



REVISTA CIENTÍFICA TRIMESTAL DE CUBASOLAR

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

50



Evaluación de aceites usados cubanos para el uso como combustible	1
Algunas consideraciones sobre el medio ambiente urbano y la movilidad de la población	13
Techos verdes, ¿una estrategia sostenible en Cuba?	27
Análisis de la marcha interanual de la rapidez del viento en superficie en tres estaciones meteorológicas involucradas en el desarrollo eólico en Cuba.....	44
Prospección eólica: herramienta para actividades de la agricultura y ganadería.....	52
Diseño de dos torres portantes para aerogeneradores de baja potencia	69

Evaluación de aceites usados cubanos para el uso como combustible

Evaluation of Cuban discarded lubricating oils to be used as fuel

Por Ing. Susana Soto Mederos, Ing. Luis Martínez Stable*,
Lic. María Dolores Ruiz Martínez* e Ing. Johanna Cobo Duharte*
* Centro de Investigación del Petróleo, La Habana, Cuba.
e-mail: susa@ceinpet.cupet.cu, lestable@ceinpet.cupet.cu*

Resumen

Se estima que en Cuba se generan alrededor de 18-20 MT/año de aceites lubricantes usados (aceites usados), provenientes de diversos sectores de la economía nacional, y no se dispone de tecnologías para su pretratamiento y reutilización eficiente del potencial energético que poseen, lo que significa una inadecuada gestión tecnológica y ambiental. Objetivo de este trabajo es valorar las características de este desecho para su uso como combustible, único destino final posible en estos momentos. En la investigación se estudian ocho mezclas de aceites usados recolectados en diversas regiones del país; se determinan propiedades físicas y químicas fundamentales para combustibles, y se comparan con requisitos establecidos en especificaciones nacionales e internacionales. Los resultados destacan que poseen elevada capacidad calorífica, superior a 9 600 kcal/kg, la temperatura de inflamación entre 80 y 198 °C y su contenido de contaminantes: cromo, 3,11 ppm, cadmio 0,21 ppm y plomo 23,00 ppm, en niveles permisibles para el aprovechamiento energético del aceite usado en cualquier sistema térmico, establecidos en la regulación de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos y relacionada con el manejo que se encuentra en el código federal 40 CFR 279. El contenido de cenizas entre 0,89 y 3,08% m/m resulta limitante que incide en la disminución de la transferencia de calor y eficiencia del sistema térmico, y se requiere algún pretratamiento que lo reduzca hasta 0,8% m/m, como máximo. Los resultados demuestran que los aceites usados del país son aptos para su uso como combustible.

Palabras clave: Aceite lubricante usado, combustible, aprovechamiento energético, gestión

Abstract

It is estimated that 18-20 MT/year of used lubricating oils (used oils) are discarded in Cuba. Currently, there are no recycling technologies available for their reuse as energy carriers, so their technological and environmental management is inadequate. The objective of this paper is to evaluate the

characteristics of this residue for its use as fuel, the only possible final destination at present. During the research eight mixtures of used oils collected in different regions of the country were studied and compared with the requirements of national and international specifications, determining their physical and chemical properties to be used as fuels. The results highlight that they have a heat capacity over 9 600 kcal/kg, combustion temperature between 80°C and 198°C and its content of pollutants: chromium, 3.11 ppm, cadmium 0.21 ppm and lead 23.00 ppm, acceptable levels for discarded lubricating oils to be used as fuel in any thermal system, established in the regulation of the Environmental Protection Agency of the United States and related to the handling found in the federal code 40 CFR 279. The content of ashes between 0.89 and 3.08% m/m causes the reduction of heat transfer and efficiency of the thermal system, and requires some pretreatment to reduce it to a maximum of 0.8% m/m. The results demonstrate that the country's discarded oils are suitable to be used as fuel.

Keywords: Discarded lubricating oil, fuel, energy efficiency, management

Introducción

La demanda de aceites lubricantes en el mundo es de aproximadamente 40 millones de toneladas al año, los cuales, durante el tiempo en servicio, se contaminan con diversas sustancias que deterioran su calidad, como carbón, agua, partículas metálicas del desgaste de las piezas en movimiento y la fricción, productos ácidos de la oxidación del aceite o del azufre de los combustibles, hidrocarburos aromáticos polinucleares (HAP) y remanentes de aditivos [Depuroil, 2011]. Cuando los lubricantes no cumplen sus prestaciones deben ser reemplazados por nuevos y se convierten en aceites usados que deben ser recogidos y reciclados de forma segura para la protección del medio ambiente y la salud humana [CUPET, 2014; Ciudad..., 2010].

El aceite usado es uno de los residuos contaminantes de mayor abundancia producidos en la actualidad, contiene hidrocarburos de lenta biodegradación que se acumulan en el entorno, tanto por vertimientos en aguas y suelos como por emisión de compuestos procedentes de su combustión [CUPET, 2014; EPA, 2011].

Clasifica como desecho químico peligroso y los gobiernos son responsables de la adopción de medidas para su reducción en el sitio origen, y del establecimiento de políticas y estrategias para que su eliminación se ejecute mediante técnicas apropiadas que reduzcan sus características nocivas [Miliarium, 2010a y 2010b].

En los últimos años han surgido nuevos procesos y tecnologías que permiten la reutilización o reciclaje de los aceites usados, transformándolos

en productos susceptibles de ser utilizados para aprovechamiento energético por su elevada capacidad calorífica, convirtiéndolos en uno de los residuos con mayor potencial como combustible o para su re-refinación, con la obtención de nuevos aceites bases para la formulación de lubricantes [Facultad..., 2006; Flores, 2001].

Cuba no cuenta en la actualidad con tecnologías para el procesamiento del aceite usado. Se destina al aprovechamiento energético, solo o en mezcla sin pretratamiento previo, por lo cual es necesario el conocimiento de sus características físicas y químicas fundamentales como combustible, y el nivel de contaminantes para su manejo seguro en procesos de combustión.

Los objetivos de la presente investigación están dirigidos a caracterizar, clasificar y evaluar como combustible aceites usados cubanos.

Materiales y métodos

La metodología de la investigación está dirigida al cumplimiento de sus objetivos. Las actividades para el estudio de los aceites usados se dividieron en tres etapas: caracterización, clasificación y evaluación. Por la diversidad de lubricantes que utiliza la industria nacional se realizó el estudio con ocho mezclas de aceites usados colectados en depósitos de grandes generadores y del gestor estatal de almacenamiento (Empresas Comercializadoras de Combustibles, ECC), que tributan un volumen significativo a la combustión.

En el muestreo se aplicó la norma internacional ASTM D 4057:2009 [NC, 2009]. Las muestras se tomaron de tres niveles: superior, medio e inferior y se prepararon compósitos representativos del volumen almacenado en cada depósito de procedencia. En la tabla 1 se presenta la identificación de las mezclas, tipo y procedencia.

Tabla 1. Identificación de las mezclas de aceites usados

Mezcla	Aceites usados de:	Depósito de:
1	Turbina	Central termoeléctrica
2	Motores diésel	Grupos electrógenos
3	Motores de gasolina	Base de ómnibus
4	Motores fuel	Grupos electrógenos

5	Almacenamiento	ECC Las Tunas
6	Almacenamiento	ECC Holguín
7	Almacenamiento	ECC Granma
8	Almacenamiento	ECC Santiago de Cuba

Caracterización

En el análisis de las especificaciones de combustibles nacionales [CUPET, 2008] e internacionales [ASTM, 2008, 2009 y 2010] que se toman de referencia, se definieron los índices fundamentales a determinar para caracterizar las mezclas, empleándose métodos de ensayos reconocidos internacionalmente y procedimientos analíticos desarrollados en el Centro de Investigación del Petróleo. La caracterización se fundamentó en los resultados de la determinación. La tabla 2 indica los índices definidos y métodos aplicados.

Tabla 2. Índices y métodos empleados [EPA, 2013]

Índices físico-químicos	Métodos de ensayo
Agua por destilación	ASTM D 95
Agua y sedimentos	ASTM D 1796
Azufre	ASTM D 4294
Cenizas	ASTM D 482
Metales pesados: cadmio, cromo, plomo	ASTM D 5863
Punto de inflamación	ASTM D 93
Sedimentos por extracción	ASTM D 473
Viscosidad cinemática	ASTM D 445
Valor calórico neto	ASTM D 4868

Clasificación

Los aceites usados se clasifican a partir de los índices físico-químicos determinados y las especificaciones de los combustibles de referencia. Sobre la base de los requisitos de calidad establecidos para combustibles nacionales se clasifican en los grupos 1, 2, 3 y 4. En la tabla 3 se indican los índices definidos para esta clasificación.

Tabla 3. Clasificación y especificaciones de combustibles nacionales [CUPET, 2008]

Índices de calidad	Método	Clasificación y especificaciones			
		Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3	Grupo 4
Agua, % v/v	ASTM D 95	1,5 máx.	1,5 máx.	1,5 máx.	1,5 máx.
Sedimentos, % m/m	ASTM D 473	0,15 máx.	0,10 máx.	0,10 máx.	0,15 máx.
Cenizas, % m/m	ASTM D 482	0,10 máx.	0,10 máx.	0,10 máx.	0,10 máx.
Azufre, % m	ASTM D 4294	2,5 máx.	3.0 máx.	3.5 máx.	5.0 máx.
Punto de inflamación, °C	ASTM D 93	62 mín.	62 mín.	62 mín.	62 mín.
Viscosidad a 50 °C, mm ² /s	ASTM D 445	180 máx.	181-400	400-650	1 500 máx.
Valor calórico neto, kcal/kg	ASTM D 4868	9 500 mín.	9 500 mín.	9 500 mín.	9 300 mín.
Nota: Combustibles obtenidos a partir de productos residuales de la refinación del petróleo crudo. 1. De uso general en hornos y calderas industriales. 2. De uso general en hornos y calderas industriales, en motores de generación eléctrica y como agente sellante en los gasómetros MAN de gas manufacturado. 3. De uso general en hornos y calderas industriales, así como en motores de generación eléctrica. 4. De uso general en hornos y calderas industriales. Nota: máx. = máximo, y mín. = mínimo.					

La clasificación por grados de combustibles se realizó sobre la base de los requisitos de viscosidad a la temperatura de 100 °C establecidos en las normas internacionales ASTM: D 396, D 6448 y D 6823 que se indican en las tablas 4, 5 y 6.

Tabla 4. Clasificación y especificaciones de combustibles, ASTM D 396 [ASTM, 2010]

Índices	Método	Grados	
		No. 5 (pesado)	No. 6
Agua y sedimentos, % v/v	ASTMD: D 95 + 473	1,00 máx.	2,00 máx.
Cenizas, % m/m	ASTM D 482	0,15 máx.	-
Punto de inflamación, °C	ASTM D 93	55 mín.	60 mín.
Viscosidad a 100 °C, mm ² /s	ASTM D 445	9,0-14,9	15,0-50,0
Grado No. 5 pesado y Grado No. 6, son combustibles residuales destinados a quemadores industriales y usualmente requieren precalentamiento. Según el grado los quemadores están equipados para el manejo y atomización apropiada en diversas condiciones climáticas y operacionales. Nota: máx. = máximo, y mín.= mínimo.			

Tabla 5. Clasificación y especificaciones de combustibles a partir de aceites usados, ASTM D 6448 [ASTM, 2009]

Índices	Método	Grados		
		RFO5L	RFO5H	RFO6
Agua y sedimentos, % v/v	ASTMD: D 95 + 473	3,0 máx.	3,0 máx.	3,0 máx.
Cenizas, % m/m	ASTM D 482	0,8 máx.	0,8 máx.	Reportar
Punto de inflamación, °C	ASTM D 93	55 mín.	55 mín.	60 mín.
Viscosidad a 100 °C, mm ² /s	ASTM D 445	5,0-8,9	9,0-14,9	15,0-50,0
Valor calórico neto, kcal/kg	ASTM D 240	9 920 mín.	9 920 mín.	10 140 mín.
Grado RFO5L, RFO5H y RFO6, combustibles constituidos parcial o totalmente por mezclas de aceites lubricantes usados o reprocesados, con o sin combustible destilado, residual o ambos, y están destinados a varios tipos de quemadores industriales y pueden requerir o no precalentamiento. Según el grado los quemadores están equipados para el manejo y atomización adecuada en diversas condiciones climáticas y operacionales. Nota: máx. = máximo, y mín. = mínimo.				

Tabla 6. Clasificación y especificaciones de combustibles con aceites usados, ASTM D 6823 [ASTM, 2008]

Índices	Método	Grados		
		RFC5L	RFC5H	RFC6
Agua y sedimentos, % v/v	ASTMD: D 1796	1,0 máx.	2,0 máx.	2,0 máx.
Cenizas, % m/m	ASTM D 482	0,3 máx.	0,3 máx.	Reportar
Punto de inflamación, °C	ASTM D 93	55 mín.	55 mín.	60 mín.
Viscosidad a 100 °C, mm ² /s	ASTM D 445	5,0-8,9	9,0-14,9	15,0-50,0
Valor calórico neto, kcal/kg	ASTM D 240	9 920 mín.	9 920 mín.	10 140 mín.
Grado RFC5L, RFC5H y RFC6, combustibles que contienen al menos 25% de aceite lubricante usado o reprocesado, con o sin combustible destilado medio, residual o ambos. Son destinados para varios tipos de quemadores industriales y calderas comerciales que poseen los dispositivos necesarios para el manejo y atomización adecuada en variadas condiciones climáticas y operacionales. Los combustibles pueden requerir o no precalentamiento, según la viscosidad. Esta norma es para aplicaciones en las que la especificación D 6448 no reúna las exigencias de servicio o del equipo térmico en cuestión. Nota: máx. = máximo, y mín. = mínimo.				

Evaluación

Para la evaluación se comparan los resultados de la caracterización con los requisitos establecidos para los combustibles mostrados en las tablas 4, 5 y 6. En la tabla 7 se indican los niveles de parámetros que regula la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos para el aprovechamiento energético de los aceites usados en cualquier sistema térmico.

Tabla 7. Parámetros para el aprovechamiento energético de aceites usados [EPA, 2013]

Parámetros	Niveles permisibles
Cadmio	2 ppm máximo
Cromo	10 ppm máximo

Plomo	100 ppm máximo
Punto de inflamación	38 °C mínimo

Resultados y discusión

Caracterización

En las tablas 8 y 9 se reportan los resultados de los índices físico-químicos que caracterizan a las mezclas de aceites usados de los generadores y del gestor estatal de almacenamiento.

Tabla 8. Características de mezclas de aceites usados de generadores

Índices físico-químicos		Mezclas			
		1	2	3	4
Agua por destilación, % v/v		0,06	3,32	3,00	0,61
Sedimentos, % m/m		0,50	1,02	2,06	0,08
Agua y sedimentos*, % v/v		0,56	4,34	5,06	0,69
Azufre, % m		0,34	0,37	0,84	0,92
Cenizas, % m/m		Ausencia	1,48	0,71	3,08
Punto de inflamación, °C		198	120	128	198
Viscosidad a:	50 °C, mm ² /s	20,54	51,42	87,10	79,86
	100 °C, mm ² /s	5,20	11,35	15,15	13,44
Valor calórico neto, kcal/kg		10 138	9 919	9 980	9 644
Cadmio, ppm		< 0,10	0,21	< 0,10	< 0,10
Cromo, ppm		< 0,50	< 0,50	< 0,50	1,61
Plomo, ppm		23,00	< 1,00	< 1,00	< 1,00
* NC ASTM: D 95 + D 473.					

Tabla 9. Características de mezclas de aceites usados de gestores estatales

Índices físico-químicos	Mezclas			
	5	6	7	8
Agua por destilación, % v/v	2,00	6,20	1,55	0,45
Agua y sedimentos*, % v/v	0,20	4,00	0,65	0,10
Azufre, % m	0,84	0,99	1,06	0,94
Cenizas*, % m/m	0,89	0,70	0,89	1,17
Punto de inflamación, °C	130	80	108.0	108.0
Viscosidad a 100 °C, mm ² /s	12,25	11,88	10,02	10,21
Valor calórico neto, kcal/kg	10 094	10 086	10 093	10 108
Cadmio, ppm	0,20	< 0,01	< 0,01	0,20
Cromo, ppm	3,11	< 0,50	1,47	< 0,50
Plomo, ppm	13,77	8,65	9,12	10,16

* NC ASTM D 1796.

Clasificación

Las mezclas de aceites usados no clasifican para las especificaciones de combustibles nacionales de la tabla 3, porque no cumplen los requisitos que se establecen para los índices: agua, sedimentos y cenizas.

Según la norma ASTM D 396 (Tabla 4) por la viscosidad a 100 °C: las mezclas de aceites 2, 4, 5, 6, 7 y 8, clasifican en el grado 5, la mezcla 3 en el grado 6, y la mezcla 1 no clasifica para esta norma.

Según las normas ASTM: D 6448 y D 6823 (tabla 5 y 6) por la viscosidad a 100 °C: la mezcla 1 clasifica en los grados RFO5L y RFC5L, la 3 en los grados RFO6 y RFC6 y las mezclas 2, 4, 5, 6, 7, y 8 en los grados RFO5H y RFC5H.

Evaluación

Según los requisitos de combustibles nacionales mostrados en la tabla 3, las mezclas poseen elevado valor calórico, mayor de 9 600 kcal/kg; alto punto de inflamación, entre 80 y 198 °C, y bajo contenido de azufre que oscila en el rango de 0,34-1,06% m. El contenido de agua es menor en las mezclas 1, 4 y 8, se encuentra entre 0,06 y 0,61% v/v y mayor en las mezclas 2, 3, 5, 6 y 7, entre 1,55 y 6,20% v/v; las mezclas 4 y 8 contienen menos sedimentos, 0,08 y 0,10% m/m, respectivamente. La mezcla 1 no contiene cenizas, las restantes presentan mayor contenido, que varía desde 0,70 hasta 3,08% m/m, y menos viscosidad.

Según los requisitos de combustibles de las normas ASTM: D 396, D 6448 y D 6823 mostrados en las tablas 4, 5 y 6, y la clasificación realizada, se observa, en lo referente al agua y sedimentos, que la mezcla 3 tiene mayor contenido que el especificado para el grado 6, y la 1 menos que el correspondiente a los grados RFO5L y RFC5L. En lo referente a las cenizas, la mezcla 6 presenta menos que la correspondiente al grado RFO5H y más que la del grado RFC5H. En las mezclas 2, 4, 5, 7 y 8 hay más cantidad que el establecido para los grados RFO5H y RFC5H. La mezcla 3 de los grados RFO6 y RFC6 contiene 0,71% m/m y la mezcla 1 de los grados RFO5L y RFC5L no contiene. Todas las mezclas poseen mayor punto de inflamación y menor valor calórico que los correspondientes a cada grado.

Según los parámetros de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos para el aprovechamiento energético de los aceites usados mostrados en la tabla 7, las mezclas cumplen los requisitos.

Conclusiones

Los aceites usados cubanos constituyen residuos potenciales para el aprovechamiento energético porque presentan alta capacidad calorífica, baja volatilidad y poca cantidad de los contaminantes cadmio, cromo y plomo. Deberán someterse a pretratamiento, a fin de minimizar el ensuciamiento del sistema, con el consiguiente mejoramiento de la eficiencia del equipo térmico. Para el uso, sin pretratamiento, con elevado contenido de cenizas, agua y sedimentos, se deberá aplicar la variante tecnológica de mezcla con el combustible, de manera que el producto resultante cumpla los requisitos de calidad del combustible del equipo térmico de que se trate.

Es necesaria la caracterización sistemática de los aceites usados, así como ampliar los conocimientos de su composición para su manejo seguro, ya que son desechos químicos peligrosos que se destinan a procesos de

combustión para el aprovechamiento energético y no se cuenta con tecnologías para su pretratamiento adecuado.

Reconocimientos

Los autores desean agradecer la colaboración de especialistas y técnicos de los laboratorios Físico-Químico y Química Analítica del Centro de Investigación del Petróleo, por la ejecución de los ensayos que permitieron determinar los índices físico-químicos que caracterizan a las mezclas, así como a los especialistas y técnicos de las empresas Comercializadoras de Combustibles y de grandes generadores por facilitar los aceites usados para esta investigación.

Bibliografía

ASTM (2008). *Standard Specification for Commercial Boiler Fuels with Used Lubricating Oils*. ASTM D 6823: 08. West Conshohocken. United States, 2008.

————— (2009). *Standard Specification for Industrial Burner Fuels from Used Lubricating Oils*. ASTM D 6448: 09. West Conshohocken. United States, 2009.

————— (2010). *Standard Specification for Fuel Oil*. ASTM D 396: 10. West Conshohocken. United States, 2010.

CIUDAD AUTÓNOMA DE MELILLA (2010). «Autorización como gestor de instalaciones que usen aceites usados como combustible». Consultado: 0908.2010. Disponible en: www.melilla.es/melillaportal.

CUPET. UNIÓN CUBAPETRÓLEO (2008). *Catálogo de especificaciones de productos. Rama combustible*. DT-GC/CO702. La Habana: 2008.

————— (2014). *Reglamento técnico para la gestión de aceites usados de la Unión Cubapetróleo*. OC-MA/RU2114. La Habana: 2014.

DEPUROIL S.A. (2011). «Control reciclaje y mantenimiento de aceites industriales. Riesgos Medio Ambientales de los Aceites Industriales». Consultado: 10.03.2011. Disponible en: www.euskanet.net/depuroilsa/index.

EPA. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (2013). «Standard for Management of Used O. 40-CFR». Consultado: 25.05.2013. Disponible en: www.epa.gov.

————— (2011). «Programa para el manejo de aceite usado». Consultado: 08.12.2011. Disponible en: www.epa.gov.

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y CIENCIAS DE LA PRODUCCIÓN (2006). *Factibilidad del Manejo Ambientalmente Correcto (MAC) de los residuos aceitosos en Guayaquil*. Guayaquil: jun., 2006.

FLORES, P (2001). «Transformación de los aceites usados para su utilización como energéticos en procesos de combustión», en *Escenarios y Estrategias*, 8 (28-32): 2001.

MILIARIUM (2010a). «Gestión de aceites usados». Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo. Consultado: 06.10.2010. Disponible en: www.miliarium.com.

——— (2010b). «Gestión de aceite usado en el ámbito de la comunidad autónoma del país Vasco». Consultado: 06.10.2010. Disponible en: www.miliarium.com.

NC ASTM (2009). *Industria del petróleo. Práctica estandarizada para el muestreo manual del petróleo y productos del petróleo*. NC ASTM D 4057: 2009. La Habana: 2009.

Algunas consideraciones sobre el medio ambiente urbano y la movilidad de la población

Some considerations about the urban environment and population mobility

Por Ing. Nora Romero Ochoa,
Lic. Idalmi Padilla Magdaleno*
y Zunilda Parra Arias**

** Centro de Ingeniería y Manejo Ambiental
de Bahías y Costas, Cuba.
e-mail: norar@cimab.transnet.cu*

Resumen

En este trabajo se exponen algunas consideraciones sobre la movilidad de la población en La Habana y su relación con el medio ambiente urbano. Este movimiento de la población urbana está relacionado directamente con la utilización del espacio, los medios de transporte utilizados, los recursos naturales y financieros, y el tiempo que consume, razón por la cual puede ser afectado el estado ambiental del entorno en el cual se realizan esas actividades. Lo anteriormente expuesto hace posible analizar la organización de un territorio determinado, tomando en consideración una de las herramientas más utilizadas con relación al grado de desplazamiento de la población y el estudio de la movilidad de la población, cuyos resultados ayudarían a conseguir sobrellevar las dificultades del individuo en su entorno de una forma más equilibrada con el mismo, teniendo en cuenta que el medio ambiente urbano es un espacio socialmente construido que provoca un conjunto de relaciones entre los elementos naturales y los antrópicos, en detrimento de los primeros. El objetivo principal del trabajo es realizar un análisis de los posibles impactos negativos que se generan en el medio ambiente con el objetivo de mitigar esos impactos, y recomendar la aplicación de acciones conjuntas entre los tomadores de decisiones de las autoridades ambientales y los de la infraestructura del transporte público, para contribuir a evitar accidentes, la congestión vehicular, la contaminación del medio ambiente y lograr en general garantizar una buena calidad de vida a la población.

Palabras clave: Movilidad de la población, recursos naturales, espacio geográfico, medio ambiente, SIG.

Abstract

This paper presents some considerations about the mobility of the population in Havana and its relationship to the urban environment. The

mobility of the urban population affects the environment and is directly related to the use of space, the means of transport used, natural and financial resources, and time consumed. The foregoing makes it possible to analyze the organization of a given territory, taking into consideration one of the most used tools in relation to the degree of population movement and the study of population mobility, whose results would help to endure the difficulties of the population in their environment in a more balanced way, taking into account that the urban environment is a socially constructed space that causes a set of relationships between natural and anthropic elements, to the detriment of the former. The main objective of this paper is to carry out an analysis of the possible negative impacts that are generated in the environment with the objective of mitigating those impacts, and to recommend the implementation of joint actions with the participation of decision makers, both environmental authorities and those who have to do with public transport infrastructure, in order to help avoiding accidents, traffic congestion, pollution of the environment and in summary achieving a good quality of life for the population.

Keywords: Population mobility, natural resources, geographical space, environment, GIS

Introducción

El hombre como ser biológico y social necesita ocupar espacios y territorios en para sus actividades, para lo cual utiliza recursos naturales ya sean materiales o energéticos, con la consiguiente transformación del medio ambiente, generación de desechos sólidos y residuales líquidos, y emisión de gases, radiaciones y sonidos que contaminan los componentes abióticos (suelos, aguas, aire), y provocan afectaciones a la salud de los componentes bióticos, incluyendo lógicamente a los propios seres humanos.

Atendiendo a esta situación, las estructuras territoriales y la distribución espacial de las zonas residenciales, centros de trabajo, de servicios, recreativos y de consumo, han diseñado por sí mismas las estructuras del desplazamiento urbano y viceversa en La Habana, lo cual unido a los medios de transporte disponibles y a los cambios y condiciones socioeconómicos actuales —entiéndase recursos económicos y estilos de vida—, han determinado la forma en que la población se mueve dentro de la ciudad. No obstante, es necesario señalar los desplazamientos desde y hacia las provincias que limitan el territorio de la ciudad, y estos, aunque tienen menos participación en el desenvolvimiento de la movilidad, no dejan de ser menos importantes.

Es importante considerar que la estructura urbana con sus cambios y la mecánica del funcionamiento de sus actividades, está expuesta a ser reorganizada en dependencia de las políticas y estrategias del Estado. Esto conlleva a que se puedan trasladar actividades de un sitio a otro en un lapso de tiempo determinado, que puedan comenzar o terminar actividades en un territorio u otro en el momento en que sean necesarias o no, dependiendo de las condiciones particulares de cada momento, de lo cual se derivan decisiones y acciones que determinan la dinámica del funcionamiento de cada ciudad y más allá de sus propios límites.

Se deben considerar las actividades o procesos migratorios, que pueden producir impactos en el proceso del desarrollo urbano. Esto siempre se ha visto reflejado mayormente cuando estas migraciones van desde los territorios menos favorecidos desde el punto de vista socioeconómico, hacia los de mejores posibilidades socioeconómicas.

En la Cumbre de Río se aprobó el documento de acción denominado Agenda 21, en el cual se defienden las modalidades de producción y consumo sostenibles, e iniciativas de acción a escala local, para lograr un desarrollo sostenible. En cuanto a la movilidad y el transporte, la Agenda 21 en su Capítulo 7 señala la promoción de sistemas sostenibles de energía y transporte en los asentamientos humanos, mientras que en lo referente al medio ambiente urbano se manifiesta a favor de la determinación de los servicios necesarios, la dotación de la infraestructura urbana y el mejoramiento de los servicios públicos, al igual que la gestión más eficaz de la movilidad, con acciones de ubicación y modos de transporte más eficaces y racionales desde el punto de vista ecológico.

En este trabajo se pretende brindar un aporte a la comprensión y búsqueda de mejoras ambientales para la movilidad de la población, los medios de transporte y el medio ambiente en el espacio geográfico en el cual transcurren esas actividades, y que estén basadas en políticas y estrategias ambientales multisectoriales que apoyen y definan cómo se van a llevar a efecto estas mejoras, según la Agenda 21.

Desarrollo

El marco espacial del análisis es el territorio de la ciudad de La Habana. Sin entrar en análisis específicos de carácter técnico en cuanto a la flota vehicular y la cantidad de pasajeros transportados, es posible establecer una evaluación preliminar de las características potenciales de la movilidad, y su relación con el medio ambiente urbano en las vías principales de la ciudad.

Partiendo de la idea de que la ciudad constituye una entidad compleja y dinámica, y de que fue construida desde las ópticas epocales de los diferentes actores, se concibe el medio ambiente urbano como sinónimo de espacio geográfico, producto y escenario de la relación sociedad-naturaleza.

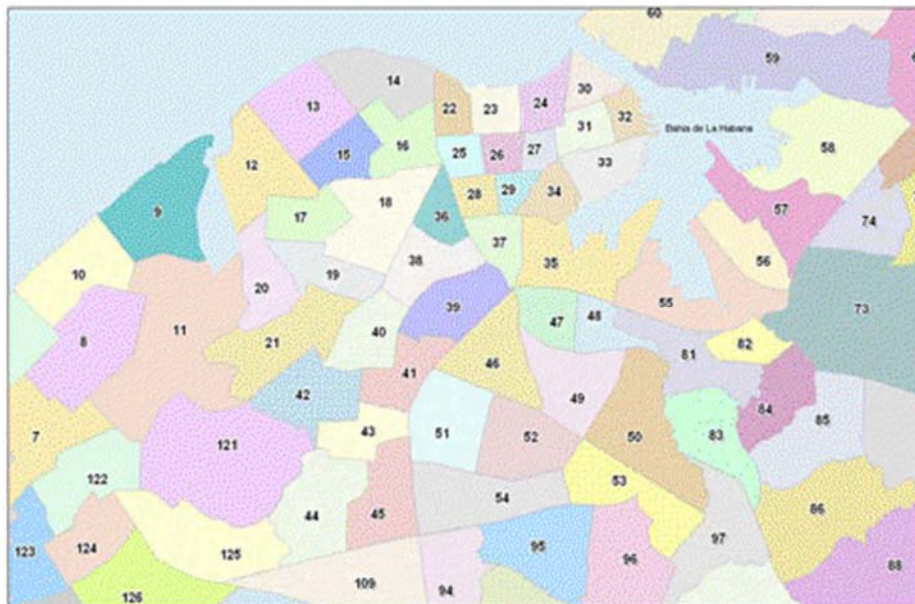
No obstante, para realizar este análisis y contribuir a la comprensión de la situación ambiental del territorio, sería conveniente realizar un estudio de sistematización de la movilidad de la población en cuanto a los factores de mayor influencia en dicha movilidad: cómo se desplaza la población y qué tipo de transporte utiliza; se debe además conocer cómo está estructurada la red de transporte en la ciudad, cómo se distribuyen las principales actividades en el espacio urbano, y finalmente revisar los principales problemas ambientales en relación con el espacio en el cual se desplaza la población.

La movilidad cotidiana de la población constituye un fenómeno complejo. Las personas se mueven para realizar actividades o acompañar a otras personas, movimiento de trasladarse de un lugar a otro que en sí representa una actividad que genera la utilización de recursos humanos y materiales. Adicionalmente se conoce que el medio ambiente existe como un conjunto de relaciones geoespaciales cuya distribución y funcionamiento pueden ser captados, procesados, guardados y utilizados en la toma de decisiones para la protección y el control ambiental [Romero y Ulloa, 2011]. Se puede afirmar que la movilidad de las personas existe como un estado latente y potencial de riesgo, y depende de la capacidad de respuesta de la sociedad para enfrentarlo, por lo que se deduce que también es posible analizar la posibilidad de disminuir la cantidad de impactos negativos en el contexto de la movilidad urbana.

En el espacio urbano actúa un conjunto de relaciones entre los elementos naturales, el hombre y el sistema de transporte, por lo que la información geoespacial que aportan los Sistemas de Información Geográfica (en lo adelante SIG) proporciona una perspectiva idónea a partir de la modelación de eventos y situaciones ambientales complejas relacionadas, por ejemplo, con la contaminación del aire por fuentes móviles de transporte y su impacto negativo en la salud humana y del medio ambiente en el territorio de dicha movilidad, ya que permite localizar cada evento en su posición geográfica, lo que resulta imprescindible para establecer relaciones entre procesos y apoyar la toma de decisiones.

Por lo anteriormente planteado, resulta evidente la necesidad de generar conocimientos científicos y tecnológicos en este campo, y abrir nuevas líneas de investigación aplicando las posibilidades de los SIG en la producción y análisis de la información geoespacial para la evaluación y

gestión ambiental en diversos niveles, tanto a escala de zona de transporte (Fig. 1), municipio o provincia, cuyo objetivo principal sea contribuir al diagnóstico y gestión de problemas ambientales, poniendo especial énfasis en el análisis de las interacciones de las actividades humanas con el medio ambiente, en este caso, la movilidad de la población.



*Fig. 1. Esquema parcial de las zonas de transporte de La Habana.
Fuente: Elaboración propia.*

Partiendo de esta premisa se puede analizar la influencia de la movilidad desde dos puntos de vista: el primero, desde la ocupación del espacio-tiempo, y el segundo, desde las redes de transporte.

En ambos casos sería muy eficaz la utilización de un Sistema de Información Geográfica como plataforma informática para el tratamiento y modelación de los eventos que genere este análisis.

Las infraestructuras del transporte compiten por el espacio haciendo uso del suelo, del aire y de los combustibles fósiles, que son los recursos naturales más impactados negativamente por la propia función del sistema de transporte [Alcántara, s.a.].

La movilidad demanda un espacio cuando se construyen o reparan las infraestructuras del transporte y durante su vida útil, estas son, vías (Fig. 2), estaciones, terminales, aceras, paradas de ómnibus, señalizaciones, redes técnicas, etcétera.

Obviamente, el espacio que ocupan estas infraestructuras es inevitablemente restado a otros usos. En el caso de vías suburbanas el

suelo que ocupan es por lo general de buena calidad y potencialidad de uso. Por ejemplo, las mejores tierras agrícolas relativamente planas y con buen drenaje son escogidas como rutas ideales para las vías.

En relación al tiempo empleado es posible hacer un análisis del tiempo de espera y el del desplazamiento, o sea, un presupuesto de tiempo, el cual es a su vez una herramienta muy útil a la hora de comprender el uso del transporte por parte de la población y su interrelación con el espacio. Por supuesto, este presupuesto de tiempo puede variar según algunas características específicas.

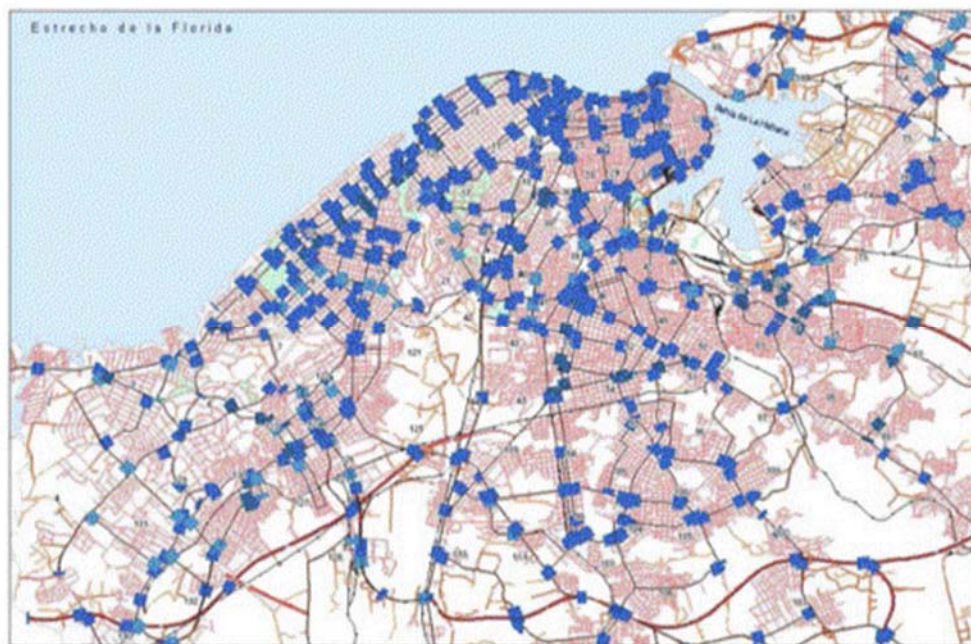


Fig. 2. Esquema parcial de los tramos de algunas de las vías principales de la ciudad de La Habana. Fuente: Elaboración propia.

En las grandes urbes citadinas donde existe una red de transporte de buena calidad y organización, un individuo puede consumir de 60 a 80 minutos como máximo, sin importar la distancia, ni el ingreso ni los medios de transporte que utiliza para moverse [García, s.a.].

En La Habana el servicio de transporte público es insuficiente y de mala calidad, lo que implica una deficiente oferta de transporte sobre todo en horarios pico. Esto genera impactos indirectos negativos sobre la población, que se hacen evidentes en el tiempo de espera en paradas y terminales, y conlleva a la aparición de impactos directos a la población, como son mayor exposición a la contaminación atmosférica, congestión del tránsito, inseguridad en las vías, contaminación sónica y vibraciones; estrés por congestión de pasajeros dentro de los medios de transporte, desventajas

para abordar los medios de transportes con exceso de pasajeros y no parada de los ómnibus en los lugares establecidos.

Las personas que se trasladan para realizar actividades cotidianas se mueven en un marco geográfico que forma parte de su espacio de vida, por lo tanto, las actividades relacionadas con el consumo de energía y recursos, y la emisión de los desechos como resultado de ese consumo, se mantienen constantes desde las zonas de residencias a través del espacio por donde se desplazan hasta sus destinos.

En el caso de los patrones de dispersión de los gases resultantes de la combustión interna de los medios de transporte automotor, se localizarán siempre en las vías convergentes y coincidentes con las vías principales de la ciudad, con menor concentración en las vías por donde no transitan las rutas de transporte público [Milanés, 2013].

El análisis del resultado potencial del estudio de la movilidad de la población, está directamente relacionado en primer lugar con el reordenamiento del transporte, para lo cual se recopiló información durante el período de 1982 hasta 2012, atendiendo a la cantidad de pasajeros que fueron transportados por los medios de transporte público como se muestra en la figura 3.

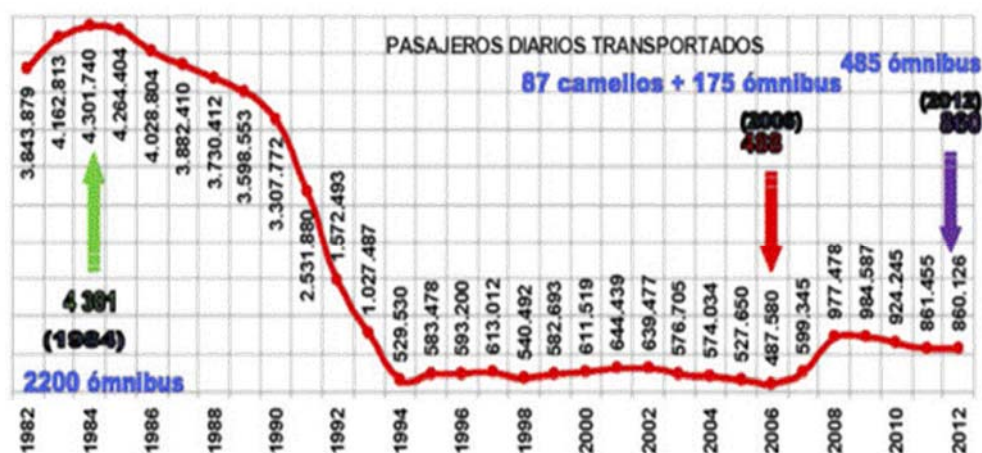


Figura 3. Transportación diaria de pasajeros en La Habana.
Fuente: Informe..., 2012.

La creciente motorización y extensión del uso del automóvil plantea dificultades generalizadas en materia de congestión del tráfico, así como altos costos ambientales y de accidentalidad. Por ejemplo, a nivel mundial se estima que en 2015 las zonas urbanizadas causarán 80% de las emisiones de CO₂.

Las fuentes móviles producen una gran parte de los gases de efecto invernadero que afectan el medio ambiente, desde que son emitidos a la atmósfera son transportados y sometidos a complejos fenómenos de difusión y transportaciones químicas, y por la distribución de su concentración en el espacio y en el tiempo estos gases y las partículas que emiten los medios automotores agravan o provocan enfermedades respiratorias, alérgicas o cancerosas. Aunque en Cuba el parque vehicular no es comparable en cantidad con los de países desarrollados, hay que tener en cuenta la existencia y uso de vehículos antiguos.

Muchos de los contaminantes tienen efectos nocivos para la salud humana, claramente definidos. Por ejemplo, el monóxido de carbono reacciona con la hemoglobina de la sangre y afecta a personas con anemia, creando problemas cardíacos y pulmonares crónicos. Los hidrocarburos reaccionan con el dióxido de nitrógeno y causan problemas respiratorios. El dióxido de azufre puede causar daños graves en personas con bronquitis crónica y otras afectaciones de las vías respiratorias. Sin embargo, el factor más relevante para la salud humana en el tiempo no es la cantidad de contaminantes emitidos, sino su concentración en la atmósfera de la ciudad. Las autoridades ambientales definen grados máximos de concentración para los diversos contaminantes —CO, HC, SO₂, NO_x—, que no deberían ser sobrepasados.

Contrariamente a lo descrito, en trabajos anteriormente realizados por el Centro de Investigación y Desarrollo del Transporte, relacionados con la influencia del transporte y el medio, la economía energética en el transporte y el Inventario Nacional de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero en Fuentes Móviles, se comprobó que a partir de los resultados alcanzados, relacionados con el desgaste de los equipos y su estado técnico, existen valores en las emisiones de gases producidos por los vehículos superiores a los reportados por los fabricantes, y se demostró que existen zonas en la capital del país, como las vías principales urbanas y el túnel de la bahía, donde se han obtenido concentraciones de gases contaminantes en valores superiores a los máximos admisibles [Amarales, 2011].

En La Habana se pone de manifiesto uno de los principales problemas ambientales que afecta a las grandes urbanizaciones: el inadecuado manejo de los residuos sólidos urbanos. Y tomando como unidad base las cuencas hidrográficas, se deben realizar valoraciones a partir de estudios realizados con anterioridad, derivados de lo definido en la estrategia ambiental nacional sobre temas ambientales vinculados al deterioro del saneamiento y las condiciones ambientales en las urbanizaciones citadinas, que inciden sobre la calidad de vida y la salud de la población.

Las cuencas hidrográficas sobre las que se ha desarrollado la estructura urbana y suburbana de la ciudad de La Habana tienen una gran importancia desde el punto de vista ambiental, económico, social, recreativo, cultural, urbanístico y paisajístico. En ellas se encuentran ríos como el Almendares, el más importante en la ciudad, y además estas cuencas abastecen de agua potable a la población y tanto las cuencas como las corrientes fluviales presentan una situación crítica debido a la contaminación de sus aguas por residuales industriales y urbanos, así como por la deforestación y la erosión del suelo [Goicochea, s.a.].

En el caso de la movilidad de la población, las vías principales de la ciudad marcan el patrón de comportamiento de la acumulación de residuos sólidos en las vías y sus áreas aledañas. Esta acumulación tiende a producir tupiciones de alcantarillas y del drenaje de los viales, provocando en ocasiones inundaciones y el traslado de estos Residuos Sólidos Urbanos (RSU) a distancias considerables del lugar donde se generan, haciendo que su recogida se realice con mayor dificultad.

Estos RSU pueden llegar a las redes de las corrientes fluviales que se extienden por toda la ciudad, a sus franjas hidroreguladoras o a zonas que tengan incidencias en esta agua [NC, 1999], aumentando la contaminación y disminución de la calidad del agua, elevando su turbidez e interfiriendo en la penetración de la luz, con la consiguiente alteración de las plantas y organismos acuáticos y con ellos la estabilidad del ecosistema; igualmente, su disposición final en la zona costera propicia el aumento de la acumulación de residuos y la degradación de la calidad ambiental de esta franja de intercambio tierra mar, lo cual juega un rol muy importante en el intercambio natural de estos dos elementos del paisaje natural de nuestras costas.

Otro punto de vista del análisis de la relación entre movilidad y medio ambiente, y posiblemente el más preocupante, es el análisis de la movilidad y el comportamiento de la población en la vía. Desde la perspectiva del espacio urbano ello también resulta fundamental, teniendo en cuenta que la movilidad por sí misma confiere el rasgo distintivo que caracteriza a las ciudades, el dinamismo o constante movimiento en su interior y entorno; gran parte de ese dinamismo lo aportan las personas, ya sea como pasajeros, peatones o conductores de algún medio de transporte [Rey y Cardozo, s.a]. Sin dejar de tener en cuenta las condiciones de los componentes de la vía pública, desde que la persona abandona el lugar donde reside, durante todo el trayecto en el que se mueve y hasta el lugar donde va a realizar sus actividades cotidianas.

Con respecto a los accidentes en la vía a los cuales está expuesta la población durante su desplazamiento cotidiano, ellos representan una de

las causas de mortalidad de mayor incidencia en la población. En los meses de verano se concentra la mayor tasa de accidentalidad en todo el año, y en el horario de la tarde, de 12:00 hasta 6:59 p.m., es cuando se produce mayor cantidad de accidentes de tránsito [Páez, 2006].

Los pasajeros del transporte público antes de abordar los medios de transporte son peatones y pueden encontrarse con obstáculos que podrían afectar su integridad física; en primer lugar las paradas, su ubicación y el estado de su estructura constructiva, iluminación y visión. En las paradas también influyen el tiempo de espera y la cobertura espacial de las rutas que pasan por ellas. Igualmente es necesario tener en cuenta en el interior de los medios públicos de transporte el estado de los pisos, puertas, ventanas, escalones, la limpieza, la contaminación auditiva y visual, el trato del chofer, y el respeto de las leyes del tránsito y de la planificación de las revisiones técnicas de los vehículos. Tanto para los medios públicos como los particulares pueden presentarse barreras físicas y psíquicas, como son las calles en mal estado, indisciplina social, derrumbes junto a los cuales se ha hecho común la aparición de microvertederos con aguas contaminadas estancadas en la vía pública, señalizaciones y vallas por obras o por peligros de derrumbe, envases para residuos sólidos, etcétera. Es necesario señalar las barreras físicas y principalmente psicológicas que pueden representar los parqueos exclusivos y el comportamiento a veces impredecible de los animales de tiro en las zonas por donde se les permite circular.

Para los peatones representan riesgos el cruce de la vía, deficiente o nula señalización en vías y aceras, estas últimas en muy mal estado; no uso de pasos peatonales y no estar atentos al cambio de las luces de los semáforos y señales para peatones. Por lo anteriormente expuesto las personas con discapacidad física y de la tercera edad son los más vulnerables.

Otras barreras físicas y psicológicas son el cruce por sendas oscuras, sucias, el grado de delincuencia, obstáculos que pueden provocar obstrucción de la visión, puestos ambulantes, vallas, toldos, vías en mal estado, roturas de calles por reparaciones, roturas por colapsar fosas sépticas, drenajes de inmuebles abandonados y alcantarillados que irremediablemente van a parar a las vías obstruyendo el paso de peatones u obligándolos a caminar por la vía hasta llegar a la acera, etcétera.

Teniendo en cuenta lo anterior es necesario que las autoridades competentes tomen decisiones con respecto a las infraestructuras viales y a quién compete el mantenimiento y reparación de vías, señalizaciones, iluminación, aceras, paradas y sus accesos, poda de árboles que obstruyen la visibilidad, liberar vías y aceras de obstáculos como son los

constructivos; ponerle límite de construcción o reparación de inmuebles y vías; microvertederos por escombros, recipientes de RSU sin recogida; fosas sépticas y red de drenajes colapsados y salideros en la red de alcantarillado (muy diseminados por toda la ciudad), que además de ser obstáculos muy peligrosos se convierten en focos para la proliferación de vectores y enfermedades muy dañinos a la salud humana, y del entorno en general, además del impacto visual negativo y los malos olores que tanto afectan a la ciudad.

Desde 2012 sesiona el Grupo de Trabajo para el reordenamiento del transporte de pasajeros de La Habana, cuyo propósito es dar respuesta al problema de la demanda del transporte público de pasajeros que no se satisface, y al de los servicios que se brindan con baja calidad y organización.

Este Grupo caracteriza el sistema de transporte público como un sistema abierto, complejo y dinámico, y establece un marco regulatorio y el contexto urbano donde aparecen las autoridades del transporte que dictan las normas; aparecen también la movilidad y disciplina social, al igual que las infraestructuras del transporte con sus vías, paradas, estaciones y los servicios de transportación. Dentro de los escenarios probables se incluyen entre otros el envejecimiento de la población y la movilidad impredecible.

El estudio revela que si no se logra revertir el deterioro del transporte público se cae en el círculo vicioso del transporte público, donde habrá una disminución en su uso, más autos ligeros, más tráfico y menos parqueos; ómnibus más lentos que contaminarán más, todo lo cual conllevará al desplazamiento de empleos y viviendas hacia la periferia, deterioro de vías y estacionamientos con la consiguiente necesidad de más inversiones para su remodelación, y así se cierra ese círculo.

Esto demuestra la afectación general que todo ello traería para la población y conlleva a variaciones de la movilidad, influidas además por el envejecimiento de la población, la migración interna y la reubicación laboral producto del redimensionamiento. Lo cual, unido a la utilización de vías urbanas inadecuadas, intensifica el deterioro de la calidad de vida de la población en general.

La hipótesis que se defiende con este estudio es el diseño de un nuevo esquema de gestión integral del servicio de transporte público de la capital, el cual contribuirá al incremento de los niveles de transportación de la población.

La población de la capital necesita con urgencia que las autoridades competentes hagan posible resultados que mejoren la calidad de los servicios de transportación que aquella necesita.

A su vez, los medios de transporte automotor, que son los más utilizados en la ciudad, deben cumplir con las condiciones técnicas y legales requeridas para circular por las vías y cumplir con las leyes del tránsito. Además, evitar al máximo la contaminación del aire con ruidos y gases dañinos a la salud.

En opinión de las autoras, las consideraciones expuestas deberían actuar como propuestas de las acciones a seguir, en tanto las entidades que dictan las políticas y estrategias ambientales se ocupen de su aplicación y generalización. De esta forma podremos aportar medidas y soluciones como apoyos para que dentro de la movilidad las alternativas de transporte sean suficientemente atractivas para la población y mantengan un mayor respeto hacia el medio ambiente, en cuanto al consumo de energía y control de las emisiones de los medios de transporte. Además de lo expuesto, es posible lograr una movilidad creciente y adecuada, como un aporte más al desarrollo en general.

Por lo tanto, teniendo en cuenta que los SIG son programas especializados de las geociencias, los cuales son utilizados como plataforma informática para ejecutar aplicaciones que pueden ser proyectos de investigación que manejan bases de datos georreferenciados con información sobre determinado sector de la superficie terrestre, y contando con la información necesaria, es posible establecer las zonas urbanas de conflicto ambiental (ZUCA) [Ulloa, 2003], relacionadas con el transporte y/o zonas de conflicto ambiental originadas por el transporte.

Los problemas ambientales de la ciudad, incrementados entre otros aspectos por su tasa de crecimiento, son elementos de primer orden para el sostenimiento de las condiciones de calidad de vida de la población.

Estos problemas tienen un carácter reiterativo en los mismos lugares del geoespacio urbano, sin que esto signifique que no puedan aparecer, de forma aislada, en cualquier lugar; es posible suponer que las causas son de índole espacial y por tanto se puede delimitar este entorno como una Zona Urbana en Conflicto Ambiental producida por el transporte (ZUCAT).

Conclusiones

- Que la movilidad de la población actúe como un proceso de cambio continuo en la búsqueda de mejoras ambientales que satisfagan a la sociedad y su calidad de vida y que a su vez no entren en contradicción con estas, o sea, lograr una movilidad adecuada.
- El conocimiento de las pautas de la movilidad cotidiana de la población resulta fundamental para llevar a cabo actuaciones eficaces en la planificación del transporte en áreas urbanas.

- De forma significativa existe una relación marcada entre movilidad, cantidad de pasajeros transportados y demanda del transporte; esta relación hace que se entienda en mayor medida la complejidad de la situación de estas actividades en la capital, situación que exige una coordinación e integración extremas, para evitar o aminorar daños ambientales.

Recomendaciones

- Se propone a los decisores de las autoridades transportistas y ambientales analizar el presente documento para la toma de decisiones de ordenamiento del transporte en la capital, dada la connotación que tiene la movilidad de la población en el área metropolitana.
- Elaborar documentos metodológicos que permitan realizar estudios concretos sobre esta temática de la movilidad y el medio ambiente por cada uno de los puntos analizados en este trabajo, prestándole especial atención al financiamiento, reparación y limpieza de vías, aceras, paradas y accesos de uso público; estudios sobre ruidos de tránsito en las vías principales, dirigidos a los sonidos vinculados a fuentes del tránsito terrestre (NC 22:1999. Atmósfera. Ruido en zonas habitables).
- Que estas consideraciones sirvan de apoyo a la gestión ambiental en la capital.

Referencias

- ALCÁNTARA, EDUARDO. «Análisis de la movilidad urbana, espacio, medio ambiente y equidad». Disponible en:
www.omu.caf.com/media/14683/análisis-movilidad-urbana.pdf. s/a.
- AMARALES CONTRERAS, M. (2011). «El transporte y la contaminación atmosférica que este provoca», en *Transporte, Desarrollo y Medio Ambiente*, 31 (40-45): 2011.
- GARCÍA, JUAN CARLOS. «Movilidad cotidiana y género en la comunidad de Madrid». Disponible en:
www.dialnet.unirioja.es/servlet/extau?codigo211197. s/a.
- GOICOCHEA, O. «Sistema de gestión integral de residuos sólidos urbanos para la cuenca Almendares-Vento». Disponible en:
<http://www.academia.edu/.../Convención>. s/a.
- Informe del grupo de trabajo temporal para el ordenamiento del transporte de pasajeros de La Habana*. La Habana: Mitrans, 2012.
- MILANÉS, G. R. (2013). «Modelación de la dispersión de monóxido de carbono en la vía convergente de las rutas del depósito Alamar», en *Memorias de XV Convención Internacional Informática Habana, VIII*

Congreso Internacional Geomática, 2013. GEO026. ISBN. 978-959-7213-02-4.

NC-23:1999. (1999). *Franjas forestales de las zonas de protección a embalses y cauces fluviales*. ICS: 13.020; 65.020.40.

PÁEZ, D. (2006). «Estudio de los accidentes del tránsito en Ciudad de La Habana en el año 2006». Disponible en: www.biblioteca.universia.net/.../estudio-accidentes-tránsito.

REY, C. Y O. CARDOZO. «La vulnerabilidad en la movilidad urbana. Apuntes teóricos metodológicos». Disponible en: www.hum.unne.edu.ar/publicaciones/instGeo/.../vulnerabilidades/.../cap11.

ROMERO OCHOA, N. Y D. ULLOA LÓPEZ (2011). «Observaciones relacionadas con la utilización de los SIG para la gestión ambiental en el sistema del transporte», en *Memorias de XIV Convención de Informática. VII Congreso Internacional de Geomática*. 2011. GEO070, ISBN: 978-959-7213-01-7.

Ulloa López, D. (2003). *Zonas urbanas de conflicto ambiental (ZUCA)*. La Habana: INSTEC. Contribución a la Educación y la Protección Ambiental, 2003. ISBN 959-7136-20-1.

Techos verdes, ¿una estrategia sostenible en Cuba?

Green roofs, a sustainable strategy in Cuba?

*Por M.Sc. Arq. Matilde Eli Rodríguez**

** Facultad de Arquitectura, Instituto Superior Politécnico*

José Antonio Echeverría (ISPJAE),

La Habana, Cuba.

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

Resumen

Un proyecto de arquitectura debe responder a la solución de una multitud de limitaciones, donde el propósito sea crear un entorno favorable para el desarrollo de la actividad humana. La calidad de vida, la fuerza de la memoria, la importancia de los intercambios interpersonales, la lectura del medio ambiente, son aspectos determinantes, y como tales condicionarán el buen diseño. El modo de vida urbano precisa, cada vez más, de espacios de expansión, zonas de relación y «micro pulmones» que favorezcan una renovación del aire. Sin embargo, tradicionalmente esos espacios se han diseñado como parques y jardines, zonas de paseo y áreas decorativas a pie de calle, los que a su vez son cada vez más escasos y costosos. Por ello, la utilización de cubiertas y fachadas para la construcción de jardines es una opción cada vez más extendida. El presente trabajo se refiere a este tema, y a la necesidad de promover su utilización en Cuba, dadas sus condicionales climáticas, como medio de crear pulmones verdes, e inclusive fomentar una cultura creativa en una ciudad compacta. El tema se hace muy atractivo sin son insertadas soluciones de impermeabilización que conlleven respuestas eficaces, eficientes y duraderas, y por ende que disminuyan los impactos medioambientales ocasionados por el empleo de tecnologías no adecuadas. La incidencia que ello puede tener en las propuestas de diseño, tanto a nivel arquitectónico como urbano, añadiría un nuevo valor agregado que no puede soslayarse. Sin duda, ello contribuye al logro de ciudades más funcionales y estéticamente más hermosas.

Palabras clave: Impermeabilización, confort ambiental, sostenibilidad

Abstract

An architecture project must respond to the solution of a multitude of limitations, where the purpose is to create a favorable environment for the development of human activity. The quality of life, the strength of memory, the importance of interpersonal exchanges, the reading of the environment, are determining aspects, and as such will condition good design. The urban way of life requires, more and more, enlargement of spaces, zones of

relationship and "micro lungs" that favor air renovation. However, traditionally these spaces have been designed as parks and gardens, walking areas and decorative areas on the street, which in turn are increasingly scarce and expensive. Therefore, the use of roofs and facades for the construction of gardens is an increasingly widespread opportunity. The current paper refers to this topic, and the need to promote its use in Cuba, given its climatic conditionals, as a means of creating green lungs, and even promote a creative culture in a compact city. The subject becomes very attractive if waterproofing solutions are inserted that entail effective, efficient and lasting responses, and therefore reduce the environmental impacts caused by the inappropriate use of technologies. The impact that this may have on the design proposals, from both architecture and urban points of view, would give an added value that can't be ignored. Undoubtedly, this contributes to achieving more functional and aesthetically more beautiful cities.

Keywords: Waterproofing, environmental comfort, sustainability

Introducción

Las ciudades deben ser lugares donde la vida sea satisfactoria para sus habitantes. Para ello es necesario lograr que establezcan un serio compromiso con el entorno, desarrollen soluciones tecnológicas avanzadas, y que sobre todo apuesten por la sostenibilidad en todas sus vertientes. El acelerado crecimiento urbano moderno ha afectado muchos de los procesos naturales del planeta. En las ciudades, la mayoría de la superficie está cubierta por asfalto y cemento, y esto altera los ciclos del agua y del aire, entre otras afectaciones. Para restablecer el balance en los ecosistemas urbanos, las ciudades deben encontrar formas de generar espacios verdes en un mundo cada vez más gris. Los espacios verdes —áreas abiertas cubiertas con vegetación— benefician a la ciudad y sus habitantes, ya que controlan la temperatura, absorben agua de lluvia, desaceleran el escurrimiento, fomentan la biodiversidad y mejoran la salud humana.

Objetivos

General

- Mostrar las bondades que tiene el empleo de las cubiertas verdes para Cuba, a partir de la reducción de los impactos medioambientales, su importancia dentro del diseño y de las políticas actuales de ahorro energético, así como la mejora de la calidad de vida que ello genera.

Específicos

- Establecer los principios generales a tener en cuenta en el proyecto, puesta en obra y mantenimiento de esta variante de diseño.
- Proponer algunas de las soluciones técnicas más convenientes para su aplicación.

Antecedentes

La cubierta jardín reproduce soluciones que, desde la más remota época histórica, ya fueron experimentadas. Ejemplos de estas soluciones son los patios y huertos del año 2 600 a.n.e. en Egipto y Persia, que se integraban a las viviendas para el cultivo, los Jardines Colgantes de Babilonia del siglo VII a.n.e., con una superficie de 1 600 m², el Palacio de Bahi-Thakt en Schiras, India, y de 1467 el Palacio Venezi en Roma. El *hortus* de la casa romana, si bien se desarrollaba en planta, creaba un microclima adecuado en la vivienda, a la par que servía para recoger las aguas en el *impluvium*. Para hablar de cubierta jardín debe partirse del concepto de «arquitectura integrada», referido a la integración arquitectónica al medio ambiente. Elementos como el mantenimiento del nivel térmico, la impermeabilización, el aislamiento y el ahorro energético, definen este concepto. La novedad reside en contemplar una naturación integral, que mejora lo existente e incorpora un espacio hasta ahora inaprovechado, al que Le Corbusier, en 1930, denominó como la quinta fachada.

Ya en 1950, el artista plástico y ecologista austriaco Hundertwasser (conocido como el «médico de la arquitectura»), realizó algunas obras emblemáticas que hacen de la cubierta vegetal una característica común de muchas construcciones en Alemania, Francia, Austria, Noruega y Suiza, entre otras (Figs. 1 y 2).



Fig. 1. Kindergarten, Frankfurt am Main.



Fig. 2. Casa Hundertwasser, Viena.

En los países del «primer mundo», la existencia de una amplia cultura sobre «lo verde» se ha convertido en práctica sistemática (Figs. 3 y 4). Es importante señalar que esos Estados, como política, incentivan su desarrollo mediante otorgamientos de subsidios para esas instalaciones.



Fig. 3. Jardín intensivo Manhattan, Nueva York.

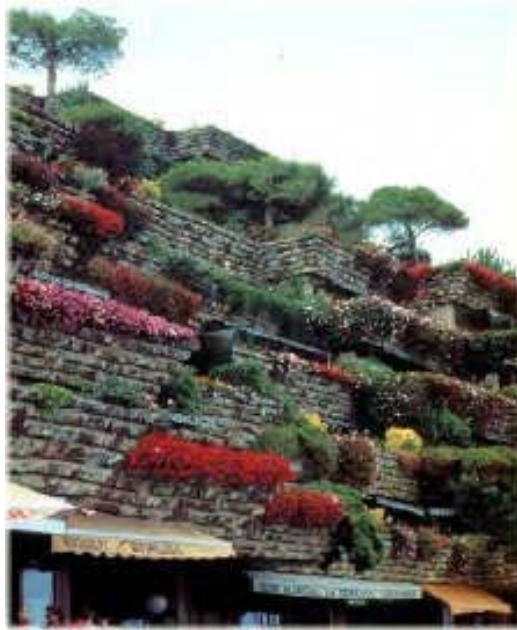


Fig. 4. Ecolonia, Holanda.

En el continente americano México marcha a la cabeza, lo que denota la importancia de su política en este aspecto. El gran basurero Neza-I, hoy convertido en la Ciudad Jardín Bicentenario, e Infonavit, así lo demuestran (Figs. 5 y 6).



*Fig. 5. Ciudad Jardín Bicentenario,
Ciudad Nezahualcóyotl, México.*



Fig. 6. Infonavit, México.

Sin embargo, aún es insuficiente. Aunque los costos de construcción se incrementan con estas soluciones, las acciones de intervención en términos ecológicos aumentan de forma eficaz la calidad de vida. Los estudios disponibles hasta el momento indican que, al menos uno de cada cinco techos debiera ser verde, para llevar los niveles de polución a parámetros deseables.

Los nuevos materiales y tecnologías producidos a partir del desarrollo de la industria química, en ocasiones pueden generar serios efectos contaminantes, por lo que la arquitectura ecológica puede ser la respuesta a estos problemas. No obstante, en Cuba no existe suficiente cultura al respecto.

En 1955 el arquitecto Aquiles Capablanca incursiona en este campo con el edificio para el Tribunal de Cuentas, hoy Ministerio del Interior. Un año más tarde, los arquitectos Gómez Sampera, Martín Domínguez y el ingeniero Bartolomé Bastard lo introducen en el Complejo Habitacional FOCSA (Figs. 7 y 8). Aquí el uso de zonas ajardinadas ofreció al conjunto un mayor valor estético. No obstante, su alto grado de deterioro, dada la falta total de mantenimiento durante años, hizo necesario acometer acciones constructivas que restituyeran su antiguo esplendor.



Fig. 7. Tribunal de Cuentas.



Fig. 8. Edificio FOCSA.

Tomando como base el proyecto original se concibió la nueva solución, teniendo en cuenta un novedoso sistema de impermeabilización que asegurase la estética, la funcionalidad y la imprescindible estanquidad (Figs. 9 y 10).

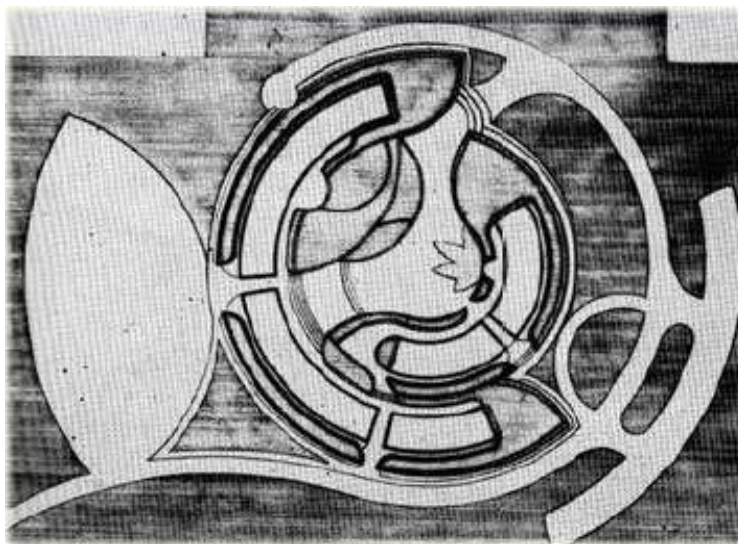


Fig. 9. Planta Jardín (+8,75 m).



Fig. 10. Detalle de la solución.

En la década de los 60, en el proyecto de oficinas de la Empresa Mecánica Agrícola, en El Calvario, del arquitecto Fernando Salinas, se trata de introducir este concepto, a partir de acercar la cubierta al suelo, recubriéndola totalmente por la vegetación, lo que también refuerza su capacidad aislante (Fig. 11).



*Fig. 11. Escuela de Mecanización Agrícola
en El Calvario, La Habana, 1962.*

Es lamentable que por aspectos técnico-constructivos y la falta de experiencia de los ejecutores, no pudiera ser construida. Igualmente, tampoco fructificaron otras propuestas, como las cubiertas de algunos Círculos Infantiles en la Habana del Este durante 1959-60.

En 2002 se desarrolló en el ISPJAE una investigación encaminada a estudiar el comportamiento de este tipo de cubiertas en las condiciones de Cuba, a partir de un proyecto conjunto de las Facultades de Ingeniería Civil e Industrial, y la Universidad Humboldt de Berlín. El trabajo concluyó con la ejecución de un prototipo experimental, que fue víctima de la no sistematicidad en su seguimiento y monitoreo. En la actualidad comienzan a retomarse algunos conceptos, pero aún resultan insuficientes.

Principios generales y criterios. Requerimientos técnicos

Las limitaciones de la industria nacional en cuanto a la producción de materiales de impermeabilización, su alto costo, el tratamiento de los drenajes y las solicitudes, hacen más complejas las soluciones, por lo que es imprescindible contar con una información detallada sobre la cubierta, la que tendrá en cuenta:

- El tratamiento riguroso de los llamados puntos singulares.
- La selección del sistema de impermeabilización a emplear.
- La precisa y clara ubicación de las líneas de riego y de otras instalaciones.
- La definición de la ubicación de las circulaciones peatonales.
- El análisis de las prestaciones que se le infringirán a la cubierta.
- La selección de las especies a emplear.

Este tipo de cubierta requiere de una impermeabilización de alta calidad, un drenaje adecuado para la evacuación de las aguas y evitarse a toda costa que las plantas (fundamentalmente las raíces) puedan dañar la impermeabilización. No es recomendable la plantación de árboles de gran porte, ya que pueden originar altas presiones sobre la cubierta. Por tanto, la plantación de arbustivas, coberturas y césped es lo más recomendable para la problemática cubana.

Soluciones técnicas a emplear

En su definición más básica, una cubierta verde es un sistema de ingeniería que permite el crecimiento de vegetación en la parte superior de los edificios (ya sea en techos o azoteas), manteniendo protegida su estructura.

Las cubiertas verdes se dividen básicamente en dos categorías: extensivas e intensivas. Las primeras son livianas, de bajo mantenimiento y generalmente inaccesibles. A menudo se plantan en ellas especies con poco requerimiento de humedad, necesitan solamente de 5 a 15 cm de sustrato y suelen subsistir con agua de lluvia.

Las cubiertas verdes intensivas, en cambio, son accesibles y tienen sustratos espesos que alojan una diversidad de plantas, desde comestibles y arbustos, hasta árboles. Estas cubiertas suelen precisar una estructura de soporte reforzada y requieren mucho más mantenimiento e irrigación.

Los materiales a utilizar pueden ser diversos, pero todos los techos verdes tienen los mismos componentes básicos. Para su funcionamiento adecuado deben tener membrana impermeable, barrera anti-raíces, capa de drenaje y de retención de agua, sustrato de crecimiento y vegetación. Una cubierta

verde bien establecida es más efectiva en retener agua, enfriar el aire y lograr el aislamiento térmico del edificio. La estructura sobre la que se soporta puede ser nueva o existente, y estar diseñada y acondicionada para soportar las cargas, el uso y su mantenimiento (Figs. 12 y 13).



Fig. 12. Detalle jardín de la cubierta del FOCSA. Solución técnica a partir del uso de láminas asfálticas.

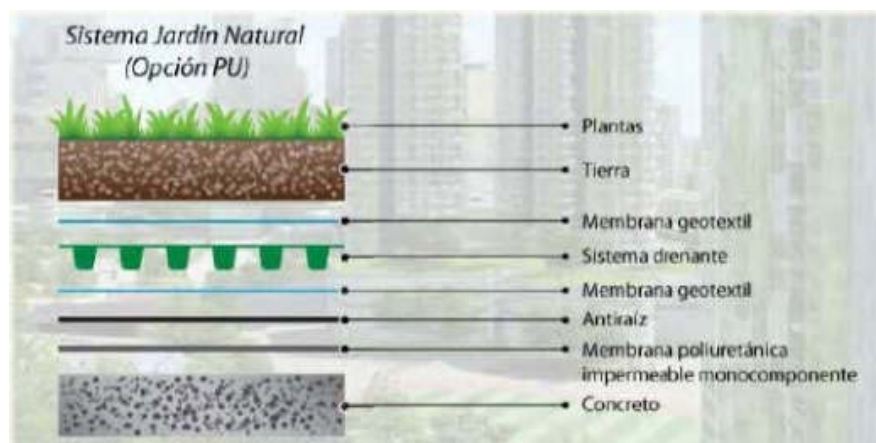


Fig. 13. Solución técnica a partir del uso del poliuretano.

En Cuba, la tierra vegetal u otros posibles componentes como la zeolita realizan función aislante. A los efectos de la puesta en obra, deberán tenerse en cuenta valores de pendiente entre 1 y 5%, y una vez ejecutadas, la superficie resultante deberá ser uniforme, estar limpia y carecer de cuerpos extraños.

La cubierta debe contar con un pretil perimetral que garantice la integridad de sus elementos componentes. Los puntos singulares serán ejecutados rigurosamente, teniéndose especial cuidado en la ejecución de los drenajes y las juntas. La impermeabilización deberá ejecutarse considerando el orden que se muestra en el esquema general.

En las condiciones climáticas de Cuba, independientemente del tipo de enjardinado que tengan, requerirán de un mantenimiento periódico. Es por ello que en todos los casos se deberán prever zonas de acceso para realizar estos trabajos.

Barreras a la adopción de cubiertas verdes

A pesar de presentar claros beneficios para el medio ambiente, la salud y la calidad de vida, la aplicación de cubiertas verdes puede verse complicada por factores técnicos, políticos y económicos. A continuación se describen algunas de las barreras e inconvenientes a resolver para lograr la adopción generalizada de cubiertas verdes en la ciudad.

Conceptuales

- Falta de una clara definición de cubiertas verdes en la conciencia colectiva.
- Resistencia al cambio y a la incorporación de conceptos nuevos.

Vinculadas a las políticas

- Ausencia de criterios y principios de sustentabilidad en los marcos regulatorios vigentes para la construcción.
- Limitaciones en los marcos de política ambiental y sus alcances, en especial en la construcción.
- Falta de normas y políticas vinculadas al tema.

Organizacionales y técnicas

- Complejidad del propósito debido a las tradiciones constructivas y a la impermeabilización de las cubiertas.
- Tratamiento diferenciado para edificaciones existentes y nuevas, lo que requiere abordajes diferentes y complejizan las propuestas de políticas e instrumentos de fomento.
- Dificultad al asignar funciones para el mantenimiento de los nuevos espacios, al ser espacios comunes.
- Falta de acceso a la tecnología y a proveedores con respuestas a las diferentes realidades.
- Ausencia de mano de obra calificada, no solo por el grado de especialización y conocimientos, sino en cuanto a la falta de «competencia», lo que implica la necesidad de desarrollar habilidades para aprender y adaptarse al cambio (proveedores de servicios y tecnologías).

Financieras

- Alto costo para la inversión inicial en la construcción.

Económicas

- Percepción de alto costo de inversión por necesidad de acondicionar las cubiertas (impermeabilización y carga portante), previa implementación de las cubiertas verdes.
- Importantes costos de mantenimiento.
- Falta de antecedentes para el cálculo apropiado de los verdaderos costos de las cubiertas verdes en edificios existentes, debido principalmente a los hábitos constructivos.

A pesar de estas limitaciones, indiscutiblemente los aportes que la utilización de los techos verdes resarcan con creces los costos que pudieran ser, en primera instancia por las inversiones a realizar.

Sin embargo, el salto de la construcción individual a la creación de una infraestructura urbana sustentable no puede hacerse sin la creación de

legislación e instrumentos de promoción que apoyen dicha construcción. Hacen falta proyectos demostrativos, incentivos y normas que promuevan la instalación de cubiertas verdes, y que a su vez compensen los costos y estimulen el mercado. Ciudades de países desarrollados y un grupo importante del continente americano, han demostrado que se puede incentivar la construcción de techos verdes a través de la legislación y la financiación institucional.

Como resultado del análisis realizado, no hay duda de los aportes de la utilización de los techos verdes, los que se traducen en:

1. Calidad del aire. Proporciona ventajas en cuanto a la retención del polvo y otras sustancias contaminantes. Las plantas durante el proceso de fotosíntesis captan el dióxido de carbono del aire (CO_2), emitiendo oxígeno (O_2). La disminución de este proceso, producto del aumento de las emisiones de CO_2 y la reducción dramática de las áreas verdes, conduce al cambio climático y a su corolario, el calentamiento global. Cuba no constituye una excepción ante esta tendencia.
2. Reposición verde. Se aumenta la superficie verde de la ciudad y desde el punto de vista estético también incide en la calidad del diseño.
3. Protección solar y aislamiento térmico. La vegetación ofrece una gran protección contra la radiación solar, reduciendo el calentamiento de la cubierta y minimizando los flujos energéticos entre el interior y el exterior, contribuyendo al confort adecuado [De la Peña y Díaz, s.a].
Esta combinación, sustrato y vegetación, contribuye al ahorro energético, tan necesario para el país. Una cubierta convencional en Cuba puede alcanzar valores sobre los 50 °C según mediciones realizadas, contribuyendo al efecto isla de calor. Evitar el impacto directo de los rayos solares hace que aumente la inercia térmica, disminuyendo el consumo energético, a la par que aumenta el confort climático de forma natural. Aumentar las superficies verdes genera un micro clima urbano que conlleva al aumento de la humedad natural, y a la reducción del diferencial de temperatura.
4. Aislamiento acústico. La cubierta ajardinada actúa como un buen absorbente acústico, reduciendo el ruido ambiente entre 30 y 40 decibeles.
5. Protección de la lámina o del sistema de impermeabilización empleado. La cubierta ajardinada protege al sistema de los cambios bruscos de temperatura y de los esfuerzos mecánicos. En el caso cubano, se añade la fuerte incidencia de los aerosoles marinos y su alto grado de agresividad. Las diversas técnicas utilizadas en el

acondicionamiento de los techos verdes garantizan una perfecta impermeabilización y disminuyen los gastos en mantenimiento.

6. Gestión del agua. Retiene parte del agua que llega a la cubierta, pues disminuye el flujo de agua superficial sobre esta y el caudal de agua que soportan las canalizaciones urbanas. Se reducen los costos de depuración de aguas residuales y se minimizan los riesgos de inundación, devolviendo el agua de lluvia al ciclo natural.
7. Refrigeración pasiva. Durante el verano, la evaporación del agua puede producir grandes efectos refrigerantes dentro de las ciudades, en cuyo proceso la vegetación juega un papel protagónico. Adicionalmente, aportan otras ventajas no desdeñables: diversos aromas en contraposición a los efectos producidos por determinados materiales expuestos al sol, efectos estéticos y psicológicos derivados de la belleza natural que se deriva, etc. (Figs. 14 y 15).



Figs. 14 y 15. Terrazas ajardinadas.

La utilización de materiales aligerados sería muy conveniente, pues el aporte de cargas a la estructura es considerable. La eficiencia de los drenajes es determinante. Si bien es cierto que se produce una disminución del flujo de agua superficial sobre la cubierta, su incorrecto diseño o ejecución trae consigo serios problemas de humedad, muy difíciles de resolver.

Desde el punto de vista económico es más costosa, pues los materiales que en sentido general componen el sistema lo son. No obstante, si se analizan los efectos de su empleo, esos costos se amortizan con creces.

Por tanto, «la futura arquitectura cubana deberá necesariamente ser bioclimática para que pueda también ser sustentable, y para ello deberá retomar la esencia de la mejor arquitectura cubana de todos los tiempos, que está, más allá de sus manifestaciones formales temporales, en la transparencia espacial interior-exterior, mediatizada por tramas de luz y sombra, permeables al paso del aire y la luz, y protegidas del sol y la lluvia, donde la vegetación desempeña un rol protagónico. Las futuras generaciones merecen un legado de igual o superior calidad que el heredado de las precedentes.

Eso es también un principio esencial del desarrollo sustentabilidad» [González, 2004].

Las cubiertas verdes representan una nueva tendencia en el planeamiento urbano, integrando los procesos naturales a las estructuras construidas por el hombre; tecnología que trabaja junto a la naturaleza en vez de reemplazarla. La progresiva construcción de una red de cubiertas verdes en Cuba, representa un paso hacia una ciudad más saludable y sustentable.

Conclusiones

- Los techos verdes son una respuesta a problemas actuales, en los que el aprovechamiento de los recursos naturales no siempre es tenido en cuenta. Se propone la reutilización y aprovechamiento de estos recursos, mediante el almacenaje de agua de lluvia y su utilización diversa, la optimización del uso de energía y la lucha contra la contaminación, temas a los que arquitectos y urbanistas prestan cada vez más atención.
- La incapacidad del entorno natural para seguir acumulando residuos, absorber los restos de las concentraciones urbanas y regenerarse satisfactoriamente, para la continuación de un ciclo vital lógico, indica lo valioso de esta respuesta.
- Su inserción, conjugando armónicamente sus ventajas y factores adversos, es una alternativa en plena correspondencia con el medio

ambiente, y propone soluciones estéticas superiores a las tradicionales, enriqueciendo la propuesta arquitectónica e influyendo determinantemente en el entorno.

- Constituye una aportación incuestionable a la sostenibilidad y a la calidad de vida en general, lo que hace que su sobre coste en la construcción sea rápidamente amortizable.

A pesar de las condiciones económicas y de las limitantes existentes, Cuba puede avanzar en ese sentido. Por tanto, la profundización en su estudio y posibilidad de generalización, así como la concepción de una política coherente a nivel institucional, constituyen uno de los retos actuales.

Bibliografía

COLECTIVO DE AUTORES. *Climatología, iluminación y acústica*. La Habana: Editorial ISPJAE, 1986.

ELI RODRÍGUEZ, MATILDE. «La Cubierta Jardín: naturaleza a ras de cielo», en *Cimientos*, 3(4): 2002.

GONZÁLEZ COURET, DANIA. «La arquitectura bioclimática en Cuba», en *Energía y tú*, 25, ene.-mar., 2004.

PEÑA, ANA MARÍA DE LA Y GISELA DÍAZ. *Arquitectura y Medio Ambiente*. EFE Consultores, ISBN 978-959-261-330-0. s.a.

PÉREZ GONZÁLEZ, LUIS GUILLERMO (2011). «Cubiertas verdes en Cuba. Evaluación de prototipo experimental», en *Revista Estudiantil Nacional de Ingeniería y Arquitectura*. La Habana: 2011.

Análisis de la marcha interanual de la rapidez del viento en superficie en tres estaciones meteorológicas involucradas en el desarrollo eólico en Cuba

Analysis of the inter-yearly march of surface wind speed in three meteorological stations involved in wind development in Cuba

Por Dra. Lourdes Álvarez Escudero
y Lic. Israel Borrajero Montejo**

*Centro de Física de la Atmósfera,
Instituto de Meteorología, La Habana, Cuba.*

e-mail: lourdes.alvarez@insmet.cu, israel.borrajero@insmet.cu

Resumen

A partir de los estudios realizados para la confección del Mapa Eólico de Cuba, se han identificado zonas del país donde la ocurrencia de los vientos puede ser aprovechable desde el punto de vista energético, y una de ellas es la costa norte de las provincias de La Habana, Artemisa y Matanzas. Estos estudios se realizan a partir de la velocidad media de los vientos; sin embargo, para series largas de datos la frecuencia del número de casos de vientos aprovechables puede tender a la disminución. Este trabajo tiene como objetivo analizar la marcha interanual de las series de porcentaje de ocurrencia de observaciones de velocidad del viento, clasificadas dentro de los rangos: calmas, menores que 4 m/s y mayores o iguales que este valor, en tres estaciones de la costa norte de la región occidental de Cuba: Bahía Honda, Casablanca y Varadero. La metodología seguida es la recomendada por la Organización Meteorológica Mundial (OMM) para los cálculos de tendencia, con algunas adiciones y ajustes de armónicos allí donde se necesita una valoración más cuantitativa de dicho comportamiento. En general, los registros de Bahía Honda muestran porcentajes muy elevados de valores menores de 4 m/s, Casablanca muestra un equilibrio entre las observaciones menores y mayores de 4 m/s y calmas de alrededor de 8% del total de observaciones, y Varadero, dada su característica de estación marítima, muestra poca presencia de calmas. Como resultado del análisis se observa un ligero crecimiento de casos de vientos mayores de 4 m/s en la estación de Bahía Honda, un comportamiento muy homogéneo para Casablanca y un crecimiento de casos menores de 4 m/s para Varadero (con una serie corta), a costa de los valores de calmas que tienden a disminuir muy abruptamente, con un punto de cambio alrededor de 2002.

Palabras clave: Análisis de tendencia, calmas, velocidad del viento

Abstract

From the studies carried out for the preparation of the Wind Map of Cuba, several areas of the country have been identified where winds can be usable for electricity generation purposes. One of them is the Northern coast of the provinces of La Habana, Artemisa and Matanzas. These studies are based on the average wind speed. However, for long series of data, the frequency of usable winds for power generation may tend to decrease. The objective of this paper is to analyze the interannual march of the series of percentage of occurrence of observations of wind speed, classified within the ranges: calms, less than 4 m/s and greater or equal than this value, in three stations of the Northern coast of the Western region of Cuba: Bahía Honda, Casablanca and Varadero. We followed the methodology recommended by the World Meteorological Organization (WMO) for trend calculations, with some additions and adjustments of harmonics where a more quantitative assessment of such behavior is needed. In general, the records of Bahía Honda show very high percentages of values lower than 4 m/s, Casablanca shows a balance between the observations smaller and greater than 4 m/s and calms of around 8% of the total of observations, and Varadero, given its maritime station characteristic, it shows little presence of calm. As a result of the analysis there is a slight increase in cases of winds greater than 4 m/s at the Bahía Honda station, a very homogeneous behavior for Casablanca and a case growth of less than 4 m/s for Varadero (with a short series), at the expense of the values of calm that tend to decrease very abruptly, with a point of change around 2002.

Keywords: Trend analysis, calm, wind speed

Introducción

El estudio del viento es un factor fundamental para la ubicación de generadores eólicos. Debido a los cambios en el comportamiento del clima, las fluctuaciones en la velocidad promedio del viento pueden variar más allá de su variabilidad natural, encontrando lugares donde los valores disminuyan hasta cantidades no aprovechables, o que aumenten haciendo más productiva la explotación de la energía eólica [Soltura, et al., 2001]. En los análisis de tendencia son fundamentales la calidad de los datos y su grado de completamiento, con vistas a no introducir sesgos en la información que conduzcan a conclusiones equivocadas [Álvarez, et al., 2001].

Álvarez y colaboradores [2008] realizaron estudios de homogeneidad para las series de viento medio en las estaciones meteorológicas asociadas al Parque Gibara I y a aerogeneradores ubicados en el Municipio Especial Isla de la Juventud, en los que constataron que para las 5 estaciones en estudio

no se observaban decrecimientos significativos de la velocidad media del viento en superficie, y se analizó la importancia que tiene la calidad de esta información para los estudios de marcha interanual.

La ocurrencia de calmas fue también analizada por Álvarez y colaboradores [2000] dada su alta frecuencia en muchas estaciones, fundamentalmente en horas de la noche y la madrugada. Un estudio más abarcador fue el realizado por Álvarez y colaboradores [2011], que analizó la marcha interanual de la rapidez media para 20 estaciones meteorológicas relacionadas con la ubicación de generadores eólicos, encontrando 5 estaciones con velocidad media del viento decreciente, algo altamente significativo.

Las estaciones de Bahía Honda (318), Casablanca (325) y Varadero (328), ubicadas en el litoral norte de las provincias Artemisa, La Habana y Matanzas, están situadas dentro de una zona identificada donde los vientos pueden ser aprovechables desde el punto de vista eólico. El presente trabajo tiene como objetivo analizar la marcha interanual de las series de porcentaje de ocurrencia, de observaciones de rapidez del viento clasificadas dentro de los rangos calmas, menores que 4 m/s y mayores o iguales que este valor, en las tres estaciones anteriormente mencionadas.

Materiales y métodos

Para realizar la investigación se utilizaron las series de datos trihorarios de velocidad del viento en superficie de las estaciones Bahía Honda (318), Casablanca (325) y Varadero (328), extraídos de la Base de Datos del Centro del Clima del Instituto de Meteorología. A los registros se les sometió a varios chequeos con el objetivo de detectar errores de asentamiento.

Para determinar la calidad de la información se siguió la metodología desarrollada por Álvarez y colaboradores [2011], dirigida a analizar el completamiento de las series de registros y el sesgo que la falta de datos podría introducir en su distribución, y basada en la determinación del largo de la serie, la información utilizable, el sesgo mensual y el sesgo horario.

La variable a trabajar será el porcentaje de ocurrencia de observaciones de rapidez del viento, dentro de cada uno de los rangos de valores dados por las calmas y velocidades por encima y por debajo de la velocidad de arranque de los aerogeneradores montados en el país (4 m/s).

Para el análisis de homogeneidad de las series de porcentaje de ocurrencia de la rapidez del viento por rangos para las estaciones en estudio, se utiliza la metodología expuesta a continuación: a) se graficó el comportamiento de las series y se resumió un descriptor de su comportamiento; b) se calculó el

estadígrafo de Wald-Wolfowitz para determinar correlación interna; c) se calculó el estadígrafo de Spearman y el de Mann-Kendall para determinar su tendencia global; d) para ayudar a tomar una conclusión, principalmente si había contradicción entre las dos pruebas anteriores, se realiza la prueba global de Fisher, e) allí donde las series no son homogéneas se realiza un análisis de punto de cambio, siempre que las series directa y retrógrada de Mann solo presenten un corte o cortes muy cercanos, y la prueba de Pettitt presente un punto significativo cercano al valor de la prueba de Mann Kendall. El cálculo de los estadígrafos se realizó según Sneyers [1990]. Los análisis se harán con ayuda del programa WINSTAT, de uso en el Instituto de Meteorología para estos fines (Israel Borrajero, Centro de Física de la Atmósfera, en comunicación personal).

Según el resultado del análisis se concluye el carácter de las series temporales como sigue: serie homogénea («0»), serie decreciente significativa (10% de significación) («-1»), serie decreciente altamente significativa (5% de significación) («-2»), serie creciente significativa (10% de significación) («+1»), serie creciente altamente significativa (5% de significación) («+2»); los datos no eran suficientes o muy contradictorios para arribar a una conclusión (no se asigna valor a la representación).

Análisis de los resultados

En la tabla 1 se muestra un resumen de las características de las series en estudio, así como el calificador general (ICALI) de la calidad de la serie.

Tabla 1. Características generales y de calidad de las series en estudio

Estación	Nombre	Año de comienzo	Año final	Largo de la serie	Cantidad de registros válidos	ICALI
318	Bahía Honda	1977	2008	32	93 918	Excelente
325	Casablanca	1970	2009	39	113 878	Excelente
328	Varadero	1997	2008	12	34 690	Muy bueno

De la tabla 1 se constata que las tres series en estudio presentan buena calidad en cuanto a lo completo de sus registros, y la más afectada es la serie correspondiente a la estación de Varadero que posee una serie corta.

La representación de las marchas interanuales de la frecuencia de ocurrencia de observaciones de rapidez del viento dentro de los tres rangos en estudio, se muestra en la figura 1.

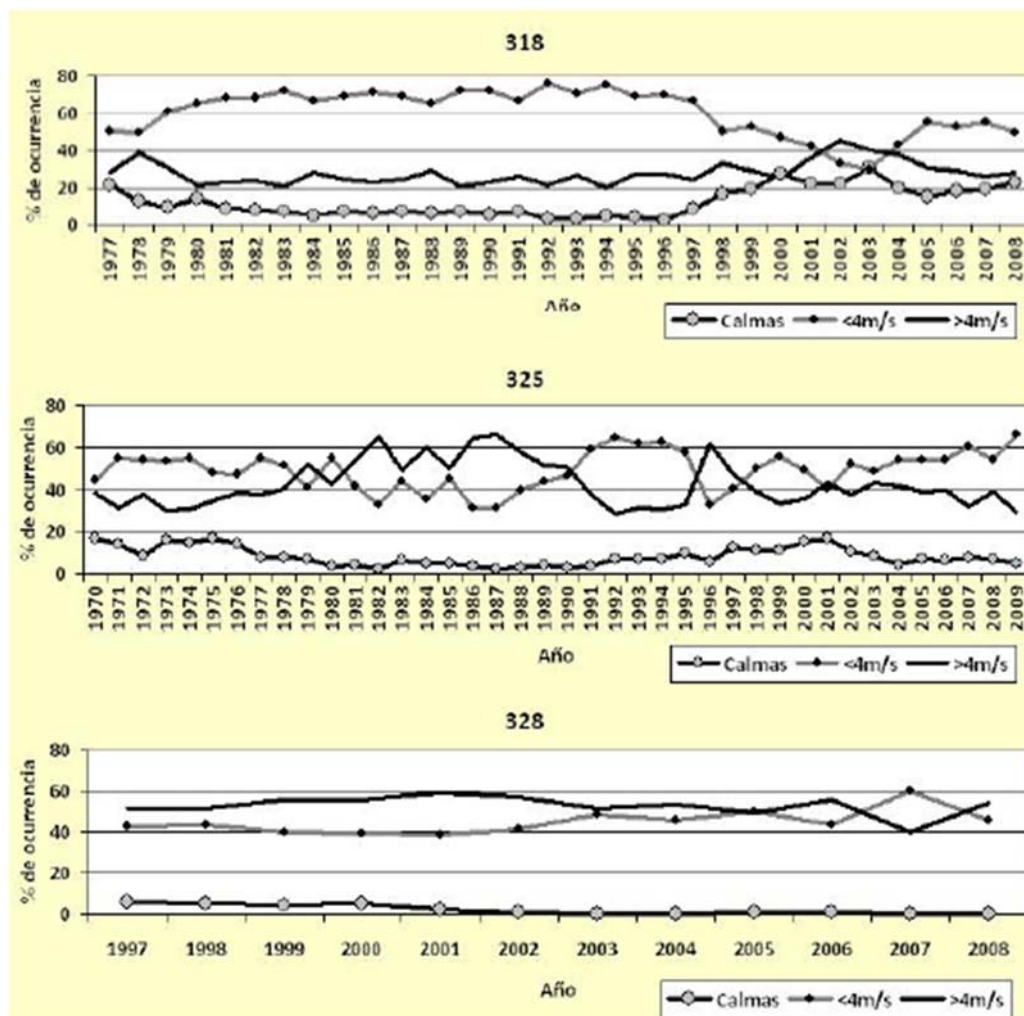


Fig. 1. Marcha interanual del porcentaje de ocurrencia de observaciones de rapidez del viento en superficie por rangos para las tres estaciones en estudio

De la figura 1 se observa que para la estación de Bahía Honda (318) el comportamiento es bastante homogéneo hasta alrededor de 1998, donde se advierte un aumento de vientos mayores o iguales que 4 m/s y en menor cuantía las calmas, a costa de los valores menores de 4 m/s, aunque estos siguen siendo los predominantes. Para la estación Casablanca (325) el predominio de vientos menores y mayores o iguales que 4 m/s se alterna en grupo de años, aunque hacia el final de la serie (a partir de 2002) se observa un decrecimiento marcado de los vientos mayores o iguales que 4 m/s, y las calmas presentan un comportamiento bastante regular de sus

frecuencias anuales. La estación de Varadero (328) muestra una ocurrencia casi nula de calmas a partir de 2002 y un predominio de vientos menores y mayores o iguales que 4 m/s, alternando según el año, aunque se nota un cambio marcado en el comportamiento a partir de 2002; anterior a esa fecha los vientos mayores o iguales de 4 m/s eran siempre predominantes en ocurrencia, y posterior a ella alternan con años en los que la ocurrencia de vientos menores prevalece.

En la tabla 2 se muestra un resumen del comportamiento de los estadígrafos relativos al análisis de homogeneidad, siguiendo el convenio expuesto en el acápite de «Materiales y Métodos».

Tabla 2. Resumen de las pruebas de homogeneidad

Estación	Rango	Descriptor del comportamiento de la serie	WW	Sp	MK	Punto de cambio	Conclusión
318	Calmas	Medio-bajo-alto	2	+2	0		0
	<4m/s	Alto-bajo-medio	2	-2	-1	2000	-2
	>=4m/s	Creciente	2	+2	+2	1998	+2
325	Calmas	Alto-bajo-alto	2	0	0		0
	< 4m/s	Fluctuante	2	0	0		0
	>=4m/s	Bajo-alto-medio	2	0	0		0
328	Calmas	Abrupta pronunciada	2	-2	-2	2002	-2
	<4m/s	Abrupta pronunciada	2	+2	+1	2003	+1
	>=4m/s	Abrupta pronunciada	0	0	0		0

Nota: El encabezamiento «WW» se refiere a la conclusión sobre el resultado de la prueba de Wald-Wolfowitz, «Sp» al de Spearman y «MK» al de Mann-Kendall.

En la tabla 2 se puede observar que la estación Casablanca (325) muestra series homogéneas para los 3 rangos; sin embargo, Bahía Honda (318) presenta una tendencia creciente altamente significativa de la ocurrencia de vientos mayores o iguales que 4 m/s, a costa de una disminución de los

valores menores, comportamiento observado en general después de 2000, y Varadero (328) aunque muestra una disminución altamente significativa de calmas y un aumento significativo de los vientos menores de 4 m/s, fundamentalmente después de 2002, no muestra cambios para el rango de vientos mayores o iguales de 4 m/s. En general, para ninguno de los tres sitios el rango de vientos mayores o iguales de 4 m/s muestra decrecimiento en su ocurrencia.

Si se ajusta una recta a la serie de porcentaje de ocurrencia de vientos mayores o iguales de 4 m/s para la estación de Bahía Honda, que fue la única con tendencia creciente altamente significativa, y se calcula el valor de este porcentaje para 10 años posteriores al final de la serie, para tener una idea aproximada de lo que podría implicar este crecimiento, se obtendría que para 2018, 34% de las observaciones corresponderían al rango especificado.

Conclusiones

Los registros de rapidez del viento de las tres estaciones en estudio tienen calidad suficiente para emprender un estudio de homogeneidad.

En las tres estaciones hay un equilibrio entre los porcentajes de observaciones con rapidez del viento en los rangos de mayores o iguales de 4 m/s, y menores que ese valor.

La estación de Bahía Honda muestra un aumento de casos de rapidez del viento en el rango de mayores o iguales de 4 m/s, y un decrecimiento en los menores, con un punto de cambio cercano al 2000.

Para ninguna de las tres estaciones el rango de porcentaje de ocurrencia de vientos mayores o iguales de 4 m/s muestra decrecimiento en su tendencia.

Las calmas solo decrecen para la estación de Varadero, con punto de cambio cercano a 2002.

Bibliografía

ÁLVAREZ, L Y R. ÁLVAREZ (2000). «El efecto de acumulación y su influencia en el patrón de dispersión de contaminantes», en *Revista Brasileña de Meteorología*, 15(1) (103-112): 2000.

——— (2001). «Climatología del viento en Casablanca y sus aplicaciones I. Climatología», en *Boletín de la Sociedad Cubana de Meteorología*, 7(2): 2001. Disponible en: www.met.inf.cu/sometcub/boletin/v07_n02/espanol/art1.htm.

ÁLVAREZ, L.; I. BORRAJERO Y R. ÁLVAREZ (2008). «Análisis de la calidad de la información y la tendencia de la rapidez del viento en algunas estaciones relacionadas con la ubicación de aerogeneradores eólicos», en *Memorias de la Convención Trópico 2008*, 16-20 de junio de 2008.

ISBN 978-959-282-079-1.

————— (2011). «Estudio de la marcha interanual del viento para estaciones relacionadas con el desarrollo eólico», en *Memorias de la VII Conferencia Internacional de Energía Renovable, Ahorro de Energía y Educación Energética CIER 2011*. La Habana: 1-3 de junio de 2011.

ISBN 978-959-261-350-8.

ÁLVAREZ, L; R. ÁLVAREZ, R. Y A. ROQUE (2000). «Caracterización del efecto de acumulación para el cálculo de la dispersión de contaminantes y sus aplicaciones a lo largo de la Isla de Cuba», *Revista Cubana de Meteorología*, 7(1) (8-13): 2000.

SNEYERS, R. (1990). «On the Statistical Analysis of Series of Observations», en WMO-No. 415, Technical Note No. 143, 192 pp.

SOLTURA, R.; S. MON, G. RODRÍGUEZ, L. AYALA Y R. BÁEZ (2001).

«Actualización de los modelos físicos y estadísticos del Atlas Eólico de Cuba», en *Revista Cubana de Meteorología*, 8(1) (83-95): 2001.

Prospección eólica: herramienta para actividades de la agricultura y ganadería

Wind prospecting: a tool for agriculture and livestock activities

*Por M.Sc. Aramis Fonte Hernández**

** Centro Meteorológico Provincial de Camagüey, Instituto Nacional de Meteorología (INSMET), Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente (CITMA), Cuba.
e-mail: aramis@cmw.insmet.cu*

Resumen

Se seleccionaron áreas específicas de cooperativas agropecuarias en el municipio cabecera de la provincia Camagüey, y se estudió su recurso eólico empleando para ello la información contenida en una base de datos trihoraria que abarcó 15 años consecutivos. El empleo del software de microescala WAsP, con resolución de rejillas de 10 m en la horizontal, permitió modelar el comportamiento de la velocidad media del viento a alturas de 10 y 30 m. Los valores de velocidad del viento en cada lugar posibilitaron seleccionar las zonas de mayor viento, y con la información de las curvas características de bombeo de algunos tipos de máquinas eólicas de las usadas actualmente en el territorio, se lograron establecer sus rangos de valores de bombeo según tres niveles distintos de velocidad predominante (mínima, media, máxima) en las áreas estudiadas en cada cooperativa. La información obtenida permitió mostrar cuáles serían las áreas más convenientes para instalar aerobombas, el caudal que aportarían, y en cuáles convendría estudiar con mayor profundidad la posibilidad de generación eoloelectrónica.

Palabras clave: Prospección eólica, bombeo, velocidad, WAsP, molino

Abstract

Specific areas of agricultural cooperatives were selected in the municipality of Camagüey, and their wind resource was studied using the information contained in a three-hourly database covering 15 consecutive years. The use of WAsP microscale software, with grid horizontal resolution of 10 m, allowed us to model the behavior of the average wind speed at heights of 10 m and 30 m. The values of wind speed in each place made it possible to select the areas of higher wind speed, and with the information of the characteristic curves of pumping of some types of wind machines among those currently used in the territory, we were able to found their ranges of pumping values according to three different levels of prevailing speed (minimum, average, maximum) in the areas studied for each cooperative.

The information obtained allowed to show which would be the most convenient areas to install wind pumps, the flow they would provide, and where would be convenient to evaluate the possibility of wind power generation.

Keywords: Wind prospection, pumping, speed, WAsP, mill.

Introducción

Si bien los estudios para generación de electricidad a partir del recurso eólico en Cuba se inician en los años 80 [Aiello, et al., 1983], no es hasta los 90 cuando empiezan a obtenerse y publicarse resultados más amplios y profundos sobre la caracterización del recurso eólico.

En este sentido destacan los primeros trabajos de evaluación del recurso eólico del país con fines energéticos [Soltura, et al., 1997; Soltura, et al., 2009], a la vez que se profundizan estudios en sitios específicos [Soler, et al., 2013]. Diferentes análisis desarrollados por especialistas [Novo y Díaz, 2003; Novo, 2005] fundamentan las condiciones favorables que presenta el litoral norte de la provincia de Camagüey, recalcando el aporte de brisas locales al del régimen normal de vientos alisios del noreste.

En estudios de prospección eólica realizados posteriormente en áreas de diversas extensiones de los alrededores de las seis estaciones meteorológicas de la provincia de Camagüey [Fonte, 2006], se esclareció que de esos sitios, tan solo en los de Nuevitas, Santa Cruz del Sur y Camagüey se obtienen condiciones apropiadas para la generación eléctrica empleando esta fuente renovable de energía, aunque esto no significa que no sea apropiado considerar otro tipo de aprovechamiento en otros lugares.

La costumbre de realizar estudios sobre el potencial eólico para determinar posibles sitios de instalación de generadores de electricidad, es algo usual cuando se persigue ese fin como objetivo fundamental. Sin embargo, la limitante de no poder contar con todos los recursos para posteriormente materializar la generación (monetarios, logística, estructura, etc.), puede conducir a que ni ejecutivos ni especialistas se interesen por esta prospección para otras aplicaciones más modestas que pueden resultar de ayuda en el desarrollo socioeconómico, tanto de entidades como de productores individuales del sector agropecuario. A tal efecto, el presente trabajo tuvo como objetivos el empleo de las herramientas actuales de evaluación del recurso eólico, y los pormenores del procedimiento para brindar información simple que resulte útil en cuanto al bombeo eólico, tanto a personas expertas en el tema como a las que no lo son.

Materiales y métodos

Para el desarrollo de este estudio se usó la base de datos de vientos de la estación meteorológica 355, ubicada en los alrededores del aeropuerto de Camagüey, o sea, en una zona suburbana.

El período considerado para este trabajo abarca los años 1998-2012 (15 años), e incluye 43 834 registros de datos de viento.

Los horarios contemplados para el cálculo en cada sitio corresponden a los establecidos por el Instituto Nacional de Meteorología (INSMET) para la realización de las observaciones en la red de estaciones de superficie.

Tratando de que el trabajo lograra la introducción de sus resultados sin grandes requerimientos, se estableció una coordinación previa con directivos de la Asociación Nacional de Agricultores Pequeños (ANAP) Provincial, quienes sugirieron realizar el estudio piloto en el municipio cabecera, a fin de viabilizar limitaciones de transporte para las visitas de trabajo y otras coordinaciones. Como consecuencia de esto, fueron seleccionadas 6 cooperativas (tres de Créditos y Servicios dedicadas a cultivos varios, y las tres restantes, de Producción Agropecuaria).

Las áreas fueron definidas a partir de centrar el punto de interés dentro de un círculo con un radio de 2 km, que genera un cuadrado de 4 km de lado. La ubicación del punto central de interés en cada cooperativa fue lograda mediante obtención de sus coordenadas con un GPS modelo Magellan Explorist 600.

Para el procesamiento de los datos y simulación del comportamiento del viento en las áreas seleccionadas, se empleó el software de microescala WAsP Vers. 8.0, así como su herramienta MapEditor para la digitalización de las características del terreno (rugosidad, orografía, uso de la tierra, etc.). La información de los mapas obtenidos de Geocuba se verificó y actualizó de manera complementaria mediante visitas a cada una de las áreas de interés, apreciando directamente en el terreno sus características, además de observar el área completa mediante imágenes satelitales de Google Earth, para complementar cualquier posible cambio no reflejado en la actualización del mapa obtenido de Geocuba (en el caso de la CCS José Martí no fue posible obtener el mapa a escala 1:25000, lo que conllevó a tener que trabajar con otro de escala 1:50000).

Tabla 1. Características de los mapas adaptados y empleados para el estudio en cada uno de los sitios seleccionados

Entidad	Magnitud del área estudiada, km ²	Escala cartográfica empleada en el mapa
CPA Jesús Suárez Gayol	16,0	1:25000
CPA Victoria de Girón	16,0	1:25000
CPA Amistad Cubano-Polaca	16,0	1:25000
CCS Renato Guitart	16,0	1:25000
CCS Antonio Suárez	16,0	1:25000
CCS José Martí	16,0	1:50000

Dado que en diversos lugares se detectó que se están instalando molinos de viento a una altura de 6 m solamente, se decidió hacer una demostración con los datos correspondientes a la CPA Amistad Cubano-Polaca para ejemplificar las diferencias que se obtienen. De igual forma, tan solo de manera demostrativa, los resultados de la CCS Renato Guitart obtenidos directamente del WAsP se llevaron en Word a áreas delimitadas numéricamente en coordenadas planas, para fijar las de mejores condiciones de viento con el criterio de las de más alto valor de velocidad ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$).

De manera complementaria y a los efectos de la generación eléctrica, los cálculos se realizaron no solo a altura de 10 m, sino también de 30 m. Los resultados para esta altura sólo se muestran tabulados en forma de resumen en las tablas A1 y A2 del anexo.

La parte relacionada con la simulación del comportamiento de molinos de viento se realizó solamente con los de los modelos Bayamo-II, CITA-Steere, Veleta, y Delta Junior, ya que no fue posible obtener las curvas características de bombeo para otros tipos de molinos más frecuentemente usados en las entidades agrícolas y pecuarias del territorio.

Resultados y discusión

La salida de los resultados obtenidos por el software para los diferentes valores de velocidad sobre el terreno se visualiza mediante un código de colores, y se muestran simultáneamente las coordenadas del punto en

cuestión con el correspondiente valor de velocidad del viento. Esto resulta adecuado para quien lo ha instalado, pero no para un usuario productor no familiarizado en su explotación.

Por esta razón fue necesario buscar alternativas de salidas más asequibles bajo diferentes circunstancias. Una de ellas, asumiendo que se tenga acceso a una computadora personal, consiste en «capturar» las imágenes de las áreas de interés, incluyendo los ejes de coordenadas y la escala de colores con valores de velocidad asociados, e insertarlos en un documento como un fichero de texto. Sin embargo, otra más modesta y común puede ser localizar las áreas de mejores valores de velocidad, e identificarlas y definir las mediante polígonos cerrados con igual valor de velocidad, o simplemente seleccionar los valores más altos de velocidad y definir en qué punto se encuentran. Según las características de cada lugar de aplicación, quedaría definir de conjunto con el posible usuario la forma de salida que convenga mejor según las posibilidades de cada uno.

Exploración del Recurso Eólico empleando rejillas en los alrededores de cada cooperativa

Resultados del cálculo del Recurso Eólico CCS Renato Guitart (Finca San José y alrededores)

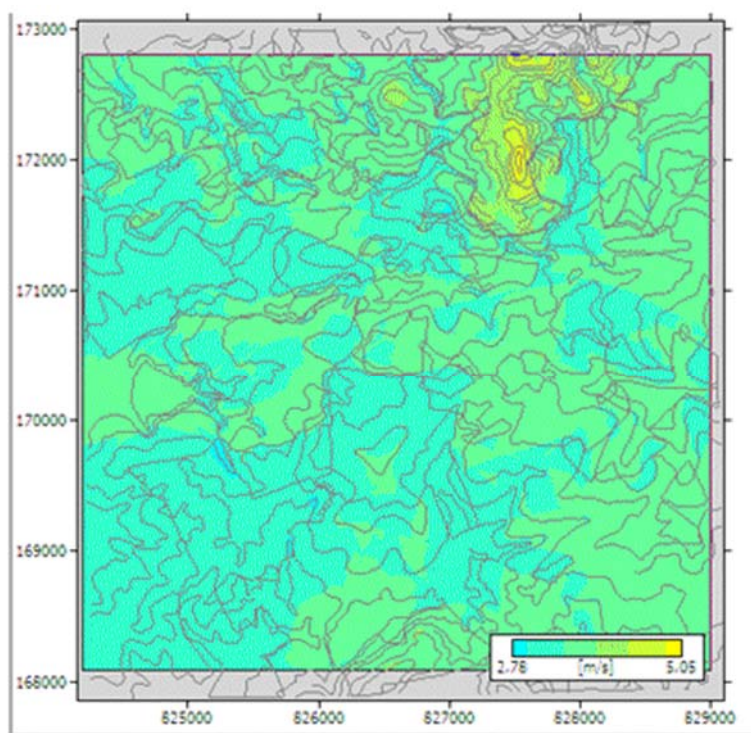


Fig. 1. Resultados de la velocidad para el área total calculada a altura de 10 m (CCS Renato Guitart, Finca San José).

Los mejores sitios según la velocidad del viento dentro del área ocupada por la finca, aparecen identificados por el código de colores y la leyenda ubicada en el extremo inferior derecho de la figura. Además de eso, y a manera de ejemplificación, estos sitios se corresponden con los puntos dados a continuación por las coordenadas (entre paréntesis el valor de velocidad media en $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$):

1. 827004,4 y 170480,2 (3,68)
2. 826680,3 y 170480,2 (3,60)
3. 826667,4 y 170726,4 (3,62)
4. 826732,2 y 170869,0 (3,69)
5. 826576,6 y 170920,9 (3,56)
6. 826602,6 y 170998,6 (3,54)
7. 826784,1 y 170687,5 (3,69)
8. 826758,1 y 170532,0 (3,67)
9. 826771,1 y 170557,9 (3,73)

Resultados para la CPA Amistad Cubano-Polaca

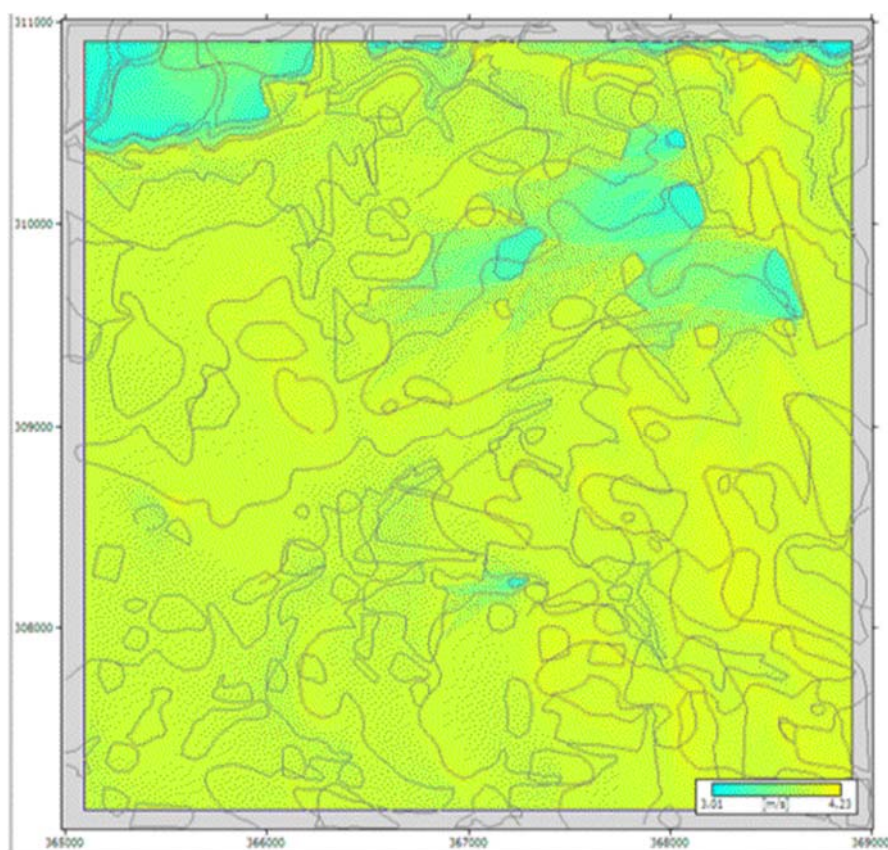


Fig. 2. Resultados de la velocidad para el área total calculada en la CPA Amistad Cubano-Polaca, a altura de 10 m.

Si bien la simulación a la altura de 10 m proporcionó un intervalo de velocidad media de $3,01-4,23 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, los resultados para 6 m de altura condujeron a un intervalo de $2,80-3,32 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, valor que era de esperar al existir mayor resistencia y perturbación del flujo a alturas más bajas [OMM, 1984; NREL, 1997].

Con el objetivo de ahorrar espacio se brindan los resultados tabulados de todas las áreas exploradas.

Tabla 2. Resumen de resultados de la velocidad media ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) en cada sitio estudiado a alturas de 10 m

Nº	Lugar	Rango de velocidades, $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
1	CPA Jesús Suárez Gayol	2,83-5,46
2	CPA Victoria de Girón	2,79-4,07
3	CPA Amistad Cubano-Polaca	3,01-4,23
4	CCS Renato Guitart	2,78-5,05
5	CCS Antonio Suárez	2,07-5,73
6	CCS José Martí	2,45-3,81

Lo expuesto en la tabla 2 permite apreciar que las áreas con velocidades medias de viento mayores corresponden a ubicadas en la CPA Jesús Suárez Gayol, así como en las CCS Renato Guitart y Antonio Suárez. Sin embargo, este análisis estaría incompleto si se toma tan solo ese criterio, pues debe tenerse presente que la tarea final es proponer sitios para la ubicación de máquinas eólicas, tratando de brindar opciones de su emplazamiento en la mayor extensión posible para que pueda ser combinado con sitios de real existencia de agua subterránea, y obtener los mayores rendimientos posibles. Esto último conlleva a la inclusión de la magnitud de las mejores áreas con velocidades de viento superiores a los $3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, que aquella en la cual comienza a trabajar la mayoría de los molinos de viento de alta capacidad instalados en Cuba [Soltura, et al., 1997].

En base a este nuevo criterio, en la tabla 3 se expone el comportamiento que resulta al analizar el área con velocidad igual o superior a $3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, tomando como base el área total estudiada en cada uno de los sitios explorados.

Tabla 3. Porcentaje aproximado de área con velocidades $\geq 3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$

No.	Lugar	Área porcentual aproximada, con velocidad $\geq 3,0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ a una altura de 10 m, %
1	CPA Jesús Suárez Gayol	85
2	CPA Victoria de Girón	90
3	CPA Amistad Cubano-Polaca	100
4	CCS Renato Guitart	90
5	CCS Antonio Suárez	70
6	CCS José Martí	80

Acorde a lo expuesto en la tabla 3 se aprecia que, en contraposición con lo reflejado en la tabla 2, las cooperativas con mayores áreas de viento con velocidad mayor o igual a $3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, resultan ser las CPA Amistad Cubano-Polaca, Victoria de Girón y la Jesús Suárez Gayol, mientras que de las CCS tan solo sobresale la Renato Guitart. Evidentemente esto no quiere decir que tan solo en las de mayor porcentaje de superficie con velocidad del viento superior a $3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ sea donde único este es aprovechable. Debe considerarse que aunque el resultado fundamental y palpable del actual estudio es detectar las zonas con mayor potencial de viento dentro de cada una de las áreas estudiadas, a fin aplicar las tecnologías eólicas (ya sea para bombeo eólico o generación eléctrica); sin embargo, los bajos valores obtenidos de velocidad media anual del viento en cada sitio (a la altura de 10 m) aconsejan el empleo de máquinas eólicas solamente para el bombeo de agua, ya que el valor de aquella lo ubica en la categoría de «Pobre» [Soltura, et al., 2009] y para generación eléctrica no resulta factible. La elevación de la altura de cálculo a 30 m para este último fin conduce a incrementos de velocidad de apenas 27-33% (Tablas A1 y A2 del Anexo), lo que ameritaría un estudio aparte.

Cálculo de la cantidad de agua a bombear acorde al potencial de viento y tipo de molino a emplear en cada cooperativa

El empleo de los valores medios de viento obtenidos para cada lugar, combinados con la información de la curva característica de bombeo de cada uno de los modelos de molino para los cuales fue factible obtener

la misma [CITA-Steere (Cita-St); Bayamo-II (Bay-II); Veleta (Velet); y Delta-Junior (DeltaJ)], permitió calcular los posibles caudales a obtener bajo regímenes de velocidades media, mínima y máxima de cada lugar. Los valores aparecen en la figuras 3, 4, y 5.

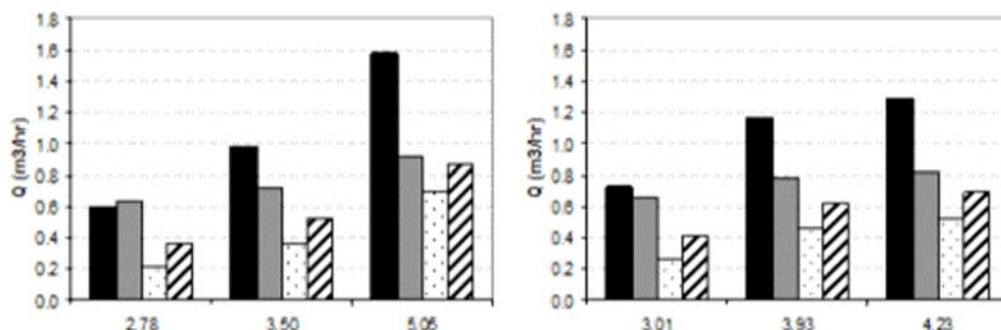


Fig. 3. Caudal de bombeo ($\text{m}^3 \cdot \text{hr}^{-1}$) por modelo: CCS R. Guitart (izq.) y CPA Amistad Cubano-Polaca (der.) a las correspondientes velocidades mínima, media y máxima.

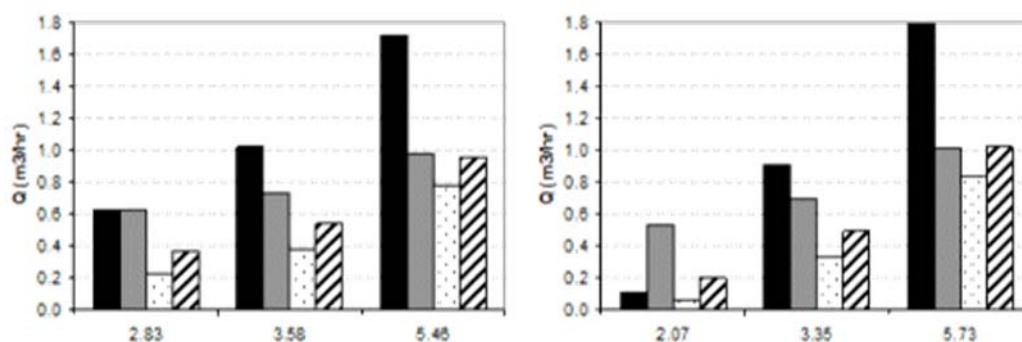


Fig. 4. Caudal de bombeo por modelo: CPA J. S. Gayol (izq.) y CCS Antonio Suárez (der.).

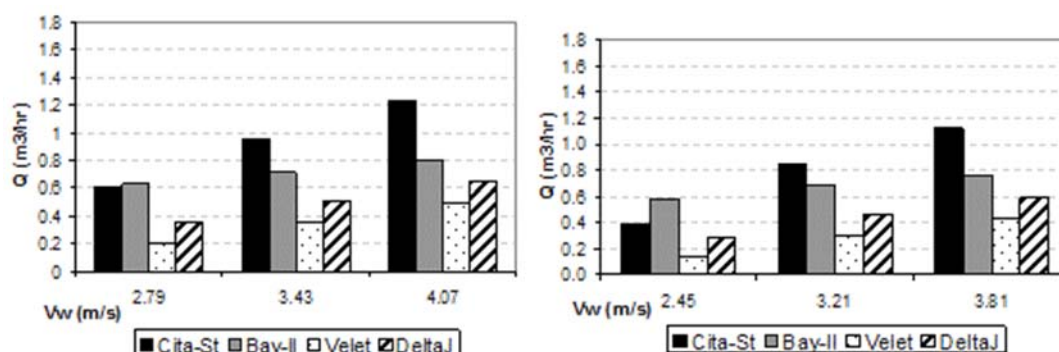


Fig. 5. Caudal de bombeo por modelo: CPA Victoria de Girón (izq.) y la CCS José Martí (der.).

El análisis de las figuras 3 a la 5 muestra que para una carga hidráulica fija de 15 m y a la velocidad media predominante del viento en cada lugar en particular, el más alto caudal de bombeo se obtiene con el molino tipo CITA-Steere, seguido del Bayamo-II, mientras que los resultados más bajos corresponden al modelo Veleta. Debe aclararse que si bien el molino Delta-Junior muestra un mayor caudal que el Veleta, esto es solo para cargas pequeñas, pues aunque el primero aparece incluido entre el grupo tomado para el presente estudio, en realidad la curva característica del Delta Junior solo ha sido evaluada para cargas de hasta 9 m [Vázquez, 2004], y la extrapolación realizada aquí a 15 m para compararlo con los restantes (que han sido evaluados a 15 m) es solo de manera ilustrativa para ampliar la comparación.

No obstante, y dado el hecho de que esta asunción puede deformar el resultado real, los valores aquí obtenidos para este molino no deben emplearse para decidir su selección en condiciones de carga superiores a 9 m. Nótese que aunque el objetivo de este trabajo no es evaluar el rendimiento de bombeo de los distintos tipos de molinos de viento aquí probados, vale resaltar que en todas las cooperativas el molino CITA-Steere es el que suministra un caudal superior a los 800 litros por hora en las condiciones de velocidad media en cada lugar, pero para condiciones de una carga hidráulica fija de 15 m.

Con relación al caso particular de la CPA Amistad Cubano-Polaca, al incluir el estudio del comportamiento del viento a dos alturas diferentes (6 y 10 m) se evidenciaron las ventajas de ubicación de máquinas eólicas a mayor altura, aspecto que si bien es algo planteado en la teoría clásica de la eólica [Wegley, et al., 1980], al aplicarse en estas áreas en particular pudo apreciarse la diferencia de rango de las velocidades medias sobre una misma área en igual intervalo de tiempo (de $2,8$ a $3,3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ a 6m de altura, contra un rango de $3,0$ a $4,2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ a 10 m), aspecto que fue ampliamente analizado con especialistas del sector, por la aplicación práctica que se manifiesta en el diseño de partes componentes de los molinos de viento, que varían desde la altura de la torre hasta el diámetro de las aspas, independientemente del número de palas que posean [Fonte, et al., 2014].

Si se toma en cuenta la frecuencia del viento en cada rango de velocidad, tomando como base de análisis los datos correspondientes a la Estación 355 del Centro Meteorológico de Camagüey (Fig. 6), y considerando el tiempo medio que corresponde a velocidades de $3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ y superiores (incluyendo todos los sectores de viento y medidas a 10 m de altura), se obtiene la capacidad de bombeo para cada uno de los diferentes molinos.

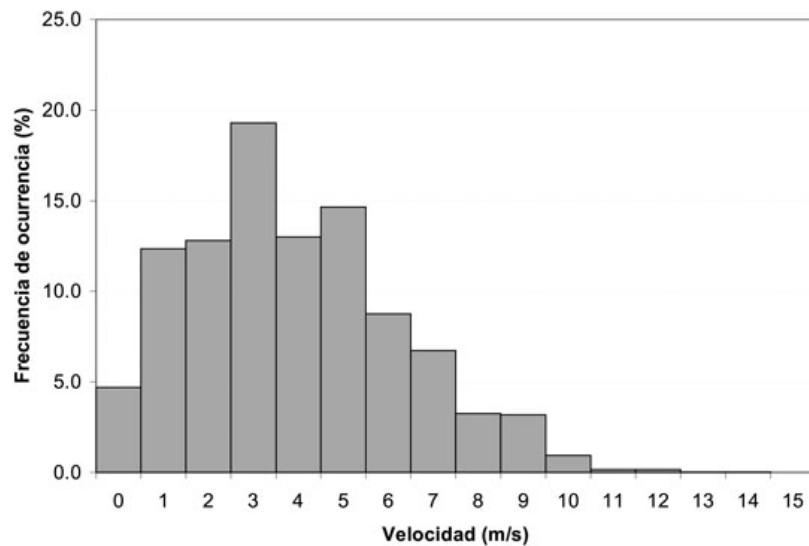


Fig. 6. Histograma de velocidades del viento ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$). Estación 355.

Si se analiza la climatología del viento para el período analizado (Fig. 7), se debe distinguir que si bien la media anual se encuentra cercana o por encima de los $2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$; sin embargo, la alta variabilidad que se aprecia de las barras de desviación estándar contenidas en cada rectángulo conllevan a que el Coeficiente de Variación sea superior a 50%, excepto en los horarios de las 10 a las 16 Hora Local (HL), lo que conduce a que excepto en dichos horarios, en los restantes pueden haber diversos casos con valores de velocidad menores a $1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, lo que impediría el trabajo de las aerobombas (las cuales, en casi todos los casos, operan a partir de velocidades por encima de $2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$).

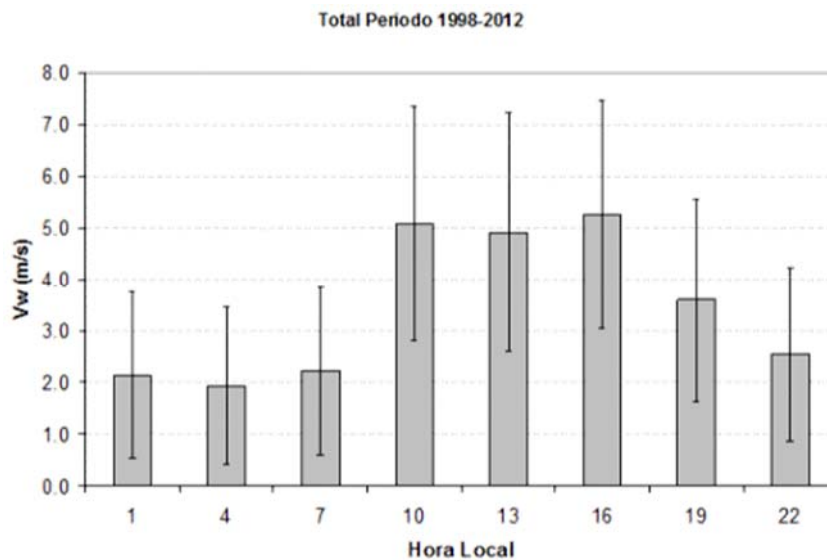


Fig. 7. Comportamiento medio anual por horas.

El análisis del comportamiento total horario por meses permite corroborar que los meses de mayores velocidades medias se enmarcan en el período diciembre-abril (Fig. 8).

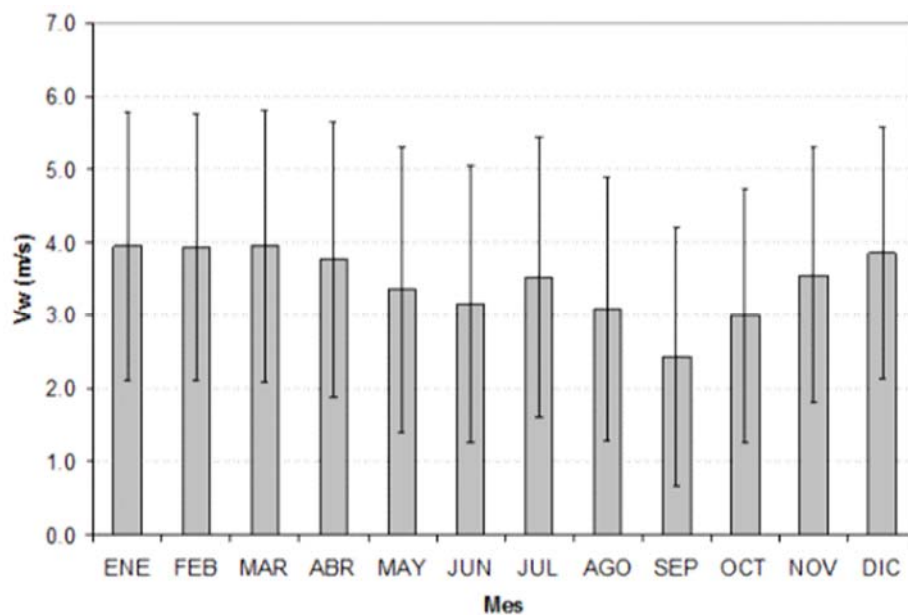


Fig. 8. Curso medio anual total por meses.

El análisis combinado de la información de las figuras 7 y 8 pudiera conducir a resultados poco alentadores, dada una conclusión parcial de que el período más caluroso coincide prácticamente con el de menores velocidades de viento. Con vistas a esclarecer esa situación, se revisó la climatología horaria particular por cada mes. De ello se obtuvo evidencia (Figs. 9 y 10) que muestra que, exceptuando septiembre, en el resto de los meses, y en el intervalo de las 10 a las 16 HL, los valores medios horarios y su variabilidad, garantizan que siempre estarán por encima de $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, aspecto que refuerza el argumento para estimular el empleo de este tipo de equipo para los fines planteados, ya que las calmas tienen una frecuencia de 4,7% para todo el período analizado, lo que coincide con los valores históricos del período 1988-2013 en esa área [CMPC, 2014].

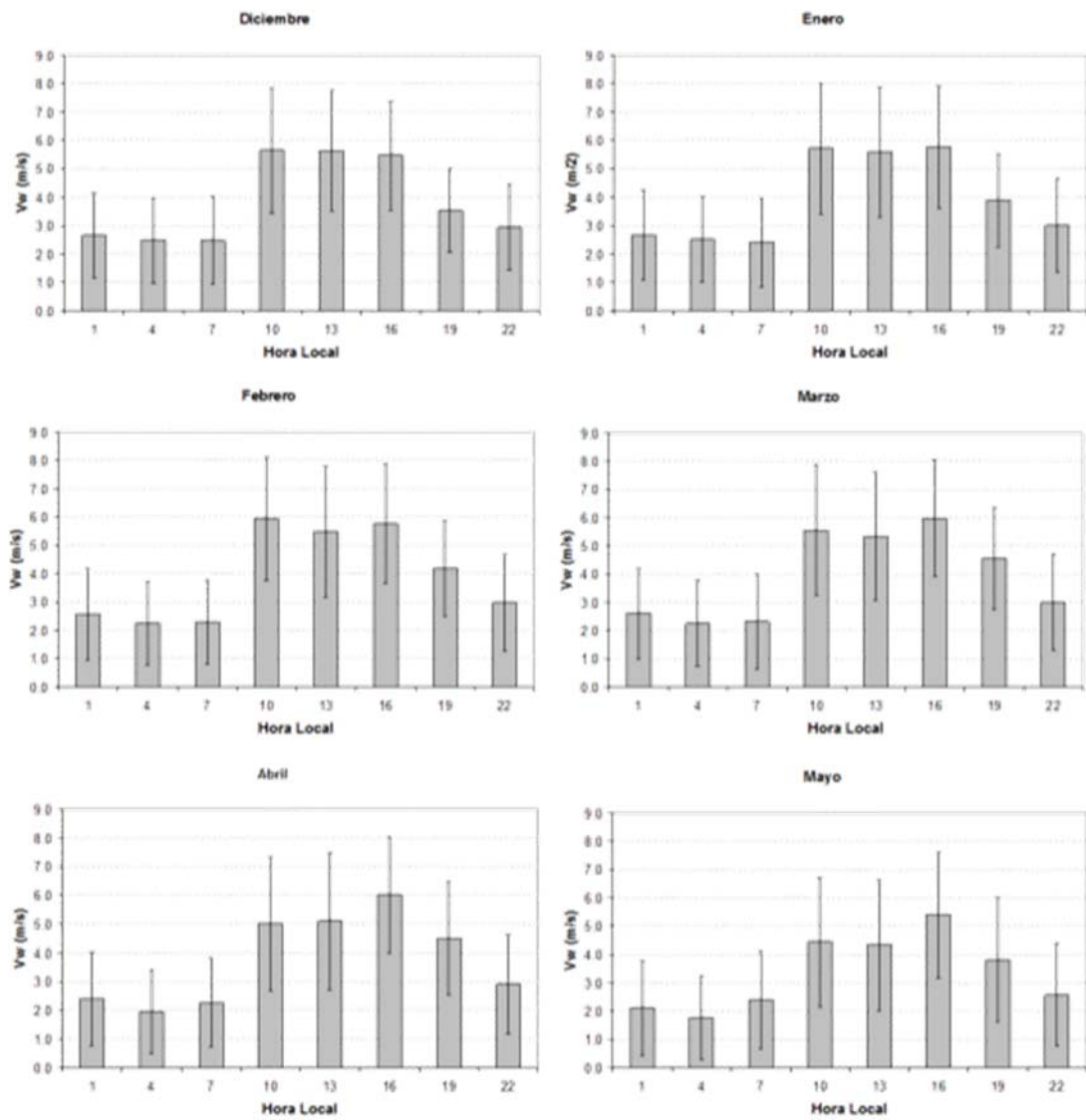


Fig. 9. Comportamiento medio horario período diciembre-mayo.

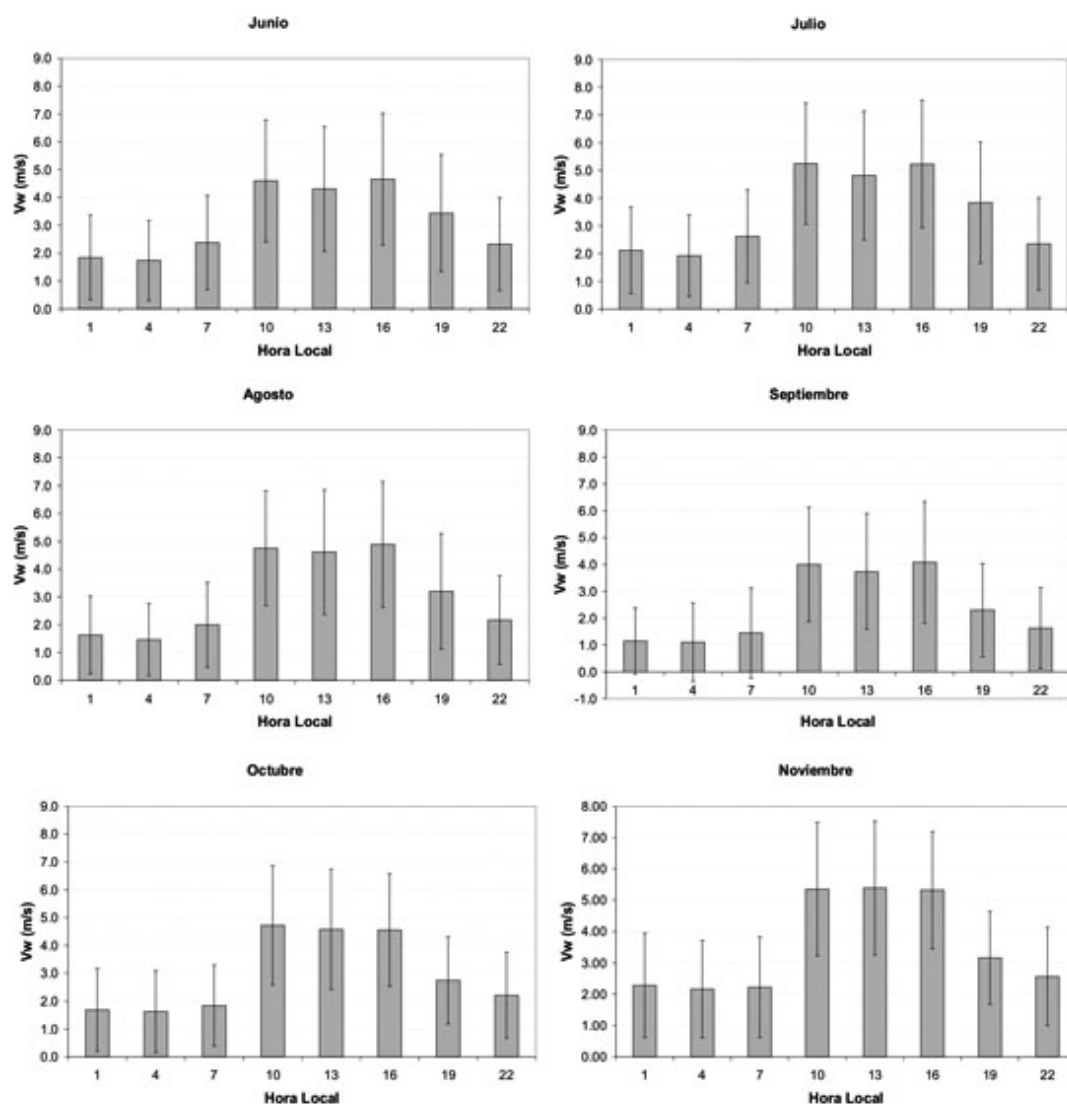


Fig. 10. Comportamiento medio horario período junio-noviembre.

De todas estas figuras (6, 9 y 10) se comprueba que, si bien los casos con velocidades de 2 o menos de $2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ constituyen casi un tercio del total, en las dos terceras partes restantes la cifra sobrepasa esos valores, o sea, que resulta aprovechable a los efectos de bombeo eólico con máquinas de baja carga.

Conclusiones

- En todas las cooperativas la mayor parte de las áreas resulta apropiada para el bombeo eólico, aunque existen zonas intercaladas que no ofrecen garantía para ello, razón que ratifica la necesidad de realizar este tipo de estudios.

- Los bajos valores de velocidad media del viento obtenidos en cada lugar estudiado descartan la posibilidad de generación eléctrica a baja altura con pequeñas máquinas eólicas.
- La posibilidad de aprovechamiento para generación de electricidad solo podría empezar a tener sentido a alturas de 30 m y superiores.
- De todos los sitios estudiados en este trabajo, tan solo algunas áreas aisladas de la CCS Antonio Suárez y la CPA J. Amistad Cubano-Polaca pudieran recomendarse para profundizar estudios con vistas a la instalación de pequeños aerogeneradores a mediana altura (30 m), aunque ello conllevaría la realización de estudios complementarios para ganar seguridad.
- Se confirmó la ventaja de ubicar de molinos de viento (aerobombas) en torres de 10 m de altura, en lugar de 6 m de altura.
- De los sitios estudiados, tres muestran velocidades medias del viento superiores a $3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, en al menos 90% de su área.

Anexos

Tabla A1. Velocidad media ($m \cdot s^{-1}$) y su incremento con la altura desde 10 hasta 30 m

No.	Lugar	H = 10 m	H = 30 m	% incremento
1	CPA Jesús Suárez Gayol	3,58	4,57	27
2	CPA Victoria de Girón	3,43	4,41	29
3	CPA Amistad Cubano-Polaca	3,93	5,02	28
4	CCS Renato Guitart	3,50	4,50	29
5	CCS Antonio Suárez	3,35	4,35	29
6	CCS José Martí	3,21	4,26	33

Tabla A2. Rango de velocidad media ($m \cdot s^{-1}$) a 10 y 30 m

No.	Lugar	Rango a 10 m	Rango a 30 m
1	CPA Jesús Suárez Gayol	2,83-5,46	3,86-6,19
2	CPA Victoria de Girón	2,79-4,07	4,09-4,77
3	CPA Amistad Cubano-Polaca	3,01-4,23	4,27-5,19
4	CCS Renato Guitart	2,78-5,05	3,89-5,76
5	CCS Antonio Suárez	2,07-5,73	3,44-5,68
6	CCS José Martí	2,45-3,81	3,62-4,81

Bibliografía

AIELLO J. VALENCIA J.; E. CALDERA Y V. GÓMEZ (1983). *Atlas eólico preliminar de América Latina y el Caribe*. Vol. II, América Central y el Caribe. Programa Regional de Energía Eólica de OLADE.
CMPC (2014). *Ficheros de la base de datos climatológicos de la Estación 355*. Camagüey: 2014.

FONTE HERNÁNDEZ, A. (2006). «Evaluación del recurso eólico en áreas de la provincia de Camagüey». Tesis de Maestría, Universidad de Oriente, 2006.

FONTE HERNÁNDEZ, A.; O. ESCOBAR Y I. PÉREZ (2014). «Exploración del recurso eólico en áreas específicas para aplicaciones al bombeo eólico», en Taller Provincial Cubasolar 2014.

NREL (1997). *Wind Resource Assessment Handbook*. National Renewable Energy Laboratory (NREL) Subcontract No. TAT-5-15283-01, 79 pages.

NOVO MESEGUÉ, RAÚL (2005). «El viento en Cuba», en *Energía y tú*, 32: 2005. ISSN: 1028-9925.

NOVO R.; G. LEYVA Y J. C. DÍAZ (2003). «Potencial eólico en Cayo Sabinal», en *Energía y tú*, 21 (8-14): 2003.

OMM (1984). *Aspectos meteorológicos de la utilización del viento como fuente de energía*. Nota Técnica No.175. Secretaría de la Organización Meteorológica Mundial (OMM). Ginebra Suiza, 1984.

SOLER, T. E.; M. R. RIVERO, S. Y. ROSALES Y N. J. IZQUIERDO (2013). «Estudio de prospección eólica con fines energéticos en la Isla de la Juventud», en *Eco Solar*, 44: 2013.

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 *Eco Solar*, 21: 2009. Disponible en: www.cubasolar.cu/biblioteca/Ecosolar/Ecosolar21/HTML/articulo06.htm.

SOLTURA, R.; S. MON, G. RODRÍGUEZ, A. ROQUE Y L. AYALA (1997). «Atlas Eólico de Cuba. Estadística y Climatología. Potenciales climáticos de generación eolo-eléctrica y bombeo eléctrico», en *Revista Solar*, 33 (13-24): primavera, 1997. ANES. Sección Mexicana de la International Solar Energy Society.

VÁZQUEZ HERNÁNDEZ, L. (2004). «Evaluación de los molinos de viento Veleta y Delta Junior», en *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, XXV(2) (50-54): 2004.

WEGLEY H.; J. RAMSDELL, M. ORGILL Y R. DRAKE (1980). *A Sitting Handbook for Small Wind Energy Conversion Systems*, Report No. PNL-2521 Rev.1, 1980.

Diseño de dos torres portantes para aerogeneradores de baja potencia

Design of two supporting towers for low power wind turbines

Por Ing. Luisa María Véliz Marrero
e Ing. Elier Trujillo Gutiérrez**

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

Resumen

Ante la demanda creciente de utilizar energías renovables, una de las principales alternativas proviene del viento. Así pueden ser creados pequeños sistemas aislados de producción de energía eléctrica a partir de la energía eólica, los cuales son muy importantes en casos donde un poblado o caserío no tenga acceso a la electricidad. Estos sistemas aislados se diseñan para aerogeneradores de baja potencia, entre 0,1 y 5 kW. El costo del equipamiento es bajo y pueden utilizar casi toda la energía del viento para recargar baterías en comunidades rurales de difícil acceso, y donde las posibilidades de montaje se dificultan. Con este objetivo el presente trabajo propone dos estructuras metálicas tipo torres, para sostener aerogeneradores de baja potencia de hasta 1,5 kW. Se describe el proceso de diseño de una estructura reticular y otra tubular, avalando sus condiciones mecánicas para soportar fuerzas de viento de magnitud Categoría 2 de huracanes, mediante la comprobación de resistencia y pérdida de estabilidad. Los cálculos se realizaron utilizando la herramienta de modelación paramétrica en 3D del software Autodesk Inventor 2013. La solución propuesta es económica, en la que el costo de la estructura no supera 20% del total de la turbina eólica. Su traslado es en secciones y la solución de montaje es simple.

Palabras clave: Diseño, modelado paramétrico, torres, aerogeneradores, resistencia

Abstract

Given the increasing demand of using renewable energies, one of the main alternatives is wind energy. Therefore, small isolated systems of electricity production from wind power can be created, which are very important in cases where a village or settlement does not have access to electricity. These isolated systems are designed for low power wind turbines, between

0.1 and 5 kW. The cost of the equipment is low and they can take advantage of almost all the energy of the wind to recharge batteries in rural remote communities, and where the possibilities of assembly are difficult. With this objective, the present paper proposes two metal structures, to withstand 1.5 kW low power wind turbines. The design process of a reticular and a tube shape structure is described, validating its mechanical conditions to withstand wind speeds of Category 2 hurricanes, through the verification of resistance and loss of stability. The calculations were made using the parametric modeling tool in 3D of Autodesk Inventor 2013 software. The suggested solution is economically viable. The cost of the structure does not exceed 20% of the wind turbine. It can be moved in sections and the assembly solution is simple.

Keywords: Design, parametric modeling, towers, wind turbines, resistance

Introducción

En la actualidad la energía es imprescindible ya que todo movimiento humano la necesita, y sin ella la sociedad quedaría paralizada. Por esto con el fin de mejorar y asegurar su vida, el hombre ha tratado de buscar nuevas fuentes de energía, y sobre todo renovables como la eólica, la geotérmica, la hidráulica y la fotovoltaica, entre otras, que son las que en el futuro podrán utilizarse de forma continuada. En esta búsqueda no deben olvidarse dos aspectos fundamentales para explotar esas fuentes de energía: un nivel económico aceptable para la situación económica del país, y no afectar el medioambiente.

Estudios realizados demuestran que la energía eólica representa hoy una de las vías para la generación de energía eléctrica más competitiva, y en Cuba es una solución real y económicamente ventajosa.

En estos momentos, los avances tecnológicos permiten la proyección hacia la fabricación de pequeños conjuntos eólicos en Cuba con una alta integración, a partir de la puesta en práctica de programas de investigación y desarrollo, y la posibilidad de emplear herramientas de diseño apropiadas.

Los sistemas aislados de producción de energía eléctrica a partir de la energía eólica, según se desprende de estudios previos, son de gran importancia especialmente en países en vías de desarrollo, donde existe un gran porcentaje de la población sin acceso a la electricidad. Dichos sistemas aislados se diseñan para pequeños aerogeneradores de potencias entre 0,1 y 5 kW, que son confiables, el costo del equipamiento es bajo y pueden aprovechar casi toda la energía del viento; pueden ser utilizados para cargar baterías para el consumo de zonas rurales aisladas, y son recomendables en zonas propensas a huracanes, donde las posibilidades de montaje son limitadas y el acceso es difícil.

Entre las principales características de los aerogeneradores de baja potencia están que el rotor tipo hélice con las palas de frente al viento está unido directamente a un generador, se orientan respecto al viento por una veleta, presentan dos sistemas de frenado, uno de tipo mecánico, y por lo general se soporta en cualquier tipo de torre con diferentes alturas.

Generalmente, el coste de la torre de la turbina eólica supone alrededor de 20% del total de la turbina. Por lo tanto, resulta importante para el costo final de la energía construir las torres más adecuadas, tanto técnica como económicamente. Teniendo en cuenta lo anterior, en este trabajo se proponen alternativas de torres que soporten la acción de los vientos más desfavorables, tengan una cimentación adecuada, cuenten con soluciones para el mantenimiento del rotor y la propia estructura. Además, que tengan materiales apropiados y sean de fácil traslado e instalación.

Diseño de torres para aerogeneradores

Existen diferentes tipos de estructuras para soportar los aerogeneradores, la diferencia está en la potencia, el tamaño del equipo a instalar y la altura que se necesite alcanzar. La ubicación y altura de la torre son los factores principales en el rendimiento del sistema. La velocidad media del viento depende de muchos parámetros y puede variar considerablemente dentro de una misma zona, pero se conoce que la potencia del viento aumenta con el cubo de la velocidad y esta aumenta con la altura, aunque la altura excesiva puede encarecer la instalación.

Por otro lado, el flujo laminar del viento sobre la superficie se ve alterado por multitud de obstáculos y variaciones topográficas. Esto produce dos fenómenos: reducción de la velocidad cerca del suelo y turbulencias que disminuyen mientras mayor es la altura, por lo que cuando más alto se sitúe el aerogenerador, mayor rendimiento tendrá [Trujillo, 2013; Bornay, 2002; Lima, 2014]. Las experiencias acerca de esto indican que pequeños equipos en lugares abiertos instalados en una torre de hasta 10 m, pueden funcionar.

Entre las estructuras más utilizadas se encuentran las torres tubulares autoportadas o con riendas, escalonadas y enterizas (Fig. 1); algunas pueden ser abatibles con ventajas para realizar tareas de mantenimiento.



Fig. 1. (A la izquierda), estructuras tubulares autosoportadas, (al centro), tubular con riendas, (a la derecha) vista del parque eólico demostrativo de Turiguanó, Ciego de Ávila, Cuba.

Para este trabajo, después de analizar las ventajas y desventajas de las estructuras que habitualmente se utilizan, y considerando que el aerogenerador a poner en operación es de pequeña potencia, es decir de 0,5 kW, se desarrollaron dos variantes de las torres: una reticular y otra tubular, para seleccionar de acuerdo al criterio del comprador la de mayores ventajas, en dependencia de la zona de emplazamiento.

El conjunto se pondrá en operación en terrenos aislados de la región occidental de Cuba, presentando difícil acceso para equipos motorizados tanto de transporte como de elevación, por lo que se debe garantizar un modo viable de transporte y de emplazamiento. También debe soportar las adversas condiciones meteorológicas que azotan frecuentemente esta región del país, generando vientos huracanados. El diseño de la torre se proyecta para que resista vientos hasta de 177 km/h, es decir, un huracán de categoría 2 de la escala de Saffir-Simpson [2006]. Además de la fuerza de los vientos están las que actúan en el aerogenerador, las cuales dependen del área del rotor y que empujan la torre, si no se ha previsto que se baje al suelo.

Entre las principales normas a consultar para definir las dimensiones de las estructuras, las cargas de diseño y métodos de cálculo, están las siguientes:

- EN61400-2:1996: Sistemas de Aerogeneradores. Parte 2. Seguridad de pequeños aerogeneradores.
- IEC 61400-2. Segunda edición 2006-03. WinTurbines-Part 2: Design Requirements for Small Wind Turbines.
- Germanischer Lloyd Wind Energie. Edition 2003 with Supplement 2004. IV-Part1.

- Guideline for the Certification of Wind Turbines.
- ISO 2394. Segunda edición 1998: Principios generales en la fiabilidad de estructuras.

El estudio de estas normas refleja que para turbinas con un área de barrido del rotor menor de 2 m^2 , la torre se calcule independientemente de la acción del aerogenerador. La importancia de considerar el área de barrido es que ese parámetro determina el tipo de aerogenerador y las condiciones de cálculo de la torre, ya que el radio del rotor es directamente proporcional a la carga máxima de empuje y a la carga de viento estacionada sobre la estructura [Lima, 2014].

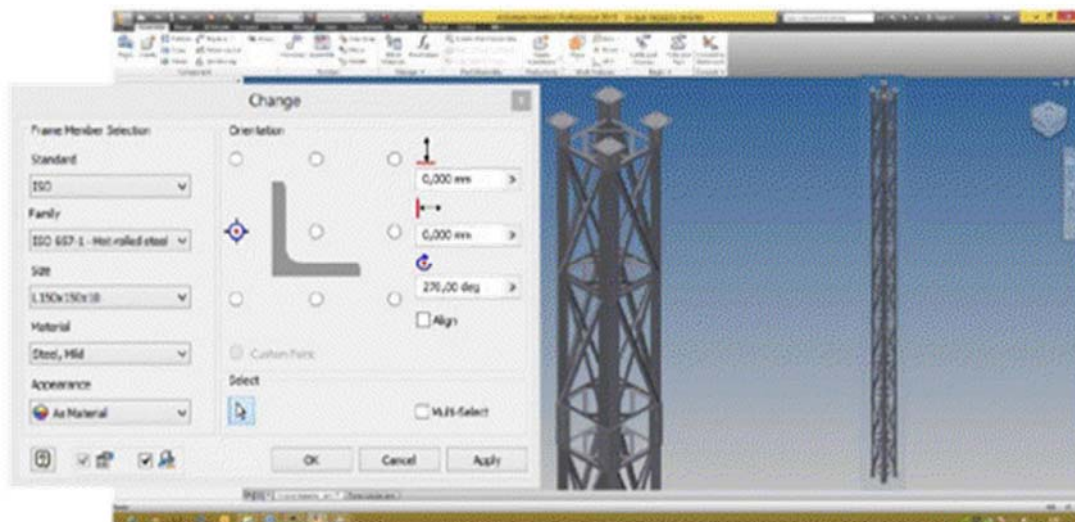
Para el diseño y comprobación de la torre se utilizó el software de modelado paramétrico en 3D, Autodesk Inventor 2013. Este se utiliza en diseños de ingeniería para producir y perfeccionar nuevos productos; con él se modela la geometría, las dimensiones y el material, de manera que si algún parámetro cambia, la geometría se actualiza automáticamente a partir de las nuevas propuestas. Esto permite que el diseñador almacene sus conocimientos de cálculo dentro del modelo.

Cuenta también con análisis de tensiones por elementos finitos, y análisis estáticos y dinámicos. Además, posee herramientas para la creación y análisis de estructuras, *piping* y cableado, y las tecnologías lpart, lassembly, lmates, lcopy e llogic posibilitan que el diseño sea más rápido y eficiente. Su combinación con Autodesk Vault y Autodesk 360 lo hacen líder en el mercado del diseño mecánico.

Propuesta de diseño de torre reticular

Se utilizaron como referencia las estructuras reticulares de las torres de alta tensión del Sistema Eléctrico Nacional, las que tienen características similares a las propuestas, es decir, son autosoportadas, con altura aproximada de 20 m, por lo que se utiliza la misma medida de angulares de acero 45. La diferencia entre ambas estructuras es que debe resistir el peso de 100 kg del aerogenerador, además de la componente estática de las fuerzas generadas por el viento en sus tres aspas.

La torre está compuesta por angulares de lados iguales L150X150x10 mm en las 4 columnas principales, y por el perfil L50X50X4 mm en las diagonales y tranques. Se concibió a partir de cinco secciones de 4 m de altura y base cuadrada de 0,75 m de lado (Fig. 2).



*Fig. 2. Modelo de la torre reticular (derecha).
Detalle de la estructura (centro). Herramienta de generación de perfiles
de Autodesk Inventor 2013 (izquierda).*

Las uniones entre las barras serán por medio de tornillos M20 en las uniones de las columnas principales, en las uniones de las diagonales y tranques con las columnas y M30 en los anclajes al suelo, y en la parte superior de la torre con el aerogenerador.

La torre se modeló de forma paramétrica a partir de la herramienta de generación de perfiles del software. Se simuló la fuerza del viento actuante sobre la torre según las normas establecidas (Fig. 3) [TIA/EIA, 1996], para el valor máximo correspondiente a un huracán de categoría 2 de la escala Saffir-Simpson (177 km/h) (Tabla 1).

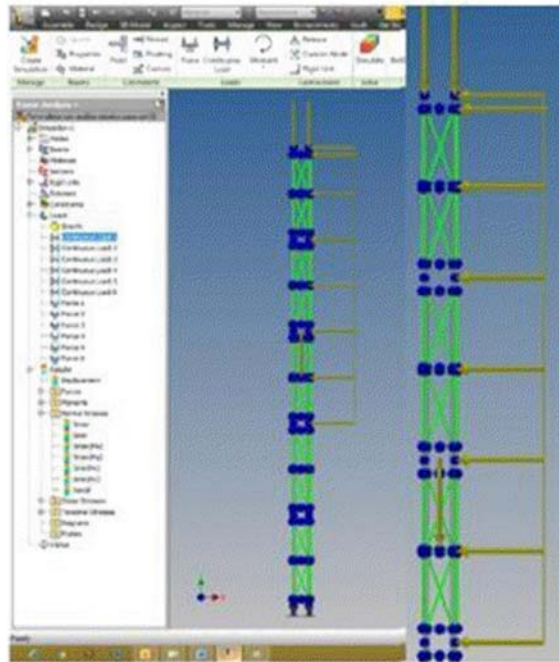


Fig. 3. Simulación de la componente estática de la fuerza del viento y el peso de la estructura.

Tabla 1. Valores de las fuerzas calculadas para la norma TIA-F222 para la torre reticulada, generadas para cada categoría, excepto la 5

Fuerzas (N)			
Cat. 1	Cat. 2	Cat. 3	Cat. 4
5 185,66721	6 939,95311	9 674,56018	13 734,4763
7 097,82032	9 498,97827	13 241,9392	18 798,901
8 213,16141	10 991,6338	15 322,7581	21 752,9328
9 041,93176	12 100,7731	16 868,9408	23 947,9689
9 221,9369	12 341,6731	17 204,7646	24 424,7207
9776,25662	13 083,5165	18 238,9226	25 892,8618

Una vez que la torre se modeló, y considerando solamente el peso propio, se efectuó una corrida de datos para determinar el período de oscilación de

la estructura, lo cual se obtiene mediante un análisis dinámico impuesto para 5 modos de vibración [NC-285, 2003; Véliz, 2011 y 2012]. El valor del periodo en cada caso fue menor que un segundo, como se muestra en la figura 4, a la izquierda. Esto se determina para comprobar la posibilidad de resonancia.

En los aerogeneradores medianos y grandes que generan potencias mayores de 3 kW se consideran otras cargas, como son las que dependen de la distribución no uniforme del viento, desbalance del motor, fuerzas verticales producto de la masa del rotor, fuerzas giroscópicas y momento torsor, que dependen de la potencia, momento de cabeceo y otros que pueden desarrollarse a causa de la fricción. Estos efectos no fueron considerados en este estudio por tener instalado un aerogenerador pequeño de 0,5 kW.

Resultados de la simulación para la propuesta de la torre reticular

Se presentan resultados arrojados por el programa: frecuencias naturales, desplazamientos, esfuerzos máximos y mínimos en la figura 4 y esfuerzos axiales de compresión y tracción (Fig. 5), y pérdida de estabilidad, después de simular en la torre los efectos de las fuerzas generadas por la componente estática del viento, peso del aerogenerador de 100 kg y peso propio de los elementos estructurales. La comprobación se realizó según la norma cubana para cálculo de estructuras de acero NC 53-94:83, para una velocidad máxima de la fuerza del viento de 177 km/h, lo que supone un huracán de categoría 2 de la escala Saffir-Simpson, con un factor de seguridad mínimo de 1,3, y los valores se presentan en la tabla 1 [Pisarenko, 1979].

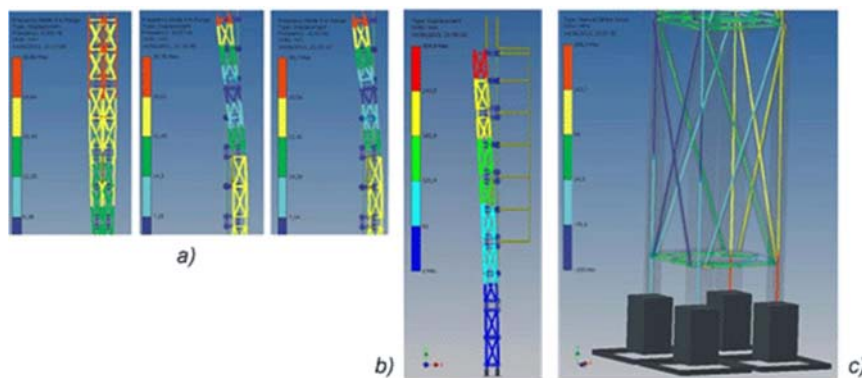


Fig. 4. A la izquierda, en a), el Análisis Modal con frecuencias naturales de 8,05, 10,87 y 10,92 Hz. En b), la simulación se obtuvo un desplazamiento máximo en el extremo superior de la torre de 304,8 mm. En c), un esfuerzo máximo de 268,3 MPa en la parte inferior de las columnas, en rojo.

Los valores de frecuencia natural se comparan con los de la frecuencia del viento que está por debajo de 1 Hz (según la Norma IEC 721-2-2, primera edición) y con la frecuencia de paso de las palas, la cual se determina por la cantidad de palas entre la velocidad de rotación del rotor. La no coincidencia de estas frecuencias indica que no existe la posibilidad de que la torre entre en resonancia.

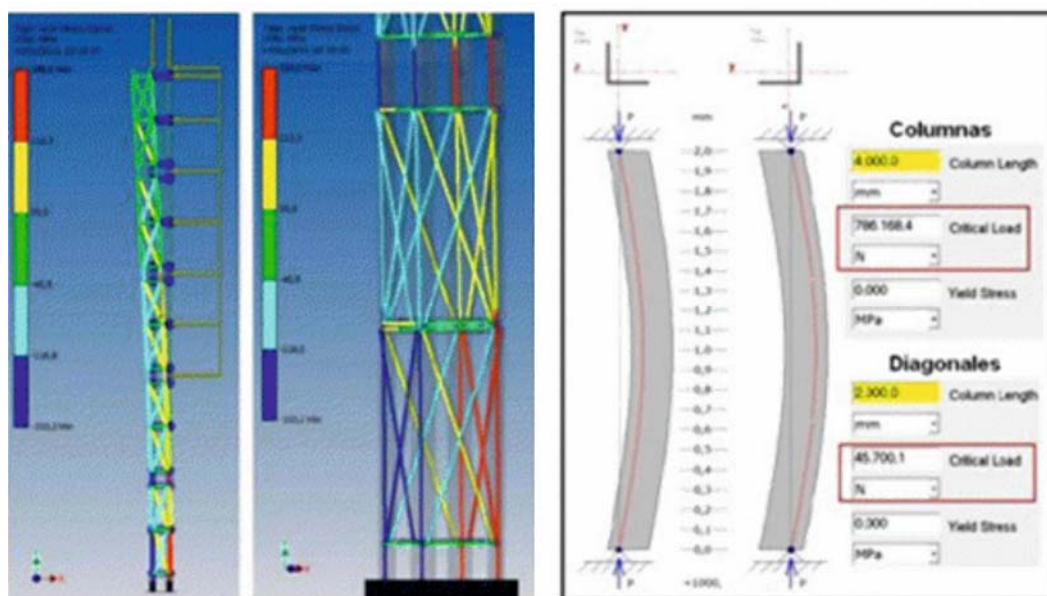


Fig. 5. Esfuerzos axiales de tracción (rojo) y de compresión (azul) a los que están sometidas las barras de la estructura (a la izquierda). Cálculo de la fuerza crítica de las vigas de las columnas y diagonales de la primera sección de la torre (a la derecha).

Tabla 2. Valores de fuerza actuante, fuerza crítica y coeficiente de seguridad para diagonales y columnas de la primera sección de la estructura, para el análisis de pérdida de estabilidad

Tipo de viga	Fuerza actuante	Fuerza crítica	Coeficiente de seguridad
Angular 150x150x10 mm Columna de 4 m de longitud	566 229,5 N	786 168,4	1,38
Angular 150x150x4 mm Diagonal de 2 m de longitud	75 204,6 N	45 700,1 N	0,60

Para aumentar la rigidez en las diagonales que fallan se concibió soldar angulares con las mismas características (Fig. 8).

Propuesta de diseño de torre tubular

Se toman como referencia las torres tubulares autosoportadas más comunes y el generador de perfiles del Autodesk Inventor, por lo que se propone la sección transversal Circular 762,0X6,0 mm, según la ISO 657/14-2000 Hot Roller Steel Sections (Secciones de acero roladas en caliente) (Fig. 6, a la izquierda).

La altura se concibió a partir de diez secciones de 2 m. Las uniones entre las secciones serán por medio de bridas atornilladas, los tornillos serán M30 tanto para la unión de las secciones como para los anclajes al suelo, y en la parte superior de la torre con el aerogenerador.

La torre se modeló de forma paramétrica a partir de la herramienta de generación de perfiles del software (Fig. 6, a la izquierda). Se simuló la fuerza del viento sobre la torre según las normas establecidas para el valor máximo correspondiente a la Categoría 2 de huracanes. Se adicionó el peso del aerogenerador y el programa generó el peso propio (Fig. 6, al centro).

Se efectuó una corrida de datos para determinar las frecuencias naturales de la estructura, lo cual se obtuvo mediante un análisis dinámico impuesto para 5 modos de vibración, obteniéndose valores de 12,11 y 33,8 Hz (Fig. 6, a la derecha), lo cual aleja la posibilidad de la resonancia al actuar la fuerza del viento, o al paso de las palas.

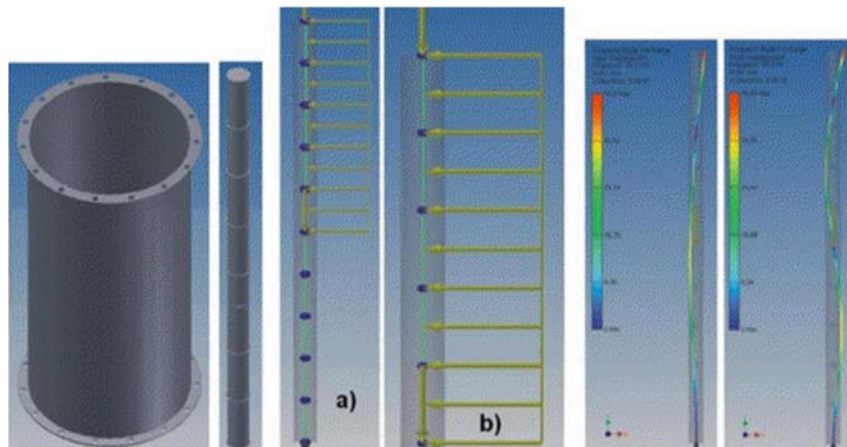
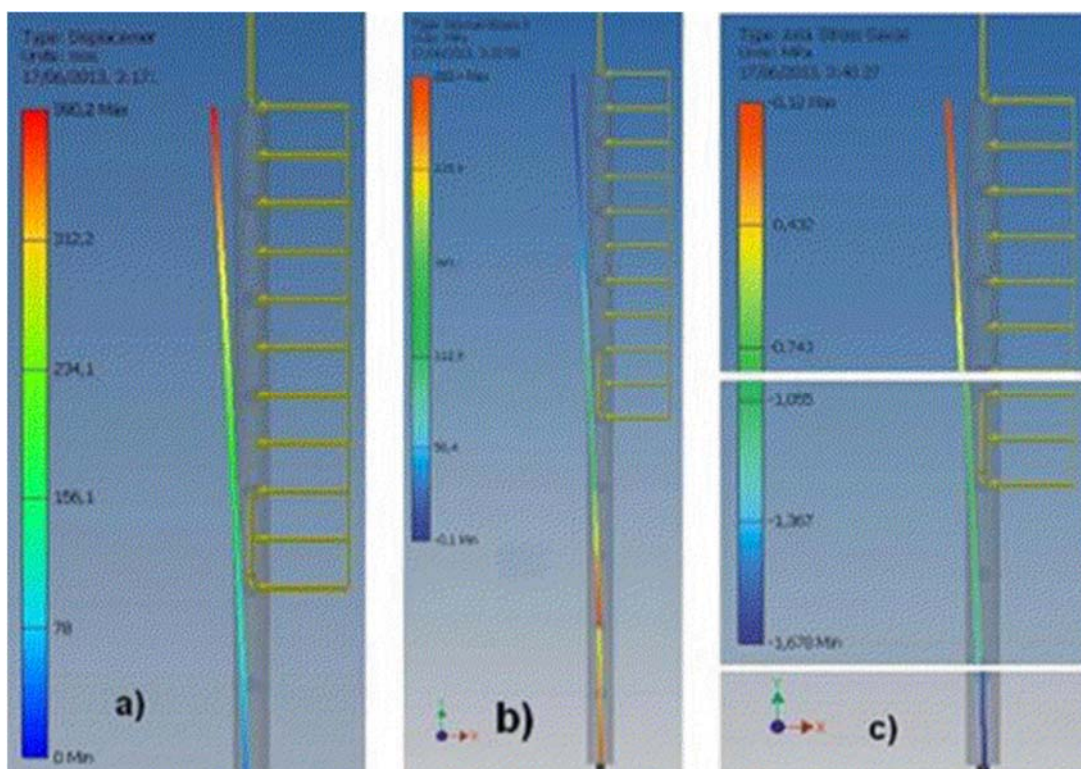


Fig. 6. Torre modelada con perfil circular 762,0x6,0 mm (a la izquierda). Al centro las fuerzas sobre la estructura en a) y un detalle en b). A la derecha Análisis Modal, con frecuencias de 12,11 y 33,8 Hz para los modos 3-4 y 5, respectivamente.

Resultados de la simulación para la propuesta de la torre tubular

A continuación y siguiendo la secuencia expuesta para la torre reticulada [Véliz, 2011], se exponen resultados arrojados por el programa: desplazamientos, esfuerzos máximos y mínimos, así como los esfuerzos axiales de compresión y tracción (Fig. 7) después de simular en la torre los efectos de las fuerzas generadas por la componente estática del viento, el peso del aerogenerador y el peso propio de los elementos estructurales. La comprobación se realizó según la norma cubana para cálculo de estructuras de acero NC 53-94:83, para una velocidad máxima de la fuerza del viento de 177 km/h, lo que supone un huracán de categoría 2 de la escala Saffir-Simpson, con un factor de seguridad mínimo de 1,3, y los valores se presentan en la tabla de la figura 7.



Valores de las fuerzas calculadas para la torre tubular, generadas para cada categoría, excepto la 5

Fuerzas [N]			
Cat 1	Cat 2	Cat 3	Cat 4
4986,15721	6672,94985	9302,34742	13206,0649
5229,91619	6999,1713	9757,11261	13851,6717
5448,17782	7291,26978	10164,3091	14429,7476
5646,53513	7556,7304	10534,3713	14955,106
5828,85661	7800,73034	10874,5166	15437,9927
5914,90884	7915,89363	11035,0586	15665,906

Fig. 7. Máximo desplazamiento de 390,2 mm, en a). Esfuerzos máximos de 282 MPa, en b). Esfuerzos axiales de tracción en rojo y compresión en azul, en c).

Resultados de la modelación para ambas estructuras

- A partir de los resultados obtenidos en la simulación de la torre reticulada se recomienda reforzar las columnas de la primera sección con cartabones, así como sus diagonales, con el fin de aumentar la resistencia y estabilidad en esas barras (Fig. 8, derecha).
- En el caso de la torre tubular no existen problemas de pérdida de estabilidad. Sin embargo, presenta problemas de resistencia en las tres primeras secciones, por lo que se propone reforzar las dos primeras secciones con el fin de corregir la falla a resistencia para esa categoría (Fig. 8, izquierda).
- Comparando las frecuencias obtenidas del Análisis Modal con las frecuencias de paso de las palas y las del viento para ambas estructuras, se observa que la posibilidad de resonancia es remota.

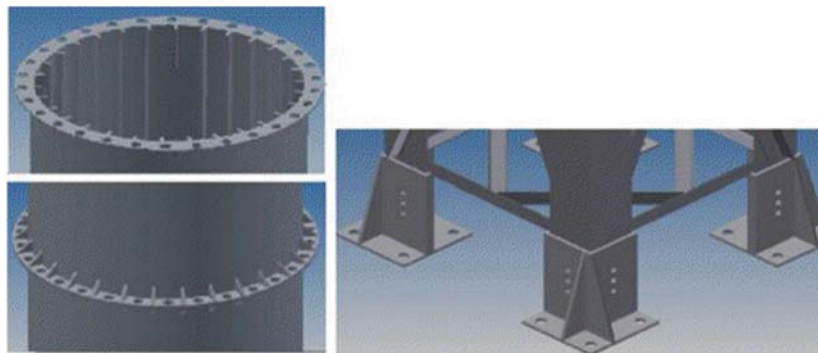


Fig. 8. Propuesta de refuerzos para la torre tubular (a la izquierda), y para la reticular (derecha)

Consideraciones sobre el costo de las estructuras propuestas

Se evaluaron los costos de producción de las torres propuestas, con el objetivo de estimar la factibilidad de la construcción de cada una y así poder brindar un argumento más para la selección del modelo idóneo para la puesta en operación (Tablas 3 y 4).

Tabla 3. Materiales para la confección de la torre reticulada

Tipo de elemento	Cantidad	Precio unitario, USD	Costo, USD
Angular L150X150X10 mm (4 m de longitud)	20	58,20	1 164,00
Angular L50X50X4 mm (2 m de longitud)	80	5,22	417,60
Angular L50X50X4 mm (0,79 m de longitud)	80	2,61	208,80
Tornillo M20	160	0,20	32,00
Tornillo M30	32	0,24	7,68
Total			1 830,08

Tabla 4. Materiales para la confección de la torre tubular

Tipo de elemento	Cantidad	Precio unitario, USD	Costo, USD
Plancha de acero 1500X6000X10 mm	6	710,00	4 260,00
Bridas de unión	11	43,25	475,75
Tornillo M30	165	0,24	39,60
Total			4 775,35

Se calculó el salario del personal vinculado a la producción según la clasificación y la cantidad de operarios que intervienen en su construcción, así como la tarifa horaria aplicada y las horas trabajadas. De ello se obtiene

que para un total de 29,786 horas de trabajo para la torre tubular, el salario básico es de 60,62 CUP, y para la torre reticulada un total de 18,692 horas de trabajo para un salario básico de 49,04 CUP. El salario complementario viene dado a partir del salario básico multiplicado por un coeficiente asociado a vacaciones pagadas de 0,09, y de 4,41 y 5,45 para las torres reticular y tubular, respectivamente.

Se adicionan los costos directos e indirectos y se obtiene el costo total de producción en la tabla 5.

Tabla 5. Costo total de la producción de las torres

Costo total	Torre reticulada		Torre tubular	
	CUP	USD	CUP	USD
	115,20	1 830,08	142,39	4 775,35

Tabla 6. Precios de las torres para pequeños aerogeneradores en el mercado mundial, (2013)

Tipo de torre	Importe, USD
Reticular autosoportada (15 m)	3 500,00
Tubular con vientos	6 240,00

De las tablas 3, 4 y 5 se concluye que la fabricación de la torre reticular representa casi 2 000 USD de ahorro con respecto a la torre tubular. No obstante, la fabricación en el país de cualquiera de las dos propuestas es más económica que las importadas. En el precio de las torres similares no están incluidos el transporte hasta el país ni los impuestos aduanales correspondientes.

Conclusiones

- Para la torre tubular se considera como ventaja la condición mecánica a resistencia y sobre todo a estabilidad, después de efectuar un refuerzo en su base. Pero presenta inconvenientes en lo económico debido a lo engorroso del proceso tecnológico de su confección y a la forma de transporte y emplazamiento debido a sus 4 743,11 kg de peso, además de los costosos mantenimientos que demanda dicha tecnología.

- La torre reticulada presenta peores condiciones de resistencia y estabilidad que la tubular, pero resiste las exigencias de operación impuestas. A su favor presenta un peso de 3 032,01 kg, el cual puede ser repartido en porciones para su transporte, debido a que la estructura reticular de la torre permite ser desarmada completamente. Por tanto, no necesita de grandes medios de transporte hasta el lugar de emplazamiento. También presenta ventajas en lo económico por no requerir de una infraestructura compleja para su fabricación. Además, utiliza mucho menos acero que la torre tubular, lo que le da una diferencia considerable en el precio.

Bibliografía

- BORNAY, J. Y. D. (2002). «Torres basculantes y autosoportadas», en *Manual de Instrucciones y Montaje*. 2002.
- LIMA ORTIZ, MARTHA (2014). «Diseño de torre para aerogeneradores de baja potencia». Tutor Dr. Jorge Rodríguez, Tesis de Maestría, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, La Habana, 2014.
- NC-285, Norma Cubana (2003). *Cargas producidas por el viento. Método de cálculo*. La Habana: 2003.
- PISARENKO, G. S. (1979). *Manual de resistencia de materiales*. Moscú: Ed. Mir, 1979.
- Saffir-Simpson Hurricane Scale* (2006). Consulta: 18.03.2011. Disponible en: www.nhc.noaa.gov/aboutsshs.shtml].
- TIA/EIA-222-F (1996). «Normas estructurales para torres y estructuras de acero para antenas», USA, 1996. Consultado: 18.03.2011. Disponible en: www.inti.gob.ar/cirsoc/pdf/publicom/Norma.pdf.
- TRUJILLO GUTIÉRREZ, ELIER (2013). «Diseño de torres de aerogenerador de baja potencia, 1,5 kW». Tutora: MSc. Luisa María Véliz. Tesis de Diploma, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, La Habana, 2013.
- VÉLIZ MARRERO, LUISA MARÍA (2011). «Evaluación de la vulnerabilidad física de una estructura tipo torre por el M.E.F», en *Revista Cubana de Ingeniería*, 2(2) (17-23): 2011.
- (2012). «Criterios para la sustitución de torres vulnerables a vientos de huracanes», en *16 Convención Científica de Ingeniería y Arquitectura*, 2012.

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

DIRECTOR GENERAL:

Dr. Luis Bérriz Pérez.

DIRECTOR:

M.Sc. Manuel Álvarez González.

EDITOR JEFE:

M.Sc. Alejandro Montesinos Larrosa.

EDITORA:

M.Sc. Madelaine Vázquez Gálvez.

CORRECCIÓN:

Ing. Jorge Santamarina Guerra.

CONSEJO EDITORIAL:

Dr. Luis Bérriz Pérez.

M.Sc. Manuel Álvarez González.

Dr. Conrado Moreno Figueredo.

M.Sc. Manuel Fernández Rondón.

M.Sc. Alejandro Montesinos Larrosa.

M.Sc. Daniel López Aldama

CONSEJO ASESOR:

Dra. Elena Vigil Santos.

Dr. Conrado Moreno Figueredo.

Dr. Sergio Corp Linares.

Dr. José Guardado Chacón.

Dr. Deny Oliva Merecio.

Dra. Dania González Couret.

Dr. Juan José Paretas.

Lic. Bruno Henríquez Pérez.

M.Sc. Leonor Turtós Carbonell.

M.Sc. Alejandro Montesinos Larrosa.

Lic. Ricardo Bérriz Valle.

Dr. David Pérez Martín.

Dr. César Cisnero Ramírez

DISEÑO ELECTRÓNICO:

D.I. Antonio Romillo Polaino.

WEB MASTER:

M.Sc. Fernando González Prieto.



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

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

Teléfono: (537) 205-9949.

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

e-mail: editora@cubasolar.cu

<http://www.cubasolar.cu>