entrando a la costa de El Brinco.

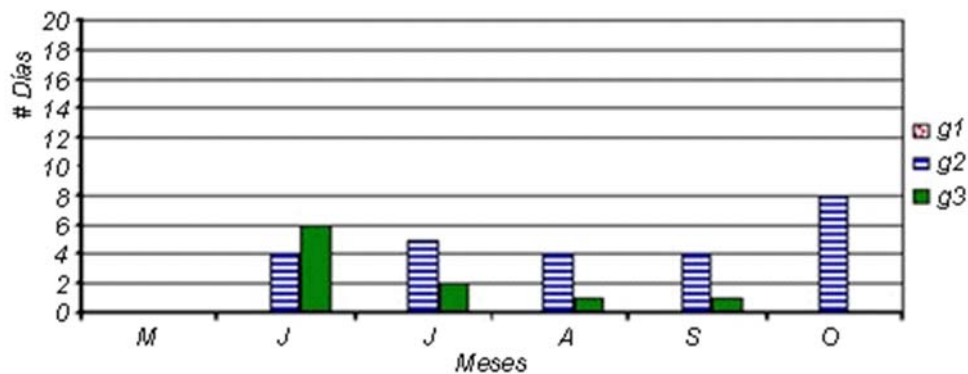


Fig. 15. Distribución de los grupos por meses.

El perfil vertical del viento para estos grupos describe una diferencia entre los promedios de velocidad del viento para cada altura de medición (Fig. 16). Durante los días en que la brisa de primera especie tuvo una fuerte influencia, el flujo sinóptico se vio favorecido por esta brisa, trayendo consigo que la cizalladura vertical del viento fuese superior con respecto a los días en que ocurrió moderada influencia.

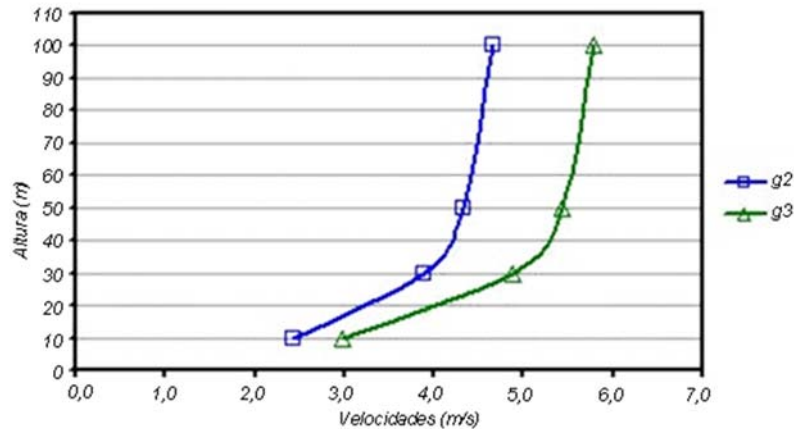


Fig. 16. Perfil vertical del viento con un flujo entrando a la costa de El Brinco, en dependencia de la influencia de la brisa de mar de primera especie, para los cuatro niveles de medición (10, 30, 50 y 100 m).

En la distribución de la frecuencia de la velocidad del viento, teniendo en cuenta los grupos anteriores (Fig. 17), se pudo observar que durante los días con moderada influencia de la brisa de primera especie, se registraron valores entre 10 y 16 m/s durante cortos intervalos de tiempo, observándose una mayor frecuencia por debajo de 8 m/s. Los máximos de ocurrencia estuvieron entre 5 y 6 m/s, manteniéndose por encima de 4 m/s durante 60% del tiempo.

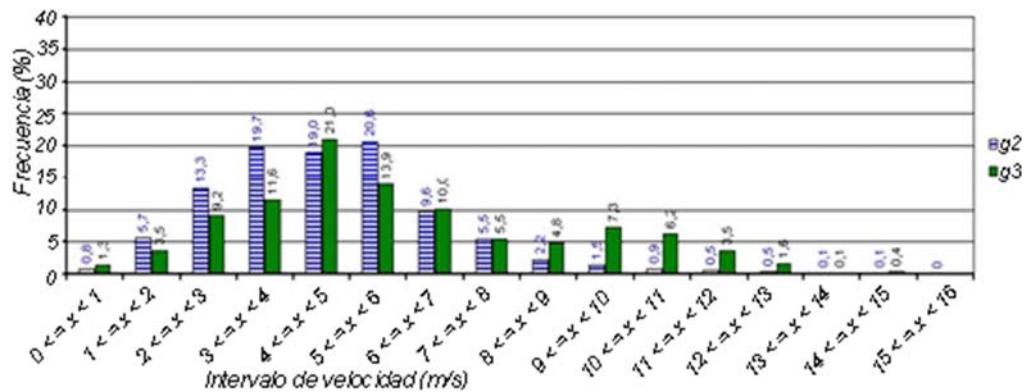


Fig. 17. Distribución de la frecuencia de la velocidad del viento en el nivel de 100 m, con respecto a los grupos analizados.

Sin embargo, con fuerte influencia de la brisa de mar de primera especie se llegaron a registrar valores hasta de 15 m/s. El máximo de ocurrencia estuvo comprendido entre 4 y 5 m/s, manteniéndose los valores por encima de 4 m/s durante 74% del tiempo.

Con la distribución de la frecuencia por rumbos para cada grupo (Fig. 18), se puede observar claramente cómo varía la dirección del viento en dependencia del tipo de influencia ejercida por la brisa de primera especie. Al presentarse una influencia moderada de este tipo de brisa, la dirección del viento varía entre los cuadrantes primero, segundo y tercero, y mientras que la influencia de esta brisa es fuerte, la dirección predominante del viento se encuentra entre los cuadrantes segundo y tercero.

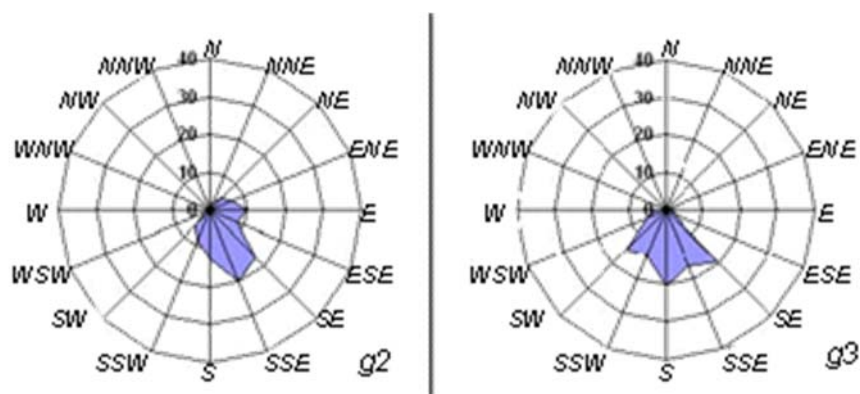


Fig. 18. Distribución de la frecuencia por rumbos en función del tipo de influencia de la brisa de mar de primera especie.

Con este flujo se obtuvo que la mayor densidad de potencia media (219 W/m^2) fuera alcanzada durante los días en que hubo una influencia fuerte de la brisa de primera especie. Sin embargo, durante los días en que la influencia fue moderada, los rendimientos eólicos disminuyeron, obteniéndose una densidad de potencia media de 103 W/m^2 (Tabla 4).

Tabla 4. Densidad de potencia media obtenida para cada grupo, en W/m^2

g2	g3
103	219

Conclusiones y recomendaciones

Teniendo en cuenta los tres grupos analizados según el nivel de influencia de la brisa:

- En presencia de la brisa de segunda especie, tanto en el terral como en la brisa de mar, la mayor densidad de potencia se alcanzó durante los días en que la influencia de dicha brisa es débil, manteniéndose la persistencia de los vientos por encima de 4 m/s durante más de 85% del día. Bajo estas condiciones, la densidad de

potencia media promedio entre los dos regímenes que se obtuvieron, fue aproximadamente de 300 W/m².

- A pesar de que una fuerte influencia de la brisa de primera especie favorece al flujo sinóptico, ésta no superó los rendimientos obtenidos con una débil influencia de la brisa de segunda especie, pues no sobrepasó los 240 W/m², manteniéndose las velocidades del viento por encima de 4 m/s durante menos de 90% del día, bajo los dos regímenes.
- Es necesario estudiar con mayor profundidad la brisa de segunda especie, debido a que es cierto que con una débil influencia se obtiene el mayor aprovechamiento eólico en ambos regímenes, pero al aumentar la influencia de esta brisa, los rendimientos bajan considerablemente.
- El método empleado en la presente investigación constituye una nueva metodología para evaluar la influencia de la circulación local de las brisas para zonas costeras, y su aplicación contribuye a una mejor evaluación del recurso eólico.

Agradecimientos

A los compañeros del Grupo Eólico (INSMET), especialmente a la técnica Leticia Muñiz, por toda la colaboración brindada.

Bibliografía

- BATISTA, T. L. (1984). *Algunas consideraciones sobre la zona de convergencia de brisas en el Polígono Meteorológico de Camagüey y su influencia en el comportamiento de las precipitaciones*. Oficina Territorial del Instituto de Meteorología en Camagüey y Ciego de Ávila. Academia de Ciencias de Cuba. Inédito, 8 pp.
- CARNESOLTAS, M. (1986). «La circulación local de brisa en Cuba». Tesis presentada en opción al grado de Candidato a Doctor en Ciencias. La Habana. Depositado en biblioteca. 96 pp.
- _____. (2002a). «La brisa de Mar y Tierra. Conceptos fundamentales», en *Revista Cubana de Meteorología*, 9 (1): 43-72, 2002.
- _____. (2002b). «El Frente de la Brisa de Tierra», en *Revista Cubana de Meteorología*, 9 (2): 83-89, 2002.
- CARRASCO, M., M. CARNESOLTAS Y A. ROQUE. (2007). «La circulación local de la brisa de mar y sus efectos en el aprovechamiento de la energía eólica. Casos de estudio», en *Memorias del IV Congreso de Meteorología en Cuba*. La Habana. Edición electrónica.
- CONRAD, V. (1928). *Beobachtungen übre den Seewinden einen flacha Sandstrand*. Ann. Hydrogr., Berlin, 56,1-3.

FERNÁNDEZ, A. Y A. C. PAZOS. (1998). *Pronóstico trihorario del viento en la provincia de Ciego de Ávila*. La Habana: Ed. Academia, 1998. 33 pp.

HERNÁNDEZ, S. R. Y H. ELIZARDE. (1981). *Climatología de las brisas en la costa norte de la provincia de Matanzas*. Oficina Territorial del Instituto de Meteorología en Matanzas. Academia de Ciencias de Cuba. Inédito.

KOSCHMIEDER, H. (1941). *Danziger Seewindstudien*. Forsch. Arl. Meteor. Inst. Danzig, 8, 1-44, 10, 1 39.

LECHA, E. L.; A. FERNÁNDEZ Y R. BUENO. (1979). *Distribución de la precipitación en la parte central de Cuba y su relación con el campo de viento a mesoescala y a escala sinóptica*. Oficina Territorial del Instituto de Meteorología en Villa Clara. Academia de Ciencias de Cuba. Depositado en biblioteca. 28 pp.

LECHA, E. L.; L. PAZ Y B. LAPINEL. (1994). *El clima de Cuba*. La Habana: Ed. Academia, 1994. 186 pp.

NOAA (activa en mayo de 2008). Physical Sciences Division de la NOAA/ESRL.
<http://www.cdc.noaa.gov/cdc/data.ncep.reanalysis.surface.html#temp>.

OMM. (1992). *Vocabulario Meteorológico Internacional*. OMM / No. 182, Secretaría de la OMM, Segunda edición. ISBN 92-63-02182-1.

OSORIO, M. Y J. REGO. (1980). *Estudio climático de la brisa en la estación de Casa Blanca*. La Habana: Departamento de Climatología del Instituto de Meteorología, 1980. 8 pp.

PORTELA, S. M. (2002). «Pronóstico de la ocurrencia de “brisote sucio” en Cuba», en *Revista Cubana de Meteorología*, 9 (2): 49-53, 2002.

REY, O. (1982). *Características de la brisa en la localidad de Cienfuegos y su relación con la ocurrencia de precipitaciones*. Santa Clara: Oficina Territorial del Instituto de Meteorología en Santa Clara, 1982. 10 pp.

RIVERO, V. R. (1978). *Características sinóptico-climatológicas de las provincias de Camagüey y Ciego de Ávila*. Camagüey: Oficina Territorial del Instituto de Meteorología en Camagüey, Academia de Ciencias de Cuba, 1978. 14 pp.

SAENZ, R. (1981). *Comportamiento de la brisa y su relación con la ocurrencia de las precipitaciones en la localidad de Jíbaro*. Santa Clara: Oficina Territorial del Instituto de Meteorología en Santa Clara, 1981. 14 pp.

SOLTURA, R.; A. ROQUE, I. RIVERO, A. WALLO, R. BÁEZ, R. VÁZQUEZ, R. RIVERO, M. AYALA, G. RODRÍGUEZ, H. CARRASCO, A. CURBELO, A. GONZÁLEZ, O. HERRERA, G. MARTÍN, J. DÍAZ Y G. HERNÁNDEZ. (2006). *Informe del Mapa de Potencial Eólico de Cuba*. Informe Científico-Técnico del Instituto de Meteorología. La Habana: 2006.

Sobreconsumos de combustible por roce de las llamas sobre las paredes refractarias de los quemadores industriales

Overconsumption of fuel by flames rubbing on the firebrick walls of industrial burners

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

Resumen

En el trabajo se presenta el fundamento teórico del sobreconsumo de combustible cuando tienen lugar roces del aerosol con la superficie del cono refractario en los quemadores de las instalaciones energéticas. Además, se presenta el sobreconsumo en una unidad de 100 MW, tomando como línea base la eficiencia del proceso de combustión lograda para diferentes estados técnicos del sistema de combustión sin roce.

Palabras clave: Quemador industrial, eficiencia energética

Abstract

This paper presents the theoretical basis of the overconsumption of fuel due to the friction of aerosol with the surface of the firebrick cone in the burners of the energy facilities. In addition, we discuss the overconsumption that occurs in a 100 MW unit of an oil-fired power plant, taking as a baseline the efficiency of the combustion process achieved for different technical states of the combustion system without friction.

Keywords: Industrial burner, energy efficiency

Introducción

El uso de la energía del combustible fósil a partir de la termoconversión en generadores de vapor, es la forma más empleada en la actualidad para la producción de energía. En Cuba más de 78% del total de la energía se produce a partir de la combustión directa del petróleo en hornos y calderas, por lo que económicamente resulta de vital importancia eliminar todos los posibles sobreconsumos que puedan tener lugar en las instalaciones energéticas. El sobreconsumo por roce de las llamas con las bocas refractarias, es un fenómeno muy común en la industria debido a la falta de concentricidad de los elementos que conforman los quemadores y sus bocas refractarias. Por otra parte, resulta muy difícil su detección por la vía de la observación visual, por lo que se requiere de mediciones especiales que, por lo regular, tienen que realizarse desde el interior del horno.

Desarrollo

Fundamentos teóricos que caracterizan el problema

Los quemadores de torbellino lanzan la mezcla aire-combustible al interior del horno en forma de chorro giratorio, en cuyo centro aparece un espacio conocido como «zona de recirculación» (Fig. 1). En esta zona se produce un vacío que es el encargado de asegurar la estabilidad del proceso de combustión, a partir de recircular la mayor cantidad de gases incandescentes hacia el interior de la zona.

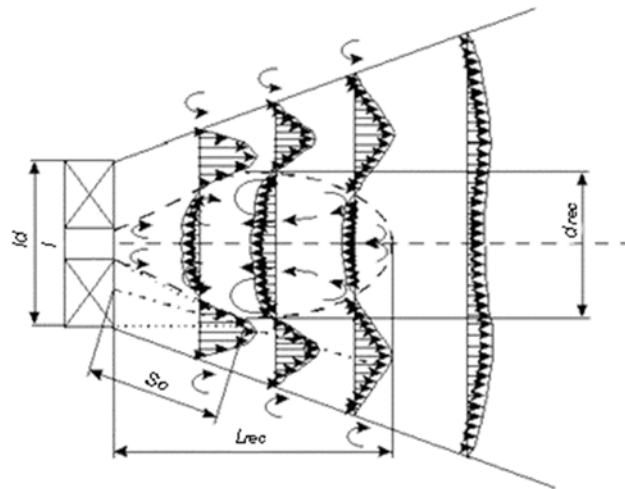


Fig. 1. Zona de recirculación

Del total del combustible que se mezcla con el aire al salir del atomizador, sólo una parte va a parar al interior de la zona de recirculación; el resto pasa a la zona periférica de la llama, que forma un cono, cuyas características dependen del diseño del quemador. En la medida en que se logre disminuir la distancia entre el cono de la llama y el cono de la boca refractaria, mejor será el mezclado con el aire, y mayor intensidad tendrá la transferencia de calor y de masa en el proceso de la reacción, lo que se traduce en eficiencia del sistema de combustión. Este acercamiento es posible hasta el límite en que se produzcan roces de las gotas del combustible con las paredes de la boca refractaria; de aquí la importancia que tiene la concentricidad de todos los elementos del quemador para lograr altos niveles de eficiencia en el proceso de combustión.

Pequeños roces de las finas gotas del combustible con la pared refractaria, provocan la unión de varias gotas, dando lugar a gotas de mayor tamaño, que de acuerdo a sus dimensiones, en el mejor de los casos, pueden continuar su vuelo dentro de la corriente de gases calientes, quemarse una

parte y otra convertirse en inquemados, de los cuales una parte se deposita sobre la superficie de los tubos, afectando la transferencia de calor. También se da el caso de que, por el tamaño que adquieren algunas gotas, éstas pueden caer al piso del horno y rápidamente convertirse en escoria, lo que trae consigo afectaciones en la transferencia de calor y, por consiguiente, disminuciones en la disponibilidad de la instalación. Cuando el roce del chorro con los bordes del cono refractario es excesivo, la formación de escoria tiene lugar sobre la propia superficie del cono, lo que crea una deposición cuyo crecimiento puede alcanzar grandes dimensiones, provocando averías, paradas de planta, etcétera.

Como se conoce, para quemar el combustible líquido es necesario evaporarlo (la temperatura de inflamación de los hidrocarburos siempre es mayor que la de ebullición), y esto se logra propiciando una alta temperatura alrededor de la gota de combustible. Como el proceso de combustión que tiene lugar es similar al de un gas (es decir, ocurre en la zona difusiva), entonces la velocidad de la reacción estará limitada por la difusión del oxígeno.

La cantidad de oxígeno que llega a la zona de combustión a través de la superficie de la gota esférica, es proporcional al cuadrado de su diámetro. Por eso, para lograr la mayor entrega de oxígeno al combustible caliente, se necesita elevar la superficie de evaporación de las gotas, lo cual se alcanza reduciendo al máximo las dimensiones de las gotas que conforman la niebla de combustible.

Por ejemplo: Si una gota de 2 mm de diámetro se divide en gotas de 0,2 mm de diámetro, se formarán mil gotas con una superficie total que será diez veces superior a la gota que le dio origen.

Por todo lo anterior, queda claro que el roce del chorro con la superficie del cono refractario provoca bajo aprovechamiento de la energía del combustible, debido a los significativos incrementos que alcanzan las pérdidas por incombustión química y mecánica en los quemadores donde tiene lugar este fenómeno. En quemadores que utilizan difusores cónicos ranurados (*bluff body*), cuando presentan problemas con la concentricidad, se puede crear falta de uniformidad en la configuración del flujo de salida del aire del quemador (Fig. 2), y por consiguiente, diferencias en la concentración de oxígeno de una parte de la llama con respecto a la otra; es decir, en la zona de mayor flujo disminuye la velocidad y se produce una disminución de la intensidad de la turbulencia. Por el contrario, en la zona opuesta, donde disminuye el flujo se intensifica el régimen turbulento; y esta nueva organización del proceso provoca una configuración asimétrica de la llama con afectaciones significativas en el proceso de mezclado y, por tanto, en la eficiencia de la combustión. Por eso reviste gran importancia,

en las instalaciones de quemadores, tener un control estricto de la concentricidad de sus elementos internos, lograr el alineamiento de las bocas refractarias y garantizar el paralelismo o la inclinación que establece el proyecto, entre las paredes exteriores e interiores donde van instalados los quemadores.

En las calderas industriales frecuentemente se presentan estas dificultades debido a deficiencias en el montaje, en primer lugar, por no existir normas que obliguen al cumplimiento riguroso de los requerimientos del proyecto; y por otra parte, por no disponer de un equipo que logre medir y ajustar con precisión todas las magnitudes que intervienen en la instalación de un quemador. Además, durante su explotación las calderas sufren desplazamientos en las paredes que afectan en ocasiones las posiciones relativas de los elementos que conforman los quemadores.

La pérdida q_3 en un proceso de combustión de un hidrocarburo líquido, está en el rango de 0 a 0,5%. La pérdida de calor por incombustión química depende fundamentalmente del coeficiente de exceso de aire, y de la carga del generador de vapor. En condiciones ideales, cuando se logra un mezclado perfecto del combustible con el aire (Fig. 3), q_3 tiene sentido solamente cuando $\alpha < 1$, y se incrementará de forma proporcional con el defecto de aire

$(1 - \alpha)$.

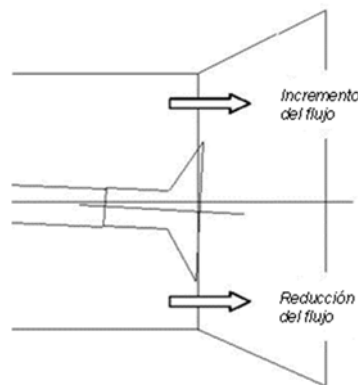


Fig. 2. Diferencias en el flujo de salida del aire en un quemador por falta de concentración del difusor.

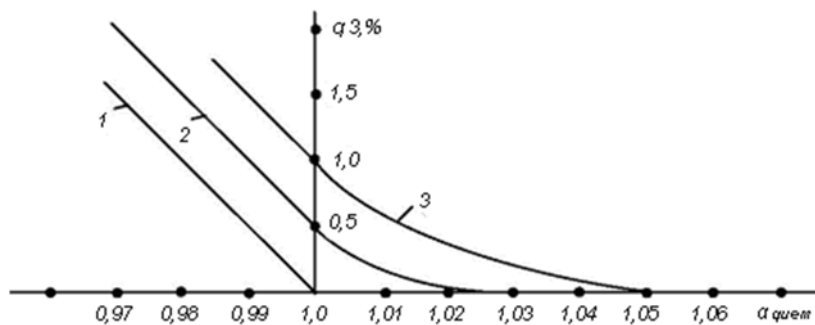


Fig. 3. Pérdida de calor por incombustión química del combustible.

α_{quem} : Exceso de aire en el quemador.

En condiciones reales (2) para carga nominal, la presencia de $q_3 \neq 0$, para $\alpha = 1$, se debe a que no se logra mezclar todo el combustible con el aire. Al coeficiente de exceso de aire, donde se logra que en condiciones reales $q_3 = 0$, se le denomina crítico ($\alpha_{crit.}$). Normalmente las instalaciones de quemadores se caracterizan porque logran condiciones aerodinámicas de $\alpha_{crit.} = 1,02-1,03$. Cuando el generador de vapor trabaja a bajas cargas (3), disminuye la velocidad de salida del combustible y del aire en el quemador, disminuyendo por consiguiente la energía del mezclado de ambas corrientes; además, disminuye también la temperatura de la zona de combustión, lo que da lugar a un crecimiento del valor de q_3 para los mismos valores de exceso de aire.

Los roces de los chorros de combustible sobre los conos refractarios, de igual forma se traducen en afectaciones del proceso de obtención de la mezcla aire-combustible, elevando el valor de la pérdida q_3 para igual valor de α , que puede ser mejorado en alguna medida elevando el exceso de aire en los quemadores, con su correspondiente influencia negativa en el valor de la pérdida térmica por los gases de salida (q_2). Por otra parte, cuando tiene lugar el roce, se producen gotas grandes, que algunas por su tamaño caen y pasan a formar parte de la escoria; y otras que, en forma de partículas sólidas incandescentes, son arrastradas por los gases o se depositan en los conductos (pérdidas térmicas por incombustión mecánica q_4). Por lo engorroso del estudio de estas pérdidas, en el trabajo se hace el análisis basado solamente en el incremento de q_3 .

Para lograr el funcionamiento eficiente de un quemador de torbellino, se establecen ajustes basados en las posiciones relativas de las cañas que lanzan el combustible, los difusores de aire y las bocas refractarias. Cuando estos elementos son ubicados en las posiciones recomendadas, las llamas logran pasar a una distancia mínima de las bocas refractarias, de esa forma todo el aire que sale por la boca participa en el proceso de formación de la

mezcla y posteriormente en el proceso de combustión. Por eso, cuando en el montaje no se logra la concentricidad requerida, aun con pequeñas desviaciones en el centraje del quemador, tienen lugar grandes roces de los chorros del combustible con el refractario. En este caso, si no se tiene en cuenta el valor de la pérdidas térmicas mecánicas, la eficiencia del proceso de combustión estará en función de las pérdidas por incombustión química q_3 ($\eta_c = 100 - q_3$), que según la literatura especializada su comportamiento dentro de la boca refractaria es como aparece en la mitad superior de la figura 4.

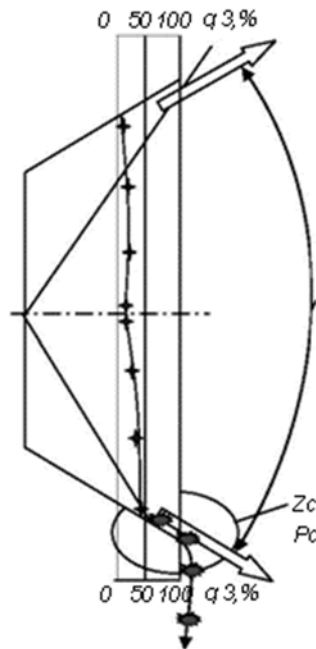


Fig. 4. Comportamiento de la pérdida q_3 dentro de una boca refractaria cuando tienen lugar roces del chorro de combustible con la superficie de la misma.

Cuando el chorro de combustible choca con la boca refractaria, se incrementa el valor de q_3 en la zona afectada (mitad inferior de la figura 4), lo que afecta el valor medio de estas pérdidas y, por consiguiente, la eficiencia del proceso de combustión en el quemador.

Según estudios realizados, el incremento del valor de q_3 debido al roce, y con respecto al nivel de eficiencia que alcanza el proceso de combustión en un quemador adecuadamente centrado, está en el orden de 1 a 5%. En la figura 5 se presenta la disminución que experimenta la eficiencia del proceso de combustión en un quemador que, de acuerdo a su estado técnico inicial, pueda lograr diferentes niveles de eficiencia (cuando todos sus elementos están concéntricos), y de pronto comienzan a aparecer roces del combustible con el refractario.

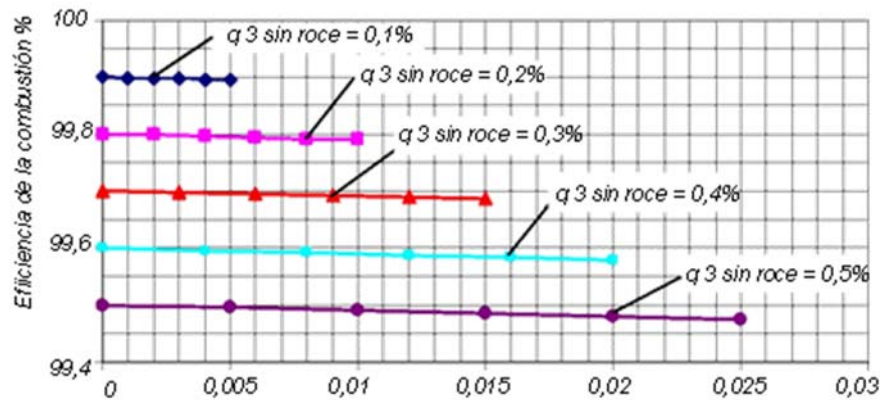


Fig. 5. Incremento del valor de la pérdida q_3 debido al roce (entre 1 y 5%) referido al valor de las pérdidas sin roce, para diferentes niveles de la eficiencia del proceso de combustión.

En la figura 6 se presenta un análisis del sobreconsumo que tiene lugar en una unidad de 100 MW (suponiendo un proceso de combustión ideal, cuyas pérdidas estén entre 0,1 y 0,5%), en la cual los quemadores presentan incrementos de q_3 (de 1 a 5%) por roces de los chorros de combustible con las bocas refractarias para diferentes estados técnicos de las instalaciones de quemadores. Como se puede observar, disminuciones al parecer insignificantes de forma sostenida en la eficiencia del proceso, pueden provocar altos niveles de sobreconsumos de combustible en una unidad de 100 MW, que pueden superar las 40 toneladas por año.

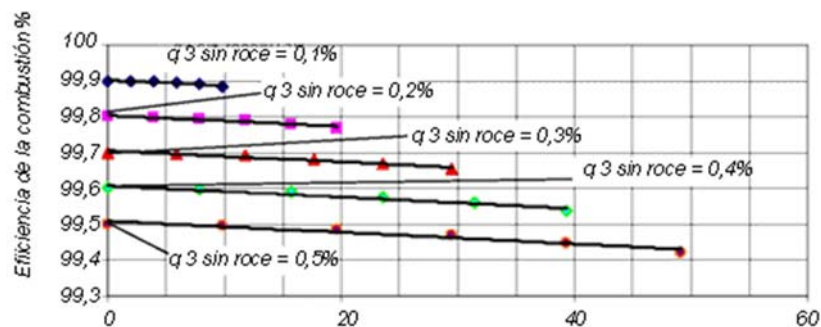


Fig. 6. Sobreconsumos de combustible en una unidad de 100 MW debido a la disminución de la eficiencia por la presencia de roces de los chorros de combustible con las bocas refractarias.

Conclusiones

1. Los pequeños incrementos del valor de las pérdidas por incombustión química (q_3), provocados por el roce de las llamas con las bocas refractarias, influyen significativamente en el

- sobreconsumo de combustible en las instalaciones energéticas, sobre todo en los grandes consumidores.
2. El sobreconsumo se incrementa cuando disminuye el nivel de eficiencia del proceso de combustión sin roce, para el mismo incremento del valor de q_3 .
 3. La configuración asimétrica de las llamas debido a la falta de concetricidad de los elementos internos de los quemadores, afecta el proceso de mezclado y por consiguiente, la eficiencia de la combustión.

Bibliografía

- CHENG, R. K. (2009). «Turbulent Combustion Properties of Premixed Syngases». Comb. Sci. Tech., 2009. In preess.
- CHENG, R. K. Y D. LITTLEJOHN. (2008). «Effects of Combustor Geometry on the Flowfields and Flame Properties of a Low-Swirl Injector», in Turbo Expo 2008. Berlin, Germany: ASME GT2008.
- REZNIKOV, M. L. Y M. LIPOV. (1987). *Instalaciones de calderas de las centrales eléctricas*. Moscú: Ed. Energía, 1987. 282 pp.
- RODRÍGUEZ ARIAS, ABELARDO D. (2007). *Tecnología para el centraje y alineamiento de quemadores en centrales termoeléctricas*. Informe técnico. Laboratorio de Combustión, INEL-UNE, 2007.
- RODRÍGUEZ ARIAS, ABELARDO D. Y LIZ B. ROSABAL PONCE. (2001). *Estudio experimental sobre el funcionamiento del quemador France Thermique en su integración al horno de la caldera rusa BKZ-340-140/29M*. Cienfuegos: Laboratorio de Combustión, 2001.
- RODRÍGUEZ, A. D.; LIZ B. ROSABAL PONCE Y PEDRO B. MARTÍNEZ DE VILLIERS. *Teoría y práctica de los procesos de combustión. Combustibles sólidos*.
- SHEPHERD, I. G. Y R. K. CHENG. (2001). «The Burning Rate of Premixed Flames in Moderate and Intense Turbulence», en *Combustion and Flame*, 127 (3): 2066-2075, 2001.
- URBAN, D. L. Y F. L. DRYER. (1990). «New Results on Coke Formation in the Combustion of Heavy-Fuel Droplets», Twenty-Third Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute, Pittsburgh, PA, pp. 1437-1443, 1990.

Obtención de biodiésel a partir de un residuo de la industria azucarera

Obtaining biodiesel from a residue of the sugar industry

Por Reinier Feyt y Gretel Villanueva*

* Departamento de Ingeniería Química, Facultad
de Química y Farmacia, Universidad Central de Las Villas
Marta Abreu (UCLV), Villa Clara, Cuba.
e-mail: reinierfl@uclv.edu.cu

Resumen

El trabajo está encaminado a la producción de un biocombustible renovable (biodiésel), partiendo del aceite presente en un residuo de la industria azucarera: la cachaza. Para la extracción del aceite se emplea nafta comercial (10,04 kg nafta/kg cachaza), y en la reacción de transesterificación para la obtención de etilésteres (biodiésel), etanol extrafino (3,5 y 15 moles etanol/mol aceite) y NaOH (1% peso del aceite) como catalizador de la reacción. Se valoró la posibilidad de realizar la extracción con solvente en dos etapas con corrientes cruzadas, resultando un aumento de la producción de aceite y de los rendimientos, por litro de solvente usado. Se determinó la metodología para llevar a cabo la reacción de transesterificación, usando un reactor discontinuo con agitación de 500 mL. Además de la obtención de biodiésel, como coproducto se obtienen alcoholes de alto peso molecular. La conversión del aceite resultó aceptable (73%), y la diferencia con los valores reportados se debe probablemente a la presencia de agua en el etanol. Para evaluar la posibilidad del diseño de una planta demostrativa para la producción de biodiésel, se llevó a cabo la simulación del proceso completo utilizando el simulador profesional Hysys 3.2, empleando para ello los resultados obtenidos en el laboratorio.

Palabras clave: Biodiésel, cachaza, transesterificación

Abstract

The work is aimed at the production of a renewable biofuel (biodiesel), based on the oil present in a residue of the sugar industry: the cachaza. For the extraction of the oil, commercial naphtha (10.04 kg naphtha/kg cachaza) is used, and in the transesterification reaction for obtaining ethyl esters (biodiesel), extrafine ethanol (3.5 and 15 mol ethanol/mol oil) and NaOH (1% weight of the oil) as catalyst of the reaction. The possibility of carrying out solvent extraction in two stages with crossed currents was evaluated, resulting in an increase in oil production and yields, per liter of solvent used. It was determined the methodology for carrying out the transesterification reaction, using a batch reactor with stirring of 500 mL. In addition to

obtaining biodiesel, high-molecular-weight alcohols are obtained as a by-product. The conversion of the oil was acceptable (73%), and the difference with the reported values is probably due to the presence of water in the ethanol. To evaluate the possibility of designing a demonstration plant for the production of biodiesel, the simulation of the entire process was carried out using the professional simulator Hysys 3.2, using the results obtained in the laboratory.

Keywords: Biodiesel, cachaza, transesterificación

Introducción

El biodiésel es un producto que ha tomado relevancia a nivel internacional a partir de la crisis experimentada por los combustibles fósiles, debido a los problemas ambientales que traen consigo, su escasez y creciente precio en el mercado. Este combustible alternativo, desde sus inicios y cada vez con mayor fuerza, ha despertado fuertes polémicas en todo el mundo, fundamentalmente en relación con las materias primas empleadas para su producción, algunas desventajas del proceso productivo y ciertos inconvenientes en el funcionamiento del motor diésel. Se han estudiado diversas fuentes para la obtención del biodiésel, la mayoría de las cuales atentan de una forma u otra contra el desarrollo alimentario de los países, principalmente los menos desarrollados, que dependen en gran medida de la agricultura: se disparan los precios de los granos y semillas, y se elevan de manera significativa los costos de producción de los alimentos. Esta es la esencia fundamental de la crítica de los detractores de este combustible.

Ante esta situación, ha habido una ligera tendencia a la búsqueda de aceites provenientes de materias primas alternativas a los granos comestibles, entre las que se encuentran el uso de aceites de freír usados, algunas grasas animales, el cultivo de plantas resistentes a condiciones extremas de clima y suelo, de manera que no se afecte la disponibilidad de las tierras para la siembra de cultivos destinados a los alimentos. La búsqueda de esos sustratos más baratos requiere complejos procesos de purificación para disminuir el contenido de humedad y de acidez, lo que hace que el proceso sea muchas veces no rentable [Wenzel, Tait y Kroumov, 2006].

Es por ello que desde hace dos años, en la Facultad de Química-Farmacia de la Universidad Central de Las Villas (UCLV), se desarrolla un proyecto de aprovechamiento de residuales sólidos de la industria azucarera, que incluye la posibilidad de obtención de biodiésel y coproductos a partir del aceite de cachaza [Ley, 2006]. Se utiliza un residuo de la industria azucarera para la obtención de un combustible renovable, con muchas potencialidades de ser aprovechado en la reducción del combustible

consumido por los propios transportes de la empresa azucarera donde se inserte una planta para su producción, teniendo un elevado impacto económico, ambiental y, por supuesto, social.

El aceite de la caña es una fuente de ácidos grasos que, hasta ahora, no ha sido objeto de atención a nivel mundial para la producción de este combustible renovable. Los ésteres de ácidos grasos presentes pueden ser transformados mediante una reacción química a alquil-ésteres (biodiésel). La cantidad de aceite presente en la cachaza oscila alrededor de 12% del peso [Vera, 1999; Villanueva, 2000] y presenta algunas ventajas para su empleo como sustrato, pues su costo es muy bajo debido a que proviene de un residuo agroindustrial, tiene bajo contenido de ácidos grasos libres que pueden perjudicar la reacción y presenta una gran disponibilidad en nuestro país. Una de las limitaciones en la producción de biodiésel está dada por los altos precios de los aceites convencionales y por las etapas de purificación de los productos secundarios. La utilización del aceite de cachaza como fuente para la producción de biodiésel, es una forma de obtener un biocombustible sin utilizar como materia prima fuentes de alimentos, ni emplear tierras para el cultivo de materias primas con ese fin. El objetivo general del trabajo es obtener la metodología para la obtención de biodiésel a partir de aceite de cachaza, y etanol extrafino a nivel de laboratorio, y valorar la posibilidad del diseño de una planta demostrativa basándonos en los resultados obtenidos en el laboratorio.

Fundamentación teórica

Según la definición de American Standards for Testing and Materials (ASTM), el concepto de biodiésel es: Ésteres monoalquílicos de ácidos grasos de cadena larga derivados de lípidos renovables, tales como aceites vegetales, y que se emplea en los motores de ignición por compresión (motores diésel) o en calderas [Martínez, 2003]. Otros autores lo definen como un combustible alternativo producido a partir de materias de base renovable, como los aceites vegetales; es un combustible líquido no contaminante y biodegradable. Químicamente son ésteres de metilo o etilo, con cadenas largas de ácidos grasos [Knothe, Dunn y Bagby, 2002] (Fig. 1). El biodiésel se produce a partir de los aceites vegetales y animales que se convierten en ésteres de etilo, a través de una reacción química denominada transesterificación, usando etanol o metanol en presencia de un catalizador básico o ácido. La transesterificación (o alcoholisis) de un éster es un intercambio parcial de grupos mediante una reacción reversible catalizada por una pequeña cantidad de etóxido de sodio, representado por el equilibrio de la ecuación de la figura 2 [Brewster y McEwen, 1963].

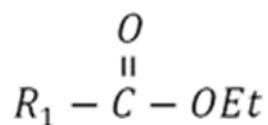


Fig. 1. Fórmula general del biodiésel.

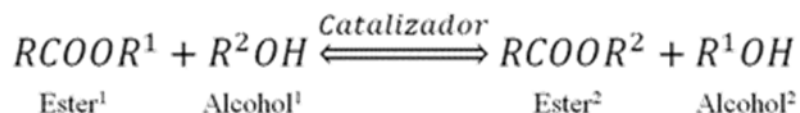


Fig. 2. Transesterificación de un éster.

La reacción se lleva a cabo entre 25 y 80 °C, con agitación mecánica, y empleando un exceso de alcohol para que la reacción se verifique en el sentido de la formación de productos, aumentando la conversión alcanzada en el equilibrio [Fukuda, Kondo y Noda, 2001; Brewster y McEwen, 1963; Canoira, Alcántara y Carrasco, 2006]. Existen diferentes vías de producción con diferentes materias primas y catalizadores, como enzimas, resinas de intercambio iónico, catalizadores sólidos y fluidos supercríticos [Marchetti, Miguel y Errazum, 2007].

Además del biodiésel (alquil-ésteres), en la reacción de transesterificación se obtiene un producto de alto valor agregado: la glicerina o los alcoholes de alto peso molecular (AAPM), de acuerdo a la materia prima empleada; éstos pueden ser comercializados, ayudando a la factibilidad económica de la planta. En nuestro caso, como se emplea una materia prima que está constituida por ésteres de ácidos grasos de cadena larga y alcoholes de alto peso molecular, se obtiene alcoholes de alto peso molecular, como coproducto de la reacción. Al contrario de los aceites vegetales y grasas animales, el aceite de cachaza no es un triglicérido, sino una mezcla de ésteres (97-98%) de cadena larga, de ácidos grasos y alcoholes grasos, donde ambos grupos son de elevado peso molecular (Fig. 3). La hidrólisis de este tipo de aceite produce un ácido y un alcohol, cada uno de los cuales habitualmente contiene de 16 a 30 átomos de carbono y en algunos casos más [Brewster y McEwen, 1963].

Muchos autores han realizado estudios sobre la composición química del aceite de cachaza: Torres [1993], coincidiendo con Evora [1987] y Guerrero [1998], reporta que contiene 35,5% de ácidos y 60% de materia no saponificable (alcoholes). Los ácidos que mayormente se encuentran en este aceite son: el linoléico (38,1%), el palmítico (29,2%) y el oléico (20%), entre otros; y los alcoholes de elevado peso molecular son: 1-octacosanol, triacontanol (alcohol melísico), eicosanol, tertracosanol y hexacosanol,

$$\begin{array}{c} \text{CH}_3(\text{CH}_2)_7 \diagdown \quad \diagup \quad (\text{CH}_2)_m - \overset{\text{O}}{\parallel} \text{C} - \text{O} - (\text{CH}_2)_n \diagdown \quad \diagup \quad (\text{CH}_2)_7\text{CH}_3 \\ \text{C} = \text{C} \quad \quad \quad \text{C} = \text{C} \\ \text{H} \quad \quad \quad \text{H} \end{array}$$

$m = 7, 9, 11, 13$ $n = 8, 10, 12, 14$

$$C_{17}H_{32}-\overset{\overset{O}{\parallel}}{C}-O-C_{28}H_{58}+C_2H_6O \xleftarrow{C_2H_5ONa} C_{17}H_{32}-\overset{\overset{O}{\parallel}}{C}-O-C_2H_5+C_{28}H_{57}OH \quad (2)$$

La reacción empleando etanol como agente transesterificante ha sido poco estudiada por los investigadores, que se han basado en la reacción con metanol, debido fundamentalmente a que es más conocida. El metanol es altamente tóxico, puede ser absorbido fácilmente por la piel y es 100% miscible en agua [Bouaid, Martinez y Aracil, 2007]. El uso de etanol para la reacción de transesterificación es de interés no sólo por la utilización de otro recurso renovable, sino por las diferentes propiedades que le confiere al biodiésel [Meher, Vidya y Naik, 2004]; además, el mayor número de átomos de carbono de la molécula de etanol, aumenta ligeramente el contenido calórico y el número de cetano del biodiésel; aunque uno de los problemas con el etanol es que para lograr un tiempo de reacción rápido y altas conversiones, se requiere alta pureza del mismo, pues la presencia de agua en la reacción ocasiona problemas secundarios [Wenzel, Tait y Kroumov, 2006].

35

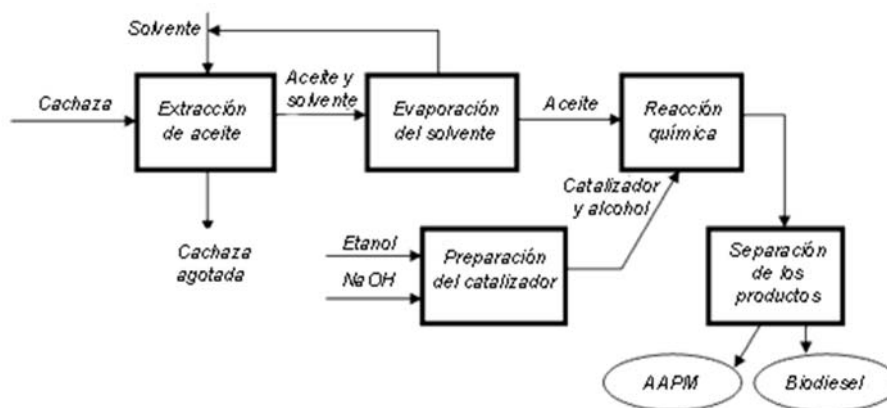


Fig. 5. Diagrama de bloques del proceso.

Métodos y condiciones experimentales

El trabajo en el laboratorio se basó en cinco etapas fundamentales:

- Determinación de las propiedades físicas de la cachaza.
- Extracción del aceite con solvente orgánico.
- Evaporación del solvente.
- Reacción de transesterificación.
- Separación de los productos.

La humedad de la cachaza se determinó por el método de secado en una estufa, hasta que el peso de las muestras se mantiene constante. Se determinó, además, la densidad aparente de la cachaza, así como la curva de humedad vs. densidad, por métodos simples convencionales. Estas propiedades se determinaron para cálculos posteriores.

La extracción del aceite se realizó mediante un proceso de extracción sólido-líquido (lixiviación), empleando como solvente orgánico la nafta comercial. Se realizó la extracción en una etapa y posteriormente en dos etapas en corrientes cruzadas con flujo fresco de cachaza en cada una. La extracción en una etapa se realizó en un recipiente enchaquetado de 5 L con control de temperatura, mezclando 180 g de cachaza con 3,75 L de nafta. Con el objetivo de demostrar la capacidad extractiva del solvente y de concentrar éste, en los dos últimos experimentos se realizó el proceso en dos etapas, logrando con esto enriquecer más la nafta antes de entrar en la etapa de evaporación del solvente. En este caso se trabajó con 360 g de cachaza en cada etapa y 7,50 L de nafta, para lo cual se empleó un recipiente enchaquetado de 10 L. Los parámetros óptimos para esta etapa ya han sido encontrados por varios autores [Villanueva, 2000]. Los valores empleados fueron: temperatura de 75 °C, 1 atm, relación de alimentación

20,83 L de nafta por kg de cachaza, tiempo de operación 1 h, y velocidad de agitación de 700 rpm.

Luego de la etapa de extracción, se realizó una etapa de separación del solvente mediante evaporación al vacío. Para lograr esto se empleó un roto-evaporador al vacío, donde la temperatura máxima alcanzada fue de 65 °C; debido a que la nafta tiene una temperatura de ebullición entre 138-178 °C, y al ser el aceite de cachaza un compuesto orgánico propenso a la descomposición térmica, al deterioro químico y a las consiguientes pérdidas de sus propiedades, no es posible realizar un proceso de evaporación a una temperatura mayor de 90-95 °C, por lo que se empleó este sistema de vacío, para separar completamente el aceite del solvente.

Para la reacción de transesterificación se empleó un reactor agitado discontinuo con control de temperatura. Los reactivos empleados fueron: etanol extrafino (96 °C), aceite de cachaza y etóxido de sodio como catalizador de la reacción. Para la preparación del catalizador se empleó NaOH anhidro (99% pureza) y etanol extrafino, en una proporción 0,0156 g de aceite por mL de etanol; la cantidad empleada del catalizador en la reacción fue de 3 mL de etóxido por g de aceite. La reacción se llevó a cabo en las siguientes condiciones: temperatura de 70 °C, 1 atm, tiempo de reacción 4 h, velocidad de agitación 200 rpm, las relaciones de alimentación del etanol y el aceite en base mol fueron 3,5 y 15 mol de etanol por mol aceite; esta última buscando aumentar la conversión en el equilibrio con un exceso superior de etanol. Estos parámetros de reacción fueron seleccionados en base a trabajos publicados en revistas relativas al estudio de la reacción de obtención de biodiésel [Canoira, Alcántara y Carrasco, 2006; Marchetti, Miguel y Errazu, 2007; Bouaid, Martinez y Aracil, 2007]. En total, se realizaron 4 experimentos con réplicas cada uno de ellos. Dos con una relación molar de etanol/aceite de 3,5 (experimentos 1 y 3), y los otros dos con una relación molar de 15 (experimentos 2 y 4).

Los productos de la reacción se dejan enfriar hasta una temperatura ambiente, y luego se le añade un solvente orgánico, que puede ser la nafta, para separar los alcoholes grasos obtenidos en la reacción. Posteriormente se filtran al vacío los alcoholes y se procede a un lavado de los mismos con etanol, y a otro lavado final con acetona. La fase líquida se lleva al roto-evaporador para separar los restos de etanol que no reaccionaron, y la nafta añadida para extraer los alcoholes de alto peso molecular.

Resultados y discusión

Las propiedades de la cachaza resultaron ser: humedad de 13,25%, densidad aparente de 141,92 kg/m³; se determinó la curva de humedad vs.

densidad representada por la figura 6; además, estudios de varios autores [Villanueva, 1991], arrojaron que la cantidad de aceite presente en la cachaza es 12% de base seca.

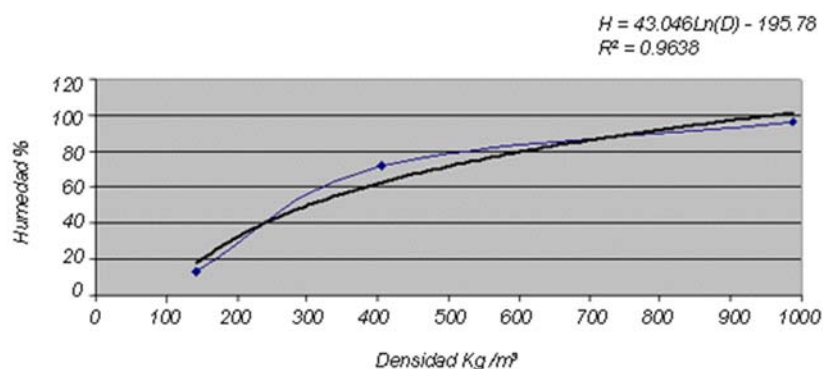


Fig. 6. Humedad vs. densidad de la cachaza.

Los resultados obtenidos en la etapa de extracción, incluyendo a la evaporación del solvente, se exponen en la tabla 1.

Tabla 1. Resultados obtenidos en la extracción del aceite

Experiencias	1	2	3	4*	5*
Cantidad de aceite extraído (g)	18,50	18,32	19,01	70,56	72,15
Rendimiento (g de aceite/g de cachaza)	0,103	0,102	0,106	0,098	0,100
Rendimiento (g de aceite/L de nafta)	4,93	4,89	5,07	9,41	9,62
Pérdidas de solvente en extractor (%)	10,40	7,73	9,33	8,00	8,67
Pérdidas de solvente en evaporador (%)	14,88	15,90	17,35	15,22	15,00
Fracción masa de soluto en nafta (%)	0,73	0,70	0,74	1,35	1,38
% de extracción	95,16	94,24	97,79	90,74	92,79
* Se realizaron con el equipo de 10 L y en dos etapas, en corrientes cruzadas.					

El rendimiento dado en g de aceite/g de cachaza se comportó superior a los valores esperados, y evidentemente los valores de las experiencias 4 y 5 son ligeramente inferiores a las primeras experiencias, debido a que en la segunda etapa de extracción de estos experimentos, el solvente que se pone en contacto con la nueva partida de sólido tiene cierta cantidad de soluto disuelto, haciendo esto que la fuerza impulsora de la transferencia de masa (diferencia de concentración), sea menor en este caso, disminuyendo la capacidad extractiva del solvente.

Por otra parte, en el rendimiento expresado en g de aceite/L de cachaza, los valores mayores obtenidos en los experimentos 4 y 5 están acordes con el análisis anterior, y demuestran que con la misma cantidad de nafta, en dos etapas, es posible extraer casi el doble de lo extraído en una sola etapa, requiriéndose menor cantidad de solvente para obtener determinada cantidad de aceite, influyendo esto en la reducción del costo de operación por concepto de ahorro de solvente.

Se determinó el porcentaje de extracción del aceite, resultando una media de 94,14%. Este es un valor superior al supuesto, el cual estaba entre 80-85%. Es un resultado que valida los parámetros óptimos empleados, y la mejora en cuanto a resultados obtenidos anteriormente se deba probablemente al mejor grado de agitación en el recipiente, la inclusión de un condensador de doble tubo para los vapores de solvente que se evaporan en el equipo, los cuales son recirculados nuevamente al mismo, y al tratamiento aplicado a la cachaza antes de entrar al equipo (secado, reducción de tamaño y tamizado).

Los resultados que se obtuvieron a partir de la reacción del aceite de cachaza con etanol extrafino (96°GL), en presencia de catalizador básico se muestran en la tabla 2, donde cada columna muestra la media de las dos réplicas realizadas de cada experiencia. Los experimentos 1 y 3 se realizaron con una relación molar de etanol/aceite de 3,5, y los experimentos 2 y 4 con una relación de 15.

Tabla 2. Resultados obtenidos de la reacción de transesterificación

	1	2	3	4
Biodiésel	42,64 g	0	48,48 g	0
Alcoholes grasos (AAPM)	11,742 g	0	12,67 g	0
Formación de jabones	Despreciable	Inaceptable	Despreciable	Inaceptable
Conversión alcanzada (XA)	72,44%	0	73,89%	0

Como resultado de las experiencias 1 y 3, se observó la formación de un sólido cristalino de color beige claro, con similar apariencia que los alcoholes de alto peso molecular, obtenidos en trabajos anteriores. Además, el producto obtenido después de la evaporación presentó una mejor fluidez que el aceite utilizado en la reacción. Por otra parte, no se observó la presencia de jabones durante la reacción, siendo estas características, junto con la precipitación de los alcoholes grasos, una señal de la verificación de la reacción de transesterificación.

En la experiencia 2, la reacción no se verificó, debido a la formación de jabones que entorpecieron la transesterificación, consumiendo para ello el catalizador y los ácidos grasos presentes; se observó un aumento de la viscosidad, lo que impide el mezclado efectivo entre los reactantes y, con ello, el transcurso de la reacción. La experiencia 4 se realizó para confirmar la experiencia 2, se disminuyó la cantidad de catalizador a la mitad, manteniendo constante la relación etanol/aceite, para evitar la formación de jabones por exceso de etóxido. En el experimento 4 se obtuvieron los mismos resultados que en el 2, lo que significa que la formación de jabones probablemente se deba a la presencia de agua, debido al exceso de alcohol adicionado en la reacción, y no a la cantidad de catalizador añadida. El agua presente en la reacción favorece la reacción de saponificación del aceite, la cual disminuye grandemente la conversión y a menudo puede ser fatal para esta, con la formación de jabones; así, los ácidos grasos libres presentes se están transformando en un producto de bajo valor e intervienen en la reacción.

Mediante los resultados de los experimentos 1 y 3, es posible concluir que se puede elaborar biodiésel a partir de un alcohol de 96°GL, utilizando un exceso de etanol de alrededor de 3,5 mol de etanol/mol de aceite, para asegurar conversiones altas en el equilibrio, siempre que no se sobrepase el límite máximo de exceso de etanol hallado (menor de 15 mol de etanol/mol de aceite). Las conversiones alcanzadas son menores que las esperadas (95-98%), aunque esos valores se alcanzaron con etanol anhidro, siendo la presencia de agua una de las causas de la disminución. El biodiésel obtenido se analizó con una técnica de cromatografía gaseosa, por un grupo de investigadores del Departamento de Química de la UCLV, arrojando excelentes resultados y comprobándose que la mezcla obtenida estaba constituida por etil-ésteres.

Simulación de la planta demostrativa

El diseño y la simulación de la planta demostrativa se realizaron basándose en una capacidad de procesamiento de 2 t de cachaza diarias (250 kg/h). La simulación se realizó para realizar los balances de masa y energía de la

planta demostrativa propuesta, con base en los resultados encontrados en el laboratorio; además, para diseñar parte del equipamiento de la planta, y seleccionar la variante de producción más factible, a partir de portadores energéticos y consumos materiales. Se utilizó para ello el software de proceso Hysys, versión 3.2. A pesar de algunas diferencias esperadas entre los resultados de la simulación del proceso y la operación real del proceso, la mayoría de los actuales software de simulación de procesos pueden arrojar información confiable de la operación del proceso, debido a que poseen gran cantidad de paquetes termodinámicos, una amplia librería de componentes y técnicas avanzadas de cálculos [Zhang, *et al.*, 2003].

El procedimiento para la simulación de un proceso está constituido, fundamentalmente, por la definición de los componentes químicos presentes en el sistema, la selección del modelo termodinámico más adecuado para el proceso a estudiar, la determinación de la capacidad de la planta, la selección de las operaciones unitarias apropiadas para lograr las transformaciones requeridas y el establecimiento de las condiciones de las corrientes de entradas (flujos, temperaturas, presión, composición, etcétera).

La mayoría de los componentes presentes en nuestro sistema se encuentran en la librería de Hysys, pero otros como la cachaza, la nafta, el biodiésel y el aceite, no se encuentran, por lo que fue necesario definir sus propiedades usando la herramienta de «Hypo Manager» con que cuenta Hysys para crear compuestos hipotéticos. El aceite puede tomarse, sin incurrir en grandes errores, constituido en su totalidad por el éster formado por el ácido linoleico y el alcohol graso octacosanol, pues es el que en mayor proporción se encuentra en la mezcla del aceite de cachaza, y es el escogido para representar al aceite de cachaza en la simulación con Hysys, por lo que el biodiésel estará constituido por el etiléster correspondiente, y el alcohol de alto peso molecular, por el octocosanol [Villanueva, 2000; Hyprotech].

El modelo termodinámico recomendado para la fase líquida es el de actividad UNIQUAC y el NRTL, ya que se tienen compuestos altamente polares como el etanol y el agua. En este caso se escogió para la fase líquida el modelo UNIQUAC, y para la fase vapor se seleccionó la ecuación de Peng-Robinson [Zhang, *et al.*, 2003; Hyprotech]. Para la realización de los balances de masa y energía, así como para el diseño y simulación de la planta, se emplearon los resultados encontrados a nivel de laboratorio, que se presentan en la tabla 3. El proceso se simuló en estado estacionario.

Tabla 3. Datos para la simulación

Etapa de extracción	
Flujo de cachaza	2 ton/d (250 kg/h)
Humedad de la cachaza	13,28%
Densidad aparente	141,92 kg/m ³
Etapa de extracción	
Cantidad de aceite en cachaza	12% base seca
Temperatura de extracción	75 °C
Presión	1 atm
Relación de alimentación	10,04 kg de cachaza/kg nafta
% de extracción	91,76
% pérdidas de solvente	8,33
2 etapas en corrientes cruzadas	
Etapa de evaporación	
Temperatura de evaporación	180 °C
Presión en evaporador	1 atm
Presión de vapor saturado	10 atm
Etapa de reacción química	
Temperatura	75 °C
Tiempo de reacción	4 h
Presión	1 atm
Relación molar catalizador/aceite	0,01
Relación molar etanol/aceite	6
K: constante de equilibrio	7

En la figura 7 se representa el diagrama de flujo del proceso continuo de obtención de biodiésel a partir de aceite de cachaza. El equipamiento principal incluye reactor, columna de destilación, intercambiadores de calor, mezcladores y separadores. Debido a que no se dispone de información detallada del mecanismo cinético de la reacción de transesterificación del aceite de cachaza, un reactor simple de equilibrio fue usado para describir la reacción, con una constante de equilibrio $K = 7$, determinada en los experimentos realizados a nivel de laboratorio. En los intercambiadores de calor, y en la columna de destilación, se asumió una caída de presión nula; para cálculos más rigurosos, se deberá calcular previamente una caída de presión en estos equipos.

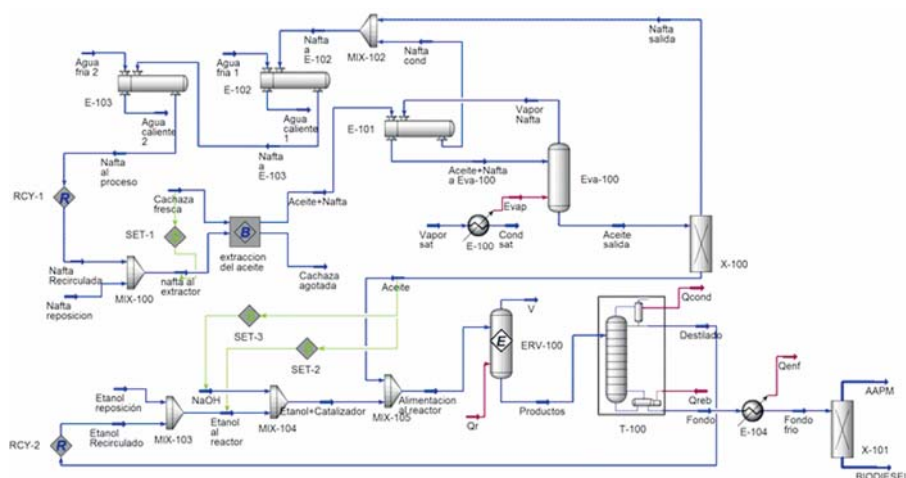


Fig. 7. Proceso de producción de biodiésel a partir de aceite de cachaza. Transesterificación con catálisis básica.

Nomenclatura del diagrama de flujo: MIX-100: Mezclador de nafta recirculada y nafta de reposición al proceso; MIX-102: Mezclador de la nafta que sale del evaporador y la que sale del separador; MIX-103: Mezclador de etanol recirculado y el etanol de reposición; MIX-104: Mezclador de NaOH y etanol; MIX-105: Mezclador del aceite y el etanol, más el catalizador para la entrada del reactor; E-100: Condensador del vapor saturado a la entrada del evaporador de nafta (parte del módulo evaporador); E-101: Condensador de los vapores de nafta y precalentador de la alimentación al evaporador (tubo y concha); E-102 y E-103: Enfriadores de nafta con agua (tubo y concha); E-104: Enfriador de los productos del fondo de la columna de destilación; ERV-100: Reactor de equilibrio para la transesterificación; Eva-100: Evaporador de nafta; X-100: Separador de la nafta remanente en el aceite a la salida del evaporado; X-101: separador del biodiésel y los AAPM; T-100: Columna de destilación para la separación del etanol que no reaccionó; RCY-1 y RCY-2: Módulos

dedicados a realizar la operación de reciclo en el proceso productivo; SET-1, SET-2 y SET-3: Módulos dedicados a fijar condiciones de ciertas corrientes, de acuerdo a las condiciones de otras corrientes.

En la parte inicial del proceso se mezcla la cachaza fresca con la nafta, en una relación tal que satisfaga las condiciones establecidas en la fase de laboratorio; para ello se emplea un módulo llamado «Set», de las herramientas del Hysys, que permite calcular el valor de alguna propiedad de una corriente (en este caso el flujo) dada una relación preestablecida entre dos corrientes (SET-1). Debido a que Hysys no presenta un módulo de lixiviación, o de extracción sólido-líquido, se emplea un módulo (extracción del aceite) que permite resolver los balances materiales y energéticos, dando las condiciones de entrada y salida de manera que los grados de libertad del sistema sean cero, y el sistema de ecuaciones sea soluble. De esta etapa sale la cachaza agotada con 2,15 kg/h de aceite y una corriente de aceite más nafta con 1% de aceite, la cual pasa por uno de los intercambiadores de calor (E-101) para precalentarse antes de entrar al evaporador (Eva-100); la temperatura de esta corriente a la entrada del evaporador es de 174,6 °C.

El evaporador está conformado por dos módulos de Hysys, un «Enfriador» (E-100) y un «Separador flash» (Eva-100); el vapor se condensa en E-100 y el calor liberado pasa a través de la corriente energética «Evap» al separador, donde se separa el aceite por el fondo y los vapores de nafta por el tope. En los vapores de nafta puede asumirse que no sale aceite (menos de 0,07%), mientras que en el aceite (aceite de salida) sale más de 80% en nafta, por lo que se emplea un módulo de separación (X-100) para separar el resto de nafta contenida en el aceite, generándose una corriente (aceite) compuesta sólo por aceite de cachaza.

Por otra parte, los vapores de nafta son pasados por una batería de intercambiadores de tubo y concha para primero condensar los vapores en E-101, y luego enfriarlos hasta 25 °C para su almacenamiento y recirculación al proceso, mediante E-102 y E-103.

Este software tiene una herramienta muy potente que permite recircular corrientes en el proceso; este módulo tiene como nombre «Recycle» (reciclo) y realiza los cálculos mediante prueba y error, hasta que los valores de la corriente que entra a él sean iguales a los que salen; en nuestro sistema se emplea este módulo para recircular la nafta luego de ser evaporada y enfriada (RCY-1), y además para recircular el etanol en exceso, recuperado en la columna de destilación (RCY-2). La cantidad de nafta de reposición calculada es de 208,1 kg/h, y la cantidad de etanol a reponer es de 1,726 kg/h.

En el módulo MIX-103 se mezclan las corrientes de etanol recirculado y el etanol que es necesario reponer, luego esta corriente de etanol se mezcla con el catalizador básico NaOH; los módulos SET-2 y SET-3 se emplean para fijar las cantidades de etanol y de NaOH que entrarán al reactor, de acuerdo a la cantidad de aceite de cachaza que se obtenga.

Las relaciones de NaOH/aceite y etanol/aceite se fijaron por datos reportados en la bibliografía consultada, estos fueron: relación molar de NaOH/aceite = 0,01, y relación molar de etanol/aceite = 6.

Antes de entrar al reactor, los reactivos son mezclados en MIX-105, y entran al reactor (ERV-100) con un flujo de 31,87 kg/h y una temperatura de 103,5 °C. Los productos de la reacción entran a la columna de destilación (T-100), para separar el alcohol que no reaccionó del biodiésel y los AAPM. La columna de destilación se simuló con el método riguroso para mezclas multicomponentes, pero antes se realizó una estimación inicial del número de platos, de la bandeja de alimentación y de la relación de reflujo, mediante un módulo de simulación de columnas de destilación simples por el método corto o «ShortCut», empleando las ecuaciones de Fenske-Underwood-Gilliland para el cálculo de los parámetros anteriores; luego, con los valores arrojados por el método corto, se procede a simular la columna por un método riguroso. La columna de destilación tiene 5 platos teóricos, una relación de reflujo de 2, lo que asegura una buena separación de los componentes en la columna; en el destilado se logra recuperar 99% del etanol, y no presenta trazas de biodiésel, mientras que en el fondo de la columna los productos de la reacción (biodiésel y AAPM) presentan 0,22% masa de etanol y 0,35% masa de agua.

Finalmente, se emplea un separador o «Splitter» para simular la separación de los AAPM y el biodiésel; se obtiene un flujo de 10,89 kg/h de biodiésel, con una composición másica de 99,1% de biodiésel, 0,5% de etanol, 0,25% de aceite y 0,15% de NaOH, mientras que se obtienen 14,46 kg/h de AAPM con 99,4% de alcoholes grasos y 0,6 de agua. La simulación produce un combustible (biodiésel) con especificaciones muy cercanas a las de la ASTM (99,6% de pureza), aunque se pudiera valorar la posibilidad de incorporar una operación de neutralización del NaOH, para acercar la pureza del biodiésel a la especificada.

Todos los equipos en el diagrama trabajan a presión atmosférica, y los coeficientes de los parámetros de interacción desconocidos por Hysys fueron estimados, usando el modelo de UNIFAC, equilibrio vapor-líquido (VLE).

Tabla 4. Balances del proceso de producción de biodiésel a partir de aceite de cachaza. Corrientes principales

Nombre de la corriente	Cachaza fresca	Aceite + nafta	Vapor de nafta	Aceite	Aliment.al Reactor
Temperatura (°C)	25	75	180	178	103,5
Presión (atm)	1	1	1	1	1
Flujo másico (Kg/h)	250	2325	2177	23,58	31,87
<i>Composición (fracción masa)</i>					
Agua	0,105	0	0	0	0,028
Etanol	0	0	0	0	0,231
NaOH	0	0	0	0	0,001
Nafta	0	0,989	0,999	0	0
AAPM	0	0	0	0	0
Aceite de cachaza	0	0,011	0,001	1	0,740
Biodiésel	0	0	0	0	0
Cachaza inerte	0,895	0	0	0	0

Nombre de la corriente	Productos	Destilado	Fondo	AAPM	Biodiésel
Temperatura (°C)	75	78,40	203,1	30	30
Presión (atm)	1	1	1	1	1
Flujo másico (Kg/h)	31,87	6,512	25,35	14,46	10,89
<i>Composición (fracción masa)</i>					
Agua	0,028	0,126	0,004	0,007	0

Etanol	0,180	0,874	0,002	0	0,005
NaOH	0,001	0	0	0	0,001
Nafta	0	0	0	0	0
AAPM	0,451	0	0,567	0,993	0
Aceite de cachaza	0,002	0	0,001	0	0,002
Biodiésel	0,338	0	0,426	0	0,992
Cachaza inerte	0	0	0	0	0

Conclusiones

1. Resulta muy atractivo utilizar el aceite presente en la cachaza para la producción de biodiésel, debido a que ésta constituye un residuo de la industria azucarera, a su gran disponibilidad, y al bajo costo de esta fuente de materias primas, lo que permite, además, la obtención de un coproducto de alto valor agregado: los alcoholes de alto peso molecular. Además, el empleo del alcohol etílico extrafino en la reacción presenta varias ventajas, como la utilización de otro recurso renovable, las diferentes propiedades que le confiere al biodiésel, la alta toxicidad del metanol y el menor costo del etanol frente al metanol.
2. El proceso de extracción del aceite, cuando se lleva a cabo en dos etapas, permite un ahorro de solvente, así como ventajas desde el punto de vista energético.
3. Para la conversión del aceite de cachaza a biodiésel es posible emplear el método de catálisis básica, debido a que la materia prima no tiene un porcentaje elevado de ácidos grasos libres, se puede utilizar este método sin mayores dificultades y se logran valores adecuados de conversión.
4. Se demuestra que es posible obtener la misma cantidad de biodiésel trabajando con menos materia prima inicial, al mejorar los resultados obtenidos en el laboratorio. A partir de tratar 2 t de cachaza diarias se producen 96 L de biodiésel y 116 kg de alcoholes grasos.
5. La simulación con el software profesional Hysys permitió evaluar varias alternativas con el fin de seleccionar la más factible económica y energéticamente, por lo que se seleccionó la que menores consumos de utilidades y menor costo de operación anual presentó: un condensador de nafta con precalentamiento de la alimentación al evaporador y dos enfriadores de nafta.

6. Mediante la simulación del proceso se obtuvieron los resultados de los balances de masa y energía, así como el diseño de algunos equipos del mismo.
7. Es posible la obtención de un biocombustible alternativo de forma sostenible, económicamente factible y ambientalmente compatible, sin comprometer la producción de alimentos ni de cultivos para los mismos, reutilizando un residuo de la industria azucarera.

Bibliografía

- BOUAID, A.; M. MARTÍNEZ Y J. ARACIL. (2007). «A Comparative Study of the Production of Ethyl Esters from Vegetable Oils as a Biodiesel Fuel Optimization by Factorial Design», en *Chemical Engineering Journal*, (134): 93-99, 2007.
- BREWSTER, R. Q. Y W. E. MCEWEN. (1963). *Química orgánica*. Buenos Aires: Ed. Médico Quirúrgica, 1963.
- CANOIRA, L.; R. ALCÁNTARA Y J. CARRASCO. (2006). «Biodiesel from Jojoba Oil-Wax: Transesterification with Methanol and Properties as a Fuel», en *Biomass and Bioenergy*, (30): 76-81, 2006.
- UKUDA, H.; A. KONDO Y H. NODA. (2001). «Biodiesel Fuel Production by Transesterification of Oils. Review», en *Journal of Bioscience and Bioengineering*, (92): 405-416, 2001.
- Hyprotech Ltd. HYSYS.PLANT 2.2 documentation.
- KNOTHE, G.; R. DUNN Y M. BAGBY. (2002). «Biodiesel: The Use of Vegetable Oils and Their Derivatives as Alternative Diesel Fuels», en *Bioresource Technology*, (59): 1-16, 2002.
- LEY, N. (2006). «Contribución a los métodos de asimilar tecnologías, aplicado a un caso de producción de biocombustibles». Tesis Doctoral. Santa Clara: Departamento de Ingeniería Química, Universidad Central de Las Villas (UCLV), 2006.
- MARCHETTI, J.; V. MIGUEL Y A. ERRAZU. (2007). «Possible Methods for Biodiesel Production», en *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, (11): 1300-1311, 2007.
- MARTÍNEZ, M. (2003). «Utilización de aceites vegetales usados para la obtención de biodiésel». Madrid: Laboratorio de Procesos Químicos y Bioquímicos Integrados, Universidad Complutense de Madrid, 2003.
- MEHER, L.; D. VIDYA Y S. NAIK. (2008). «Technical Aspects of Biodiesel Production by Transesterification-a Review», en *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, (10): 248-268, 2004.
- Software Hysys v. 3.2. 2000.
- VERA, M. (1999). «Proceso de extracción de fitoesteroides y alcoholes de alto peso molecular a partir de la fracción aceite y la cachaza de la caña de azúcar». Santa Clara: Facultad de Química-Farmacología, Universidad Central de Las Villas (UCLV), 1999.

- VILLANUEVA, G. (1991). «Aspectos fundamentales acerca de las operaciones de extracción». Santa Clara: Centro de Análisis de Procesos, Universidad Central de Las Villas (UCLV), 1991.
- VILLANUEVA, G. (2000). *Estudio de la obtención de la cera de cachaza y su caracterización*. Santa Clara: Centro de Análisis de Procesos, Universidad Central de Las Villas (UCLV), 2000.
- WENZEL, B.; M. TAIT Y A. KROUMOV. (2006). «Modelling Chemical Kinetics of Soybean Oil Transesterification Process for Biodiesel Production: An Analysis of Molar Ratio between Alcohol and Soybean Oil Temperature Changes on the Process Conversion Rate», en *Bioautomation*, (5): 13-22, 2006.
- ZHANG, Y.; M. A. DUBE, D. D. MCLEAN Y M. KATES. (2003). «Biodiesel Production from Waste Cooking Oil: 1. Process Design and Technological Assessment», en *Bioresource Technology*, (89): 1-16, 2003.

Gasto de combustible fósil y de agua, y emisión de CO₂, para formar un profesional en la Universidad Agraria de La Habana (UNAH)

Fossil fuel, water and carbon footprint to train a professional at the Agrarian University of Havana (UNAH)

Por Félix Ponce Ceballos,
Abel Fernández*, Mario Herrera Pratt*,
Enrique Álvarez Torres*, Gemma Domínguez*
y Yanara Rodríguez* * Grupo de Energías Alternativas
del Departamento de Explotación,
Facultad de Mecanización Agropecuaria, Universidad
Agraria de La Habana, Cuba.*

Palabras clave: Eficiencia energética, formación profesional

Keywords: Energy efficiency, professional training

Introducción

La primera misión de la Universidad Agraria de La Habana (UNAH) consiste en la formación de profesionales altamente calificados. Esa formación tiene un costo en términos económicos, pero se ignora cuánta energía, cuántos metros cúbicos de agua y en cuántas toneladas se contamina la atmósfera por cada profesional que sale de sus aulas.

Para medir la eficiencia de una producción determinada, casi siempre se recurre a los costos económicos, ya sea cualesquiera monedas. El sistema de evaluación actual no recoge aspectos tan importantes como el costo energético, el gasto de agua y la emisión de contaminantes a la atmósfera por unidad de producción. Un litro de diésel o de otro cualquier combustible, entrega siempre una cantidad de energía y emite a la atmósfera determinada cantidad de CO₂ y otros contaminantes, pero su valor económico varía constantemente; en cada día vale diferente el mismo litro o el mismo barril de petróleo, y sin embargo, ningún dinero puede sustituir el valor intrínseco del portador energético.

La nueva propuesta expuesta en este estudio consiste en determinar la eficiencia energética, la eficiencia en el uso del agua, y el efecto contaminante de la atmósfera; todo ello, considerando la formación del profesional en las condiciones concretas de la UNAH.

Desarrollo

Se obtuvieron los datos primarios a partir de la información existente en los controles establecidos por la Vicerrectoría Económica, fundamentalmente la

que ésta posee acerca del consumo de energía eléctrica en la UNAH, el combustible utilizado para el transporte, así como el combustible tecnológico empleado en la atención de las áreas verdes, laboratorios y otros. Se tomaron datos sobre el bombeo de agua, la energía consumida por la electrobomba y la motobomba, así como los gastos energéticos para la cocina y comedores.

Electricidad

La tabla 1 expone toda la electricidad consumida por la Universidad Agraria de La Habana (UNAH) en los últimos cinco años. En los primeros resultados no se incluye el consumo específico de cada área, aunque sí se dispone de la información detallada de cada área para concretar en estudios posteriores todas las vías para aumentar la eficiencia energética, la eficiencia en el uso del agua y la disminución de la carga contaminante en la formación de profesionales.

Tabla 1. Electricidad consumida en la UNAH en los últimos cinco años (2005-2009), el combustible fósil gastado para generarla, y el CO₂ emitido al medio ambiente

Electricidad consumida (MWh)	Combustible equivalente (L)	Combustible equivalente (kg)	Combustible fósil equivalente (t)	Emisión de CO ₂ en toneladas (t)
5 352	1 606 633	1 177 440	1 170	3 211,2

Para determinar la cantidad de kilogramos de combustible consumidos en la generación de electricidad, se consideró el índice de 220 g de diésel por cada kWh generado. Este índice es el límite inferior referido al costo energético para producir electricidad en el país.

El factor de emisión usado para determinar la carga contaminante de CO₂, es de 0,60 t por MWh consumido [Asociación..., 2009].

Los resultados más significativos en la tabla 1 reflejan que la Universidad ha consumido 5 352 MWh, más de millón y medio de litros de combustible para generarla, y ha enviado a la atmósfera más de 3 211 toneladas de CO₂, en el quinquenio 2005-2009, solamente por el uso de electricidad. Combustible diésel

En los últimos cinco años, el consumo de este combustible fue de 852 370 L (Tabla 2), equivalente a 714 286 kg (714,3 t), lo que representa una emisión a la atmósfera de 2 258 t de CO₂.

Debe significarse que la Universidad Agraria de La Habana necesita de cierta cantidad de combustible para mantener un nivel adecuado de funcionamiento, básicamente en gastos de transportación, ya que, a diferencia de la mayoría de las universidades del país, que se encuentran en las ciudades, la UNAH está ubicada distante de la capital y de los pueblos de la provincia Habana, de donde proceden la mayoría de los estudiantes, docentes, trabajadores de servicios y otros.

Tabla 2. Combustible diésel consumido en la UNAH en los últimos cinco años

Diésel consumido (L)	Diésel consumido (kg)	Diésel consumido (t)	Emisión atmosférica (kg de CO ₂)	Emisión a la atmósfera (t de CO ₂)
852 370	714 286	714,30	2 257 143	2 258

El factor de emisión seleccionado es de 3,16 kg de CO₂ por kg de combustible. La densidad del diésel considerado, es de 0,838 kg/L.

Gasolina

La gasolina es otro combustible altamente consumido en la gestión para la formación profesional en esta institución, aunque, en general, su consumo fue inferior al diésel, ya que se emplearon 308,21 toneladas en el quinquenio (Tabla 3).

Tabla 3. Gasolina consumida en los últimos cinco años

Gasolina (L)	Gasolina (kg)	Gasolina (t)	Emisión de CO ₂ (kg)	Emisión de CO ₂ (t)
426 303	308 217	308,21	986 294	986,30

La densidad de la gasolina es de 0,723 kg/L.

El factor de emisión es de 3,20 kg CO₂/kg, con respecto a la gasolina.

La emisión de contaminantes que ingresa a la atmósfera por el uso de la gasolina es de 986,3 t, como se observa en la tabla 3.

El fuel oil para la caldera

El costo energético para la elaboración de los alimentos también es relevante, sobre todo cuando se emplea el fuel oil como combustible, que se caracteriza por ser muy contaminante, no solamente por la emisión en CO₂, sino también por emisiones de otros residuales altamente nocivos.

Tabla 4. Fuel oil empleado para la caldera de la cocina en los últimos cinco años

Fuel oil (L)	Fuel oil (kg)	Fuel oil (t)	Emisión de CO ₂ (kg)	Emisión de CO ₂ (t)
523 878	523 829	523,83	1 655 454	1655,45

La densidad del fuel oil es de 0,9998 kg/L.

El factor de emisión empleado es de 3,16 kgCO₂ /kg de fuel oil.

En la tabla 4 se observa que se consumió más de medio millón de litros de fuel oil en el período, y la emisión de contaminante agrega 1 655,45 t más de CO₂ al entorno.

Consumo de agua

Para determinar el volumen de agua consumida en el período se partió de la cantidad de metros cúbicos bombeados en el 2009. En este año ya se ha eliminado una parte considerable de los salideros, lo que representa una disminución significativa de los gastos por este concepto, comparados con los años precedentes.

En la tabla 5 se destaca que, en este período, se le extrajo al manto freático donde está enclavada la Universidad, cerca de cuatro millones de m³ de agua; solo se aprovecha 50% de esta agua, bombeada por cualquiera de los sistemas de extracción.

Tabla 5. Bombeo de agua subterránea (m³), combustible consumido por la motobomba y la electrobomba (L y kg), y de CO₂, en el período 2005-2009

Diésel consumido		Emisión de CO ₂		Agua bombeada
(L)	(kg)	(kg)	(t)	(m ³)
438 637	367 577	1 229 059	1 229,06	3 898 675

Resultado final

En la tabla 6 se resumen los resultados finales de este estudio. Contiene las cifras totales de la cantidad de combustible, la cantidad de agua y la emisión de CO₂ que se le ha enviado a la atmósfera en ese período.

La información más significativa es que queda claro, en cifras, el gasto de combustible, el gasto de agua y el costo ambiental que genera cada graduado en la Universidad Agraria de La Habana UNAH.

Tabla 6. Gasto de combustible fósil, gasto de agua y contaminación del medio ambiente con CO₂ por graduado en la UNAH, en el período 2005-2009

Período	Combustible fósil total consumido		Agua total bombeada	CO ₂ total enviado a la atmósfera	
	(L)	(t)	(m ³)	(kg)	(t)
2005-2009	3 409 184	2 857	3 898 675	6 566 862	6 567
Graduados	L/G	t/G	m ³ /G	kg/G	t/G
1 890	1 804	1,51	2 063	3 475	3,48

G: Graduado.

Conclusiones

Para formar un profesional en la Universidad Agraria de La Habana, se incurre en gastos de 1,51 t de combustible (equivalente a 64,5 GJ de energía) y 2 063 m³ de agua, y se produce una contaminación atmosférica estimada en 3,48 t de CO₂.

Propuesta de vías para aumentar la eficiencia energética en la UNAH

La Dirección de la Universidad se ha propuesto (según datos del banco de problemas), lo siguiente:

1. Erradicar salideros de agua y racionalizar su uso. Esta sola medida permite el ahorro anual de 43 864 L de combustibles y de 389 867 m³ de agua, y se dejarán de emitir 102 t de CO₂ a la atmósfera.
2. Solarizar con calentadores solares la Residencia Estudiantil, incluyendo el Hotelito, la cocina y los comedores de la UNAH. Esta medida, además de posibilitar el ahorro de agua, contribuye a la disminución de 30% del gasto de energía para cocinar, calentar

agua para el baño, higienizar la cocina y comedores, y otros beneficios: se ahorrarían 321 mWh y se dejarán de emitir 193 t de CO₂ cada año al medio ambiente.

3. Sembrar árboles forestales y frutales en las áreas aledañas a la UNAH, lo que ahorrará 50% del combustible empleado en los tractores para la chapea de las áreas verdes.
4. Aplicar una política de educación ambiental hacia a todos los miembros de la comunidad universitaria, y en las áreas de influencia de la UNAH.

Bibliografía

Asociación Danesa de la Industria Eólica. *Manual de referencia sobre la energía eólica* (en línea). Disponible en:

<http://www.windpower.org/es/tour/wres/betz.htm>. Consultado el 12 de mayo de 2009.

BARACCA, ÁNGELO. (2007). «La insostenibilidad del petróleo», en *Energía y tú*, (37): 25-26, 2007.

MORENO, CONRADO. (2008). «El concepto danés», en *Energía y tú*, (44): 22-23, 2008.

RUIZ, REINALDO. (2008). «Agua: recurso vital y finito», en *Energía y tú*, (41): 9-12, 2008.

SERRANO MÉNDEZ, *et al.* (2006). *Protección ambiental y producción más limpia*. Tabloide de Universidad para todos. La Habana: 2006.

ISBN: 978-959-270-097-0.

Aporte energético-económico y ecológico de molinos de viento para el abastecimiento de agua en una unidad ganadera

Energy, economic and ecological contribution of windmills for water supply in a livestock unit

Por Froilán Silvano Lozamamani*, Dr. Félix Ponce Ceballos*,
M.Sc. Enrique Álvarez Torres*, Ing. Yaudi Lafargue Rigondón**
y M.Sc. Alfredo Pérez Sendín*

* Universidad Agraria de La Habana (UNAH), Facultad de Ciencias
Técnicas.

Autopista Nacional, km 23½, Carretera de Tapaste,
San José de las Lajas, La Habana, Cuba.

** Instituto de Ciencia Animal (ICA), La Habana, Cuba.
e-mail: felix@isch.edu.cu

Resumen

Para satisfacer el abastecimiento de agua a una unidad ganadera, enclavada en el Instituto de Ciencia Animal (ICA), se llevó a cabo una investigación que utilizó como base los datos de la Estación Meteorológica de la localidad y la experiencia de varios años, de manera tal que pudiera determinar la cantidad óptima de molinos de viento que deberían instalarse. Esta investigación determinó la conveniencia energético-económica y ecológica de sustituir el uso de equipos eléctricos para el bombeo de agua, además de evitar el trasiego de pipas de agua. La propuesta permite un considerable ahorro de combustibles fósiles, la independencia energética de la unidad ganadera y la disminución de la vulnerabilidad en el abastecimiento de agua al ganado en los períodos de sequía.

Palabras clave: Eficiencia energética, abastecimiento de agua, energía eólica

Abstract

In order to satisfy the water supply to a livestock farming unit, located at the Institute of Animal Science (ICA), it was carried out a research based on the data of the local Meteorological Station and the experience of several years, so it could be determine the optimum number of windmills that should be installed. This research determined the energy, economic and ecological convenience of replacing the use of electrical equipment for pumping water, as well as avoiding the use of water carrier trucks. The proposal allows a considerable saving of fossil fuels, the energy independence of the livestock farming unit and the decrease of the vulnerability in the water supply to the cattle during drought periods.

Keywords: Energy efficiency, water supply, wind energy

Introducción

El empleo de molinos de viento para el bombeo de agua para los bebederos del ganado, se usaba en Cuba desde hace dos siglos. En la primera mitad del siglo pasado fue muy común el bombeo de agua con molinos, tanto para la ganadería como para las viviendas del campo. Actualmente, el empleo de estas máquinas eólicas se convierte de nuevo en una estrategia viable para suministrar agua a la ganadería, ahorrando el combustible fósil que se emplea en la generación de electricidad, en motobombas y tractores encargados del abastecimiento del líquido.

Sin embargo, el cambio climático está modificando la velocidad del viento y su estructura vertical, alterando, por tanto, los potenciales disponibles de energía solar y eólica de modo continuo. En todo el país se han instalados miles de molinos de viento, pero hay períodos en los que las instalaciones eólicas no alcanzan a cubrir las necesidades mínimas. Desde enero a abril se registran las mayores velocidades del viento, y consecuentemente la mayor capacidad de bombeo de agua por los molinos más empleados en la actualidad; sin embargo, en julio y agosto los vientos son débiles, disminuyendo la capacidad de bombear el agua necesaria para cubrir las necesidades de los rebaños.

Esto motiva el estudio de la capacidad de los molinos eólicos multipalas actuales, como fuente renovable de energía, ante los cambios puntuales del régimen de velocidad del viento, determinando su eficiencia energética, económica y su aporte ecológico en las condiciones concretas de una unidad ganadera.

Desarrollo

El Instituto de Ciencia Animal está ubicado en el municipio de San José de las Lajas, en la provincia de La Habana, y cuenta con una unidad de ganado en desarrollo, y con un área de 55 ha destinada al pastoreo; los pastos fundamentales son: guinea, king grass, CT-115 asociación de leucaena y pasto estrella, Bermuda 68, y en sus áreas pastan 181 animales en acuartonamiento. Estos son llevados al pastoreo por la mañana (7:00 a.m.), y regresan a la instalación a las 7:30 p.m., donde permanecen durante toda la noche. La temperatura media anual en la región es de 24,69 °C, donde los valores más altos se registran en julio (27,3 °C) y agosto (27,4 °C). La precipitación anual es de 1 626,8 mm, y entre mayo y octubre decrece en 72,9% del total, mientras que de noviembre a abril ocurre sólo 27,1% (440,9 mm). Se utilizaron molinos de viento de tipo multipala (Fig. 1). Para la toma de datos imprescindibles se empleó cinta métrica (1 mm de precisión), probeta de 2 000 mL (50 mL de precisión) y anemómetro portátil (*pocket type*). Los datos meteorológicos de los últimos

10 años se obtuvieron de la Estación Meteorológica existente dentro del área que ocupa el ICA.



Fig. 1. Molino de viento multipala.

Cálculo de la potencia eólica disponible (Pd)

Para determinar la potencia eólica disponible por área expuesta al viento, se aplica la expresión (1):

$$Pd / A = \frac{1}{2} \rho \cdot v^3, W/m^2 \quad (1)$$

Donde:

Pd : Potencia eólica disponible (W).

A : Unidad de área expuesta al viento (m^2).

ρ : Densidad del aire (kg/m^3).

v : Velocidad del viento (m/s).

Cálculo de la potencia eólica aprovechable (Pa)

La potencia aprovechable por una máquina eólica de área A , frente a un flujo de aire de velocidad v , y densidad del aire ρ , es:

$$Pa = \frac{1}{2} \rho \cdot A \cdot v^3 \cdot Cp, W \quad (2)$$

Donde:

Cp : Coeficiente de potencia, que expresa la fracción de potencia extraída por el rotor, y es función de la velocidad del viento, $Cp = f(v)$. Cp es un coeficiente que teóricamente depende del tipo de rotor; su valor es de 0,45 para rotores hélices de alta velocidad y de 0,30 para rotores múltiples de baja velocidad (molino de viento para bombeo, tipo americano).

Cálculo del consumo de agua mensual de los animales, y la entrega real (Q_{nec}) del aeromotor [Iglesias y Soto, 1988].

$$Q_{nec} = 10^{-3} K_1 K_2 \sum mi * gi, m^3 \quad (3)$$

Donde:

K_1 : Coeficiente de irregularidad en dependencia de la época (1-1,3).

K_2 : Coeficiente de irregularidad en dependencia del día (1-1,25).

mi : Norma de consumo diario por categoría de animales (L/día).

gi : Cantidad de consumidores por categoría de animales.

Cálculo de la emisión de gases contaminantes

La energía eléctrica que se emplea en el bombeo de agua para el suministro del ganado, antes de sustituirla por los molinos de viento, produce un efecto contaminante de la atmósfera que se calcula por la expresión (4):

$$Gei = Ee \times 0,75, t (CO_2) \quad (4)$$

Donde:

Gei : Gases de efecto invernadero (t de CO_2).

Ee : Electricidad estimada (MWh).

0,75: Índice equivalente de energía en emisión de CO_2 .

Resultados

Comportamiento de la velocidad del viento en los últimos 10 años

En la figura 2 se expresa la variación de la velocidad del viento mensual en los últimos 10 años, poniéndose de manifiesto que los meses de mayor potencia eólica son de enero a mayo, y de noviembre a diciembre. En junio disminuye la velocidad del viento, llegando cerca de 2,9 m/s, y desde julio a octubre hay una frecuencia de velocidad aún más baja, del orden de 2,75 m/s, aproximadamente.

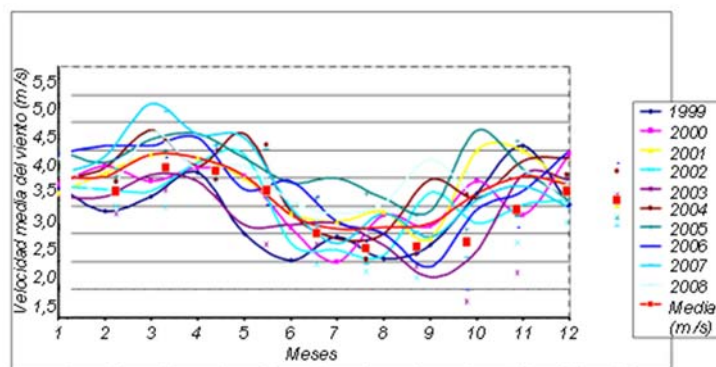


Fig. 2. Comportamiento de la velocidad media del viento en los últimos 10 años (m/s).

Por otra parte, en la figura 3 se observa el comportamiento de la potencia eólica media aprovechable en (W), destacándose marzo y abril con un potencial alrededor de los 50 W, mientras que en julio y agosto disminuye al nivel mas bajo, es decir, apenas supera los 15 W. Esta variación de la potencia del viento hay que tomarla en cuenta para determinar la necesidad de molinos en la unidad.

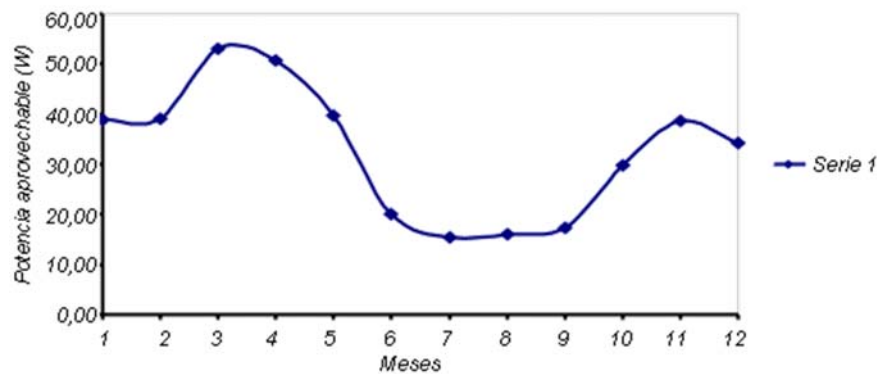


Fig. 3. Variación de la potencia eólica media disponible durante el año (W).

Demanda de agua del ganado y capacidad de entrega del molino de viento

La demanda de agua del ganado es menor en los meses de temperatura más baja (Fig. 4), siendo enero y febrero los de menor demanda, alrededor de 300 m³/mes. En julio y agosto los animales consumen cerca de 400 m³ de agua cada mes, lo que representa un aumento de 25%. Lo paradójico de estos resultados es que, en los meses de menor demanda de agua por los animales, hay un mayor potencial de energía eólica y una mayor capacidad del molino para bombear (Fig. 4), y viceversa, en los meses de mayor consumo de agua por los animales, julio y agosto, la energía eólica disponible es mínima y la capacidad de bombeo de los molinos se reduce también, en más de 25%.

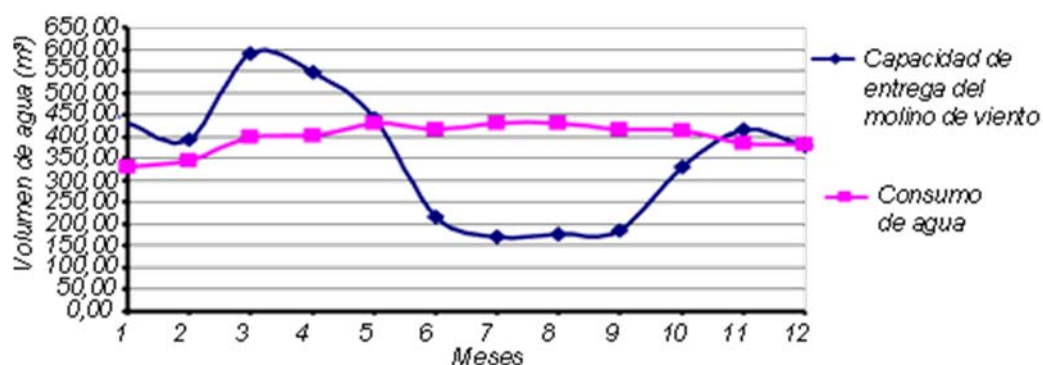


Fig. 4. Capacidad de entrega del molino y demanda de agua por el ganado

Número de aeromotores necesarios para el bombeo de agua

En julio y agosto, debido a la poca energía del viento disponible y aprovechable, es necesario colocar un número de molinos que sean capaces de bombear el volumen de agua suficiente para cubrir la demanda de los animales. En la figura 5 se destaca que tres molinos son suficientes para satisfacer dicha demanda.

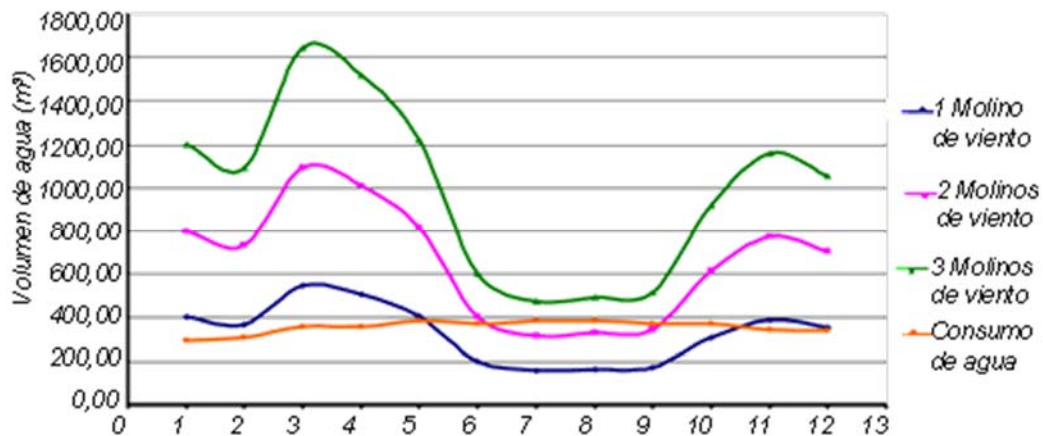


Fig. 5. Variación de entrega de molinos de viento contra consumo de agua de los animales en el año.

Efecto energético, económico y ambiental

Antes de la instalación de los molinos de viento, se trasladaban diariamente dos pipas de agua, con capacidad de 5,73 m³ cada una, haciendo un total de 11,46 m³/día.

Consumo de electricidad por unidad de volumen

El consumo de electricidad para llenar el tanque central, con capacidad de 283,9 m³, es de 110 kWh; por lo tanto, el consumo de electricidad por unidad de volumen es 0,39 kWh/m³. Para bombear la demanda de agua de los animales, 11,46 m³/día, el consumo de electricidad es 4,46 kWh/día, equivalente a 1 627,9 kWh/año.

Equivalente energético en kg de diésel

Para producir 1 kWh se necesitan 210 g de combustible fósil, como mínimo; por lo tanto, el consumo de 4,46 kWh/día corresponde a 936,6 g de combustible/día, equivalente a 341,85 kg/año. Para el traslado de las pipas de agua el tractor realiza dos viajes, y consume un total de 15 L/día de combustible diario, equivalente a 5 475 L/año (4 588,05 kg/año).

Efecto económico

El efecto económico es correspondiente al consumo combustible diésel que no se usa, debido al empleo de los molinos de viento, y por las mismas razones se dejan de pagar 5 882,94 peso/año por concepto de ahorro del combustible empleado para el bombeo, y el traslado de agua en pipa hasta la vaquería. No se tienen en cuenta los gastos de mantenimiento y amortización del tractor y la pipa.

Período de recuperación de la inversión

El costo de la inversión de los tres molinos, incluido el costo de instalación, es de 10 195,70 pesos. La razón entre el costo de inversión de los molinos de viento, y el ahorro económico de 5 882,94 peso/año, da como resultado que la inversión se recupera en 1,7 años.

Emisión de gases contaminantes

La cantidad de gases contaminantes dejados de emitir a la atmósfera por concepto del no uso de energía fósil, para la producción de electricidad para el bombeo de agua y el llenado de las pipas, así como el combustible que se deja de gastar para el traslado de las pipas en el abastecimiento de los bebederos, es de 17,7 t (CO₂)/año.

Conclusiones

- Se obtiene un ahorro de 5 882,9 L/año (4 929 kg/año) de combustible diésel en la sustitución de la electricidad para el bombeo y para el trasiego de agua con las pipas; se evita la emisión 17,27 t/año de contaminantes a la atmósfera; se obtiene una ganancia de 5 882,94 peso/año y la inversión se recupera en 1,7 años, todo lo cual demuestra el beneficio económico, energético y medioambiental de esta alternativa energética.
- La instalación de los molinos garantiza la independencia energética de la unidad en 66%, y disminuye la vulnerabilidad del abastecimiento de agua al ganado en períodos de sequía, es decir, de enero a mayo y de octubre a diciembre.

Control de la combustión y determinación de la eficiencia de la caldera por método práctico

Control of combustion and determination of efficiency of the boiler by practical method

*Por Dr. Jesús M. Guzmán China**

** Doctor en Ciencias Técnicas. Profesor Adjunto e Investigador de la Universidad de Cienfuegos. Director de la empresa PEXAC, SIME, Cienfuegos, Cuba.e-mail: director@pexacfg.co.cu*

Resumen

Se realiza un estudio físico-químico de los combustibles más convulsionados en Cuba, con el objetivo de conocer sus características para su utilización en la caldera. Este trabajo, entre otras ventajas, fija la temperatura óptima de preparación del combustible, pues se conoce su viscosidad en diferentes temperaturas. Se expone un estudio de investigación, y la experiencia práctica, que han demostrado y han hecho posible la confección de tablas que determinen las pérdidas por q_2 , q_3 , q_4 y q_5 , lo que permite hallar la eficiencia de la caldera de forma rápida, sin técnicas de laboratorio ni equipo alguno. Este método práctico permite evaluar diariamente la combustión y la eficiencia de la caldera, así como posibilita un ajuste para obtener los beneficios y el ahorro de combustible. Está demostrado que se pierde diariamente, como promedio, 2% de la eficiencia de la caldera por falta de ajuste y de control de la combustión. La aplicación de este trabajo sustituye la adquisición de analizadores de gases, así como la contratación del servicio del ajuste de la combustión a otra entidad, además de los beneficios diarios en el control y el ajuste de la combustión, y el ahorro que ello significa, así como contribuye a elevar el nivel técnico y profesional del personal.

Palabras clave: Combustión en calderas, eficiencia energética

Abstract

A physico-chemical study of the most emulsified fuels in Cuba is carried out, in order to know its characteristics to use it in a boiler. This work, among other advantages, fixes the optimum fuel preparation temperature, since its viscosity is known at different temperatures. It presents a research study, and the practical experience, that have shown and made possible the preparation of tables that determine the losses by q_2 , q_3 , q_4 and q_5 , which allows finding the efficiency of the boiler, without laboratory techniques or equipment. This practical method allows daily evaluation of the combustion and efficiency of the boiler, as well as enabling an adjustment to obtain

benefits and fuel savings. It is demonstrated that on average, 2% of the efficiency of the boiler is lost daily due to lack of adjustment and control of combustion. The application of this research replaces the acquisition of gas analyzers, as well as contracting the combustion adjustment service to another organization, in addition to the daily benefits in the control and adjustment of combustion, and the saving that means, as well as helping to raise the technical and professional level of the staff.

Keywords: Boiler combustion, energy efficiency

Objetivos

Generales:

- Determinar por método práctico, mediante tablas y a partir de los datos de los instrumentos de medición, tanto el estado de la combustión como su eficiencia, sin recurrir a equipos ni pruebas especiales.
- Aplicar un método sencillo que pueda realizar el operador diariamente, para el ajuste de la combustión.
- Mejorar la eficiencia de la caldera mediante el ajuste de la combustión, para lograr un ahorro de combustible, de hasta 4% del consumo diario.

Específicos:

- Elaborar una tabla que caracterice los combustibles fuel-oil, lo cual permite ajustar la temperatura adecuada para la combustión, además del ahorro de energía por concepto de no elevar la temperatura del combustible más allá de lo necesario.
- Determinar, mediante gráfico, el rendimiento aparente de la caldera, conociendo las pérdidas por q_2 .
- Elaborar una tabla que le indique al operador, según la presión o la temperatura del vapor saturado y la lectura de la temperatura de los gases de salida, la relación de pérdida de energía que tiene la caldera.

Materiales y método

Material:

- No se necesita ningún recurso material, pues el control de la combustión y la eficiencia de la caldera se obtiene por medio de tablas ya confeccionadas, y el operador sólo debe tomar los datos necesarios de los instrumentos.

- Sólo se necesita aprendizaje y cultura técnica por parte del operador, así como conocer la forma ajustar la entrada de aire a la caldera para regular, en caso necesario, la combustión.

Método:

El operador ha de tomar la lectura de presión y temperatura del vapor saturado, así como la temperatura de los gases de salida de la caldera. Con estos valores se consulta la tabla confeccionada al efecto, y se obtienen las pérdidas por q_2 . Esta tabla, además, indica, según una presión y una temperatura determinadas del vapor saturado en que está trabajando la caldera, cuál valor normativo de temperatura de gases y pérdidas se debe tener, lo que permite corregir haciendo un ajuste en la combustión, para llevar la caldera a los parámetros necesarios. También se aportan otras tablas para determinar la eficiencia de la caldera.

Introducción

En Cuba hay poca cultura técnica en cuanto a la disciplina tecnológica de los operadores y el equipamiento necesario para obtener eficiencia en las calderas de tubo de fuego (pequeña). Es por ello que lo normal es que seamos grandes consumidores de combustible, sin que nada lo justifique, cuando en realidad estamos llamados a optimizar y a ser cada día más eficientes.

El equipamiento necesario para regular la combustión en la caldera tiene un precio elevado, y en algunos casos no existen disponibilidades, por lo que en ocasiones el operador no tiene cuidado o preocupación por ahorrar al máximo el combustible. Sólo con la aplicación sistemática de la lectura de parámetros tales como temperatura del combustible, temperatura o presión del vapor saturado y la temperatura de los gases de salida, podemos lograr, mediante tablas, obtener la eficiencia de la caldera, y desde ésta, las pérdidas de energía.

Desarrollo

Caracterización físico-química de los combustibles líquidos más combustionados en Cuba

Las características físico-químicas de los combustibles líquidos merecen una especial atención, puesto que todos son de importancia, tanto para la combustión, como para el control de la eficiencia energética.

El fuel oil debe ser calentado a la temperatura adecuada: con una temperatura baja no habrá una buena atomización, y la temperatura muy alta formará escoria. De acuerdo al tipo de combustible, se fijan sus

temperaturas para la combustión; de ahí la importancia de conocer el tipo de combustible que estamos empleando. Actualmente es muy común el tipo de combustible que se está usando, por lo que generalmente las temperaturas para quemadores de atomización mecánica oscilan entre 100 y 110 °C, mientras que para los quemadores rotatorios, es de 60 a 70 °C.

Tabla 1. Caracterización físico-química del fuel-oil

Tipo fuel-oil	Gravedad específica (g/cm ³)	Carb. (%)	Hidrog. (%)	Azuf. (%)	Oxig. más nitrog. (%)	Agua (%)	Valor calor superior (kCal/kg)	Viscosidad CST temp. (°C)			
								50	60	80	100
Mazut-40	0,970	85,1	10,9	2,5	1,0	0,35	10 200	240	55	32	9,6
Mazut-100	0,940	83,2	10,5	3,5	1,0	1,65	10 090	495	324	95	44
Refinería cubana	0,950	85,0	11,4	2,5	1,0	0,6	10 233	115	40	20	6,2
Mezclas crudo-fuel	0,950	85,0	11,1	3,0	1,0	1,05	10 110	141	46	26	7,8
Promedio 10 a 30% crudo											

Tabla 2. Tipo de quemador y viscosidad permisible a temperatura de 30 °C

Tipo de quemador	Viscosidad CST
Con pulverización mecánica	15
Con pulverización con fluido auxiliar	60
Por el tiro de pulverización (rotatorio)	60

Determinación por tabla de las pérdidas por gases de salida

Para determinar la tabla que permite conocer las pérdidas por gases de salida de la caldera, nos apoyamos de la ecuación de SIEGERT. Como base de cálculo se tomó 130% de exceso de aire, y temperatura ambiente de 35 °C.

Tabla 3. Porcentaje de pérdidas en gases de salida de la caldera

Temperatura °C gases	210	220	230	240	250	260	270	280	300
% CO ₂ + CO	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10	9,57	10,15	10,73	11,31	11,89	12,47	13,63	14,21	14,80
11	8,70	9,22	9,75	10,28	10,80	11,33	12,39	12,91	13,51
12	7,97	8,45	8,94	9,42	9,90	10,39	11,35	11,84	12,44
13	7,36	7,80	8,25	8,69	9,14	9,59	10,48	10,93	11,53
14	6,76	7,15	7,56	7,96	8,28	8,79	9,61	10,02	11,00

La composición de los gases de salida de caldera en los combustibles líquidos, tiene la composición aproximada siguiente:

CO₂ = 12%.

CO = 0,6%.

O₂ = 5%.

SO₂ = 0,2%.

N₂ = 70,2%.

H₂ O = 11 %.

Tabla 4. Relación oxígeno-bióxido de carbono

O ₂ (%)	CO ₂ (%)
1	14,7
2	14,0
3	13,3
4	12,5
5	12,0
6	11,5
7	10,4

8	9,6
9	8,8
10	8,1
11	7,4
12	6,6
13	5,9
14	5,2
15	4,4

Pérdidas normales e inevitables

- Temperatura de los gases de salida = 50 °C por encima de la temperatura de saturación del vapor a la presión de trabajo.
- Contenido de CO₂ = 12%.
- Contenido de O₂ = 5%.

Tabla 5. Relación de la presión y temperatura del vapor con la temperatura de los gases de salida para la obtención de las pérdidas de energía

Presión (kgf/cm ²)	Temp. vapor saturado (°C)	Temperatura gases salida (°C)	Pérdidas normales (%)	% pérdidas neta temperatura de:				
				200 °C	225 °C	250 °C	280 °C	300 °C
1	119,6	169,6	6,66	3,4	9,08	21	42	53
2	132,9	183	7,25	1,4	5,7	13,5	30	41
3	142,9	193	7,73	0,3	3,87	10	25	37
4	151,2	201	8,16	-	2,55	7,4	15	24
5	158,1	208	8,45	-	1,77	6,25	11	18
6	164,2	214	8,74	-	0,92	4,52	8,5	15,4
7	169,5	220	9,08	-	-	4,04	6	10,3

8	174,5	225	9,22	-	-	3,42	5	8,7
9	179,1	229	9,51	-	-	2,68	4,3	6,8
10	183,3	233	9,66	-	-	1,82	3	5,2

Este método de obtención de la eficiencia de la caldera sólo se puede utilizar en calderas de tubo de fuego (pequeña), que emplean combustible fuel-oil.

Valor normativo de las pérdidas de energía y de la eficiencia de la caldera

$$q_2 = 10-12\%$$

$$q_3 = 0,5\%$$

$$q_4 = 0\%$$

$$q_5 = 0\%$$

$$q_6 = 0\%$$

$$\Sigma Q = (q_2 + q_3 + q_4 + q_5 + q_6)$$

$$\Sigma Q \cong 11-13\% \text{ pérdida de energía}$$

$$\eta_{ib} = 100 - \Sigma Q$$

$$\eta_{ib} = 89-87 \text{ eficiencia bruta de la caldera}$$

Determinación de las pérdidas de energía y la eficiencia de la caldera por método práctico

- El valor de presión y temperatura del vapor saturado, y la temperatura de los gases de salida de la caldera, se puede, obtener mediante la lectura de los instrumentos de medición; se consulta la tabla 5, la cual da a conocer las pérdidas normales para cada presión y temperatura del vapor, más las pérdidas originadas por el aumento de la temperatura de gases, y se obtienen las pérdidas de energía por q_2 .
- Si se necesita conocer el valor del oxígeno en la combustión para el ajuste de la caldera, con el valor de la pérdida de energía que se obtuvo en la tabla 5 y la temperatura de los gases de salida que aportó el instrumento, se consulta la tabla 3 y se obtiene el valor de % de CO₂. Después, con este valor, se consulta la tabla 4 y se determina para ese valor de CO₂, su relación con el oxígeno, para conocer su valor y comparar con los valores normativos de O₂ y CO₂ con que debe trabajar eficientemente la caldera. Si no se corresponden, se puede hacer el ajuste correspondiente, cerrando o abriendo la entrada de aire para la combustión.

- Si se necesita determinar las pérdidas por incombustión química al combustible q_3 , conociendo el valor del oxígeno real que tenemos, se consulta la tabla 6 y se obtienen las pérdidas.
- Los valores de q_4 , q_5 y q_6 se asumen como cero, pues en este tipo de caldera se desprecian los valores q_4 y q_5 , por ser muy pequeños, y en el caso de q_6 , sólo se considera para el combustible sólido.

Esto quiere decir que la obtención de las pérdidas reales y la eficiencia de la caldera, se reducen a:

$$\Sigma Q = (q_2 + q_3)$$

$$\eta_b = 100 - \dot{a}Q$$

Partiendo de que para que exista una correcta combustión son necesarias las condiciones siguientes:

$$O_2 = 5\%$$

$$CO_2 = 12\%$$

$$CO = 0,6\%$$

La tabla 6 sólo tendrá en cuenta estas pérdidas para variación del oxígeno, fijando el valor normativo de CO.

$$CO = 0,6\%$$

Tabla 6. Determinación de las pérdidas reales por incombustión química

O_2 (%)	q^3 (%)
1	0,35
2	0,40
3	0,42
O_2 (%)	q^3 (%)
4	0,45
5	0,50
6	0,53
7	0,56
8	0,60
9	0,65

10	0,69
11	0,75
12	0,82
13	0,91
14	1,03
15	1,19

Control de la combustión

El control de la combustión se logra mediante las observaciones siguientes:

- Atomización, dimensiones de la llama y su temperatura (se verifica a través de las mirillas de observación).
- Gasto de combustible (medición diaria del tanque).
- Flujo de aire (mediante manómetros diferenciales a la salida de los ventiladores y a la entrada de la chimenea).
Temperatura de combustible y gases de salida (termómetros indicadores).
- Composición de los gases de salida (mediante análisis de gases o, en su defecto, por el método práctico que se plantea en este trabajo).
- Producción de vapor.
- Presión del combustible (mediante manómetros antes y después del quemador).

Evaluación práctica de la eficiencia de la combustión

- La atomización deficiente se observa cuando hay formación de escoria en el horno, o se observan, al final de la llama, juntas brillantes.
- La dimensión de la llama debe ser tal que ocupe todo el horno sin tocar las paredes o el fondo del mismo.
- La temperatura se determina por el color, que debe ser amarillo.
- La temperatura del combustible y de los gases de salida son buenos indicadores de la eficiencia de la combustión, sobre todo los gases de salida que no deben sobrepasar el parámetro establecido de 50 °C por encima de la temperatura de saturación del vapor.
- La composición de los gases de salida es la comprobación de que la mezcla aire-combustible es la correcta.

- El conocimiento de los kilogramos de vapor generados, y del combustible quemado, nos dará la eficiencia de la caldera y el comportamiento de los equipos que consumen vapor.
- La presión del combustible es indispensable para cumplir los parámetros del quemador fijados por los fabricantes, y verificar los aparatos de la combustión en los rangos permisibles.
- Lograr que la operación de la caldera y el horno sea estable; así se obtiene la combustión más eficiente, cuando se logre que la llama permanezca encendida uniformemente, durante todo el proceso productivo.

Conclusiones

Este trabajo permite regular, controlar y hacer eficiente la combustión de la caldera, sin empleo de equipo alguno, ni de tecnología; el propio operador es capaz, mediante el conocimiento de las tablas que se aplican en el trabajo, y la lectura de los instrumentos de mediciones, de conocer y corregir la combustión, mediante el ajuste necesario. Con esto se logran disminuir las pérdidas de energía, y mejorar la eficiencia de la caldera. Se estima, por experiencia práctica, que a la mayoría de las calderas de tubo de fuego no se le lleva el control y ajuste de la combustión. En la práctica, se ha podido conocer que esto significa una pérdida de 2% de la eficiencia de la caldera, y se ha demostrado que ello puede alcanzar valores promedios de 4%.

Recomendaciones

5. Emplear este método práctico de control y ajuste de la combustión en todas las calderas que se encuentren en funcionamiento en la industria ligera.
6. Calificar a los operadores, y capacitarlos, para que puedan asimilar el empleo de esta técnica novedosa de control de la combustión en las calderas.

Bibliografía

GUZMÁN CHINEA, JESÚS M. Fuel Emulsión of Low Viscosity Mixture Method. v.3, Bordeaux, Francia. 1997.
 Revista Científica 1. Emulsión. Bordeaux, Francia. 1997
 Revista ELSEVIER, editorial service, Gran Bretaña.
 La eficiencia de combustión. Comisión Provincial de Ahorro de Energía, Ciudad de La Habana, 1989

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.

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

DISEÑO ELECTRÓNICO:

D.I. Antonio Romillo Polaino.

WEB MASTER:

M.Sc. Fernando González Prieto.



**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>