



REVISTA CIENTÍFICA TRIMESTAL DE CUBASOLAR

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

44



El viento en la ciudad: ¿amigo o enemigo?.....	1
Estudio de prospección eólica con fines energéticos en la Isla de la Juventud.....	15
Estimación de la pérdida de potencia en rodamientos de aerogeneradores considerando holgura radial y desalineación	25
Opiniones y recomendaciones al sector energético cubano	41
Organización general del proyecto del Parque Eólico de 51 MW La Herradura 1.....	52

El viento en la ciudad: ¿amigo o enemigo?

Wind in the city: friend or enemy?

Por Dr. Arq. Dania González Couret,
Dr. Obdulio Coca Rodríguez*
e Ing. Luis Guillermo Pérez González***

** Instituto Superior Politécnico
José Antonio Echeverría (ISPJAE), La Habana, Cuba.*

*** Empresa de Proyectos «Diseño Ciudad Habana»
(DCH), La Habana, Cuba.*

*e.mail: danial@arquitectura.cujae.edu.cu,
coca@arquitectura.cujae.edu.cu
y luisguillermo@dch.ch.gov.cu*

Resumen

A pesar de ser el parámetro climático más variable, el viento es esencial para el bienestar térmico en climas cálidos y húmedos como el de Cuba, donde casi el único mecanismo posible de termoregulación es la ventilación. Al mismo tiempo, el viento es útil como fuente de energía, fundamentalmente para la generación eléctrica y el bombeo de agua. Sin embargo, constituye una importante amenaza durante fenómenos naturales como huracanes y tornados, por su fuerza destructiva. Las investigaciones sobre el comportamiento del viento generalmente se especializan en uno de estos campos: bienestar humano y diseño bioclimático, energía eólica, o vulnerabilidad. Este trabajo se relaciona justamente con la integración de esos diversos enfoques. El problema sobre el que se reflexiona en el presente artículo es cómo las ciudades y los edificios pueden resolver esa contradicción para aprovechar las oportunidades que el viento ofrece. La investigación toma como base trabajos precedentes relacionados con estos campos, para identificar en cada caso las variables urbanas determinantes y su influencia. Para dar respuesta a la pregunta se considera el comportamiento del viento de acuerdo con el clima cubano en aras de satisfacer los requerimientos de ventilación (higiénica y térmica), y se identifican las variables del diseño urbano que influyen en la ventilación natural. Posteriormente, se analiza el viento como fuente de energía en relación con la arquitectura y el urbanismo, y la etapa siguiente consiste en la consideración del viento como amenaza cuando tienen lugar eventos meteorológicos como huracanes, tornados u otros similares, con vistas a evaluar los requerimientos para reducir la vulnerabilidad. Finalmente, todas las

necesidades se integran para identificar las fortalezas arquitectónicas y urbanas que permiten aprovechar las oportunidades que el viento ofrece.

Palabras clave: Arquitectura, diseño bioclimático, urbanismo, vulnerabilidad, climas cálido-húmedos, energía eólica

Abstract

In spite of being the most variable meteorological parameter, wind is essential for thermal well-being in hot and humid climates such as Cuba, where almost the only possible thermoregulation mechanism is ventilation. At the same time, wind is useful as a source of energy, mainly for electricity generation and water pumping. However, it constitutes an important threat during natural phenomena such as hurricanes and tornadoes, due to its destructive force. Research on wind behavior generally specializes in one of these fields: human well-being and bioclimatic design, wind power, or vulnerability. This paper is related to the integration of these various approaches. In this article we tackle the subject of how cities and buildings can overcome this contradiction to take advantage of the opportunities offered by the wind. The research is based on previous research related to these fields, in order to identify in each case the urban determinant variables and their influence. To answer the question, the behavior of wind according to the Cuban climate is considered in order to fulfil the requirements of ventilation (both hygienic and thermal), and the urban design variables that influence natural ventilation are identified. Subsequently, the possibilities of making good use of wind as an energy source are analyzed in relation to architecture and urbanism, and the next stage is the consideration of wind as a threat when meteorological events such as hurricanes, tornadoes or analogous events occur, in order to assess the requirements to reduce vulnerability. Finally, all the needs are integrated to identify the architectural and urban strengths that allow taking advantage of the opportunities that wind offers.

Keywords: Architecture, bioclimatic design, urban planning, vulnerability, hot-humid climates, wind energy

Introducción

El viento es el parámetro climatológico más variable, ya que cambia continuamente su velocidad, dirección y sentido, a pesar de que su comportamiento puede ser registrado y caracterizado según la frecuencia de ocurrencia. Esta situación es aún más imprecisa en las ciudades, porque la morfología urbana introduce nuevas modificaciones en el comportamiento del viento.

Sin embargo, el viento es un factor clave para el confort térmico en climas cálidos y húmedos, donde la evaporación de la transpiración que puede ser acelerada por la velocidad del viento es casi la única forma posible de intercambio de calor entre el cuerpo humano y su ambiente, y por tanto, constituye un mecanismo esencial de enfriamiento.

El viento es también útil como fuente de energía para generar electricidad, como energía mecánica para el bombeo de agua u otros usos, como los tradicionales molinos de viento. Pero al mismo tiempo, el viento puede ser muy peligroso cuando ocurren eventos meteorológicos extremos como huracanes y tormentas, en cuyo caso puede ocasionar un gran efecto destructivo.

Entonces, la pregunta es cómo las ciudades y los edificios pueden contribuir a resolver esta contradicción (reducir la vulnerabilidad y aprovechar las oportunidades).

Materiales y métodos

Ambos aspectos del viento son generalmente abordados de forma aislada. La ventilación debe ser maximizada en las ciudades para obtener condiciones ambientales más apropiadas para el confort térmico, por lo que en climas cálidos y húmedos debe estimularse el incremento de la velocidad del viento. Durante años se han desarrollado investigaciones encaminadas a proponer recomendaciones de diseño arquitectónico y urbano para incrementar la ventilación.

Otros equipos de investigación estudian la vulnerabilidad en edificios y ciudades para proponer soluciones que permitan reducir la velocidad del viento en áreas urbanas, con vistas a reducir el impacto negativo de los vientos fuertes en condiciones extremas.

En la presente investigación se evalúan las morfologías urbanas en relación con el comportamiento del viento, combinando ambos requerimientos: mejorar el confort térmico y reducir la vulnerabilidad. Para ello se han recopilado, clasificado, evaluado y comparado resultados de investigaciones precedentes, considerando ambos efectos contradictorios. Finalmente, se han identificado modelos urbanos que contribuyan a resolver la contradicción entre ambos objetivos.

Resultados y discusión

Ventilación natural

En climas cálido-húmedos como el de Cuba, las temperaturas y la humedad relativa son altas durante el día y la noche a lo largo del año, con una reducida amplitud de oscilación de los valores de las temperaturas máximas

y mínimas (Fig. 1). Por tanto, algunas estrategias de diseño pasivo válidas para climas cálido-secos, como la inercia térmica, el enfriamiento evaporativo o el gradiente térmico del suelo, no son aplicables en tales condiciones. Prácticamente, el único mecanismo posible de enfriamiento es la ventilación [González, 2010] (Fig. 2).

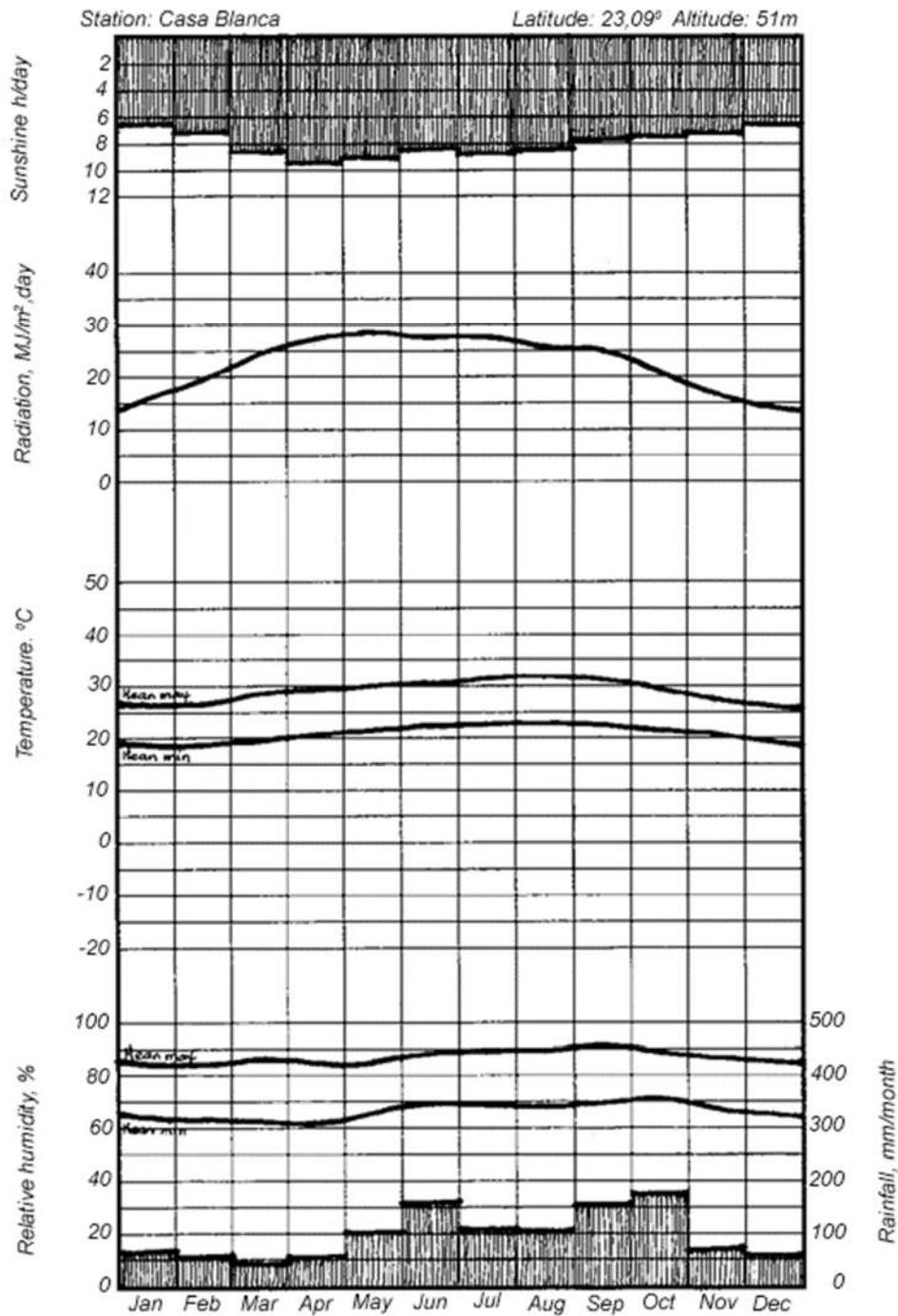


Fig. 1. Climograma para La Habana

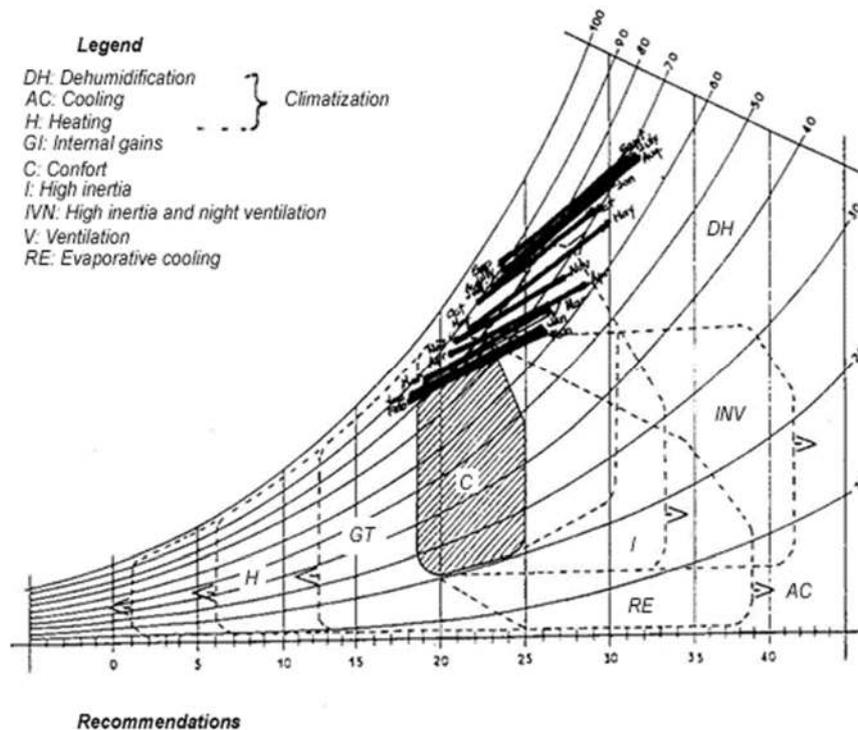


Fig. 2. Datos de temperatura y humedad máximos y mínimos mensuales de La Habana en Carta Bioclimática de Givoni.

La ventilación natural cumple tres funciones principales en estos climas: higiénica, térmica y de enfriamiento estructural [Alemany, et al., 1986]. El objetivo de la ventilación higiénica es mantener la calidad del aire interior, evitando la excesiva concentración de contaminantes, por lo cual el volumen del aire interior debe ser reemplazado cada cierto tiempo, en función de la actividad que se realiza y la cantidad de personas en el espacio dado. Esto genera un flujo de aire requerido, que es generalmente menor que el que se necesita por razones térmicas en condiciones cálidas y húmedas.

Es por ello que la ventilación térmica es determinante en tales casos, con el objetivo de reemplazar el aire caliente interior por el más fresco proveniente del exterior. Pero lo más difícil de alcanzar no es el caudal de aire requerido, sino las velocidades necesarias para el bienestar térmico humano. Como se ha señalado, según las temperaturas y la humedad relativa predominante en los climas cálidos y húmedos, la principal forma de intercambio de calor entre el cuerpo humano y su ambiente es la evaporación de la transpiración, que se acelera con la velocidad del aire en torno a las personas.

Las velocidades del aire recomendadas por algunos autores en esas condiciones son superiores a 1,5 m/s, lo cual es muy difícil de obtener en

interiores, e inclusive, si llegaran a ocurrir resultarían muy molestas [Givoni, 1998]. La ventilación para el enfriamiento estructural contribuye a reducir la temperatura de las superficies en la envolvente arquitectónica, y con ello, la radiación de calor emitida desde los cierres exteriores hacia el espacio interior. En ambos casos, el principal objetivo es incrementar el flujo de viento alrededor de los edificios y en su interior, maximizando las velocidades del aire en contacto con las personas.

El viento en el contexto urbano

Resulta muy difícil predecir el comportamiento exacto del viento y sus velocidades en cada punto y momento, ya que cambia constantemente y es inclusive modificado en el contexto urbano por las calles, la vegetación, los propios edificios, e inclusive por el cierre o abertura de vanos en los espacios interiores. Sin embargo, un principio esencial del bienestar térmico humano en climas cálido-húmedos es incrementar la ventilación todo el tiempo, tanto como sea posible.

Para ello es importante conocer cómo el contexto urbano influye en el comportamiento del viento, y cómo optimizar esa relación. En una estructura urbana convencional, el viento que entra en la ciudad es canalizado por las calles que actúan como cañones, y que constituyen a su vez los bordes de las manzanas (Fig. 3). Entonces, el flujo de viento a lo largo de las calles puede entrar en la masa edificada de la manzana, en dependencia de su permeabilidad. Por tanto, el organismo urbano puede ser clasificado según su influencia en el comportamiento del viento en calles y masa construida.

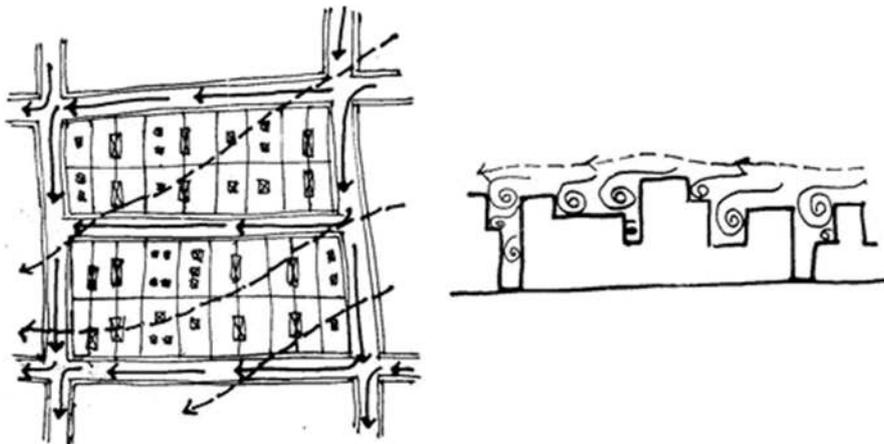


Fig. 3. Comportamiento del viento en la ciudad.

El flujo del viento y sus velocidades a lo largo de las calles dependerá de su orientación, trazado y sección. La orientación de las calles con respecto a los vientos predominantes determina la cantidad de viento canalizado y su

velocidad (Fig. 4). A su vez, el trazado de la calle (ordenamiento, regularidad y continuidad), así como su sección, influyen en el flujo de viento.



Fig. 4. Foto aérea de La Habana donde se aprecian diferencias en la orientación de las calles.

La sección de la calle es el parámetro más complejo que influye en el flujo de viento a lo largo de la vía (Fig. 5). La relación alto/ancho condiciona la velocidad del viento [Johansson, 2006], y la regularidad en la altura de los edificios a ambos lados de la vía también impacta el efecto de canalización. La morfología urbana determina la asociación de los edificios, es decir, la continuidad de la fachada, o su permeabilidad, cuando los edificios están separados por corredores, expresando cuán compacta es la fachada hacia la calle.



Fig. 5. Sección de calle en La Habana Vieja.

Las regulaciones urbanas incluyen todos esos parámetros en relación con las dimensiones, jerarquía y carácter de las calles, así como la presencia de vegetación. Finalmente, las características físicas de la arquitectura complementan las condiciones de la calle. La relación de volúmenes y huecos (llenos y vacíos) en las fachadas determina su permeabilidad al viento.

Los balcones, voladizos y aleros, así como las plantas bajas libres, portales y galerías, además de las ventanas, modifican el flujo de viento a lo largo de la calle.

El viento canalizado por las calles penetra en la masa construida por las diferencias de presión generadas entre los bordes de las fachadas y la parte superior de los edificios dentro de las manzanas, es decir, por la capa de viento que fluye sobre los edificios. La forma en la que el viento entra en los edificios, o en los espacios abiertos dentro de la manzana y los cruza, el flujo que se genera, su dirección, trazado y velocidad, dependerá de la masa construida: cuán compacta es, cuán permeable y cuán irregular es su perfil (Fig. 6).



Fig. 6. Vista aérea de la masa construida semi-compacta en El Vedado.

La posibilidad real de penetración del viento en la manzana depende de cuán compacta esta sea, lo cual está determinado por el coeficiente de ocupación del suelo, la forma de asociación de los edificios, su forma volumétrica y altura. El espacio entre los edificios (si existe) puede generar corredores que actúen como túneles de viento, cuyo efecto dependerá de su sección, continuidad y rugosidad, que incluye la posible influencia de la vegetación en esos espacios. En la masa construida compacta también influye la presencia de patios, con independencia de sus dimensiones y proporciones (Fig. 7).

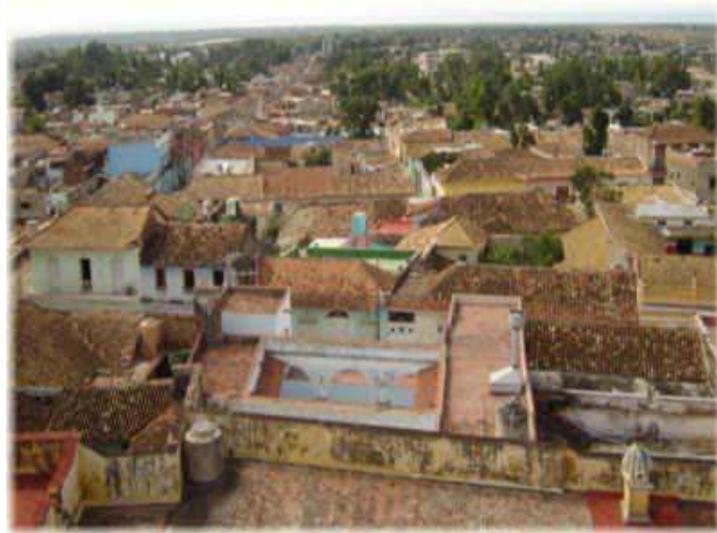


Fig. 7. Presencia de patios en la trama urbana compacta del centro de Cienfuegos.

La capa de viento sobre los edificios genera una diferencia de presiones con respecto a los bordes del canal que constituye la calle, que dependerá de la rugosidad de la masa construida, lo cual queda determinado por la regularidad del perfil urbano, es decir, por las diferencias de altura entre los edificios. Otra característica importante de la masa construida que influye en el comportamiento y flujo del viento es su permeabilidad, que depende de las dimensiones, proporciones, localización y tipo de ventanas en los edificios.

El viento como fuente de energía

La fuerza del viento ha sido históricamente usada como fuente de energía, desde los barcos de vela y los molinos de viento, hasta los parques eólicos. Para convertir la fuerza del viento en energía mediante un aerogenerador, se requiere de un flujo de viento constante y estable en dirección y velocidad, lo que puede obtenerse en áreas aisladas, pero resulta difícil de alcanzar en contextos urbanos donde el comportamiento del viento es muy variable y se ve afectado por numerosos parámetros, fundamentalmente en las zonas centrales de las ciudades [Moreno, 2011].

El concepto del edificio como generador de energía se ha tomado como base para diseñar edificios cuya forma se subordina al flujo del viento, en aras de concentrar las mayores velocidades en ciertos lugares donde se ubican los aerogeneradores (Fig. 8). Pero en todos los casos se trata de edificios altos y aislados, ubicados en grandes espacios abiertos sin obstrucción, y que actúan como elementos significativos del paisaje.



Fig. 8. El edificio como generador que subordina su forma al viento.

Este no es el caso dentro del contexto urbano, donde los edificios se encuentran uno al lado del otro, aprovechando al máximo el suelo urbano y conformando una masa construida relativamente compacta. El posible uso de aerogeneradores en tales condiciones no ha sido totalmente demostrado aún, y por tanto, el uso de estos equipos para generar energía en las ciudades hasta el momento no se integra al contexto urbano, o al diseño de los edificios.

El viento como amenaza

Las tormentas tropicales, tornados y huracanes son fenómenos meteorológicos que ocurren en algunas áreas geográficas durante ciertos períodos, en los cuales aquellos son más frecuentes. Entre sus principales características se encuentran las fuertes velocidades de los vientos, que pueden ser peligrosas como resultado de su efecto destructivo en el ambiente construido (Fig. 9). Cuba suele ser afectada con cierta frecuencia por huracanes, que pueden cruzar el territorio nacional por cualquier parte. Por tanto, reducir la vulnerabilidad en las ciudades que enfrentan ese fenómeno es un principio esencial a seguir.



Fig.9. Efecto destructivo del viento huracanado.

No solo los vientos fuertes ocasionan destrucción durante un huracán, sino que también las abundantes lluvias asociadas provocan inundaciones, y pueden hacer colapsar los edificios (Fig. 10). Las altas velocidades de los vientos generan grandes presiones en la envolvente de los volúmenes edificados, que pueden hacer volar los techos ligeros, derrumbar las paredes y abrir las ventanas, desprenderlas de las paredes e inclusive destruirlas, como resultado de lo cual los fuertes vientos pueden penetrar al interior de los edificios, arrastrando todo lo que se encuentra en su interior como el mobiliario, equipos, pertenencias de las personas, y destruir todo. Los vientos de tormenta afuera pueden también acarrear efectos peligrosos que podrían golpear los edificios, destruyendo sus componentes, y también, dañar a las personas [Coca, 2009].

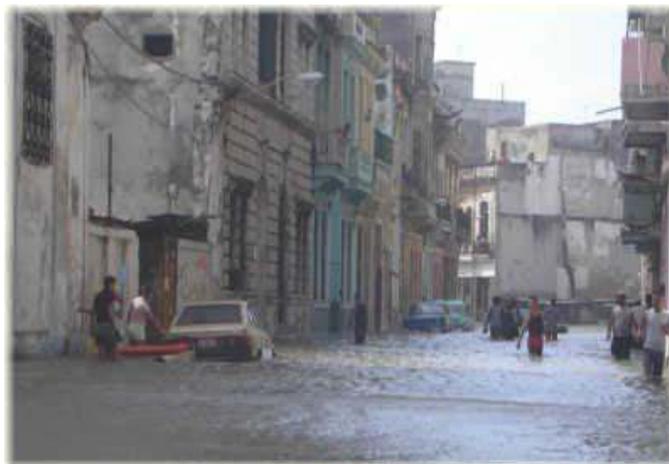


Fig.10. Inundaciones ocasionadas por las grandes lluvias asociadas a los huracanes.

Requerimientos integrados

Lo que se necesita para la vida cotidiana en un clima cálido-húmedo es justamente lo contrario de lo que se requiere para resistir y protegerse durante un huracán. Para lograr el confort térmico en esas condiciones climáticas, de acuerdo con los tradicionales manuales de diseño, el edificio debe ser lo suficientemente ligero para no almacenar calor y enfriarse rápidamente, con aleros para proporcionar sombra y muy abierto y permeable a la ventilación natural.

Una cubierta ligera doble y ventilada puede volar si la velocidad del viento es alta, y cuando esta tiene grandes aleros la presión del viento para levantar el techo se incrementa. Por otro lado, es difícil controlar el flujo del aire o evitar la penetración de los fuertes vientos si el edificio es muy permeable para proporcionar tanta ventilación natural como sea posible. Los árboles, tan necesarios para ofrecer sombra y reducir el efecto de la isla de calor urbana, pueden convertirse en elementos peligrosos si son presionados por el viento cuando se encuentran muy cerca de los edificios.

Por tanto, si las condiciones requeridas para mantener ambientes interiores confortables en la vida diaria son contrarias a las necesarias para reducir la vulnerabilidad en situaciones extremas, la única solución posible sería transformar los edificios justo en el momento requerido para adecuarlos a esas situaciones, en lugar de generar edificios seguros pero invivibles (Figs. 11 y 12).

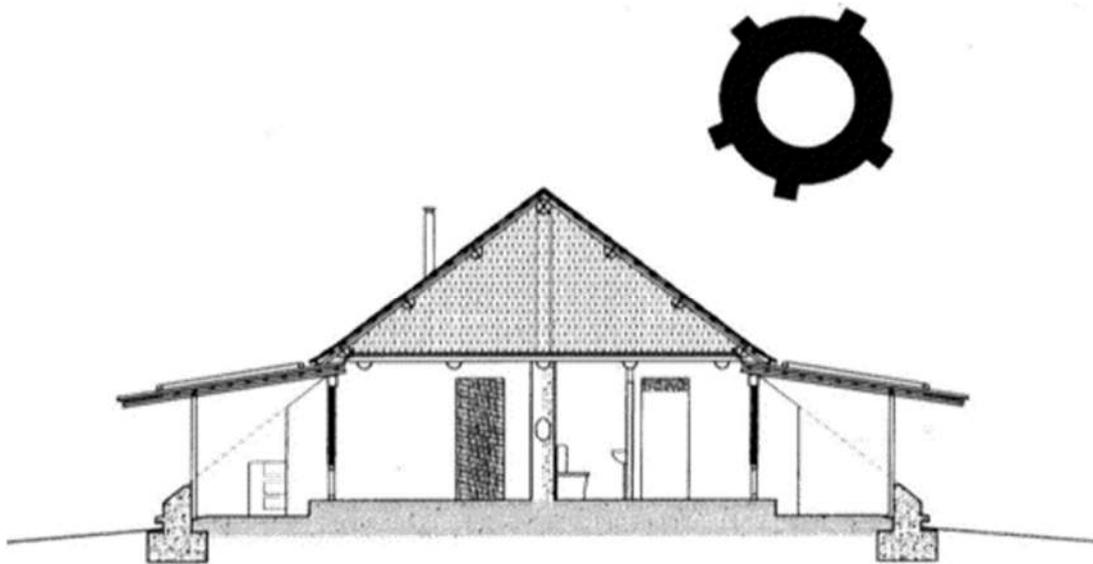


Fig.11. Arquitectura permeable al viento y protegida del sol.

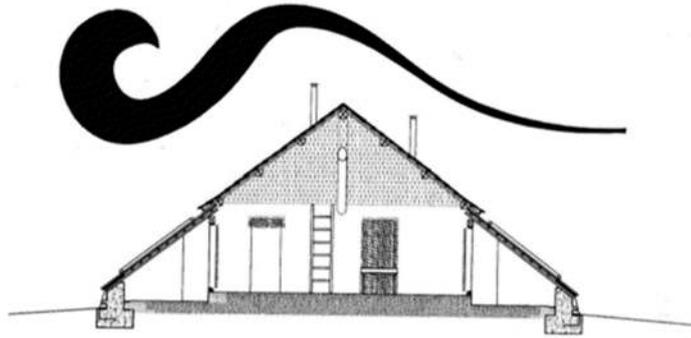


Fig.12. Arquitectura que se transforma para protegerse contra fuertes vientos huracanados. Propuesta de estudiante sueca Teres Silverg.

La misma reflexión puede aplicarse a la morfología urbana. Teniendo en cuenta las variables que influyen en el comportamiento del viento en la ciudad, los tipos urbanos pueden ser identificados y clasificados, según la conveniencia para el ambiente térmico interior y el bienestar humano, y al mismo tiempo, en función de su vulnerabilidad ante los fuertes vientos de tormenta. Como que ambos requerimientos son opuestos, y no es fácil transformar el tejido urbano como la arquitectura, los mejores modelos urbanos en relación con ambos puntos de vista deben ser los que presentan condiciones intermedias, que permiten una posición de equilibrio con respecto a ambos extremos: No muy buenos para la ventilación natural, y no tan vulnerables ante huracanes.

Los modelos que cumplen esas condiciones son los semi-compactos como El Vedado (Fig. 13), donde el coeficiente de ocupación del suelo no es tan alto como en las urbanizaciones compactas (Centro Habana), ni tan bajo como en las abiertas (Alamar). En esos casos, las calles se definen como cañones, pero no muy cerrados, y la permeabilidad de la masa construida es media, mediante corredores discontinuos. Este es el enfoque teórico del problema, cuya solución debe ser verificada mediante mediciones y simulaciones que se deben llevar a cabo en futuras investigaciones.



Fig.13. La morfología semi-compacta de El Vedado ofrece condiciones intermedias.

Conclusiones

- Es posible clasificar el organismo urbano según su influencia en el comportamiento del viento en calles y masa construida.
- Lo que se necesita para la vida cotidiana en un clima cálido-húmedo, es justamente contrario a lo que se requiere para resistir y protegerse durante un huracán.
- La única posible solución de esta contradicción sería transformar los edificios justo en el momento requerido para adecuarse a las condiciones extremas, en lugar de generar edificios seguros pero invivibles.
- Como ambos requerimientos son opuestos, y el tejido urbano no es fácil de transformar como la arquitectura, los mejores modelos urbanos relacionados con ambos puntos de vista deben ser los de condiciones intermedias que representan una posición de equilibrio con respecto a los dos extremos: no muy buenos para la ventilación natural, y no tan vulnerables ante huracanes.
- Este es el enfoque teórico del problema, cuya solución deberá ser verificada mediante mediciones y simulaciones.

Bibliografía

ALEMANI, A., et. al. (1986). *Climatología, iluminación y acústica*. La Habana: Ediciones ISPJAE, 1986.

COCA, O. (2009). «Daños del viento en zonas urbanas», en *Revista de Arquitectura y Urbanismo*, no. 1, ISPJAE, La Habana, 2009.

GIVONI, B. (1998). *Climate Considerations in Building and Urban Design*. New York: Van Nostrand Reinhold, 1998.

GONZÁLEZ COURET, DANIA (2010). *Arquitectura bioclimática*, La Habana: Ed. Científico Técnica, 2010.

JOHANSSON, E. (2006). *Urban Design and Outdoor Thermal Comfort in Warm Climates. Studies in Fez and Colombo*. Lund: Lund University, 2006.

MORENO FIGUEREDO, CONRADO (2011). *Energía eólica. Tecnología y aplicaciones*. La Habana: Ed. Academia, 2011.

Estudio de prospección eólica con fines energéticos en la Isla de la Juventud

Wind survey for energy purposes in the Isle of Youth

*Por M. Sc. Edgardo Soler Torres, Lic. Ramón Rivero Magaña,
Lic. Yoendris Rosales Sánchez y Lic. José Izquierdo Novelle*

** Centro Meteorológico, Isla de la Juventud, Cuba.*

*** Delegación del CITMA, Isla de la Juventud, Cuba.*

e-mail: edgardo.soler@ijv.insmet.cu

Resumen

La Isla de la Juventud es el segundo territorio en extensión del archipiélago cubano, en ella se promueve la aplicación demostrativa de tecnologías de energías renovables ambientalmente casi inocuas, y ello es uno de los objetivos del proyecto «Producción y Comercialización de Servicios Energéticos Renovables. Caso: Isla de la Juventud», con cuyo financiamiento se logró la instalación de una red de prospección eólica. A partir de sus registros cada 10 minutos se obtuvieron los valores medios de la velocidad del viento, rosas del viento, distribuciones de frecuencia, perfiles verticales y el atlas de viento climático para cada estación. Utilizando diversas capas de información digital disponibles en SIG con base cartográfica 1:25000, así como imágenes de satélites y la información recogida en expediciones de campo, se confeccionó el mapa de cambios de rugosidad para la Isla de la Juventud, que conjuntamente con el mapa de curvas de nivel y las series temporales de velocidad y dirección del viento, fueron utilizadas como entradas al modelo de microescala WAsP (Wind Atlas Analysis and Application Program), obteniéndose la distribución de la densidad de potencia del viento a 50 m de altura sobre el suelo, con una resolución espacial de 100 m. El resultado indica que los máximos de potencial eólico están en las elevaciones del Norte de la Isla, seguidos por una franja estrecha a lo largo de la costa Este y pequeñas áreas sobre las elevaciones del Este y el centro. El análisis detallado permitió la identificación de un área promisorio en paisaje llano hacia el extremo Nordeste de la Isla. La estimación de producción anual de energía (MWh) realizada para una turbina promedio del Parque Eólico Los Canarreos, fue verificada respecto al real generado, arrojando desviaciones de 3 a 8%, con coeficientes de disponibilidad técnica entre 0,93 y 0,97, respectivamente.

Palabras clave: Potencial eólico, rugosidad, viento, WAsP

Abstract

The Isle of Youth is the second largest territory of the Cuban archipelago, in which the demonstrative application of environmentally friendly renewable

energy technologies is promoted, one of the objectives of the project “Production and Marketing of Renewable Energy Services. Case: Isla de la Juventud”, which financed the setting up of a wind prospecting network. The records obtained every 10 minutes by the network allowed to obtain the mean values of wind speed, wind roses, frequency distributions, vertical profiles and the climatic wind atlas for each station. Using various layers of digital information available in GIS with 1:25000 cartographical bases, satellite images, information gathered in field expeditions, the map of rugosity changes was obtained for the Isle of Youth. This map, together with the map of contour lines and time series of wind speed and direction, were used as inputs to the model of microscale WAsP (Wind Atlas Analyzes and Application Program), obtaining the distribution of the power density of the wind at 50 m of height, with a spatial resolution of 100 m. The result indicates that the maximum wind potential is in the heights on the North of the Island, followed by a narrow strip along the East coast and small areas on the elevations of the East and the center. The detailed analysis allowed the identification of a favorable area in a flat landscape towards the Northeast end of the Island. The estimation of annual energy production (in MWh) made for an average turbine of Los Canarreos Wind Farm was verified with respect to the actual generated, showing deviations from 3 to 8%, with technical availability coefficients between 0.93 and 0.97, respectively.

Keywords: Wind potential, roughness, wind, WAsP

Introducción

Los estudios sobre el recurso eólico en Cuba se realizan desde principios de la década del 70 del siglo xx, cuando Boytel [1972] publicó su *Geografía Eólica de Oriente*. Un fuerte impulso se da a las investigaciones sobre el recurso eólico a partir de 2006, que permitió la publicación de la Primera Edición del Mapa Eólico de Cuba [Soltura, et al., 2009], en el cual se identifican zonas geográficas de excepcional potencial eólico.

Recientemente se culminó un detallado estudio sobre la caracterización físico-meteorológica de las capas bajas de la atmósfera, a partir de la implementación de una red de torres altas de gradiente, y su aplicación al estudio del viento como fuente de energía [Roque, et al., 2010a].

El antecedente directo, y del cual consideramos una continuidad este trabajo, es la «Evaluación del potencial eólico en Cuba. Aplicaciones del WAsP (Wind Atlas Analysis and Application Program): Atlas Eólico de la Isla de la Juventud» [Soltura, et al., 2004], que se realizó con datos a 10 m de altura en las estaciones meteorológicas como parte del proyecto internacional SWERA (Solar and Wind Energies Resources Assessment),

ocasión en la que por primera vez un especialista del territorio participó en un estudio sobre el recurso eólico.

La Red Mundial de Mediciones Eólicas (MEASNET) exige para los estudios de factibilidad que los datos sean registrados cada 10 minutos, y en al menos dos niveles de medición, donde el más alto esté preferiblemente a la altura del buje del aerogenerador [Roque, et al., 2010a]. Los primeros pasos para obtener información que cumpliera esos requisitos internacionales se dieron a mediados de la década de los 90 del pasado siglo xx, realizándose temporadas de mediciones del viento a alturas superiores a 10 m en algunos puntos de la Isla. Posteriormente, entre 2007 y 2008 se establecieron mediciones en el Parque Eólico Los Canarreos, las que fueron interrumpidas al paso del huracán Gustav. Pero es a finales de 2009 que con el financiamiento del Proyecto Internacional «Producción y comercialización de servicios energéticos renovables. Caso: Isla de la Juventud», se logra iniciar la instalación de una pequeña red de prospección eólica con 3 mástiles de medición de hasta 50 m de altura, que han aportado la base de datos para la ejecución de este proyecto, enfocado en el cálculo de la potencia del viento con fines energéticos aplicando la metodología del programa WAsP.

Materiales y métodos

Se utilizaron 54 409 registros de datos cada 10 minutos, generados por los sensores de cada uno de los mástiles de medición instalados en la Isla de la Juventud durante un periodo de 377 días consecutivos, los que fueron gestionados por una base de datos estructurada en Microsoft Access, que consta de una tabla con todos los casos arreglados en campos definidos a partir de los ficheros *.csv, que organiza el programa PC 400, que comunica el Centro con los mástiles.

Para el análisis estadístico de las series temporales se utilizó el programa computacional SPSS (Statistical Product and Service Solutions), en su versión 15.0. Los cálculos de densidad de potencia del viento fueron realizados con el WAsP 9.1, tomando como información de entrada las series temporales de velocidad y dirección del viento preparadas con el OWC Wizard (Observed Wind Climate), y las bases de datos cartográficas correspondientes a las curvas de nivel y cambios de longitud de rugosidad preparadas con el WAsP Map Editor.

Discusión de los resultados

Velocidades medias mensuales

La figura 1 muestra el comportamiento correspondiente a la velocidad media mensual a 50 m de altura, en las tres estaciones anemométricas

emplazadas en el territorio pinero, permitiendo caracterizar esta variable en el ciclo anual. El valor máximo de velocidad media mensual durante el periodo, fue de 6,20 m/s, reportado por Columbia en diciembre. Mientras, el valor mínimo lo reportó San Pedro en agosto, con 3,02 m/s. Aunque en sentido general el año presentó un comportamiento cercano a la climatología obtenida con las estaciones meteorológicas [Rivero, 2003], pueden mencionarse el máximo secundario de junio y los valores alcanzados en diciembre como particularidades del periodo, lo que está en correspondencia con el análisis de representatividad realizado con los datos a 10 m de altura.

La mediana, índice estadístico que fija 50% de los datos de una serie, indica que el viento sopla con valores superiores a 4,90 m/s en Columbia, 4,72 m/s en La Demajagua y 4,65 m/s en San Pedro, durante una cantidad de horas proporcional a la mitad del año.

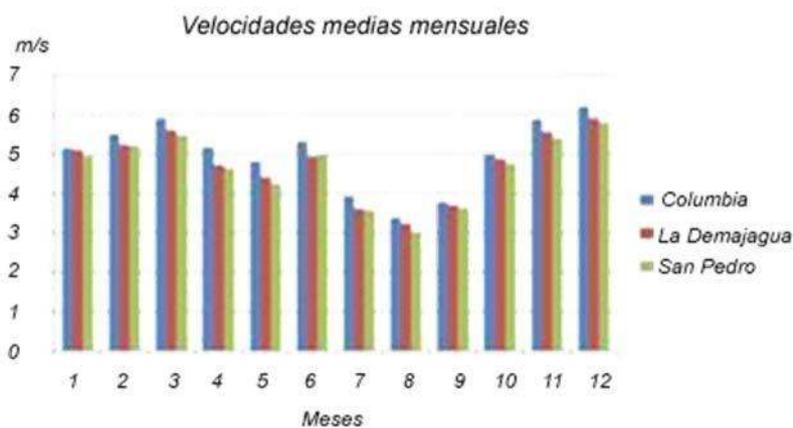


Fig.1. Comportamiento de la velocidad media del viento a 50 m de altura en Columbia, La Demajagua y San Pedro

Frecuencias de velocidades medias ≥ 4 m/s

El intervalo de funcionamiento de los aerogeneradores suele estar entre 4 y 25 m/s [Moreno, et al., 2007], de ahí la necesidad del análisis de las frecuencias con que se presentó ese rango de valores de la velocidad del viento durante el periodo estudiado.

Las distribuciones de la figura 2 evidencian dos comportamientos bien definidos en la climatología del viento en la Isla de la Juventud [Rivero, 2003] y [Soler, et al., 2010], representados por Columbia (costa Este) y La Demajagua-San Pedro (Centro-Oeste), con diferencias apreciables en las frecuencias de los valores, entre 5 y 9 m/s. Las frecuencias más altas fueron de 31,6 y 29,4% en San Pedro y La Demajagua, respectivamente, para 5 m/s. Mientras Columbia registró las frecuencias superiores para las

velocidades entre 7 y 10 m/s, siendo significativa para el territorio la alcanzada para los 8 m/s, de 13,6%.

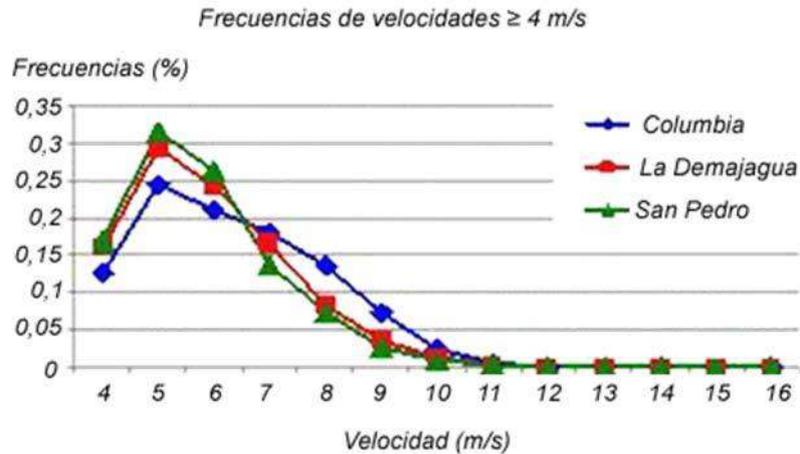


Fig.2. Distribución de frecuencias de velocidades medias ≥ 4 m/s registradas cada 10 minutos a 50 m de altura en Columbia, La Demajagua y San Pedro.

El análisis demuestra que las frecuencias de los valores ≥ 4 m/s tienen comportamientos diferentes para las temporadas seca y lluviosa del año, lo que también ocurre en las estaciones meteorológicas y torres de referencia emplazadas en Cuba [Roque, Niebla y Reyes, 2010]. Las frecuencias de las velocidades entre 4 y 5 m/s predominan durante la temporada lluviosa, mientras que las frecuencias de los valores a partir de 6 m/s son superiores en la temporada seca. Sin embargo, en ambas temporadas se mantiene como valor modal 5 m/s, y las frecuencias de ocurrencia para velocidades ≥ 10 m/s describen un comportamiento asintótico, aproximándose a cero.

Evaluación y caracterización del potencial eólico a 50 m de altura

Para determinar la densidad de potencia del viento se programaron en WAsP 48 rejillas de 10 x10 km con 10 000 nodos, que abarcan el área de la Isla de la Juventud y parte de sus mares adyacentes, teniendo en cuenta, según recomendaciones de WAsP [2009], que las zonas de interés deben quedar a más de 5 km de distancia del borde del dominio de cálculo.

El resultado final en formato vectorial fue elaborado tomando en cuenta las clases de energía del viento propuestas por la Organización Meteorológica Mundial (OMM) en su Nota Técnica No. 175 de 1981, citada por Roque et al [2010a], permitiendo las comparaciones del resultado obtenido en este estudio con sus antecedentes y cualquier otra investigación realizada bajo esa clasificación internacional. El mapa demuestra que los máximos de potencial del viento están localizados en las elevaciones del Norte de la Isla, con el valor extremo clasificado de Excepcional en Sierra de Caballos

(> 600 W/m²), y con clasificación Excelente (de 500 a 600 W/m²) sobre Sierra de Casas y Sierra Colombo, seguidos por una franja estrecha a lo largo de toda la costa Este y pequeñas áreas en las elevaciones del Este y Centro de la Isla, con clasificación Marginal (de 200 a 300 W/m²). En el resto del territorio predomina la clasificación energética Pobre (de 100 a 200 W/m²), localizándose los mínimos en zonas llanas cercanas a Sierra de la Cañada y al Oeste (sotavento) de La Daguilla, lo que coincide con la zona de convergencia de las brisas, así como en el extremo Suroeste de la llanura Sur.

Teniendo en cuenta el predominio de la Clase 2 con clasificación Pobre (de 100 a 200 W/m²) en los valores de densidad de potencia obtenidos, para el análisis detallado de las diferentes regiones de la Isla se ha desglosado la escala en cinco subrangos de la Clase 2, como muestra la figura 3, en la que se evidencia un apretado gradiente, semejante a un «frente» de potencia, con franjas estrechas (de 180 a 200), (de 160 a 180) y (de 140 a 160 W/m²) en los primeros 5 o 6 km a partir de la línea de costa Este-Sudeste hacia el interior, y una rápida disminución hacia el centro y Oeste del territorio, exceptuando el primer cuadrante donde predominan los valores entre 140 y 160 W/m², ocupando áreas al Este del río Las Casas, el Aeropuerto de Nueva Gerona, Mal País y el Sur de Santa Fe hasta el cerro de La Jía, destacándose que el Parque Eólico Los Canarreos quedó dentro de este rango de potencial.

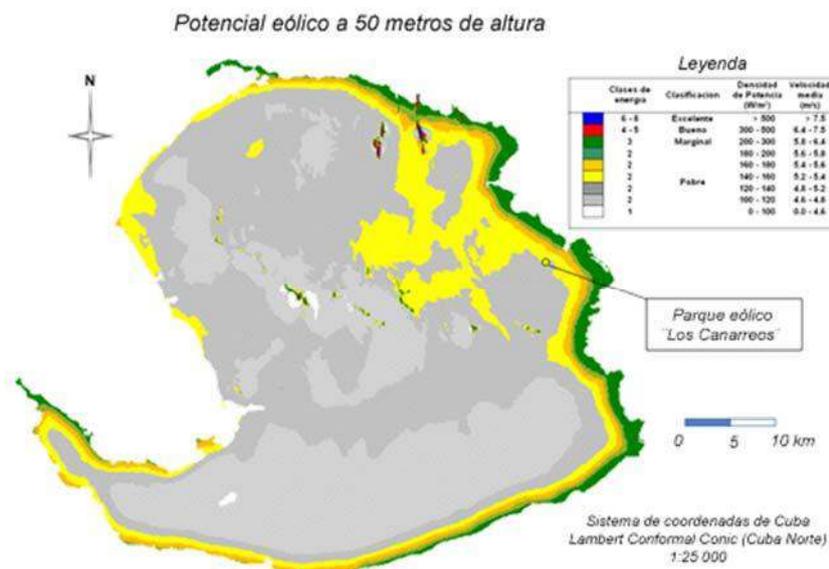


Fig.3. Mapa de densidad de potencia del viento a 50 m de altura sobre el suelo en la Isla de la Juventud a escala 1:25 000, con subrangos de la clasificación Pobre (de 100 a 200 W/m²).

La principal diferencia del resultado de este estudio con sus antecedentes, está en los valores de potencial obtenidos para la franja costera del Este de la Isla, los que consideramos fueron sobrestimados por Soltura, et al. [2009] al obtener una clasificación energética de Bueno, y algunas áreas de Excelente. Sin embargo, en cuanto a la localización espacial de los valores extremos, ambos resultados coinciden como tendencia, con máximos en las elevaciones del Norte y mínimos hacia el interior y Sur, mostrando discretamente la extensión de la Ciénaga de Lanier, que separa la llanura boscosa meridional de la mitad Norte del territorio.

Al compararlo con Soltura, et al. [2004] aparece una diferencia en la distribución espacial sobre la llanura Sur, ya que en aquella ocasión se obtuvieron máximos sobre el bosque y mínimos sobre la ciénaga. En cuanto a los valores de potencia obtenidos, estuvieron ligeramente por debajo a los de este estudio para el terreno llano, lo que está muy ligado a la base de datos utilizada.

El análisis espacial en SIG, y los ejercicios de predicción realizados utilizando el modelo WAsP para los emplazamientos de los mástiles y otros enclaves en paisaje llano, permitieron la identificación de un área promisoría hacia el extremo Nordeste de la Isla, que posee mejores condiciones de potencia del viento que el actual enclave del Parque Eólico Los Canarreos, representada en los cálculos energéticos por el sitio pronóstico Cayo Gordo.

Estimación de la producción anual de energía

Para determinar la producción anual de energía eléctrica a partir de la utilización de turbinas eólicas comerciales, se seleccionó la turbina eólica modelo VERGNET GEV MP 32/275, teniendo en cuenta que seis de ellas están en funcionamiento en el Parque Eólico Los Canarreos y se dispone de sus datos técnicos y curva de potencia.

De cinco localidades seleccionadas, el sitio pronóstico de Cayo Gordo, localizado en el NE de la Isla, con valores de densidad de potencia entre 160 y 180 W/m² en el mapa, es el que posee la mayor producción anual de energía con 324,91 MWh/año, y un factor de capacidad de 13,3%, seguido por el Parque Eólico y el mástil de Columbia, los tres cercanos a la costa Este de la Isla. Mientras, los mástiles de La Demajagua y San Pedro evidencian una disminución de la producción eólica hacia el interior del territorio.

Verificación de la estimación para el Parque Eólico Los Canarreos

Para la verificación de las estimaciones realizadas era necesario conocer el coeficiente de disponibilidad técnica (CDT), el cual indica el número de horas en que el aerogenerador se encuentra disponible para trabajar. Esto,

sin tener en cuenta el tiempo en que el aerogenerador no funciona por efecto de encontrarse la velocidad del viento fuera del intervalo de operación, ni tampoco el tiempo en que la red eléctrica está fuera de servicio [Moreno, 2010].

Los valores reales del CDT logrados por el Parque Eólico Los Canarreos en los años 2011 y 2012, fueron facilitados por la entidad empresarial que lo opera. Se consideró que la desviación obtenida para el 2011 (0,43%) está sesgada por el bajo CDT del Parque (0,84), y no debe tomarse como referente de efectividad en la verificación del resultado. Más confiables son: el valor de desviación de 2,99% obtenido para el 2012, cuando el parque trabajó con una disponibilidad técnica de 0,93, y el determinado para un CDT teórico de 0,97, que resultó 7,87%.

Conclusiones

- a) La característica anual de la velocidad media del viento a 50 m de altura, y sus distribuciones de frecuencias, evidencian un comportamiento estacional de esta variable, con máximos en la temporada seca y mínimos en la temporada lluviosa.
- b) El mapa de densidad de potencia del viento a 50 m de altura obtenido, sitúa los máximos de potencial eólico en las elevaciones del Norte de la Isla, corroborando investigaciones anteriores [Soltura, et al., 2004; Soltura, et al., 2009], seguidos por una franja estrecha a lo largo de la costa Este y pequeñas áreas sobre las elevaciones del Este y Centro, pero con valores inferiores a las estimaciones realizadas por Soltura, et al. [2009], con mediciones a 10 m de altura, las que consideramos sobreestimaron el potencial para estas zonas del territorio.
- c) El análisis detallado permitió identificar un área promisorio en paisaje llano hacia el extremo Nordeste de la Isla. Los cálculos energéticos pronósticos para un punto localizado en esa área (Cayo Gordo), indican condiciones de potencial del viento superiores a las existentes en el enclave del Parque Eólico Los Canarreos.
- d) Como criterio de verificación del cálculo de producción anual de energía para una turbina eólica modelo VERGNET GEV MP 32/275, se presentan las desviaciones porcentuales obtenidas para el sitio del Parque Eólico Los Canarreos, con valores de 3 a 8%, con coeficientes de disponibilidad técnica entre 0,93 y 0,97, respectivamente.

Recomendación

- a) Incorporar los resultados de este estudio a la información disponible para consultar por los tomadores de decisiones del territorio pinero, así como para los especialistas vinculados al tema.

Bibliografía

BOYTEL JAMBÚ, FERNANDO (1972). *Geografía eólica de Oriente*. Santiago de Cuba: Ed. Ciencia y Técnica, Instituto de Planificación Física, 1972. 251 pp.

MORENO FIGUEREDO, CONRADO (2010). «Indicadores de funcionamiento de un aerogenerador», en *Energía y tú*, no. 49, 2010. Disponible en Internet: <http://www.cubasolar.cu/biblioteca/Energia/Energia49/HTML/Articulo04.htm>.

MORENO FIGUEREDO, CONRADO, et al. (2007). *Diez preguntas y respuestas sobre energía eólica*. La Habana: Ed. CUBASOLAR, 2007. 309 pp.

RIVERO MAGAÑA, RAMÓN (2003). «Caracterización del viento en las estaciones meteorológicas». Isla de la Juventud: Unidad de Ciencia y Tecnología, Delegación CITMA, 2003.

ROQUE RODRÍGUEZ, AFREDO; YADIERY NIEBLA SOSA Y PABLO REYES MARTÍNEZ (2010). «Perfil vertical del viento sobre Cuba en los primeros 100 m de altura sobre la superficie. Su importancia en la toma de decisión de los emplazamientos eólicos», en *VI Congreso de Meteorología*. La Habana: 2010.

ROQUE RODRÍGUEZ, ALFREDO; ROLANDO SOLTURA MORALES, RAÚL NOVO MESEGUÉ, DIETER ROJAS REMIS, LOURDES ÁLVAREZ ESCUDERO, MIRIAM LIMIA MARTÍNEZ, MAGDIEL CARRASCO DÍAZ, RAIMUNDO VEGA GONZÁLEZ, YAIMA RODRÍGUEZ VALIENTE, PABLO REYES MARTÍNEZ, REINALDO BÁEZ ALTAMIRANO, YADIERY NIEBLA SOSA, JOSÉ ARMANDO ESPINOSA MARTÍNEZ, PABLO VARONA DE VARONA, ORLANDO OSA PERALO, ALAIN CALZADILLA RIVERO, KARELIA FERNÁNDEZ CASTILLO, MAYRA SANTANA RAMÍREZ Y MARIO CARNESOLTAS CALVO (2010a). *Proyecto: Caracterización físico-meteorológica de las capas bajas de la atmósfera a partir de la implementación de una red de torres altas de gradiente y su aplicación al estudio del viento como fuente de energía*. La Habana: INSMET, 2010. 177 pp.

SOLER TORRES, EDGARDO; ALEYDA CARDOSO INFANTE, ISRAEL ARENCIBIA GONZÁLEZ Y YOANI CARDERO MONTERO (2010). «Estudio del viento trihorario en la temporada lluviosa», en *Revista Isla, Ciencia y Tecnología*. Disponible en Internet: <http://www.gerona.inf.cu/modules.php?name=revista>.

SOLTURA MORALES, ROLANDO; ALFREDO ROQUE RODRÍGUEZ, IBIS RIVERO LLERENA, ANTONIO WALLO, REYNALDO BÁEZ ALTAMIRANO, RANSÉS VÁZQUEZ, RAMÓN RIVERO, LILIAN AYALA PÉREZ, GLORIA RODRÍGUEZ FERNÁNDEZ, HAZLE CARRASCO, ALFREDO CURBELO ALONSO, ANDRÉS GONZÁLEZ BARRERA, OMAR HERRERA SÁNCHEZ, GUSTAVO MARTÍN MORALES Y JOSÉ CARLOS DÍAZ VIDAL

(2009). «Primera edición del Mapa de Potencial Eólico de Cuba», en *EcoSolar*, no. 21, 2009. Disponible en Internet: <http://www.cubasolar.cu/biblioteca/Ecosolar/Ecosolar21/HTML/articulo06.htm>.
SOLTURA MORALES, ROLANDO; GUSTAVO MARTÍN, JOSÉ C. DÍAZ, GLORIA RODRÍGUEZ, LILIAN AYALA, RANSÉS VÁZQUEZ Y RAMÓN RIVERO (2004). *Evaluación del potencial eólico en Cuba. Aplicaciones del WASP: Atlas Eólico de la Isla de la Juventud*. INSMET. La Habana: 2004. 36 pp.
WAsP (2009). *Contenidos de ayuda del programa Wind Atlas Analisis and Application Program* [digital]. 2009.

Estimación de la pérdida de potencia en rodamientos de aerogeneradores considerando holgura radial y desalineación

Estimation of the power loss in wind turbine bearings considering radial clearance and misalignment

*Por Ing. Luis Miguel Corzo Rodríguez**

** Departamento de Mecánica Aplicada,
Facultad de Ingeniería Mecánica, Instituto Superior
Politécnico José Antonio Echeverría (CUJAE), La Habana, Cuba.
e-mail. luis@mecanica.cujae.edu.cu*

Resumen

La experiencia en la explotación de los cojinetes de rodamiento permite afirmar que la desalineación angular y la holgura radial influyen significativamente en su capacidad de carga, vida útil esperada y eficiencia. En la actualidad no existe un procedimiento para valorar las pérdidas de potencia útil en los rodamientos por desalineación de los aros, y la holgura radial generada por desgaste. Este trabajo presenta un procedimiento de cálculo para estimar las pérdidas de potencia por fricción en los rodamientos de rodillos cilíndricos, con influencia de la magnitud de la holgura radial y la desalineación de sus aros. El procedimiento está basado en la especificación técnica ISO 16281:2008 y la norma ANSI/AGMA/AWEA 6006-A03, y fue validado mediante comparación con resultados presentados por fabricantes de rodamientos, como Fag y Timken. Finalmente, se muestra la aplicación del procedimiento en los rodamientos del multiplicador de un aerogenerador de alta potencia.

Palabras clave: Rodamiento, rodillos cilíndricos, desalineación angular, holgura radial, eficiencia

Abstract

The experience in the operation of roller bearings allows upholding that the angular misalignment and the radial clearance significantly influence on its load capacity, expected service and effective life. At present there is no procedure to assess the losses of useful power in the bearings due to misalignment of the rings, and the radial clearance generated by wear and tear. This paper presents a calculation procedure to estimate the frictional power losses in cylindrical roller bearings, influenced by the magnitude of the radial clearance and the misalignment of its rings. The procedure is based on the ISO 16281:2008 technical specification and the ANSI/AGMA/AWEA 6006-A03 standard, and was validated by comparing with results offered by bearing manufacturers, such as Fag and Timken.

Finally, the application of the procedure in the multiplier bearings of a high power wind turbine is shown.

Keywords: Bearing, cylindrical rollers, angular misalignment, radial clearance, efficiency

Introducción

En nuestros días los ingenieros trabajan, entre otros temas, en la optimización del rendimiento de las máquinas, mejorando la eficiencia de trabajo de los elementos que componen las maquinarias. El mal montaje, un aumento de la holgura radial y el desalineamiento entre los aros del rodamiento, generan una sobrecarga que aumenta la pérdida de potencia por fricción y disminuye la eficiencia. Las pérdidas de potencia debido a la fricción están muy vinculadas a la velocidad y la carga presente en los cojinetes de rodamiento.

La publicación de la norma ISO 15312:2004 [ISO, 2004], referida al cálculo de la velocidad límite de los rodamientos por calentamiento, ha permitido ganar conocimiento adicional acerca de la influencia de la velocidad, la viscosidad del lubricante y la geometría de los rodamientos en sus pérdidas por fricción, ya que esta norma, mediante un balance térmico entre el flujo de calor disipado y el calor generado, permite estimar la velocidad límite del rodamiento.

La carga es un aspecto fundamental para el estudio de las pérdidas de potencia en los rodamientos en movimiento. La especificación técnica ISO/TS 16281:2008 [ISO, 2008] proporciona relaciones para el conocimiento de manera consistente del cálculo de la carga dinámica, ya que el principio básico se basa en el análisis completo de las cargas internas en cada elemento rodante, teniendo en cuenta la geometría interna del rodamiento, su desalineación y holgura interna.

Este método es utilizado en los rodamientos de rodillos cilíndricos que se emplean en algunos multiplicadores de velocidad de los aerogeneradores, ya que el uso del viento como generador de energía es de alto interés en los últimos tiempos, teniendo como propósito principal la producción de electricidad con el fin de suplir los costosos combustibles fósiles.

Relación carga y deformación elástica en rodamientos de rodillos cilíndricos

La práctica demuestra que los rodamientos con desalineación entre los aros que conforman las pistas de rodadura de los elementos disminuyen su capacidad de trabajo, dado que aumenta la carga radial del rodamiento (Fig. 1), incrementando también el área de deformación. En esta situación

es importante conocer cuánto se incrementa la carga radial en el contacto, cuando el rodamiento está desalineado.

Para el cálculo de la distribución de carga en los elementos rodantes, hay que tener en cuenta que este parámetro depende de la deflexión elástica de los elementos rodantes y de la constante elástica, que es hallada por la fórmula siguiente [Hamrock, 1983]:

$$Q_j = c_s \cdot \delta_j^{\frac{10}{9}} \quad (1)$$

$$c_s = 26200 \cdot L_w^{\frac{8}{9}} \quad (2)$$

Donde:

Q_j : Carga radial asociada al elemento rodante j en, N

c_s : Constante elástica del elemento rodante j con un contacto lineal, N/mm^{10/9}

δ_{ij} : Deflexión elástica asociada al elemento rodante j , mm

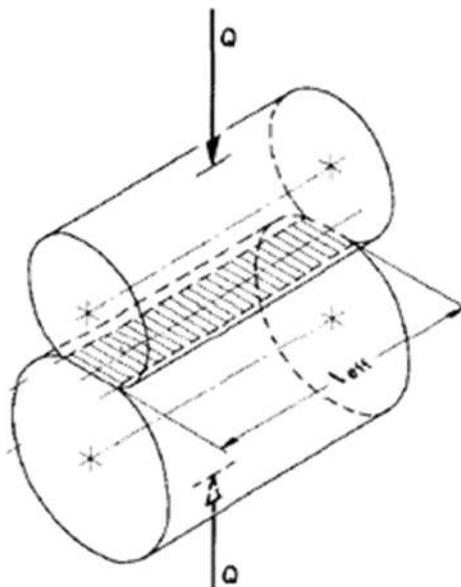


Fig. 1. Carga radial asociada al elemento rodante j

La distribución de las cargas interiores en los elementos rodantes que conforman el rodamiento (Ec. 1), se estima mediante el cálculo de las deflexiones elásticas que se producen en el contacto entre el rodillo y la pista de rodadura. En el caso de rodamientos en explotación con velocidades bajas y moderadas, puede ser aceptado un esquema de las

deflexiones de los rodillos en dependencia de la geometría del rodamiento, la holgura radial, el desplazamiento radial, la desalineación angular y la cantidad y localización de los rodillos en el rodamiento. La localización del elemento rodante se realiza mediante el ángulo φ_j , según muestra la figura 2.

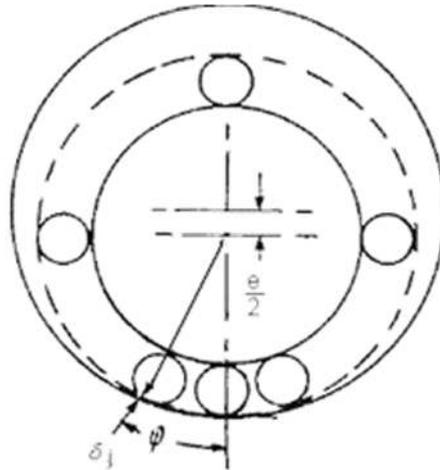


Fig.2. Localización de los rodillos en el rodamiento mediante el ángulo φ .

La pérdida de alineación entre los aros exterior e interior será cuantificada mediante un valor de desalineación angular ψ , según muestra la figura 3, y considerando el desplazamiento radial entre los aros de rodamiento de los rodillos cilíndricos.

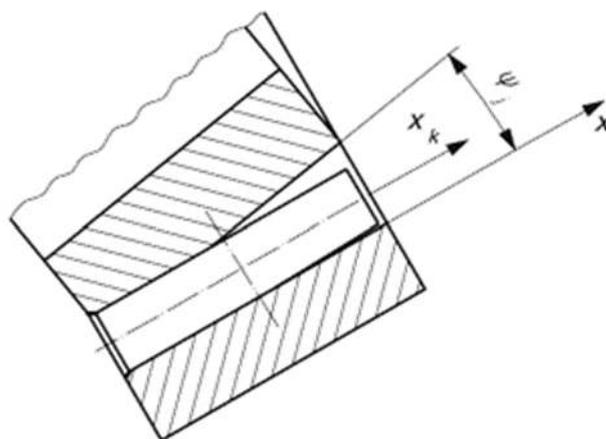


Fig.3. Rodamiento de rodillo cilíndrico desalineado.

La deflexión elástica en los rodillos del rodamiento puede ser valorada mediante las fórmulas (3, 4, 5, 6 y 7), obtenidas mediante un procesamiento matemático de las relaciones presentadas en ISO-TS 16281:2008, para hacer corresponder una distribución de carga en cada elemento rodante

según la deformación elástica generada en el contacto, y calculable con la Teoría de Hertz, con el objetivo de utilizarla para analizar la influencia de la desalineación angular en la capacidad de carga dinámica de los rodamientos.

$$\delta_j = \delta_r \cdot \cos \varphi_j - \frac{e}{2} - x_k \cdot \tan \psi_j - 2 \cdot P_{(x_k)} \quad (3)$$

Si un rodillo completamente cilíndrico está cargado, las tensiones que ocurren en el borde pueden exceder sustancialmente los cálculos de presión establecidos por Hertz. Para rodillos de acero, perfil P(xk), se emplean las expresiones siguientes:

Para rodillos que tienen una longitud $L_w \leq 2,5 \cdot D_w$:

$$P_{(x_k)} = 0,00035 \cdot D_w \cdot \ln \cdot \left[\frac{1}{1 - \left(\frac{2x_k}{L_w} \right)^2} \right] \quad (4)$$

Para rodillos que tienen una longitud $L_w > 2,5 \cdot D_w$:

$$P_{(x_k)} = 0 \quad \text{para} \quad x_k \leq \frac{L_w - 2,5 \cdot D_w}{2} \quad (5)$$

$$P_{(x_k)} = 0,00050 \cdot D_w \cdot \ln \cdot \left[\frac{1}{1 - \left(\frac{2x_k - (L_w - 2,5D_w)}{2,5D_w} \right)^2} \right] \quad \text{para} \quad x_k > \frac{L_w - 2,5 \cdot D_w}{2} \quad (6)$$

$$L_w \leq 3 \cdot D_w \quad (7)$$

Donde:

- δ_j : Deflexión elástica asociada al elemento rodante j , mm
- x_k : Distancia entre el centro de la lámina k y el centro del rodillo, mm
- ψ_j : Desalineamiento total entre los aros interiores y exteriores en el elemento rodante j , °
- $P_{(x_k)}$: Perfil del elemento rodante, mm
- φ_j : Localización del elemento rodante, °
- e : Holgura radial, mm

D_n : Diámetro del elemento rodante, mm

L_n : Longitud efectiva del rodillo, mm

Fuerza radial nominal y fuerza radial equivalente por desalineación angular en rodamientos de rodillos cilíndricos

El método de cálculo presentado en la norma ISO 281:2007 [ISO, 2007] para estimar la vida útil de los rodamientos no considera la influencia de la desalineación de los aros del cojinete en la duración de los rodamientos; por tal motivo, los expertos del Comité Técnico ISO 4 (ISO/TC4-Rolling bearing), luego de un desarrollo matemático avanzado de la teoría de Hertz, y una mejor aplicación de la teoría de la lubricación elastohidrodinámica en el contacto rodillo-pista, han reconsiderado esta omisión en la especificación técnica ISO-TS 16281:2008 [ISO, 2008], con la inclusión de recomendaciones para el cálculo de la capacidad de carga del rodamiento, tomando en consideración la lubricación, la contaminación, el límite de carga a la fatiga del material y el desalineamiento del cojinete.

En este trabajo se ha elaborado un procedimiento de cálculo orientado a determinar la duración nominal del rodamiento L_{10-des} , que permita estimar la relación entre la carga dinámica básica Q_c de un elemento rodante j (vinculada directamente con la capacidad de carga dinámica nominal C_r), y la carga radial equivalente por desalineación Q_e de un elemento rodante j . Este procedimiento considera el rodamiento operando con un valor de holgura y una distribución de carga interior en los elementos rodantes, en dependencia de la rigidez del contacto entre rodillos y pistas.

$$Q_{ei} = \frac{1}{\lambda_v} \cdot \frac{C_r}{0,378 \cdot Z \cdot (\cos\alpha) \cdot i^{\frac{1}{3}}} \cdot \left\{ 1 + \left[1,038 \cdot \left(\frac{1-\gamma}{1+\gamma} \right)^{\frac{143}{108}} \right]^{\frac{9}{2}} \right\}^{\frac{2}{9}} \quad (8)$$

$$Q_{ee} = \frac{1}{\lambda_v} \cdot \frac{C_r}{0,364 \cdot Z \cdot (\cos\alpha) \cdot i^{\frac{1}{3}}} \cdot \left\{ 1 + \left[1,038 \cdot \left(\frac{1-\gamma}{1+\gamma} \right)^{\frac{143}{108}} \right]^{\frac{9}{2}} \right\}^{\frac{2}{9}} \quad (9)$$

$$Q_{air} = \left[\frac{1}{Z} \cdot \sum_{j=1}^z (Q_j)^4 \right]^{\frac{1}{4}} \quad (10)$$

$$Q_{ae} = \left[\frac{1}{Z} \cdot \sum_{j=1}^z (Q_j)^{4.5} \right]^{\frac{1}{4.5}} \quad (11)$$

$$L_{10-dsz} = \left[\left(\frac{Q_{ai}}{Q_{air}} \right)^{-4.5} + \left(\frac{Q_{ae}}{Q_{ae}} \right)^{-4.5} \right]^{-\frac{8}{9}} \quad (12)$$

$$L_{nm} = a_1 \cdot a_{ISO} \cdot L_{10-dsz} \quad (13)$$

Donde:

Q_{ai} : Carga radial nominal considerando la capacidad dinámica radial básica del rodamiento por la resistencia del contacto en el aro interior, N

Q_{ae} : Carga radial nominal considerando la capacidad dinámica radial básica del rodamiento por la resistencia del contacto del aro exterior, N

C_r : Capacidad de carga dinámica nominal del rodamiento, N

λ_s : Factor para la reducción de las concentraciones de esfuerzo $\lambda_s = 0,83$

Z : Cantidad de rodillos en el rodamiento

α : Ángulo de contacto del rodillo con la pista de rodadura,

i : Cantidad de hileras de rodillos

γ : Parámetro geométrico auxiliar $\gamma = \frac{D_m \cdot \cos \alpha}{D_n}$

D_m : Diámetro medio del rodamiento, mm

Q_{air} : Carga dinámica equivalente del rodamiento desalineado, considerando la resistencia del aro interior rotando, N

Q_{aif} : Carga dinámica equivalente del rodamiento desalineado, considerando la resistencia del aro interior estático, N

Q_{aef} : Carga dinámica equivalente del rodamiento desalineado, considerando la resistencia del aro exterior estático, N

Q_{aer} : Carga dinámica equivalente del rodamiento desalineado, considerando la resistencia del aro exterior rotando, N

L_{10-dsz} : Duración nominal considerando la desalineación en millones de ciclos

L_{nm} : Duración nominal modificada en millones de ciclos

El cálculo de la fuerza radial equivalente es mediante la suma de la fuerza por el efecto de la desalineación angular ψ y la carga radial; para validar esta expresión se tomó como carga radial la capacidad de carga dinámica nominal del rodamiento:

$$P_{ref,r} = \frac{C_r}{L_{10-des}^{\frac{3}{10}}} \quad (14)$$

El efecto de la desalineación angular puede ser estimado mediante el cálculo de la duración nominal L_{10-des} , con empleo de la fórmula (13) y analizando las condiciones siguientes:

- a) $L_{10-des} \geq 1$ millón de vueltas. El rodamiento está trabajando en iguales o mejores condiciones de alineación angular que las establecidas durante los ensayos de capacidad de carga del rodamiento, y no presenta disminución de la vida útil debido a la desalineación de sus aros.
- b) $L_{10-des} < 1$ millón de vueltas. El rodamiento está trabajando en condiciones de alineación angular desfavorables, en comparación con las establecidas durante los ensayos de capacidad de carga, y el rodamiento presenta disminución de la vida útil por desalineación de sus aros.

En las condiciones de $L_{10-des} < 1$ millón de vueltas, y haciendo uso de la ecuación (14), puede ser determinada la carga radial adicional por desalineación angular de los aros del rodamiento, valorando que la $F_r=C_r$ y con empleo de la fórmula (15).

$$F_{r\psi} = F_r \times \left(\frac{1}{L_{10-des}^{\frac{3}{10}}} - 1 \right) \quad (15)$$

$$F_{rt} = F_r + F_{r\psi} \quad (16)$$

Donde:

$F_{r\psi}$: Fuerza radial adicional por desalineación angular de los aros del rodamiento, N

F_{rt} : Fuerza radial total sobre los rodamiento desalineados, N

Relación entre la fuerza radial total sobre los rodamientos desalineados, el momento de fricción total y las pérdidas de potencia por fricción

La fricción total de un cojinete es la suma del deslizamiento de todos los elementos rodantes y de la fricción del lubricante; esto es, modelado como

la resistencia que el cojinete ejerce contra su movimiento. Esta resistencia representa un momento y generalmente es llamado momento de fricción M [Brändlein, et al., 1999]. Los estudios para el cálculo del momento de fricción total del rodamiento, se orientan generalmente a la influencia en la fricción de diferentes cargas y velocidades, en condiciones constantes de lubricación. Esa tendencia ha motivado que el cálculo del momento de fricción total del rodamiento sea valorado como [Harris y Kotzalas, 2006]:

$$M = M_o + M_1 + M_f \quad (17)$$

$$M_o = 10^{-7} \cdot f_{o_v} \cdot (v_o \cdot n)^{\frac{2}{3}} \cdot D_m^3 \quad \text{para } v \cdot n \geq 2000 \quad (18)$$

$$M_o = 160 \cdot 10^{-7} \cdot f_{o_v} \cdot D_m^3 \quad \text{para } v \cdot n < 2000 \quad (19)$$

$$M_1 = f_{1_v} \cdot F_n \cdot d_m \quad (20)$$

$$M_f = f_f \cdot F_a \cdot d_m \quad (21)$$

Estudios realizados [Craig, 2011] han mostrado que la pérdida de potencia debido a los momentos de fricción en cojinetes de rodamientos puede valorarse en dependencia del calor producido por el rodamiento cuando está funcionando bajo cargas, debido a que las pérdidas de potencia están muy vinculadas a la fricción, al sistema de lubricación y a la velocidad de trabajo presentes en el rodamiento.

El cálculo de las pérdidas de potencia por fricción va a estar en función de la frecuencia de rotación con que opera el rodamiento y el momento total de fricción:

$$N = \frac{\pi}{30 \cdot 10^3} \cdot M \cdot n \quad (22)$$

Siendo:

M = Momento de fricción total (N.mm)

M_o = Momento de fricción debido a las propiedades del lubricante y a la velocidad del rodamiento (N.mm)

M_1 = Momento de fricción debido a la carga aplicada (N.mm)

- M_f = Momento de fricción debido al deslizamiento entre el rodillo y las pestañas de los aros de rodamiento (N.mm)
- f_{or} = Coeficiente que tiene en cuenta el diseño del rodamiento y el tipo de lubricación. (Ver tabla 1)
- f_{lr} = Coeficiente que depende de la dirección de la carga aplicada (ver tabla 1)
- f_f = Coeficiente que depende de la geometría de las pestañas de los aros y del lubricante usado
- ν_0 = viscosidad de operación del aceite (mm²/s)
- n = velocidad de operación del rodamiento (min-1)
- F_a = Fuerza axial (N)
- N = Pérdida de potencia por fricción (kW)

Tabla 1. Valores de los factores f_{lr} , f_{or} y f_f . [Harris y Kotzalas, 2006]

Tipo de cojinete de rodamiento	f_f	f_{or}	f_{lr}
Rodamiento de rodillos cilíndricos	0,003	5	0,00055

Análisis de resultados

Los resultados de este trabajo son referidos a los rodamientos de rodillos cilíndricos utilizados en un multiplicador híbrido compuesto por tres fases: la primera es un engranaje planetario y las dos restantes son de árboles paralelos con engranajes de dientes helicoidales (Fig. 4).

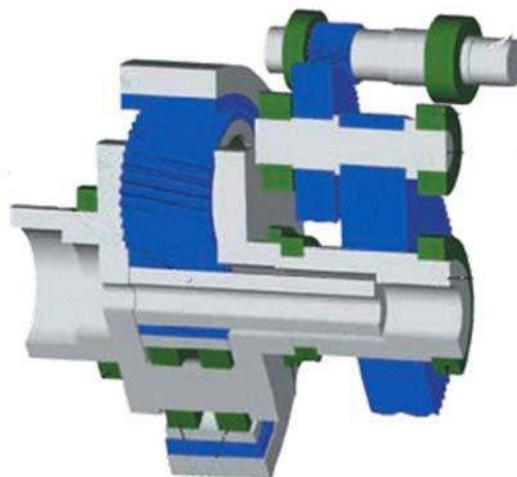


Fig.4. Multiplicador de velocidad híbrido de un aerogenerador [Gebauer y Ruhl, 2001].

Los rodamientos usados para este aerogenerador de alta potencia fueron recomendados por INA (Fig. 5). En este trabajo solo fueron calculados los rodamientos de las dos últimas fases del multiplicador de velocidad, etapas señaladas en la figura 6. Los datos de entrada que se tienen en cuenta son mostrados en la tabla 2.

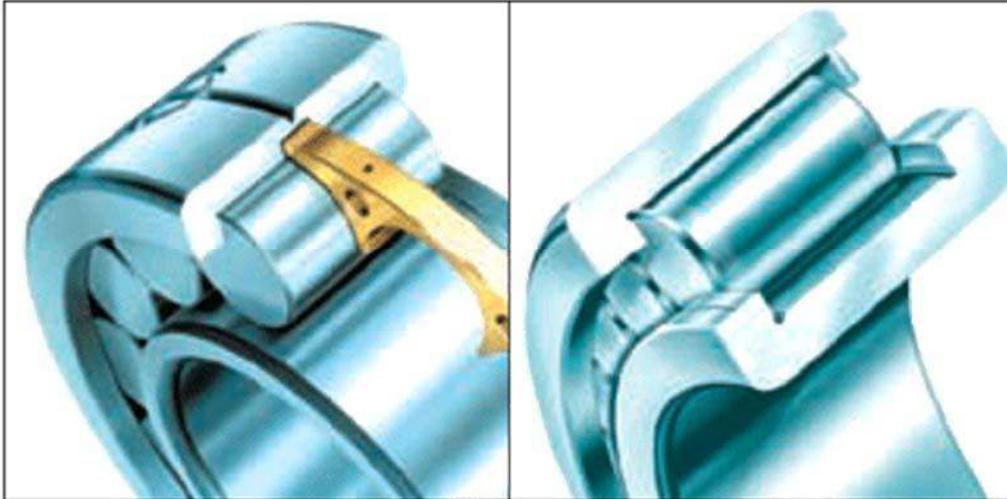


Fig.5. Rodamientos LSL 1923 y SL 1818.

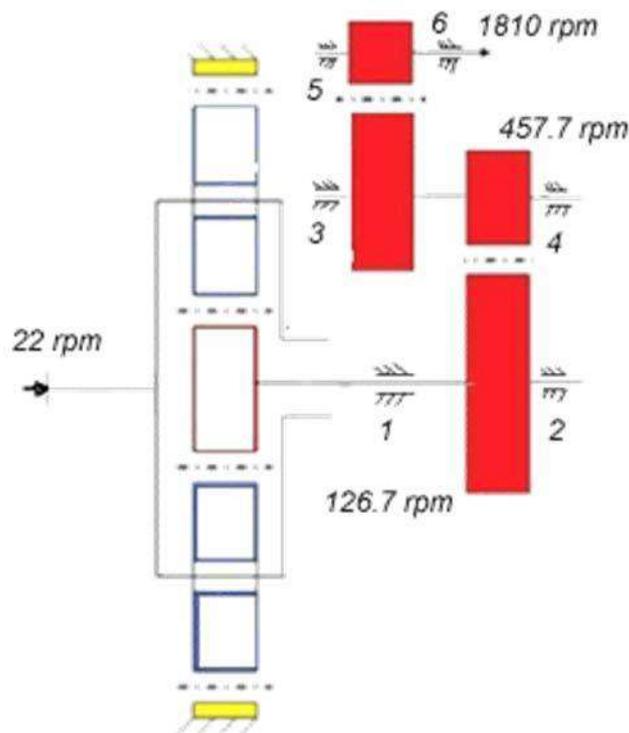


Fig.6. Esquema que muestra los 6 rodamientos de las dos últimas etapas.

Tabla 2. Valores de velocidad y potencia

Árbol de entrada		
Rodamiento de rodillo cilíndrico usado	Velocidad (rpm)	Potencia (kW)
SL192344	126,7	750
SL182952	126,7	750
Árbol intermedio		
LSL192330	457,7	750
LSL192330	457,7	750
Árbol de salida		
LSL192330	1810	750
LSL192330	1810	750

Los cálculos de duración de los rodamientos AGMA [ANSI, 2010] muestran resultados de duración de los rodamientos usados en los multiplicadores de velocidad de los aerogeneradores bajo una correcta alineación; estos valores se compararon con los obtenidos por las ecuaciones usadas en este trabajo, permitiendo validar las ecuaciones usadas (Fig. 7).

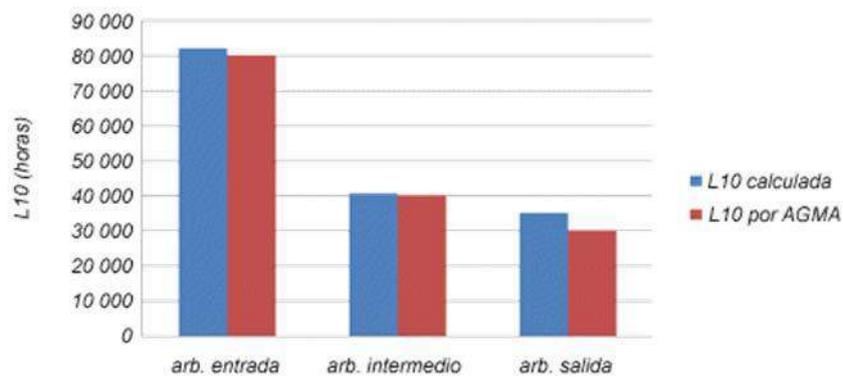


Fig.7. Duración de los rodamientos por AGMA y calculados en el trabajo bajo un ángulo de desalineación $\psi = 0,08^\circ$, y una holgura normal

La figura 8 muestra cómo un pequeño ángulo de desalineación de $\psi = 0,2^\circ$ trae consigo una sobrecarga de los elementos rodantes; esto modifica la

vida de servicio de los rodamientos, reduciéndola drásticamente alrededor de 10 699 horas.

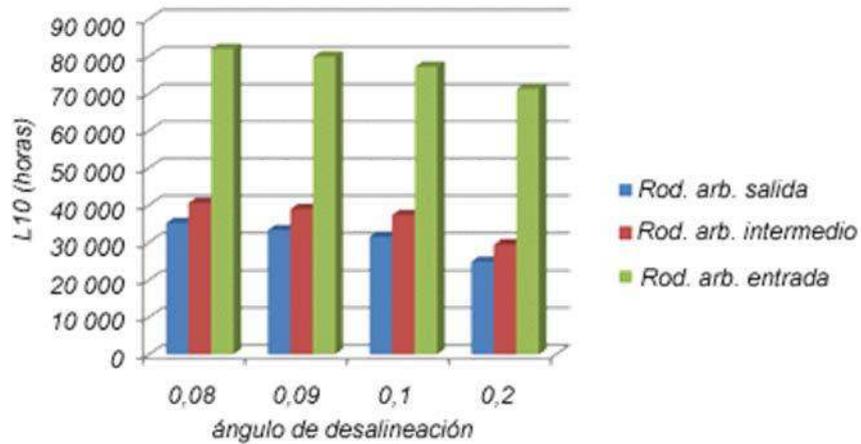


Fig.8. Reducción de la vida de servicio de los rodamientos bajo un ángulo de desalineación de $\psi = 0,2^\circ$

La figura 9 muestra los resultados de evaluar la deformación elástica resultante entre el contacto rodillo-pista en un rodamiento con nominación LSL192330 (12 rodillos), en condiciones diferentes de holgura radial y desalineación angular. En las condiciones analizadas puede observarse que modificaciones en el orden de holgura radial de 215 μm y ángulo de desalineación de $0,8^\circ$, producen deformaciones elásticas de hasta 0,60 mm.

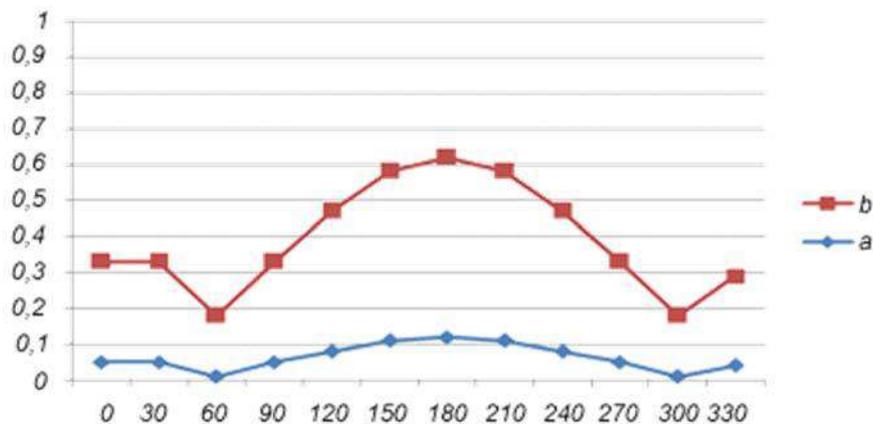


Fig.9. Comportamiento estimado de la deformación elástica resultante en las condiciones de: a) holgura radial $e = 70 \mu\text{m}$ (CN) y desalineación angular $\psi = 0,05^\circ$; b) holgura radial $e = 215 \mu\text{m}$ (C4) y desalineación angular $\psi = 0,8^\circ$.

Mediante el procedimiento de cálculo desarrollado en este trabajo puede estimarse la pérdida de capacidad de carga dinámica de un rodamiento de rodillo cilíndrico, en dependencia de la desalineación angular.

En la tabla 3 se muestra el resultado de la variación en la capacidad de carga para un rodamiento LSL192330, cuando el ángulo de desalineación fue aumentado desde $\psi = 0,1^\circ$ (prácticamente despreciable) hasta $\psi = 0,8^\circ$. El estimado en un rodamiento estándar permitió observar que por efecto de la desalineación, la capacidad de carga de un rodamiento puede variar en más de 25% con solo una variación en la desalineación angular de apenas $0,7^\circ$.

Tabla 3. Disminución de la capacidad de carga dinámica de un rodamiento en dependencia del ángulo de desalineación

Rodamiento LSL192330 Diámetro interior $d = 150$ mm Diámetro exterior $D = 320$ mm Capacidad de carga dinámica nominal $C = 1\ 410$ kN Carga radial $F_r = 82\ 789$ N	
Ángulo de desalineación $\psi = 0,1^\circ$	Ángulo de desalineación $\psi = 0,8^\circ$
Capacidad de carga efectiva $C = 1\ 410$ kN	Capacidad de carga efectiva $C = 1\ 410$ kN
$C/P = 1$ (desalineación angular despreciable, según el procedimiento $C/P = 7,24$, en caso de $C/P > 1$ se considera $C/P = 1$)	$C/P = 0,75$
Pérdida de capacidad de carga en % = 0%	Pérdida de capacidad de carga en % = 0,25%

Tabla 4. Pérdida de potencia de los rodamientos funcionando con una desalineación $\psi = 0,8^\circ$, lo que trae una disminución de la eficiencia de casi 2%

Árbol de entrada		
Rodamiento de rodillo cilíndrico usado	Pérdida de potencia, kW	Pérdida de eficiencia, %
SL192344	0,88	0,11
SL182952	0,92	0,12

Árbol intermedio		
LSL192330	1,12	0,15
LSL192330	2,15	0,28
Árbol de salida		
LSL192330	3,79	0,51
LSL192330	3,98	0,53
Total	12,84	1,7

Los resultados de la tabla 4 muestran cómo la desalineación angular entre las pistas de rodadura sobrecargan el rodamiento, aumentando los momentos de fricción, lo que trae consigo un aumento de las pérdidas de potencia de hasta 12,84 kW, y una disminución de la eficiencia de los cojinetes de rodamiento usados en los multiplicadores de velocidad.

Conclusiones

- a) Se desarrolló un procedimiento de cálculo para estimar las pérdidas de potencia por fricción en rodamientos de rodillos cilíndricos, que permite considerar la influencia de la desalineación angular y la holgura radial del rodamiento.
- b) Se obtuvo una expresión que permite calcular las cargas adicionales que se crean en un rodamiento bajo la influencia de la desalineación angular.
- c) Se cuantificó que por efecto de la desalineación la capacidad de carga de un rodamiento puede variar en más de 25% de su capacidad de carga dinámica efectiva, con solo una variación en la desalineación angular de apenas $0,7^\circ$.
- d) En las condiciones analizadas se observó que modificaciones en el orden de holgura radial de $215 \mu\text{m}$ y ángulo de desalineación de $0,8^\circ$, producen deformaciones elásticas de hasta $0,60 \text{ mm}$.
- e) La vida de servicio de los rodamientos de rodillos cilíndricos es reducida alrededor de 10 699 horas, cuando funcionan bajo un ángulo de desalineación $\psi = 0,2^\circ$.
- f) La pérdida de potencia en los rodamientos funcionando con una desalineación $\psi = 0,8^\circ$, alcanza alrededor de 13 kW.

Bibliografía

- ANSI/AGMA/AWEA 6006-A03 (2010). «Standard for Design and Specifications of Gearboxes for Wind Turbines». Reaffirmed: marzo, 2010.
- BRÄNDLEIN, JOHANNES; PAUL ESCHMANN, LUDWIG HASBARGEN Y KARL WEIGAND (1999). *Ball and Roller Bearings: Theory, Design, and Application*. 3th edition., John Wiley & Sons, Ltd., 1999. 630 pp. ISBN 9780471984528.
- CRAIG, SEIDELSON (2011). «How Tapered Roller Geometry Determines Bearing Energy Efficiency», en *International Journal of Engineering Science and Technology*, vol. 3, no. 1, pp. 736-747, enero, 2011.
- GEBAUER, RAINER Y STEFAN RUHL (2001). «Rolling Bearings in Wind Turbine Gearboxes», *Öantriebstechnik*, no. 4, abril, 2001.
- HAMROCK, BERNARD J. (1983). «Simplified Solution for Stresses and Deformations», en *Journal of Lubrication Technology*, 1983, vol. 105, no. 2, pp. 171-177, 1983.
- HARRIS, TEDRIC Y MICHAEL KOTZALAS (2006). *Essential Concepts of Bearing Technology*. Editora ISBN, 338 pp., 5th edition, 2006.
- ISO 15312 (2004). *Rolling Bearing. Thermal Speed Rating. Calculation and Coefficients*. ISO/IEC Office. Geneva, Switzerland, 2004.
- ISO 281 (2007). *Rolling bearings. Dynamic load ratings and rating life*. 51 pp. ISO/IEC Office. Geneva, Switzerland, 2007.
- ISO (2008). *Rolling Bearings: Methods for Calculating the Modified Reference Rating Life for Universally Loaded Bearings*. ISO Technical Specification (TS) 16281: 2008. 28 pp. ISO/IEC Office. Geneva, Switzerland, 2008.

Opiniones y recomendaciones al sector energético cubano

Considerations and recommendations to the Cuban energy sector

Por Dra. Tanya Moreno Coronado, Dr. Víctor Hugo Ventura**,
Dr. Ernesto Fariñas Wong*** y Dra. Yanelys Delgado Triana*****

*Centro de Capacitación, Investigación y Desarrollo
Tecnológico (CCIDTES), México.*

*** Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL).*

**** Universidad Central de Las Villas (UCLV), Santa Clara, Cuba.*

e-mail: tanya.moreno@ccidtes.org.

Resumen

En las últimas décadas Cuba ha enfrentado dificultades debido a la crisis económica originada por la desintegración de la URSS y el Campo Socialista de Europa del Este, a finales de los años 80 y principios de los 90. Dentro de las acciones para enfrentar dicha crisis resaltan las emprendidas para afrontar la crisis energética, entre ellas el desarrollo de una política de ahorro y uso eficiente de la energía, y la promoción de las fuentes renovables de energía, así como la implementación del cambio de los equipos electrodomésticos. En este artículo se muestra un panorama al respecto, y a su vez se exponen varias recomendaciones encaminadas a la estabilidad energética del país.

Palabras clave: Fuentes renovables de energía, eficiencia, generación distribuida, Revolución energética

Abstract

In the last decades, Cuba has faced difficulties due to the economic crisis caused by the disintegration of the USSR and the Eastern European Socialist Block of Countries, at the end of the 80s and the beginning of the 90s. Among the actions to face this crisis were those undertaken to deal with the energy crisis, including the development of a policy of energy saving and efficiency, the promotion of renewable energies, as well as introducing new household appliances. This paper discusses this process and offers at the same time several recommendations aimed at the energy stability of the country.

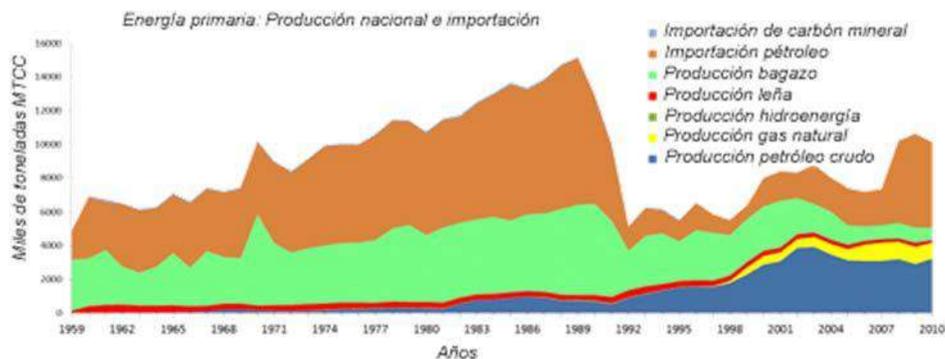
Keywords: Renewable sources of energy, efficiency, distributed generation, Energy Revolution.

El sector energético en Cuba

De acuerdo con información publicada en el Anuario Estadístico de Cuba del 2011, por la Oficina Nacional de Estadística e Información, la extensión

superficial del archipiélago es de 109 884,01 kilómetros cuadrados y al cierre de 2011 el país contaba con 11 247 925 habitantes.

En los últimos 50 años el sector energético en Cuba ha tenido un gran impacto en la planeación económica y social del país, debido a una gran dependencia en las importaciones del petróleo y sus derivados. Históricamente, Cuba se caracterizaba por una gran disponibilidad de bagazo en su energía primaria (Fig. 1) proveniente de la industria azucarera, que se empleaba en varios sectores de manera ineficiente, como el industrial, o se quemaba. La leña era otra fuente de energía primaria que se consumía en la industria azucarera, en el sector residencial y como carbón vegetal para las locomotoras de vapor. En las últimas tres décadas se observa cómo la extracción de petróleo crudo y gas natural ha crecido sostenidamente; esto se debe a programas gubernamentales que contaron con exploraciones conjuntas realizadas con compañías extranjeras de Canadá, Francia, Brasil, Suecia y España, entre otros. La economía cubana tiene una fuerte dependencia del petróleo y al ser insuficiente la producción nacional, depende de importaciones para garantizar su desarrollo económico y social. En cuanto a las importaciones de energía primaria, casi en su totalidad son petroleras, y con un mínimo porcentaje (menos de 1%) se importa el carbón mineral. El petróleo crudo es empleado como materia prima en las refinerías para el procesamiento y obtención de sus derivados, y en la generación de electricidad. Como se puede observar en la figura 1, antes de 1990 se presentó un crecimiento en la oferta de energía primaria, así como una gran demanda de petróleo de importación, debido a la producción industrial y al desarrollo del país.



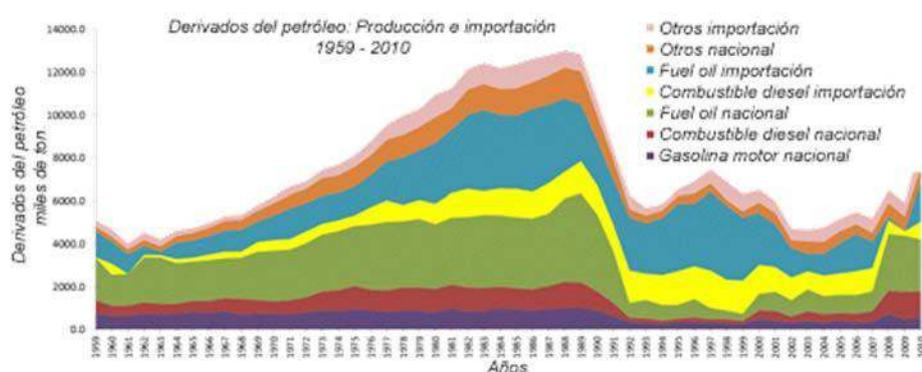
*Fig. 1. Disponibilidad de energía primaria en Cuba.
Fuente: Elaboración propia con estadísticas oficiales.*

En la década de los años 90 se produjo una caída en la importación de petróleo, y en la producción de bagazo de caña, debido a la desintegración de la URSS. Por décadas, Cuba fue un importante productor de azúcar a nivel mundial, sector que consumía una gran cantidad de combustibles

fósiles y que a su vez empleaba tecnologías provenientes de países socialistas; sin embargo, en la década de los años 90 el país sufrió una gran caída económica.

En lo que respecta a la energía secundaria, los dos rubros con mayor peso en cuanto a la producción y consumo son los derivados del petróleo y la generación de electricidad.

En cuanto a los derivados del petróleo, la figura 2 muestra cómo el país con el paso del tiempo depende en gran medida de las importaciones, principalmente de fuel oil, el cual es utilizado en calderas y hornos para la producción de energía eléctrica y otros procesos industriales; y en segundo lugar se tiene la importación del diésel, empleado en su mayoría en motores de combustión interna. Hasta antes de la crisis de los 90 se tenía una importante producción de fuel oil nacional, el cual se vio reducido a partir de la merma en el suministro de petróleo de importación, ya que se utilizaba para la producción de derivados del petróleo. Se puede observar un comportamiento similar en la producción de combustible diésel nacional y la gasolina. Es importante resaltar que la crisis de los años 90 se vio reflejada en la producción nacional, las importaciones se mantuvieron y el país tuvo que enfrentar su alto costo para asegurar su desenvolvimiento social y económico; en general, se observa que las importaciones se redujeron en la última década y a su vez, aumentó la producción nacional.



*Fig. 2. Derivados del petróleo en Cuba.
Fuente: Elaboración propia con estadísticas oficiales.*

En cuanto a la electricidad, en la figura 3 se observa que la generación por plantas termoeléctricas presenta un gran porcentaje a nivel nacional, a pesar de que en la última década se ha incrementado la generación por otras tecnologías como las de turbinas de gas, grupos electrógenos e inclusive por fuentes renovables de energía.

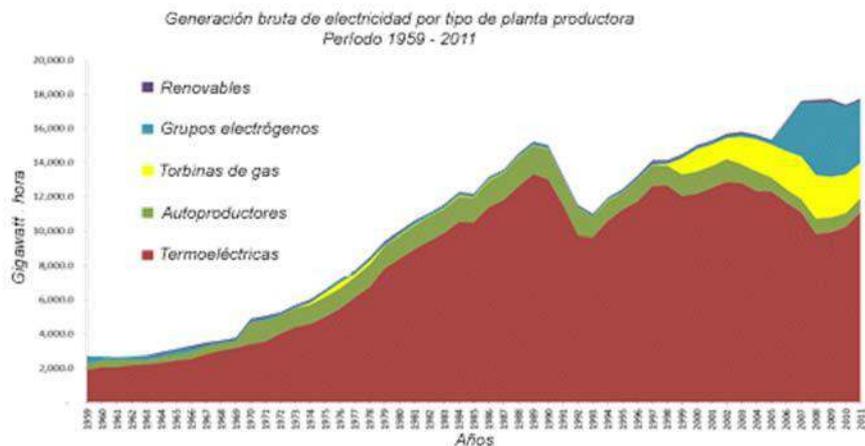


Fig. 3. Generación bruta de electricidad por tipo de planta productora en Cuba. Fuente: Elaboración propia con estadísticas oficiales.

Los grupos electrógenos pueden consumir fuel, diésel o gas natural, y alrededor de 98% de su generación proviene de equipos interconectados al sistema. En cuanto a los sistemas autoprodutores de electricidad, en su mayoría pertenecen a la industria del azúcar, utilizando principalmente el bagazo de caña. En cuanto al consumo de energía eléctrica, el sector residencial ha aumentado de consumo en la última década, pasando de 28,24% en el 2000 a 38,7% en el 2011, mientras que el sector industrial tuvo una ligera disminución, de 32,3% en el 2005 a 26,5% en el 2011; por otro lado, las pérdidas de energía eléctrica representan de 15 a 16% (Fig. 4).

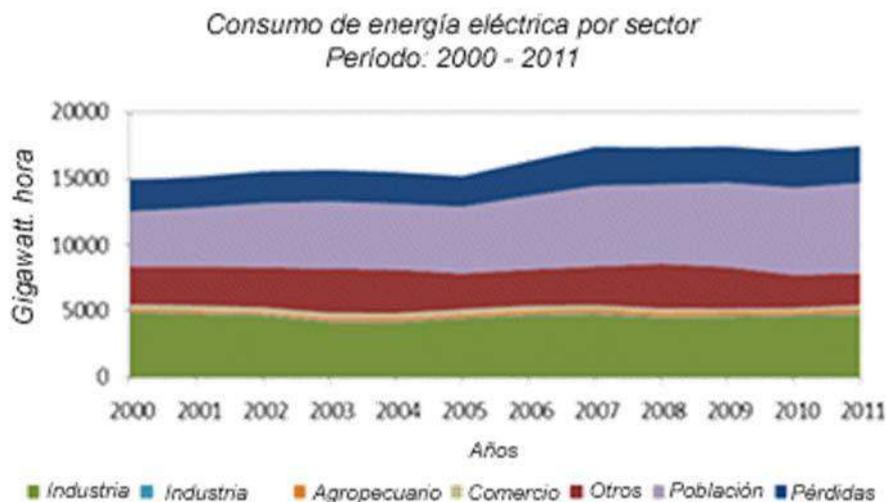
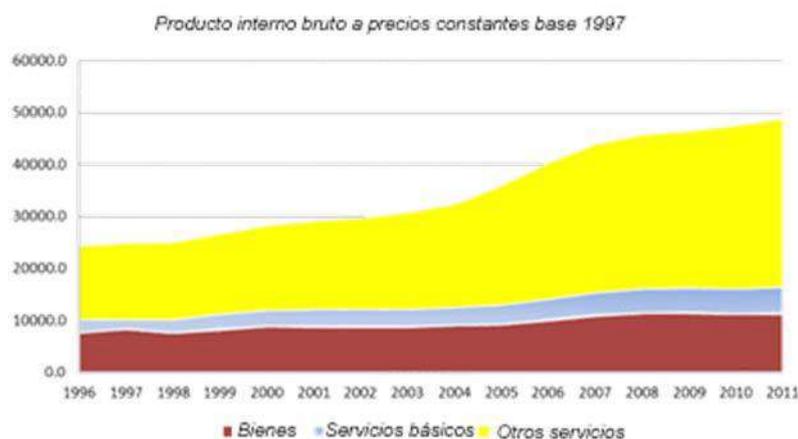


Fig. 4. Consumo de energía eléctrica por sector en Cuba. Fuente: Elaboración propia.

La crisis que se presentó a principios de la década de los años 90 conllevó a una caída en la actividad económica, así como a la reducción en los consumos energéticos, crisis que se denominó Período Especial. En 1989 las exportaciones e importaciones de bienes y servicios representaron 29 y 41% del PIB [García, 2005]. En 1993 la situación se agravó y las producciones de alimentos se fueron reduciendo hasta quedar con escasos suministros para la población [Calvó e Ibáñez, 2009]. En 1995 se tomaron nuevas medidas para aliviar esa situación, fomentando y permitiendo la inversión extranjera e iniciativas privadas. A partir de 1996 hasta el 2011 el PIB ha tenido una participación constante en cuanto a los servicios básicos (principalmente de transporte, almacenamiento y comunicaciones, seguido de electricidad, gas y agua) y bienes (principalmente de industrias manufactureras y construcción, seguido de agricultura, caza, silvicultura, pesca, exploración de minas e industria azucarera); por otro lado, las actividades englobadas en otros servicios mostradas en la figura 5, registraron un crecimiento en la última década, y corresponden en gran medida al comercio y reparación de efectos personales, así como a la salud pública y la asistencia social, seguidas por la educación, hoteles y restaurantes; otras actividades adicionales y con menor participación complementan el PIB [ONEa-c, 2011].



*Fig. 5. Producto Interno Bruto a precios constantes base 1997.
Fuente: Elaboración propia.*

Debido a que en el período de 1994 a 1997 [Rodríguez, 2001] se produce una recuperación gradual de los niveles de actividad económica, con una tendencia al incremento del consumo de energía (en los sectores de la industria y los servicios) por encima del crecimiento del producto interno bruto, los esfuerzos para promover el ahorro energético fueron opacados debido al incremento del consumo en los servicios y actividades no industriales. Durante 1998 y 1999 disminuyó el consumo energético, el cual creció por debajo del incremento del PIB, reflejando una mejor eficiencia

energética. En este período (1995-1999) se invirtieron 300 millones de dólares en medidas de ahorro energético para enfrentar la crisis económica y energética. Como mencionamos anteriormente, en la última década se alcanzó un incremento en las actividades de extracción nacional de crudo y gas, permitiendo aligerar la factura petrolera, mejorar el suministro a la población de combustible doméstico y expandir la generación de electricidad, lo que permitió alcanzar una electrificación de 95% de los hogares. En el período (1998-2003) se beneficiaron 1,3 millones de personas en La Habana y Santiago de Cuba, mediante el suministro de gas como sustituto de otros combustibles domésticos, y en el 2003 la extracción nacional de petróleo y gas permitió satisfacer la mitad de las necesidades totales del país [García, 2005].

Dentro de las medidas que se promovieron para enfrentar la crisis energética, resaltan las siguientes: incremento del uso del petróleo nacional y del gas acompañante; reducción de la importación de energía con respecto al PBI; reducción de la intensidad energética global; racionalización energética; ajustes en los horarios de los centros laborales y de estudio; restricción del riego agrícola a lo estrictamente necesario; interrupción de la actividad comercial a las 7:00 p.m. (excepto la gastronomía); paralización de equipos de aire acondicionado donde fuera posible hacerlo; paralización/desaceleración de actividades productivas cuya recuperación pudiera realizarse en los próximos meses o sustituirse por importaciones (118 plantas industriales donde destacan producciones altamente consumidoras de energía como acero, cemento y papel); concentración de las actividades productivas fuera de los horarios de máxima demanda; financiación para aplicar programas de ahorro de energía; protagonismo de las variables financieras en la planificación energética, conjugado con instrumentos y mecanismos económicos; aprobación del Programa de Desarrollo de las Fuentes Nacionales de Energía (PDFNE) en 1993; lanzamiento del Programa de Ahorro de Electricidad de Cuba (PAEC) en 1997 (programa del mayor impacto en la elevación de la eficiencia energética de la economía), y a su vez, también se logró la modernización de las centrales termoeléctricas y el aumento de la capacidad de generación.

En el transporte, la capacidad en el sistema público disminuyó, por lo que se promovió el uso extendido de bicicletas, de la tracción animal y la utilización de camiones con tráileres de ferrocarril para el transporte de pasajeros. Una medida complementaria para atenuar el desplazamiento de los trabajadores, fue su reubicación en función de la cercanía a sus domicilios.

En la política de precios una de las medidas más significativas fue establecer el pago en Moneda Libremente Convertible (CUC) de los

derivados del petróleo y de la electricidad para una serie de empresas autofinanciadas en CUC, a las que se suman año tras año otras empresas que exportan o venden en CUC en el mercado interno [Rodríguez, 2001]; se incluyeron también las industrias que suministran bienes o servicios a empresas que, a su vez, venden en CUC, por ejemplo, las textiles que comercializan en con instalaciones turísticas. En cuanto a los impuestos aplicados a los energéticos, solamente se gravan las ventas de gasolina y diésel en las estaciones de servicio, pagadas en CUC. Todos los demás suministros carecen de impuestos. El pago de los energéticos en divisas manifiesta una tendencia creciente y es una medida importante para promover el uso racional de la energía, aunque aún no incluye a todos los grandes consumidores de electricidad y derivados del petróleo. Para la parte de la economía que opera en moneda nacional, se mantiene una tarifa que conserva un nivel importante de subsidio. En la electricidad se aplicó una tarifa compuesta, que tiene en cuenta diferentes tramos de consumo, y está orientada a proteger a los sectores de menores ingresos, pero que a la vez no incentiva el uso racional de la energía, pues el cobro de la tarifa se realiza por consumo acumulado. En los combustibles para transporte, los únicos que se pueden obtener libremente son la gasolina y el diésel para vehículos particulares, a pagar en CUC.

El financiamiento de la Banca Nacional para proyectos de ahorro de energía ha sido clave para su promoción. Las entidades bancarias cuentan con programas de financiamiento en divisas para inversiones que tengan pronta recuperación. A su vez, también se cuentan con empresas ESCOs (Empresas de Servicios Energéticos o Energy Service Companies) para promover el financiamiento en los proyectos energéticos. El antiguo Ministerio de la Industria Básica (MINBAS), que tenía bajo su responsabilidad los sectores de la energía, química básica, geología y minería, también contaba con un programa que autofinanciaba inversiones a partir de los ahorros obtenidos por concepto de compra de combustible e insumos.

Revolución Energética en Cuba

A pesar de la implementación de las medidas mencionadas anteriormente, ello no fue suficiente y el país enfrentó en 2004 y 2005 cortes de energía eléctrica, con las correspondientes afectaciones a la población y a las actividades productivas; cortes como promedio de cuatro horas. Aunado a esto, el complejo cañero-azucarero disminuyó significativamente su aporte de electricidad al Sistema Eléctrico Nacional, existiendo un deficiente estado en las instalaciones de distribución eléctrica; a ello se unieron afectaciones climatológicas, huracanes que dañaron las redes de transmisión y distribución de electricidad, generando mayores pérdidas de

electricidad. Para el período mencionado (2004-2005) existía una gran cantidad de electrodomésticos ineficientes, y 85% cocinaba con queroseno; se contaba con un subsidio muy elevado para la tarifa del sector residencial y una insuficiente cultura de ahorro de energía [González, 2009].

Por todo ello, en 2006 se puso en marcha una nueva política energética, denominada Revolución Energética Cubana (REC), que contó con 6 líneas nacionales de actuación [Calvo e Ibáñez, 2009]:

- a) Generación distribuida: se instalaron grupos electrógenos de generación con motores diésel y fuel, se crearon centros de investigación y se formó personal técnico.
- b) Autosuficiencia energética: incremento del aprovechamiento del petróleo y gas natural nacional, investigación y prospección, mejoras tecnológicas.
- c) Rehabilitación en las redes de transmisión y distribución: reducción de las pérdidas, sustitución de postes, acometidas y circuitos, sustitución de medidores analógicos eléctricos por electrónicos en el sector residencial, eliminación de zonas de bajo voltaje.
- d) Incremento de la eficiencia: cambio masivo de electrodomésticos (refrigeradores, equipos de climatización, televisores y ventiladores), bombas de agua, bombillas eléctricas (incandescentes por fluorescentes); generalización del sistema de cocción eléctrico (hornillas, ollas multipropósito, arroceras, etc.), eliminando el uso del queroseno y el gas licuado de petróleo (GLP) y aumento de la tarifa eléctrica.
- e) Participación y concienciación: participación de las brigadas estudiantiles y trabajadores sociales en la promoción de una cultura de ahorro de energía, concienciación en los medios de comunicación y por parte del Programa de Ahorro de Electricidad del Ministerio de Educación.
- f) Fuentes renovables de energías: promoción de la eólica, solar, hidráulica, biomasa, así como cooperación nacional e internacional para su desarrollo.

Conclusiones y recomendaciones

Actualmente Cuba tiene acuerdos energéticos regionales como la Alianza Bolivariana para las Américas, Petrocaribe y los acuerdos bilaterales con Venezuela, con los que se ha logrado una mejoría de la situación energética, y se han establecido esquemas de financiamiento con firmas extranjeras para revitalizar e incrementar las capacidades de la refinación existentes en el país. Como se puede observar en las figuras 1 y 2, la importación de petróleo se ha incrementado en la última década y la

importación de productos derivados del petróleo ha disminuido, con una tendencia a aumentar en el fuel oil importado. Sin embargo, estas acciones vuelven vulnerable al país, debido a que dichos acuerdos pueden verse afectados por diversas situaciones.

Sobre el acuerdo energético bilateral entre Venezuela y Cuba existen muchas opiniones y sobre todo falta de información; sin embargo, es beneficioso para ambos países. Sus principales líneas establecen la venta a Cuba de 53 000 barriles diarios de petróleo (2,5 millones de toneladas anuales); 80% de los suministros Cuba lo paga a precios del mercado mundial, en los 90 días posteriores a la entrega. El plazo de pago para 20% restante está entre 5 y 20 años, en dependencia del precio promedio anual que alcance el petróleo, y Cuba paga esa quinta parte con la exportación de bienes y servicios para Venezuela. Este acuerdo ha permitido a Cuba mantener un nivel energético estable sin los sobresaltos de las dos últimas décadas, y a Venezuela desarrollar amplios programas sociales en salud, educación, deporte, cultura y desarrollo comunitario.

A continuación se exponen recomendaciones generales para el sector energético cubano:

- Desarrollar tecnologías avanzadas y eficientes, preferentemente las que utilicen fuentes renovables de energía.
- Crear y fortalecer centros de investigación especializados, con redes nacionales e internacionales.
- Realizar estudios de potenciales de las energías renovables.
- Realizar estudios de vulnerabilidad energética ante el cambio climático y otros factores, en cada una de las tecnologías existentes. Un caso particular es el del bagazo de caña, el cual hoy en día debido a diversas dificultades se ha visto disminuido, lo que provoca un impacto directo en el potencial para generar energía eléctrica con este residuo.
- Buscar Alianzas Público Privadas (APP), del mismo modo que se impulsaron las empresas ESCOs, para promover las energías renovables. Se pueden consultar experiencias exitosas de su implementación en Latinoamérica, como en el caso de Uruguay.
- Promover las energías renovables en el sector residencial, de gran consumo energético en el país.
- Crear un centro especializado de desarrollo tecnológico energético, con el objetivo de promover el desarrollo de nuevas tecnologías nacionales en diversas escalas, de amplio uso en todos los sectores.
- Incentivar y promover el cambio tecnológico en los sectores de mayor consumo energético, o en sectores claves como la agroindustria azucarera.

- Promover leyes ambientales y energéticas para los que inviertan en la Isla, por ejemplo, que los inversionistas extranjeros, incluyendo los hoteles, cumplan con un porcentaje de generación de energía con energía renovable, solar térmica y fotovoltaica, así como que cumplan con ciertos lineamientos referentes a la eficiencia energética, ahorro de agua, reciclado, etcétera.
- Resolver la falta de integración entre los productores y la ciencia aplicada al diseño, la ausencia de espacios de intercambio entre los centros de investigación y de producción, y entre los propios centros productivos para difundir y generalizar las mejores experiencias y resultados.
- Agilizar los trámites burocráticos para la adquisición y aplicación de tecnologías, así como para aprobar inversiones, generalmente complicados y dilatados. Es necesario flexibilizar los mecanismos de aprobación de inversiones destinadas a la reposición de equipamientos, y a la adquisición de equipos de medición.
- Existe escasez en el mercado nacional de materias primas e insumos, por lo que se deben diseñar esquemas/programas que resuelvan esta problemática.
- Fortalecer la diversificación de productos exportables, considerando los problemas que se enfrentan por la existencia de la doble moneda que complica hasta la formación de precios, y repercuten en la competitividad del producto en el mercado externo. De igual forma, la imagen de las producciones no está en correspondencia con las exigencias del mercado mundial, y las empresas presentan dificultades para realizar la mercadotecnia.
- Finalmente, los canales de distribución de mercancías deben revisarse, pues encarecen los precios del producto al cliente final debido al régimen fiscal de los mercados mayoristas que, además, no tienen a los productos nacionales dentro de sus prioridades.

Bibliografía

BARRERAS FERRÁN, RAMÓN (2013). «Al bagazo, mucho caso», en *Trabajadores*, 2013. www.trabajadores.cu.

CALVÓ, MARIBEL Y MERCEDES IBAÑEZ (2009). *La Revolución Energética Cubana en la UCLV: ¿Un paso en el camino hacia la sostenibilidad?* Santa Clara: Universidad Central de Las Villas (UCLV), 2009.

CEPAL (2012). *Informe macroeconómico 2011-2012, Cuba*. 2012.

CURBELO ALONSO, ALFREDO; BÁRBARA GAREA MOREDA Y ANTONIO VALDÉS DELGADO. *Generación de electricidad a partir de bagazo en Cuba*. División de Industria y Energía, Agencia de Ciencia y Tecnología. www.fao.org.

Enciclopedia cubana, EcuRed, <http://www.ecured.cu/>

GARCÍA MOLINA, JESÚS M. (2005). *La economía cubana a inicios del siglo XXI: desafíos y oportunidades de la globalización*. CEPAL: 2005.

GARCÍA MOLINA, JESÚS M. (2005). *La economía cubana desde el siglo XVI al XX: del colonialismo al socialismo con mercado*. CEPAL: 2005.

GONZÁLEZ COBAS, JOSÉ (2003). *La producción azucarera de Cuba y el mercado mundial azucarero*. La Habana: Centro de Investigación y Desarrollo del Transporte de Cuba, 2003.

GONZÁLEZ, RICARDO (2009). *La eficiencia energética en Cuba, resultados y perspectivas*. La Habana: Unión Eléctrica, 2009.

ONE (2007). *Series de Cuentas Nacionales de Cuba 1996-2007*. La Habana: Oficina Nacional de Estadísticas, República de Cuba, 2007.

ONE (2009). *Estadísticas Energéticas en la Revolución*. La Habana: Oficina Nacional de Estadísticas, 2009.

ONE (2011-a). *Anuario Estadístico de Cuba 2011. Cuentas Nacionales*. La Habana: Oficina Nacional de Estadísticas, República de Cuba, 2011.

ONE (2011-b). *Anuario Estadístico de Cuba 2011. Minería y Energía*. La Habana: Oficina Nacional de Estadísticas, República de Cuba, 2011.

ONE (2011-c). *Panorama económico y social 2011*. La Habana: Oficina Nacional de Estadísticas, República de Cuba, 2011.

PNUD (2013). *Indicadores Internacionales sobre desarrollo humano, informe 2013*.

REYES MONTIEL, JORGE LUIS; RAÚL PÉREZ BERMÚDEZ Y JESÚS BETANCOURT MENA.
Uso de la biomasa cañera como alternativa para el incremento de la eficiencia energética y la reducción de la contaminación ambiental. Santa Clara: Centro de Estudios de Termoenergética Azucarera (CETA), Universidad Central de Las Villas (UCLV).

RODRÍGUEZ CASTELLÓN, SANTIAGO (2001). *Consideraciones sobre el sector energético cubano*. La Habana: Centro de Estudios de la Economía Cubana, 2001.

SOMOZA CABRERA, JOSÉ. «Estimación de la demanda de energía. Cuba en el contexto de América Latina y el Caribe». Informe de Investigación para la obtención del grado de Doctor en Ciencias Económicas, Universidad de La Habana, Cuba.

TORRES, RICARDO. *El sector energético cubano entre 2005 y 2009*. La Habana: Centro de Estudios de la Economía Cubana, Universidad de La Habana.

Organización general del proyecto del Parque Eólico de 51 MW La Herradura 1

General organization of the 51 MW wind farm project La Herradura 1

Por Ing. María del Carmen Delgado González
e Ing. Guillermo Leiva Viamonte* * Empresa de Ingeniería
y Proyectos de la Electricidad (INEL),
Unión Nacional Eléctrica (UNE), Ministerio de Energía
y Minas (MINEM), La Habana, Cuba.
e-mail: maridglez@nel.une.cu y leiva@inel.une.cu*

Resumen

Se describen las ideas conceptuales aplicadas para la organización general del Proyecto, que incluyen la identificación de los objetos de obra principales del parque eólico y trabajos inducidos, las actividades principales y complementarias, las empresas participantes en su ejecución y sus límites de responsabilidad, los recursos principales requeridos, los plazos de terminación deseados y elementos locales que inciden en la planificación y calidad de la ejecución del Proyecto. Se identificaron especialmente las restricciones ocasionadas por las infraestructuras existentes y las principales acciones correctivas o nuevas inversiones a ejecutar para su acondicionamiento, a fin de que estén aptas para cada etapa. Como resultado principal se preparó el cronograma general utilizando el MS Project Manager que define todas las actividades del Proyecto, identifica la ruta crítica de cada proceso principal y permite la planificación detallada de los recursos que se emplearán en su ejecución.

Palabras clave: Organización, energía eólica, recursos, infraestructuras, cronograma

Abstract

The concept ideas applied in the general organization of the Project are described in this paper, including the identification of the main work objects of the wind farm and related works. We also describe the main and complementary activities, the participating companies and their limits of obligation, resources required and deadlines for completion and local elements that affect the planning and quality of the completing of the Project. The restrictions caused by the existing infrastructures and the main corrective actions or new investments to be carried out for their conditionings were identified so their availability is guaranteed for each phase. As a main result, a general time line was prepared using the MS

Project Manager that defines all project activities, the critical path of each main process and allows detailed planning of the resources that will be used in its implementation.

Keywords: Organization, wind energy, resources, infrastructures, time line

Introducción

El principal objetivo del Parque Eólico de 51 MW Herradura 1 en la provincia de Las Tunas, es la generación de electricidad a partir de una fuente renovable y disponible establemente en el territorio, para lograr tres efectos de alto interés para el Estado y la economía cubanos:

- Reducir la importación de combustibles, acrecentando la soberanía energética de la Nación;
- Reducir significativamente las erogaciones anuales de divisas para dicha importación, y
- Reducir sensiblemente las emisiones de gases que causan efecto de invernadero (GEI) y otros contaminantes sólidos y líquidos derivados de la combustión de combustibles fósiles.

Objetivos

Para la organización integral del Proyecto se definieron sus premisas [Delgado y Leiva, 2013] que incluyeron las ideas conceptuales tecnológicas, la identificación de sus objetos principales y obras inducidas, actividades principales y complementarias, empresas participantes y sus responsabilidades, recursos requeridos, plazos de terminación deseados y factores locales que inciden en la planificación y calidad de la ejecución.

Se identificaron especialmente las restricciones ocasionadas por las infraestructuras existentes y las acciones correctivas o nuevas inversiones a ejecutar para su acondicionamiento.

Efectos positivos esperados del Parque Eólico

La magnitud de los efectos positivos del Parque Eólico [Leiva, et al., 2013] será directamente proporcional a su producción anual de energía (PAE), que depende en primera instancia de la eficiencia y eficacia con que se aproveche el recurso eólico disponible en la región de emplazamiento. Las estimaciones más recientes de la PAE, actualizadas mediante un exhaustivo análisis de las restricciones identificadas hasta esta fecha, son las siguientes (Tabla 1):

Tabla 1. PAE y efectos positivos estimados del Parque Eólico Herradura 1

Efecto	Unidad	Valor
Producción de energía anual (promedio anual)	GWh/año	137,96
Combustible fósil sustituido (promedio anual, considerando el consumo específico de 280 g/kWh o 280 t/GWh)	Miles de t/año	38,63
Combustible ahorrado a precio de compra (promedio anual, considerando el precio unitario de \$601/t de fuel oil)	Millón \$/año	23,22
Gases de efecto invernadero evitados (promedio, considerando las emisiones específicas de 2,07 t GHG/t fuel oil)	Miles de t/año	79,96

Bases para la selección de los aerogeneradores

La selección de los aerogeneradores se basó en la Solicitud de Oferta elaborada por la Ingeniería [INEL, 2011], cuyos requerimientos principales fueron:

- a) Tecnología de velocidad de rotación variable y paso de palas variable (pitch).
- b) Rotor tripalas a barlovento, con orientación activa.
- c) Potencia nominal unitaria preferida: En el rango de 1,5 MW a 2,0 MW.
- d) Clase de resistencia preferida: Clase III-a (máquina y torre) (según IEC 61400-1,

GL 2003, o sus versiones más actualizadas, u otras normas aplicables). De no garantizarse su resistencia para las condiciones de vientos extremos pronosticadas, evaluar la posibilidad de utilizar máquinas de Clase III-a sobre torres de Clase II-a. e. Altura de buje:

- Hasta 70 m sobre el nivel del terreno para potencia unitaria hasta 1,7 MW.
 - Hasta 80 m sobre el nivel del terreno para potencia unitaria de 2 MW.
- e) Generador eléctrico según la tecnología disponible del ofertante, con voltaje de generación de 690 V, o superior según el diseño propio del

suministrador, garantizando los niveles correspondientes de protección y aislamiento.

- f) Clasificación térmica según IEC 60085 Edición 3 (2004), o su versión más reciente. Grado de protección según IEC 60529 Edición 2 (2001), o su versión más reciente. Compatibilidad electromagnética según IEC 61000 en sus versiones más recientes.
- g) Nivel de ruido según IEC 61400-11, IEC 61400-14, EN-ISO 11202-1996 y la Norma Cubana NC26:2007. Ruidos admisibles en zonas habitables. Requisitos higiénico-sanitarios.
- h) Protección contra descargas eléctricas atmosféricas según el Reporte TR-IEC 61400-24 (2002), Norma UNE-EN 62305-2007 y la Norma Cubana NC 96-02-09:1987.

Esta tecnología de aerogenerador permitirá su funcionamiento estable en compatibilidad con la red, al contar con los medios técnicos para regular su voltaje, frecuencia, potencia activa y reactiva, así como para apoyar al Sistema Electroenergético Nacional (SEN) a restablecerse tras sufrir huecos de tensión.

Alcance de la inversión a ejecutar

En correspondencia con el estudio de prefactibilidad [INEL, 2011], el Parque Eólico contará con los objetos de obra siguientes:

- Montaje de 34 aerogeneradores de 1,5 MW con bujes a 70 m de altura.
- Construcción de un Centro de Operación y Mantenimiento.
- Construcción de una subestación (SE) de concentración del Parque Eólico para conexión al SEN, de 110/34,5 kV.
- Caminos interiores y plataformas de montaje.

Se ejecutarán las obras inducidas siguientes:

- Construcción de dos líneas de transmisión eléctrica (LTE) a 110 kV desde la SE de salida del Parque Eólico hasta la SE Guiteras (30 km) y la SE de transferencia (Switchero) de Velasco, Holguín (25 km), que permitirán un esquema de alta confiabilidad y asegurarán la transferencia de este parque, y de otros dos de 50 MW cada uno, cuyo desarrollo se prevé en esta región;
- Ampliación y modernización de la SE Guiteras 110/34,5 kV del SEN, para alimentar la LTE 110 kV de enlace con el Parque Eólico;
- Nueva SE de transferencia Velasco 110 kV, que se enlazará a través de líneas a 110 kV con las SE del Parque Eólico, y del SEN Holguín 220/110 kV, la Caridad, 110/34,5 kV;

- Construcción de 2 km de nuevo vial para acceso a los caminos interiores de los aerogeneradores y sus plataformas de montaje;
- Reacondicionamiento de puntos críticos de carreteras y vías férreas en el circuito de transportación desde el puerto (Carúpano) hasta el emplazamiento, y
- Reacondicionamiento de áreas en el puerto para el almacenamiento temporal de los componentes tecnológicos.

Construcción civil

Se realizó un estudio preliminar de organización y logística de la construcción civil [Delgado y Leiva, 2012], teniendo como referencia los volúmenes y actividades previstas para la construcción civil y el montaje de un parque de estas características, referencias de soluciones de cimentación y montaje de aerogeneradores, experiencias anteriores en la ejecución de los parques eólicos ya instalados y referencias internacionales [Experiencia..., 2008; CUBE, 2009].

Para este proyecto eólico, dada su magnitud sin precedentes en Cuba, se definió el Cronograma General y el Presupuesto con todos los costos de suministros, construcción y montaje. Su complejidad organizativa se manifiesta al considerar que, sin incluir los trabajos previos de la Ingeniería para evaluar y caracterizar el recurso eólico en el emplazamiento, y para definir la microlocalización del parque, el Cronograma contempla unas 2 500 actividades principales (sin detallar todas las acciones y operaciones), con la participación de 41 organizaciones de 6 ministerios, que se desglosan en la tabla 2.

Se contrataron los ejecutores y proveedores de materiales, aspecto crítico porque esta obra demanda altos volúmenes de hormigón para los cimientos de las torres, y por consiguiente requiere grandes cantidades de áridos, cemento y barras de acero (ver Tabla 3), y exigirá alta resistencia del hormigón y gran precisión en la ejecución de las cimentaciones, con una adecuada selección y control de la calidad de los áridos y demás materiales a emplear, así como de todo el proceso.

Tabla 2. Clasificación de actividades principales del Cronograma

Perfil de actividad	Cantidad de actividades	Organizaciones participantes
Obtención de Permisos y licencias	17	10
Estudios previos	50	2

Construcción civil directa en el Parque Eólico	4	5
Obras de acondicionamiento en el Puerto Carúpano	200	
Recepción, almacenaje y transporte de suministros	818	3
Montaje y puesta en marcha del Parque Eólico	500	5
Construcción y montaje de 2 LTE de enlace al SEN	200	5
Construcción y montaje de SE del Parque Eólico	345	
Construcción y montaje de SE en el SEN	200	
Obras de acondicionamiento de carreteras	50	4
Obras de acondicionamiento de ferrocarril	50	4
Facilidades temporales para la construcción	50	3
Total	2 484	41

Tabla 3. Principales volúmenes constructivos requeridos (estimados)

Indicador		Volumen	Unidad	Peso	Unidad
Hormigón	Para un cimiento	284,5	m3	625,9	t
	Total	9 673	m3	21 280,6	t
Barras de acero	Para un cimiento			42	t
	Total			1 428	t
Zanjas para soterrar líneas eléctricas		25	km		

Importantes trabajos preparatorios para acondicionar las infraestructuras del puerto y las carreteras en el circuito de acceso al emplazamiento fueron objeto de un estudio específico, emitiéndose las tareas técnicas [Delgado y Leiva, 2012] para organizar y ejecutar las acciones correspondientes.

Transportación y montaje

Se elaboró un estudio preliminar de organización y logística de la transportación por carretera desde Puerto Carúpano hasta el Parque Eólico, en el que se identificaron las cantidades, dimensiones y pesos de todos los componentes a transportar y que originan una demanda de cerca de 500 viajes, de los cuales unos 300 requieren de medios especiales.

Este se garantizará por CUBIZA, empresa cubana especializada con medios y personal altamente calificado [CUBIZA, 2012]. Se coordinarán los permisos y medidas de seguridad vial con las entidades pertinentes.

CUBIZA también realizará los izajes con las grúas de uso general disponibles, y subcontratará a una entidad extranjera con experiencia el servicio de una grúa de alta capacidad para izar los componentes principales de los aerogeneradores (como las góndolas con peso hasta de 60 t), al no disponer ni de dicho medio ni de la experiencia propia. La llegada de la grúa principal para el montaje mecánico de los aerogeneradores se sincronizará con el avance de las obras, para minimizar su tiempo total de empleo.

La Empresa de Construcción y Montaje Especializados (ECME) ejecutará el montaje tecnológico de los grandes aerogeneradores, con supervisión técnica del suministrador seleccionado.

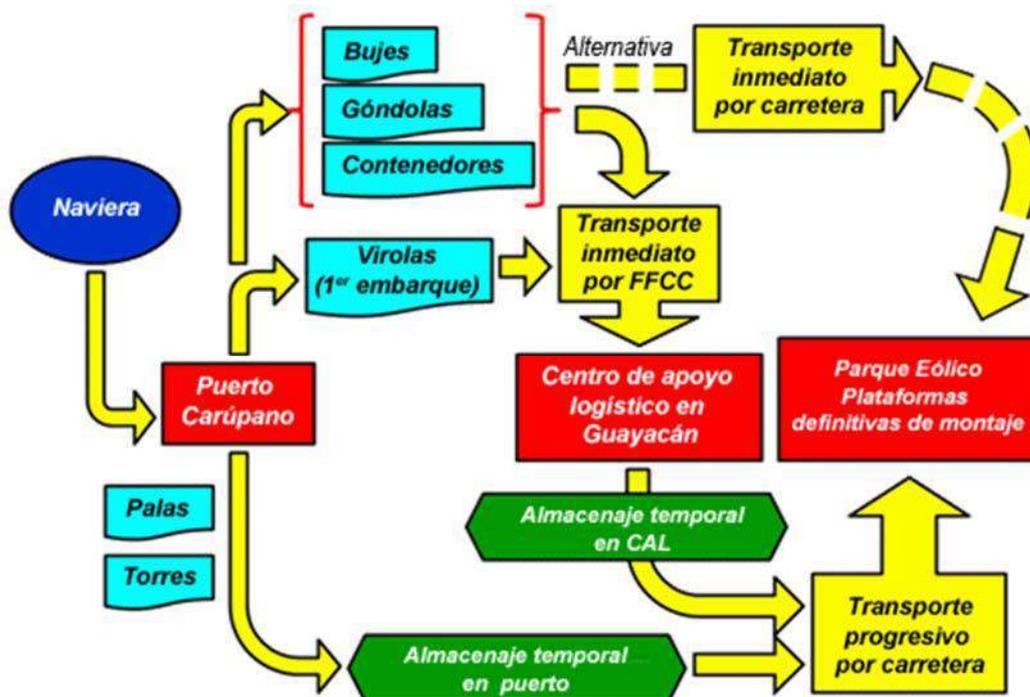
Esquemas de manipulación

Se elaboró un estudio preliminar de manipulación y almacenaje de los aerogeneradores que define las maniobras a ejecutar, la extensión y ordenamiento de las áreas de almacenaje en el puerto y el emplazamiento, los medios de izaje y transporte requeridos en cada posición, los plazos en que deberán estar disponibles y la duración estimada de las maniobras. Este estudio complementa al Cronograma General y facilitará la preparación de los proyectos a elaborar para la recepción, transportación, manipulación y almacenamiento. Sus premisas fueron:

- a) Todo el equipamiento tecnológico se recibirá por vía marítima en Puerto Carúpano, distante del Parque Eólico a 30 km, aproximadamente.
- b) Todos los componentes de los 34 aerogeneradores y medios auxiliares se recibirán en 4 embarques:

- El primero con las 34 virolas o anillos de cimentación;
 - Los 3 siguientes, con todos los componentes de aerogeneradores en lotes de 12, 11 y 11 unidades, incluyendo equipos complementarios y auxiliares requeridos para su manipulación.
 - Se recibirán otros embarques de distintos suministradores para objetos de obra inducidos, o por vía terrestre desde almacenes de la UNE en La Habana.
- c) En el puerto se destinarán áreas para almacenaje temporal de las palas y torres de aerogeneradores, hasta su evacuación por ferrocarril o carretera directamente hacia el Parque Eólico.
- d) Los embarques se sincronizarán con la construcción civil y el montaje del parque eólico, reduciendo la estadía en puerto al mínimo imprescindible para evacuar progresiva y directamente hacia cada una de las plataformas de montaje, empleando un mínimo de medios especiales de transporte (vehículos extensibles y otros).
- e) Las palas y tramos de torres se almacenarán y trasladarán por juegos, según indicación del suministrador.
- f) Los transformadores, equipos y cables para las SE y las LTE de salida del parque eólico se almacenarán en áreas próximas a sus emplazamientos de destino.

El esquema general de transportación y manipulación se muestra a continuación:



Bibliografía

- Catálogo y website de Alstom Wind / Ecotecnia.*
- Catálogo y website de Enercon GmbH.*
- Catálogo y website de Fuhrlaender GmbH.*
- Catálogo y website de Goldwind Science & Technology Co., Ltd.*
- Catálogo y website de Goudian United Power Technology Co., Ltd.*
- Catálogo y website de Sinovel Wind Group Co., Ltd.*
- Catálogo y website de Vensys GmbH.*
- Catálogo y website de Vergnet SA.*
- CUBE Engineer Ing GmbH. *Planificación y gestión de proyectos eólicos.*
Tannenweg 11, 25813 Husum.
www.cube-engineering.com
- CUBIZA (2012). *Evaluación sobre equipos de izaje para parque eólico de 50 MW en Herradura, Las Tunas.* La Habana: diciembre 2012.
- DELGADO, MARÍA Y GUILLERMO LEIVA (2012a). *Parque Eólico de 51 MW Herradura 1. Tarea Técnica para la evaluación y acondicionamiento de las infraestructuras portuarias y viales en itinerarios hacia el parque eólico, la organización de la transportación y el izaje de los aerogeneradores.*
La Habana: INEL, junio, 2012.
- DELGADO, MARÍA Y GUILLERMO LEIVA (2012b). *Parque Eólico de 51 MW Herradura 1, Las Tunas. Diagrama general de organización del proyecto.* La Habana: INEL, julio, 2012.
- DELGADO, MARÍA Y GUILLERMO LEIVA (2012c). *Informe Técnico ER-EO 28/2012. Ideas conceptuales de organización logística de la recepción portuaria, manipulación, almacenamiento temporal y transportación del equipamiento tecnológico (Logística de los aerogeneradores).* La Habana: INEL, septiembre, 2012.
- Experiencia en el desarrollo de proyectos de energía eólica. Parque eólico Jepirachi.* Foro de Normalización y Contexto Nacional en Energía Solar y Eólica ICONTEC-UPME. Empresas Públicas de Medellín E.S.P. Gerencia Generación Energía, noviembre. 2008. www.eppm.com
- INEL (2011). *Informe Técnico ER-ING 23/2011. Estudio de Prefactibilidad Técnico-económica del Proyecto de un Parque Eólico de 50 MW en la zona de Playa Herradura a Punta del Lirio, municipio de Jesús Menéndez, Las Tunas.* La Habana: INEL, junio, 2011.
- INEL (2011). *Solicitud de Oferta para el Suministro de un parque eólico de 50 MW para la República de Cuba.* La Habana: INEL, agosto, 2011.
- LEIVA, GUILLERMO, et al. (2013). *Parque Eólico de 51 MW Herradura 1. Informe Técnico ER-EO 14/2013. Premisas del Esquema de Plan General.*
La Habana: INEL, marzo, 2013.

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

DIRECTOR GENERAL:

Dr. Luis Bérriz Pérez.

DIRECTOR:

M.Sc. Manuel Álvarez González.

EDITOR JEFE:

M.Sc. Alejandro Montesinos Larrosa.

EDITORA:

M.Sc. Madelaine Vázquez Gálvez.

CORRECCIÓN:

Ing. Jorge Santamarina Guerra.

CONSEJO EDITORIAL:

Dr. Luis Bérriz Pérez.

M.Sc. Manuel Álvarez González.

Dr. Conrado Moreno Figueredo.

M.Sc. Manuel Fernández Rondón.

M.Sc. Alejandro Montesinos Larrosa.

M.Sc. Daniel López Aldama

DISEÑO ELECTRÓNICO:

D.I. Antonio Romillo Polaino.

WEB MASTER:

M.Sc. Fernando González Prieto.

CONSEJO ASESOR:

Dra. Elena Vigil Santos.

Dr. Conrado Moreno Figueredo.

Dr. Sergio Corp Linares.

Dr. José Guardado Chacón.

Dr. Deny Oliva Merecio.

Dra. Dania González Couret.

Dr. Juan José Paretas.

Lic. Bruno Henríquez Pérez.

M.Sc. Leonor Turtós Carbonell.

M.Sc. Alejandro Montesinos Larrosa.

Lic. Ricardo Bérriz Valle.

Dr. David Pérez Martín.

Dr. César Cisnero Ramírez



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

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

Teléfono: (537) 205-9949.

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

e-mail: editora@cubasolar.cu

<http://www.cubasolar.cu>