



REVISTA CIENTÍFICA TRIMESTAL DE CUBASOLAR

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

51



Terremotos fuertes en el archipiélago cubano durante 1501-2010	1
Arquitectura y clima. Contradicciones en Cuba	15
Métodos de sincronización de convertidores con la red eléctrica	32
Modelación y simulación de la gasificación de la cáscara de arroz en un reactor <i>downdraft</i>	44
Análisis y diseño de biodigestores de ferrocemento. Comparación económica.....	62
Estudio de modelo cubano de torre autosoportada en túnel de viento	71

Terremotos fuertes en el archipiélago cubano durante 1501-2010

Strong earthquakes in the Cuban archipelago in the period 1501-2010

*Por Dr. Tomás J. Chuy Rodríguez**

** Doctor en Ciencias Geofísicas, Profesor Titular de la Universidad de Oriente e Investigador Titular del Centro Nacional de Investigaciones Sismológicas (Cenais), Cuba.
e-mail: chuy@cenais.cu*

Resumen

Se caracteriza el comportamiento de la actividad sísmica en el archipiélago cubano en todo su período histórico, con el objetivo de poder valorar de esta forma el comportamiento espacio-temporal-energético de los terremotos en el territorio con fines de la peligrosidad sísmica del país. En los casos de los sismos más significativos de las tres regiones del país ocurridos en ese período (intensidad > 6,0 grados MSK), se presentan criterios sobre el comportamiento de la atenuación de la intensidad sísmica y las diferentes zonas de afectación. Como un complemento a esta información, se muestran algunos elementos de la sismicidad de las zonas en que estos terremotos se produjeron y la importancia de continuar su monitoreo.

Palabras claves: Intensidad, atenuación sísmica, líneas isosistas

Abstract

The current paper characterizes the seismic activity in the Cuban archipelago throughout its historical period, with the objective of assessing the spatio-temporal and energy behavior of earthquakes in the territory. The purpose is evaluating the seismic danger of the country. In the cases of the most significant earthquakes occurred in the three regions of the country in that period (intensity > 6.0 MSK degrees), criteria are presented on the behavior of the attenuation of the seismic intensity and the different affected areas. As complementary information, some elements of the seismicity of the zones in which these earthquakes occurred and the importance of continuing their monitoring are shown.

Keywords: Intensity, seismic attenuation, isosist lines

Introducción

El análisis espacio-temporal de los parámetros de la relación magnitud-frecuencia posibilita conocer con mayor precisión el comportamiento de la sismicidad y potencialidad de una zona sismoactiva y sus regularidades. En

estudios realizados en Cuba por Chuy [1980] y Álvarez [1983], se utilizaron diferentes intervalos espaciales, temporales y de magnitud, así como del número de estaciones utilizadas, como elemento para la discusión y evaluación de los resultados. La metodología para la obtención de esas estimaciones estuvo basada en el empleo de métodos estadísticos.

En zonas tradicionalmente sismoactivas como la parte suroriental del archipiélago cubano, los estudios del proceso y el régimen sísmico para la estimación de los parámetros de la frecuencia de ocurrencia de los terremotos, es decir, la función Gutenberg y Richter $N(M)$, conocida también como relación magnitud-frecuencia, contiene como principal incertidumbre la fijación de intervalos espaciales (latitud, longitud y profundidad), temporales (rangos de tiempo para el análisis) y de magnitud.

Terremotos moderados e inclusive pequeños, pueden tornarse catastróficos cuando ocurren en lugares con una alta concentración de población e infraestructura no preparada para recibir su impacto. La ocurrencia de un terremoto potencialmente destructivo puede tener consecuencias graves para el desarrollo sostenible de una comunidad, por lo que el conocimiento por parte de esta y las autoridades competentes de los factores amenazantes, les permitirá adoptar las medidas adecuadas para enfrentar esas manifestaciones de la naturaleza.

Caracterización de sismos perceptibles significativos

Es de especial interés significar que de los sismos significativos reportados en Cuba, 2 de ellos produjeron intensidad 9,0 MSK en áreas de la provincia de Santiago de Cuba en 1766 (Magnitud Richter $M_s = 7,6$) y 1852 ($M_s = 7,3$), reportándose de ambos considerables daños en toda la región oriental [Chuy, 1999]. Sin embargo, la sismicidad de «interior de placa» también se manifiesta en las zonas sismogénicas de baja actividad distribuidas en el resto del territorio nacional. A pesar de presentar una menor frecuencia la ocurrencia de terremotos en ellas, su ubicación cercana a las costas en los casos de que se localicen en las acuatorias o bien en el interior del territorio, así como la poca profundidad de los hipocentros de los sismos que se generan en ellas, hacen que en ocasiones los efectos de sismos de menor magnitud reporten afectaciones significativas (Tabla 1).

Tabla 1. Terremotos con intensidades mayores que 6,0 MSK-EMS con epicentro reportado en Cuba. Período 1501-2010

Fecha	Intensidad sísmica MSK-EMS							Total
	6,0	6,5	7,0	7,5	8,0	8,5	9,0	
1501-1600	1	-	1	-	2	-	-	4
1601-1700	-	-	3	-	1	-	-	4
1701-1800	2	-	2	-	1	-	1	6
1801-1900	6	1	3	-	2	-	1	13
1901-2000	32	-	9	-	2	-	-	43
2001-2010	3	-	-	-	-	-	-	3
Total	44	1	18	-	8	-	2	73

Es así que se reportan sismos [Chuy, 1999] como el de 1880 ($M_s = 6,0$) que produjo 8,0 grados MSK en la zona de San Cristóbal (Fig. 1), afectaciones de $I = 6,0$ en La Habana y se extendió su área de perceptibilidad hasta Cienfuegos; el de 1982 ($M_s = 5,0$) produjo 6,0 grados MSK en la zona de Torriente-Jagüey Grande, reportándose inclusive en puntos aislados afectaciones de 7,0 grados (Fig. 2); el de 1939 ($M_s = 5,6$) produjo $I = 7,0$ grados en la zona de Remedios-Caibarién (Fig. 3); el de 1943 ($M_s = 4,6$) fue el último de los sismos de $I = 6,0$ grados que se han producido en la zona de Trinidad (Fig. 4); el de 1953 ($M_s = 3,9$) produjo 6,0 grados MSK en Morón (Fig. 5); el de 1974 ($M_s = 4,0$) produjo 6,0 grados en Esmeralda (Fig. 6); el de 1914 ($M_s = 6,2$) produjo 7,0 grados en Gibara (Fig. 7) y su área de perceptibilidad se extendió hasta Sagua la Grande-Corralillo, zona en la que en las décadas de los 80 y 90 se han reportado epicentros de sismos que han producido intensidades de 5,0 grados MSK en varias ocasiones.

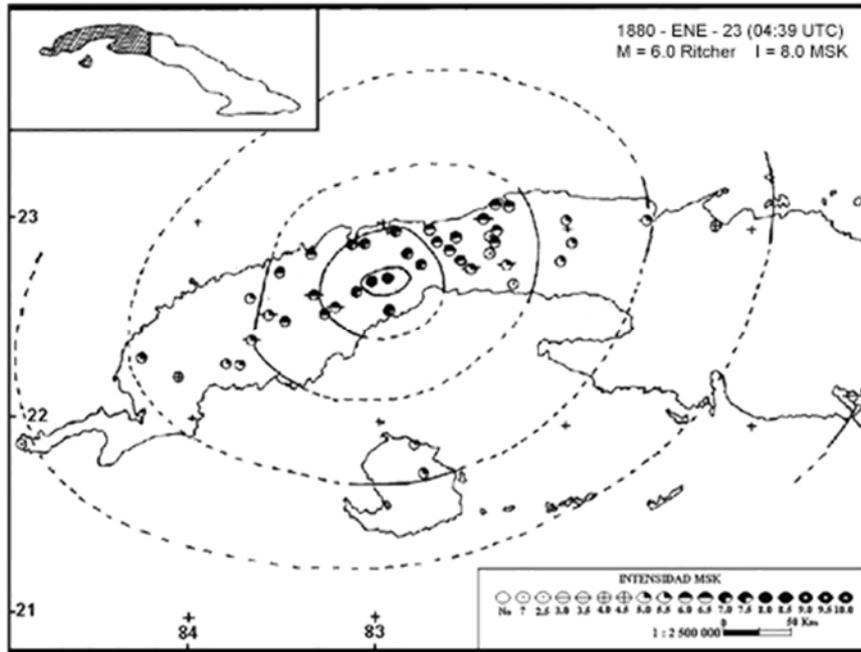


Fig. 1. Mapa de isosistas del sismo de 8,0 grados MSK de San Cristóbal de 1880. La leyenda de intensidades marca los puntos en que se reportó este evento y con qué grado.

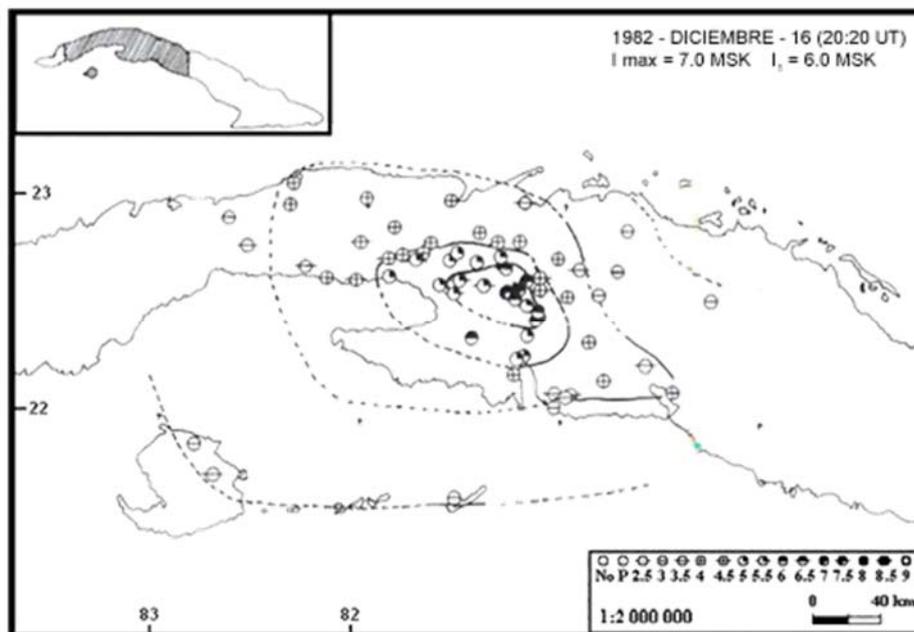


Fig. 2. Mapa de isosistas del sismo de 6,0 grados MSK de Jagüey Grande de 1982. La leyenda de intensidades marca los puntos en que se reportó este evento y con qué grado.

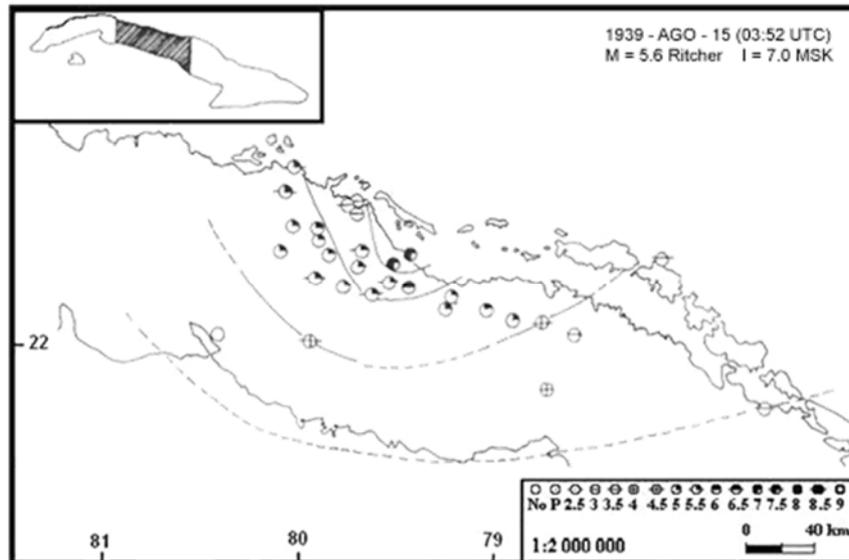


Fig. 3. Mapa de isosistas del sismo de 7,0 grados MSK de Remedios-Caibarién de 1939. La leyenda de intensidades marca los puntos en que se reportó este evento y con qué grado.

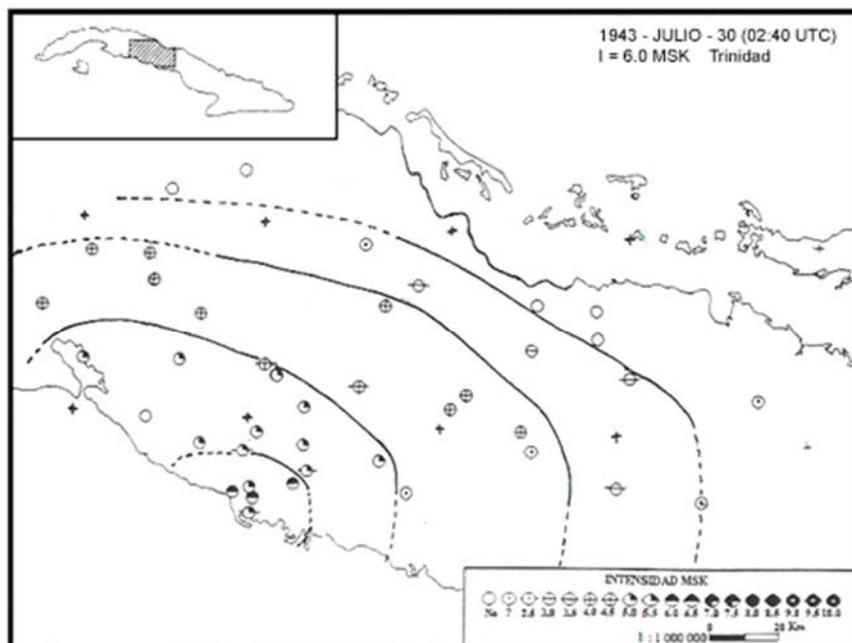


Fig. 4. Mapa de isosistas del sismo de 6,0 grados MSK de Trinidad de 1943. La leyenda de intensidades marca los puntos en que se reportó este evento y con qué grado.

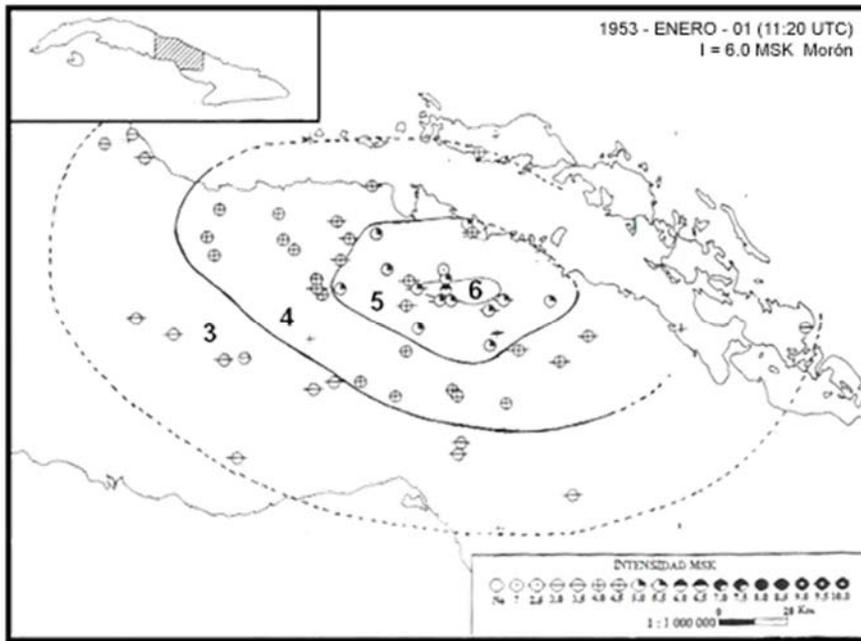


Fig. 5. Mapa de isosistas del sismo de 6,0 grados MSK de Morón de 1953. La leyenda de intensidades marca los puntos en que se reportó este evento y con qué grado.

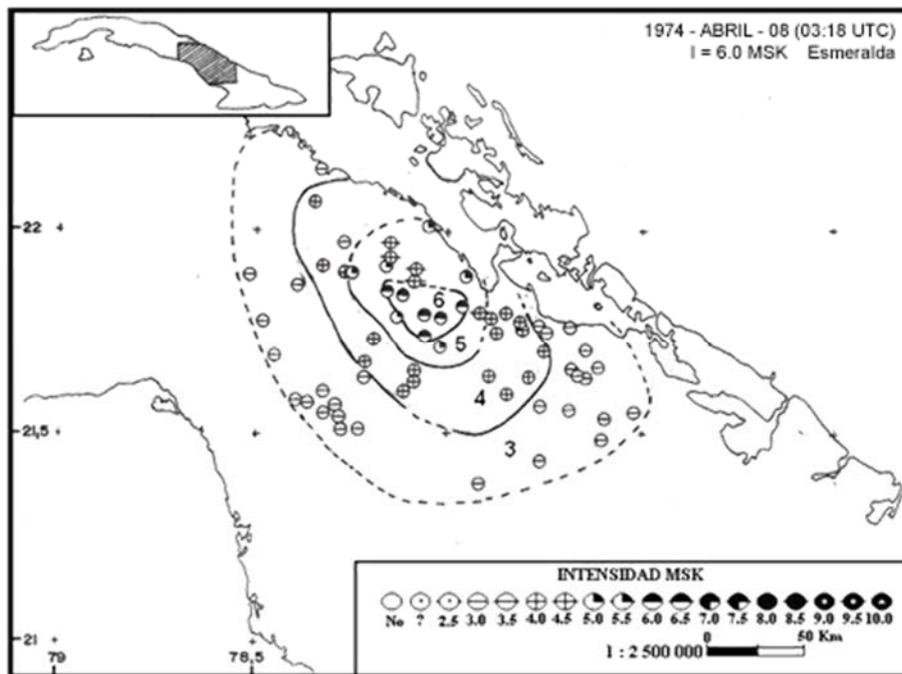


Fig. 6. Mapa de isosistas del sismo de 6,0 grados MSK de Esmeralda de 1974. La leyenda de intensidades marca los puntos en que se reportó este evento y con qué grado.

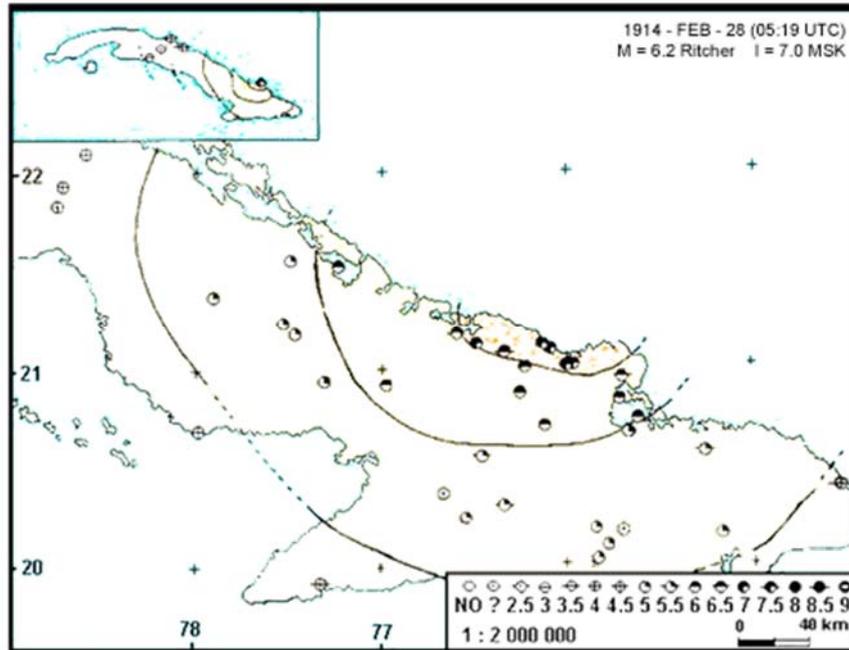


Fig. 7. Mapa de isosistas del sismo de 7,0 grados MSK de Gibara de 1914. La leyenda de intensidades marca los puntos en que se reportó este evento y con qué grado.

Así también, los más recientes que han afectado a toda la región oriental en su conjunto se reportan en 1932 ($M_s = 6,75$; $I = 8,0$) y 1947 ($M_s = 6,75$; $I = 7,0$) para la ciudad de Santiago de Cuba, y 1976 ($M_s = 5,7$; $I = 8,0$) y 1992 ($M_s = 7,0$; $I = 7,0$) para el sur de la provincia de Granma [Chuy, 1999]. De los terremotos fuertes reportados, solo estos 4 últimos y el de 1939 (Remedios-Caibarién) han sido registrados instrumentalmente.

Otros terremotos significativos reportados [Chuy, 1999] son el de 1551 ($M_s = 5,8$) que produjo 8,0 grados en la ciudad de Bayamo y los de 1992 ($M_s = 4,5$) y 1998 ($M_s = 5,4$) que produjeron 6,0 grados en Moa. Sismos recientes que deben ser objeto de conocimiento, son los de 5,0 grados de 1957 y 1981 en la zona de Pinar del Río-Alonso de Rojas (Fig. 8); los de 1953 y 1995 con $I = 5,0$ en Tapaste y Ganuza respectivamente (La Habana); el de 1970 de $I = 4,0$ en Sancti Spíritus; el de 1953 con $I = 5,5$ en Velazco; entre otros, así como los de 1973 en Nuevitas, 1978 de Nueva Gerona y 2000 en Varadero (Fig. 9), por citar los más recientes.

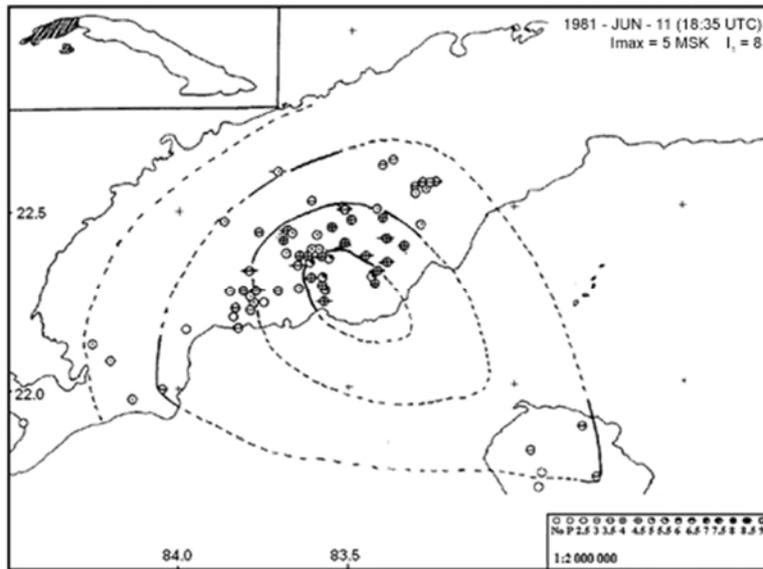


Fig. 8. Mapa de isosistas del sismo de 5,0 grados MSK de Alonso de Rojas de 1981. La leyenda de intensidades marca los puntos en que se reportó este evento y con qué grado.

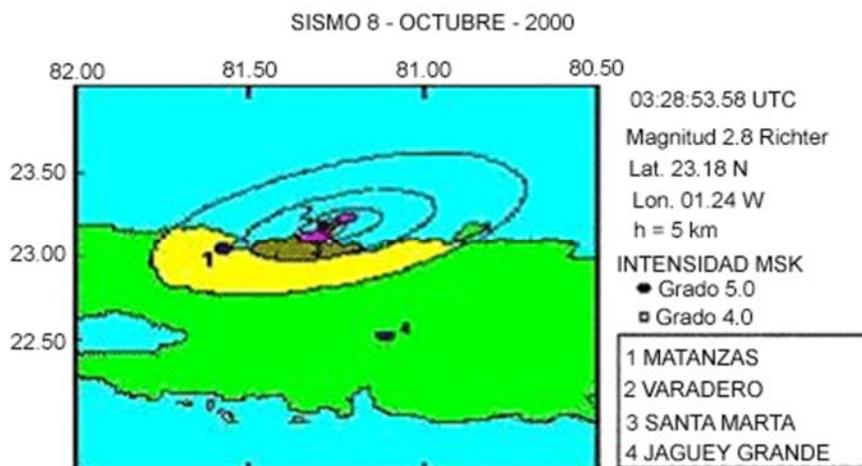


Fig. 9. Mapa de isosistas del sismo de 5,0 grados MSK de Varadero de 2000. La leyenda de intensidades marca los puntos en que se reportó este evento y con qué grado

Todo esto incide, prácticamente, en que no pueda considerarse sin reportes de perceptibilidad de terremotos ninguna zona del territorio nacional, lo que se refleja en el Mapa de Intensidades Máximas Reportadas en Cuba (Fig. 10). En este Mapa se conjugan las áreas pleistosísticas (áreas de perceptibilidad) conocidas de los terremotos que tienen mapa de isosistas confeccionado y los datos de los epicentros más significativos por regiones, para dar el valor máximo reportado de intensidad en todo el territorio

nacional y precisar con ello el nivel de amenaza ya conocido. Este mapa solo ha sufrido una modificación en ocasión del sismo de 1992 que se le añadió un sector con 7,0 grados MSK en la zona de Cabo Cruz.



Fig. 10. Mapa de intensidades máximas reportadas 1501-2010.

Atenuación sísmica de Cuba

Se presentan los resultados del análisis para el intervalo de 1501 al 2010, especialmente después del 1998, período en el cual se trabajó con estaciones digitales y una red de estaciones que aportaba una cobertura adecuada por proyecto para terremotos con magnitudes de 2,0 Richter. Los intervalos de tiempo considerados se ajustaron al período en que se tenía toda la data revisada e integrada.

Otro elemento considerado es que en el archipiélago cubano se presentan dos formas de génesis de sismos: de «entre placas» y de «interior de placa». Ambos tipos de sismicidad corresponden a la actividad sísmica que se genera en estructuras tectónicas distribuidas en todo nuestro territorio. En la figura 11 (Tabla 2) se muestran las estructuras activas (zonas sismogénicas), que pueden generar sismos de magnitud $M \geq 5$, correspondiendo las numeradas como 23, 24, 25, 26, 27, 39 y 44, a la zona de fallas Bartlett-Caimán, de categoría 1, que presenta sismicidad del tipo de «entre placas».



Fig. 11. Mapa de las principales zonas sismogénicas de Cuba con sus categorías correspondientes, en función de la magnitud máxima que pueden alcanzar
Fuente: [Álvarez y Chuy, 1985].

Esto significa que en nuestro territorio no existe el mismo nivel de atenuación sísmica en términos de intensidad en todas sus partes, así también que la sismicidad de diferentes regiones es completamente distinta, destacándose en este último caso el de la región suroriental por la frecuencia con que ocurren terremotos, y los valores altos de magnitud e intensidad alcanzados históricamente. Esta región se corresponde con la estructura de Bartlett-Caimán (Oriente); señalándose en la misma 22 reportes de terremotos fuertes [Chuy, 1999].

Se destaca la relación de atenuación de Fedotov y Shumilina [1971] y que se ha demostrado prácticamente su utilidad en el caso de las Antillas Mayores, para los que Álvarez y Chuy [1985] plantearon su modelo de atenuación, cuya forma es:

$$I = 1,5 M - 2,63 \log r - 0,0087 r + 2,5$$

Donde:

r: Distancia hipocentral

I: Intensidad

M: Magnitud del terremoto

Debe señalarse que las relaciones del tipo $I = f(M_s)$ o $I = f(M_s, r)$ no tienen una solución única, sino que en la práctica determinan un intervalo de magnitudes, debido a que a cada valor de intensidad *I* le corresponde a un intervalo ($I - 0,5, I + 0,5$) por el propio error implícito en la determinación de los grados [Chuy, 2003 y 2004].

Tabla 2. Parámetros de atenuación de las zonas sismogénicas de Cuba en términos de Intensidad Sísmica

No.	Zona Sismogénica (ZS)	A/B	DV	Az (p)	H (cs)	Mmax
1	Norte Cubana Occidental 1	(1,5)	(A)	40	10	5,3
2	Norte Cubana Occidental 2	(1,5)	(A)	30 (10)	10	5,5
3	Norte Cubana Occidental 3	(1,5)	(A)	25 (3)	10	5,2
4	Hicacos	(1,7)	(A)	30	10	5,5
5	Consolación del Norte	(1,5)	(A)	50 (15)	20	5,5
6	Pinar 1	1,5	A	55 (20)	15	6,2
7	Pinar 2	(1,5)	(A)	35	10	5,0
8	Bejucal Madruga Coliseo	1,7	A	5 (25)	10	5,2
9	Bahía de Cochinos	1,7	A	70	20	5,5
10	Río Hondo	1,3	A	45	10	5,0
11	Cienfuegos	1,7	A	35	10	5,5
12	Trinidad Fomento	1,4	A	40	10	5,0
13	Cienfuegos Santa Clara	(1,4)	(A)	45	10	5,0
14	Norte Cubana Occidental 4	1,6	A	30 (10)	20	4,7
15	Camagüey	1,5	A	40	10	5,0
16	Santa Cruz	(1,5)	(A)	25	15	5,1
17	Norte Escambray	1,5	M	45	15	5,5
18	Cubitas 3	1,6	A	45	10	5,5
19	Sur Cubana	1,5	M	35 (10)	15	6,5

20	La Trocha	2,3	M	20	15	6,0
21	Sutura Central 1	2,1	A	25	10	5,8
22	Sutura Central 2	1,6	A	35	10	5,8
23	Oriente 1	1,8	M	0	35	8,0
24	Oriente 1 (subzona)	1,5	M	0	35	8,0
25	Oriente 2	1,3	A	5	30	7,6
26	Oriente 2 (subzona)	2,0	M	5	30	7,6
27	Oriente 3	1,8	M	5	40	7,6
28	Cauto Nipe	1,7	A	20	20	7,0
29	Cauto Norte	1,4	A	10	20	6,5
30	Sabana 1	2,4	M	25	35	7,0
31	Sabana 2	1,5	M	20	35	6,5
32	Sabana 3	(1,2)	A	40	25	6,0
33	Purial	2,1	M	40	15	6,5
34	Guaso	1,5	A	10	10	5,0
35	Palenque	(1,5)	(A)	5	10	5,0
36	Santiago Moa	(1,5)	(A)	50	10	5,0
37	Santiago Bayamo	1,6	A	25	15	5,5
38	Bayamo	1,3	A	65	25	6,5
39	Baconao 1	1,6	A	25	25	7,0
40	Baconao 2	1,2	A	50	15	6,0

41	Baconao 3	(1,2)	(A)	50	15	6,0
42	Cubitas 1	1,8	A	0	20	5,5
43	Cubitas 2	(1,8)	(A)	5	20	5,5
44	Caimán	2,0	M	5	30	7,6

Donde:

M_{max} y $H(cs)$, por [Orbera, et al., 1990; Chuy, et al., 1992, y González, et al., 1994]

A/B : Razón entre los ejes mayor y menor de la elipse modelada

DV : Dirección de Validez para el cálculo de r

$Az(p)$: Azimut de la ZS medido desde EW según manecillas del reloj

$H(cs)$ y M_{max} : Profundidad (capa sismoactiva) y magnitud máxima (ZS)

Conclusiones

- Se valoraron las características de la atenuación sísmica del archipiélago cubano en términos de intensidad sísmica.
- Se reportan los 73 sismos de intensidad $I > 6,0$ grados MSK - EMS que han afectado nuestro territorio en toda su historia sísmica conocida (1501-2010) [Chuy, 1999; Álvarez, et al., 1999, y Servicio..., 2013].
- Se reflejan las áreas pleistósicas de algunos sismos significativos ocurridos en el territorio nacional.

Bibliografía

ÁLVAREZ, J. L. (1983). «Estimación de la peligrosidad sísmica para Santiago de Cuba», en *Investigaciones Sismológicas en Cuba*, 4 (87-123): 1983.

ÁLVAREZ, J. L. Y T. J. CHUY (1985). «Isoseismal Model for Greater Antilles», en *Proceedings of the 3erd. International Symposium on the Analysis of Seismicity and Seismic Risk*, Liblice Castle, Czechoslovaquia, 1985. Pp. 134-141.

ÁLVAREZ, J. L.; T. J. CHUY, J. GARCÍA, B. MORENO, H. ÁLVAREZ, M. BLANCO, et al. (1999). An Earthquake Catalogue of Cuba and Neighboring Areas. IC/IR/99/1, Internal Report, Unesco-IAEA-ICTP, Miramare, Trieste, 1999. 60 pp.

CHUY, T. J. (1980). «Régimen sísmico de la región Suroriental de Cuba», en *Investigaciones Sismológicas en Cuba*, 1 (58-68): 1980.

- CHUY, T. J. (1999). «Macrosísmica de Cuba y su aplicación en los estimados de peligrosidad y microzonación sísmica». Tesis en opción al Grado de Doctor en Ciencias Geofísicas. Fondos del MES, IGA y Cenais, 1999.
- CHUY, T. J. (2003). «Caracterización del proceso de liberación de las deformaciones en las principales zonas sismogénicas de Cuba», en *Memorias del V Congreso de Minería y Geología (GEOMIN 2003)*. La Habana: 2003. ISBN 959-7117-11-8. 11 pp.
- CHUY, T. J. (2004). «Terremotos fuertes y peligrosidad sísmica de Cuba», en *Memorias de la 12 Convención Científica de Ingeniería y Arquitectura (III TIARD)*. La Habana: Ispjae, 2004. ISBN 959-261-169-6. 10 pp.
- CHUY, T. J. Y J. L. ÁLVAREZ (1995). «Peligrosidad sísmica de Cuba con fines del código sismorresistente cubano». Fondos del Cenais y del X Forum Nacional de Ciencia y Técnica, 1995.
- CHUY, T. J.; J. L. ÁLVAREZ, J. A. ZAPATA, B. E. GONZÁLEZ, et al. (1992). *Estudio Sismológico Complejo del Complejo Hidroenergético Toa-Duaba. Reporte de investigación*. Fondos del Cenais y de Energoproyecto, 1992.
- CHUY, T. J.; B. E. GONZÁLEZ Y L. ORBERA (1994). «Seismicity and Seismic Hazard Assessment for Western Cuba», en *Geología y Minería*, v. XI, 3 (45-51): 1994.
- CHUY, T. J.; L. ORBERA, J. R. HERNÁNDEZ, A. MAGAZ, F. SÁNCHEZ, et al. (1997). «Dictamen Conclusivo. Comisión Ad-hoc para la determinación de las Zonas Sismogénicas de la región Oriental de Cuba y zonas aledañas», en *Ciencia en su PC*, v. 2, no. 2, 1997. ISSN 1027-2887.
- FEDOTOV, S. A. Y L. S. SHUMILINA (1971). «Sacudibilidad Sísmica de la Kamchatka» [en ruso]. Noticias de la AC de la URSS, *Fizika Zemli*, 9 (3-15): 1971.
- GONZÁLEZ, B. E.; T. J. CHUY, J. L. ÁLVAREZ, et al. (1994). *Estudio Sismológico Complejo de la región central de Cuba para la ubicación de reservorios nucleares*. Fondos del Cenais y del MINBAS, 1994.
- Servicio Sismológico Nacional (2013). Fondo de Datos Instrumentales del Cenais.

Arquitectura y clima. Contradicciones en Cuba

Architecture and climate Contradictions in Cuba

*Por Dra.Cs. Arq. Dania González Couret**

** Doctora en Ciencias, arquitecta y profesora del Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría (Ispjae), Cuba.
e-mail: danial@arquitectura.cujae.edu.cu*

Resumen

A pesar de las acciones que se desarrollan a escala internacional para mitigar los efectos del cambio climático y la pérdida de la biodiversidad, derivados de la crisis ecológica de finales del pasado siglo, la arquitectura cubana contemporánea ha perdido su tradición adoptando modelos foráneos. El trabajo presenta los resultados de varias investigaciones dirigidas a caracterizar y evaluar la arquitectura cubana en su evolución, desde el punto de vista de su adecuación a las condiciones climáticas. Para ello se combinan métodos de la investigación teórica con trabajos empíricos desarrollados y dirigidos por la autora durante varias décadas, así como otros resultados de investigaciones precedentes. La discusión de los resultados permite demostrar la calidad de la tradición arquitectónica cubana y la necesidad de su rescate como principio esencial para la adaptación al cambio climático.

Palabras claves: Arquitectura, clima, diseño bioclimático, Cuba

Abstract

In spite of the actions developed at worldwide scale to mitigate the effects of climate change and biodiversity loss, resulting from the ecological crisis of the end of the last century, contemporary Cuban architecture has lost its tradition by adopting foreign models. This paper presents the results of several investigations aimed at characterizing and evaluating Cuban architecture in its evolution, from the point of view of its adaptation to climatic conditions. For this purpose, methods of theoretical research are combined with empirical works developed and directed by the author for several decades, as well as other results of previous research. The discussion of the results demonstrates the quality of the Cuban architectural tradition and the need for its rescue as an essential principle for adapting to climate change.

Keywords: Architecture, clima, bioclimatic design, Cuba

Introducción

El consumo de energía generada a partir de la explotación de los combustibles fósiles ha sido un factor determinante en la crisis ecológica mundial, que condujo a la formulación del modelo de desarrollo sustentable a finales del pasado siglo. El llamado «pico del petróleo» significa el fin de la era de los combustibles fósiles, o al menos, del petróleo «barato».

Consecuencias de la crisis ecológica son el cambio climático y la pérdida de la biodiversidad. Entre las acciones que se desarrollan a escala internacional con vistas a mitigar sus efectos se encuentran el movimiento Arquitectura 2030 impulsado por el arquitecto norteamericano Edward Mazria [Mazria, 2012], el objetivo 20-20-20 de la Comunidad Europea, así como las ciudades neutrales y los edificios de energía cero (o casi cero) [Montes de Oca, 2011]. Todos persiguen entre otros propósitos, reducir el consumo de energía en el medio ambiente construido y sustituir la que proviene de los combustibles fósiles por la generada mediante fuentes renovables.

Aunque el cambio climático es inevitable como consecuencia de las emisiones de CO₂ generadas por la humanidad principalmente durante los últimos 50 años, estas acciones contribuirán a mitigar sus efectos para el próximo siglo. Por tanto, no solo será necesario mitigar sus efectos, sino adaptarse a ellos, lo cual requiere de importantes transformaciones en el medio construido presente y futuro.

Sin embargo, la arquitectura cubana transita por un camino opuesto, caracterizado por la pérdida de la tradición y la adopción de modelos foráneos no apropiados al clima. El trabajo presenta los resultados de varias investigaciones enfocadas en la caracterización y evaluación de la arquitectura cubana y su evolución, desde el punto de vista de su adecuación a las condiciones climáticas.

Materiales y métodos

La presente investigación se ha desarrollado a lo largo de varias décadas, aplicando diversos métodos de la investigación teórica y empírica. Se parte, por un lado, de un ordenamiento histórico de la evolución de la arquitectura cubana, tanto la culta como la popular, a partir de la revisión documental, la investigación teórica (método histórico) y la observación de la realidad. Por otro lado, se toma como base el modelo propuesto en la literatura internacional y las investigaciones precedentes con respecto a la arquitectura bioclimática recomendable en las condiciones cubanas, así como la evolución de la teoría y la práctica del diseño bioclimático a escala internacional.

La comparación de ejemplos significativos de la evolución de la arquitectura cubana con el modelo de referencia, permitió arribar a una evaluación preliminar y detectar rasgos esenciales que se repiten a lo largo de la historia, cualquiera que sea la codificación formal de la época. Para corroborar la evaluación cualitativa inicial se tomaron en consideración resultados cuantitativos ofrecidos por investigaciones precedentes, u obtenidos mediante mediciones y trabajo empírico de campo.

Entre los resultados de investigaciones precedentes desarrolladas por otros autores que se han tomado como referencia en este trabajo se encuentran las investigaciones de Alfonso en los años 70 [Alfonso, 1979], las del Grupo de Física Ambiental del Micons en los 80 [Colectivo..., 1989], así como los estudios sobre el microclima de la ciudad compacta realizados en esa misma época [Alfonso, 1985, y Alfonso, et al., 1989].

Los trabajos empíricos desarrollados por la autora que han servido de base para la realización del presente artículo incluyen mediciones y simulaciones, tanto en zonas rurales como urbanas.

Las mediciones de temperatura y humedad en viviendas rurales ubicadas en el macizo Sagua-Baracoa en Guantánamo, como parte de los trabajos desarrollados para el Plan Turquino en 1987, contribuyeron a demostrar lo apropiado del clima interior en la vivienda rural que continuó la tradición de la arquitectura aborigen [González, 1991], mientras que las desarrolladas en viviendas del centro histórico en 1990 permitieron verificar la influencia de la volumetría y la orientación en el ambiente térmico interior de la arquitectura colonial [Castillo, et al., 1990].

La influencia del diseño arquitectónico en el ambiente térmico interior y en el consumo de energía por climatización en hoteles de sol y playa, fue simulada para demostrar los beneficios de la protección solar diseñada de acuerdo con la orientación y, por el contrario, los efectos negativos de la penetración solar a través de la envolvente [Rueda, 2003].

La influencia de la protección solar en un caso real objeto de estudio fue también simulada en el edificio de oficinas de la Inmobiliaria Almendares, donde quedó demostrado que por concepto de ahorro de energía el costo de los elementos de protección podía amortizarse en menos de dos años [Martínez, 2008].

Estos efectos fueron verificados nuevamente en 2013 mediante mediciones de temperatura y humedad en espacios interiores no protegidos de la Universidad de las Ciencias Informáticas, en comparación con los resultados simulados considerando la protección solar diseñada para tales efectos [Llovet, González y Rodríguez, 2013].

Estudios realizados en edificios de apartamentos ubicados en diferentes contextos urbanos también permitieron verificar la influencia de la solución volumétrico-espacial y los espacios de transición interior-exterior en el ambiente térmico y visual en espacios no climatizados. Para ello se realizaron simulaciones del ambiente térmico en el edificio proyectado en el Centro Histórico de Matanzas, ganador del Gran Premio en el Concurso Nacional de Diseño del Hábitat en 1999 [González, 2000]. También se efectuaron durante varios años mediciones de temperatura y humedad relativa, así como simulaciones de iluminación natural en espacios interiores de edificios de apartamentos con diferentes soluciones volumétricas en diversos contextos de la ciudad de La Habana: Centro Habana, Vedado y Miramar [González, 2005 y 2010].

Toda la investigación empírica mencionada sustenta las conclusiones a las que se arriba en cuanto al comportamiento bioclimático de la arquitectura cubana, cuyos resultados se analizaron en el presente artículo.

El conocimiento y la evaluación de las normas se consolidaron mediante el trabajo en el Comité Técnico de Normalización de Diseño Bioclimático desde su fundación hace más de 15 años, y los casos de estudio valorados son también el resultado de la información obtenida como miembro de los Comités de Expertos del Ministerio de la Construcción, en los cuales dichos proyectos fueron evaluados.

Se relaciona la investigación teórica y empírica desarrollada durante años, con la experiencia personal de la autora en órganos normativos y evaluadores de proyectos, para arribar a las reflexiones finales que se ofrecen este trabajo.

Resultados y discusión

Las estrategias de diseño bioclimático y su evolución

La arquitectura bioclimática que busca optimizar la relación entre el «bios», es decir, el ser humano que la habita, y el «clima» o las condiciones ambientales del contexto en que esta se inserta [Serra y Coch, 1994]. Aunque en teoría toda arquitectura debería ser bioclimática y por tanto, optimizar esa relación, esto no siempre ocurre en la práctica, por lo cual se generan consumos adicionales de energía para el acondicionamiento del ambiente térmico interior por medios artificiales, cuando el diseño arquitectónico no es capaz de garantizarlo por medios pasivos.

La clasificación de Köpen [Jansa, 1974], una de las más aceptadas a escala internacional, establece cinco tipos de climas: Tropical (A), Árido (B), Templado Cálido (C), Templado Frío (D) y Polar (E), y del comportamiento de las variables climáticas, fundamentalmente la temperatura del aire y la

humedad relativa, se derivan las estrategias de diseño sugeridas en cartas bioclimáticas como la de Givoni [1998].

Por ser Cuba una isla larga y estrecha que ocupa un reducido rango de latitudes, su clima es bastante uniforme, a pesar de que pueden distinguirse tres regiones climáticas (las costas, las zonas montañosas y la zona central). El clima cubano, clasificado por Köpen [Jansa, 1974] como Tropical, es cálido y húmedo, caracterizado por altos valores de temperatura del aire a lo largo del día y el año, elevadas humedades relativas y abundantes lluvias, lo que lo hace diferente de otros climas también cálidos pero secos, catalogados por el referido autor dentro de los Áridos.

La diferencia esencial entre los climas cálido-húmedos y los cálido-secos propios de zonas áridas y de desierto, consiste no tanto en los valores de temperatura (aunque en los segundos las temperaturas diurnas suelen ser mucho más elevadas que en los primeros), sino en la amplitud de la oscilación de sus valores máximos y mínimos a lo largo del día. Los climas cálido-secos se caracterizan por reducidos valores de la humedad relativa y cielos despejados con poca nubosidad que favorecen una elevada insolación y radiación diurnas, pero a la vez permiten que el calor absorbido sea irradiado hacia la bóveda celeste durante la noche. Es por ello que se produce una gran amplitud en la oscilación de los valores de las temperaturas del aire en el ciclo diario, de manera que hay calor por el día y frío en la noche.

Por el contrario, en los climas cálido-húmedos caracterizados por su elevada humedad relativa, nubosidad y precipitaciones, el cielo cubierto o parcialmente cubierto no permite una alta insolación diurna, aunque tampoco favorece la evacuación del calor hacia la bóveda celeste nocturna cubierta. Como resultado, la oscilación de la temperatura diaria en estos casos no rebasa los 10 grados, de manera que hay calor tanto por el día como por la noche, ya sea invierno o verano [Konya, 1981] (Fig. 1), y la sensación térmica percibida por las personas se hace más calurosa como consecuencia de la elevada humedad relativa que dificulta la evaporación de la transpiración, principal mecanismo de termorregulación del cuerpo humano.

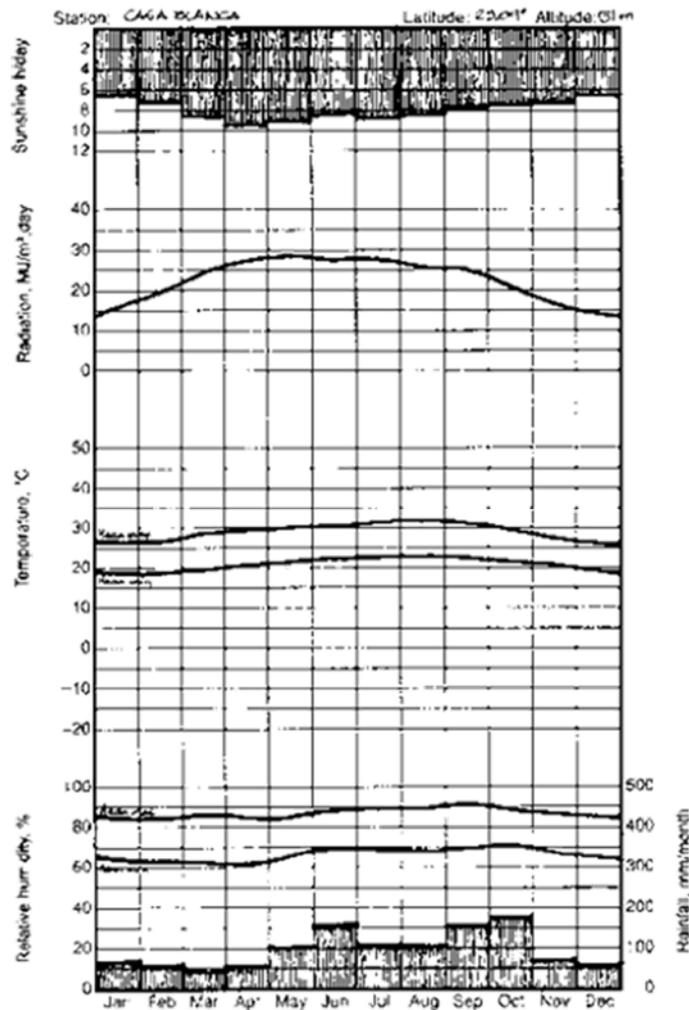
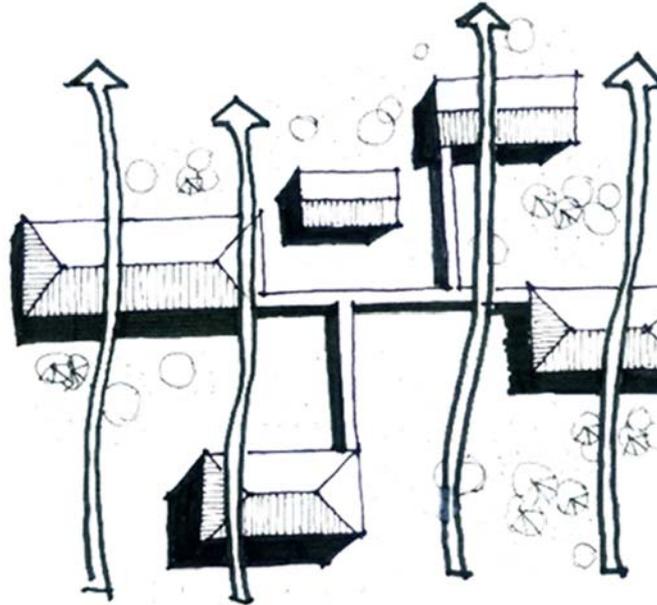


Fig. 1. Climograma de La Habana a partir de los Datos meteorológicos de Casablanca. Fuente: González [1999].

De las características del clima se derivan las estrategias de diseño bioclimático, que son más variadas en los climas cálido-secos, en los cuales es posible experimentar con recursos como la inercia térmica de la edificación, y del suelo, así como el enfriamiento evaporativo, pero en los cálido-húmedos las dos estrategias principales son reducir la ganancia térmica en la edificación y maximizar la ventilación natural.

Es por ello que el esquema de diseño bioclimático recomendable para Cuba se corresponde con el edificio aislado protegido del sol y permeable a la ventilación, lo cual es posible en zonas rurales y suburbanas, o en las urbanizaciones abiertas al estilo del movimiento moderno (Fig. 2). Sin embargo, los centros históricos de las ciudades tradicionales desarrolladas por los colonizadores españoles responden al modelo compacto mediterráneo más apropiado para los climas secos, en los que en lugar de

la ventilación cruzada predomina la inercia térmica de la masa edificada que permite generar microclimas en los patios interiores (Fig. 3).



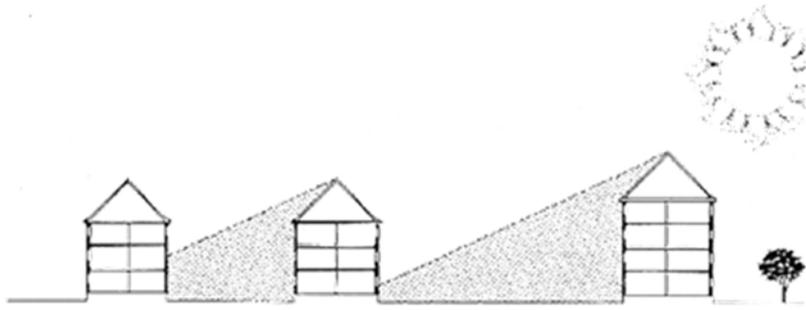
*Fig. 2. Esquema de diseño bioclimático recomendable para Cuba.
Fuente: Dibujo de Pedro Rodríguez a partir de ilustración de Konya [1981].*



*Fig. 3. Morfología urbana compacta del Centro Histórico de La Habana.
Fuente: Google Earth.*

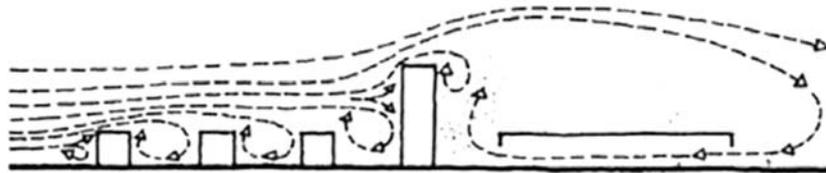
La ciudad tradicional compacta fue criticada por el movimiento higienista surgido en la Europa del siglo XIX y posteriormente por el urbanismo moderno como continuidad de aquel. Así, durante la primera mitad del siglo XX se abogó por una urbanización abierta donde los edificios estrechos

permitieran el acceso del sol a los espacios interiores y la separación entre ellos evitara las sombras arrojadas [Butti y Perlin, 1985] (Fig. 4).



*Fig. 4. Separación de edificios para evitar sombras arrojadas.
Fuente: Butti y Perlin [1985].*

Este modelo surgido en el norte de Europa se extendió a otras latitudes donde la justificación del acceso al sol fue sustituida por las facilidades de ventilación. Entonces, los edificios debían ser estrechos para que el viento los cruzara (ventilación cruzada), y estar lo suficientemente separados unos de otros para que este pudiera recuperarse (evitar la sombra de viento) (Fig. 5). Tanto la arquitectura como el urbanismo modernos guardaban una mayor relación con las estrategias de diseño bioclimático recomendadas para climas cálido-húmedos en todos los manuales, que las presentes en la morfología de la ciudad tradicional compacta.



*Fig. 5. Separación de edificios para permitir la recuperación del viento.
Fuente: Konya [1981].*

Sin embargo, los manuales de diseño bioclimático producidos durante las décadas de los 50, 60 e inclusive 70, copiaron los resultados de investigaciones realizadas en modelos de espacios o edificios aislados sometidos a flujos laminares en cámaras de humo o en túneles de viento, sin considerar que en la ciudad los edificios no se encuentran aislados y que el contexto urbano modifica no solo el comportamiento del viento, sino también el de las temperaturas, lo cual fue demostrado posteriormente al ser reconocido el efecto de la «isla de calor urbana».

Con el cuestionamiento del modelo urbano moderno y la revalorización de los valores de la ciudad tradicional que se produjo a escala internacional a

partir de finales de la década de los 70, comenzaron los estudios de microclima urbano y muchas afirmaciones anteriores fueron reconsideradas. Investigaciones conducidas en Cuba por Alfonso, et al. [1989] arrojaron resultados novedosos que demostraron que la ciudad compacta no era tan negativa como se pensaba ni la urbanización abierta tan favorable como se creía.

Los estudios sobre el microclima urbano que datan de hace apenas 30 años, continúan generando interrogantes a nivel mundial, y la mayoría de los edificios modernos que responden al estilo internacional, cuya construcción fue posible gracias al uso extensivo de sistemas de iluminación y climatización artificial, están siendo rehabilitados para mejorar su eficiencia energética, ya que de manera general constituyen altos consumidores.

La arquitectura tradicional cubana

La original arquitectura cubana, sin contaminación con influencias foráneas, fue desarrollada por los aborígenes que habitaban la isla antes del período colonial (Fig. 6). Esta era ejecutada a partir de maderas y fibras naturales disponibles localmente, y su forma respondía a las condiciones del medio y el clima. Las cubiertas inclinadas garantizaban una rápida evacuación de las abundantes lluvias; los materiales orgánicos en cubiertas y paredes eran poco absorbentes de la radiación solar y de baja transferencia térmica, por lo que dejaban pasar poco calor hacia el espacio interior, y las paredes resultaban permeables al paso del aire, favoreciendo la ventilación natural cruzada como mecanismo esencial para el balance térmico humano en climas cálido-húmedos como el de Cuba.



Fig. 6. Población Indoantillana. Grabado de Roberto Mateizán. Fuente: Alfonso, et al. [1985].

Los aborígenes cubanos nunca intentaron revestir sus estructuras de cujes con argamasa de tierra como fue necesario en las regiones andinas, en las que la inercia térmica de la envolvente arquitectónica resulta decisiva para retener el calor ganado durante el día con vistas a calentar los espacios interiores en el período nocturno.

Es conocido que los habitantes de la Isla antes de la llegada de los españoles, a diferencia de otras civilizaciones del continente americano, se encontraban en un estadio de desarrollo correspondiente a la comunidad primitiva, por lo que habitaban en aldeas. Es por ello que este modelo no sirve de referencia directa para el hábitat urbano, aunque ha continuado su desarrollo hasta hoy mediante el bohío como principal exponente de la vivienda rural cubana. Las primeras ciudades fueron fundadas en Cuba por los colonizadores españoles según el modelo mediterráneo, cuya forma y comportamiento térmico responde como se ha planteado, a mecanismos de termorregulación diferentes, tradicionalmente recomendados para climas secos.

No obstante, la arquitectura colonial cubana, que en sus inicios fue muy masiva y poco permeable, evolucionó para adecuarse mejor a las condiciones del clima, mediante el aumento de los puntales y los vanos, y la aparición de portales, galerías y balcones, así como persianas y vitrales, todo ello para maximizar la sombra y protección de lluvias, a la vez que tamizaba la luz y favorecía la ventilación (Fig. 7).



*Fig. 7. Vivienda colonial en Trinidad.
Fuente: Foto de la autora.*

Otras manifestaciones de la arquitectura vernácula, además de la rural, también responden al modelo recomendado. Tal es el caso de la vivienda de madera típica de los bateyes de centrales azucareros, o la de zonas costeras, levantada sobre pilotes, con cubiertas inclinadas, grandes aleros, portales y galerías, e inclusive con aberturas en los planos altos para la ventilación convectiva [González, 2004] (Fig. 8).



*Fig. 8. Vivienda de madera en Varadero.
Fuente: Foto de la autora*

La arquitectura del movimiento moderno en Cuba

La influencia del movimiento moderno comienza a apreciarse en la arquitectura cubana desde finales de la década de los 30, con la pérdida de la ornamentación ecléctica y la aparición de los elementos decorativos con énfasis en la horizontalidad propios del «stream line». Los años 40 constituyen una transición en la que de manera general se conservó la simetría, la macidez y la proporción vertical de los vanos, pero ya en la década de los 50 cristalizó una arquitectura que asumió totalmente los principios de composición del movimiento moderno y retomó la espacialidad y permeabilidad de la mejor arquitectura cubana anterior (Fig. 9).



Fig. 9. Casa de las Hermanas Farfante en Nuevo Vedado. Arq. Frank Martínez, 1955. Fuente: Foto de la autora.

Aunque en lugar de los materiales naturales se empleó el hormigón armado, se aprovecharon precisamente las bondades de este material para proporcionar continuidad espacial, así como grandes voladizos de protección solar y amplios vanos permeables al viento con persianas que permiten su regulación, y vitrales reinterpretados con formas geométricas que tamizan la luz.

La investigación y el sistema normativo

Cuba ha sido pionera en Latinoamérica en cuanto a la investigación, la formación académica y la actividad normativa en relación con el diseño bioclimático. Prueba de ello son los primeros estudios de Joaquín Rayo en los años 60; las investigaciones realizadas durante los años 70 y 80 en la Facultad de Arquitectura de La Habana, el Grupo de Física Ambiental del Ministerio de la Construcción y el Instituto de Higiene y Epidemiología, y la inclusión de estos temas en la formación de arquitectos desde los años 70.

Por otro lado, la labor en este sentido no solo se ha limitado a la investigación o la formación, sino que desde inicios de los años 80 se trabajó en la elaboración de normas para regular el control solar, la iluminación, el comportamiento térmico de los materiales de construcción, las variables climáticas y otras, algunas de las cuales fueron aprobadas. Sin embargo, aquellos documentos regulatorios iban fundamentalmente dirigidos a establecer métodos de cálculo y tal vez fue esa la razón que motivó que estos no fueran realmente aplicados en los proyectos.

Aunque el Grupo de Física Ambiental del Ministerio de la Construcción desapareció, han surgido en su lugar otras instituciones como el Comité Técnico de Diseño Bioclimático (CTN-40) que ha asumido la revisión de las primeras normas en este campo y su renovación, mientras que la investigación sobre estos temas se ha seguido desarrollando en el Instituto de Higiene y Epidemiología, en la Facultad de Arquitectura de La Habana y en otras Facultades de Construcción del país, a pesar de las dificultades económicas para la adquisición de software y equipos de medición adecuados.

La arquitectura cubana contemporánea

Como se ha pretendido demostrar, Cuba cuenta con una tradición arquitectónica de calidad en los diferentes períodos históricos, que constituye un buen referente de adecuación de los principios esenciales del diseño bioclimático para el clima cálido-húmedo a la arquitectura de diversas épocas. Sin embargo, a pesar de esa buena tradición, el sistema normativo y el trabajo desplegado en la investigación y la formación de profesionales, se aprecia una regresión en la arquitectura contemporánea con respecto a ese tema.

En un estudio de casos sobre proyectos ejecutados en La Habana entre 1998 y 2009 [Llovet, González y Rodríguez, 2013], se pudo apreciar que a pesar de los dictámenes negativos de los comités de expertos a los que fueron sometidos, las obras presentan exceso de superficies vidriadas expuestas al sol sin protección, que no cumplen las normas vigentes [NC..., 2009] y generan reflexiones indeseadas hacia el contexto urbano, así como penetración de la radiación solar directa en los espacios interiores, lo que provoca deslumbramiento e incrementa el consumo energético de los sistemas de climatización artificial (Fig. 10).



Fig. 10. Colegio de San Gerónimo en el Centro Histórico de La Habana. Fuente: Foto de la autora.

La interrogante es entonces, ¿por qué a pesar de la buena tradición, el sistema normativo, la investigación y la formación, la arquitectura cubana contemporánea no ofrece soluciones que se adecuen al clima para lograr ambientes interiores apropiados que contribuyan a reducir el consumo energético?

La influencia de modelos foráneos

El fenómeno descrito es multicausal. A través de los cursos de posgrado impartidos y la evaluación de proyectos en Comités de Expertos, se ha podido comprobar que los arquitectos no se apropian de los conocimientos ofrecidos durante su formación. En las generaciones graduadas en las décadas de los 70 y 80 influye el rechazo a los engorrosos métodos de cálculo que caracterizaron la enseñanza de esta disciplina en aquellos momentos. Tampoco la aplicación de estos conocimientos ha sido exigida en todos los casos por los profesores de proyecto que carecen de estas herramientas, por lo cual evaden el tema alegando que no es importante, o que limita la expresión estética de la arquitectura, de lo cual inclusive logran convencer a sus alumnos. También en ocasiones los propios profesores que imparten estas disciplinas contribuyen al rechazo al insistir en que sean

estos factores los que determinen a ultranza la solución de diseño, subordinando a ellos todo lo demás.

Sin embargo, es sabido que no son precisamente los arquitectos los que deciden en última instancia la solución de diseño, sino los inversionistas u otros decisores que generalmente parten de ideas preconcebidas sobre el proyecto deseado a partir de sus propios paradigmas, que generalmente están condicionados por imágenes provenientes de la arquitectura de los países desarrollados, cuyos climas de manera general son fríos y por tanto, totalmente diferentes al de Cuba. De hecho, una buena parte de los proyectos considerados en el estudio de caso no responden a diseños elaborados en Cuba, sino a soluciones importadas, impuestas por la parte extranjera.

Y es esa precisamente la causa fundamental que subyace tanto en la opinión del profesor que considera que el diseño bioclimático limita la expresión arquitectónica y la creatividad de los estudiantes, o del inversionista o decisor que sueña con la caja de vidrio asociada con su imagen del desarrollo. Es una confluencia de desconocimiento y de falta de autovaloración, lo cual genera una alta vulnerabilidad a los paradigmas foráneos, que en muchas ocasiones ni siquiera en las sociedades de donde provienen resultan apropiados.

Conclusiones

Cuba posee una tradición arquitectónica de calidad que ha logrado mantener y reinterpretar principios esenciales del diseño bioclimático en diferentes momentos históricos, pero que se han perdido en la arquitectura contemporánea, a pesar del continuado trabajo de investigación y formación académica desplegado en este campo, como consecuencia de la importación de modelos foráneos.

Cambiar esta situación requiere de un intenso trabajo de divulgación de los conocimientos esenciales y los valores propios, no solo en la formación profesional de pre y posgrado, sino hacia toda la sociedad, especialmente en aquellos que actúan como inversionistas y decisores. Se trata ahora no solo del rescate de las tradiciones culturales propias, sino de un principio esencial de adaptación al cambio climático.

Bibliografía

ALFONSO, ALFONSO (1979). «Condiciones admisibles del ambiente térmico para los edificios de vivienda», en *Arquitectura y Urbanismo*, 5 (23-41): 1979.

ALFONSO, ALFONSO (1985). «¿Transpira la ciudad compacta?», en *Arquitectura y Urbanismo*, 1(60-69): 1985.

ALFONSO, ALFONSO; GISELA DÍAZ Y ANA M. DE LA PEÑA (1989). «Por el rescate de la tradición», en *Arquitectura y Urbanismo*, 2 (20-25): 1989.

BUTTI, KEN Y JOHN PERLIN (1985). *Un hilo dorado*. Madrid: Hermann Blume, 1985.

CASTILLO, ROSA M.; TANIA GONZÁLEZ Y LIEN GONZÁLEZ (1990). «Tipología habitacional en Ciudad de La Habana antes de 1959. Comportamiento Climático». DIRECTORAS: DANIA GONZÁLEZ Y ELIANA CÁRDENAS. Facultad de Arquitectura, ISPJAE, La Habana, 1990.

Colectivo de Autores (1989). *Selección de artículos*. La Habana: Centro de Información de la Construcción, octubre de 1989.

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

GONZÁLEZ COURET, DANIA (1981). «Montaña, clima y arquitectura», en *Arquitectura y Urbanismo*, 3 (45-54): 1991.

GONZÁLEZ COURET, DANIA (1999). «Progressive Social housing in the Historic Centre of Matanzas City. A Bioclimatic Analysis», en *Architecture, Energy and Environment*, Lund University, 1999.

GONZÁLEZ COURET, DANIA (2000). «Design Criteria for Warm Humid Climates: A Case Study», en *Renewable Energy*. Renewables: The Energy for the 12th Century. World Renewable Energy Congress VI, Part I, Pergamón, Brighton, 2000. Pp. 534-540.

GONZÁLEZ COURET, DANIA (2004). «From the Past to the Present of Bioclimatic Architecture in Cuba», en *World Renewable Energy Congress VIII*, Elsevier, Denver, 2004.

GONZÁLEZ COURET, DANIA, et al. (2005). *Vivienda apropiada para Ciudad de La Habana*. La Habana: Ed. CUJAE, 2005.

GONZÁLEZ COURET, DANIA, et al. (2010). *El edificio de apartamentos en Cuba*. La Habana: Ed. CUJAE, 2010.

JANSA GUARDIOLA, JOSÉ MARÍA (1974). *Curso de Climatología*. La Habana: Instituto Cubano del Libro, 1974.

KONYA, A (1981). *Diseño en climas cálidos*. Madrid: Ed. Blume, 1981.

LLOVET, MÓNICA, NATALY GONZÁLEZ Y ELIZABETH RODRÍGUEZ (2013). «Arquitectura sustentable en clima cálido-húmedo. Caso de estudio: Universidad de las Ciencias Informáticas». Directora: Dania González Couret. Facultad de Arquitectura, Ispjae, La Habana, 2013.

MARTÍNEZ, ROLANDO (2008). «Diseño de elementos de protección solar para el ahorro energético en edificios». Directora: Dania González Couret. Facultad de Arquitectura, ISPJAE, La Habana, 2008.

MAZRIA, E. (2012). «Clean Energy: The Future is Now», en *World Renewable Energy Forum*. Denver, American Solar Energy Society, 2012.

MONTES DE OCA, M. (2011). «Edificios de energía casi nula. Una realidad

inminente», en *Curso de Arquitectura Sostenible*, P. Romera García (Ed.) Las Palmas de Gran Canarias, Escuela de Arquitectura, 2011. Pp. 66-71.
NC 220_1, 2009 (2009). *Edificaciones. Requisitos de Diseño para la eficiencia energética. Parte 1: Envolvente del edificio*. La Habana: CNN, 2009.

RUEDA GUZMÁN, LUIS ALBERTO (2003). «Influencia del diseño en el consumo de energía por climatización en las habitaciones de hoteles de sol y playa en Cuba». DIRECTORA: DANIA GONZÁLEZ COURET. Facultad de Arquitectura del Ispjae, La Habana, 2003.

SERRA, R. Y H. COCH (1994). *Las energías naturales en la arquitectura*. Barcelona: UPC, 1994.

Métodos de sincronización de convertidores con la red eléctrica

Methods of synchronization of converters with the electric grid

Por Lesyani León Viltre,
Francisco de Assis Dos Santos Neves***

*Silvio Erick Ruíz González**

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

*** Universidad Federal de Pernambuco, Recife, Brasil.
e-mail: lesyani@uclv.edu.cu*

Resumen

La correcta sincronización con la red es un aspecto importante para el adecuado funcionamiento del control de convertidores conectados a la red eléctrica. Esta tarea normalmente es realizada por el PLL (Phase Locked Loop). El objetivo de los PLL es la sincronización exacta del control del convertidor en fuente de voltaje (VSC), con la fase de la secuencia positiva de la armónica fundamental de la tensión de red. En el presente trabajo se realiza una comparación de las principales técnicas de sincronización existentes en la actualidad y se realizan simulaciones en Matlab del método basado en el retraso en la cancelación de la señal generalizado (GDSC, Generalized Delayed Signal Cancellation).

Palabras claves: Convertidores, sincronización con la red

Abstract

The correct synchronization with the grid is an important aspect for the right operation of the control of converters connected to the electrical grid. This task is normally performed by the PLL (Phase Locked Loop). The objective of the PLL is the exact synchronization of the control of the converter in voltage source (VSC), with the phase of the positive sequence of the fundamental harmonic of the grid voltage. In the present paper, a comparison of the main synchronization techniques available today is carried out, and using Matlab the method based on the delay in the cancellation of the generalized signal (GDSC, Generalized Delayed Signal Cancellation) was simulated.

Keywords: Converters, grid synchronization

Introducción

En muchos casos, la red de distribución presenta tensiones distorsionadas y desequilibradas, y en esos casos el método de sincronización con la red influye fuertemente en el rendimiento de la totalidad del esquema de control

del convertidor de potencia conectado a la red. Determinar el valor correcto de la componente de secuencia positiva de la frecuencia fundamental del vector de tensión de la red (FFPS, por sus siglas en inglés), es esencial para un buen control de esos sistemas. Esta información es usada en los PLL (Phase Locked Loop), por lo que en la actualidad existen muchas investigaciones encaminadas a lograr PLL más rápidos y con comportamientos adecuados ante distorsiones en la red.

En un marco de referencia sincrónico (SRF, por sus siglas en inglés), solo la componente del vector de secuencia positiva de la frecuencia fundamental de la señal trifásica (FFPS) tiene componentes constantes en los ejes directo (d) y en cuadratura (q), por tanto, en principio un controlador proporcional-integral (PI) de bajo ancho de banda puede ser utilizado en un sistema de referencia sincrónico para aplicar el PLL (SRF-PLL). En algunas investigaciones [Kaura y Blasko, 1997; Chung, 2000; Arruda, et al., 2001] se utilizan controladores PI para determinar la FFPS de una señal trifásica. Sin embargo, para separar el vector componente FFPS de la secuencia negativa de la frecuencia fundamental (FFNS, por sus siglas en inglés) u otros componentes, este método de detectar la FFPS sería muy lento.

Otro método conocido para determinar la FFPS, basado en sistemas de referencias sincrónicos dobles, es propuesto por Rodríguez, et al. [2007]. Se puede lograr un mejor rendimiento bajo condiciones de desequilibrio mediante la separación de las componentes positivas y negativas de la secuencia del vector de voltaje. Esto se hace por el PLL de doble marco de referencia síncrono (DSRF-PLL), que utiliza un desacoplamiento para aislar los componentes de secuencias negativa y positiva de frecuencia fundamental. Sin embargo, el esfuerzo computacional aumenta, si es necesario atenuar muchas componentes armónicas.

En otros trabajos [Rodríguez, et al., 2006; Guo, et al., 2011] se proponen métodos basados en integrador generalizado, mientras que en otras investigaciones [Svensson, et al., 2007; Saccomando y Svensson, 2001; Sousa, et al., 2009; Neves, et al., 2010a; Neves, et al., 2010b] se proponen métodos basados en retraso en la cancelación de la señal (DSC, delayed signal cancellation). En este método los componentes de secuencia positiva y negativa de la tensión de red se separan, basados en el vector de tensión en un marco de referencia estacionario ($\alpha\beta$) y en el vector de voltaje retrasado un cuarto de ciclo. Después de la separación, la secuencia positiva obtenida (α) y los componentes (β) se introducen en un SRF-PLL para calcular su amplitud y la posición angular. El método es adecuado para tensiones de redes distorsionadas y desbalanceadas, pero las tensiones de secuencia negativa y positiva calculadas son sensibles a los armónicos en el voltaje de la red.

Algunos autores proponen diferentes maneras de combinar filtros resonantes, con el fin de pre-filtrar las señales de entrada (α) y (β) para la determinación de los componentes del vector de secuencia positiva. Estos componentes se utilizan entonces en una salida SRF-PLL para obtener el vector de amplitud y posición de secuencia positiva. En el llamado integrador generalizado de segundo orden (DSOGI-GAC), los parámetros de filtro de resonancia dependen de la frecuencia detectada por la salida del SRF-PLL, con el fin de lograr una estrategia de frecuencia adaptativa. Sin embargo, la robustez y la estabilidad a la variación de frecuencia aún no han sido analizadas debido a las dificultades introducidas por las no linealidades involucradas.

Por lo general, el filtro discreto de Kalman (DKF) se aplica solo en sistemas de alimentación monofásicos. Trabajos recientes proponen el uso de DKF para detectar la frecuencia fundamental de secuencia positiva en el vector de voltaje de un sistema trifásico. Las ganancias del filtro de Kalman se ajustan para atenuar los efectos de los armónicos de orden bajo o componentes de secuencia negativa, pero la respuesta es lenta en comparación con las técnicas mencionadas anteriormente.

Neves, Cabral, Souza, Bradaschia, Bueno y Rizo [Neves, et al., 2010c], proponen una técnica novedosa basada en el retraso en la cancelación de la señal generalizado (GDSC, Generalized Delayed Signal Cancellation), que presenta resultados relevantes ante distorsiones de la tensión de la red. El método está basado en un esquema GDSC, visto como un caso particular de la transformada de Fourier del vector espacial (SVFT), y se presenta un nuevo procedimiento para cada transformación GDSC.

Desarrollo

Según los códigos de red de los países con mayor penetración eólica, las turbinas eólicas conectadas a los sistemas de distribución deben permanecer conectadas durante huecos de tensión severos. En esos casos también se requiere que las fuentes renovables de energía estén habilitadas para el control de la potencia activa y reactiva durante y después de la falla. Para cumplir con estos requerimientos es muy importante la detección rápida del FFPS del vector del voltaje.

Entre los diferentes métodos de detección del FFPS mencionados en la introducción del trabajo, el de mejores resultados es el GDSC-PLL, afirmación que se basa en simulaciones realizadas en Matlab ante diferentes condiciones de fallas. En el primer caso se simula un hueco de tensión trifásico balanceado, en el segundo se simula un hueco de tensión entre fase y neutro, y la tercera simulación es un hueco de tensión fase a fase, mientras que por último se utiliza una señal de entrada altamente

distorsionada. En la tabla 1 se muestran los resultados de esta comparación basados en la distorsión armónica total a la salida (THD) y el tiempo de respuesta. Los métodos de sincronización utilizados para la comparación son SRF-PLL, DSRF-PLL, DKF y el GDSC-PLL.

La tabla 1 muestra los resultados de la comparación y los subíndices representan los 4 casos de fallas descritos anteriormente. Como se puede apreciar en la tabla, los tiempos de respuesta más rápidos corresponden al método de sincronización GDSC-PLL, así como los índices más bajos de distorsión armónica total, por lo que analizaremos con más detalle las características de esta técnica novedosa de sincronización.

Tabla 1. Comparación de diferentes métodos de sincronización

	SRF	DSRF	DSOGI	DFK	GDSC
THD (1)	0,46 %	5,59 %	5,46 %	0,56 %	0,00 %
THD (2)	3,70 %	1,13 %	1,12 %	0,10 %	0,00 %
THD (3)	6,33 %	1,24 %	1,31 %	0,12 %	0,00 %
THD (4)	1,88 %	2,22 %	2,17 %	0,24 %	0,14 %
Tiempo de respuesta (1)	162,8 m	399,3 m	151,7 m	222,0 m	22,7 m
Tiempo de respuesta (2)	-	6,1 m	7,6 m	-	17,3 m
Tiempo de respuesta (3)	-	54,6 m	34,2 m	-	18,3 m
Tiempo de respuesta (4)	-	-	21,7 m	0,0 m	0,0 m

Transformada GDSC

Una señal trifásica, periódica, desbalanceada y distorsionada puede ser descrita por las siguientes ecuaciones [Bueno, et al., 2005]:

$$S_a = \sum_{h=0}^{\infty} [S_a^{(h)} \cos(h\omega t + \varphi_a^{(h)}) + S_0^{(h)} \cos(h\omega t + \varphi_0^{(h)})] \quad (1)$$

$$S_b = \sum_{h=0}^{\infty} [S_b^{(h)} \cos(h\omega t + \varphi_b^{(h)}) + S_0^{(h)} \cos(h\omega t + \varphi_0^{(h)})] \quad (2)$$

$$S_c = \sum_{h=0}^{\infty} [S_c^{(h)} \cos(h\omega t + \varphi_c^{(h)}) + S_0^{(h)} \cos(h\omega t + \varphi_0^{(h)})] \quad (3)$$

La componente armónica h de esta señal puede ser escrita como:

$$S_a^{(h)} = S_a^{(h)} \frac{e^{j(h\omega t + \varphi_a^{(h)})} + e^{-j(h\omega t + \varphi_a^{(h)})}}{2} + S_0^{(h)} \cos(h\omega t + \varphi_0^{(h)}) \quad (4)$$

$$S_b^{(h)} = S_b^{(h)} \frac{e^{j(h\omega t + \varphi_b^{(h)})} + e^{-j(h\omega t + \varphi_b^{(h)})}}{2} + S_0^{(h)} \cos(h\omega t + \varphi_0^{(h)}) \quad (5)$$

$$S_c^{(h)} = S_c^{(h)} \frac{e^{j(h\omega t + \varphi_c^{(h)})} + e^{-j(h\omega t + \varphi_c^{(h)})}}{2} + S_0^{(h)} \cos(h\omega t + \varphi_0^{(h)}) \quad (6)$$

Una señal trifásica puede ser representada por un vector en los ejes de referencia $\alpha\beta$, eliminando el efecto de la componente homopolar como:

$$S_{\alpha\beta}^{(h)} = \frac{2}{3} (S_a^{(h)} + S_b^{(h)} e^{j120^\circ} + S_c^{(h)} e^{-j120^\circ}) \quad (7)$$

Otra forma para eliminar el efecto de la componente homopolar es:

$$S_{\alpha\beta}^{(h)} = e^{jh\omega t} \left[\frac{1}{3} (S_a^{(h)} + S_b^{(h)} e^{j120^\circ} + S_c^{(h)} e^{-j120^\circ}) \right] + e^{-jh\omega t} \left[\frac{1}{3} (S_a^{(h)} + S_b^{(h)} e^{-j120^\circ} + S_c^{(h)} e^{j120^\circ}) \right] \quad (8)$$

Donde:

S: Fasores complejos que contienen información sobre el valor inicial de magnitud y el ángulo de fase de los componentes sinusoidales

$$S_i^{(h)} = S_i^{(h)} e^{j\varphi_i^{(h)}}, i = a, b, c \quad (9)$$

También se puede observar a partir de (1) que los términos dentro de corchetes son fasores de secuencia positiva y negativa, denotados por $S_{\alpha\beta\pm}^{(h)}$ y $S_{\alpha\beta\mp}^{(h)}$. Entonces:

$$S_{\alpha\beta}^{(h)} = \sum_{h=0}^{\infty} S_{\alpha\beta+}^{(h)} + \sum_{h=1}^{\infty} S_{\alpha\beta-}^{(h)} = \sum_{h=0}^{\infty} [S_{\alpha\beta+}^{(h)} e^{jh\omega t}] + \sum_{h=1}^{\infty} [S_{\alpha\beta+}^{(h)*} e^{-jh\omega t}] \quad (10)$$

Cualquier vector armónico de secuencia positiva o negativa puede representarse por:

$$S_{\alpha\beta}^{(hs)} = S_{\alpha\beta+}^{(hs)} e^{sign(hs)j\phi^{hs}} e^{jhswt} \quad (11)$$

Donde:

hs : Valor h para la componente armónica de secuencia positiva

$-h$: Para la componente armónica de secuencia negativa

Además de las componentes homopolares, cualquier conjunto de señales periódicas de tres fases es igual a una suma de componentes del vector armónico de secuencia positiva y negativa. Cada componente del vector tiene magnitud constante y gira a velocidad constante.

Al considerar un vector armónico con componentes de secuencia positiva o negativa, retardado en el tiempo, un ángulo correspondiente a θ radianes de la frecuencia fundamental (o $h\theta$ con respecto a la componente armónica hs) se obtiene:

$$S_{\alpha\beta-\theta}^{(hs)} = S_{\alpha\beta}^{(hs)} e^{sign(hs)j\phi^{hs}} e^{jhs(wt-\theta)} = S_{\alpha\beta}^{(hs)} e^{-jhs\theta} \quad (12)$$

Cabe señalar que si $hs > 0$, entonces los vectores tensión $S_{\alpha\beta}^{(h)}$ y $S_{\alpha\beta-\theta}^{(h)}$ rotan en sentido contrario a las manecillas del reloj y el vector $S_{\alpha\beta-\theta}^{(h)}$ está $h\theta$ radianes detrás que $S_{\alpha\beta}^{(h)}$. Consecuentemente, si $hs < 0$, entonces los vectores de la tensión $S_{\alpha\beta}^{(h)}$ y $S_{\alpha\beta-\theta}^{(h)}$ rotan en sentido de las manecillas del reloj, y el vector $S_{\alpha\beta-\theta}^{(h)}$ está $h\theta$ radianes en adelante. En ambos casos, girar en contra de las manecillas del reloj se considera como la dirección positiva.

Una transformación matemática, en la que se combinan el vector de tensión original y el retardado, es:

$$S_{\alpha\beta I}^{(hs)} = aS_{\alpha\beta}^{(hs)} + ae^{j\theta_1} S_{\alpha\beta-\theta}^{(h)} \quad (13)$$

Donde:

a : Ganancia compleja (constante)

θ_1 : Ángulo (constante)

La transformación anterior permite seleccionar componentes armónicas específicas de la señal original para ser eliminadas. Sin embargo, es deseable que la ganancia de la transformación para obtener el vector

tensión FFPS (o cualquier otro componente armónico específico con secuencia positiva o negativa) se pueda igualar a uno. A partir de las ecuaciones (12) y (13) puede ser verificado que el vector tensión transformado $S_{\alpha\beta T}^{(hs)}$ es igual al de la señal original $S_{\alpha\beta}^{(hs)}$ multiplicado por una ganancia compleja:

$$S_{\alpha\beta T}^{(hs)} = a(1 + e^{j\theta_1} e^{-jhs\theta}) \cdot S_{\alpha\beta}^{(hs)} e^{j\text{sign}(hs)j\phi^{(hs)}} e^{jhs\omega t} \quad (14)$$

Al hacer en la ecuación anterior el término $a(1 + e^{j\theta_1} e^{-jhs\theta}) = G^{(hs)}$ se obtiene:

$$S_{\alpha\beta T}^{(hs)} = G^{(hs)} \cdot S_{\alpha\beta}^{(hs)} \quad (15)$$

Los parámetros reales θ y θ_1 se determinan de manera que las componentes armónicas elegidas, de orden $hs = hi \pm km, \forall i \in \mathbb{N}$, sean eliminadas, donde hi y k son elegidos como constantes enteras. Esto puede conseguirse si se hace $G^{(hs \pm km)} = 0$

$$1 + e^{j\theta_1} e^{-j(hs \pm km)\theta} = 0 \quad (16)$$

Donde:

$$\theta = \frac{360^\circ}{k} \quad \text{y} \quad \theta_1 = \theta i + 180^\circ$$

El parámetro complejo constante a se determina mediante la imposición de la ganancia de transformación deseada para un vector de frecuencia específica. Por ejemplo, con el fin de garantizar la ganancia unitaria para el vector de tensión de FFPS:

$$G^{(hs=1)} = a(1 + e^{j(\theta_1 - \theta)}) = 1 \quad (17)$$

Donde:

$$a = \frac{1}{1 + e^{j(\theta_1 - \theta)}} \quad (18)$$

Implementación del método

Un detector del vector de tensión FFPS ideal debe ser capaz de eliminar el vector de secuencia negativa de la secuencia fundamental con todos los armónicos de los vectores de secuencias negativa y positiva. Por otra parte, la ganancia para el vector FFPS debe ser igual a uno. No es posible cancelar todos los vectores de las componentes armónicas usando solo la transformación descrita en (13). Por lo tanto, se deben seleccionar algunas transformaciones y colocarse en cascada con el propósito de eliminar los vectores de componentes armónicas alrededor del vector FFPS.

Como se muestra en (16), todos los vectores de componentes armónicas impares pueden ser eliminados por una transformación matemática, en la

cual $\theta = 180^\circ$ y $\theta_1 = 180^\circ$, donde se establece $a = \frac{1}{2}$ para mantener la ganancia unitaria del vector de tensión FFPS en la ecuación (17). Por tanto, la ganancia $G_A^{(h_1)}$ para esta primera transformación es:

$$G_A^{(h_1)} = \frac{1}{2} [1 + e^{j\pi(h_1-1)}] \quad (19)$$

Se aplican otras cuatro transformaciones (B, C, D y E) con el objetivo de eliminar los vectores armónicos de orden

$h_2 = 3 \pm 4n$, $h_2 = 5 \pm 8n$, $h_2 = 9 \pm 16n$ y $h_2 = 17 \pm 32n$, respectivamente.

Los parámetros para estas transformaciones son

$$\theta_B = 60^\circ, \theta_{1B} = 0^\circ \text{ y } a_B = \frac{\sqrt{3}}{3} e^{j30^\circ}, \theta_C = 60^\circ$$

Las ganancias correspondientes son:

$$\theta_{1C} = 120^\circ \text{ y } a_C = \frac{\sqrt{3}}{3} e^{-j30^\circ}; \theta_D = 30^\circ, \theta_{1D} = 30^\circ \text{ y } a_D = \frac{1}{2}; \theta_E = 15^\circ, \theta_{1E} = 15^\circ \text{ y } a_E = \frac{1}{2}.$$

$$G_B^{(h_2)} = \frac{1}{2} [1 + e^{j\frac{\pi}{2}(h_2-1)}] \quad (20)$$

$$G_C^{(h_2)} = \frac{1}{2} [1 + e^{j\frac{\pi}{4}(h_2-1)}] \quad (21)$$

$$G_D^{(h_2)} = \frac{1}{2} [1 + e^{j\frac{\pi}{8}(h_2-1)}] \quad (22)$$

$$G_E^{(h_2)} = \frac{1}{2} [1 + e^{j\frac{\pi}{16}(h_2-1)}] \quad (23)$$

Con el objetivo de ejemplificar el método propuesto, se emplean las transformaciones A, B, C, D y E en cascada, como se muestra en la figura 1.

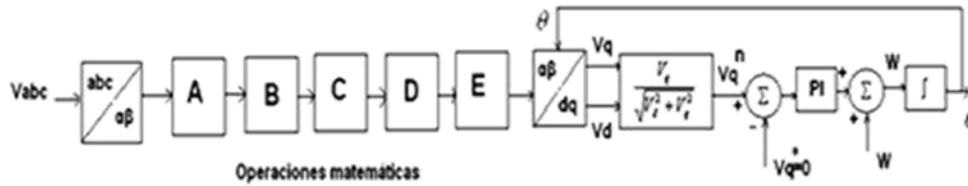


Fig. 1. Diagrama de bloques del GDSC-PLL utilizado.

Al utilizar esta propuesta de solución, no son solo cancelados por las operaciones matemáticas los armónicos de secuencia positiva de orden , sino que pueden ser cancelados por una adecuada selección del ancho de banda de la salida del SRF-PLL. La decisión acerca del ancho de banda de la salida del PLL debe tener en consideración el tiempo de la respuesta total del esquema de detección del vector FFPS en relación a la reducción alcanzada para la distorsión armónica total (THD).

La primera etapa para la implementación de cada transformación es medir las cantidades de fase y calcular el vector $S_{\alpha\beta}$. Las componentes del vector deben ser almacenadas con el objetivo de determinar $S_{\alpha\beta-\theta}$. El vector transformado es obtenido al sumar la corriente, y los vectores retardados multiplicados por a y $ae^{j\theta}$, respectivamente. Esto se hace en forma matricial a través de las siguientes operaciones:

$$\begin{bmatrix} S_{\alpha T} \\ S_{\beta T} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1 & -a_2 \\ a_2 & a_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_{\alpha} \\ S_{\beta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_1 & -b_2 \\ b_2 & b_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_{\alpha-\theta} \\ S_{\beta-\theta} \end{bmatrix} \quad (24)$$

Donde:

$$a_1 = \text{real}(a) , a_2 = \text{imag}(a) , b_1 = \text{real}(ae^{j\theta}) \text{ y } b_2 = \text{imag}(ae^{j\theta})$$

Consecuentemente, las transformaciones A, B, C, D, y E se obtienen mediante operaciones de muy bajos esfuerzos computacionales:

$$\begin{bmatrix} S_{\alpha IA} \\ S_{\beta IA} \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} S_{\alpha} & -S_{\alpha-180} \\ S_{\beta} & -S_{\beta-180} \end{bmatrix} \quad (25)$$

$$\begin{bmatrix} S_{\alpha TB} \\ S_{\beta TB} \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{\sqrt{3}}{3} \\ \frac{\sqrt{3}}{3} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_{\alpha IA} + S_{\alpha IA-60} \\ S_{\beta IA} + S_{\beta IA-60} \end{bmatrix} \quad (26)$$

$$\begin{bmatrix} S_{\alpha TC} \\ S_{\beta TC} \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & \frac{\sqrt{3}}{3} \\ -\frac{\sqrt{3}}{3} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_{\alpha TB} \\ S_{\beta TB} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -\frac{\sqrt{3}}{3} \\ \frac{\sqrt{3}}{3} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_{\alpha TB-60} \\ S_{\beta TB-60} \end{bmatrix} \quad (27)$$

$$\begin{bmatrix} S_{\alpha TD} \\ S_{\beta TD} \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} S_{\alpha TC} \\ S_{\beta TC} \end{bmatrix} + \frac{1}{4} \begin{bmatrix} \sqrt{3} & -1 \\ 1 & \sqrt{3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_{\alpha TB-30} \\ S_{\beta TB-30} \end{bmatrix} \quad (28)$$

$$\begin{bmatrix} S_{\alpha TE} \\ S_{\beta TE} \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} S_{\alpha TD} \\ S_{\beta TD} \end{bmatrix} + \frac{1}{2} \begin{bmatrix} \frac{\sqrt{2+\sqrt{3}}}{2} & -\frac{\sqrt{2-\sqrt{3}}}{2} \\ \frac{\sqrt{2-\sqrt{3}}}{2} & \frac{\sqrt{2+\sqrt{3}}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_{\alpha TD-15} \\ S_{\beta TD-15} \end{bmatrix} \quad (29)$$

Nótese que la salida del PLL no ejerce influencia sobre las transformaciones A-E, debido a que las mismas aparecen en los ejes $\alpha \beta$ (las transformaciones A-E no utilizan la posición angular estimada por la salida del PLL), como ocurre en el método cancelación de señal retardada mejorada EDSC-PLL, (por sus siglas en inglés, Enhanced Delayed Signal Cancellation) [Sousa, 2009]. La función transferencial de salida del SRF-PLL se obtiene al considerar que la posición del vector de salida estimado (θ'), es aproximadamente igual al valor correcto de θ . El vector V_q obtenido de la transformación $\alpha \beta$ a $d q$ debe ser normalizado al hacer la función de transferencia del PLL independiente de la magnitud del vector de tensión. Para alcanzar y sobrepasar 20 %, independientemente del ancho de banda, los parámetros fueron calculados considerando un factor de amortiguamiento $\varepsilon = \frac{1}{\sqrt{2}}$ [Bueno, 2005]. Sin embargo, la elección de la frecuencia natural depende de la componente armónica de más bajo orden que debe ser filtrada por el PLL de salida. Cuanto menor es la frecuencia natural, menor es también el ancho de banda del PLL, y así más lenta será su respuesta. Al usar el SRF-PLL, debe escogerse una frecuencia natural baja con el objetivo de filtrar los armónicos de bajo orden en la tensión de salida. Para el método propuesto puede ser especificado un ancho de banda más alto, ya que los armónicos de más bajo orden son eliminados por las transformaciones en cascada.

Como se indica en (13), la transformada del vector de salida $S_{\alpha\beta T}$ se calcula a través del vector de entrada $S_{\alpha\beta}$, el cual está atrasado en el tiempo por un valor correspondiente a θ radianes de la señal de frecuencia fundamental. Por lo tanto, las muestras de las componentes α y β de la transformación del vector de entrada deben ser almacenadas por un período de tiempo. Por esta razón, cuando el vector de transformación de entrada cambia, la acción correcta de filtrado solo se alcanza después del tiempo necesario para que la señal de entrada atrasada sea afectada. El tiempo máximo de respuesta de las transformaciones A – E es correspondiente a 345 grados de un ciclo de la frecuencia fundamental (por ejemplo: 19,17 ms si la frecuencia de la red es 50 Hz). Por lo tanto, debe tenerse en cuenta que las transformaciones propuestas son filtros de respuesta infinita al impulso y, por lo tanto, no cambian la frecuencia de la señal de entrada. Consecuentemente, si la frecuencia de la señal de entrada es igual al valor nominal ($h_1 = 1$, donde h_1 es la relación entre la frecuencia real y la nominal), entonces no habrá error en la magnitud detectada o ángulo de fase. Por lo tanto, se mantiene la capacidad de la etapa de salida del PLL para sincronizar con la frecuencia fundamental de entrada y detectar el ángulo correcto.

El tiempo de respuesta de detección del vector de secuencia positiva de la frecuencia fundamental, es la suma de los retardos de las transformaciones, con el tiempo de respuesta del PLL de salida. Por otra parte, puede ser usado un SRF-PLL de salida más rápido, ya que este no necesitará filtrar los armónicos de bajo orden.

En la figura 2 se puede observar la implementación del GDSC-PLL en Simulink.

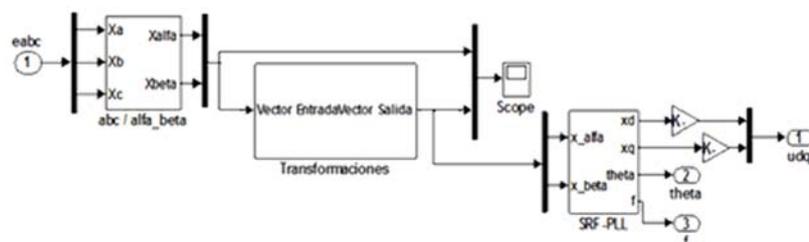


Fig. 2. Implementación en Simulink del GDSC-PLL.

Conclusiones

En este trabajo se realizó una comparación de los principales métodos de sincronización con la red, y se demostró que el método basado en GDSC-PLL para dicha sincronización muestra resultados satisfactorios ante señales distorsionadas, ya que mediante transformaciones en cascada

permite cancelar armónicos específicos de secuencia positiva y secuencia negativa de la señal de entrada.

Referencias

- ARRUDA L., N., et al. (2001). «PLL structures for utility connected systems», en *Conf. Rec. IEEE IAS Annu. Meeting.*, 4 (255-266): 2001.
- BUENO, E., et al. (2005). «SPLL Design to Flux Oriented of a VSC Interface for Wind Power Application», en *Proc. IEEE Annu. Conf. Industrial Electronics Soc.*, (1-6): 2005.
- CHUNG, S. (2000). «A Phase Tracking System for Three Phase Utility Interface Inverters», en *IEEE Trans. Power Electron*, 15 (431-438): may., 2000.
- GUO, X., et al. (2011). «Multiple-Complex Coefficient-Filter Based Phase-Locked Loop and Synchronization Technique for Three-Phase Grid-Interfaced Converters in Distributed Utility Networks», en *IEEE Trans. Ind. Electron*, vol. 58 *IEEE Trans. Ind. Electron*, (1194-1204): 2011.
- KAURA, V. Y V. BLASKO (1997). «Operation of Phase Locked Loop System under Distorted Utility Conditions», en *IEEE Trans. Ind. Appl.*, 23 (58-63): ene.-feb., 1997.
- NEVES, F., et al. (2010a). «A Generalized Delayed Signal Cancellation Method for Detecting Fundamental-Frequency Positive-Sequence Three-Phase Signals», en *IEEE Trans. Power Del.*, 25 (1816-1825): 2010.
- NEVES, F., et al. (2010b). «Low Effort Digital Filters for Fast Sequence Components Separation of Unbalanced and Distorted Three-Phase Signals», en *Proc. IEEE Int. Symp. Ind. Electron*, (2927-2932): 2010.
- NEVES, F., et al. (2010c). «A Generalized Delayed Signal Cancellation Method for Detecting Fundamental-Frequency Positive-Sequence Three-Phase Signals» en *IEEE Transactions on Power Delivery*, 25 (1816-1825): jul., 2010.
- RODRÍGUEZ, P., et al. (2006). «New Positive-Sequence Voltage Detector for Grid Synchronization of Power Converters under Faulty Grid Conditions», en *Proc. IEEE PESC*, (1-7): 2006.
- RODRÍGUEZ, P., et al. (2007). «Decoupled Double Synchronous Reference Frame PLL for Power Converters Control», en *IEEE Trans. Power Electronic*, 22 (584-592): 2007.
- SACCOMANDO, G. Y J. STEVENSSON (2001). «Transient Operation of Grid Connected Voltage Source Converter under Unbalanced Voltage Conditions», en *Conf. Rec. IEEE IAS Annu. Meeting*, (2419-2424): 2001.
- SOUSA, H., et al. (2009). «A Method for Extracting the Fundamental Frequency Positive-Sequence Voltage Vector Based on Simple Mathematical Transformations», en *IEEE Trans. Ind. Electron*, 56 (1539-1547): 2009.
- SVENSSON, J., et al. (2007). «Practical Implementation of Delayed Signal Cancellation Method for Phase-Sequence Separation», en *IEEE Trans. Power Del.*, 22 (18-26): 2007.

Modelación y simulación de la gasificación de la cáscara de arroz en un reactor *downdraft*

Modeling and simulation of rice husk gasification in a *downdraft* reactor

*Por M.Sc. Manuel Plá Duporté
* Profesor Auxiliar del Centro de Estudio de Tecnologías Energéticas Renovables (Ceter), Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría (Ispjae), La Habana, Cuba.
e-mail: mpla@ceter.cujae.edu.cu*

Resumen

Se realizan los cálculos que permiten la caracterización de los procesos termoquímicos (pirólisis y gasificación) a los que se pueden someter los recursos biomásicos (en este caso cáscara de arroz), para su aprovechamiento energético. Todos los procesos se asumen que ocurren en el gasificador *downdraft* existente en el Centro de Estudio de Tecnologías Energéticas Renovables (Ceter). Para ello se parte de las condiciones iniciales que debe tener la biomasa en cuanto a humedad, granulometría, composición química y densidad, así como las características del gasificador que se va a emplear y el agente de gasificación a utilizar, en este caso aire. Se consideraron las especies gaseosas siguientes: CO, CO₂, CH₄, H₂O, H₂, O₂ y N₂. Se llevan a cabo los cálculos de las fracciones volumétricas en el proceso de pirólisis o desvolatilización, así como en la gasificación, y se obtuvo, según el modelo, un comportamiento esperado de las principales especies consideradas en el sistema. Se realizó la modelación del proceso en el simulador Fluent, un programa típico de la dinámica de fluidos computacional (CFD), en el cual se simula el perfil de temperatura del gasificador, ofreciendo resultados satisfactorios en su distribución geométrica, así como los perfiles de concentración de las principales especies consideradas en el proceso de gasificación.

Palabras claves: Biomasa, gasificación, modelación, simulación

Abstract

The present paper describes the calculations that allow the characterization of the thermochemical processes (pyrolysis and gasification) that biomass undergoes (rice husk in this case) for its energy exploitation. All processes are assumed to occur in the *downdraft* gasifier located at the Center of Studies of Renewable Energy Technologies (Ceter). The starting point are

the initial conditions that biomass must have as moisture, particle size, chemical composition and density as well as the characteristics of the gasifier to be used and the gasifying agent used which is air in this case. The following gaseous species were considered: CO, CO₂, CH₄, H₂O, H₂, O₂ and N₂. The calculations of the volumetric fractions were carried out in the pyrolysis or devolatilization process, as well as in the gasification, and it was obtained according to the model the expected behavior of the main species considered in the system. The modeling of the process was carried out using Fluent simulator, a typical program of computational fluid dynamics (CFD), in which the temperature profile of the gasifier is simulated, offering satisfactory results in its geometric distribution, as well as the concentration profiles of the main species considered in the gasification process.

Keywords: Biomass, gasification, modeling, simulation

Introducción

El empleo del proceso de gasificación de biomasa en Cuba en la actualidad, como método de su conversión térmica con fines energéticos, es extremadamente limitado, pues prácticamente no existe este tipo de aplicaciones en el país. Hoy hay pocos ejemplos a nivel nacional y todos son instalaciones demostrativas con tecnología foránea. El desarrollo de investigaciones que permitan dominar esta tecnología a un alto nivel, para el posterior desarrollo de equipos y el diseño de equipos propios con mayor correspondencia con las biomásas locales, está aún por acometerse. Un aspecto importante en el desarrollo de estas investigaciones pasa por la modelación y simulación de los procesos que tienen lugar durante la gasificación de los recursos biomásicos, a fin de obtener resultados para su posterior validación mediante experimentación. Todo esto lleva a formular una estrategia para la realización del trabajo que comprende desde la situación problemática que se va a enfrentar, hasta los métodos de investigación empleados y los objetivos propuestos.

Situación problemática

Existe poca información sobre estudios realizados a partir de la modelación y simulación del proceso de gasificación de la cáscara de arroz en las condiciones particulares de Cuba.

Objetivo general

Obtener la caracterización de los principales parámetros del proceso de gasificación de la cáscara de arroz mediante su modelación y simulación, empleando las peculiaridades geométricas del gasificador *downdraft* existente en el Ceter.

Objetivos específicos

- Modelar los procesos que tienen lugar durante la gasificación de la cáscara de arroz, realizando los cálculos pertinentes de los distintos fenómenos que ocurren en el gasificador.
- Desarrollar la simulación del proceso de gasificación de la cáscara de arroz en el reactor *downdraft* existente en el Ceter mediante el Fluent.

Proceso de pirólisis y gasificación

La gasificación es un proceso térmico que permite la conversión de un combustible sólido como la biomasa, en un combustible gaseoso, mediante un proceso de oxidación parcial. Como agente oxidante se emplea el aire, el vapor de agua o el oxígeno. El gas resultante contiene monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂), dihidrógeno (H₂), metano (CH₄), alquitrán, agua y pequeñas cantidades de hidrocarburos. Este gas posee un bajo poder calórico, del orden de 4 a 7 MJ/m³; en cambio, si se emplea como agente oxidante el O₂ se pueden alcanzar de 10 a 18 MJ/m³. La tecnología más empleada es, sin embargo, la que utiliza aire como agente oxidante, por razones económicas y tecnológicas.

Fases de la gasificación

Dependiendo del tipo de gasificador y de las condiciones del proceso, la gasificación de biomasa tiene las siguientes fases [Bridgwater, 2003]:

Calentamiento y secado de la biomasa

Desgasificación o desvolatilización de la biomasa.

Oxidación parcial de la biomasa y reducción parcial de los productos de oxidación (CO₂ y H₂O a CO e H₂), y simultáneamente, gasificación del carbón sólido a CO.

Secado

Cuando la partícula de biomasa se pone en contacto directo con el ambiente del reactor termoquímico, lo primero que sucede es que comienza a perder toda la humedad que trae consigo. Toda el agua intersticial que contiene la biomasa se va convirtiendo en vapor y abandona el sólido. Este proceso se considera completado a temperaturas entre los 110 y 115 °C, y es eminentemente físico, pues no conlleva ninguna transformación química.

Pirólisis

Numerosos complejos procesos físicos y químicos ocurren durante la pirólisis, que comienza lentamente a una temperatura alrededor de los 200 °C, acelerándose a una temperatura por encima de los 700 °C. La composición de los productos obtenidos está en función de la temperatura, la presión y la composición de los gases durante la pirólisis.

[De Souza Santos, 2004]. El proceso se inicia cuando los productos térmicamente inestables, como la celulosa y la hemicelulosa en la biomasa, se separan y evaporan con otros componentes volátiles. Este proceso puede ser representado mediante la reacción general siguiente: Biomasa + Calor -----> Gases + Vapor o Líquido + Ceniza.

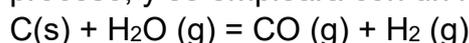
Modelación del proceso de gasificación

Tabla 1. Reacciones que tienen lugar proceso de gasificación

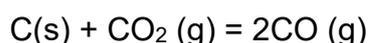
Número	Reacción
1	$C(s) + 2H_2(g) = CH_4(g)$
2	$CH_4(g) + H_2O(g) = CO(g) + H_2(g)$
3	$C(s) + CO_2(g) = 2CO(g)$
4	$CO(g) + H_2O(g) = CO_2(g) + H_2(g)$
5	$H_2(g) + 1/2O_2(g) = H_2O(g)$
6	$C(s) + H_2O(g) = CO(g) + H_2(g)$
7	$C(s) + 1/2O_2(g) = CO(g)$
8	$CO(g) + 1/2O_2(g) = CO_2(g)$
9	$C(s) + O_2(g) = CO_2(g)$
10	$CO_2(g) + H_2(g) = CO(g) + H_2O(g)$
11	$2C(s) + 2H_2O(g) = CH_4(g) + CO_2(g)$
12	$CO(g) + H_2(g) = CH_4(g) + H_2O(g)$

13	$\text{CO}_2 (\text{g}) + 4\text{H}_2 (\text{g}) = \text{CH}_4 (\text{g}) + 2\text{H}_2\text{O} (\text{g})$
14	$\text{CH}_4 (\text{g}) + \text{O}_2 (\text{g}) = \text{CO}_2 (\text{g}) + 2\text{H}_2\text{O} (\text{g})$
15	$\text{C}_2\text{H}_4 + 3\text{O}_2 (\text{g}) = 2\text{CO}_2 (\text{g}) + 2\text{H}_2\text{O} (\text{g})$
16	$\text{CO} (\text{g}) + \text{H}_2\text{O} (\text{g}) = \text{CO}_2 (\text{g}) + \text{H}_2 (\text{g})$

La reacción 6 es una de las más importantes que tiene lugar durante el proceso, y se empleará con un rol decisivo en el trabajo.



Otra reacción importante es la de Boudouard, la cual, a pesar de ser lenta dado su bajo nivel de reactividad, tributa más moles de monóxido de carbono al gas producto, contribuyendo a aumentar el poder calórico del gas resultante. A través de esta reacción (3) de la tabla 1, el dióxido de carbono presente en el gasificador reacciona con dificultad para producir CO según la reacción siguiente:



Cálculo de las fracciones volumétricas en la fase de pirólisis

Es necesario calcular las fracciones volumétricas en la fase de la pirólisis, para conocer con exactitud cuál es la composición de las especies que entran en el proceso de gasificación. Se calculan las fracciones volumétricas de los componentes CO, CO₂, H₂O, N₂, H₂, CH₄ durante la pirólisis.

Balance de carbono

El carbono se distribuye entre CO, CO₂ y CH₄. Para un metro cúbico normal de gases producidos, se puede expresar el balance de carbono molar entre la entrada y la salida de la pirólisis como sigue:

$$F \cdot X_c / 12 = (V_{\text{CO}} + V_{\text{CO}_2} + V_{\text{CH}_4}) / 22,4 \quad (1)$$

Donde:

V: Fracción volumétrica del gas

Para este cálculo, A es la cantidad de aire suministrado en kg aire/kgde biomasa, F la cantidad de biomasa requerida para obtener un metro cúbico

normal de gas, y Xc el contenido de carbono en la biomasa kg carbono/kg biomasa [Basu, 2006].

Balance de hidrógeno

El hidrógeno se distribuye entre H₂, H₂O y CH₄, y el balance molar se escribe de la forma siguiente:

$$F(S/18 + Xh/1 + W/18) = (V_{H_2} + V_{H_2O} + 2V_{CH_4})/22,4 \quad (2)$$

Donde:

S: Vapor suministrado con el aire en kg de vapor/kg aire

Xh: Contenido de hidrógeno en la biomasa

W: Volumen de humedad de biomasa en kg de agua/kg de biomasa seca

Balance de oxígeno

El oxígeno se distribuye entre el CO, el CO₂ y el H₂O, y el balance molar se escribe de la forma siguiente:

$$F(S/36 + Xo/16 + A.Oa/32) = (0,5V_{CO} + V_{CO_2} + 0,5V_{H_2O})/22,4 \quad (3)$$

Donde:

Oa: Fracción másica de oxígeno en el aire

Xo: Oxígeno contenido en la biomasa

Balance de nitrógeno

Si Xn es el nitrógeno contenido en la biomasa y Na es la fracción másica de nitrógeno en el aire, el balance molar se expresa de la manera siguiente:

$$V_{CO_2} + V_{CO} + V_{H_2} + V_{H_2O} + V_{N_2} + V_{CH_4} = 1 \quad (4)$$

Para calcular los valores de las fracciones volumétricas en la fase de desvolatilización se obtuvo un sistema de 7 ecuaciones, y se trabajó para cada temperatura tenida en cuenta en el sistema.

1. $F \times Xc/12 = (V_{CO} + V_{CO_2} + V_{CH_4})/22,4$
2. $F(S/18 + Xh/1 + W/18) = (V_{H_2} + V_{H_2O} + 2V_{CH_4}) / 22,4$
3. $F(S/36 + Xo/16 + A*Oa/32) = (0,5V_{CO} + V_{CO_2} + 0,5V_{H_2O}) / 22,4$
4. $F(Xn/14 + A*Na/28) = V_{N_2} / 22,4$
5. $V_{CO} + V_{CO_2} + V_{H_2} + V_{H_2O} + V_{N_2} + V_{CH_4} = 1$
6. $K_{pb} = (V_{CO})^2 / V_{CO_2}$
7. $K_{pm} = (V_{CO} \times V_{H_2}) / V_{H_2O}$

Cálculo de las fracciones volumétricas en el proceso de gasificación

Es necesario estimar el equilibrio de la composición de los gases después del proceso de gasificación, a partir de una composición elemental de los gases de salida de la pirólisis.

Se realiza el balance para los principales elementos (carbono, hidrógeno, oxígeno y nitrógeno).

La suma de las fracciones volumétricas de todos los constituyentes debe ser igual a 1, y de aquí se obtiene que:

$$V_{CO} + V_{CO_2} + V_{H_2} + V_{H_2O} + V_{N_2} + V_{CH_4} = 1 \quad (5)$$

Para poder estimar el valor de las incógnitas V_{CO} , V_{CO_2} , V_{H_2} , V_{H_2O} , V_{N_2} , V_{CH_4} y F se necesita un total de siete ecuaciones. Con este propósito, además de las cinco ecuaciones de balance se pueden asumir otras dos de las que ocurren en la gasificación, como la reacción Boudouard y la de vapor-gas; la constante de equilibrio para cada una es:

$$K_{PB} = (P_{CO})^2 / P_{CO_2} \quad (5a)$$

Donde:

P_{CO} : Presión parcial de CO, la cual es igual a la fracción volumétrica CO por la presión en el reactor. La misma relación se establece para el CO_2 , de aquí:

$$K_{PB} = (V_{CO} \times P)^2 / (V_{CO_2} \times P) = K_{PB} = (V_{CO})^2 \times P / V_{CO_2} \quad (6)$$

Donde:

P : Presión en el reactor, en este caso la atmosférica

$$K_{pb} = (V_{CO})^2 / V_{CO_2} \quad (7)$$

Simulación del proceso de gasificación. Fluent como herramienta

La simulación es una herramienta de gran importancia en los procesos industriales, ya que permite visualizar los resultados esperados sin el gasto de recursos de materiales en dicho proceso. El funcionamiento de los simuladores se basa en la utilización de modelos matemáticos. La modelación de la gasificación de la biomasa implica la representación de forma matemática de los fenómenos, tanto físicos como químicos, que ocurren en el gasificador. En este trabajo se emplea el simulador Fluent, uno de los programas que caracterizan la dinámica de fluidos

computacional (CFD), el cual utiliza el método de análisis por elementos finitos para la simulación de problemas científicos y de ingeniería, basados en ecuaciones diferenciales de derivadas parciales (PDEs). En el Fluent se realiza la simulación a partir del diseño previamente mallado del equipo por donde fluyen los materiales que interactúan en el gasificador. También es necesario definir las condiciones de contorno del sistema. Para el diseño geométrico de los modelos se usó el software Gambit 2.0, que permite exportar directamente el diseño mallado a Fluent. Gambit 2.0 es un pre-procesador que posibilita construir modelos geométricos de sistemas de flujo para su posterior uso en Fluent. La principal ventaja de Gambit es la calidad de mallado, factor crucial para la obtención de una correcta solución en CFD.

Perfiles de temperatura a lo largo del gasificador

El modelo permite la simulación del comportamiento de la temperatura a lo largo del gasificador, teniendo en cuenta la entrada de la biomasa, las reacciones que caracterizan los procesos que tienen lugar en el mismo y la salida del gas resultante.

Perfiles de las fracciones volumétricas de las especies consideradas en la modelación

Otros parámetros cuyo comportamiento es indispensable conocer, son las fracciones volumétricas de las especies que consideradas en la modelación. Como ya se ha expresado, la gasificación se realiza para convertir un combustible sólido en uno gaseoso, para disponer de este a partir de las bondades que implica su empleo. Para poder caracterizar al gas pobre como mezcla de gases, hay que conocer completamente su composición con lo que se define la calidad del gas producto, sus propiedades y las prestaciones que pueden tener las tecnologías que vayan a utilizar el gas resultante de la gasificación. La simulación también brinda como resultado el perfil de las fracciones volumétricas de las especies que se tienen en cuenta en la modelación del proceso.

Composición del gas producto

A partir de los perfiles de las fracciones volumétricas de las especies que se consideraron en el modelo, que ofrecen la composición de la mezcla de gases, se estima el poder calórico del gas producto.

Análisis de resultados

Tabla 2. Constante de equilibrio en función de la temperatura para la reacción 6

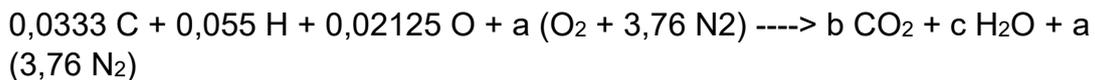
T(K)	400 K	600 K	800 K	1 000 K	1 200 K
Ke	7,7*10 ⁻¹¹	5*10 ⁻⁵	4,4*10 ⁻²	2,617	245

En el caso de la reacción de Boudouard se muestran en la tabla siguiente las constantes de equilibrio que la caracterizan para diferentes temperaturas:

Tabla 3. Constante de equilibrio en función de la temperatura para la reacción 3

T(K)	400 K	600 K	800 K	1 000 K	1 200 K
Ke	5,2*10 ⁻¹⁴	1,87*10 ⁻⁶	1,09*10 ⁻²	1,9	649

Se realiza el cálculo de la combustión completa para determinar la cantidad de O₂ que se requeriría para la combustión de un kg de cáscara de arroz. Se sigue la formulación típica para este tipo de procesos, buscando el valor de los coeficientes que acompañan a cada elemento, lo que permite el cálculo de la proporción de los productos en la mezcla final, y se llega a la expresión siguiente:



Se calculan los coeficientes por balanceo

$$C \rightarrow 0,03333 = b \quad H \rightarrow 0,055 = 2c \quad O \rightarrow 0,0275 + 2a = 2b + c$$

Se obtiene que:

$$B = 0,03333; c = 0,0275; a = 0,036458$$

Para tener una aproximación a la caracterización de los parámetros de la pirólisis, es necesario disminuir al máximo la cantidad de aire en el sistema. Para ello se calcula la relación aire/combustible para 1 kg de combustible y la cantidad de aire estequiométrico para combustión completa. Luego se afecta por un coeficiente que representa una disminución de 95 % del

oxígeno presente en el gasificador. De tal manera se obtiene la cantidad de aire presente en la zona de desvolatilización del gasificador, por kg de bagazo.

$$A = 5,02750208 \times 0,05 = 0,2513751 \text{ (kg aire/kg biomasa)}$$

A partir de los cálculos realizados en el modelo se tienen los resultados parciales siguientes, correspondientes a la etapa de la desvolatilización:

$$XC = 0,4 \text{ (kg carbón/kg biomasa)}$$

$$XH = 0,055 \text{ (kg hidrógeno/kg biomasa)}$$

$$XO = 0,34 \text{ (kg oxígeno/kg biomasa)}$$

$$XN = 0 \text{ S} = 0.0001 \text{ (kg vapor/kg aire)}$$

$$A = 0,2513751 \text{ (kg aire/kg biomasa)}$$

$$Oa = 0,23$$

$$Na = 0,77$$

$$W = 0,05 \text{ (kg agua/kg biomasa seca)}$$

Tabla 4. Composición de los gases para diferentes temperaturas en el proceso de pirólisis

%	400 K	600 K	800 K
V_{N_2}	11,74	11,60	10
V_{CO}	11,05e-6	6,64e-2	4,93
V_{CO_2}	23,36	23,61	22,35
V_{H_2}	2,20e-2	2,27	19,68
V_{H_2O}	31,61	30,17	22,05
V_{CH_4}	33,25	32,26	20,96
Σ	100 %	100 %	100 %

Considerando la presencia mínima de oxígeno en esta fase del proceso, la mayor parte aportado por la propia degradación de los componentes hidrocarburos que se descomponen en esta etapa, obsérvense los valores obtenidos. Véase que la fracción de nitrógeno no varía mucho con la temperatura, pues no participa en las reacciones aunque tiende a disminuir levemente a valores más elevados de temperatura. El CO cambia

en la medida en que aumenta la temperatura, considerando la ocurrencia de varias reacciones que lo involucran. El CO_2 no cambia mucho con la temperatura debido a que su formación está limitada por la presencia del oxígeno y se mantiene a niveles aceptables para la etapa de que se trata. En el caso del H_2O , cuando se alcanzan temperaturas más elevadas tiende a disminuir por su participación en varias reacciones que tienen lugar en el proceso y su probable descomposición elemental parcialmente, lo que contribuye a la mayor presencia del hidrógeno. Por otra parte, cabe esperar que el hidrógeno aumente su fracción volumétrica con la temperatura, tal como se preveía y según se aprecia en los resultados. Nótese también que el CH_4 tiene una presencia considerable al finalizar la fase de desvolatilización, lo que contribuye a que la mezcla de gases que se obtiene al final de esta sea de alto valor energético que debe afectarse a partir de las reacciones que ocurren en la etapa que le sucede.

El proceso de desvolatilización de biomasa es una etapa crítica en la gasificación, ya que consiste en la liberación de los volátiles existentes en el combustible sólido quedando por lo tanto, al final de esta, una matriz sólida de carbón vegetal (residuo carbonoso o *char*) y cenizas. Se considera que el final de la etapa de pirólisis ocurre a los 800 °K, y con la composición que aparece en la tabla 4 es con la que continúa el proceso de gasificación, una vez generados todos los volátiles. Del carbono original (0,40 kg), de 30-40 % pasa a formar parte de los gases (CO , CO_2 , CH_4), y el resto, 60-70 %, pasa a formar el carbón que queda después del proceso de desvolatilización. Se supone que 40 % pasa a los gases, valor que sería 0,16 kg, y el resto, 0,24 kg, pasa al carbón sólido.

En la figura 1 se puede observar el comportamiento de cada fracción volumétrica con respecto a la temperatura en la fase de pirólisis.

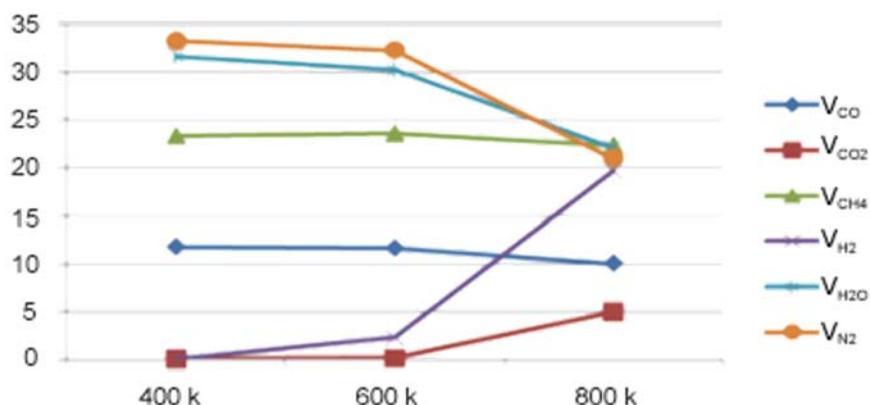


Fig. 1. Comportamiento de las fracciones volumétricas (%) en la fase de pirólisis con respecto a la temperatura.

En el caso de la etapa de gasificación, una vez cumplimentada la desvolatilización y a partir de los datos obtenidos anteriormente, se procede a calcular los valores de las fracciones volumétricas para cada temperatura. Se forma un sistema de 7 ecuaciones similar al de la pirólisis. La tabla 4 muestra los resultados obtenidos.

Tabla 5. Composición de los gases para diferentes temperaturas en el proceso de gasificación

%	900 °K	1 000 °K	1 200 °K
V _{N2}	52,179	51,900	51,407
V _{CO}	15,595	17,502	20,622
V _{CO2}	10,687	8,907	6,092
V _{H2O}	2,445	1,478	20,407e-3
V _{H2}	15,058	16,475	18,703
V _{CH4}	4,033	3,745	3,234
Σ	100	100	100

En la figura 2 se puede ver el comportamiento de cada fracción volumétrica con respecto a la temperatura en la fase de gasificación, a partir de que se inyecta aire como agente gasificante.

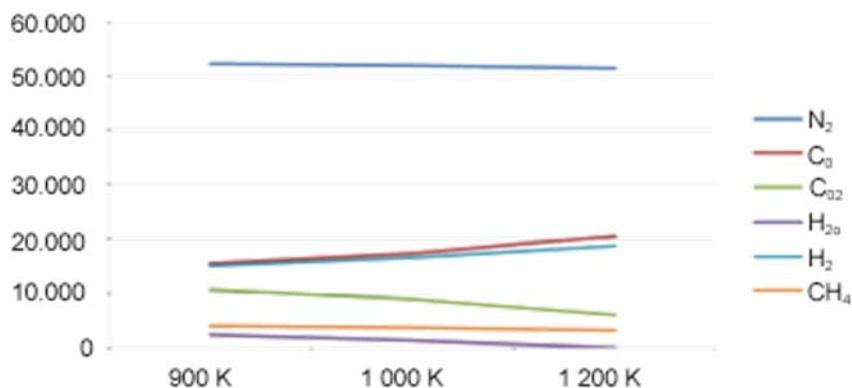


Fig. 2. Comportamiento de las fracciones volumétricas en la fase de gasificación con respecto a la temperatura.

En la tabla 5 se puede observar que la fracción volumétrica del nitrógeno se mantiene prácticamente invariable, debido a que prácticamente no participa en las reacciones que tienen lugar en el proceso. La fracción del CO aumenta con la temperatura, debido a la ausencia del oxígeno necesario para la oxidación de este compuesto, lo que favorece la calidad de la mezcla gaseosa al final de la gasificación. Lo mismo influye en que el CO₂ presente en esta etapa disminuya con el aumento de la temperatura, causado ello por el número insuficiente de moléculas de oxígeno que permita la asociación del carbono y el movimiento hacia el dióxido. Algo parecido le ocurre al H₂O, ya que su presencia va disminuyendo con el aumento de la temperatura por la no posibilidad de la oxidación del H₂ generado, por lo que este último va aumentando su presencia en la mezcla de gases [Hartiniati, et al., 1989; Xu, et al., 1985;].

Poder calórico del gas producto

$$P_{Ci} = (V_{CO} \times 12\,680) + (V_{H_2} \times 10\,800) + (V_{CH_4} \times 35\,900)$$

$$P_{Ci} = (0,20622 \times 12\,680) + (0,18703 \times 10\,800) + (0,03234 \times 35\,900)$$

$$P_{Ci} = 2\,614,86 + 2\,019,92 + 1\,161$$

$$P_{Ci} = 5\,795,786 \text{ kJ/m}^3 \approx 5,8 \text{ MJ/m}^3$$

Este resultado obtenido se corresponde completamente con varios de los trabajos referenciados y encontrados durante la realización de este trabajo [Van der Aarsen, et al., 1982; Xu, et al., 1985; Hiler, 1982; Bingyan y Zhongnan, 1987; Flanigan, et al., 1987].

Simulación del proceso en el Fluent

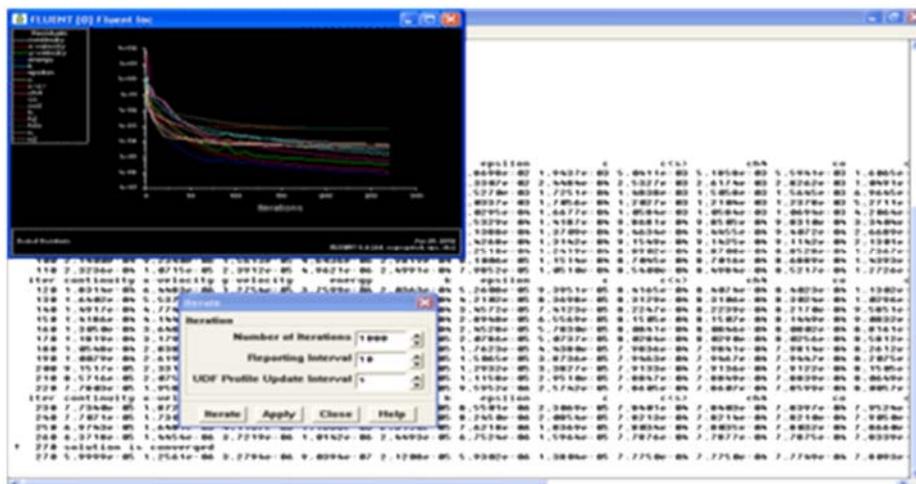


Fig. 3. Análisis interactivo en el Fluent llevando a convergencia.

Perfil de temperatura en el gasificador

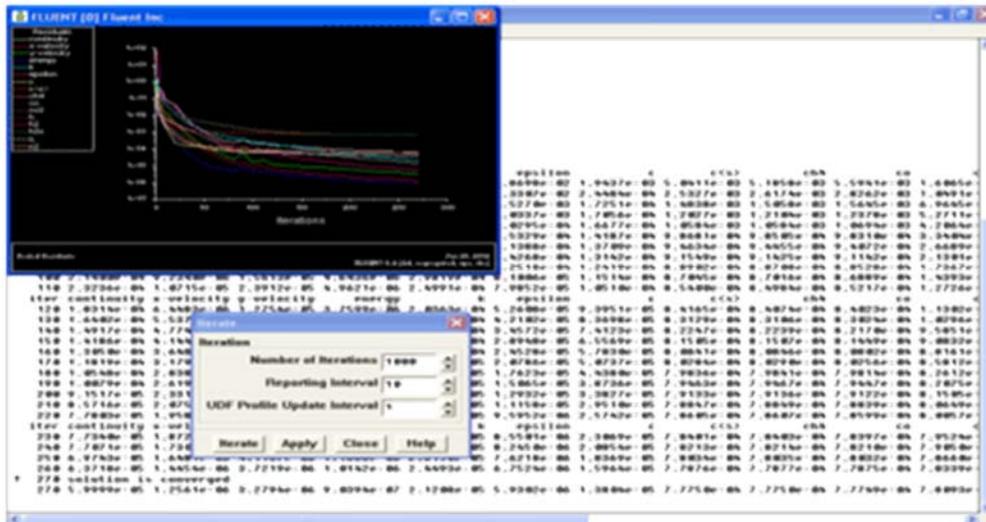


Fig. 4. Perfil de temperatura en el reactor obtenido en la simulación.

Fracciones volumétricas de las especies consideradas

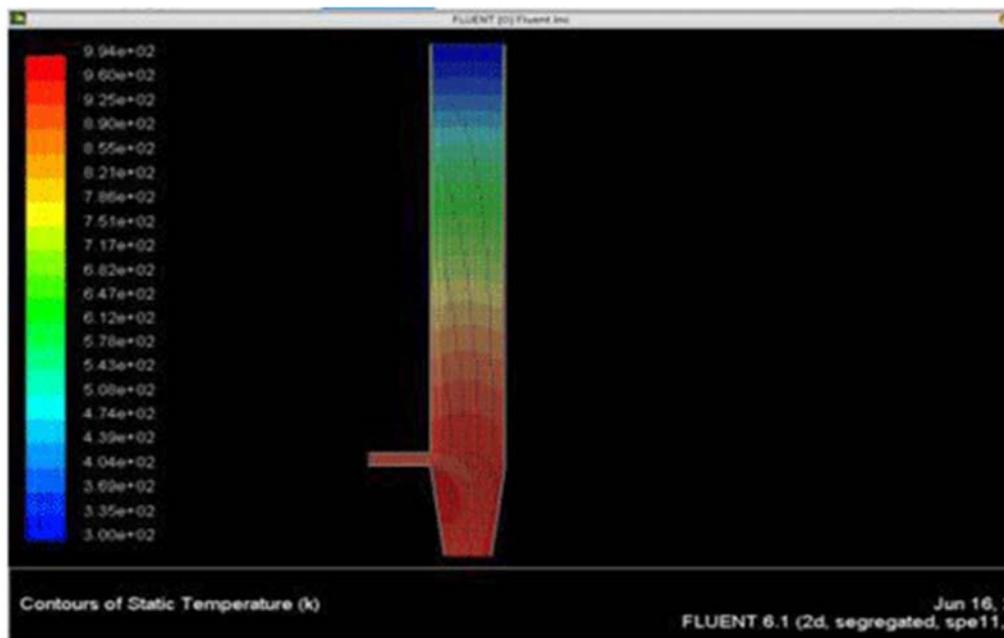


Fig. 5. Comportamiento del CO en el gasificador.

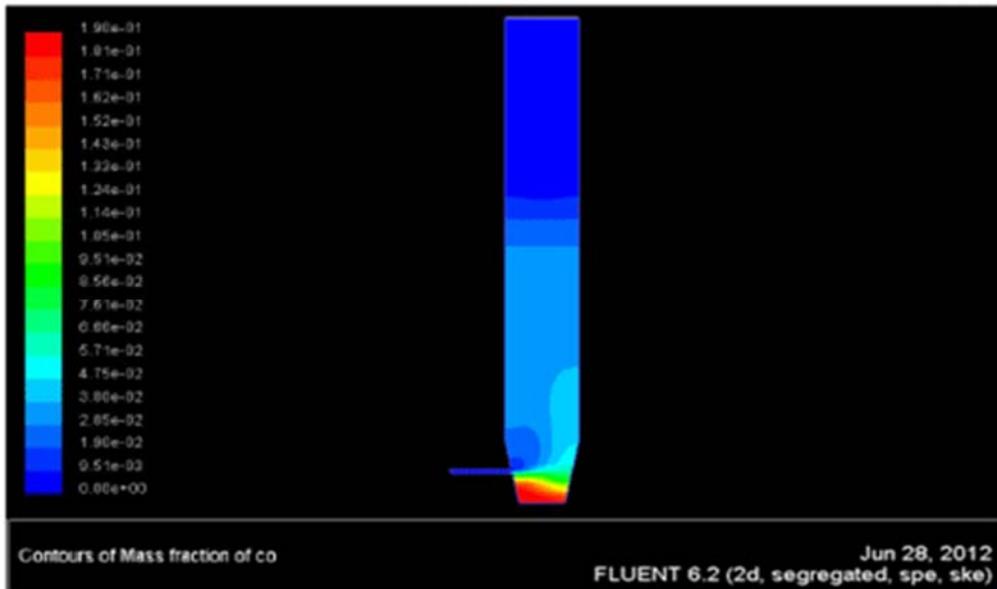


Fig. 6. Comportamiento del CH4 en el gasificador.

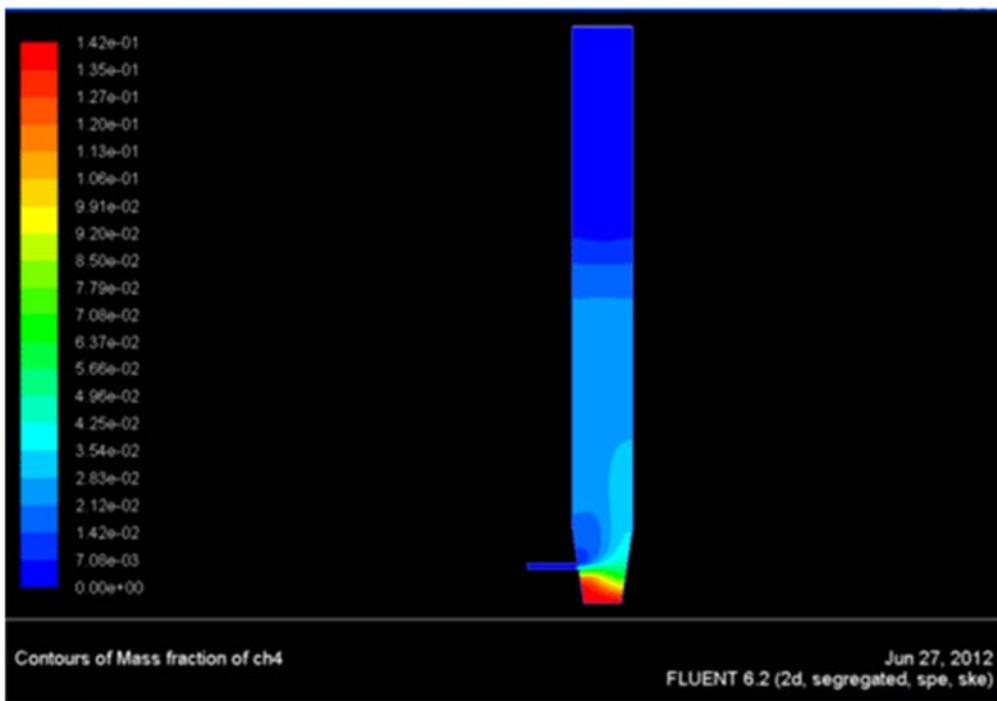


Fig. 7. Comportamiento del H2 en el gasificador.

Aunque la gráfica se parece en el comportamiento, los valores son diferentes y se corresponden con lo obtenido en el modelo en cuanto a comportamiento, no así en valores, fundamentalmente para el CO y el H₂.

Tabla 6. Comparación de la concentración de algunas de las especies gaseosas presentes en el proceso, obtenidas por el modelo propio y por la simulación

Concentración	Modelo propio a 1 200 °K	Simulación por Fluent
CO	0,21	0,19
H ₂	0,18	0,257
CH ₄	0,032	0,14

Conclusiones

1. Se modeló el proceso de gasificación asumiendo las etapas fundamentales de su desarrollo, obteniéndose una valoración de los principales parámetros del proceso para la cáscara de arroz como materia prima.
 - a) Se asumió una temperatura máxima de 1 200 °K (927 °C), acorde a lo que se usa y reporta en la literatura científica internacional [Bridgwater, 1996-2003].
 - b) Las fracciones volumétricas de las especies consideradas en el proceso, tanto a la salida de la pirólisis como al final de la gasificación, se comportan como se espera que ocurra a partir de las características de las etapas. El CO, el CH₄ y el H₂ tienen una variación acorde a lo esperado. El CO₂ y el H₂O también se comportan adecuadamente, al igual que el N₂, que no varía [Hartiniati, et al., 1989; Xu, et al., 1985].
 - c) El poder calórico del gas producto se estimó en 5,795 MJ/m³, lo que se corresponde con la literatura referenciada [Van den Aarsen, et al., 1982; Xu, et al., 1985; Hiler, 1982; Bingyan, et al., 1987; Flanigan, et al., 1987].
2. Se desarrolló la simulación del proceso de gasificación de la cáscara de arroz en el reactor *downdraft* existente en el Ceter mediante el Fluent, arrojando resultados satisfactorios en cuanto al perfil de temperatura y algo alejado de los valores modelados en cuanto a las concentraciones de las principales especies gaseosas consideradas.

Referencias

- BRIDGWATER, A. V. (1996). *Thermal Biomass Conversion and Utilization-Biomass Information System*. U.K.: University of Aston Energy Research Group, 1996. ISBN 92-827-7207.
- LEI, Z.; J. CHEN, Z. ZHANG Y N. SUGIURA (2010). «Methane Production from Rice Straw with Acclimated Anaerobic Sludge: Effect of Phosphate Supplementation», en *Bioresource Technology*, 101 (4343-4348): 2010.
- LI, X.; J. R. GRACE, A. P. WATKINSON, C. J. LIM Y A. ERGUDENLER (2001). «Equilibrium Modeling of Gasification: A Free Energy Minimization Approach and its Application to a Circulating Fluidized Bed Coal Gasifier», en *Fuel*, 80 (195-207): 2001.
- NATARAJAN, A.; A. NORDIN Y A. N. RAO (1998). «Overview of combustion and gasification of rice husk in fluidized bed reactors», en *Biomass and Bioenergy*, 14 (533-546): 1998.
- OLIVA, D. M. (1999). «Combustión del bagazo de caña de azúcar en lecho fluidizado». Tesis Doctoral, Universidad de Valladolid, 1999.
- SANCHES, C. G. Y E. S. LORA (1994). «Biomass Fluidized Bed Gasification Research in the State University of Campinas», en *Energy for Sustainable Development*, 1(4) (31-33): 1994.
- YIN, X. L.; C. Z. WU, S. P. ZHENG E Y. CHEN (2002). «Design and Operation of a CFB Gasification and Power Generation System for Rice Husk», en *Biomass and Bioenergy* 23, (181-187): 2002.
- ZHANG, R. Y Z. ZHANG (1999). «Biogasification of Rice Straw with an Anaerobic-Phased Solids Digester System», en *Bioresource Technology*, 68 (235-245): 1999.

Bibliografía

- BASU, P. (2006). *Combustion and Gasification in Fluidized Bed*. Canadá: Taylor & Francis Group, LLC. Dalhousie University, 2006.
- BINGYAN, X. Y L. ZHONGNAN (1987). "A study of fluidized bed gasification of rice hulls", en *Advances in Solar Energy Technology*, Biennial Congress, Hamburg, Germany, (2312-2316): 1987.
- BRIDGWATER, A. V. (2003). «Renewable Fuels and Chemicals by Thermal Processing of Biomass», en *Chemical Engineering Journal*, 91 (87-102): 2003.
- DE SOUZA SANTOS, M. (2004). «Solid Fuels Combustion and Gasification, Modeling, simulation and equipment operation». Ed. Marcel Dekker Inc. New York. (24-38): 2004.
- FLANIGAN, V. J.; B. Y. XU Y E. HUANG (1987). «Fluidized Bed Gasification of Rice Hulls», en *The Tenth Annual Energy-Sources Technology Conference and Exhibition*, Dallas, Texas, (19-34): 1987.

HARTINIATI, A.; A. SOEMARDJO Y M. YOUVIAL (1989). «Performance of a pilot-scale fluidized bed gasifier fuelled by rice husk», en *Proc. Int. Conf. Pyrolysis and Gasification*, (257-263): 1989.

HILER, E. A. (1982). On-site Energy Production from Agricultural Residues, en *Cent. Energy Miner. Resour.*, Texas A and M University, TX, Report: TENRAC/EDF-074, Order No. DE83900814.

VAN DEN AARSEN, F. G.; A. A. BEENACKERS Y W. P. M. VAN SWAIJ (1982). «Performance of a Rice Husk Fluidized Bed Pilot Plan Gasifier», en *Producer Gas-1982: First Int. Conf. Sri Lanka*, (381-391): 1982.

XU, B. Y.; W. C. HUANG, V. J. FLANIGAN Y O. C. SITTON (1985). «Design and operation of a 6 inch fluidized bed gasifier for rice hulls», en *Symposium on Energy from Biomass and Waste IX*. Organized by IGT. Chicago, USA, (595-613): 1985.

Análisis y diseño de biodigestores de ferrocemento. Comparación económica

Analysis and design of ferrocement biogas digesters. Economic comparison

Por Ing. Henry Hernández Sotomayor,
M.Sc. Ing. Yasser Miguel Díaz Capdesuñer*,
Dr.C. Hugo R. Wainshtok Rivas***

** Instituto de Investigaciones Porcinas (IIP), La Habana, Cuba.*

*** Instituto Superior Politécnico*

José Antonio Echeverría (Ispjae), La Habana, Cuba.

e-mail: hhernandez@iip.co.cu, ydiaz@iip.co.cu,

hugow@tesla.cujae.edu.cu

Resumen

En este trabajo se presenta el análisis y diseño de un biodigestor de ferrocemento de cúpula fija y un nuevo prototipo con forma de canal y cubierta de bóveda, con el propósito de disminuir el gasto de materiales y lograr una mayor eficiencia, al tener una capacidad de almacenamiento del gas producido superior a los tradicionales. Para su estudio se toma un biodigestor tradicional de cúpula fija con una capacidad de 22 m³ de estiércol, para una capacidad de almacenamiento de biogás de 4,7 m³. En su análisis y diseño se emplea el método de Rankine para determinar el empuje del terreno y se diseña mediante el método de las tensiones admisibles, en el que se chequean los parámetros que deben cumplir las estructuras de ferrocemento como son la superficie específica (Sr) y el factor de volumen (Vf); además, se determinaron la cantidad de materiales en cemento, acero, áridos fino y grueso, así como sus costos, plasmando los resultados en tablas.

Palabras claves: Ferrocemento, biodigestores, cúpula, bóveda, biogás

Abstract

This paper presents the analysis and design of a ferrocement biogas digester with a fixed dome and a new prototype with channel and vault roof shape, with the purpose of reducing material waste and achieving greater efficiency, by having a higher gas storage capacity compared to traditional ones. For its study, a traditional fixed dome biogas digester with a capacity of 22 m³ of manure is used, for a biogas storage capacity of 4.7 m³. In its analysis and design, the Rankine method is used to determine the drive of the terrain and is designed by means of the admissible stresses method, in which the parameters that the ferrocement structures must meet are

verified, such as the specific surface (S_r) and the volume factor (V_f). In addition, the amount of materials in cement, steel, fine and coarse aggregates were determined, as well as their costs, and the results are shown in tables.

Keywords: Ferrocement, biogas digesters, dome, vault, biogas

Introducción

Actualmente, entre todos los materiales de construcción para la construcción industrial y civil en general, el más utilizado es el hormigón. La tendencia general en el uso del hormigón armado se basa en el desarrollo de un trabajo activo y profundo para mejorar sus indicadores técnico-económicos, así como la creación y mayor aplicación de nuevos elementos estructurales que se distingan por su menor peso, menor gasto de materiales, mayor porcentaje de fabricación industrial y una mayor seguridad y durabilidad. La solución de todas estas tareas está en correspondencia con la introducción, en la práctica de la construcción, de estructuras de paredes delgadas construidas con ferrocemento.

El ferrocemento puede considerarse precursor del hormigón armado (H.A), siendo la escala la principal diferencia entre ellos. Mientras uno utiliza barras de acero de gran diámetro como refuerzo y árido grueso para conformar la matriz (H.A), el otro emplea alambres de pequeño diámetro y árido fino (ferrocemento).

Las investigaciones teóricas y experimentales desarrolladas con respecto al ferrocemento como material de construcción, y las experiencias en la proyección y construcción de estructuras de este material para los más diversos tipos de edificaciones industriales y sociales, barcos, depósitos, puentes, piscinas, etc., así como los años transcurridos en su explotación y utilización en muchos países del mundo, confirman la gran economía que brindan las estructuras de ferrocemento, así como su elevado grado de seguridad y durabilidad.

Este trabajo aborda el uso del ferrocemento en la construcción de biodigestores, con el propósito de demostrar el ahorro económico que se puede obtener al construir esos biodigestores, en comparación con los tradicionales de cúpula fija, aprovechando que este material es esencialmente ventajoso en estructuras de paredes delgadas que deben ser impermeables, en las que la rigidez y resistencia se aseguran a partir de su estructura de refuerzo, que garantiza una gran resistencia al agrietamiento, teniendo la ventaja de ser moldeable y construirse en el lugar o prefabricado. Además, se propone un nuevo diseño geométrico con el fin de no solo disminuir el costo de materiales, tiempo de ejecución y volumen de excavación de la obra, sino también lograr una mayor eficacia

al proporcionar una mayor capacidad de almacenamiento del gas obtenido por la degradación de los residuales.

En el mundo se han construido pequeños biodigestores de ferrocemento con capacidades inferiores a los 8 m³; sin embargo, en este trabajo se aborda el análisis y diseño de un biodigestor de ferrocemento de cúpula fija de 22 m³ de capacidad, y otro tipo canal de igual capacidad, y se demuestra que la utilización de este material en la construcción de biodigestores brinda soluciones más racionales que las construidas con bloques huecos de hormigón.

Definición de ferrocemento

Entre muchas definiciones del ferrocemento, el autor recomienda la señalada por el Profesor Antoine Naaman [Galiano, 2009]. Es una lámina de pequeño espesor, construida con mortero de cemento hidráulico reforzado con telas de mallas formadas con alambres continuos y de relativamente pequeño diámetro. La tela de mallas puede ser hecha de alambres metálicos o de cualquier otro material adecuado. La matriz de mortero y su composición deben ser compatibles con la tela de mallas y la armadura de esqueleto al cual se fija. La matriz puede contener fibras discontinuas.

Introducción del ferrocemento como material de construcción en Cuba

A mediados de la década del 60 fue necesario desarrollar en Cuba una flota pesquera que cubriera las necesidades crecientes del país en la explotación de los recursos marinos. Se precisaba la sustitución de los viejos barcos de pesca de madera, pero la madera para la construcción de embarcaciones debía importarse. Por otra parte, no se disponía de la técnica para la construcción de barcos de acero, no había obreros especializados ni se contaba con una industria siderúrgica que produjera las planchas de acero necesarias. Se necesitaba, por lo tanto, la búsqueda de nuevas alternativas.

Biodigestor

Es todo depósito usado para el tratamiento de residuales, y se pueden clasificar en función de su tecnología y materiales de construcción.

En cuanto a sus materiales de construcción, estos pueden ser:

De bloques huecos de hormigón con cúpula de ladrillos.

Tubulares de PVC, polietileno, PDA, Red Mud Plastic, etcétera.

Tipo túneles con manta de EPDM.

- Nueva propuesta: ferrocemento.
Según su tecnología se pueden clasificar en:
Biodigestores de cúpula fija
Biodigestores de campana móvil
Tubulares
Tipo túneles
- Nueva propuesta: biodigestor de ferrocemento tipo canal de bóveda.



Fig. 1. Biodigestores de cúpula fija.



Fig. 2. Biodigestores tipo túneles.



Fig. 3. Biodigestores tubulares.

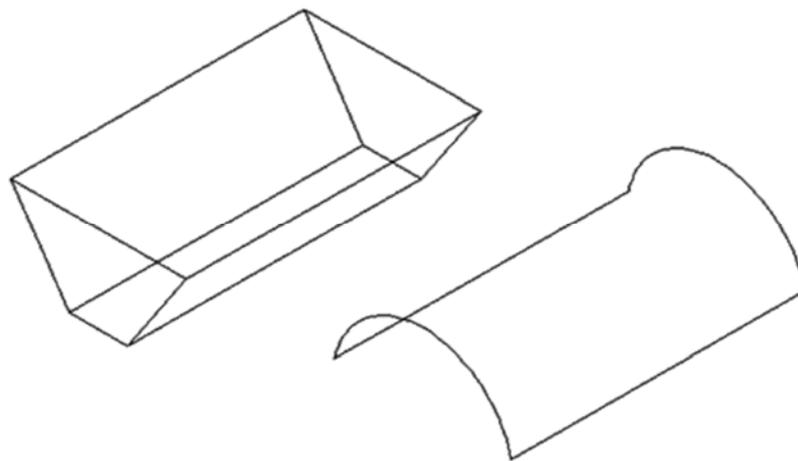


Fig. 4. Biodigestor de ferrocemento tipo canal de bóveda, propuesto.

Diseño del biodigestor de ferrocemento

Para el diseño del biodigestor de ferrocemento se tomaron las mismas consideraciones de los biodigestores construidos de bloques huecos de hormigón armado con cúpula de ladrillos. Este es soterrado, tiene una capacidad de 22 m³, un diámetro de 3,68 m y una profundidad de 2 m con una capacidad de almacenamiento de biogás de 4,7 m³; este se compara con uno de cúpula fija de ferrocemento de igual capacidad y con la nueva

propuesta del biodigestor tipo canal de bóveda con una capacidad de almacenamiento de biogás de 12 m³.

Para el diseño del tanque se tomó como material de relleno perimetral un suelo friccional y se consideraron dos estados de carga empleando el método de Rankine para el análisis y diseño del biodigestor.



Fig. 5 Estado de carga 1. Depósito vacío. Estado de carga 2. Depósito lleno

El estado de carga 1 es el caso más desfavorable; para el diseño del tanque se determinó el empuje lateral del terreno, y para el diseño de la cúpula, la presión generada por el biogás sobre la cúpula a través del método de las tensiones admisibles.

Para la losa de fondo se tomó como hipótesis que esta trabaja solo como una capa impermeable, pues la presión del agua es compensada con la reacción del suelo, es decir, se equilibran las cargas, para lo cual se consideró que el manto freático no llegaría en ningún caso a las cercanías del fondo; la resistencia del suelo se consideró de 0,15 MPa (1,5 kg/cm²).

En todos los casos se verificaron los parámetros a considerar en estructuras de ferrocemento, los cuales son: factor de volumen del refuerzo (V_f), que oscila entre 1 y 8 %, y la superficie específica del refuerzo (S_r), oscila entre 0,5 y 2 cm⁻¹, tomándose como tensión admisible a tracción, 5 MPa, y una tensión admisible a compresión de 0,45 f/c.

Fórmulas a utilizar en el método de tensiones permisibles

$\delta_{ft} = M / W$, tensión admisible no mayor de 5 MPa	(1)
$W = (\eta m \times \phi^1) (\delta m / E m) S$, ancho de fisura (no mayor de 0,05 mm)	(2)
$V_r = V_{refuerzo} / V_{compuesto}$, factor de volumen de refuerzo (1-8 %)	(3)
$S_r = A_{refuerzo\ superficial} / V_{compuesto}$, superficie específica de refuerzo (0,5-2 cm ⁻¹)	(4)

Tabla 1. Biodigestor de ferrocemento de cúpula fija

Elementos	$\delta_{act.}$, Mpa	$\delta_{adm.}$, Mpa	Sr, cm-1	Vf, %	Telas de malla, u	Refuerzo de esqueleto, $\varnothing = 8$ mm, @ en cm
Paredes	1,47	11,25	0,56	1,28	2	30 x 30
Cúpula	1,18	11,25	0,56	1,28	2	30 x 30

A partir de esto se realiza un estudio variando la geometría, no solo buscando un ahorro de materiales sino facilidad constructiva y mejor aprovechamiento del biogás producido por día. Se determinó que la forma de canal con una bóveda como cubierta brinda mayor capacidad de almacenamiento y aprovechamiento del biogás obtenido de la degradación anaerobia de los residuales, teniendo la canal forma de trapecio isósceles con 1,25 m en la base menor, 3 m en la base mayor, 1,3 m de profundidad y una longitud de 8 m; para una capacidad de almacenamiento de biogás de 12 m³, la bóveda tiene una cuerda de 3 m y una altura de 0,8 m, lo que da una longitud arco de 3,4 m.

Tabla 2. Biodigestor de ferrocemento tipo canal de bóveda

Elementos	$\delta_{act.}$, Mpa)	$\delta_{adm.}$, Mpa	Sr, cm-1	Vf, %	Telas de malla (u)	Refuerzo de esqueleto, $\varnothing = 8$ mm, @ en cm
Canal	0,34	5	0,91	1,8	2	-
Bóveda	1,56	11,25	0,56	1,28	2	30 x 30

Comparación de materiales utilizados en los tres biodigestores

El biodigestor objeto de estudio construido con bloques huecos de hormigón y cúpula fija de ladrillos, tiene 3,68 m de diámetro, 2 m de altura, una capacidad de 22 m³ de digestión y una capacidad de 4,7 m³ de almacenamiento de biogás. El mismo será comparado con uno similar utilizando el ferrocemento como material de construcción, y con otro variando la geometría, manteniendo la misma capacidad de digestión que permite una mayor capacidad para almacenar el biogás generado.

Tabla 3. Comparación con respecto a la cantidad de materiales

Materiales	Biodigestor tradicional	Biodigestor de ferrocemento	Biodigestor de ferrocemento tipo canal
Cemento, sacos	72	24	17
Arena, m3	6	1,5	1
Acero, t	0,22	0,45	0,34
Telas de malla, m2	-	222	135
Bloques, u	435	-	-
Ladrillos, u	900	-	-

Tabla 4. Comparación con respecto al costo de materiales

Costo de materiales	Biodigestor tradicional	Biodigestor de ferrocemento	Biodigestor de ferrocemento tipo canal
Cemento, MN	8 640	2 880	2 040
Arena, MN	1 140	285	190
Acero, MN	1 200	2 540	1 875
Telas de malla, CUC	-	444	270
Bloques, MN	3 480	-	-
Ladrillos, MN	3 600	-	-
Costo total, MN	18 060	5 705	4 105
Costo, CUC	-	444	270

Resultados y conclusiones

El costo es entre 2 y 4 veces menor.
Es impermeable.

Más fácil de construir y puede prefabricarse.
Igual vida útil.
Mínimo mantenimiento igual que los contruidos con bloques huecos de hormigón.

Conclusiones

En este trabajo queda demostrado que existe un ahorro significativo de al menos tres veces el costo de inversión de los biodigestores tradicionales de cúpula fija con respecto a los contruidos de ferrocemento de cúpula fija, y cuatro veces más económico empleando la nueva propuesta de biodigestores de ferrocemento tipo canal de bóveda, teniendo en cuenta solo el gasto en materiales (acero, áridos y cemento).

Bibliografía

- GALIANO ORTIZ, AMADO F. (2009). «El ferrocemento y sus posibilidades para el desarrollo de las comunidades pesqueras para el continente». Empresa de Proyectos Navales (CEPRONA), 2009.
- NAAMAN, ANTOINE E. (2011). *Ferrocement & Laminated and Cementitious Composites*. Michigan: Techno PRESS 3000, 2011.
- WAINSHOK RIVAS, HUGO R. (2010). *Ferrocemento: Diseño y construcción*. Ribamba: Ed. Riobamba, 2010.

Estudio de modelo cubano de torre autosoportada en túnel de viento

Study of Cuban model of self-supporting tower in wind tunnel

Por M.Sc. Ing. Patricia Martín Rodríguez,
Dra.C. Ing. Vivian B. Elena Parnás*, M.Sc. Ing. Acir Mércio Loredo-Souza**,
y Dr.C. Ing. Edith Beatriz Camaño Schettini****

** Centro de Construcción y Arquitectura Tropical (Cecat),
Facultad de Ingeniería Civil, Instituto
Superior Politécnico José Antonio Echeverría (Ispjae),
La Habana, Cuba.*

*** Laboratorio de Aerodinámica de las Construcciones,
Universidad Federal de Río Grande del Sur, Brasil.*

**** Instituto de Pesquisas Hidráulicas,
Universidad Federal de Río Grande del Sur, Brasil.
e-mail: patriciamr@civil.cujae.edu.cu, acir@ufrgs.br*

Resumen

Las torres autosoportadas de telecomunicaciones son estructuras que presentan al viento como carga predominante en su diseño, además, tienen como característica especial la presencia de antenas que actúan como pantallas frente al viento, generando fuerzas adicionales sobre la torre. En los últimos años, debido al paso de los ciclones por el territorio cubano fallaron varias torres autosoportadas de telecomunicaciones que generaron pérdidas económicas y sociales, razón por la cual el estudio del efecto del viento en estas tipologías estructurales es de gran importancia. En este trabajo se realiza un estudio experimental en túnel de viento a un modelo cubano de torre autosoportada conformada por perfiles angulares, que se encuentra construida en varias localidades del país. El objetivo del trabajo es obtener de forma experimental los coeficientes de arrastre de la torre y el incremento en los coeficientes de arrastre para diferentes casos de posiciones de parábolas colocadas sobre la torre. Se experimentan cuatro tramos de la torre que tienen diferentes relaciones de solidez, y se comparan los coeficientes de arrastre experimentales con los propuestos por las normas ESDU (81028), Canadiense (CSA S37-01, 2001), Australiana (AS 3995-1994), Británica (BS1800-4, 1995), Eurocódigo (EC 3: Part 3-1, 2007), Estadounidense (TIA/EIA-222-G, 2005) y Brasileña (NBR 6123, 1988).

Palabras claves: Torre autosoportada de telecomunicaciones, coeficientes de arrastre, túnel de viento

Abstract

The self-supporting telecommunication towers are structures that have wind as the predominant load in their design. In addition, they have as a special feature: the antennas that act as screens against the wind, generating additional forces on the tower. In recent years, due to the impact of cyclones on the Cuban territory, several self-supporting telecommunication towers failed, generating economic and social losses, which is why the study of the effect of wind on these structural typologies is of great importance. In this paper, an experimental wind tunnel study is carried out on a Cuban model of self-supporting tower formed by L beams, which is built in several locations in the country. The objective of the paper is to obtain experimentally the drag coefficients of the tower and the increase in the drag coefficients for different cases of parabolic positions placed on the tower. Four sections of the tower having different solidity ratios are tested, and the experimental drag coefficients are compared with those proposed by the standards ESDU (81028), Canadian (CSA S37 -01, 2001), Australian (AS 3995-1994), British (BS1800 -4.1995), Eurocode (EC 3: Part 3-1, 2007), American (TIA / EIA -222-G, 2005) and Brazilian (NBR 6123, 1988).

Keywords: Self- supporting telecommunications tower, drag coefficients, wind tunnel

Introducción

Las torres autosoportadas de telecomunicaciones son estructuras que presentan al viento como carga predominante en su diseño, además, tienen como característica especial la presencia de antenas que actúan como pantallas frente al viento, generando fuerzas adicionales sobre la torre. En los últimos años, debido al paso de los ciclones por el territorio cubano, fallaron varias torres autosoportadas de telecomunicaciones que generaron pérdidas económicas y sociales, y razón por la cual el estudio del efecto del viento en estas tipologías estructurales es de gran importancia.

El valor de la carga de viento a aplicar sobre una torre de celosía, depende de muchos factores que pueden agruparse en parámetros meteorológicos y parámetros aerodinámicos o de forma. Los parámetros meteorológicos actúan modificando la velocidad de viento, mientras que los aerodinámicos modifican el valor de la presión ejercida por el viento sobre la estructura; los parámetros aerodinámicos tienen en cuenta la resistencia aerodinámica de los objetos expuestos al viento, y en este trabajo el parámetro aerodinámico que se estudia es el coeficiente de arrastre. La principal herramienta para la obtención de los parámetros aerodinámicos, en particular los coeficientes de fuerza aerodinámicos, han sido los túneles de viento.

Los principales autores [Bayar, 1986; Carril e Isyumov, 2003; Carril, 2000; Eiffel, 1911; Flachsbart, 1932; Flachsbart y Winter, 1955; Flint y Smith, 1980; Georgakis, et al., 2009; Georgiou y Vickery, 1980; Gould y Raymer, 1972; Holdo, 1993; Johnsen, 2009; Klein, 2004; Loredou-Souza, et al., 2008; Machado, 2003; Nielsen, 2001; Rippel, 2005; Sykes, 1981; Whitbread, 1979] que realizaron estudios sobre los coeficientes de fuerzas aerodinámicas, en particular los coeficientes de arrastre y sobre las torres autosoportadas de telecomunicaciones, han resumido los aspectos principales que se tienen en cuenta para la obtención de estos parámetros, ellos son: i) Razón de aspecto, relación entre largo / ancho; ii) Índice de área expuesta o relación de solidez; iii) Efecto de protección de los reticulados a barlovento ejercido sobre los reticulados a sotavento, cuantificado numéricamente por medio del parámetro denominado «factor de protección» [Flachsbart, 1932; Flachsbart y Winter, 1955; Georgiou y Vickery, 1980; Whitbread, 1979]; iv) Orientación de la estructura reticulada en relación al ángulo de incidencia del viento; v) Inclinación de las barras de la torre; vi) Forma de las barras aisladas directamente asociada a los valores de número de Reynolds; en las barras prismáticas de aristas vivas los efectos asociados al número de Reynolds y a la rugosidad son minimizados [Bayar, 1986; Carril, 2000; Flachsbart y Winter, 1955; Holdo, 1993; Klein, 2004], vii) Turbulencia contenida en el flujo; la mayoría de los estudios expresan que en perfiles de aristas vivas la turbulencia en el flujo es relativamente pequeña y puede ser despreciada a partir de determinado número de Reynolds [Carril y Isyumov, 2003; Carril, 2000; Holdo, 1993; Klein, 2004; Machado, 2003].

El estudio del efecto de las antenas en el comportamiento aerodinámico de las torres de celosía de telecomunicaciones, se ha concentrado fundamentalmente en la obtención de los coeficientes de fuerza aerodinámicas y en factores de interferencia producto de la presencia de las antenas parabólicas [Carril y Isyumov, 2003; Carril, 2000; Holmes, et al., 1993; Whitbread, 1977 y 1978], a través de ensayos en túnel de viento. Los factores de interferencia tienen en cuenta los efectos de protección que se producen entre la parábola y la celosía de la torre.

El objetivo del trabajo es obtener de forma experimental los coeficientes de arrastre de un modelo cubano de torre autosoportada, y el incremento en los coeficientes de arrastre para diferentes casos de posiciones de parábolas colocadas sobre la torre. Se experimentan cuatro tramos de la torre que tienen diferentes relaciones de solidez y se obtiene el incremento en el coeficiente de arrastre para tres posiciones de parábolas sobre la sección transversal de la torre. El estudio se realiza a través de ensayos en túnel de viento.

Descripción del estudio experimental

La torre de telecomunicaciones seleccionada para el estudio es un modelo cubano de fabricación nacional, del tipo autoportada de sección cuadrada variable, con la altura (tronco piramidal) conformada por perfiles angulares, y presenta una torreta de sección constante desde los 45 metros de altura, cuyo esquema se puede ver en la figura 1. Dicho esquema representa la torre y las características de los cuatro modelos seccionales (módulos) de la torre construidos para el ensayo. Los modelos seccionales con diferentes relaciones de solidez (Φ) fueron construidos con elementos angulares de madera, ver figura 2. Las escalas geométricas utilizadas para los modelos fueron de 1:10 para los módulos del 2 al 4, y de 1:15 para el módulo 1.

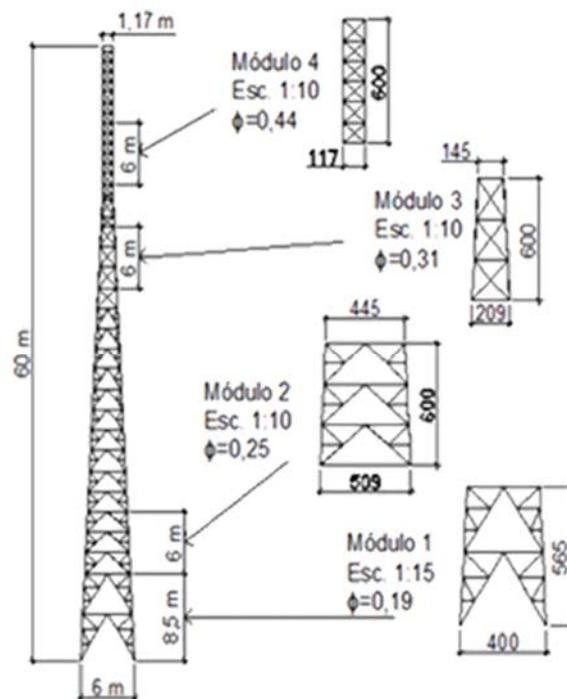


Fig. 1. Esquema del prototipo y modelos.

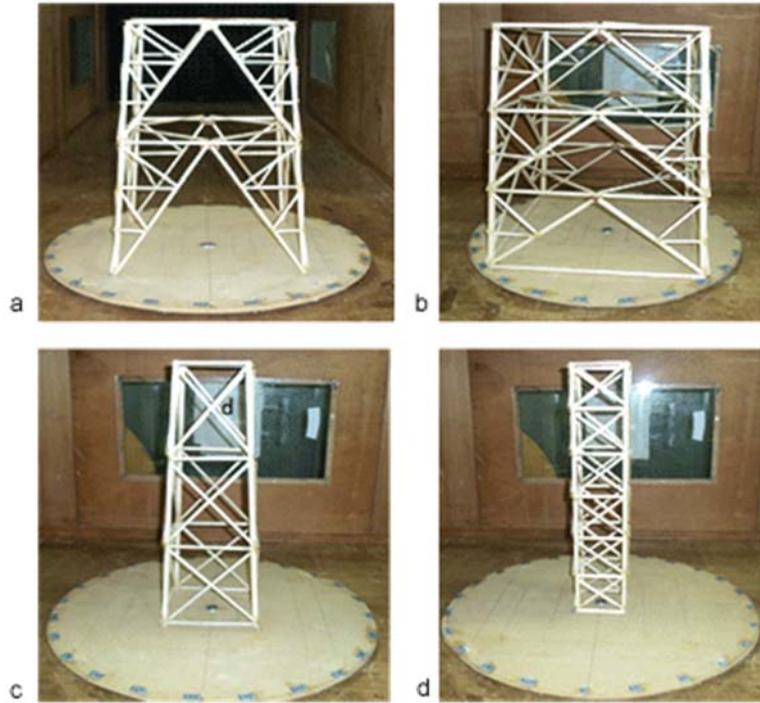


Fig. 2. Fotos módulos, a) Módulo 1, b) Módulo 2, c) Módulo 3, d) Módulo 4.

Según las indicaciones de las normas de torres de telecomunicaciones [AS..., 1994; BS..., 1995; Canadian..., 2001; CIRSOC..., 1992; EC..., 2007; TIA..., 2005] y normas de viento en edificaciones [NBR..., 1988; NC..., 2003], las direcciones de viento registradas fueron 0 y 45 grados para los módulos sin antenas.

La antena parabólica escogida para este estudio tiene un diámetro de dos metros, y los detalles de sus características geométricas fueron obtenidos del catálogo de la empresa RFS [2013]. Para la construcción de los modelos de antenas parabólicas se elaboró un molde de madera con las dimensiones requeridas y las parábolas fueron construidas con yeso. Fueron construidos dos modelos de parábolas a dos escalas diferentes en correspondencia con los módulos de la torre: escala 1:10 para los módulos 2, 3, 4 y otro modelo a escala 1:15 para el módulo 1. Las direcciones de viento ensayadas para las antenas individuales fueron de 0 a 180 grados, con intervalos de 45 grados (Fig. 3).



*Fig. 3. Antenas parabólicas en túnel de viento,
a) Ángulo de incidencia del viento,
b) Foto de antena parabólica en el túnel para dirección 90°,
c) Foto de antena parabólica en el túnel para dirección 180°.*

En función de los datos de campo encontrados de torres autosoportadas con presencia de antenas parabólicas en Cuba, y según las posiciones que pueden generar diferentes efectos del flujo de viento sobre la torre, fueron seleccionados tres casos de estudio (Casos 1, 2 y 3) que presentan una sola parábola colocada en diferentes posiciones (Fig. 4).

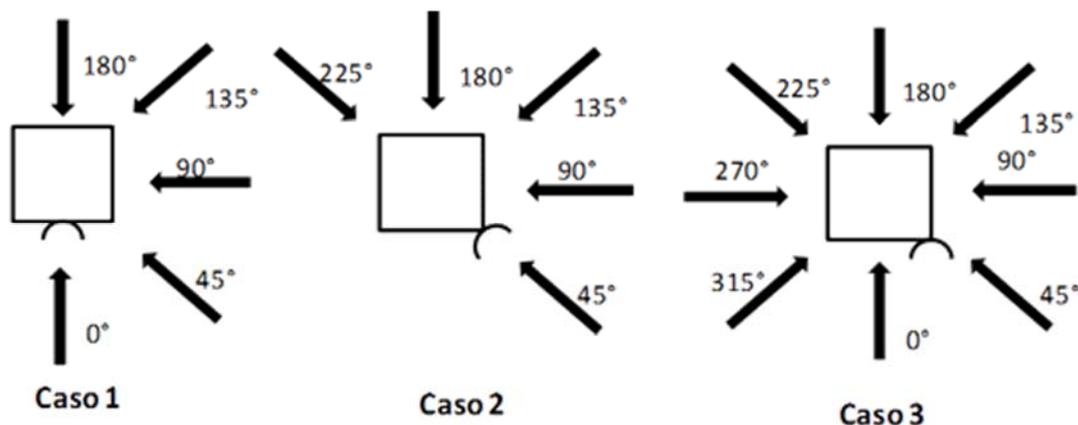


Fig. 4. Casos que presentan unas parábolas y direcciones de viento ensayadas.

El trabajo experimental fue realizado en el Túnel de Viento Prof. Joaquim Blessmann, del Laboratorio de Aerodinámica de las Construcciones (LAC) de la Universidad Federal de Río Grande del Sur (UFRGS). Se trata de un túnel de viento de capa límite de circuito cerrado, proyectado específicamente para realizar estudios de efectos estáticos y dinámicos sobre modelos de construcciones civiles en general [Blessmann, 1982].

Se simuló un perfil de velocidades uniforme, con dos intensidades de turbulencia, clasificadas como intensidad de turbulencia 1 con un valor de 0,2 % (IT1) e intensidad de turbulencia 2 con un valor de 12 % (IT2). El

perfil de velocidades turbulento fue generado a partir de la utilización de una malla. La velocidad de viento escogida para los ensayos fue de 15 m/s.

La medición de las fuerzas de arrastre se realizó con una balanza unidireccional acoplada con *strain-gages* (extensómetros eléctricos).

Resultados

Los resultados están basados en los valores de los coeficientes de arrastre para los módulos de las torres sin antenas y para las parábolas de forma independiente. Además, se calcularon los incrementos en el coeficiente de arrastre para los tres casos de ubicación de parábolas ensayados.

El coeficiente de arrastre es un número adimensional, definido en la ecuación 1.

$$C_a = F_a / (\frac{1}{2}\rho \times V^2 \times A_r) \quad (1)$$

Donde:

F_a: Fuerza de arrastre medida con la balanza

ρ: Densidad del aire

V: Velocidad medida en el ensayo

A_r: Área de referencia. Los valores del área de referencia utilizados son los correspondientes al área proyectada frontal de los modelos, tanto de las antenas parabólicas como los de las torres.

Los valores de los coeficientes de arrastre de los módulos de la torre obtenidos experimentalmente para la dirección cero grado, se compararon con los valores propuestos por diferentes normas de cálculo de estructuras bajo la acción del viento [Whitbread, 1978; BS..., 1995; Canadian..., 2001; CIRSOC..., 1992; RFS, 2013] (Fig. 5). Estos resultados corroboran los estudios de Georgiou y Vickery [1979], que plantean que existen diferencias entre los valores de coeficientes de arrastre para torres de celosía según diferentes normas, y que a su vez pueden existir variaciones de los resultados experimentales con los normativos. Esos resultados experimentales muestran mayores valores de coeficientes de arrastre para flujos de alta intensidad de turbulencia (IT2), lo cual coincide con los resultados obtenidos por Smith [2007] y difieren de la mayoría de las referencias que exponen mayores valores para flujos de baja intensidad de turbulencia.

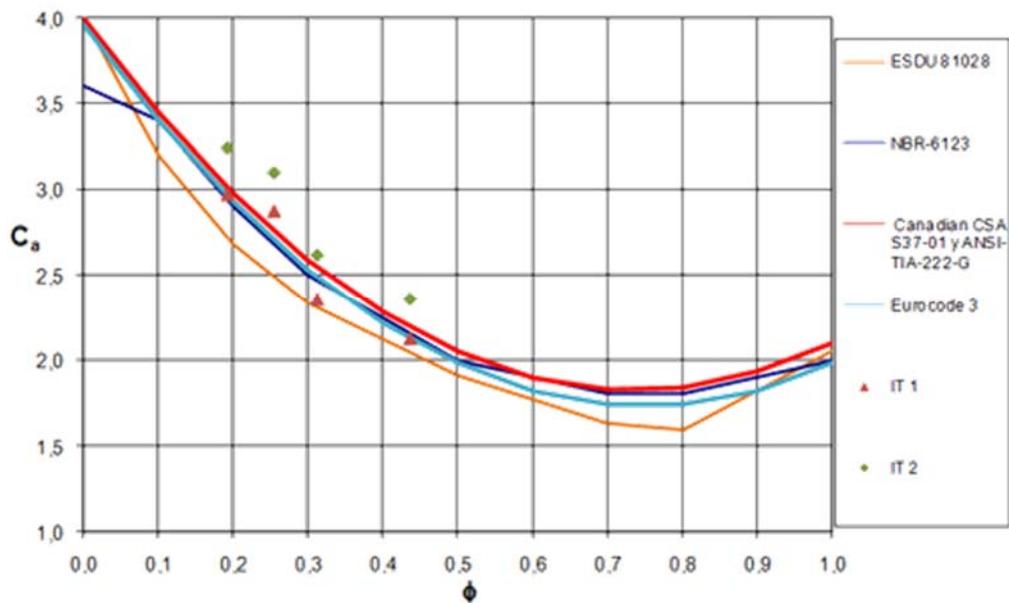


Fig. 5. Comparación de coeficientes de arrastre normativos, con los resultados experimentales obtenidos para los 4 módulos.

Los valores de coeficientes de arrastre obtenidos experimentalmente para las direcciones de viento 0 y 45 grados, se muestran en la tabla 1.

Tabla 1. Coeficientes de arrastre experimentales

Módulo	ϕ	Ca			
		0		45	
		Suave	Turbulento	Suave	Turbulento
1	0,192	2,98	3,247	3,13	3,33
2	0,254	2,88	3,10	2,89	3,05
3	0,313	2,35	2,62	2,64	2,78
4	0,436	2,13	2,36	2,53	2,67

En la figura 6 se muestran los valores experimentales obtenidos de los coeficientes de arrastre de las parábolas para diferentes direcciones de viento. Se representan los resultados para las dos parábolas construidas a diferentes escalas.

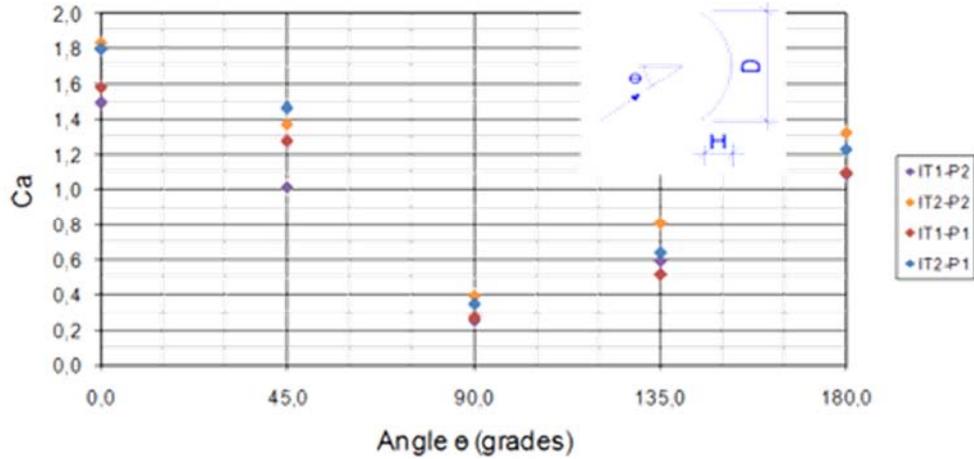


Fig. 6. Coeficientes de arrastre para las parábolas 1 (escala 1:15, $H/D = 0,177$) y 2 (escala 1:10 $H/D = 0,182$).

El incremento en el coeficiente de arrastre producto de la presencia de las parábolas, está definido según la ecuación 2, y el porcentaje de incremento se obtuvo a partir de normalizar el incremento con el valor del coeficiente de arrastre de la torre sin antenas (ver ecuación 3). Los porcentajes de incremento en el coeficiente de arrastre producto de la presencia de las parábolas para los diferentes casos de posición horizontal, se muestran en los gráficos de la figura 7. Los mismos muestran de forma radial el porcentaje de incremento para cada una de las direcciones de viento en que fueron ensayados los módulos de la torre.

$$\Delta C_a = (F_{\text{torre+antenas}} - F_{\text{torre}}) / (\frac{1}{2}\rho \times V^2 \times A_{\text{proyectorde torreSA}}) \quad (2)$$

$$\% \Delta C_a = 100 \times [(F_{\text{torre+antenas}} - F_{\text{torre}}) / (\frac{1}{2}\rho \times V^2 \times A_{\text{proyectorde torreSA}})] / C_{\text{atorre}} \quad (3)$$

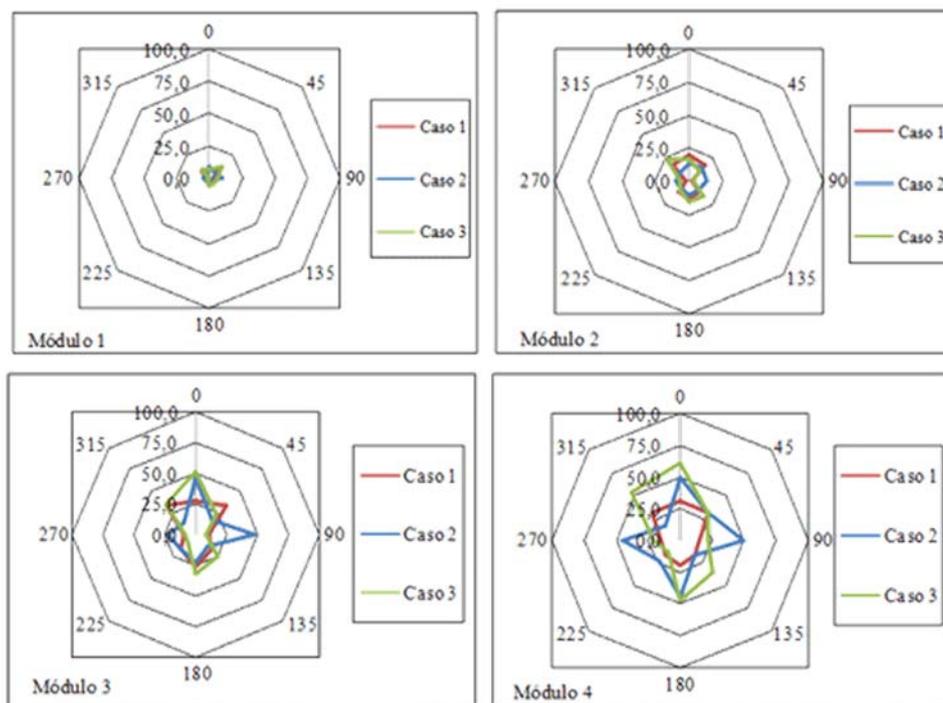


Fig. 7. Porcentaje de incrementos en el coeficiente de arrastre por presencia de parábolas.

En la figura 7 se aprecia que a medida que aumenta la relación entre el área de la parábola y el área bruta del módulo de la torre, aumentan los incrementos en el coeficiente de arrastre (Tabla 2). Se aprecia que en los módulos 1 y 2, donde la relación de áreas es menor que 0,1, los incrementos para todos los casos no superan 25 %, mientras que en los módulos 3 y 4, en los que la relación de área es mayor que 0,26, los incrementos alcanzan valores iguales o mayores de 50 %.

Tabla 2. Relación del área de parábola con el área bruta del tramo de torre

Casos	Área bruta torre, m ²	Área de parábolas, m ²	Relación A.parábola/A.bruta torre
M1	0,209	0,010	0,05
M2	0,286	0,027	0,10
M3	0,106	0,027	0,26
M4	0,070	0,027	0,39

Los menores incrementos en el coeficiente de arrastre para los casos de una parábola, se producen para el Caso 1, y los mayores incrementos se producen para la posición de la parábola del Caso 3. Esto se puede explicar por el aumento del área expuesta al viento, ya que una parte del área de la antena no está sobre la torre.

Conclusiones

1. Los valores experimentales de los coeficientes de arrastre de los módulos de la torre obtenidos para flujo de baja intensidad de turbulencia son similares a los propuestos por las normas internacionales; sin embargo, los obtenidos para flujos de alta intensidad de turbulencia varían con respecto a los valores normativos, lo cual coincide con lo expresado por algunas bibliografías consultadas. En futuros trabajos se propone profundizar en las causas de las diferencias obtenidas en los resultados de los coeficientes de arrastre para las dos intensidades de turbulencia estudiadas.
2. El estudio de los incrementos de coeficientes de arrastre para los casos de posiciones en las parábolas estudiados, demostró que a medida que los módulos tienen menor área bruta el efecto de las antenas es más significativo y los valores de coeficientes de arrastre aumentan.

Reconocimientos

Los autores desean agradecer a la fundación brasileña CAPES (Fundación de Coordinación para el Perfeccionamiento del Personal de Nivel Superior), por el financiamiento proporcionado que hizo posible la realización de este trabajo.

Referencias

- AS3995-1994 (1994). *Australian Standard: Design of Steel Lattice Towers and Masts*. 1994.
- Bayar, D. (1986). «Drag Coefficients of Latticed Towers», en *Journal of Structural Engineering*, 1986. 112(2) (417-430): 1986.
- BLESSMANN, J. (1982). «The Boundary Layer tv-2 Wind Tunnel of the UFRGS», en *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 10(2) (231-248): 1982.
- BS1800-4 (1995). *British Standards Institution, British Standards on Lattice Towers and Masts: Part 4 Code of Practice for Loading of Guyed Masts*. Londres: 1995.

Canadian Standards Association (2001). *Antennas, Towers, and Antenna Supporting Structures, CSA S37-01*. Rexdale, Canada: 2001.

CARRIL J. R., C. F. (2000). «Análise numérica e experimental do efeito dinâmico do vento em torres metálicas treliçadas para telecomunicações». Tesis de doctorado, en Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 2000.

CARRIL, J. R. Y C. L. F., ISYUMOV (2003). «Experimental Study of the Wind Forces on Rectangular Latticed Communication Towers with Antennas», en *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 91(8) (1007-1022): 2003.

CIRSOC-306 (1992). *Estructuras de acero para antenas*. Argentina: INTI-CIRSOC, 1992.

EC3: Part 3-1 (2007). *Eurocode 3: Design of Steel Structures - Part 3-1: Towers, Masts and Chimneys-Towers and Masts*. 2007.

EIFFEL, G. (1911). *Résistance de l'air et l'aviation:expériences effectuées au laboratoire do Champ-de-Mars*. Paris: Ed. H. Dunod y E. Pinat, 1911.

FLACHSBART, O. (1932). «Winddruck auf vollwandige bauwerke und gitterfachweke (Wind Pressures on Solids Walls and Framed Structures)», en *Mémoires Association Internationale de Pontes et Charpentes*, 1 (153-1172): 1932.

FLACHSBART, O. Y H. WINTER, H. (1955). «Model Research on the Wind Loading of Lattice Structures, in publication original. Modellversuche uber die Belastung von Gitterfachwerken durch Windkrafte», en *Journal Der Stahlbau, Part 1 appears on pages 65 to 69 of the April 27, 1934, issue and on pages 73 to 79 of that for :May 11, 1934. Part 2 was printed on April 26, 1936, pages 65 to 77, t.d.a.p.B.L.T.e*. 1955, Editor. 1934-1935, Sandia Corporation: Albuquerque, 1955.

FLINT, A. R. Y B. W. SMITH (1980). «The Development of the British Draft Code of Practice for the Loading of Lattice Towers», en *Wind Engineering, Proceedings of the 5th International Conference*. 1979. Fort Collins, CO: Pergamon Press, 1980.

GEORGAKIS, C.T., et al. (2009). «Drag Coefficients of Lattice Masts from Full-Scale Wind-Tunnel Tests», en *European & African Conferences on Wind Engineering (EACWE) 5.* Florencia: 2009.

GEORGIU, P. N. Y B. J. VICKERY (1979). «Wind Loads on Building Frames», en *Proceedings of the Fifth International Conference*, Fort Collins, Colorado, USA, Pergamon, Oxford, 1980.

GEORGIU, P. N. Y B. J. VICKERY (1980). «Wind Loads on Building Frames», en *Proceedings of the Fifth International Conference*. 1979. Fort Collins, Colorado, USA: Pergamon, Oxford, 1980.

- GOULD, R.W. Y W. G. RAYMER (1972). *Measurements Over a Wide Range of Reynolds Numbers of the Wind Forces on Models of Lattice Frameworks with Tubular Members*. National Physical Lab., Teddington (England). Div. of Maritime Science, 1972.
- HOLDO, A. E. (1993). «Reynolds Number Effects on Lattice Structures Forming Part of a Wind Tunnel Model», en *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 45(2) (229-238): 1993.
- HOLMES, J. D.; R. W. BANKS Y G. ROBERTS (1993). «Drag and Aerodynamic Interference on Microwave Dish Antennas and their Supporting Towers», en *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 50(0) (263-269): 1993.
- JOHNSEN, M. (2009). «Aerodynamic Coefficients of Lattice Telecommunication Structures, Full Size Wind Tunnel Testing», in *Department of Civil Engineering*. 2009, DTU - Danmarks Tekniske Universitet: Kgs. Lyngby.
- KLEIN, T. (2004). «Estudo em túnel de vento das características aerodinâmicas de torres metálicas treliçadas», en *ENGENHARIA CIVIL*, UNIVERSIDAD FEDERAL DE RÍO GRANDE DEL SUR: PORTO ALEGRE, 2004.
- LOREDO-SOUZA, A.M., et al. (2008). «Determinação dos coeficientes de arrasto aerodinâmico em torres treliçadas de transmissão», in *Novos estudos e pesquisas em construção metálica*, M. Kripka and Z.M. Chamberlain, Editors, Editora Universidade de Passo Fundo: Passo Fundo, 2008.
- MACHADO, A. C. (2003). «Caracterização das propriedades aerodinâmicas de torres metálicas para determinação da resposta devida ao vento», in *Escola de Engenharia*, Universidad Federal de Río Grande del Sur: Porto Alegre, 2003.
- NBR6123 (1988). *ABNT-Associação Brasileira de Normas Técnicas: Forças devidas ao vento em edificações*. 1988.
- NC-285:2003 (2003). *Carga de viento. Método de cálculo*. Cuba: 2003.
- NIELSEN, M. G. (2001). «Wind Tunnel Tests», en *lass Working Group for Masts and Towers*, Oslo:2001.
- RFS (2013). «Catálogo RFS (AWS Microwave, Antenna System)». Consultado: 02.2013. Disponible en: www.rfsworld.com.
- RIPPEL, L. I. (2005). «Estudo em túnel de vento do arrasto aerodinâmico sobre torres treliçadas de linhas de transmissão», in *Escola de Engenharia*, Universidad Federal de Río Grande del Sur: Porto Alegre, 2005.
- SMITH, B. W. (2007). *Communication Structures*. Londres: Thomas Telford,2007.
- SYKES, D. M. (1981). «Lattice Frames in Turbulent Airflow», en *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 7(2) (203-214): 1981.

TIA/EIA-222-G (2005). *Structural Standards for Steel Antenna Towers and Antenna Supporting Structures*. USA: Telecommunications Industry Association, 2005.

WHITBREAD, R. E. (1977). «Wind Loading on Lattice Towers: Part I - Wind Tunnel Measurements on Models of Typical Tower Sections», en *Project Report 352003 (unpublished)*, National Maritime Institute, 1977.

WHITBREAD, R. E. (1978). «Wind Load Measurements on a Range of Configurations for a Model of a Typical Lattice Tower», in *Project Report 352020 (unpublished)*, National Maritime Institute, 1978.

WHITBREAD, R. E. (1979). «The Influence of Shielding on the Wind Forces Experienced by Arrays of Latticed Frames», en *Proceedings of the Fifth International Conference on Wind Engineering*, Fort Collins, USA: 1979.

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.

EDITORIA:

M.Sc. Madelaine Vázquez Gálvez.

CORRECCIÓN:

Ing. Jorge Santamarina Guerra.

CONSEJO EDITORIAL:

Dr. Luis Bérriz Pérez.

M.Sc. Manuel Álvarez González.

Dr. Conrado Moreno Figueredo.

M.Sc. Manuel Fernández Rondón.

M.Sc. Alejandro Montesinos Larrosa.

M.Sc. Daniel López Aldama

DISEÑO ELECTRÓNICO:

D.I. Antonio Romillo Polaino.

WEB MASTER:

M.Sc. Fernando González Prieto.

CONSEJO ASESOR:

Dra. Elena Vigil Santos.

Dr. Conrado Moreno Figueredo.

Dr. Sergio Corp Linares.

Dr. José Guardado Chacón.

Dr. Deny Oliva Merecio.

Dra. Dania González Couret.

Dr. Juan José Paretas.

Lic. Bruno Henríquez Pérez.

M.Sc. Leonor Turtós Carbonell.

M.Sc. Alejandro Montesinos Larrosa.

Lic. Ricardo Bérriz Valle.

Dr. David Pérez Martín.

Dr. César Cisnero Ramírez



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

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

Teléfono: (537) 205-9949.

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

e-mail: editora@cubasolar.cu

<http://www.cubasolar.cu>