



REVISTA CIENTÍFICA TRIMESTRAL DE CUBASOLAR

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

18



La corrosión en el sector eléctrico cubano: estudio de caso.....	1
Iluminación natural en edificios de vivienda. Simulación automatizada.....	11
La inteligencia artificial al servicio de las fuentes renovables de energía. Modelo neuronal de un turbogenerador tipo P-4-20/2TK con parámetros desviados.....	27
Potencialidades energéticas y medioambientales del árbol <i>Jatropha curcas</i> L en las condiciones edafoclimáticas de la región semiárida de la provincia de Guantánamo.....	34
Tecnología para la combustión directa de los residuos biomásicos de la agroindustria azucarera.....	45
Caracterización de los compuestos del nitrógeno y las partículas suspendidas totales en el municipio Regla, ciudad de La Habana.....	56

La corrosión en el sector eléctrico cubano: estudio de caso

A case study on corrosion in the Cuban electric sector

*Dr. Miguel Castro Fernández**

**Centro de Investigaciones y Pruebas Electroenergéticas (CIPEL),
Ave. 127 s/n, Carretera al Central M. M. Prieto, Marianao 15,
CP 19390, Ciudad de La Habana, Cuba.*

Tel: (537) 452487.

Fax: (537) 666081.

e-mail: mcastro@electrica.cujae.edu.cu

Resumen

La alta agresividad de la atmósfera en Cuba se refleja en diversas esferas del sector productivo, y una de las más afectadas es el sector eléctrico. Desde 1989 se han realizado varios esfuerzos en el país con el objetivo de caracterizar el problema de la corrosión en este sector, siendo una de las temáticas de mayor interés la relacionada con la corrosión en las líneas de transmisión y distribución de energía eléctrica, dada la importancia que poseen desde el punto de vista de la confiabilidad para el servicio que se oferta a los diferentes sectores productivos y a la población en general. En el presente trabajo se exponen las características fundamentales de los procesos corrosivos que ocurren en las líneas de alta tensión en las condiciones cubanas, a partir del análisis de la estadística de falla reportada por la Unión Nacional Eléctrica (UNE).

Palabras clave: Corrosión, aisladores, herrajes.

Abstract

The effects of the high aggressiveness of the atmosphere in Cuba affect various sectors of the economy, being the power sector among the most affected ones. Since 1989 several efforts have been made in the country with the objective of characterizing the problem of corrosion in this sector, particularly the transmission and distribution power lines, given the importance they have from the point of view of the reliability of power supply service offered to the different economic sectors and the population. In the present paper we discuss the main characteristics of the corrosion processes that take place in the high-voltage power lines under Cuban conditions, from the analysis of the statistics of reported failures by the National Electric Utility (UNE, in Spanish).

Keywords: Corrosion, insulators, iron fittings

Introducción

Las expectativas de vida útil de cables, herrajes y en general de soportes de equipos expuestos a la acción del medio ambiente se ven disminuidas debido al ataque corrosivo que soportan durante su explotación.

La corrosión de los metales o recubrimientos metálicos que forman parte de las construcciones de equipos, así como las consecuentes fallas que ocurren por su acción son un fenómeno universal que generalmente tiene un mecanismo preestablecido y existen, en ocasiones, alguna dificultad para determinar el punto de origen y los factores que inician el proceso. La posibilidad de disminuir los efectos de la corrosión está muy unida al conocimiento que sobre el fenómeno tengan los especialistas, y en particular de los fundamentos de la corrosión.

Según [Colter] se aceptan, de forma general, tres mecanismos diferentes de corrosión: físico, químico y electroquímico, difiriendo entre sí por la naturaleza del ataque corrosivo y sobre quién actúa. Por otro lado, se expone que la corrosión de los metales puede presentarse de muchas formas si se considera la apariencia externa o alteración de alguna de las propiedades físicas del material o según el mecanismo de ocurrencia; de acuerdo con estas consideraciones la corrosión puede ser uniforme o localizada.

Una clasificación más amplia de los tipos fundamentales de corrosión de los metales se expone en [Anastasiev, *et al.*], entre los que se especifica la corrosión atmosférica. Dado que éste es de naturaleza electroquímica y para que ocurra es necesaria la formación de una película finita de humedad sobre la superficie del metal, estudios realizados en el antiguo Colectivo Internacional de Científicos (CIC) del Centro Nacional de Investigaciones Científicas (CNIC) permitieron evaluar, en las condiciones del clima de Cuba, el complejo temperatura-humedad y su influencia sobre el proceso de corrosión [Corvo, 1989].

Hay factores que coadyuvan a la captación y retención del electrolito sobre la superficie metálica, entre los cuales pueden señalarse la rugosidad superficial, el polvo sedimentado y los productos hidroscolopicos, siendo la rugosidad y el polvo sedimentado factores particularmente influyentes en las primeras etapas del proceso, aunque pierdan significación a medida que progresa la corrosión [Rosenfeld, 1972; Barton, 1982, y Feliz y Morcillo, 1982]. Otros estudios [Zacks, y Bardeen y Sheadel, 1956] han demostrado también la alta influencia de los compuestos de SO₂ y de los cloruros, donde los vientos predominantes, su intensidad y dirección, así como la orientación de la superficie metálica pueden determinar la gravedad del ataque corrosivo en un alto nivel.

En Cuba se ha demostrado la alta relación existente entre los estudios de contaminación del aislamiento eléctrico [Castro, *et al.*, 1993] y la regionalización de la agresividad de la atmósfera [Corvo, *et al.*, 1989]. En estos estudios se han elaborado mapas donde se observa una alta coincidencia en las zonas de alta agresividad, así como el factor tiempo de humectación como fundamental para ambos procesos. Asimismo, un análisis de la estadística de falla en el Sistema Electroenergético Nacional (SEN) permite asegurar que en Cuba la corrosión atmosférica es una de las causas que más incide en el servicio confiable y estable de la energía eléctrica, dado fundamentalmente por el tiempo de duración de las fallas, lo cual se refleja en afectaciones a otras industrias.

La corrosión en los herrajes de aisladores en Cuba

Es conocido que la porcelana y el vidrio utilizados en el diseño de los aisladores de alta tensión tienen una alta resistencia a la corrosión atmosférica; no obstante, existen partes metálicas que pueden sufrir graves ataques de corrosión y limitar la vida del aislador durante su explotación.

Puede plantearse que, por lo general, sólo un pequeño porcentaje de los aisladores en servicio sufre serios ataques de corrosión debido a que las técnicas de recubrimientos garantizan una protección adecuada de las partes metálicas. Por otro lado, se plantea que el ataque corrosivo sobre los herrajes de los aisladores no depende sólo de las condiciones atmosféricas y del tipo de material, sino también de los esfuerzos eléctricos o reforzamientos de campo que pueden ocurrir en puntos críticos [Bardeen y Sheadel, 1956].

El desarrollo industrial ha llevado, además, a que grandes áreas se encuentren bajo la influencia de las emanaciones contaminantes y, por tanto, un extenso número de aisladores estén sometidos a la acción directa de esos contaminantes.

La exposición de los aisladores a la intemperie implica que sobre ellos actúen todas aquellas condiciones que influyen en el proceso de corrosión. Si bien el polvo sedimentado y la humedad son factores que inciden en el desarrollo del proceso corrosivo, no puede dejarse de tener en cuenta que otro de los factores de más importancia en este proceso es el oxígeno, presente en el proceso de descargas parciales o totales en el aislamiento debido a la contaminación con la producción de ozono, elemento que acelera la corrosión.

En investigaciones realizadas [Larrabee, 1944] se ha observado la influencia de la ubicación de la parte metálica en las pérdidas de corrosión; se reportó, en muestras inclinadas, que 60% de las pérdidas totales se producían por el lado que daba hacia la tierra. La inclinación del ángulo de ubicación de las muestras también se ha reportado como influyente en el proceso de corrosión [Muleshkova, *et al.*, 1990]. Un efecto similar fue observado en las cadenas de aisladores de suspensión donde la parte superior de los aisladores aparece corroída en una razón menor en relación con las partes de los herrajes más protegidos, como por ejemplo la espiga [Bardeen y Sheadel, 1956]. Esto se debe posiblemente a que las lluvias fuertes tienden a limpiar las partes superiores, pero el aerosol que salpica puede humedecer las partes intermedias y acelerar el proceso. Otro factor al que pudiera atribuirse un efecto secundario, en este caso positivo, es la protección o efecto pantalla externo, como pueden ser las propias estructuras de soporte e incluso los edificios en las zonas urbanas, los cuales pueden proteger a los aisladores o herrajes de los aerosoles y de la contaminación en general.

En Cuba, a partir del examen de partes metálicas corroídas pertenecientes a aisladores, se han detectado diferentes tipos de corrosión, que teniendo en

cuenta la propuesta realizada en Bardeen y Sheadel [1956] pueden clasificarse como:

- Tipo A. Pérdida de sección del metal expuesto.
- Tipo B. Corrosión de la espiga del aislador, ubicada dentro del ensamblaje de los aisladores.
- Tipo C. Corrosión de la espiga sin ensamblaje.

La corrosión del tipo A ha sido encontrada con mayor frecuencia y ocurren generalmente en atmósferas contaminadas, con un alto grado de acidez. Este es un ataque corrosivo típico de zonas industrializadas, siendo vulnerables al mismo tiempo todos los herrajes; durante este ataque se detectó una aceleración en el proceso corrosivo donde hay un reforzamiento del campo, así como que las uniones de los aisladores (unión espiga-caperuza) llegan a soldarse. La reducción de la sección de la espiga lleva a una reducción de la fortaleza mecánica del aislador a valores críticos, muy grave para las cadenas de aisladores que prestan servicio en zonas donde los requerimientos mecánicos son mayores, como son las cercanías de las fábricas de cemento. En el caso de la corrosión del tipo B, ésta se detectó fundamentalmente en las cavidades de la espiga de los aisladores debido a que el ensamblaje protege las otras regiones de la espiga. Este tipo de ataque se desarrolla en forma de postes radiales de óxido de hierro, se extiende por la espiga a la cavidad y ejerce una presión sobre la porcelana o vidrio que lleva al estallido de la misma.

El tipo C de corrosión se ha detectado a través de la fractura radial de los aisladores de suspensión, con pequeñas evidencias de corrosión externa. El mecanismo de ataque es muy similar al tipo B, y se caracteriza en lo fundamental por la formación de picaduras y la necesidad de la presencia del campo eléctrico para su desarrollo; esta última condición se ha demostrado en estudios de campo, donde aisladores energizados y sin energizar han estado en una misma estructura, siendo observado el ataque en aquellos bajo tensión, mientras que en los otros no ha sido observado. Su consecuencia final es igual a la del tipo B.

Las clasificaciones del tipo D, E y F que exponen Bardeen y Sheadel [1956] no han sido detectadas de forma significativa en Cuba. En la tabla 1 se presentan algunas zonas donde se tipifican estos tipos de corrosión.

Tabla 1. Tipos de corrosión en herrajes de aisladores y localizaciones en Cuba

Tipo	Características	Localizaciones típicas en Cuba	Agresividad atmosférica, g/m ² acero	
			Placas	Espirales
A	En la espiga o caperuza, pérdida de sección del metal expuesto.	Zonas industriales. Zonas con lluvias ácidas.	776-232	1 237-400
B	En la espiga,	Zonas costeras.	4 820-330	3 164-346

	sección ubicada en la zona externa del aislante hacia la interna, se desarrolla en forma de postes radiales de óxido de hierro.			
C	En la espiga, sección metálica interna, en forma de picaduras con alta presencia de descargas parciales.	No aplicable. Su localización depende de la calidad del aislamiento.	4 820-163	3 164-140
E	Localizada por tramos, sección externa de conductores y herrajes, corrosión acelerada por par galvánico.	Zonas costeras, en lo fundamental. Zonas montañosas.	4 820-301	3 164-400

Caracterización de los recubrimientos de los aisladores de más amplio uso en el SEN

La necesidad de estudiar la influencia de los procesos corrosivos en las líneas de transmisión de energía eléctrica ha estado continuamente en el interés de los especialistas que se dedican a la explotación del SEN. El antiguo Centro de Investigaciones Energéticas del Ministerio de la Industria Eléctrica inició los contactos con el CIC del CNIC en 1988 con el objetivo de realizar un estudio preliminar que permitiera caracterizar los recubrimientos y bases de los herrajes que formaban parte de los aisladores que más se utilizaban en el SEN. Los resultados de este estudio se expusieron en Castro y Corvo [1998], cuyas conclusiones principales fueron las siguientes:

- Durante el análisis de la microestructura correspondiente a la sección transversal de las capas de recubrimiento, no se pudieron detectar diferencias significativas en las diferentes muestras; no obstante, se pudo apreciar una diferencia sustancial en la homogeneidad entre capas y una mayor uniformidad de la capa superior en el caso de los aisladores procedentes de Japón y producidos por la firma NGK. Es de señalar que los aisladores de esta firma han sido históricamente los que mejor comportamiento han tenido ante la corrosión en Cuba.
- Durante la determinación del comportamiento de los diversos recubrimientos mediante ensayos acelerados en cámaras salina y de calor-humedad, se pudo observar que después del primer ciclo de ensayo aparecieron puntos blancos de los productos de corrosión del

recubrimiento de zinc en todas las muestras, aunque aquellas que eran de procedencia japonesa presentaban una menor cantidad de puntos por área de análisis; posteriormente, una vez concluidos diez ciclos de ensayo se detuvo la experimentación al no encontrarse diferencias significativas en el comportamiento entre las distintas muestras, ni presencia de productos de corrosión del metal base ni corrosión localizada en ningún caso, lo que permitió concluir que era necesario realizar estudios de campo o de laboratorio, pero con aplicación de tensión eléctrica sobre las muestras.

A partir de estos resultados, obtenidos en octubre de 1990, se procedió a elaborar un proyecto de investigación con el objetivo de estudiar en campo, en la zona de playa Viriato, la zona de mayor nivel de corrosión atmosférica de Cuba y donde el proceso de corrosión se caracterizaba por su rapidez y fortaleza, el comportamiento de los aisladores estudiados con tensión eléctrica aplicada e incorporándole una muestra de herrajes y conductores utilizados en el SEN. El proyecto fue aprobado y se dieron los primeros pasos en la construcción del polígono de ensayos, el cual se alimentaría a través de una fuente de corriente alterna de 13,8 kV que permitiría realizar el estudio. Este proyecto, independientemente de su importancia, reconocida por la Unión Eléctrica, no pudo ser ejecutado por los problemas financieros que han caracterizado la presencia del llamado Período Especial en Cuba, lo que ha retrasado la ganancia de conocimientos al respecto.

Debido a la razón anteriormente expuesta se decidió buscar criterios que permitieran, ya que no podían tenerse los resultados del mencionado estudio, al menos tratar de mejorar el problema de las fallas a causa de la corrosión; para ello se estableció la siguiente dirección de trabajo:

- Analizar la situación real de las fallas por corrosión atmosférica en el país y caracterizarlas en cuanto a la elaboración de un patrón estacional y territorial.
- Estudiar las experiencias internacionales relativas a los diferentes modelos y tipos de aisladores y su uso en los diferentes tipos de ambientes corrosivos, y aplicar paulatinamente estos criterios de forma que permitiera una evaluación en campo, de su uso.
- Aplicar, de acuerdo con las posibilidades, nuevas tecnologías en las actividades de mantenimiento en las instalaciones eléctricas de alta tensión.

Evaluación de la corrosión en el SEN

Dentro del proceso estadístico utilizado por la Unión Nacional Eléctrica en Cuba existe un grupo de cuatro causas que de una forma u otra pueden estar relacionadas con la corrosión atmosférica y su influencia sobre las instalaciones eléctricas.

En la tabla 2 se presenta la estadística de fallas analizadas durante dos períodos 1985-1989 y 1990-1999. La división no es casual y está determinada por la variación experimentada en el trabajo estadístico de la UNE en esta última etapa. Haciendo una evaluación de la información para el período 1985-

1989 se observan diferencias muy significativas entre las fallas que ocurren en la zona oriental con respecto a las que ocurren en las zonas occidental y central, y se evidenció que las condiciones de explotación de las instalaciones son realmente diferentes. Si se considera que las condiciones en cuanto a características del aislamiento, niveles de tensión, configuración de las líneas y subestaciones (incluyendo en ello los materiales utilizados) son similares en todas las regiones, debe buscarse la respuesta en otra dirección, y principalmente hacia las condiciones ambientales de explotación.

Tabla 2. Estadística de falla por corrosión en el SEN

Zona geográfica	1985-1989	1990-1999
Occidente	56	-
Centro	50	-
Oriente	89	-
Totales	195	649
Promedio por año	39	64,9

De estudios realizados en Cuba y presentados como resumen de resultados en Mérida, México [Corvo, *et al.*, 1992] puede extraerse como información que la zona oriental de Cuba se diferencia, en cuanto a la influencia del complejo temperatura-humedad, de la zona occidental, con un promedio de 3 613 horas/año con respecto a la humedad relativa del aire (por 2 547 horas/año en la zona occidental, 1 066 horas de diferencia) y 1 147 horas/año con respecto a la temperatura del aire (por 967 horas/año en la zona occidental, 180 horas de diferencia). En estas diferencias es muy posible que esté parte de la explicación del porqué se dan los comportamientos analizados, debido a que los herrajes de la zona oriental están sometidos, con una mayor probabilidad, a un mayor tiempo de humectación y, por tanto, con condiciones favorables para la aceleración del proceso de corrosión.

La diferencia observada es posible que no sea aún mayor debido a un fenómeno que se produce en Cuba, y es que la agresividad contaminante sobre las instalaciones eléctricas, presentes en las diferentes regiones de Cuba, no es igual [Castro, *et al.*, 1993]. Si se parte de que el contaminante predominante en Cuba es el procedente del aerosol marino con un segundo papel protagónico de los compuestos SO_x, que en la zona occidental existe un alto nivel de contaminación por aerosoles de este tipo y que el mayor desarrollo industrial del país se presenta en dicha zona, acentuado esto en la costa norte desde La Habana hasta Matanzas, y que precisamente en esa región se encuentran algunas de las instalaciones que presentan un índice mayor de fallas del SEN a causa de la corrosión, existen sobradas razones para tomar este fenómeno como un factor que puede tenerse en cuenta a la hora de dar alguna consideración. Una estadística a tener en consideración se muestra en que 98% de las fallas en la zona occidental se producen en instalaciones eléctricas atendidas por las Organizaciones Básicas Eléctricas (OBEs) de las provincias de La Habana, ciudad de La Habana y Matanzas, donde mayor influencia existe de los aerosoles marinos. Situación similar se presenta en la región norte oriental donde existen condiciones contaminantes similares a las

planteadas anteriormente, y donde 40% de las fallas se encuentran acumuladas en dos subregiones: Holguín y Guantánamo, las que ocupan sólo 26% del territorio de la zona oriental; sin embargo, en ella se encuentran las mayores concentraciones de instalaciones eléctricas e industrias de esa zona, así como la mayor región montañosa del país.

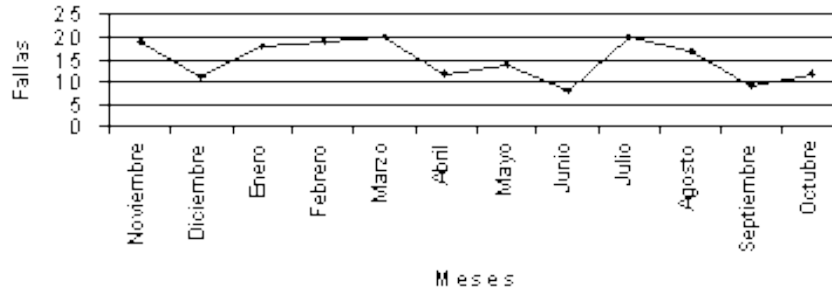


Fig. 1. Estadística de fallas (período 1985-1989).

Si se observa la figura 1 puede llegarse a la conclusión de que el proceso de corrosión en el SEN no posee características de ser súbito ni predominante de alguna época del año, pues se aprecia una distribución muy similar a lo largo de los doce meses del año (con períodos picos en noviembre, marzo y julio) y muy poca diferencia entre las épocas de lluvia y seca (o período menos lluvioso).

A partir de los resultados obtenidos en Castro, *et al.* [1993] se comenzaron a tomar medidas que los especialistas de la UNE consideraron debían incidir, de forma directa o indirectamente, en la disminución de las fallas por corrosión. Entre estas medidas pueden señalarse como principales las siguientes:

- Sustitución del aislamiento de procedencia soviética, tipo porcelana, el cual demostró altos índices de falla no sólo en zonas de alta contaminación, sino por problemas de calidad en la producción.
- Utilización correcta del procedimiento de mantenimiento conocido como lavado del aislamiento en caliente, el cual ayuda a abatir los niveles de contaminación y a su vez a disminuir la cantidad de aerosoles depositados sobre los elementos aislantes de las líneas y subestaciones eléctricas, sobre todo en las zonas costeras.
- Utilización de aislamiento de vidrio, con un mejor comportamiento ante las condiciones ambientales que favorecen el proceso de corrosión; este comportamiento se considera que esté fundamentalmente en el hecho de permitir la penetración de los rayos de sol en zonas muy protegidas del aislamiento, ayudando a disipar la humedad de dichas zonas y por tanto a disminuir el tiempo del complejo humectación-tensión eléctrica aplicado sobre sus herrajes.

Otras medidas decididas por la Unión Nacional Eléctrica estuvieron dirigidas al uso de aislamientos con un mayor grosor en la espiga, que si bien tienen un costo mayor, el mismo no es comparable con los costos asociados a una falla

del sistema o parte de éste, así como al uso de nuevas tecnologías para el empalme de conductores de diferentes o iguales características, lo que debería permitir la disminución de las fallas por el tipo de corrosión E anteriormente nombrado.

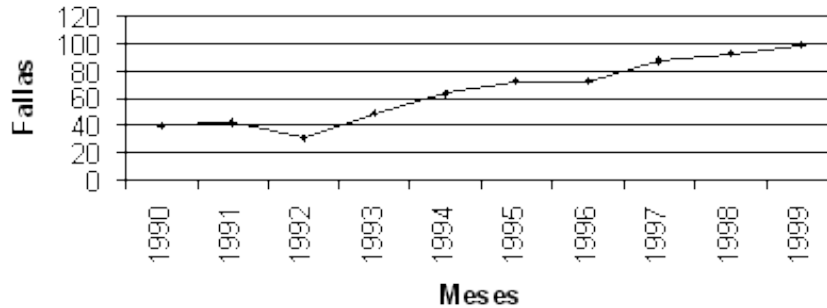


Fig. 2. Estadística de fallas (período 1990-1999).

Si se analizan las estadísticas del período 1990-1999, reflejadas en la figura 2, puede observarse que la práctica en las actividades de mantenimiento, a partir de las medidas tomadas, se observa una tendencia inicial a disminuir las fallas por año, pero posteriormente se aprecia un incremento notable en el total de fallas relacionadas con la corrosión, en casi el doble. Esto lleva al criterio de lo imprescindible de tener un mayor conocimiento de los procesos asociados a la corrosión y sus influencias sobre el sector eléctrico, pues permitirá mejorar los resultados y abatir esos efectos. Por tal razón, es considerado conveniente retomar el proyecto de estudio de la corrosión sobre herrajes, aisladores y conductores bajo condiciones experimentales de campo.

Conclusiones

- La necesidad de estudiar con profundidad el proceso de corrosión que ocurre en los herrajes de aisladores, elementos y conductores de las instalaciones eléctricas se avala no sólo por los índices económicos, sino por la necesidad de una mejora del servicio que se presta al cliente.
- Es importante dentro de este estudio lograr incluir la incidencia que en el proceso de corrosión tiene el campo eléctrico y la ubicación de los elementos metálicos.
- El proceso de corrosión en los elementos de las instalaciones eléctricas del SEN se muestra con un carácter monótono y no súbito, así como un carácter atemporal, o sea, es distribuido a lo largo del año.
- Es evidente que a pesar de los problemas acarreados por el Período Especial, el ingenio y el uso adecuado de los recursos han permitido disminuir las fallas por corrosión en el SEN, aún cuando siguen siendo importantes dentro del espectro de fallas del sistema.

Bibliografía

- ANASTASIEV, P. I., *et. al. Protección de las líneas de conducción de electricidad contra la corrosión y la contaminación atmosférica*. Electroatomoizdat (traducción interna de la Empresa de Ingeniería para la Electricidad).
- BARDEEN, A. M. Y J. M. SHEADEL. AIEE, vol. PAS. 75, Part III, June, 1956. pp. 491-501.
- BARTON, K. *Protection against Atmospheric Corrosion*. Nueva York: Wiley e hijos Inc., 1976.
- CASTRO, M. Y F CORVO. *Revista Energética*, vol. XIX, No. 1, 1998. pp. 25-28.
- CASTRO, M.; R. GONZÁLEZ, H. CUERVO Y J. DURÁN. *Revista Energética*, vol. XIII, No. 3, 1993.
- COLTER, L. G. (Jr). Olefin Plastics Department, Dow Chemical, USA, Freeport, Texas 77541. pp. 1-38.
- CORVO, F. X Seminario Científico del CNIC. La Habana: junio-julio, 1989.
- CORVO, F.; N. Betancourt, L. Muleshkova, C. Haces, Y. León, J. Pérez, E. Bricuyet, O. Rodríguez, C. ECHEVARRÍA, F. TAMAYO, M. ARIAS Y M. LORENTE. III Congreso Iberoamericano de Corrosión y Protección. Tomo I. Río de Janeiro: junio, 1989. pp. 405-414.
- CORVO, F; N. BETANCOURT, L. MULESHKOVA, C. HACES, Y. LEÓN, J. PÉREZ, M. CASTRO Y R. GONZÁLEZ. Memorias del 1er. Taller Internacional de Corrosión. Mérida: marzo 23-28, 1992. pp. 40-55.
- FELIZ, S. Y M. MORCILLO. *Corrosión y protección de los metales en la atmósfera*. Barcelona: Ediciones Bellaterra, 1982.
- LARRABEE, C. P. *Transactions, Electrochemical Society*, vol. 85, 1944. p. 297.
- MULESHKOVA, L.; F. CORVO Y J. PÉREZ. I Simposio Internacional de Corrosión-Protección y Tropicalización, Quimindustria'90. La Habana: Palacio de Convenciones de La Habana, mayo 9-12, 1990.
- ROSENFELD, I. L. *Atmospheric Corrosion of Metals*. Texas: National Association of Corrosion Engineers (NACE), 1972.
- ZACKS, T. *Los efectos de la corrosión y medidas para resolver el problema*. ONU, ONU.

Iluminación natural en edificios de vivienda. Simulación automatizada

Natural lighting in apartment buildings. Automated simulation

*Prof. Dra. Arq. Dania González Couret, Arq. Héctor Gómez
y Arq. Anielsys Zorrilla*

*Facultad de Arquitectura, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría,
La Habana, Cuba.*

e-mail: danial@arquitectura.cujae.edu.cu

Resumen

El aprovechamiento del suelo y la conservación de los centros urbanos son principios esenciales de sustentabilidad. La Dirección Provincial de Planificación Física de la Ciudad de La Habana ha propuesto la rehabilitación integral de la ciudad, conservando el actual coeficiente de ocupación del suelo. El presente trabajo muestra los resultados de una investigación encaminada a evaluar cómo podrían ser los nuevos edificios multifamiliares a construir en los lotes largos y estrechos disponibles en zonas urbanas como Centro Habana, para garantizar los niveles mínimos de iluminación natural interior requeridos.

Para ello, se simuló el comportamiento de la iluminación natural en esquemas volumétrico – espaciales propuestos, a partir del programa ADELIN (Advanced Daylighting & Electric Lighting Integrated New Environment). Los valores de iluminación difusa sobre un plano horizontal exterior obtenidos en la simulación sobrepasan ampliamente la luminancia de 10 000 lux normada hasta hoy en Cuba, razón por la cual se trabajó con el factor de día. Los resultados simulados fueron validados mediante su comparación con mediciones en un edificio existente. De acuerdo con los resultados obtenidos, los coeficientes de ocupación del suelo podrían variar entre 0.44% y 0.67%, en dependencia del ancho del lote y la altura de los edificios. Estos valores resultan inferiores a los actuales, que se pretende mantener.

Palabras clave: Iluminación natural en edificios.

Abstract

Two essential principles of sustainability are: making good use of the ground and the conservation of urban areas. The provincial office of the Physical Planning Institute in La Habana has proposed the comprehensive rehabilitation of the city, keeping the present-day ground occupation coefficient. The present paper shows the findings of a research addressed to evaluate how could be the new apartment buildings to be built in the long and narrow lots available in urban areas like Centro Habana, to guarantee the minimum levels of interior natural lighting required. For it, it was simulated the behavior of natural lighting in the volumetric space schemes proposed, using the software ADELIN (Advanced Daylighting and Electric Lighting Integrated New Environment). The values of diffuse lighting on an exterior horizontal plane obtained in the simulation, largely surpass and irradiance of 10 000 lux, today's standard in Cuba, which is the reason why it was worked with the factor in the daytime. The

simulated results were validated by means of their comparison with measurements in an existing building. According to the results obtained, the ground occupation coefficient could vary between

0,44 % and 0,67 %, depending on the width of the lot and the height of the buildings. These values are inferior to the current ones that are intended to maintain.

Keywords: Natural lighting in buildings..

Antecedentes y fundamentación del problema

El aprovechamiento del suelo y la conservación de los centros urbanos son principios esenciales de sustentabilidad. El proceso de rehabilitación integral de las áreas centrales de la ciudad de La Habana propuesto por la Dirección Provincial de Planificación Física comienza con la inserción de nuevos edificios de vivienda en lotes disponibles, para trasladar a éstos las familias que habitan en edificios que deben ser rehabilitados.

Investigaciones sobre el microclima urbano en áreas compactas de la ciudad, como La Habana Vieja, desarrolladas hace aproximadamente veinte años [Alfonso, *et al.*, 1989], demostraron que a pesar de no responder al modelo tradicionalmente recomendado en todos los manuales de diseño bioclimático para climas cálido-húmedos como el de Cuba, estas morfologías generan un microclima más favorable que el de las urbanizaciones abiertas al estilo del Movimiento Moderno, como Alamar.

Esto, unido al reconocimiento de los valores de la ciudad tradicional que se produjo en el mundo desde finales de los años setenta, ha condicionado la voluntad de conservar ese valioso patrimonio en La Habana. Es por ello que la Dirección Provincial de Planificación Física de la ciudad se ha propuesto preservar el tejido urbano existente y para ello exige que los nuevos edificios que se deben construir mantengan los actuales coeficientes de ocupación del suelo, que resultan bastante elevados (aproximadamente 0,8).

A partir de aquí se planteó una interrogante: ¿Cómo deberán ser los nuevos edificios multifamiliares que se deben construir en los lotes largos y estrechos disponibles en zonas urbanas como Centro Habana, manteniendo los altos coeficientes de ocupación del suelo existentes hoy? Y otra pregunta: ¿Podrían los edificios multifamiliares existentes servir de referencia para proyectar los nuevos que deberán ser construidos?

Para responder a esa pregunta se desarrolló una investigación exploratoria sobre las condiciones ambientales interiores en una muestra representativa de las tipologías de edificios multifamiliares existentes en Centro Habana [Chiong y Luaces, 2005]. Del procesamiento de los resultados de las mediciones y las entrevistas a la población desarrolladas durante el trabajo de campo se concluyó que, de manera general, en los espacios interiores de estos edificios no se satisfacen los requerimientos de iluminación natural, lo cual genera consumo innecesario de energía en iluminación artificial diurna, falta de confort y posibles afectaciones a la salud de los habitantes [Pérez, 2005].

Los nuevos edificios a concluir no podrían, por tanto, reproducir estos modelos existentes, donde predominan las relaciones interior-exterior a través de pequeños patinejos que, además de no satisfacer los requerimientos de iluminación natural, también generan otros problemas de privacidad y convivencia entre vecinos [Gómez, 2001].

Ante esta situación se optó por proponer nuevas soluciones volumétrico-espaciales para edificios multifamiliares en Centro Habana, que pudieran garantizar condiciones ambientales interiores apropiadas con el máximo aprovechamiento posible del suelo urbano [Zorrilla y Wells, 2004]. Entre los principios de diseño que dieron origen a estas propuestas se destacan la profundidad de dos crujías de los volúmenes edificados para propiciar la relación interior-exterior y, con ello, la iluminación natural, además del empleo de patios que garanticen una mayor calidad ambiental que la que ofrecen los actuales patinejos.

El comportamiento de la iluminación natural interior en las soluciones volumétrico-espaciales propuestas fue simulado automáticamente con vistas a determinar la amplitud necesaria de los patios para satisfacer los requerimientos de iluminación [Gómez, 2005]. Exponer el proceso de simulación y sus resultados constituye el objetivo del presente trabajo.

El programa

El programa ADELIN (Advanced Daylighting & Electric Lighting Integrated New Environment), es un software desarrollado por la Agencia Internacional de Energía en colaboración con Fraunhofer Institute of Building Physics (FhG-IBP), Daylighting Research Center y Lawrence Berkeley Laboratory (LBNL). Las primeras versiones datan de 1989, desarrolladas en la Universidad de Berkeley, Estados Unidos. La versión utilizada data de 1998 y emplea el servicepack 9c disponible en la página Web oficial del programa.

Constituye una herramienta de diseño que provee a arquitectos e ingenieros información precisa sobre el comportamiento de la iluminación natural y artificial en un modelo 3D de cierta complejidad. Además, posibilita el cálculo del consumo de energía eléctrica y la ganancia térmica por concepto de iluminación artificial, así como la energía requerida en calefacción o enfriamiento al enlazarse con otros programas de simulación térmica.

Los niveles de iluminación exterior

Se realizó una primera simulación de los niveles de iluminación exterior sobre un plano horizontal sin obstrucciones correspondientes a un punto con las coordenadas geográficas de la ciudad de La Habana para el 21 de marzo, junio, septiembre y diciembre (equinoccios y solsticios) en el horario comprendido entre las 8:00 a.m. y las 6:00 p.m., con un intervalo de dos horas desde el momento de inicio. Los resultados se compararon con los modelos obtenidos por cálculo, por De la Peña [1992] a partir de mediciones de radiación solar realizadas en la ciudad (sobre una superficie horizontal exterior sin obstrucciones).

De la Peña [1992] define el cielo de Cuba como parcialmente nublado con tendencia al cubierto, con impermeabilidad a los rayos solares, intermitencia luminosa y luminancia constante, como modelo isótropo entre la alternancia de la presencia o no del sol debido al frecuente desplazamiento de nubes sobre el disco solar. El cielo uniforme usado en el presente trabajo, como modelo teórico, presenta igual luminancia en todas sus direcciones, y según la propia De la Peña, que actuó como asesora en este trabajo, es un modelo que se ajusta al cielo definido para La Habana en estudios previos, aunque no considera la incidencia directa del sol.

Los valores de iluminación difusa sobre un plano horizontal exterior obtenidos sobrepasan ampliamente la luminancia de 10 000 lux normada hasta hoy en Cuba como cielo de diseño (RC 1075:88), excepto en diciembre, después de las 4:00 p.m. (Tabla 1 y figura 1).

Tabla 1. Resultados de la simulación de los niveles de iluminación en un plano horizontal exterior sin obstáculos, en diferentes momentos del año

Iluminación difusa plano horizontal exterior (klux)						
Meses	Hora solar					
	8	10	12	14	16	18
Marzo	8,9	19,4	24,8	23,6	16,2	4,6
Junio	13	22,5	27,1	25,8	18,8	8
Septiembre	10,5	20,5	25,5	23,2	15,2	3,3
Diciembre	4,8	14,1	18,6	17,1	9,9	-

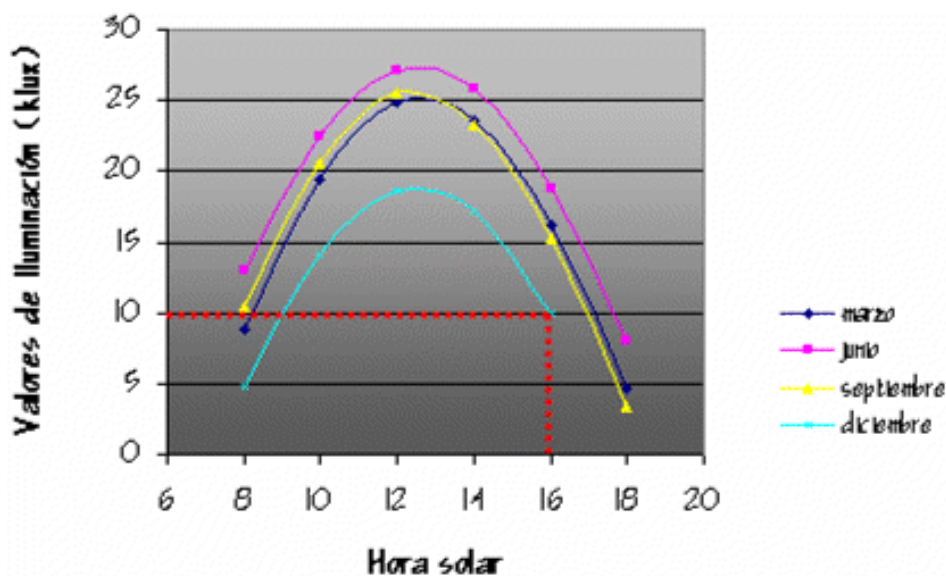


Fig. 1. Resultados de la simulación de los niveles de iluminación en un plano horizontal exterior sin obstáculos, en diferentes momentos del año.

Por esta razón, ya De la Peña había propuesto en 1992 que en las condiciones de Cuba podría considerarse un cielo de diseño de 13 000 lux, lo cual permitiría reducir las áreas de ventanas requeridas para satisfacer los niveles de iluminación mínimos normados. No obstante, los valores obtenidos por De la Peña [1992] para los solsticios de invierno y verano en la ciudad de La Habana bajo condiciones de cielo uniforme son incluso superiores a los que se obtienen con SUPERLITE (Módulo de Adelina empleado en el trabajo) para la latitud de Cuba. (Fig. 2)

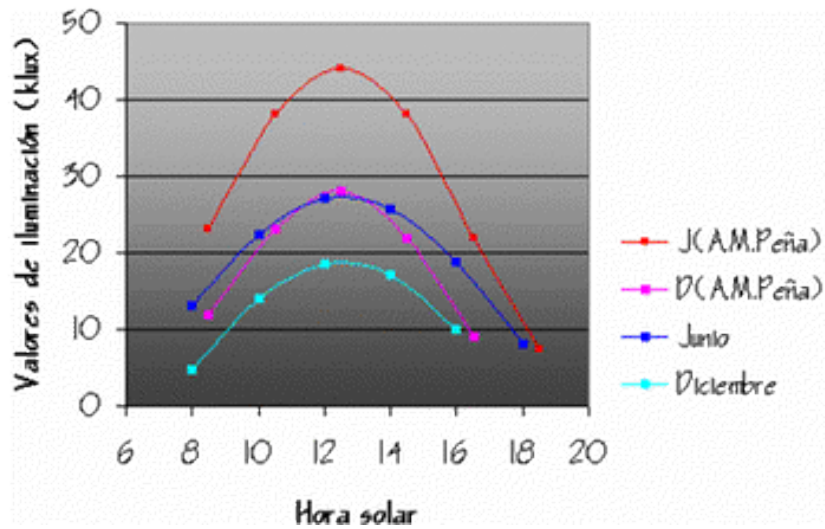


Fig. 2. Niveles de iluminación en un plano horizontal exterior sin obstáculos, simulados para diciembre y junio, en comparación con los valores calculados por De la Peña (1992) para los mismos meses.

La marcada diferencia entre los valores obtenidos por ambas fuentes hacen recomendable el desarrollo de futuras investigaciones que permitan comparar estos resultados con datos reales de iluminación difusa medidos bajo el mismo tipo de cielo que ofrece el programa, con vistas a precisar su validez para las condiciones de Cuba. Por esta razón, la simulación de la iluminación natural interior en los modelos arquitectónicos estudiados, se hizo a partir del factor de día y no de los niveles absolutos de iluminación natural interior, que pueden obtenerse no obstante a partir de éste, en el momento que se desee.

Comparación entre la simulación y los resultados de mediciones reales

Se compararon los resultados del factor de día obtenidos mediante mediciones realizadas en un edificio ubicado en la calle Reina 412, entre Gervasio y Escobar, como parte de otra investigación experimental [Chiong y Luaces, 2005], con los obtenidos mediante la simulación automatizada de un modelo virtual construido del propio edificio, considerando un coeficiente de transmisión para las ventanas de 36% (ventana miami) y una reflectancia de 35% (madera clara). Los coeficientes de reflexión asumidos para el techo, las paredes y el piso fueron 0,7, 0,5 y 0,25, respectivamente (Figs. 3, 4, 5 y 6)) [De la Peña, 1991].



Fig. 3. Fachada del edificio ubicado en Reina 412, entre Gervasio y Escobar, Centro Habana. (Tomado de Luaces y Chiong, 2005).

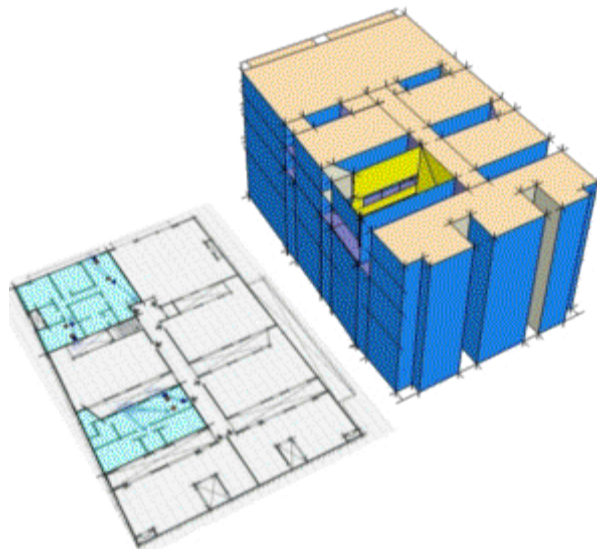


Fig. 4. Modelo tridimensional del edificio ubicado en Reina 412, entre Gervasio y Escobar, Centro Habana. (Tomado de Luaces y Chiong, 2005).

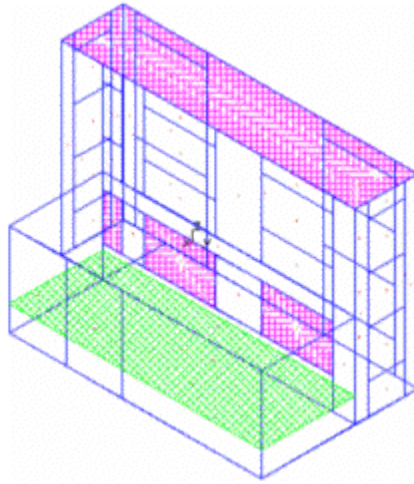


Fig. 5. Modelo geométrico elaborado en ADELINA del edificio ubicado en Reina 412, entre Gervasio y Escobar, Centro Habana. (Tomado de Gómez, 2005).

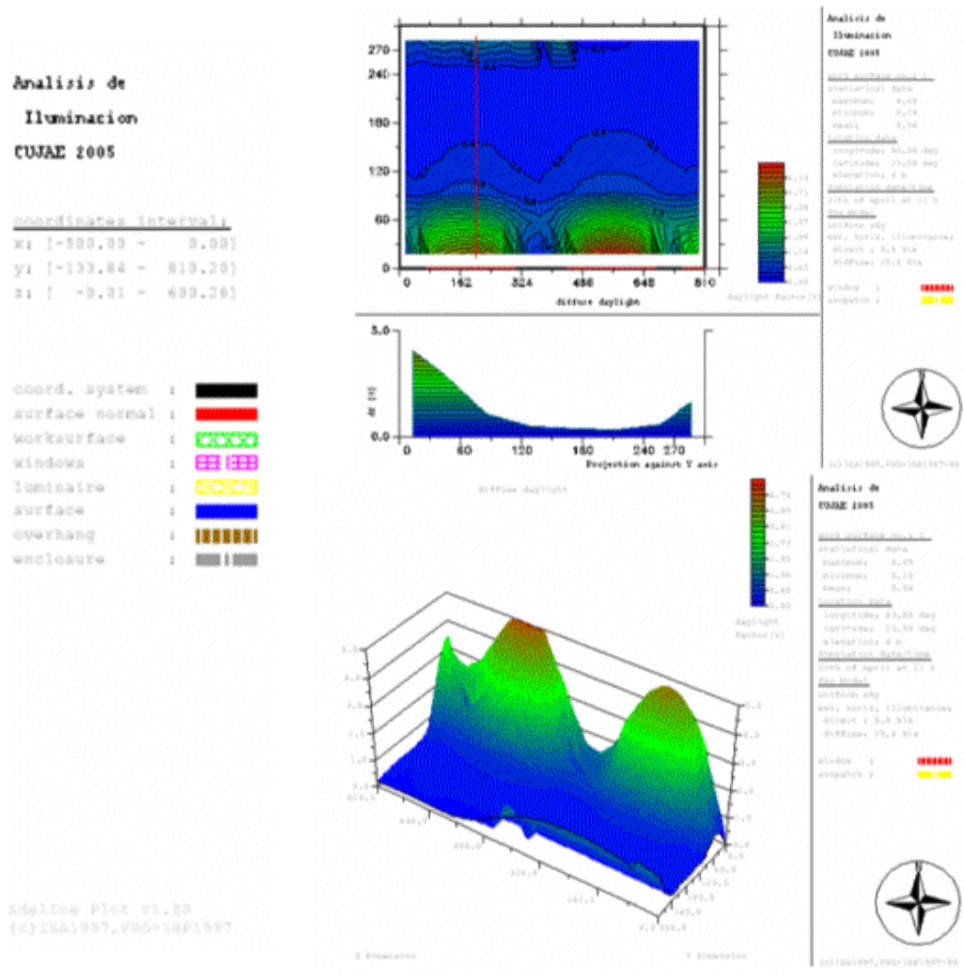


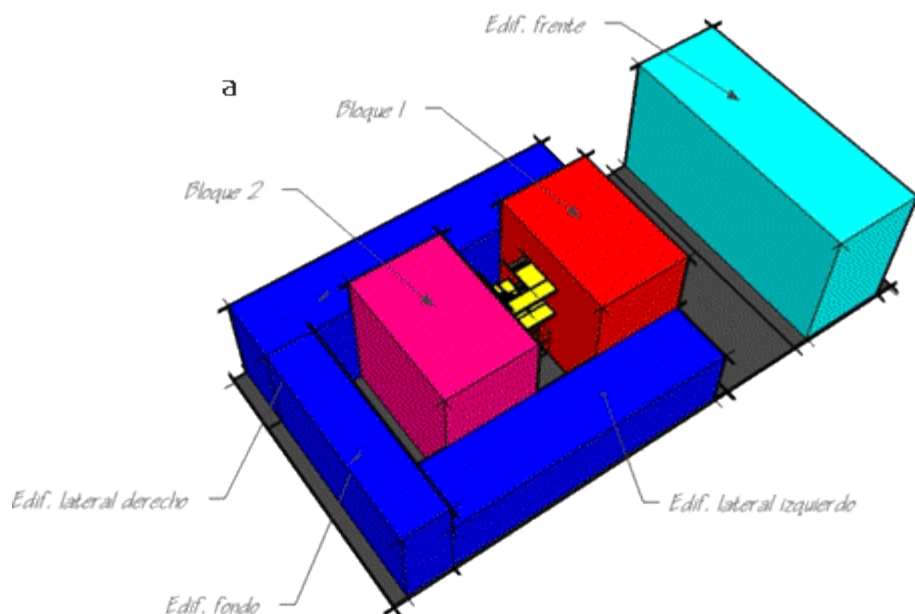
Fig. 6. Resultados de la simulación: Factor de día (en planta y 3D) para el espacio interior simulado.

Existe correlación entre los valores del factor máximo, mínimo y promedio medidos (4,69, 0,19 y 0,94) con los simulados, lo cual permite validar el posible uso del programa para estimar el factor de día bajo condiciones de cielo uniforme. La exactitud en los resultados se incrementa a medida que el modelo geométrico simulado y las propiedades fotométricas de los materiales se ajusten a lo que acontece en el modelo real.

Definición de variables

Las variables que determinan el comportamiento de la iluminación natural se han clasificado en tres grupos: el ambiente, la geometría y las propiedades fotométricas de los materiales. Las variables ambientales incluyen el tipo de cielo (cielo de diseño), así como los niveles de iluminación o factores de día normados para la vivienda. Las variables geométricas se refieren al modelo desde el punto de vista dimensional e incluyen tanto el ancho de los lotes como la altura de cada uno de los edificios insertados en el contexto de estudio, así como la geometría del modelo a diseñar. Las propiedades fotométricas determinan cómo varía el comportamiento de la luz al interactuar con los materiales empleados.

Para definir las variables geométricas se tuvo en cuenta el inventario de lotes disponibles en Centro Habana realizado por Zorrilla y Wells [2004], de acuerdo con el cual 85,8% del total se encuentran entre 5 y 14,6 m de ancho. Se trabajó para tres intervalos, tomando el menor valor en cada caso, de manera que se asumieron anchos de lote de 5, 7,2 y 11 m. (Fig. 7).



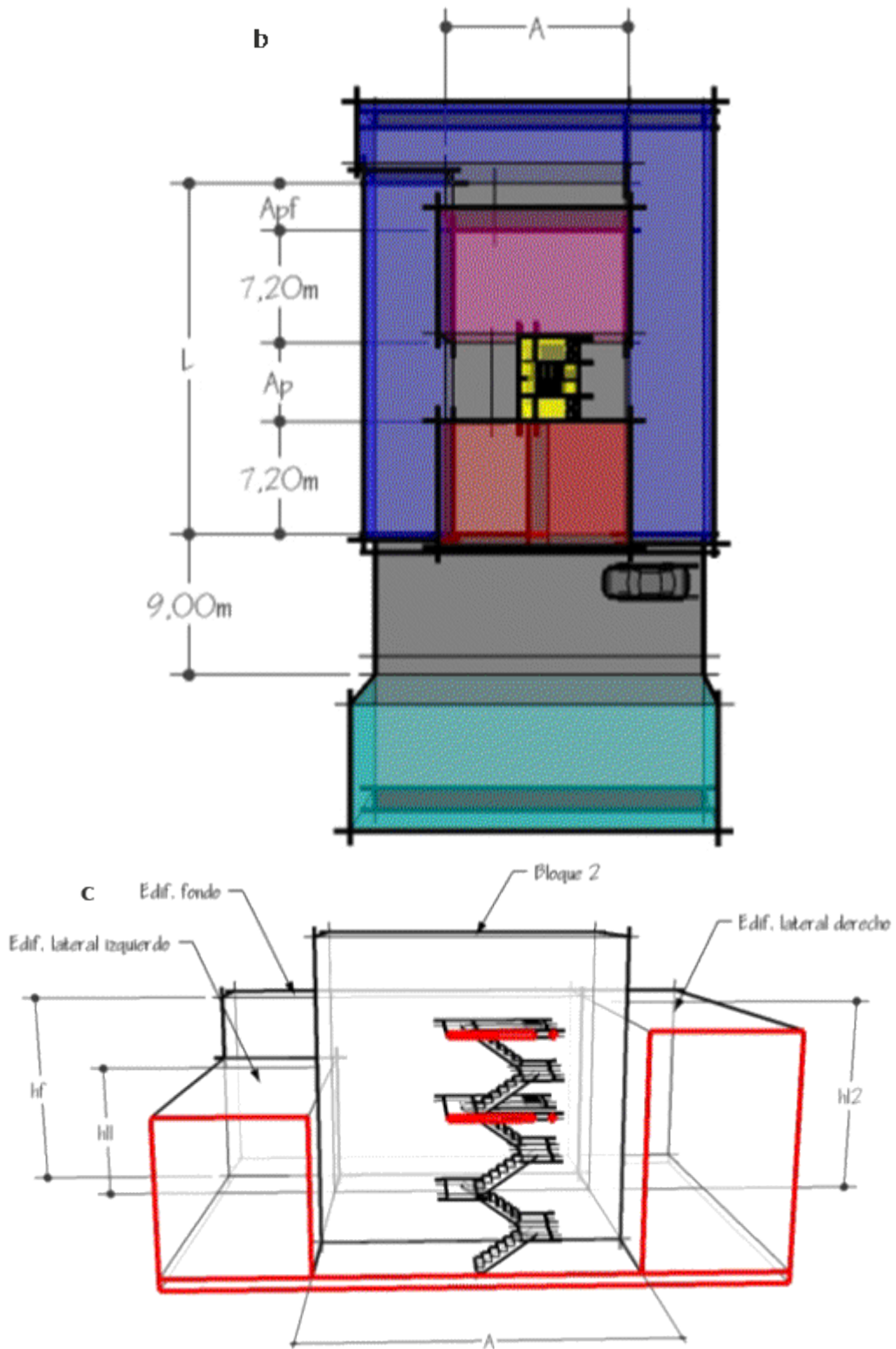


Fig. 7. Esquema de la solución arquitectónica propuesta.
 a) Volumetría. b) Vista superior. c) Corte.

La solución volumétrico-espacial del modelo simulado asume el esquema propuesto a partir de los principios antes expuestos, que generan volúmenes medianeros de dos crujías de profundidad, separados entre sí por patios interiores y de los edificios circundantes por un patio de fondo.

La medianería determina en cada caso límites espaciales que conforman obstrucciones externas que afectan la entrada de luz. El *frente* se ve afectado por la sección de la calle y la altura del edificio al cual enfrenta. El *patio interior* y el *patio fondo* quedan limitados por la altura de los edificios laterales, añadiendo a este último la altura del edificio del fondo.

Cada una de las variables descritas se agruparon según su dimensionamiento horizontal y vertical.

A: Amplitud o ancho del lote, m.

L: Longitud o largo del lote, m.

Ap: Amplitud del patio interior, m.

Apf: Amplitud del patio fondo, m.

h1: Altura del bloque 1, m.

h2: Altura del bloque 2, m.

hf: Altura del edificio del fondo, m.

hl1: Altura del edificio lateral izquierdo, m.

hl2: Altura del edificio lateral derecho, m.

Se tomó una sección de calle de 9 m característica de la zona en estudio (acera-calle-acera) [Chiong y Luaces, 2005], una altura máxima de 11 m (dos niveles de 5,5 m) para el edificio del frente. Los valores de h1, h2, hf, hl1 y hl2 varían indistintamente entre 5,4 y 10,8 m, tomando 2,4 m como el puntal mínimo interior. Al asumir una altura máxima de 10,8 m se trabaja para el número de pisos promedio de Centro Habana (dos niveles de 5,4 m) [Zorrilla y Wells, 2004], aunque, por supuesto, existen edificaciones de mayor altura. Sobre la base de las dimensiones asumidas para las variables, se determinó el número de combinaciones posibles para la simulación.

Proceso de simulación

Como las soluciones espaciales propuestas permiten la iluminación bilateral en los espacios sociales de la vivienda (estar, comedor y cocina), se ha considerado el factor de día en el punto central más alejado de las entradas de luz lateral como una sumatoria equivalente en la cual cada abertura aporta la mitad del valor normado. Por tanto, la simulación tuvo como objetivo determinar la amplitud de los patios para que permitan obtener valores de factor de día de 0,7% a 3,6 m desde la ventana (se considera 0,7% la mitad del valor normado y 3,6 m la mitad del módulo espacial de dos crujías de profundidad). Esto permite simplificar al modelo.

La luz que penetra en la planta baja de los apartamentos es en esencia luz reflejada, por lo que a medida que se desciende en altura hacia el interior de los patios aumenta el área de ventanas, disminuyendo, por tanto, la reflexión de las superficies exteriores. Por ello fue necesario calcular para cada uno de los patios interiores y de fondo, superficies con un coeficiente de reflexión

equivalente en función del área y tipo de vanos empleados. Las restricciones en el número de superficies empleadas en el modelo geométrico que admite SUPERLITE condujeron al cálculo por niveles de cada una de las superficies en contacto con los patios, con el fin de obtener resultados más precisos. Para ello se empleó una suma ponderada de los coeficientes de reflexión asumidos. Tanto los coeficientes de reflexión de las superficies exteriores como los factores de reducción y coeficientes de reflexión de las ventanas, se asumieron a partir de lo recomendado por De la Peña [1991].

La tabla de la figura 8 recoge los datos utilizados y la descripción de cada uno de ellos. Los materiales asumidos fueron vidrio, madera clara y una pintura de color amarillo claro. Estos materiales conformaron en todos los casos las soluciones de cierre, asumiendo para el vidrio una reflectancia de 5% (lucetas y aberturas), la madera 35% (ventanas) y la pintura 75% (terminación de los muros de cierre). Se calculó el área que ocupaba cada uno de ellos en la solución de cierre, determinando un coeficiente de proporcionalidad con el cual se ponderó cada uno de los respectivos coeficientes de reflexión. La sumatoria de los coeficientes ponderados dio como resultado la reflectancia equivalente que se empleó en SUPERLITE, otorgando a cada una de las superficies un identificador tipológico.

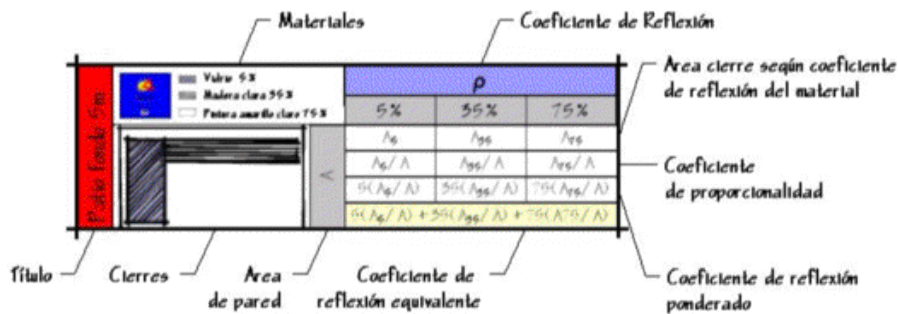


Fig. 8. Cálculo del área de ventana equivalente en cada cierre del patio interior o de fondo.

El módulo SUPERLITE del programa considera las ventanas como superficies de área equivalente con un coeficiente de transmisión (36% para la ventana miami); sin embargo, el efecto específico de las lamas en la distribución interior de la luz pudo apreciarse mediante el módulo RADIANCE del propio programa. (Fig. 9).



Fig. 9. Efectos de las persianas en la distribución interior de la luz, simulado con RADIANCE.

La amplitud de los patios se obtiene por un proceso de aproximaciones sucesivas. Una vez realizada la simulación se chequea el gráfico de factor de día comprobando el valor de 0,7% a 3,6 m desde la ventana. En caso de no alcanzarse este valor se aumenta la amplitud y se repite el proceso descrito.

Finalmente, se comprobó la validez del modelo simplificado de iluminación unilateral. En la figura 10 se muestra un ambiente 3D del modelo considerado en SUPERLITE, después de realizado el ajuste en la amplitud de los patios. Se pudo comprobar que los valores de factor de día se comportan según lo esperado. El área en blanco muestra los valores superiores a 1,5%; en naranja, los valores de 1,4%.

Los niveles de iluminación máximos se alcanzan hacia las esquinas, mientras tanto los valores mínimos se registran a la mitad del espacio, próximo a los muros de cierre. Si se toma el factor de día separado a un metro desde la fuente de luz (4,2%), se alcanza una uniformidad de 0,33.

Posteriormente se realizaron nuevas simulaciones para validar la efectividad de las soluciones de ventanas inicialmente asumidas. (Fig. 10).

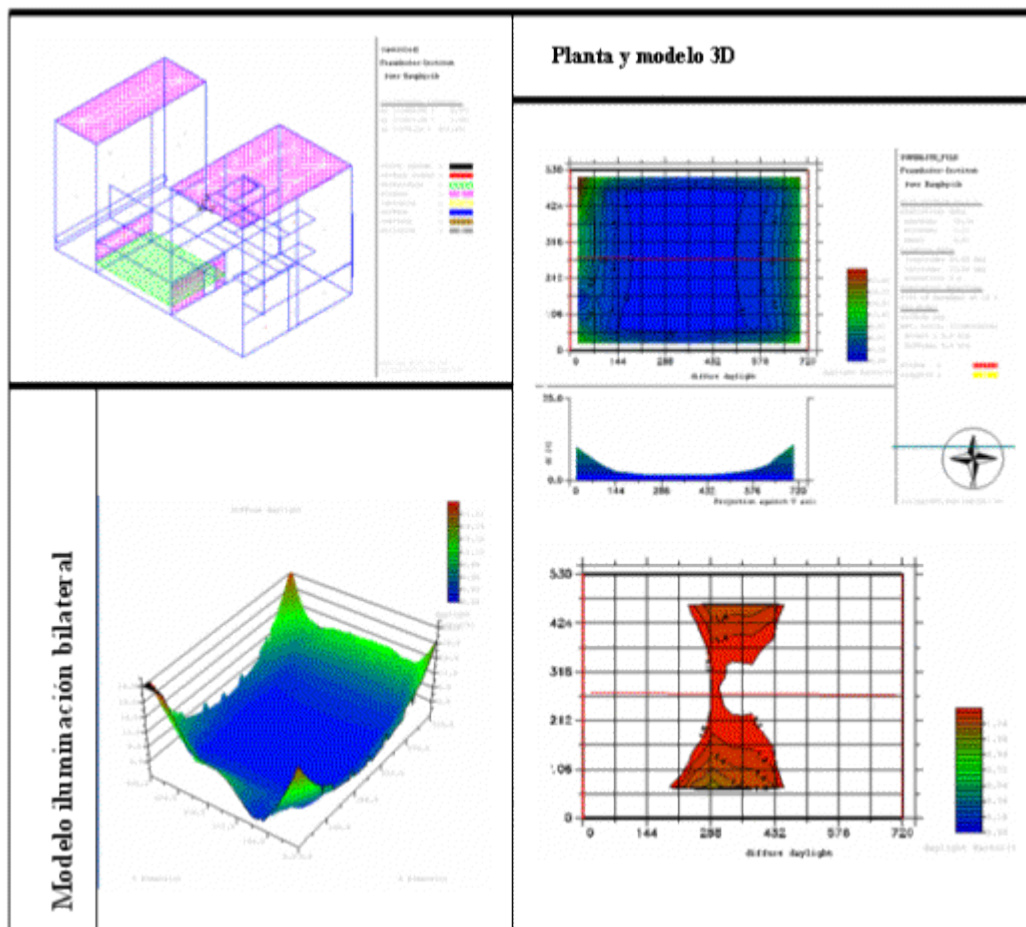


Fig. 10. Resultados de la simulación con SUPERLITE para uno de los modelos estudiados

Resultados

Los resultados de la simulación realizada para la planta baja con un área de vanos y transmitancia máxima se tabularon en función del ancho de los lotes. La amplitud necesaria de los patios se determinó para un cielo de diseño de 10 000 lux, según lo normado y para una opción de 15 000 lux, ya que como ha sido demostrado, la mayor parte del tiempo la luminancia de la bóveda celeste en Cuba es muy superior a 10 000 lux y, en todo caso, podría aceptarse que las soluciones propuestas requieran de iluminación artificial en las primeras horas de la mañana y últimas de la tarde, sobre todo en los meses de invierno. De todos modos, esto sería una opción que requeriría de un estudio de factibilidad económica que valore el uso del suelo y el consumo energético.

El recuadro amarillo de la figura 11 recoge la amplitud en metros requerida en el patio para garantizar la iluminación natural interior en las condiciones del modelo (ancho del lote y altura de los edificios), considerando una luminancia de la bóveda celeste de 10 000 lux. El recuadro violeta refleja el mismo valor, pero para un cielo de diseño de 15 000 lux, por lo cual es un valor menos conservador, es decir, una menor amplitud del patio.

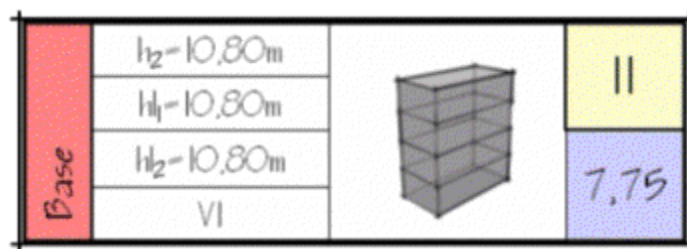


Fig. 11. Amplitud del patio requerida (en metros) en función de la altura de los edificios y la luminancia asumida en la bóveda celeste.

De manera general, a medida que se aumenta el ancho de la parcela la amplitud requerida de los patios disminuye. La influencia de las obstrucciones exteriores se reduce igualmente mientras el ancho del lote crece. El comportamiento en el patio fondo es menos variable.

Se calculó la ocupación de suelo (SC/ST) para cada uno de los anchos de lotes estudiados considerando fija la altura del módulo del frente y variando sólo la altura del módulo del fondo de 4-2 niveles. De acuerdo con las amplitudes de los patios interiores y de fondo necesarios para garantizar los niveles mínimos de iluminación interior normados, obtenidos en la simulación de los esquemas volumétrico-espaciales propuestos, los coeficientes de ocupación del suelo requeridos varían entre 0,44 y 0,67%, valores inferiores a los actuales, que se pretende mantener. Estos valores, que coinciden con resultados de investigaciones precedentes [González, 2003] se ofrecen en gráficos similares a los que se presentan a continuación, tanto para el patio interior como para el de fondo, en dependencia del ancho del lote y la altura de las edificaciones. (fig. 12).

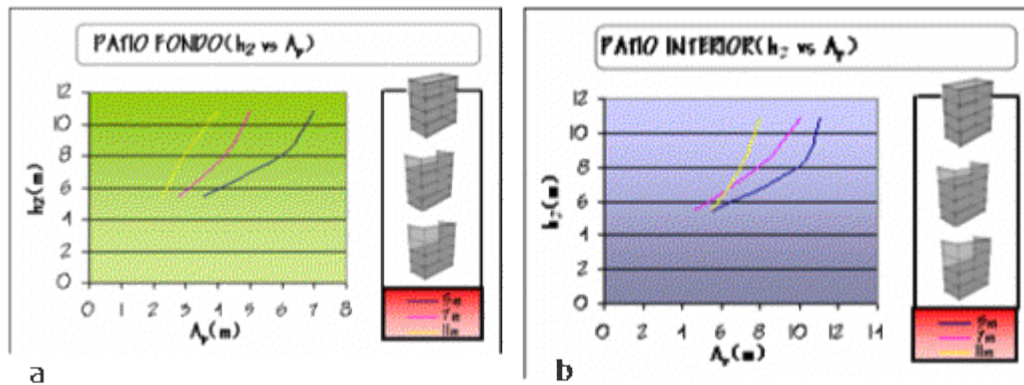


Fig.12. Amplitud del patio requerida, de acuerdo con la altura de los edificios y el ancho del lote. a) Fondo. b) Interior.

Los espacios que enfrentan la calle presentan mejores condiciones de iluminación natural que aquellos que dan al patio interior o de fondo, debido a la amplitud de la sección de la vía que minimiza la acción de las obstrucciones exteriores, lo cual permite una incidencia de la componente directa de la bóveda celeste hasta 1,8 m de profundidad. El área de vidrio debe ocupar 23% del área de vanos en planta baja, decreciendo hasta 20% en el segundo nivel. En las plantas superiores no es necesario el uso de vidrio y los cierres permeables con elevada trasmittancia deben estar protegidos de la radiación solar directa [Aguilera, 2005].

El patio interior no favorece la iluminación natural tanto como la calle, no solo por su confinamiento lateral, sino también debido al mayor porcentaje de aberturas y la consecuente disminución del coeficiente de reflexión de sus superficies. El uso de un área de vanos máxima en planta baja condiciona una ocupación más eficiente del suelo una vez resueltos los problemas de privacidad que ella produce. En el segundo nivel se puede emplear un cierre con una trasmittancia de 72%, manteniendo una luceta superior de vidrio transparente. No es apropiado el uso de la ventana miami opaca, pues el área de vanos necesaria ocuparía más de 80% del área de pared.

Los espacios que dan al patio de fondo requieren un área de vanos inferior a los que se vinculan con el patio interior, pues el muro de fondo puede ser tratado en su totalidad como elemento de elevado coeficiente de reflexión, siempre que se tomen precauciones para evitar el deslumbramiento. En consecuencia, se puede emplear la ventana miami opaca a partir del segundo nivel, manteniendo en este caso la luceta superior.

Conclusiones

- Es posible utilizar el módulo SUPERLITE del programa ADELIN para determinar los niveles de iluminación interior, empleando para ello el cálculo de factor de día que brinda el programa y tomando como referencia los valores reales de luminancia de la bóveda celeste, ya que los resultados que SUPERLITE ofrece a partir del modelo de cielo uniforme resultan conservadores.

- El cielo de diseño de 10 000 lux provee una amplia cobertura durante todo el año, siendo su punto crítico el mes de diciembre a las 4:00 p.m. Esta condición provee un entorno de luz natural de 7-9 horas durante todo el año, cumpliendo el nivel de iluminación normado en viviendas bajo las condiciones de cielo asumidas.
- Si se aceptara una luminancia de la bóveda celeste de 15 000 lux, podrían admitirse mayores ocupaciones del suelo, a partir de usar la iluminación artificial en determinados momentos del día y del año. Esto requiere de un estudio de factibilidad económica.
- Se valida el método simplificado de iluminación unilateral en el cual, partiendo de una retícula fija, cada lado aporta la mitad del valor normado al considerar un espacio con iluminación bilateral.
- Las dimensiones de los vanos deben disminuir a medida que se crece en altura, ya que aumenta la componente de luz directa por la menor obstrucción del contexto; así se favorece una mayor reflexión en las paredes hacia las plantas bajas.
- En las plantas altas, cuando se reduce la protección del contexto, debe garantizarse la protección solar complementaria de la ventana.
- Aprovechando la iluminación proveniente desde la calle (área más favorecida) se puede reducir la abertura de los cierres hacia el patio para obtener mayor luz reflejada hacia la planta baja.
- De acuerdo con los resultados obtenidos, el COS actual de Centro Habana, de aproximadamente 0,8, resulta muy alto para garantizar condiciones ambientales apropiadas en los espacios interiores de las nuevas viviendas a construir, atendiendo particularmente a los requerimientos de iluminación natural interior.
- Para garantizar los niveles de iluminación normados en el interior de la vivienda en la zona de estudio, los nuevos edificios multifamiliares que se proyectan insertar no deben sobrepasar una ocupación de la parcela de 67%.
- A medida que crece el ancho del lote se aprovecha mejor la iluminación natural, por tanto resulta conveniente en caso de existir dos parcelas continuas disponibles conformar un lote único siempre que se respete la parcelación característica de la zona.
- Según el esquema volumétrico espacial propuesto, las amplitudes requeridas de los patios interiores varían, en dependencia del ancho del lote y la altura de los edificios, entre un mínimo de 3,5 m y un máximo de 11 m, y la de los patios interiores oscila entre 2 y 7 m.

Bibliografía

- AGUILERA, M. «Protección solar en edificios multifamiliares de vivienda en Centro Habana. Ejemplo de proyecto», Trabajo de Diploma. Tutora: Dra. Arq. Dania González Couret. La Habana: Facultad de Arquitectura, ISPJAE, 2005.
- ALFONSO, ALFONSO; GISELA DÍAZ Y ANA MARÍA DE LA PEÑA. «Por el rescate de la tradición», en *Revista Arquitectura y Urbanismo*, No. 2. La Habana: ISPJAE, 1989. pp. 20-25.
- CHIONG, Y E Y. LUACES. «Evolución histórico-tipológica de los edificios multifamiliares en Centro Habana. Comportamiento ambiental». Trabajo de Diploma. Tutora: Dra. Arq. Dania GONZÁLEZ COURET. La Habana: Facultad de Arquitectura, ISPJAE, 2005.
- DE LA PEÑA, A. M. «CINU: Cálculo de iluminación natural unilateral», software. La Habana: Facultad de Arquitectura, ISPJAE, 1991.
- . «Iluminación natural». Tesis en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Técnicas. La Habana: Facultad de Arquitectura, ISPJAE, 1992.
- GÓMEZ, H. «Nuevos edificios de vivienda en Centro Habana: Simulación de la iluminación natural interior». Trabajo de Diploma. Tutora: Dra. Arq. Dania González Couret. La Habana: Facultad de Arquitectura, ISPJAE, 2005.
- GÓMEZ, RICARDO. «Estudio de la solución volumétrico-espacial de edificios multifamiliares de vivienda en la ciudad de La Habana», Tesis de Maestría en Vivienda. Tutora: Dra. Arq. DANIA GONZÁLEZ COURET. La Habana: Facultad de Arquitectura, ISPJAE, 2001.
- GONZÁLEZ, DANIA. «Land Use vs. Indoor Environment», *Proceeding PLEA 2003*. Santiago de Chile: Universidad Católica de Chile, 2003.
- PÉREZ, A. «Edificios multifamiliares en zonas centrales de la ciudad. Municipio Centro Habana». Tesis de Maestría. Tutora: Dra. Arq. Dania González Couret. La Habana: Facultad de Arquitectura, ISPJAE, 2005.
- ZORRILLA, A. Y H. WELLS. «Soluciones volumétrico-espaciales para nuevos edificios de vivienda a insertar en zonas centrales de la ciudad de La Habana». Trabajo de Diploma. Tutora: Dra. Arq. Dania González. La Habana: Facultad de Arquitectura, ISPJAE, 2004.

La inteligencia artificial al servicio de las fuentes renovables de energía. Modelo neuronal de un turbogenerador tipo P-4-20/2TK con parámetros desviados

Artificial intelligence at the service of renewable energies. Neural model of a turbogenerator type P 4-20/2TK with deviated parameters

*M.Sc. Julio R. Gómez Sarduy**

*Dr.C. Marcos A. de Armas Teyra**

e-mail: jgomez@ucf.edu.cu y marmas@ucf.edu.cu

**Centro de Estudios de Energía y Medio Ambiente (CEEMA),
Universidad de Cienfuegos, Cuba.*

Resumen

Cuando se necesita modelar o realizar el balance energético de una central termoeléctrica, de una planta de generación independiente o de una industria con generación propia es necesario obtener, con la precisión necesaria, el modelo de los diferentes componentes del sistema. Un componente fundamental es el turbogenerador, el cual ha sido modelado de diversas formas a partir del conocimiento de su curva de eficiencia y del salto entálpico en la turbina o conociendo la curva de consumo específico dada por el fabricante. En este trabajo se aborda la elaboración del modelo de consumo de vapor de un turbogenerador cuando sus parámetros difieren de los nominales, como ocurre durante la explotación real, ya sea de forma estable o transitoria. El modelo está basado en una red neuronal artificial entrenada a partir de variables de operación obtenidas de las curvas de diseño sin requerir de pruebas o mediciones especiales.

Palabras clave: Modelación de turbogeneradores y redes neuronales.

Abstract

When it is necessary to model or to carry out the energy balance of a thermal power plant, an on-site generator, or an industry with its own generation, it is necessary to get, with the necessary precision, the model of the system's different components. A fundamental component is the turbogenerator, which has been modeled in different ways from the knowledge of its efficiency curve and the enthalpy jump in the turbine or knowing the specific consumption curve given by the manufacturer. In this paper we discuss the processing of the model of steam consumption of a turbogenerator when its parameters differ from the nominal ones as it happens during real life exploitation, either in a stable or transitorily way. The model is based on an artificial neural network trained from variables of operation from the design curves without needing proofs or special measurements.

Keywords: Modeling of turbogenerators and neural network.

Introducción

La planta de generación eléctrica en un sistema de cogeneración con fuente renovable de energía, a partir de la biomasa, es un elemento fundamental del ciclo térmico en el que tiene lugar la transformación y entrega de importantes flujos energéticos. En ella se producen la energía eléctrica y la energía térmica necesarias para el proceso de producción. En Cuba, como respuesta a la obsolescencia y a la introducción de nuevas tecnologías y mecanismos accionados eléctricamente, se realizaron una serie de inversiones dirigidas fundamentalmente a la ampliación de la base energética en la industria azucarera, con el objetivo de autoabastecerse y también de lograr excedentes moderados de energía eléctrica a partir del bagazo que se exportan a las fábricas sincronizadas al Sistema Electroenergético Nacional (SEN). Una parte importante de estas plantas de generación poseen turbogeneradores del tipo P-4-20/2TK de 5 000 KVA que aún están en explotación.

El análisis del comportamiento de estas plantas es fundamental cuando se efectúa un balance energético o se desea realizar un estudio del uso racional y la eficiencia energética en la industria. En estas condiciones, si el interés es lograr que los resultados de los cálculos reflejen fielmente la realidad, es muy importante considerar las condiciones reales de los parámetros del vapor a la entrada de las turbinas. Esto se debe a la dependencia existente entre los parámetros iniciales y finales de la sustancia de trabajo (en este caso vapor de agua) y su consumo total y específico en una instalación de este tipo.

Cuando existe diferencia entre la presión de vapor vivo efectivo a la entrada de la máquina y su valor nominal, se modifica sustancialmente la potencia que desarrolla la turbina. Esta dependencia es función de la magnitud absoluta de la desviación, del método de distribución del vapor en la turbina y del régimen en que ésta funciona. La potencia de la turbina también es afectada por variaciones en la temperatura del vapor de entrada y por la presión del vapor de escape, ya que ambos parámetros influyen en el rendimiento.

La modelación matemática de un sistema que ha sido utilizada tradicional y extensivamente para resolver los problemas de ingeniería está basada en establecer relaciones que representan, con mayor o menor exactitud, el comportamiento real de sus elementos. Estas relaciones se desarrollan a partir de principios físicos, en ocasiones complejos, debido a las no linealidades presentes o a determinadas incertidumbres en el comportamiento de las variables. Lograr un modelo para determinar el consumo de vapor de una turbina con parámetros del vapor fuera de los nominales o desviados, es un problema complejo que requiere incluso del conocimiento de factores de diseño.

Una alternativa de solución propuesta en este trabajo, y que resuelve el problema, es modelar el turbogenerador a partir de redes neuronales artificiales (RNA), una herramienta de inteligencia artificial que tiene la capacidad de representar un sistema sin preocupaciones adicionales por

el tamaño o la complejidad del proceso. Este modelo neuronal puede constituir un nuevo tipo de sensor o ser incorporado como un subsistema en aplicaciones más complejas.

El trabajo se basa en la experiencia del Centro de Estudios de Energía y Medio Ambiente de la Universidad de Cienfuegos, donde se han desarrollado y se desarrollan sistemas inteligentes con aplicaciones energéticas fundamentados en las RNA y algoritmos genéticos, fundamentalmente para el control de la operación y la eficiencia de los sistemas energéticos. Esta experiencia se ha aplicado a un sistema de cogeneración con biomasa cañera, para evaluar el comportamiento de las unidades de generación distribuida en las redes donde hacen efectiva su penetración, así como para determinar la eficiencia en operación de los motores eléctricos asincrónicos y para predecir demandas y gastos futuros con vistas a sugerir estrategias de ahorro, mantenimiento e impacto ambiental. También se utilizan en la toma de decisiones de control y explotación y para establecer la operación y efectuar el despacho económico de energía eléctrica en una red de 34,5 kV.

La respuesta de una RNA es frecuentemente más precisa que las respuestas generadas por las precisiones ingenieras, ya que se fundamenta solo en la interacción de entradas y salidas sin la formulación y el conocimiento previo de complicadas ecuaciones. Además, con la aplicación de RNA el carácter aproximado puede ser gradualmente reducido en la medida que se trabaja y se obtiene más información del sistema.

Características de explotación de la unidad

El consumo de vapor de los turbogeneradores del tipo P-4-20/2TK de 5 000 kVA está definido por las características de explotación (Fig. 1), que son: el gráfico de dependencia de la potencia eléctrica respecto al consumo de vapor y los gráficos de correcciones de la presión y la temperatura de vapor directo y de escape en dependencia del consumo de vapor de la turbina [*Turbinas...*].

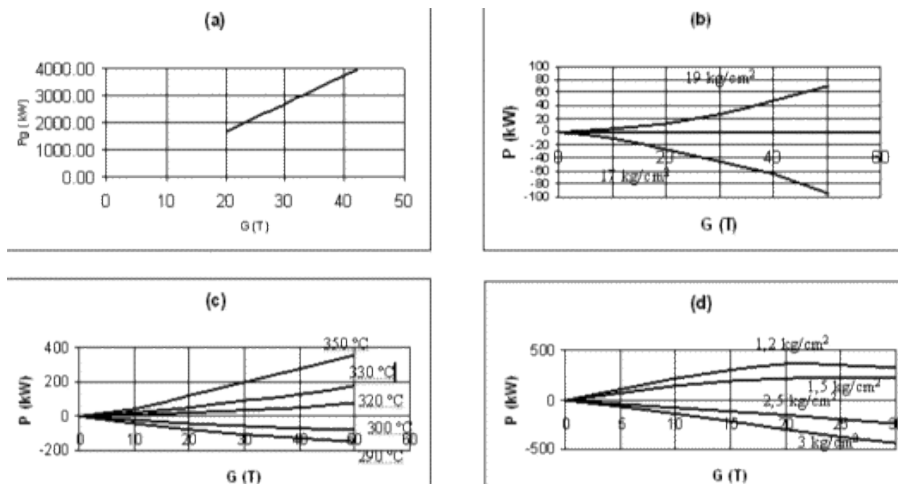


Fig. 1. Características de explotación del turbogenerador.
 a) Dependencia de la potencia eléctrica respecto al consumo de vapor para $P_0 = 18 \text{ kg/cm}^2 \text{ abs}$, $T_0 = 310 \text{ }^\circ\text{C}$ y $P_2 = 2 \text{ kg/cm}^2 \text{ abs}$.
 b) Corrección por presión de vapor directo.
 c) Corrección por temperatura del vapor directo.
 d) Corrección por presión de escape.

Diseño de las redes neuronales artificiales (RNA)

En problemas de ingeniería con una naturaleza no lineal se han aplicado con éxito a las RNA. Las RNA pueden «aprender» el comportamiento físico de un sistema a partir de sus juegos de datos y reproducirlo con una precisión adecuada a las necesidades.

En la figura 2 se muestra el esquema de una neurona artificial. Las cantidades de entrada x_i se combinan linealmente con los pesos w_i y constituyen el argumento de una función de activación para obtener las salidas. Se emplean diferentes tipos de funciones, como la sigmoideal, lineal, hiperbólica, tangente, etcétera.

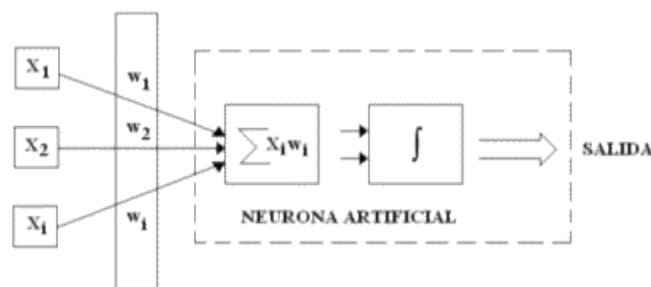


Fig. 2. Neurona artificial con función de activación.

Las neuronas simples se combinan para construir una red cuya arquitectura puede ser muy variada. La topología, las características de los nodos y las reglas de aprendizaje o entrenamiento caracterizan el modelo de la RNA. La literatura especializada sugiere una red de alimentación progresiva que emplea el mecanismo matemático de retropropagación para «aprender y ajustar», o sea, adaptar los pesos.

La arquitectura de la red utilizada en este trabajo se muestra en la figura 3. La primera capa de la izquierda contiene las neuronas de entrada, la capa intermedia contiene las neuronas ocultas y la última capa de la derecha una neurona de salida. Aunque puede emplearse una arquitectura con múltiples capas ocultas, se ha demostrado que con una sola capa oculta usualmente es suficiente [Boccaletti, *et al.*, 2001]. El vector de entrada (kW , Po , To , $P2$) está constituido por la carga eléctrica, la presión del vapor directo, la temperatura del vapor directo y la contrapresión. Estas magnitudes determinan el consumo de vapor G de la turbina, el cual constituye la salida de la RNA.

La red fue entrenada con 224 juegos de datos representativos de las posibles combinaciones de parámetros del vapor y potencia generada con un rápido aprendizaje y convergencia mostrado en la figura 4. Cada variable en el conjunto de datos fue normalizada utilizando el máximo valor de la variable, como se recomienda en Halpin y Burch [1997].

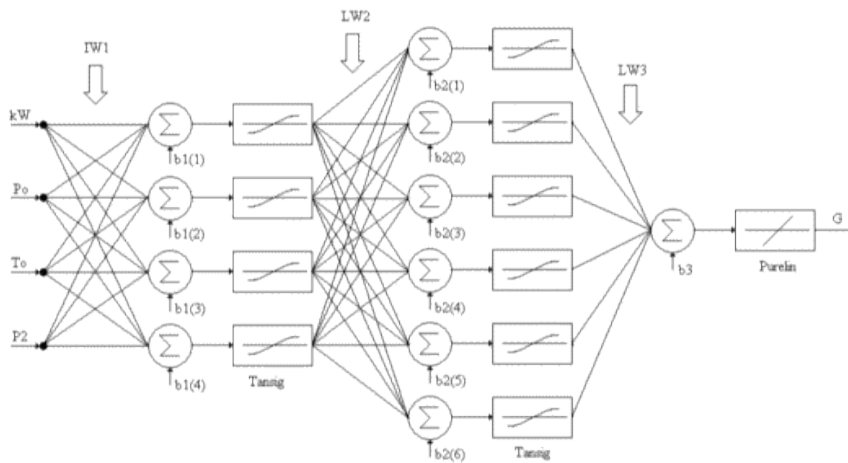


Fig. 3. Arquitectura de la RNA diseñada para simular el consumo de vapor del turbogenerador.

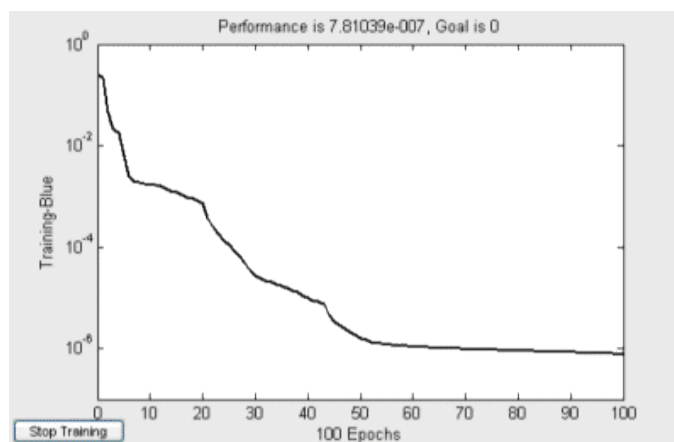


Fig. 4. Comportamiento del entrenamiento para la red anterior.

En este caso la red tiene cuatro neuronas de entrada y una de salida, en correspondencia con el número de entradas y salidas previstas. Seleccionar el número adecuado de neuronas ocultas es un aspecto importante y para ello se entrenó la red variando el número de éstas y manteniendo otros parámetros constantes. El entrenamiento se realizó para cuatro, cinco, seis, siete y ocho neuronas en la capa oculta. La figura 5 muestra el error medio cuadrático —*Mean Square Error (MSE)*—, como función del número de neuronas ocultas. Se puede observar que el mejor comportamiento se logra con seis neuronas en la capa oculta, razón por la cual se ha escogido como arquitectura 4-6-1.

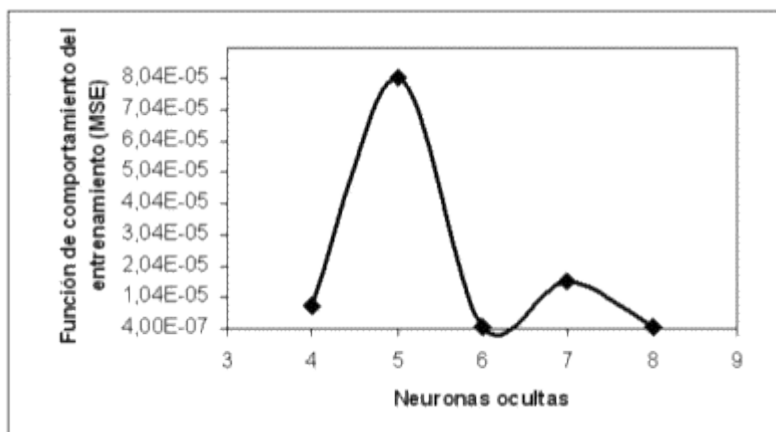


Fig. 5. Optimización del número de neuronas de la capa oculta. Arquitectura: 4-n-1. Razón de aprendizaje: 0,001. Épocas: 100.

Simulación neuronal

La simulación se efectuó para un conjunto de datos tomados de la información del fabricante. Los resultados de consumo de vapor obtenidos por la RNA, para diversas condiciones de explotación definidas para parámetros del vapor directo desviados por encima y por debajo de los de diseño y diferente cargabilidad, se muestran en la tabla 1.

Tabla 1. Comparación entre resultados de la simulación de la RNA y el método gráfico del fabricante

Condiciones de explotación			Consumo de vapor (T)	
Potencia, kW	Parámetros desviados del vapor		Modelo neuronal	Método del fabricante
	Presión de vapor directo, kg/cm2abs	Temperatura del vapor directo, °C		
4 000	17	290	44,47	44,49
4 000	19	320	41,19	41,01
3 500	17	290	39,39	38,28
3 500	19	320	36,56	36,00
3 000	17	290	34,36	34,98
3 000	19	320	31,91	32,11

Conclusiones

1. Este trabajo demuestra que es posible el empleo de una RNA para modelar el consumo de vapor de una planta de generación eléctrica de un central azucarero bajo condiciones de operación diferentes a las de diseño. En este caso la RNA fue optimizada para determinar el número de neuronas de la capa oculta que ofrece un mejor comportamiento y, una vez entrenada, es capaz de predecir el consumo de vapor con buena precisión dentro del dominio establecido.
2. Las investigaciones futuras pueden dirigirse a entrenar la red con datos experimentales obtenidos de las lecturas de la instrumentación de campo para lograr un patrón de comportamiento que tenga en cuenta el deterioro de la eficiencia debido al desgaste, las reparaciones efectuadas, etc., además de incluir ésta en un modelo global del bloque energético con el objetivo de optimizar económicamente su operación.
3. Esta red puede constituir un nuevo tipo de sensor que evita utilizar platillos, orificios, bridas, botellas de compensación, logómetros especializados, etc., y puede ser incorporada al software de control de la estación de cogeneración, a un microchip o a un programa lógico controlable (PLC).

Bibliografía

- BOCCALETTI, C.; G. CERRI Y B. SEYEDAN. «A Neural Network Simulator of Gas Turbine with a Waste Heat Recovery Section». *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, vol. 123, abr., 2001, pp. 371-376.
- GÓMEZ SARDUY, J. R. «Aspectos a considerar en una empresa cogeneradora de la industria azucarera». Tesis de Maestría. Facultad de Ingeniería Eléctrica, Universidad Central de Las Villas, Cuba. 1996.
- HALPIN, S. M. Y R. F. BURCH. «Applicability of Neural Networks to Industrial and Commercial Power Systems: A Tutorial Overview». *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 33, No. 5, sep., 1997. pp 1355-1361.
- Turbinas de vapor de contrapresión P-2,5-20/2TK y P-4-20/2TK*. Descripción técnica e instrucciones de explotación 103-M-0225. Moscú. Tercera edición.

Potencialidades energéticas y medioambientales del árbol *Jatropha curcas* L en las condiciones edafoclimáticas de la región semiárida de la provincia de Guantánamo

Energy and environmental potential of the *Jatropha curcas* L tree in the edaphic-climate conditions of the semiarid region of the province of Guantnamo

*M.Sc. José Angel Sotolongo Pérez**

*Dr. Pedro A. Beatón Delgado***

*Ing. Armando Díaz García****

*Lic. Sofía Montes de Oca López**

*Lic. Yadiris del Valle Atala**

*Ing. Soraya García Pavón**

**Centro de Aplicaciones Tecnológicas para el Desarrollo Sostenible (CATEDES), del Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente (CITMA), Guantánamo, Cuba.*

***CITMA, Santiago de Cuba, Cuba.*

****Facultad de Ingeniería Química, Universidad de Oriente, Cuba.*

e-mail: sotogtmo@enet.cu y pbeaton@yahoo.es

Resumen

En Cuba las biomásas de origen agroforestal son abundantes en muchas regiones y no se aprovechan completamente. Entre el bagazo, la paja de caña, la cáscara de arroz y de café, el aserrín, las astillas y los residuos forestales se producen cada año alrededor de 400 000 toneladas equivalentes de petróleo (tep), lo que representa aproximadamente 10% de la producción anual de petróleo crudo y gas acompañante del país [Rodríguez, 2003]. Una nueva especie botánica, que crece silvestre sin aparentes usos económicos (solo como cerca viva y sus semillas son antiparasitarias), podría convertirse en breve tiempo en una nueva alternativa para potenciar el desarrollo sostenible en zonas rurales. La *Jatropha curcas* Leen, más conocida como piñón botija o piñón de leche por los campesinos en el Oriente cubano, pertenece a la familia de las Euphorbiaceae. Estudios desarrollados por el Centro de Aplicaciones Tecnológicas para el Desarrollo Sostenible (CATEDES), del Ministerio de Ciencia Tecnología y Medio Ambiente (CITMA), en conjunto con el ICINAZ, el Complejo Agroindustrial (CAI) Bartolomé Masó, ambos del Ministerio del Azúcar (MINAZ) y el CEINPET, del Ministerio de la Industria Básica (MINBAS), demuestran las potencialidades energéticas y medioambientales de este cultivo energético como un alternativa para el desarrollo energético sostenible, permitiendo la producción de nuevos combustibles: biodiésel a partir de su aceite vegetal (no comestible) y otras biomásas residuales (cáscara del fruto, pericarpio o cascarilla de sus semillas, la torta o cake residual de la extracción del aceite y la madera combustibles). También contribuye a importantes soluciones

ambientales: mejoramiento y conservación de suelos, incremento de la biodiversidad mediante la reforestación y mitigación de las emisiones de gases contaminantes. Otro aspecto de la investigación es el desarrollo de una tecnología agrícola que permita el uso de áreas agrícolas abandonadas por la producción cañera debido al empobrecimiento de los rendimientos, así como el uso de tierras semidesérticas y secas, como las de la franja costera sur de la provincia de Guantánamo. También se crean nuevos empleos y se potencia un desarrollo agroindustrial en zonas rurales, lo que genera nuevas materias primas o rublos exportables y disminuye las importaciones de portadores energéticos (combustibles fósiles), y finalmente incrementa la participación de la biomasa en la matriz energética de Cuba.

Palabras clave: *Jatropha curcas*, biomasa, biodiésel, glicerol, tranesterificación, metiléster, desarrollo sostenible, aceite vegetal, nuez, cáscara del fruto, pulpa, pergamino o cascarilla, tonelada de petróleo equivalente.

Abstract

In Cuba the biomasses of agroforestry origin are abundant in a many regions but they are not fully exploited. Every year the country produces around 400 000 tons of oil equivalent (tep) considering bagasse, sugar cane straw, rice and coffee shells, sawdust, wood chips and forest residues, what represents roughly 10% of the annual production of crude oil and associated gas in the country (Rodríguez, 2003) . A new botanical species, that grows up wild without apparent economic uses (only as a living fence and its seeds are antiparasitic), could become in a short time in a new alternative to promote sustainable development in rural areas. The *Jatropha curcas* Lean, also known as Piñón Botija by peasants in the Eastern part of the country, belongs to the Euphorbiaceae's family. Studies carried out by the Center of Technological Applications for Sustainable Development (CATEDES, in Spanish), an institution that falls under the Ministry of Science, Technology and Environment (CITMA, In Spanish), together with ICINAZ, the Agroindustrial Complex (CAI, in Spanish) Bartolomé Masó, both from the Ministry of Sugar (MINAZ, in Spanish) and the Center of Oil Research (CEINPET, in Spanish), from the Ministry of The Basic Industry (MINBAS, In Spanish), demonstrated the energy and environmental potential of this fuel crop as an alternative for the sustainable energy development, by means of the production of new fuels: biodiesel from its vegetable oil (non-edible) and other residual biomasses (fruit shell, pericarp or seeds husk, the cake or residual cake of the extraction of oil and the wood fuel). Also contribute to important environmental solutions: the improvement and soil conservation, increasing biodiversity by means reforestation and mitigation of the emissions of polluting gases. Another aspect of the research is the development of an agricultural technology that enables the use of agricultural areas abandoned by the sugar cane production due to the decrease of the productivity, as well as the use of semiarid and dry lands, like the ones of the Southern coastal strip of the province of Guantánamo.

Also this creates new jobs and enhances the agroindustrial development in rural areas, which generates new raw materials or export items and decrease the import of energy carriers (fossil fuels) and finally, increment the share of biomass in the Cuban energy mix.

Keywords: *Jatropha curcas*, biomass, biodiesel, glycerol, tranesterification, metilester, sustainable development, vegetable oil, nut, fruit shell, pulp, husk, ton of oil equivalent

Introducción

El nombre del género *Jatropha* deriva del griego: *jatrós* (doctor) y *trophé* (comida), que implica usos medicinales. Según Correll [1982], *curcas* es el nombre común para la nuez del *Phycis* en Malabar, India.

Es originaria de México y Centroamérica, pero crece en la mayoría de los países tropicales; se cultiva en América Central, Sudamérica, sureste de Asia, India y África [Schmook y Serralta-Peraza, 1997]. En Cuba está presente en casi todas las provincias y la Isla de la Juventud, y se desarrolla de forma silvestre como cerca viva.

La planta *Jatropha curcas* L. (nombre científico) pertenece a la familia de las Euphorbeaceae (familia Castor) [Salas, *et al.*, 1994]. Es una oleaginosa de porte arbustivo que tiene más de 3 500 especies agrupadas en 210 géneros; alcanza de 3 a 6 m de altura y tiene una longevidad mayor de 50 años; se destaca por su producción de biomasa, versatilidad de usos y adaptabilidad a condiciones marginales.

Actualmente uno de los grandes problemas de la humanidad es su dependencia con relación a los combustibles fósiles, que además de ser limitados provocan un fuerte impacto ambiental y trastornos económicos, en especial a los países del Sur. El reto está en conseguir que las fuentes renovables de energía vayan sustituyendo paulatinamente esos combustibles; una alternativa puede ser la biomasa, en especial aquella que puede convertirse en fuentes productoras de aceite vegetal, como es el cultivo de la *Jatropha curcas* L. en tierras abandonadas, secas y semiáridas no comprometidas con la alimentación humana.

El cultivo de esta planta cada día se extiende con mayor fuerza en países como India, Brasil, Guatemala y algunos países africanos, los cuales están trabajando para perfeccionar las técnicas del cultivo y los procesos industriales de sus diferentes biomasa y/o residuos. Ya en Cuba, en las provincias de Guantánamo y Granma, se desarrollan los primeros cultivos energéticos impulsados por el CITMA, el MINAZ y el apoyo del MINBAS.

Una estrategia encaminada al desarrollo de este cultivo como fuente de energía y productos renovables podría permitir:

- Reducir la pobreza creando empleos, en especial para el sector femenino, y creando nuevos productos, como combustibles, medicinas, insecticidas, lubricantes, fertilizantes, etcétera.

- Solucionar problemas ambientales, como la erosión y la reforestación, además de mejorar microclimas y mitigar los gases de efecto invernadero, etcétera.
- Incrementar la calidad de vida en el campo.
- Reducir el consumo de leña en zonas rurales.
- Reducción de las importaciones en zonas rurales.
- Disminuir la vulnerabilidad alimentaria.
- Desarrollar tecnologías descentralizadas, en especial en la solución de la energización.

Materiales y métodos

El objeto de esta investigación fue evaluar los aportes de biomasa de un agrosistema forestal de *Jatropha curcas* en las condiciones de la región semiárida de la franja costera sur de la provincia de Guantánamo, para lo cual se hizo una evaluación cuantitativa y cualitativa mediante el estudio experimental de las características físico-químicas de cada uno de sus componentes o residuos agroindustriales, lo que permitió determinar las potencialidades energéticas en dependencia del poder calórico o potencia calorífica (PCS y PCI) mediante métodos experimentales (uso de una bomba calorimétrica) o analíticos (uso de la composición elemental de los combustibles C-H-O-N-S, humedad y cenizas, todos expresados en tanto por ciento). La determinación de estos parámetros físico-químicos, junto a la evaluación fenológica y productiva del cultivo, permiten estimar la producción de biomasa con fines energéticos y la producción de energía de este agrosistema forestal, lo que facilita la selección y diseño de las tecnologías para sus usos, con grandes impactos socioeconómicos y ambientales.

Características de los frutos

Los frutos son cápsulas drupáceas de 2 cm de diámetro, como una pelotita de ping-pong de color café claro, donde se encuentran de dos a tres semillas del tamaño, forma y apariencia de una almendra, aunque más blancuzca, rodeadas por un material en forma de pulpa y la cáscara del fruto, que se convierte en un material pergaminoso al secarse. Una hectárea de cultivo energético de *Jatropha curcas* (en base a 400 árboles/ha) puede producir 3 500 kg de frutos (con un peso promedio por fruto de 3,3 g).

Cáscara del fruto

Para obtener la almendra es preciso pelar o descascarar el fruto, lo que puede hacerse de forma manual o con una máquina descascaradora. La producción de cáscara del fruto es de 1 000 kg/ha (30% del peso del fruto), que también puede pasarse por un molino de bola y convertirse en un material magnífico como biofertilizante después de convertirla con compost. La cáscara tiene un valor calórico de aproximadamente 2 651 kcal/kg (15% de humedad), por lo que también puede ser empleada como combustible.

La cáscara también puede transformarse, mediante un proceso de digestión anaerobia, en biogás y biofertilizante (efluente del digestor), lo

que podría optimizar los rendimientos energéticos. En Nicaragua fue investigada la bioconversión de este material en digestores anaerobios

de flujo ascendente, a temperatura ambiente, con tiempos de retención de tres días y se alcanzaron producciones de biogás adecuadas.

La semilla

Una hectárea de la variedad nativa podría producir unos 2 500 kg de semillas (70% del peso del fruto y 5 % de humedad), de color negro y forma oblonga elipsoidal con estrías oscuras y prominentemente reticuladas, que pueden medir como promedio alrededor de 17,41 mm de largo (entre 16,3 y 19,0 mm) y 11,45 mm de ancho (entre 10,0 y 12,8 mm). El peso de la semilla (para 1 000 unidades) es aproximadamente 840 g, es decir, 1 190,5 semillas por kilogramo, como promedio. Cada semilla pesa como promedio 0,84 g en la variedad nativa, según los resultados experimentales obtenidos en el segundo año del cultivo. De este peso, 74% corresponde a la nuez y 26% a la cascarilla o pergamino. Este último no se puede eliminar para su uso como portador energético en el caso de usar máquinas extractoras Sundhara (proyecto alemán), debido a que facilita el proceso de extracción del aceite. La cascarilla tiene un valor calórico de 4 108 kcal/kg (10% de humedad), por lo que puede ser empleada como portador energético.

La variedad de Cabo Verde posee una semilla más pequeña (el peso de mil granos es aproximadamente de 682 g y la longitud de la semilla es aproximadamente de 16,8 mm). Esta variedad se encuentra en casi todos los países el mundo, excepto Centroamérica (en Cuba se han sembrado unas 9 ha recientemente, en las provincias de Guantánamo y Granma; se adaptaron muy bien a las condiciones edafoclimáticas de esas regiones secas y se encuentran en proceso de evaluación.

La semilla de la variedad de Nicaragua tiene un peso por 1 000 granos de aproximadamente 878 g; la longitud de la semilla es de aproximadamente 20,3 mm. El rendimiento de los árboles parece ser el mismo, pero tiene menos frutas por árbol que la variedad africana.

En otra variedad mexicana reportada como no tóxica el peso de mil granos está entre 524 y 901 g. Birgit y Schmook reportan existencia de estas semillas en la zona de Misantla, Veracruz, y son muy apreciadas por la población como alimento.

Las variedades nativas de Centroamérica (Nicaragua, México y Cuba) son diferentes a la de Cabo Verde, con hojas más grandes y redondeadas y una talla mayor, con semillas más grandes. Aunque esta última en Cuba parece ser más resistente ante el estrés por sequía.

Cada 100 g, la semilla puede contener 6,6 g de agua, 18,2 g de proteína, 38,0 g de aceite vegetal, 33,5 g de hidrato de carbono total, 15,5 g de fibra y 4,5 g de ceniza [Duque y Atchley, 1983].

Las semillas son longevas y debe reducirse su humedad hasta alcanzar entre 5 y 7% antes de almacenarse. A la temperatura ambiente las semillas pueden retener una alta viabilidad por lo menos durante un año. Esa característica de longevidad le da ventajas en relación con otras oleaginosas. Sin embargo, con el tiempo el aceite varía su pH, lo que afecta después el proceso de transesterificación para producir biodiésel (lo hace más ácido), lo que encarece el proceso industrial al requerir un consumo mayor de materia prima.

Las semillas pueden ser prensadas en cualquier máquina extractora de aceite diseñada para su procesamiento a presión en frío y se obtienen dos productos:

- El primero es un jugo o aceite de la semilla, que puede ser utilizado en la fabricación de jabones, insecticidas, lubricantes; como combustible para las cocinas y faroles de alumbrado y para la producción de biodiésel. También puede emplearse en la alimentación humana (después de desintoxicar).
- El segundo es un residual conocido con el nombre de torta o cake.

El aceite vegetal

Las semillas contienen alrededor de 38% de aceite en peso (aunque hay autores que reportan cifras hasta aproximadamente 50%). De esta cifra se puede obtener entre 27 y 32% usando máquinas extractoras a presión en frío. Este aceite es principalmente usado para la producción de jabón, insecticida y como combustible en forma de aceite puro o después de transesterificar (metilester o etilester), como biodiésel para ser usado en motores, cocinas y faroles para el alumbrado. Como biodiésel se emplea en mezclas B2, B5, B10, B20 o puro (B100). Si se usan algunos extractos, como solventes orgánicos, la extracción puede aumentar.

Con el empleo de una máquina Sundhara de fabricación local se han obtenido extracciones de aceite del orden de 29% y se han logrado rendimientos de 3,3 kg de semillas para producir 1 kg de aceite puro (1,086 L de aceite), con las siguientes características físico-químicas determinadas en el Laboratorio de la Refinería Hermanos Sainz de Santiago de Cuba.

VCI: 8 955,8 kcal/kg.

VCS: 9 335,0 kcal/kg.

Densidad a 60 OF g/cm³: 0,9207.

Viscosidad cinemática a 20 °C cst: 44,31.

Relación C/H: 13,11.

Azufre en peso: 0,04%.

Agua en peso: 0,21%.

Una hectárea podía producir, en las condiciones predeterminadas en este trabajo, unos 750 kg de aceite puro de *Jatropha curcas* (30% del peso de la semilla), con un valor calórico de 9 335,0 kcal/kg, y puede alcanzar menos de 4% de acidez cuando está fresco.

La torta o cake

Es una mezcla de carbohidratos, fibra, proteína y aceite que no se pudo extraer, la cual contiene algunos componentes tóxicos; aún así es muy útil como biofertilizante por su alto contenido en nitrógeno. Después de eliminados los elementos tóxicos se podría transformar en un excelente alimento balanceado para el ganado, con un contenido proteínico superior a 50%. Aproximadamente 1 000 kg de este material podían obtenerse por hectárea, y también puede usarse como combustible, ya que tiene un valor calórico de 2 651 kcal/kg (3% de humedad). La variedad mexicana no es tóxica (contenidos de ácido forbólico y curcina muy bajos), por lo que sus semillas producen una torta de mayor calidad para usos económicos. Se prevé la adquisición de estas semillas para su evaluación. Investigaciones en Nicaragua ya han demostrado que este material es un buen sustrato para la producción de biogás en reactores UASB.

La madera combustible

Una hectárea de *Jatropha curcas* puede aportar unas 20 t de biomasa (base seca), considerando 200 kg de biomasa por árbol (población de 400 árboles/ha) después de los seis años.

La madera de las podas obligatorias de este cultivo (mantenimiento y de formación) tiene un valor calórico de 3 702 kcal/kg (15% de humedad), la cual puede ser empleada como estacas para regeneraciones de la *Jatropha curcas* en potreros, como cercas vivas o como leña combustible o para producir carbón. La producción de leña combustible aún no se ha podido definir con exactitud en las condiciones de este estudio, ya que las plantaciones aún son jóvenes.

Desde el punto de vista ambiental cada árbol puede contribuir a fijar 6 kg de CO₂ (disminución de las emisiones de gases contaminantes) y 9 kg de O₂, además de contribuir a la reforestación de zonas semiáridas y secas, y ayudar a incrementar la biodiversidad, evitar la erosión, restablecer el ciclo hídrico y formar suelos.

Estudios internacionales de varios países del trópico arrojan que si el nivel de nutriente suministrado es suficiente (en especial nitrógeno), el desarrollo de la planta depende de la disponibilidad de agua y la producción primaria neta de biomasa (NPP); es decir, la producción de todos los tipos de biomasa en un período anual (hojas del árbol, biomasa de la madera, frutos, etc.), puede alcanzar un rango promedio de 1,2 t/ha/año de materia seca al aire seco con precipitaciones anuales de 200 mm hasta 11,8 t/ha/año de materia seca al aire donde las lluvias alcanzan 1 500 mm.

Después de siete años cada planta tiene aproximadamente 200 kg de biomasa, incluyendo las raíces, por lo que considerando 25% de materia seca se aportarían 50 kg de materia seca (biomasa/árbol).

El glicerol

En el proceso de transesterificación del aceite para producir biodiésel por regla general se forman 79 mL de glicerina por cada litro de aceite usado (7,9 %), o sea, unos 64,35 L de este material por hectárea. La glicerina pura no es sólida a temperatura ambiente, pero la «capa de glicerina» no es solo glicerina, sin también una mezcla de glicerina, jabones, metanol sobrante y catalizador (lejía). Ésta se puede destilar para convertirla en glicerina farmacéutica con un alto valor añadido como materia prima industrial o como combustible en la producción de biogás.

Hay dos rutas para producir energía de los desechos del proceso de biodiésel; la bioconversión y la termoconversión, aunque la generación del biogás combinada es mejor que la combustión. La mezcla correcta de proteínas, glicerina y sales necesita ser cuidadosamente resuelta mediante futuras investigaciones.

Desde el 2001 se está investigando la conversión en gas de la glicerina obtenida como coproducto en la transesterificación. Este proceso podría aportar también una notable ayuda en la depuración del resto de los residuos de la planta, que se incorporarían como materia prima en los digestores.

La termoconversión de la glicerina será otra opción en el futuro teniendo en cuenta que la relación de poderes caloríficos inferiores de la glicerina y el gasoil es de 0,377 (4128,2 kcal/kg). En cuanto a la combustión se refiere, la glicerina se quema bien, pero ha de ser quemada a altas temperaturas para evitar que emita vapores de acroleína, sustancia tóxica por inhalación y por contacto a través de la piel. El límite legal de exposición humana a la acroleína es de 0,1 ppm, como promedio, durante una jornada de trabajo de ocho horas y en ningún momento se puede exceder de 0,3 ppm durante más de quince minutos. Los vapores de acroleína se producen al quemar la glicerina entre 200 y 300 °C.

Por lo tanto, la opción de quemar la glicerina debe contar con unos quemadores que permitan alcanzar una combustión completa a una temperatura del orden de los 1 000 °C y mantenerlo en los quemadores durante un período superior a cinco segundos, siendo conveniente incorporar también un proceso previo de precalentamiento y atomización. La glicerina tiene más de 1 500 usos conocidos; no obstante, en este momento las aplicaciones más importantes se derivan de su destino para la industria de la alimentación, que además es también la que más crece con tasas de 4% anual. La cosmética le sigue en importancia con tasas de crecimiento anual que superan los 3,5%.

Resultados y discusión

En las condiciones de Cuba se pueden realizar (para regiones secas y/o semiáridas) dos cosechas: una de producción alta entre los meses de diciembre y febrero, y otra con rendimientos menores entre los meses de julio y septiembre.

El cultivo energético de una plantación de *Jatropha curcas* acentúa su producción a partir del tercer año y se estabiliza a los seis años. En ese momento por cada hectárea plantada de *Jatropha curcas* en un agrosistema de silvipastoreo se podrían garantizar los niveles de productividad de biomasa expuestos en la figura 1 (para estas condiciones edafoclimáticas y suelos secos y semiáridos):

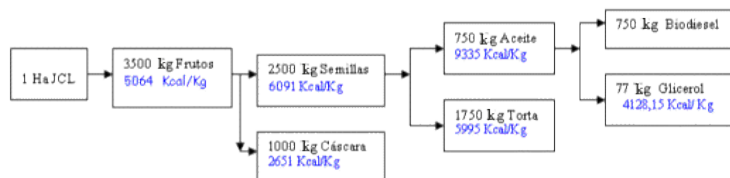


Fig. 1. Niveles de productividad de biomasa.

En esta figura se pueden observar las características energéticas de las diferentes biomásas; las de mayor valor económico son el aceite y el glicerol por su diversidad en usos, potencialidades energéticas y el estado de madurez actual de la tecnología para su aprovechamiento energético y otros muchos usos industriales, como materia prima en importantes procesos (jabón, cosméticos, insecticidas, lubricantes, etcétera).

En espera de las nuevas y más modernas tecnológicas para el aprovechamiento de las otras biomásas (cáscara del fruto, cascarilla o pericarpio de la semilla y la torta residual), se pueden utilizar de inmediato como biofertilizantes, y podrán transformarse en energía en un futuro próximo mediante procesos de bioconversión y termoconversión, en la producción de gas (biogás) y calor para diversas necesidades socioeconómicas.

Un sistema agroforestal puede producir de forma teórica niveles de energía superiores a las 1,835 tep/ha (no se incluye la leña combustible). De esta cifra, el aporte de mayor calidad lo constituye el aceite vegetal puro y su conversión en biodiésel (0,305 tep/ha), cifra que puede duplicarse en la medida que se garanticen manejos agroforestales óptimos del cultivo y se determinen con exactitud las repuestas productivas de frutos ante las variaciones de irrigación y fertilización, aspectos que necesitan aún de mayores estudios y precisiones.

Aportes e impactos

Los principales aportes e impactos de un agrosistema forestal de *Jatropha curcas* se pueden enmarcar en los beneficios económicos, sociales y medioambientales.

Económicos: El país podrá disponer de nuevos combustibles renovables (cáscara, cascarilla, leña y el aceite vegetal para producir biodiésel), lo que tendrá una influencia positiva en el mejoramiento de la matriz energética, así como posibilitará una mayor diversificación de los combustibles que participan en la economía energética, en especial la biomasa (al aportar nuevos combustibles renovables). Estas materias

primas y sus subproductos (residuos) de los procesos industriales (aceites, glicerol, torta, cáscara, etc.) pueden tener otros empleos económicos (insecticidas, abono, alimento animal, y otros), de acuerdo con la factibilidad económica, así como generar empleos, desarrollo de agroindustrias y reducción de las importaciones de combustibles y otras materias primas, y generar nuevos rubros exportables.

Sociales: Puede contribuir a la solución de problemas de la energización rural, como un nuevo combustible para las cocinas, lámparas de alumbrado, las maquinarias, etc., lo que influye en una elevación de la calidad de vida.

Medioambientales: El desarrollo de un agrosistema de *Jatropha curcas* y el aprovechamiento de su biomasa pueden propiciar un incremento de las áreas boscosas y frenar la reforestación en los ecosistemas más frágiles, en especial en las regiones semiáridas y secas no aprovechadas por la agricultura cubana, la regeneración de esos suelos, el incremento de la biodiversidad, la disminución de las emisiones de gases contaminantes, etcétera.

Conclusiones

La producción de biomasa de la *Jatropha curcas* y su conversión en energías limpias y útiles puede tener una influencia positiva en la matriz energética nacional y sobre el medio ambiente; el país se beneficiará con el crecimiento del área boscosa, el incremento de la biodiversidad, la recuperación de suelos erosionados y agotados productivamente y la mitigación de las emisiones de gases contaminantes, responsables del efecto invernadero y del calentamiento global.

No son despreciables las producciones de biomasa de un agrosistema forestal de *Jatropha curcas* (1,83 tep/ha, no se incluye el aporte de la leña combustible por no haberse estudiado con precisión su aporte real, cifras que sí están incluidas en la producción de biomasa de las otras agroindustrias). Esas producciones pueden incrementarse a medida que se precise la influencia de la fertilización y la irrigación con la productividad de frutos y biomasa en general. Una comparación de los resultados obtenidos con otras agroindustrias cubanas (3,43 tep/ha de la caña de azúcar, 1,07 tep/ha del cocotero y 0,118 tep/ha del café), demuestran la factibilidad de este cultivo energético.

Otro análisis que avala lo anterior es la relación input:output energética; para la *Jatropha curcas* es de 1:3,5 hasta 1:5 según la experiencia internacional, superior a las obtenidas en las otras agroindustrias cubanas, exceptuando al cocotero (caña de azúcar 1:1,8; en Guantánamo era de 1:0,94; mientras que el café era de 1:0,71 y el coco de 1:22). A esto se añaden las potencialidades que ofrece este cultivo energético vinculado a un sistema agroforestal, los dos primeros años y después a un sistema silvipastoreo (ovino), garantizando la producción de alimentos (legumbres y proteína animal) de gran valor en la dieta

humana; ya se cuenta con una primera experiencia en una finca en la región de Macambo del municipio San Antonio del Sur en la provincia de Guantánamo y en la provincia de Granma.

Bibliografía

- AUGUSTUSA, G.D.P.S.; M. JAYABALANA Y G.J. SEILERB. «Evaluation and Bioinduction of Energy Components of *Jatropha curcas*», *Biomass and Bioenergy* 23, 2002.
- COLECTIVO AUTORES. "CATEDES" «Evaluación fenológica y productiva del cultivo de *Jatropha curcas*». Datos estadísticos de evaluación del proyecto PT 137, 2006.
- DUKE, J.A., «Medicinal plants». *Science*, 1985.
- Openshaw, Keith. «A Review of *Jatropha curcas*: an Oil Plant of Unfulfilled Promise». *Biomass and Bioenergy* 19, 2000.
- RODRÍGUEZ, F. 2003. «Cuanto creció en verdad la economía cubana». En: *Trabajadores*, 29 de diciembre, Cuba. p. 7.
- SCHMOOK, B., & SERALTA-PERAZA, L. (1997). *J. curcas*: Distribution and Uses in the Yucatan Peninsula of Mexico. In G. M. Guñ bitz, M. Mittelbach, & M. Trabi (Eds.). *Biofuels and industrial products from Jatropha curcas*. DBV Graz, 1997.
- SOTOLONGO PÉREZ, JOSÉ A. «Evaluación de las fuentes de energía, sus potencialidades y principales impactos medioambientales en la provincia de Guantánamo». Tesis en opción al grado de Máster en Energía.

Tecnología para la combustión directa de los residuos biomásicos de la agroindustria azucarera

Direct combustion technology of the biomass residues from the sugar cane agroindustry

*Abelardo Daniel Rodríguez Arias**

**Laboratorio de Combustión, Empresa de Ingeniería para la Electricidad (INEL), Unión Nacional Eléctrica (UNE), La Habana, Cuba.
e-mail: abelardo@inel.une.cu*

Resumen

La tecnología que se presenta es el resultado de las investigaciones realizadas durante una larga etapa de trabajo dedicada al estudio de la biomasa como fuente de energía. Los quemadores y el secador de biomasa que integran la tecnología han sido desarrollados especialmente para trabajar con partículas finas de los residuos biomásicos de la agroindustria azucarera. El diseño de estos equipos fue realizado aplicando un nuevo método aerodinámico, de estabilización o frenado de las corrientes de gases, basado en un novedoso principio físico, al cual se le ha denominado «Principio de las secciones de paso en rotación».

Palabras clave: Residuos biomásicos, biomasa, quemador de biomasa, secador de biomasa, combustión directa, agroindustria azucarera.

Abstract

The technology presented in this paper is the result of a research accomplished during a period of time dedicated to the study of the biomass as an energy source. Burners and biomass driers that integrate the technology have been specially developed in order to enable them working with the tiny particles of the biomass residues of the sugar cane agroindustry. The design of this equipment was carried out applying a new aerodynamical method of stabilization or decreasing the speed of the gas current, based on an innovative physical principle that has been named "Principle of the step sections in rotation".

Keywords: biomass residues, biomass, biomass burner, biomass drier, direct combustion, sugar cane agroindustry.

Introducción

En las últimas décadas el uso de la biomasa como fuente de energía ha estado presente en el escenario internacional, como una atractiva y promisoría vía para producir potencia con mínimo impacto ambiental. Sin lugar a dudas, grandes potencialidades de biomasa se concentran en los residuos agroindustriales de las producciones de azúcar de caña; esto ha motivado el interés de prestigiosas instituciones científicas que hoy en día invierten cuantiosas sumas de dinero en el desarrollo de ambiciosos proyectos energéticos dedicados a la gasificación y a los ciclos combinados. Actualmente

varias empresas líderes en el campo de la energía exhiben extraordinarios resultados en instalaciones demostrativas de ciclos combinados con gasificación de biomasa.

Sin embargo, los pronósticos internacionales sobre el tema proyectan crecimientos en el uso de los sistemas de combustión directa de biomasa para los países con infraestructura en desarrollo. De ahí la importancia que tiene para la mencionada industria, en esta etapa de transición, poder disponer de tecnologías que permitan alcanzar altos rendimientos en la combustión directa de los residuos agroindustriales destinados a la producción de potencia en las fabricas de azúcar. En el presente trabajo se exponen los resultados obtenidos, a partir de la implementación de una nueva tecnología que permite quemar eficientemente los residuos biomásicos de la producción de azúcar de caña. Los residuos biomásicos de la agroindustria azucarera son el bagazo con su médula y los residuos agrícolas cañeros (RAC).

El bagazo es el residuo lignocelulósico fibroso que se obtiene al moler la caña de azúcar, y lo conforma una masa heterogénea de partículas con un tamaño promedio de 20 mm. Se le denomina médula al tejido parenquimatoso que envuelve los haces vasculares donde se encuentra el jugo; en la industria se le denomina médula a la mezcla de partículas de este tejido con fibras de corta longitud, tierra y otras materias extrañas. Cuando se utiliza la fibra del bagazo con destino a la producción de pulpas y madera artificial es necesario enriquecer la fracción fibrosa extrayendo la mayor cantidad de médula posible.

Los residuos de la agricultura cañera (RAC) están constituidos principalmente por paja y cogollo, y pueden ser empleados en la producción de alimento animal directo, o con fines energéticos. Según algunos especialistas las cantidades disponibles de RAC a nivel mundial sobrepasan los cincuenta millones de toneladas por año, lo que representa un equivalente en petróleo que supera los diecisiete millones de toneladas. Las dificultades para lograr el aprovechamiento de esta reserva potencial están relacionadas fundamentalmente con la recolección, los tratamientos mecánicos y químicos, la transportación, la manipulación y la conservación. En la tabla 1 se presentan los intervalos de variación de los componentes de los residuos agroindustriales de la producción de azúcar de caña en el análisis inmediato. Los resultados de este análisis van acompañados del valor calórico.

Tabla 1. Resultados del análisis inmediato (masa de trabajo)

Combustibles	Análisis Inmediato				Valor calórico superior (MJ/kg)
	Humedad (%)	Materia volátil (%)	Carbono fijo (%)	Ceniza (%)	
Bagazo	40 - 55	39 - 55	4 - 8	0,55 - 2,2	6,4 - 12,3
Meollo	50 - 60	34 - 49	6 - 10	1,6 - 3	5,8 - 8,8
RAC	8 - 15	60 - 77	10 - 16	4,6 - 6	12,7 - 17,6

El bagazo, al salir de la estación de molienda, tiene una alta humedad equivalente (6,59%kg/MJ), por lo que se hace necesario utilizar un esquema de secado abierto para su preparación.

En 1993 se logró poner en marcha el primer sistema demostrativo con quemadores rotatorios y esquema de secado abierto, en una caldera «combustión» con capacidad de 45 t/h de vapor (Fig. 1). Los quemadores y el secador fueron diseñados aplicando un nuevo método aerodinámico de estabilización basado en un novedoso principio, al cual se le ha denominado «Principio de las secciones de paso en rotación».

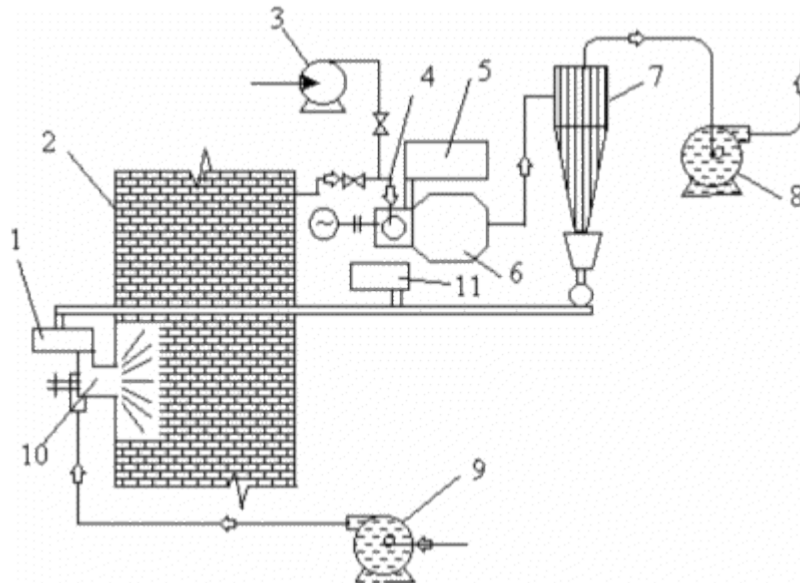


Fig. 1. Sistema de combustión directa de los residuos biomásicos de la agroindustria azucarera. 1. Alimentador de bagazo al quemador. 2. Horno. 3. Ventilador. 4. Entrada de gases al secador. 5. Alimentador del bagazo húmedo. 6. Secador dinámico. 7. Ciclón. 8. Ventilador de tiro inducido. 9. Ventilador de tiro forzado. 10. Quemador rotatorio. 11. Alimentador de los RAC.

La instalación cuenta con un secador dinámico de 12 t/h de residuos industriales y cuatro quemadores rotatorios de primera generación, que disponen de una potencia térmica de 5 MW cada uno. El secador dinámico (Fig. 2) para partículas inferiores a 10 mm es un equipo compacto cuyas características de diseño y funcionamiento lo diferencian de los modelos de secadores utilizados tradicionalmente para el bagazo.

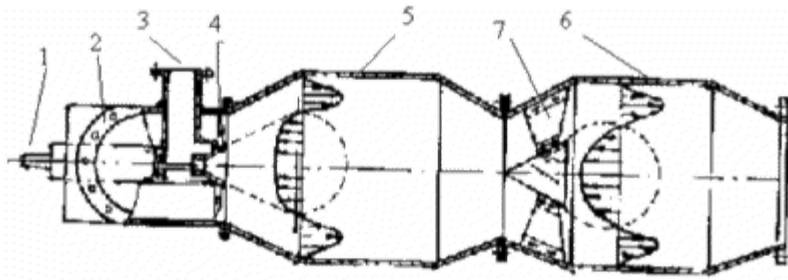


Fig. 2. Secador dinámico. 1. Sistema motriz. 2. Entrada de gases. 3. Conducto de alimentación del bagazo húmedo. 4. Impelente estabilizador. 5. Segundo cuerpo. 6. Tercer cuerpo. 7. Estabilizador estático.

El equipo consta de tres cuerpos acoplados entre sí, con una longitud total aproximada de 5 m. En el primer cuerpo está ubicado el sistema motriz (impelente estabilizador), la entrada de gases y el conducto de alimentación de combustible. En el segundo cuerpo transcurre la primera etapa de secado y en el tercero tiene lugar el resto del proceso. Al girar el impelente estabilizador a alta velocidad y con la ayuda del vacío creado por el tiro inducido del sistema, el gas caliente y el combustible dosificado son succionados y lanzados al interior de la primera cámara de secado, en la cual se desarrolla un proceso turbulento caracterizado por una alta componente tangencial de la velocidad, con un valor mínimo en la componente axial de dicha cámara.

A medida que la mezcla gas-sólido se aproxima a la salida de la primera etapa tiene lugar un debilitamiento creciente de las corrientes circulares de los gases, cuando aún éstos disponen de la energía suficiente para continuar el proceso de secado. Para utilizar el potencial energético disponible en los gases, en ese punto, fue montada otra etapa de secado, en la cual se instaló un estabilizador estático para lograr una segunda zona de retención. El proceso de secado termina en el ciclón (ver Fig. 1), donde además se separa el combustible de la corriente de gases. Los quemadores instalados en el sistema son de tipo torbellino con dispositivos de estabilización rotatorios, especialmente diseñados para quemar residuos biomásicos (Fig. 3).

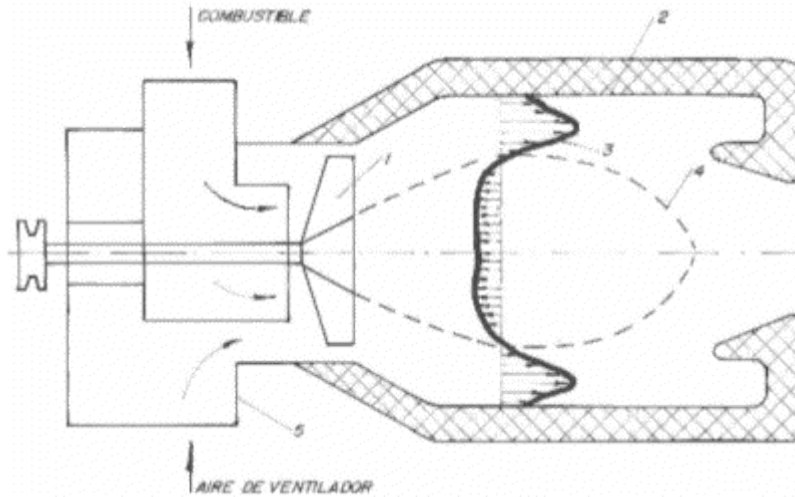


Fig. 3. Quemador rotatorio para residuos biomásicos. 1. Estabilizador rotatorio. 2. Precámara de combustión. 3. Campo de la componente axial de la velocidad. 4. Zona de recirculación. 5. Cuerpo del quemador.

La estabilidad del proceso de combustión de estos quemadores se logra a partir de un dispositivo giratorio (principio de las secciones de paso en rotación), detrás del cual se forma una estructura aerodinámica que depende de la acción de dos mecanismos: el efecto provocado por el contorneo de la corriente de aire al pasar por el diámetro mayor del cono, y los chorros giratorios que aparecen cuando se ponen a girar las secciones de paso del dispositivo estabilizador.

Los resultados de las investigaciones realizadas han demostrado que en estos sistemas el tamaño de la zona de recirculación y su índice de turbulencia están en función de la velocidad de rotación, de la forma del estabilizador y de la velocidad de la corriente de aire. En la figura 4 se presenta el comportamiento del largo y el diámetro relativo de la zona de recirculación que se forma en la huella turbulenta, detrás del estabilizador rotatorio. Como se puede observar, para velocidades de la corriente de aire superior a 20 m/s, la velocidad de rotación del quemador tiende a incrementar el diámetro de la zona de recirculación y, por consiguiente, a reducir el largo relativo de la llama.

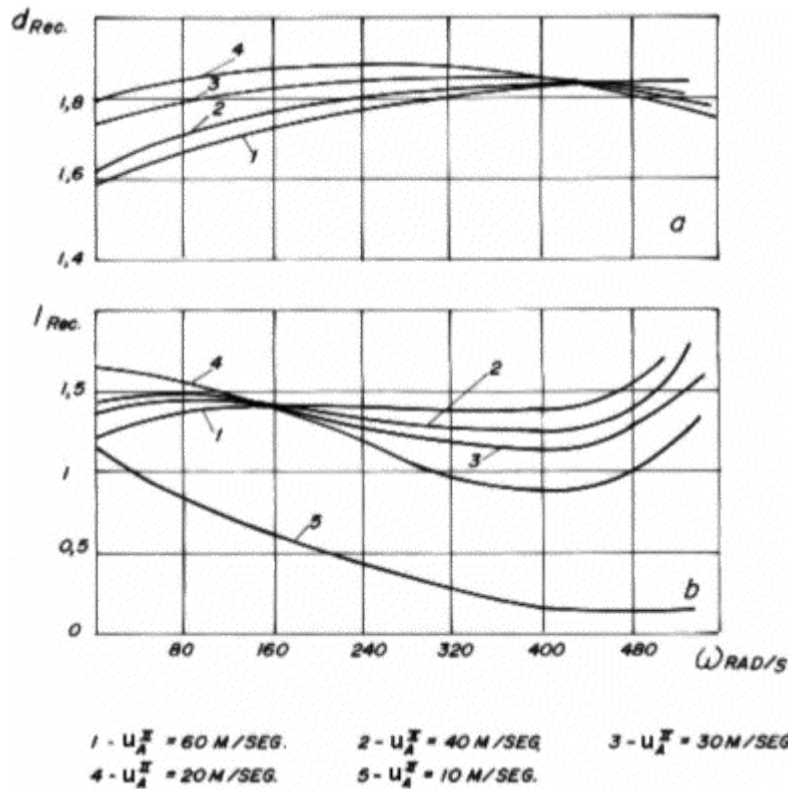


Fig. 4. Comportamiento de las dimensiones relativas de la zona de recirculación, en función de la velocidad de rotación, para diferentes valores de la corriente de aire.

Las áreas de paso por donde sale el aire a la cámara de combustión de un quemador convencional por lo regular son fijas y están determinadas por las velocidades necesarias para que las corrientes de aire puedan lograr el campo aerodinámico seleccionado. De esta forma, los flujos de aire podrán variar sólo dentro de los límites donde la eficiencia del quemador no sea afectada, ni por problemas aerodinámicos, ni por variaciones en las cantidades de aire.

El principio de funcionamiento del dispositivo de estabilización rotatorio permite un campo de regulación alto debido a que la aerodinámica del sistema mantiene un comportamiento estable para un amplio rango de variación de la cantidad de aire que participa. Para la preparación de los RAC se diseñó una planta piloto demostrativa (Fig. 5), que fue montada en un centro de preparación y limpieza de caña, previo a la fábrica de azúcar, donde se producen diariamente entre 15 y 20 t de residuos. El secado natural utilizado necesitó un área relativamente pequeña en la que los RAC, con un tiempo de exposición nunca superior a los cuatro días, alcanzaron niveles de humedad entre 10 y 15%.

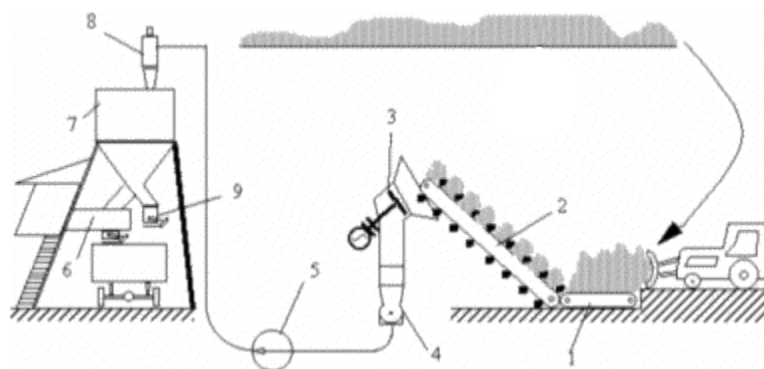


Fig. 5. Sistema de preparación de los RAC. 1. Mesa alimentadora. 2. Transportador de banda. 3. Picadora. 4. Molino de martillos. 5. Ventilador. 6. Tolva. 7. Separador ciclónico. 8. Descarga del polvo. 9. Área de secado.

El sistema tiene una capacidad de 4 t/h y consta de una picadora, un molino de martillos y un sistema de alimentación de los RAC. La picadora tiene como objetivo densificar el residuo antes de que éste pase al molino de martillos, donde se convierte en polvo.

Las características granulométricas del producto final que se obtiene se presentan en la tabla 2. El polvo obtenido logra una densidad promedio entre 80 y 100 kg/m³, lo cual demuestra la necesidad de una compactación adicional para buscar eficiencia en el almacenaje y en la transportación.

Tabla 2. Características granulométricas del RAC molido

RAC seco (humedad de 16%)		
Dimensión del tamiz, μm	Porcentaje en peso retenido	Porcentaje en peso no retenido
3 000	5,8	94,2
2 500	5,9	94,1
2 000	6,6	93,4
1 000	34,2	65,8
600	47,0	53,0

El consumo específico de energía está en el orden de 40 kWh por tonelada de residuo molido. El análisis conjunto, molida-transportación, suponiendo un destino a una distancia de 20 km del lugar de molida y sin compactación, arrojó que por cada tonelada de combustible equivalente consumido se pueden producir 22 toneladas de este último. Como se explicó anteriormente, son conocidos los factores que se deben tener en cuenta para lograr la combustión eficiente de un combustible sólido; sin embargo, en los hornos actuales utilizados para quemar el bagazo no se logra que todas las partículas que lo integran puedan quemarse completamente de manera estable. Las mayores pérdidas que se producen en los hornos de bagazo de la industria azucarera están relacionadas con los arrastres de partículas pequeñas, que no logran quemarse en la zona de alta temperatura.

En los últimos años ha existido la tendencia en las fábricas de azúcar a elevar los niveles de preparación de la caña, con el objetivo de lograr mayores rendimientos en la producción de azúcar, lo que trae consigo una disminución en el tamaño de la partícula de bagazo. Desde el punto de vista teórico, la disminución en la granulometría del combustible es favorable y debe contribuir al mejoramiento del proceso de combustión; sin embargo, en los hornos actuales destinados a la quema del bagazo sucede todo lo contrario debido a que su aerodinámica no asegura el tiempo de permanencia mínimo requerido para que las partículas finas de bagazo se quemen completamente. La contradicción antes expuesta queda resuelta con la aplicación del esquema de secadores y quemadores, que puede ser implementado tanto en los nuevos diseños de calderas como en los hornos actuales.

La instalación demostrativa de la figura 1 fue evaluada quemando 12 t/h de médula de bagazo con un contenido de humedad promedio de 55% a la entrada del secador. La humedad en el combustible a la entrada de los quemadores osciló entre 15 y 20%. Para completar la energía necesaria para producir las 45 t/h de vapor se utilizó bagazo integral como combustible en el sistema de combustión original de la caldera. La eficiencia térmica alcanzada se elevó en siete unidades debido a la nueva organización lograda a partir de la quema en llama de la médula de bagazo. El sistema permite quemar bagazo fino, RAC molido, médula de bagazo y otros residuos biomásicos que cumplan los parámetros requeridos por la tecnología.

En la actualidad el Centro de Tecnologías de Combustión, del Ministerio de la Industria Básica, ha logrado desarrollar, a partir de este nuevo principio aerodinámico, novedosos modelos de quemadores de gran utilidad en la quema de residuos biomásicos. Un ejemplo de ello son los quemadores combinados o mixtos que tienen la posibilidad de quemar de forma independiente combustible líquido o sólido, así como diferentes combinaciones entre ellos. En la figura 6 se puede observar un quemador rotatorio de 1 MW tipo monobloque, con ventilador incorporado y atomización mecánica, para hornos de pequeña capacidad; en la figura 7 se muestra un quemador combinado de 17 MW térmicos para calderas de vapor de la industria azucarera, el cual atomiza el combustible con fluido auxiliar y puede trabajar con aire caliente para la combustión.

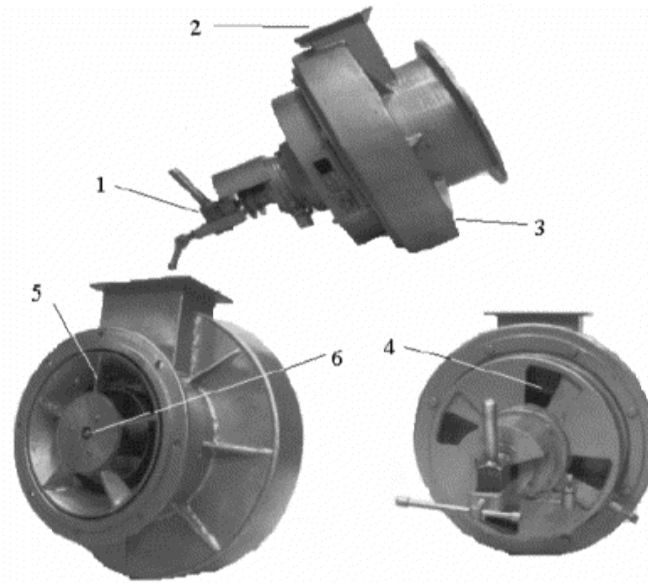


Fig. 6. Quemador rotatorio combinado de 1 MW, diseñado para quemar combustible líquido y residuos biomásicos pulverizados (Patente: 22526).
 1. Caña del combustible líquido. 2. Conducto de entrada del combustible sólido.
 3. Cuerpo del ventilador. 4. Válvula del aire.
 5. Estabilizador rotatorio de dos corrientes.
 6. Boquilla del combustible.

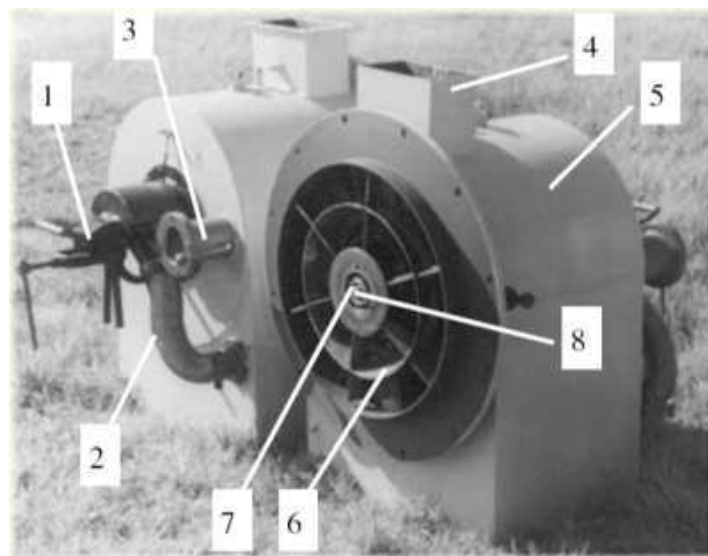


Fig. 7. Quemador rotatorio combinado de 17 MW para quemar combustible líquido y residuos biomásicos pulverizados de la agroindustria azucarera.
 1. Caña del combustible. 2. Conducto de aire de limpieza.
 3. Visor. 4. Conducto de entrada del combustible sólido.
 5. Cuerpo. 6. Estabilizador rotatorio de tres canales.
 7. Portacaña. 8. Boquilla del combustible.

Los quemadores combinados o duales, como también se les conoce, pueden ser de gran utilidad en los sistemas de quema directa de biomasa, pues posibilitan una alta estabilidad en la regulación de la carga. La opción del combustible líquido, en determinados momentos del proceso (cuando se presentan dificultades en el suministro de la biomasa), elimina las afectaciones en el sistema de generación.

Conclusiones

- Los rendimientos obtenidos en las instalaciones demostrativas aseguran un futuro promisorio para la aplicación de la tecnología en países con infraestructuras en desarrollo.
- La nueva tecnología resuelve la contradicción existente en la industria azucarera, entre el grado de preparación de la caña y la producción de azúcar.
- El sistema puede ser instalado tanto en los hornos actuales como en los nuevos diseños.
- La aplicación de esta nueva tecnología permite reducir el tamaño de los hornos que hoy se emplean para quemar el bagazo en la industria azucarera.

Bibliografía

- BAUM, M. M. Y P. J. STREET. «Predicting the Combustion Behavior of Coal Particles», *Comb Sci and Tech.*, 3. 1971. pp 231-243.
- DRARAR, J. S. Y J. W. ALLEN. «The Evaluation of Fuel and Burners for Power Generation Boiler». British Flame Research Committee British Flame Days. 21st / 22nd September, 1992.
- DIXON, T. F.; C. PALMER, S. Y D. DOMANTI. «Bagasse Swirl Burner Development. Sugar Research Institute, Mackay Qld». *Proceeding of Australian Society of Sugar Cane Technologists*, 1986. pp. 295-302.
- ELLIOT, P. Y R. BOOTH. Brazilian Biomass Power Demonstration Project. Biomass Integrated Gassification-Gas Turbine (BIT -GT). Technology Project - Phase II. 1993. 10 pp.
- Fung, Y. H. *Wood Energy Prospects. Energy From Forest Biomass*. Academic Press, New York, 1982.
- JOHANSSON, T. B. *Renewable Energy. Sources for Fuels and Electricity*. Island Press. Washington DC. Unites States, 1993. 1160 pp.
- LAMB B. W. Y R. W. BILGER. «Combustion of Bagasse: Literature Review». *Sugar Tech. Review*, 4, 1977. pp. 89-130.
- LOU M. Y B R. STANMORE. «The Combustion Characteristics of Char from Pulverised Bagasse». *Fuel*, 71, 1992. pp. 1074-1076.
- MCINTOSH M. J. «Mathematical Models of Drying in a Brown Coal Mill System: 1 Formulation of Model». *Fuel*, 55, 1976. p. 52.
- RODRÍGUEZ ARIAS, A. D. *Nuevo principio aerodinámico de las secciones de paso en rotación*. Centro de Tecnologías de Combustión, Cuba, 1995. 40 pp.
- . *Quemador rotatorio para líquidos y sólidos pulverizados*. (Certificado de Autor No. 22526), Cuba, 1998.
- . *Secador de sólidos pulverizados*. (Certificado de Autor No. 22485), Cuba, 1997.

RODRÍGUEZ ARIAS, A. D.; L. B. ROSABAL PONCE Y P. B. MARTÍNEZ DE VILLIERS. *Estudio granulométrico y de las propiedades físicas de las partículas de bagazo*. Centro de Tecnologías de Combustión, 1996. 15 pp.

———. *Teoría y práctica de los procesos de combustión. Combustibles sólidos*. La Habana: Ed. Academia, 2000. 453 pp.

RODRÍGUEZ ARIAS, A. D. Y V. A. JRISTICH. *Quemador universal para el quemado de combustibles sólidos, líquidos y gaseosos*. (Certificado de Autor No 21753). Cuba, 1987.

Rodríguez Arias, A. D., *et al.* *Silo dosificador para sólidos pulverizados* (Certificado de Autor No. 2288). Cuba, 1996.

Caracterización de los compuestos del nitrógeno y las partículas suspendidas totales en el municipio Regla, ciudad de La Habana

Characterization of the nitrogen compounds of and the total suspended particles in the municipality of Regla, city of La Habana

Antonio Wallo Vázquez y Osvaldo Cuesta Santos**
**Instituto de Meteorología, Loma de Casablanca s/n, Regla,*
ciudad de La Habana, Cuba.
Tel.: (537) 8670721 al 26, ext. 243.
e-mail: awallo@met.inf.cu

Resumen

Las cuestiones relacionadas con la contaminación atmosférica en zonas urbanas cada día cobran mayor importancia por las afectaciones que puede producir tanto en la salud de los seres humanos como en los materiales, edificaciones, etcétera. En la ciudad de La Habana los compuestos de nitrógeno y las partículas suspendidas totales son de los contaminantes cuyas concentraciones resultan elevadas en la atmósfera. Dentro de este contexto, el presente trabajo se propone el análisis del comportamiento de dichas concentraciones, tomado como polígono experimental el municipio Regla en ciudad de La Habana.

Palabras clave: Contaminación atmosférica, partículas suspendidas totales, azufre y nitrógeno

Abstract

The issues related to atmospheric pollution in urban areas have an increasingly importance due to the impacts produced both on human health as on materials, buildings, etcetera. In the city of La Habana the nitrogen compounds and the total suspended particles are pollutants whose atmospheric concentrations are high. Within this context, the present paper analysis the behavior of the above mentioned concentrations, taking the municipality of Regla in the city of La Habana as an experimental polygon.

Keywords: Atmospheric pollution, total suspended particles, sulphur and nitrogen

Introducción

El impetuoso crecimiento de la sociedad contemporánea, condicionado por el desarrollo de la revolución científico-técnica, se asocia con daños cada vez mayores a las condiciones ambientales en las que el hombre se ha adaptado a vivir. La calidad del medio ambiente atmosférico, interpretada como el conjunto de características físicas (relacionadas con el clima) y químicas (relacionadas con la contaminación del aire) de la atmósfera, producto de las relaciones entre la sociedad y la naturaleza, no escapa de esta situación. Hoy se puede asegurar que los contaminantes están modificando la composición química y física de nuestra atmósfera, y se introducen transformaciones que pueden

variar el clima actual, no sólo en el ámbito local sino también a escala global. Dentro de este contexto el presente trabajo se propone el análisis del comportamiento de las concentraciones de los compuestos de nitrógeno y las partículas suspendidas totales, tomado como polígono experimental el municipio Regla en ciudad de La Habana.

Materiales y métodos

Características geográficas

El municipio Regla (Fig. 1) se encuentra en su mayor parte en una llanura baja pantanosa con áreas de superficie baja-marina palustre que bordea la bahía de La Habana. Las zonas más alejadas de la costa se encuentran sobre una llanura ondulada, medianamente diseccionada, y en Casablanca se destaca un escarpe denudativo de alrededor de 50 m de altura con altos valores de pendiente.

El municipio está modificado por una fuerte acción antropológica, con grandes industrias y un importante desarrollo urbanístico, además de ser atravesado por vías importantes de comunicación. Cuenta con una superficie territorial de 10,2 km², una población de 43 173 habitantes y una densidad poblacional de 4 232 hab./km². Limita al Norte con el municipio La Habana del Este, al Sur con San Miguel del Padrón, con Guanabacoa al Este y La Habana Vieja al Oeste.

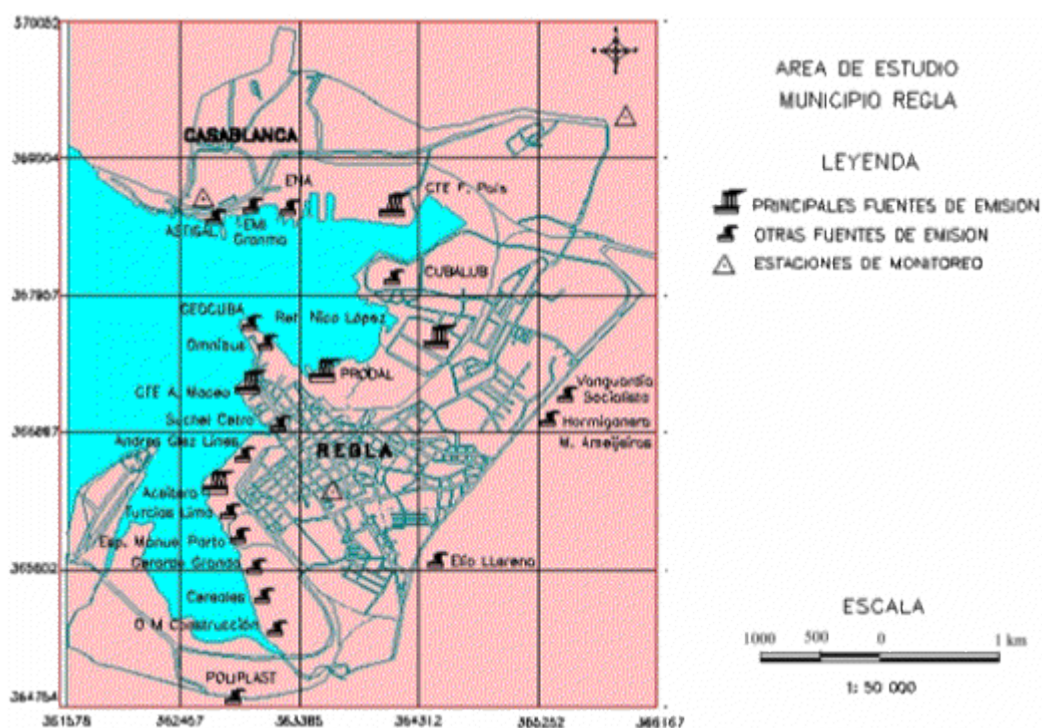


Fig. 1. Polígono experimental.

Contaminantes estudiados

En la zona de estudio los principales contaminantes emitidos a la atmósfera son producto de la quema de combustibles fósiles, principalmente el petróleo y sus derivados, así como material particulado proveniente de la misma quema y de las actividades constructivas y agrícolas del territorio.

Estos contaminantes, junto con sus concentraciones máximas admisibles (Cma) según la Norma Cubana (NC: 39:1999), son los siguientes:

- Dióxido de nitrógeno (NO₂): 40 µg/m³.
- Monóxido de nitrógeno (NO): 600 µg/m³.
- Amoníaco (NH₃): 200 µg/m³.
- Partículas suspendidas totales (PST): 100 µg/m³.

Métodos de muestreo y análisis químico

Los valores obtenidos de las mediciones y análisis químicos de los contaminantes estudiados se realizaron según las metodologías recomendadas por la Red de Vigilancia de la Atmósfera Global (VAG), de la Organización Meteorológica Mundial (OMM), y la Organización Mundial de la Salud [WHO, 1997, y OMM, 1990]; éstas son las oficialmente empleadas por el Centro de Contaminación y Química Atmosférica (CECONT), del Instituto de Meteorología, del Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente (CITMA).

Métodos de muestreo de los contaminantes

Se han empleado las metodologías recomendadas por la Organización Meteorológica Mundial para el muestreo y análisis químico de estos compuestos. También se toman en cuenta las normas cubanas para la toma de las muestras [NC: 93-02-203, 1986 y NC: 39: 1999], además de las indicadas por instituciones internacionales [Martínez y Romieu, 1997].

Las muestras diarias de contaminantes fueron tomadas con ajuste a las metodologías señaladas [WMO, 1986 y Cuesta, 1995], avaladas por la Organización Meteorológica Mundial (OMM), con un flujo entre 0,25 y 2 L/min⁻¹ de aire durante 24 horas (de 8:00-8:00, hora local), en dependencia del tipo de contaminante.

La captación del NO₂ y NO se realizó utilizando el procedimiento de los tubos de absorción, [Volberg, 1982, y WMO, 1986], donde los gases muestreados se obtienen del aire mediante una columna de gránulos de vidrio recubiertos por una solución absorbadora. El amoníaco (NH₃) fue muestreado utilizando un burbujeador portador de la solución de absorción específica para ese gas, aplicando uno de los métodos recomendados por la Organización Meteorológica Mundial.

El método utilizado para la toma de las partículas suspendidas totales [NC: 93-02-221, 1986] es el de filtración, el cual constituye un método simple y muy operacional (una bomba de succión, un medidor de flujo y un medio captador).

Métodos de análisis químico

Para la determinación de las concentraciones se utilizaron los métodos espectrofotométricos habitualmente aplicados en los laboratorios del CECONT y de uso común en la Red de Vigilancia de la Atmósfera Global de la OMM. Para los NO_x se utilizó el procedimiento del yoduro de potasio (KI) y la oxidación del NO a NO₂ a través de filtros de óxidos de cromo VI.

La determinación de la masa de polvo se realizó por pesada en balanza analítica. La sensibilidad de este método es de 0,1 mg de polvo en el volumen de aire analizado. El método es específico.

Resultados y discusión

Comportamiento de los contaminantes estudiados

Al analizar el comportamiento de los compuestos gaseosos del nitrógeno (NO_2 y NO) en la estación de monitoreo de Casablanca (Fig. 2), se pudo observar que el NO_2 presentó su máximo absoluto en junio de 2001 con $12,7 \mu\text{g}/\text{m}^3$; se muestra un máximo secundario hacia el 2003 con $12,6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en el mes de febrero y se mantuvieron sus valores por encima de $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ durante los meses de septiembre, noviembre y diciembre de este último año.

El NO presentó valores más bajos, debido a su alto potencial de reaccionar y transformarse con rapidez, por lo tanto tiene muy poco tiempo de vida como monóxido en la atmósfera, apreciándose su más alta concentración en noviembre de 2000, con $8,8 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

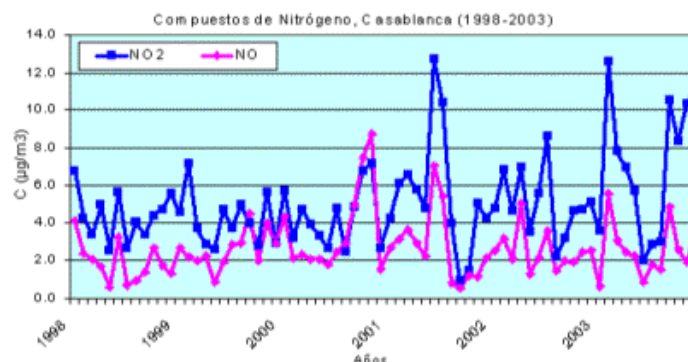


Fig. 2. Comportamiento de los compuestos gaseosos del nitrógeno (NO_2 y NO) en la estación de Casablanca (1998-2003).

Al estudiar el comportamiento del amoníaco (NH_3) en la estación de Casablanca (Fig. 3) se observó un máximo absoluto durante el mes de marzo de 2001 con $20,1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y un máximo secundario durante el mes de febrero de 2003 con $14,8 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

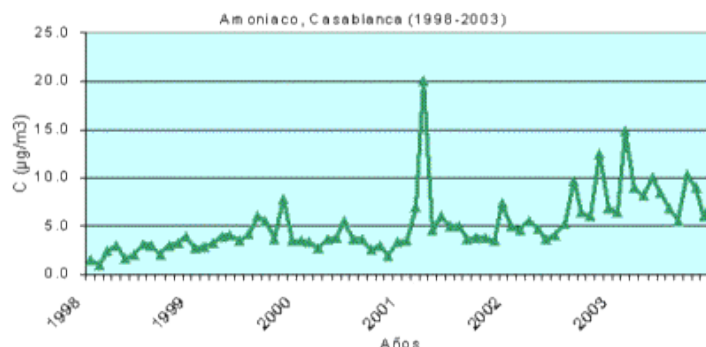


Fig. 3. Comportamiento del amoníaco en la estación de Casablanca (1998-2003).

En la figura 4 se muestra la marcha de las concentraciones de los compuestos gaseosos del nitrógeno en Casablanca durante el período 1998-2003; las mayores concentraciones ocurrieron en el período poco lluvioso, fundamentalmente en los meses invernales; el NO₂ presentó un máximo absoluto en febrero con 6,7 µg/m³ y uno secundario en noviembre con 6,3 µg/m³; el amoníaco mostró un máximo absoluto en marzo con 7,2 µg/m³ y uno secundario en noviembre con 5,9 µg/m³, coincidiendo con los resultados hallados para estos compuestos en zonas con influencia urbana [Cuesta, *et al.*, 2000a y 2000b].

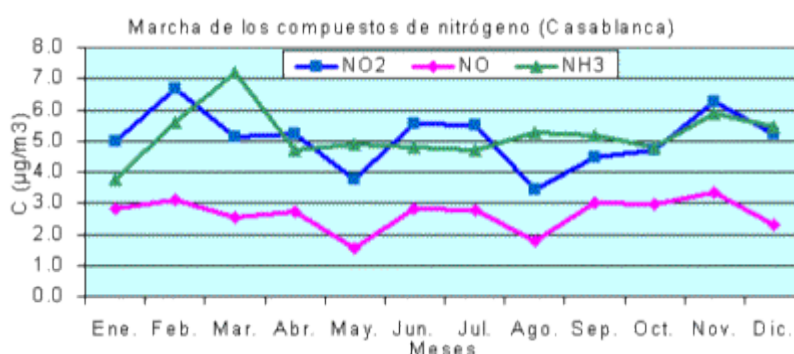


Fig. 4. Marcha de las concentraciones de los compuestos gaseosos del nitrógeno en la estación de Casablanca (1998-2003).

En la estación de Regla el comportamiento de los compuestos gaseosos del nitrógeno (Fig. 5) presentó un máximo absoluto extremadamente pronunciado en el mes de marzo de 2003 para el NO₂ con 465,8 µg/m³; durante este mismo año se observó un máximo secundario en el mes de septiembre con 106,4 µg/m³ también para este compuesto.

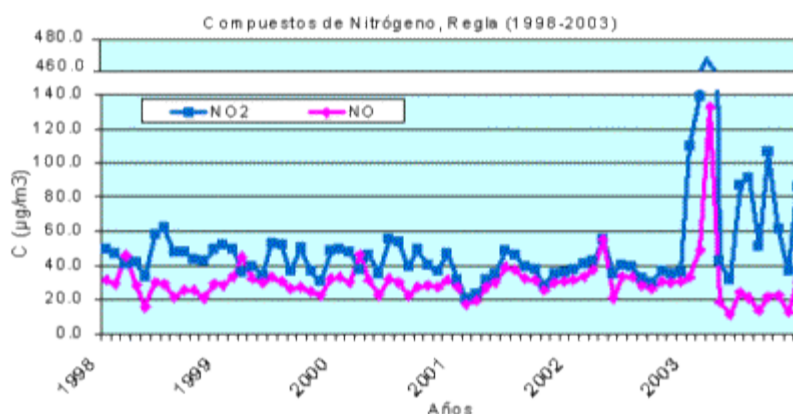


Fig. 5. Comportamiento de los compuestos gaseosos del nitrógeno en la estación de Regla (1998-2003).

El comportamiento del amoníaco en la estación de Regla (Fig. 6) presentó un máximo secundario en el mes de febrero de 2001 con un valor de 39,4 µg/m³ y su máximo absoluto en el mes de marzo de 2003 con 48,0 µg/m³, coincidiendo con las mayores concentraciones observadas para los compuestos gaseosos del nitrógeno, como se mostró en la figura 5.

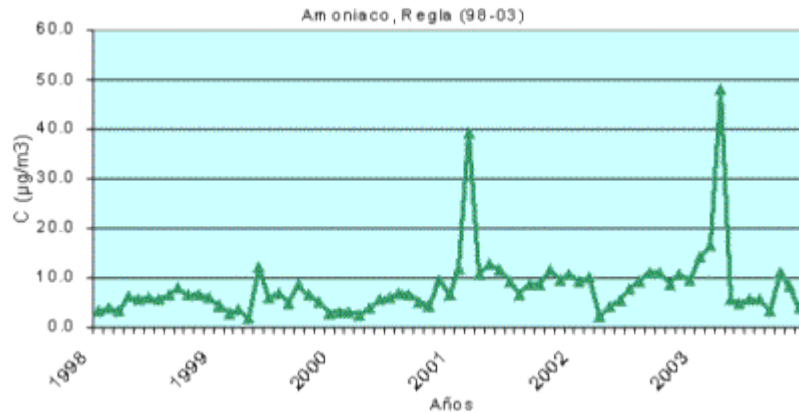


Fig. 6. Comportamiento del amoníaco en la estación de Regla (1998-2003).

La marcha de las concentraciones de los compuestos del nitrógeno en la estación de Regla (Fig. 7), presentó sus máximos absolutos en el mes de marzo con los valores siguientes: NO- 34,5 µg/m³ y NO₂- 99,2 µg/m³.

Para el amoníaco los máximos absolutos ocurrieron durante febrero y marzo con 12,6 µg/m³ y 11,8 µg/m³, respectivamente.

Como puede observarse, en la localidad de Regla las concentraciones de los compuestos de nitrógeno estudiados fueron generalmente mayores que las registradas en Casablanca, por lo que presenta un mayor deterioro de su calidad del aire [Cuesta, et al., 2000a]. Las más elevadas concentraciones ocurrieron fundamentalmente durante los meses comprendidos en el período poco lluvioso del año.

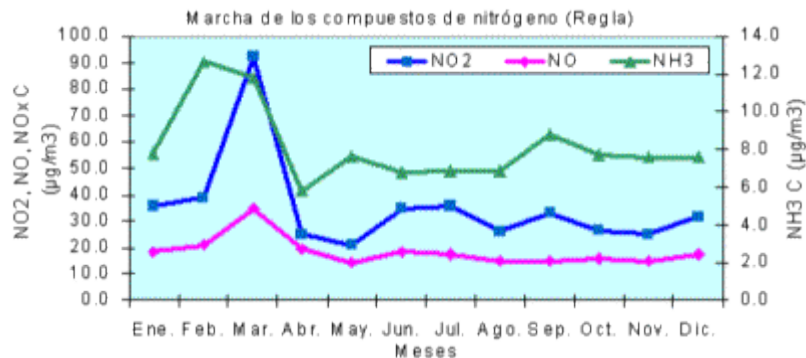


Fig. 7. Marcha de las concentraciones de los compuestos de nitrógeno en la estación de Regla (1998-2003).

Las partículas suspendidas totales (Fig. 8) solamente fueron medidas para el período 2001-2003 en Regla y presentaron sus concentraciones máximas durante el 2003, con un máximo absoluto de 397,1 µg/m³ en el mes de febrero y otros dos secundarios en los meses de agosto y diciembre con 303,6 µg/m³ y 297,2 µg/m³, respectivamente.

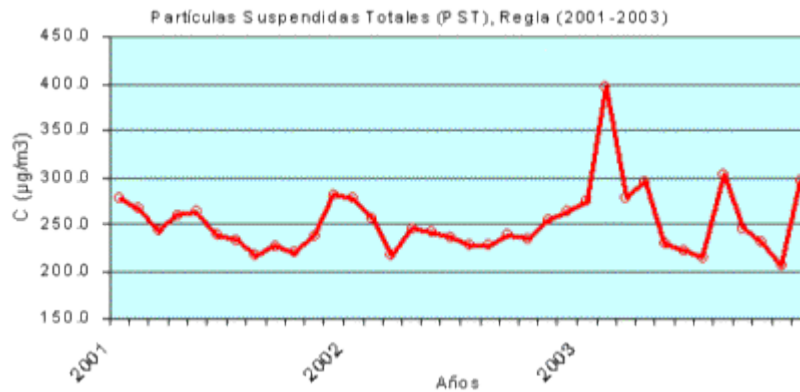


Fig. 8. Comportamiento de las concentraciones de las partículas suspendidas totales en la estación de Regla (2001-2003).

La marcha de las concentraciones de este contaminante (Fig. 9) mostró su máximo absoluto en el período poco lluvioso, con $306,9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ durante el mes de febrero, siguiendo el mismo comportamiento que el resto de los compuestos estudiados, lo que reafirmó a este período del año como el de máxima acumulación de contaminantes en la atmósfera. Existieron máximos secundarios en abril con $267,3 \mu\text{g}/\text{m}^3$, agosto con $249,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y diciembre con $280,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

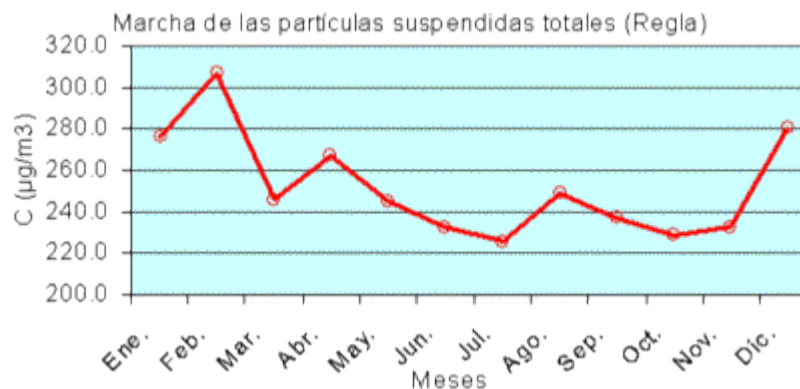


Fig. 9. Marcha de las concentraciones de las partículas suspendidas totales en la estación de Regla (2001-2003).

Conclusiones

Tanto todos los compuestos de nitrógeno estudiados como las partículas suspendidas totales presentaron sus máximas concentraciones durante el período poco lluvioso del año.

El dióxido de nitrógeno y las partículas suspendidas totales fueron los compuestos de todos los estudiados que presentaron concentraciones por encima de sus concentraciones máximas admisibles (Cma).

Las partículas suspendidas totales fueron el contaminante que presentó las concentraciones más elevadas de todos los compuestos estudiados en la zona del polígono experimental.

Recomendaciones

- Implementar mediciones de otros contaminantes no estudiados hasta el momento en la zona del polígono experimental con vistas a tener una mejor idea del comportamiento de la contaminación atmosférica en esta área.
- La implementación de medidas de mitigación con vistas a la disminución de las concentraciones de contaminantes por encima de las concentraciones máximas admisibles.

Bibliografía

- CUESTA, O. «Caracterización de las concentraciones de los principales compuestos del nitrógeno atmosférico en Cuba y su relación con los tipos de situaciones sinópticas». Tesis en Ciencias Meteorológicas. La Habana, 1995. p.104.
- CUESTA, O.; A. COLLAZO, A. WALLO, A. ROQUE, A. CAMPOS, L. ÁLVAREZ, R. GONZÁLEZ, A. ARRIBA, M. GONZÁLEZ, P. SÁNCHEZ, R. LABRADOR Y D. PÉREZ. «Caracterización del medio ambiente atmosférico en la zona de la refinería Níco López». Resultado científico-técnico. La Habana: Instituto de Meteorología, 2000a. p. 226.
- CUESTA, O.; A. WALLO, A. COLLAZO, C. LÓPEZ, A. ROQUE, A. CAMPOS, L. ÁLVAREZ, R. GONZÁLEZ, A. ARRIBA, M. GONZÁLEZ, D. PÉREZ, R. LABRADOR, P. SÁNCHEZ, I. RIBERO, E. ECHEVERRÍA, G. ANANIAS Y R. MANSO. «Caracterización del medio ambiente atmosférico en la ribera este de la bahía de La Habana». Informe científico-técnico. La Habana: 2000b. p. 130.
- MARTÍNEZ, A. P. Y I. ROMIEU. *Introducción al monitoreo atmosférico*. ECO/OPS, Metepec, Estado de México, 1997.
- NC: 93-02-203. *Atmósfera: Requisitos generales para el muestreo del aire*. Norma Cubana. Comité Estatal de Normalización. 1986
- NC: 93-02-221. *Determinación gravimétrica del polvo en suspensión*. 1986.
- NC: 39:1999: *Requisitos higiénico-sanitarios*. La Habana: CITMA-INN-MEP, 1999.
- Organización Meteorológica Mundial. *Guía de prácticas climatológicas*. Ginebra: Organización Meteorológica Mundial (OMM), No. 100, 1990.
- Volberg, S. H. *Instrucciones metodológicas para el análisis químico del aire atmosférico por tubos de absorción*. Leningrado: Comité Estatal de Hidrometeorología, 1982. 34 pp.
- WHO. *Guidelines for Air Quality*. Geneva, December, 1997.
- WMO. *Environmental Pollution Monitoring Research Programme N° 45 WMO*, Technical Document, No. 151. Geneva: 1986.

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

DIRECTOR GENERAL:

Dr. Luis Bérriz Pérez.

DIRECTOR:

Lic. Manuel Álvarez
González.

EDITOR:

Lic. Alejandro Montecinos
Larrosa.

CORRECCIÓN:

M Sc. Roberto Manzano
Díaz.

Ing. Jorge Santamarina

DISEÑO ELECTRÓNICO:

D.I. Antonio Romillo Polaino.

TRADUCCIÓN:

Lic. Lázaro O´Farril Lazo.

CONSEJO ASESOR:

Dr. Luis Hernández (Energía fotovoltaica)

Dr. Conrado Moreno Figueredo (Energía
eólica)

Lic. Bruno Henríquez Pérez (Física
ambiental)

Dr. Jorge Luis Paretas (Energía hidráulica)

Dr. Dania González Couret (Arquitectura
bioclimática)

Dr. Jorge Guardado (Biomasa)

Dr. Sergio Corp Linares (Energía solar
térmica)

Lic. Leonor Turtós Carbonell (Impacto
ambiental)

Lic. Alejandro Montecinos Larrosa (Energía
humana)

Lic. Ricardo Bérriz Valle (Educación
ambiental)



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

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

Teléfono: (537) 205-9949.

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

e-mail: editora@cubasolar.cu

<http://www.cubasolar.cu>