

Modelación de capa límite atmosférica para estudios de paneles solares en túnel de viento

Alejandro López Llanusa e-mail: alo@civil.cujae.edu.cu
Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría(CUJAE), La Habana, Cuba.

Vivian B. Elena Parnás e-mail: vivian@civil.cujae.edu.cu
Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría(CUJAE), La Habana, Cuba.

José Cataldo Ottieri e-mail: jcataldo@fing.edu.uy
IMFIA, Universidad de la República, Montevideo, Uruguay.

RESUMEN

Una adecuada reproducción de la capa límite atmosférica (CLA) es muy importante en estudios de acción del viento sobre estructuras, realizados mediante ensayos en túnel de viento, para garantizar la correspondencia entre los resultados del prototipo y el modelo a estudiar. En este proceso es importante la caracterización del régimen de vientos del lugar de emplazamiento, así como la adecuada selección de los dispositivos de generación de rugosidad y turbulencia en el túnel. El objetivo de este trabajo es exponer el proceso empleado en la simulación de la CLA en el ensayo en túnel de viento de paneles solares fotovoltaicos a construir en Cuba. Los resultados muestran un adecuado ajuste al perfil vertical, espectro e intensidad de turbulencia esperados para el tipo de superficie estudiada y el clima cubano.

Palabras clave: capa límite atmosférica, dispositivos de rugosidad, perfil vertical de velocidades medias, túnel de viento, turbulencia.

Atmospheric boundary layer simulation in wind tunnel for studies of solar panels

ABSTRACT

The adequate reproduction of the atmospherically boundary layer (ABL) is of great significance in wind tunnel tests in order to guarantee the correspondence between the results in prototype and the model under study. In this process it is necessary the characterization of the wind regime at the site and a carefully selection of the devices to be employed at the wind tunnel to simulate these parameters. The main goal of this work is to present the process of simulation of the ABL in the wind tunnel test of a photovoltaic park to be located in Cuba. Results show adequate correspondence to the vertical wind profile, Von Kármán spectrum and turbulence intensity between Cuban wind characteristics for the surface type and wind tunnel boundary layer.

Keywords: atmospheric boundary layer, roughness devices, mean wind profile, wind tunnel, turbulence.

INTRODUCCIÓN

El estudio de los coeficientes de presión sobre los paneles solares ubicados sobre el terreno, es uno de los elementos que permiten la obtención de su carga de viento de diseño. Este tema ha ganado especial atención en la última década, por ser los paneles estructuras que se encuentran dentro de la capa rugosa, donde incide de forma especial el efecto de la turbulencia generada por el intercambio de energía entre el viento y el terreno en los coeficientes de presión.

Mundialmente una de las técnicas más empleadas para la determinación de los coeficientes de presión sobre las estructuras son los túneles de viento. En determinadas investigaciones, como es el caso del estudio de los coeficientes de presión sobre los paneles solares, para lograr una adecuada medición sobre el modelo es necesario reproducir la capa límite atmosférica, y esto consiste en desarrollar un modelo físico del flujo turbulento, de manera tal que los parámetros que lo caracterizan a escala real se reproduzcan dentro del túnel.

Para lograr una adecuada representación del flujo de la capa límite atmosférica en un túnel de viento, existen dos grupos de simulaciones (Loredo-Souza et al. 2004). El primer grupo, denominado métodos naturales, se corresponde con las simulaciones que estimulan el crecimiento de la capa límite; se utiliza para esto una rugosidad en el piso del túnel para lograr los perfiles de velocidades medias y los parámetros de la turbulencia.

Los trabajos realizados en túnel de viento por Jensen y Franck (1963), Davenport (1966) y Cermak (1966) citados por De Bortoli et al. (1997) obtuvieron la capa límite de esta manera. El principal inconveniente de estas simulaciones es que el desarrollo de la capa límite es muy lento y son necesarias grandes longitudes de túnel del orden de 30 veces la altura de la capa límite a modelar, para lograr las escalas de simulación convenientes en la aplicación a modelos estructurales.

El segundo grupo, los métodos artificiales, se corresponde con las simulaciones que aceleran el crecimiento de la capa límite sobre la superficie rugosa. Este grupo se divide en dos subgrupos: los métodos activos y los pasivos. Los primeros utilizan chorros de aire o bien piezas móviles en el inicio de la cámara de ensayos para controlar el número de Reynolds y la intensidad de la turbulencia en la altura. Los segundos utilizan grillas de generadores de turbulencia, que modifican el flujo medio como pueden ser elementos puntiagudos (Standem) o los de cuña elíptica (Counihan) junto con barreras que pueden ser uniformes, dentadas o bien con elementos trapezoidales en la parte superior. Estos son conocidos como “métodos de rugosidad, barreras y dispositivos de mezcla” (Cataldo 1992).

La rugosidad se logra con obstáculos colocados en forma distribuida en el piso del túnel que permiten simular el efecto que tiene la rugosidad superficial natural del terreno sobre el flujo atmosférico. El efecto deseado es reducir la cantidad de movimiento en la parte del flujo próximo al suelo y producir turbulencia. La grilla de generadores de turbulencia tiene como objetivo producir turbulencia de gran escala y un déficit de cantidad de movimiento variable en la altura.

Finalmente, las barreras, si bien producen un déficit de cantidad de movimiento como si existiera una gran altura de rugosidad aguas arriba de la zona de ensayos, tienen como principal objetivo producir una mezcla entre la región del flujo próxima al suelo y alejada del mismo.

Estos tipos de métodos han sido empleados en trabajos realizados para la determinación del campo de presiones sobre los paneles solares (Abiola-Ogedengbe et al. 2015), (Guha et al. 2015) ver figura 1.

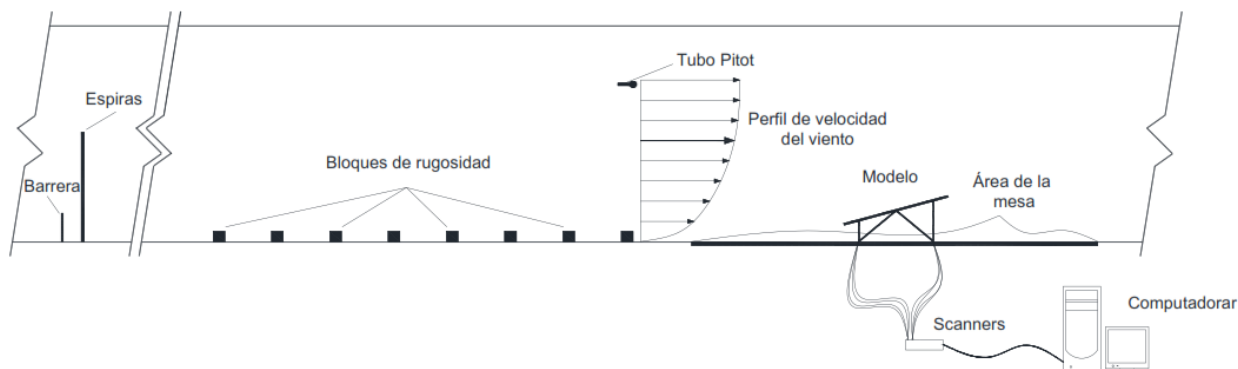


Figura 1. Esquema de ensayo para realizar las mediciones de presiones sobre el panel solar fotovoltaico

El presente estudio se desarrolla dentro de esta temática y tiene como objetivo determinar la capa límite necesaria en un túnel de viento, como paso previo en el estudio del campo de presiones sobre los paneles de los parques fotovoltaicos en Cuba.

MATERIALES Y MÉTODOS

A partir del año 2012 se decidió emplear en Cuba los parques fotovoltaicos como fuente de generación eléctrica con el objetivo de llegar en el año 2030 al 3% de la matriz energética nacional. Hasta la fecha, se han construido siete parques y se encuentran en fase de terminación otros seis, distribuidos en distintas provincias como son Guantánamo, Santiago de Cuba, Granma, Sancti Spíritus, Villa Clara, Cienfuegos, Pinar del Río, La Habana y el municipio especial Isla de la Juventud.

Independientemente de la localización geográfica, todos tienen en común que se encuentran en terrenos llanos, de poca vegetación y alejados de las ciudades, todo esto para evitar que se generen sombras sobre la superficie expuesta al sol de las celdas que provoquen pérdidas en la producción eléctrica; además se persigue lograr un flujo de aire suave por la parte inferior de los paneles para eliminar las pérdidas energéticas por calentamiento de las celdas. Ver en la figura 2 las características de los emplazamientos de los parques solares cubanos.

La determinación de la carga de viento sobre los paneles de los parques es un proceso en el que intervienen varios factores y que tiene varias etapas. El presente trabajo se enfoca en la etapa inicial, que consiste en la simulación en túnel de viento, de la capa límite atmosférica que represente las características de los sitios donde se emplazan los parques fotovoltaicos cubanos. Este aspecto constituye el primer paso en la determinación de los coeficientes de presión sobre estas estructuras, factor indispensable en la obtención de la carga de viento total.

La simulación en el túnel de viento del terreno debe garantizar que las características del viento a escala real sean correctamente establecidas a escala de modelo, y esto se logra mediante

el establecimiento de la variación vertical de las velocidades medias, de la distribución espacial de la turbulencia y del espectro de potencia de la turbulencia, fundamentalmente. Estas propiedades del viento han sido estudiadas y existen varias formulaciones teóricas establecidas que describen su comportamiento.



Figura 2. Ejemplo de parques fotovoltaicos construidos en Cuba

La elección de una formulación u otra va a estar condicionada por las características meteorológicas del sitio que se requiera modelar. En el caso de Cuba, un factor que tiene alta incidencia en la elección es la ocurrencia de huracanes, es por esto que como paso previo al proceso de simulación en el túnel se describe a continuación un estudio realizado de las principales formulaciones.

La descripción del terreno donde se ubican los paneles se corresponde, aproximadamente, con la categoría A que plantea la norma cubana NC-285 del 2003 para el cálculo de estructuras frente a la acción del viento. Esta norma propone el perfil exponencial para describir la variación de la velocidad media con la altura; sin embargo, de acuerdo con estudios realizados (Tamura and Kareem 2013), para regímenes de fuertes vientos similares a los que se ve sometida Cuba por la ocurrencia de huracanes, la representación más adecuada para simular la variación de la velocidad media con la altura es el perfil logarítmico, ecuación (1), por lo que fue el seleccionado en este trabajo para simular en el túnel de viento.

$$\bar{U}(z) = \frac{U^*}{K} \ln \left(\frac{z}{z_0} \right) \quad (1)$$

En la ecuación (1), $U(z)$ representa la velocidad media del viento a la altura z , U^* es la velocidad de fricción que se puede determinar a partir de dos enfoques frecuentemente empleados: el primero es la extrapolación a partir del perfil logarítmico y el segundo mediante la expresión (2) que está basada en el intercambio turbulento de cantidad de movimiento, siendo las u, v, w componentes longitudinal, lateral y vertical, respectivamente, de la fluctuación del viento (Li et al. 2015). Este segundo método puede ser empleado cuando se cuenta con mediciones de anemómetros que registren en las tres direcciones.

$$u_*^2 = \sqrt{\overline{u'v'^2} + \overline{w'u'^2}} \quad (2)$$

K es el coeficiente de Von Kármán que es aproximadamente 0,4 y Z_0 es la altura de rugosidad. Para un terreno con las características de los emplazamientos donde se encuentran los parques solares, esta altura de rugosidad (Z_0) tiene diferentes valores en función de las normativas (ver tabla 1).

La turbulencia atmosférica es un campo estocástico, tri-dimensional (u , v , w) y no estacionario. El análisis de la turbulencia suele ser realizado en un intervalo de tiempo durante el cual se admite que resulta estadísticamente estacionaria. Entre las componentes de la turbulencia es posible establecer correlaciones, las cuales, dado que el flujo es estadísticamente estacionario, resultan independientes del tiempo. La relación entre las diferentes componentes es diferente de acuerdo con el tipo de flujo turbulento que se analice.

En el caso de los flujos limitados por una pared, como lo es en una capa límite, es usual que los estudios se limiten a caracterizar la componente longitudinal (u) que es la más simple de medir. Las diferentes componentes turbulentas tienen más o menos relevancia en función del problema que se analice.

Los parámetros habituales que se utilizan para caracterizar la turbulencia son la intensidad de turbulencia, que es una medida de la potencia contenida en la turbulencia, y el espectro de potencia, que describe la forma en la cual dicha potencia se distribuye entre componentes de diferente frecuencia.

Tabla 1. Valores de Z_0 por las diferentes normativas

Norma	País	Categoría	Descripción	Z_0 (m)
(WMO 2010)	Organización Meteorológica Mundial	Abierto	Terreno cerca de las costas con velocidades de viento mayores de 30 m/s, cercano a los aeropuertos de baja vegetación y pocos árboles.	0,03-0,1
(AS/NZS1170.2 2011)	Australia y Nueva Zelanda	2	Terrenos abierto con césped bajo y edificios de poca altura menor de 10 m.	0,02
(ASCE7-10 2010)	Estados Unidos	C	Aeropuertos similar a terrenos abiertos	0,02

La intensidad de turbulencia, ecuación (3), se define como el cociente entre la desviación estándar de las fluctuaciones de la velocidad y la velocidad media en un punto determinado.

$$I = \sigma_u / \bar{U} \quad (3)$$

Durante el paso de ciclones tropicales la mezcla turbulenta es fuerte, lo que conduce a mayores valores de intensidad de turbulencia que los que se encuentran frecuentemente descritos en las normas técnicas. Por este motivo es que varios autores (Fu et al. 2012), (Ishizaki 1983) han desarrollado mediciones a escala real para lograr una determinación más certera de este parámetro. Estos trabajos, sin embargo, solo muestran registros para alturas superiores a los 5 m desde el nivel del terreno, y los paneles solares cubanos se encuentran por debajo de esa altura.

Un trabajo publicado en China por Li et al. (2015) obtuvo para un terreno con características similares al del presente estudio, para una altura de 5 m, un valor de intensidad de turbulencia de 0,23; mientras que Ishizaki (1983) en Japón, para un terreno similar obtuvo 0,188 lo que evidencia que hay una dispersión considerable. En estas diferencias, tienen una alta incidencia las particularidades de los terrenos en los que se realizaron las mediciones, así como las características meteorológicas del fenómeno atmosférico registrado.

El espectro de frecuencia es una medida de la energía contenida en las ráfagas del viento y describe la relación entre las frecuencias presentes en el proceso real que generan la fluctuación de la velocidad.

En cuanto al espectro de frecuencia, se adoptó en este trabajo la formulación propuesta en la ecuación (4) por Von Kármán (1948), expresada específicamente para la componente longitudinal de las fluctuaciones.

$$\frac{f \cdot S(f)}{\sigma_u^2} = \frac{4X}{[1 + 70.8(X)^2]^{5/6}} \quad (4)$$

Esta expresión, resulta una representación adecuada de la turbulencia del viento durante el paso de huracanes, de acuerdo con el criterio de Tamura y Kareem en bibliografía de referencia en esta temática (Tamura and Kareem 2013) y ese criterio está avalado por un grupo de trabajos basados en resultados de monitorear estructuras sometidas a la acción de huracanes (Fu et al. 2012), (Li et al. 2015).

En la ecuación (4), σ_u^2 es la varianza de la componente (u) y X es una variable definida por la ecuación (5).

$$X = f * L_u / \bar{U} \quad (5)$$

En la ecuación (5) f son las frecuencias lineales, \bar{U} es la velocidad media en un determinado punto y L_u es la escala integral de la componente (u) de la turbulencia.

La escala integral o longitud de turbulencia, L_u , es una medida del tamaño promedio de los vórtices del viento dentro de la capa límite atmosférica y depende fundamentalmente de la altura de rugosidad Z_o , de la altura sobre el terreno z y de la velocidad media \bar{U} (Tamura and Kareem 2013).

Las mediciones experimentales en condiciones de huracanes en cuanto a este parámetro no son concluyentes y existe una discrepancia en normas y artículos en relación con la elección de la mejor formulación.

La tabla 2 resume algunas de las formulaciones que han sido recogidas en las normativas estudiadas.

La formulación que fue adoptada en esta investigación es la que recoge el Eurocódigo EN1991-1-4 (2004), pues fue obtenida a partir de más de 20 estudios realizados bajo condiciones climáticas diferentes.

El trabajo experimental fue realizado en el túnel de viento existente en el Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental (IMFIA), de la Universidad de la República (UDELAR) en Montevideo, Uruguay, una vez determinadas las características del viento a lograr con la simulación (ver figura 3). Este túnel presenta una zona de trabajo de 17 m de longitud con una sección de 2,25 m de ancho por 1,80 m de alto.

Cuenta con un ventilador axial que presenta un rotor de 2,5 m de diámetro el cual proporciona un caudal de 121,5 m³/s y una velocidad de rotación de 750 rpm, lo cual le permite desarrollar una velocidad de trabajo regulable de hasta 30 m/s. Además, tiene un difusor de 4,1 m a la salida, para incrementar el rendimiento de la instalación.

Tabla 2. Formulaciones de L_u en las diferentes normativas

Norma	País	Formulación
(AS/NZS1170.2 2011)	Australia y Nueva Zelanda	$L_u = 85(z/10)^{0.25}$
(ASCE7-10 2010)	Estados Unidos	$L_u = l(z/10) \varepsilon^-$ donde: $l=152,4$ y $\varepsilon^- = 1/5$ para la categoría de exposición de terreno C.
(EN1991-1-4 2004)	Europa	$L_u = 300 (z/200)^{(0.67+0.05 \ln(Z_\theta))}$

Para lograr simular la capa límite atmosférica descrita anteriormente, se crearon en el túnel las características de rugosidad necesarias mediante la técnica pasiva denominada como “métodos de rugosidad, barreras y dispositivos de mezcla”. Específicamente para este trabajo, se utilizaron bloques de rugosidad, una barrera dentada y como dispositivo de mezcla se emplearon las espiras de Standen (ver figura 4).

El instrumento utilizado para las mediciones de velocidad del aire dentro del túnel de viento fue un anemómetro de hilo caliente de tres canales modelo IFA100 marca TSI Company U.S.

La condición de trabajo en el túnel de viento se caracterizó con la medición de un tubo pitot ubicado a una altura de 1,5 m sobre el suelo de la zona de trabajo y a 30 cm de la pared, posición en la cual el flujo ya no es influenciado por los dispositivos de rugosidad. Fueron medidas también, con un termómetro, las variaciones de temperatura durante el ensayo, para realizar correcciones en los valores obtenidos pues estos sufren alteraciones producto de los cambios en la densidad del aire.

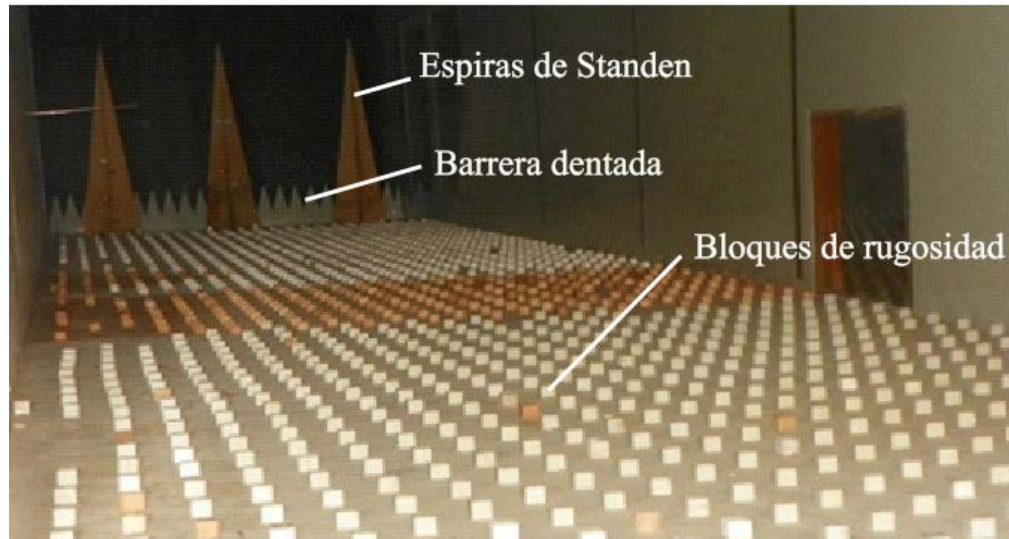


Figura 3. Túnel de viento del IMFIA de la Universidad de la República (UDELAR)



Figura 4. Arreglo de los dispositivos de simulación para generación del flujo turbulento en el túnel de viento

Para la determinación de la capa límite se midieron 29 puntos en la vertical del túnel. Los primeros puntos se midieron cada 5 mm hasta los 50 mm, pues la intensidad de turbulencia es mayor mientras más cerca se está de la superficie rugosa y luego se fue aumentando el espaciamiento hasta llegar a una altura de 700 mm.

La altura máxima de medición fue fijada a partir de evidenciar que los perfiles de velocidad media e intensidad de turbulencia comenzaban a presentar un comportamiento constante. En cada altura la señal emitida por el anemómetro de hilo caliente se midió con una frecuencia de muestreo de 1000 Hz y se tomaron 65536 datos es decir que el tiempo de muestreo fue de 65 segundos. El esquema de la instrumentación realizada en el túnel se presenta en la figura 5.

RESULTADOS

De las mediciones se obtuvo una altura de rugosidad ($Z_0=0,006$ m) a escala de modelo, equivalente a una ($Z_0=0,06$ m) a escala real. La altura de rugosidad fue determinada del despeje de la relación existente entre dos puntos consecutivos medidos en el perfil vertical de velocidad media, ecuación (6).

Este proceso fue realizado para varios puntos consecutivos y se obtuvo Z_0 mediante un ajuste lineal. El valor obtenido se encuentra dentro de los valores que se plantean en las normas consultadas en la tabla 1 del trabajo, lo que indica que fueron logradas de una forma correcta las condiciones de rugosidad del terreno real.

$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{\ln(Z_2/Z_0)}{\ln(Z_1/Z_0)} \quad (6)$$

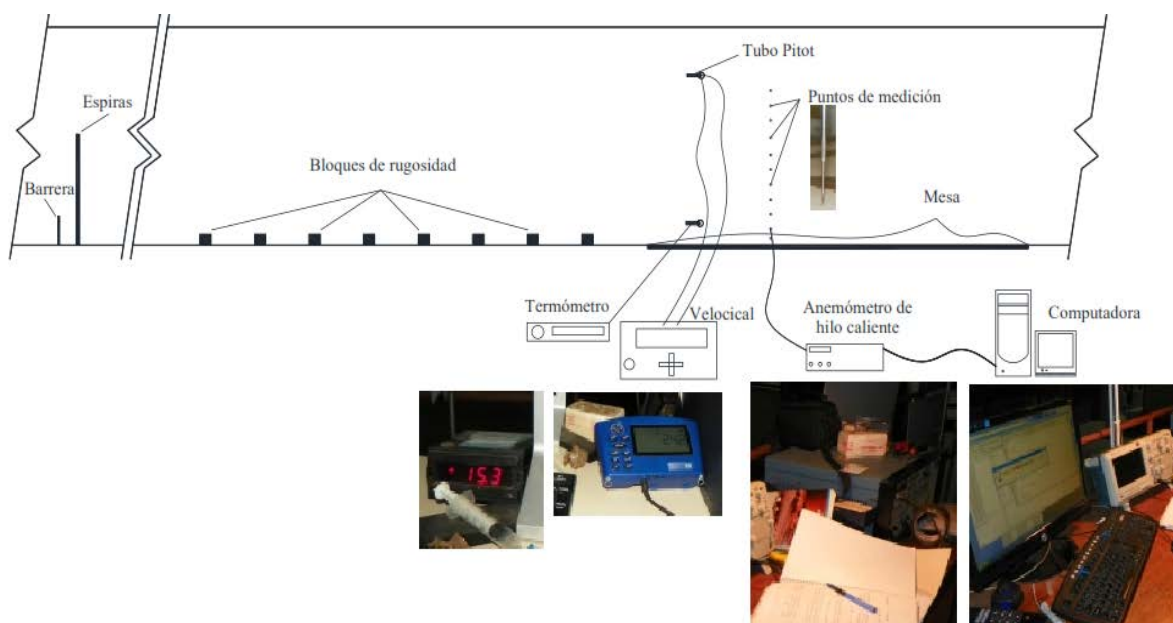


Figura 5. Esquema de medición para la obtención de la capa límite dentro del túnel

En la figura 6 se muestra el perfil de velocidades obtenido en el túnel y el perfil logarítmico adoptado como patrón comparativo. En ella se puede apreciar que existe una adecuada simulación del perfil de velocidad representado por los puntos, pues estos se ajustan en gran medida al perfil patrón representado por la línea continua. En el perfil medido, los puntos rojos representan la altura del borde inferior y superior del panel que se pretende estudiar dentro de la capa límite simulada.

La intensidad de turbulencia (I), se obtuvo a partir de la ecuación (3) para cada punto en los que fueron realizadas las mediciones. La figura 7 muestra el perfil de intensidad de turbulencia simulado en el túnel.

Para una altura de 5 m, a escala de prototipo, la intensidad de turbulencia medida fue aproximadamente de 0,18, este valor es inferior al obtenido experimentalmente a escala real por Li et al. (2015) pero tiene una adecuada concordancia con los resultados de Ishizaki (1983).

El espectro de frecuencia se obtuvo para cada altura de medición. A 140 mm, que corresponde a la mitad de la altura a la que se colocará el panel en el túnel de viento, se comparó el espectro de frecuencias medido con el propuesto por Von Kármán (1948). La figura 8 muestra que existe un ajuste adecuado entre el espectro simulado y el patrón, especialmente para las altas frecuencias.

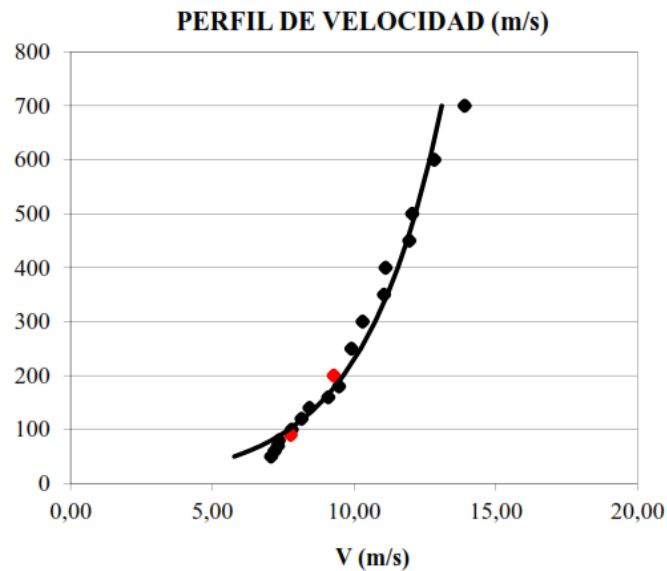


Figura 6. Perfil de velocidad media y ajuste con el perfil logarítmico

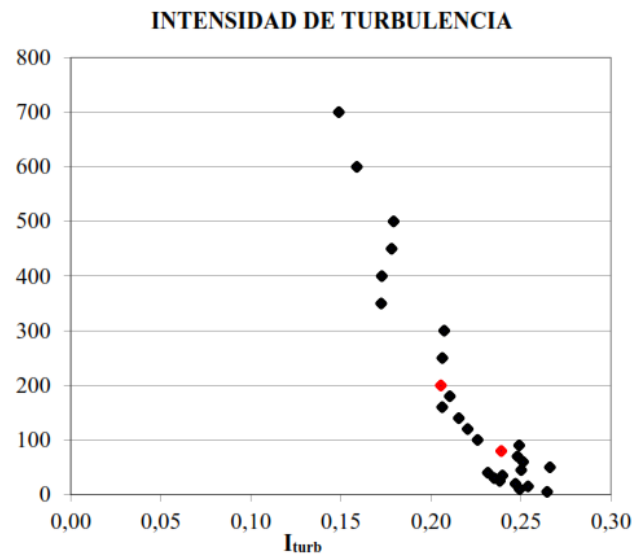


Figura 7. Perfil de intensidad de turbulencia

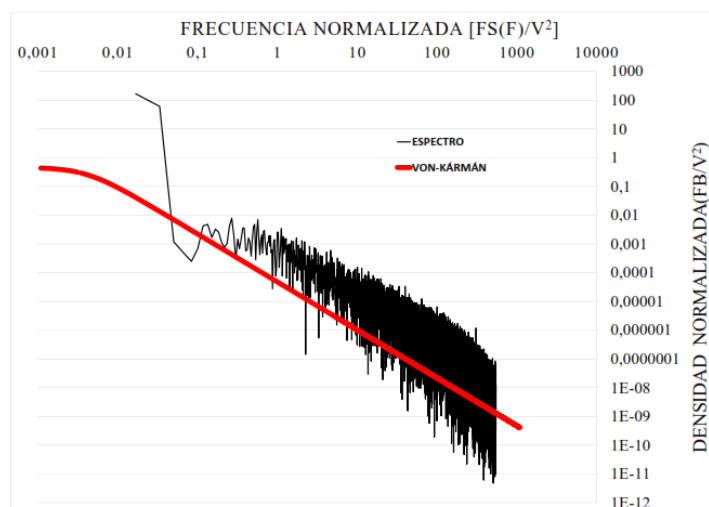


Figura 8. Espectro de frecuencia

CONCLUSIONES

- El proceso para simular en un túnel de viento la capa límite atmosférica de un emplazamiento determinado, comienza por establecer de forma adecuada las características de rugosidad del terreno, así como las particularidades climáticas que rigen el comportamiento de los perfiles verticales de velocidad media y de las fluctuaciones caracterizadas por la intensidad y el espectro de turbulencia de los regímenes de vientos.
- En el caso de los regímenes de vientos dominados por fenómenos atmosféricos como los huracanes, el perfil logarítmico y el espectro de Von Kármán son las representaciones más adecuadas para simular la variación de la velocidad media con la altura y la energía de la turbulencia. En cuanto a las intensidades de turbulencia no se encontraron trabajos que registren valores a las alturas sobre el terreno a las que se encuentran colocados los paneles solares que se construyen en Cuba. La menor altura para la que se encontraron mediciones fue 5 m y en cuanto a los valores existe una dispersión en las referencias internacionales.
- La simulación realizada en el túnel de viento logró reproducir adecuadamente las características planteadas para el viento en los emplazamientos de los parques fotovoltaicos en Cuba, demostrándose por el ajuste que presentaron el espectro y el perfil vertical simulados, con los patrones reales. La intensidad de turbulencia que se registró para 5 m de altura, presentó una estrecha relación con los estudios de Ishizaki (1983).

RECONOCIMIENTO

Se agradece la colaboración de la Agencia Uruguaya de Cooperación Internacional (AUCI) y del Ministerio de Energía y Minas (MINEM) de Cuba, en particular de la Dirección de Energías Renovables (EDIFRE), por el financiamiento brindado para la investigación. Además, se

reconoce el apoyo incondicional brindado por especialistas y trabajadores del Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ing. Ambiental de la Universidad de la República en Montevideo, Uruguay y en especial a Gabriel Narancio y Pablo Pais por su participación en las mediciones.

REFERENCIAS

- Abiola-Ogedengbe A., Hangan H. and Siddiqui K.** (2015). "Experimental investigation of wind effects on a standalone photovoltaic (PV) module". *Renewable Energy*, vol. 78, pp. 657-665. ISSN: 0960-1481, Network, Brighton, UK. . extraído de <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2015.01.037> en Septiembre 2015.
- AS/NZS1170.2** (2011). "Standart: Structural Design actions, Part 2: Wind Actions". Australian Standard. ISBN 978-0-7337-9805- 4. Australian/New Zeland.
- ASCE7-10** (2010). "Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures". American Society of Civil Engineers, ISBN 978-0-7844-1085-1, USA.
- Cataldo J.** (1992). "Simulación física de flujos tipo capa límite atmosférica". Tesis de Maestria en Ingeniería (Mecánica de los Fluidos Aplicada). Universidad de la República, Uruguay.
- De Bortoli M. E., Natalini B. and Paluch M. J.** (1997). "Simulaciones de espesor total de capa límite atmosférica neutralmente estable por los metodos de Counihan y Standen". *Memorias de las XXVIII Jornadas Sur-Americanas de Ingenieria Estrutural*, vol. 1, pp. 1615-1624. Facultad de Ingeniería, Porto Alegre, Brasil.
- EN1991-1-4** (2004). "Eurocode 1: Actions on structures — General actions — Part 1-4: Wind actions". European Standard, Technical Committee CEN/TC250 "Structural Eurocodes", the Secretariat is held by BSI, Europe.
- Fu J. Y., Wu J. R., Xu A., Li Q. S. and Xiao Y. Q.** (2012). "Full-scale measurements of wind effects on Guangzhou west tower". *Engineering Structures*, vol. 35, pp. 120-139, Elsevier B.V., extraído de <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2011.10.022> en enero 2016.
- Guha T. K., Fewless Y. and Banks D.** (2015). "Effect of panel tilt, row spacing, ground clearance and post-offset distance on the vortex induced dynamic loads on fixed tilt ground mount photovoltaic arrays". *14th International Conference on Wind Engineering*. ISBN: 978-85-66094-07-7, Porto Alegre, Brazil.
- Ishizaki H.** (1983). "Wind profiles, turbulence intensities and gust factors for design in typhoon-prone regions". *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 13, pp. 55-66. ISSN:0167-6105. Elsevier Science Publishers, Amsterdam. The Netherlands, extraído de [http://dx.doi.org/10.1016/0167-6105\(83\)90128-9](http://dx.doi.org/10.1016/0167-6105(83)90128-9) en julio 2014.

- Li L., Kareem A., Xiao Y., Song L. and Zhou C.** (2015). “A comparative study of field measurements of the turbulence characteristics of typhoon and hurricane winds”. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 140, pp. 49-66. ISSN: 0167-6105. Elsevier B.V., extraído de <http://dx.doi.org/10.1016/j.jweia.2014.12.008> en octubre 2015.
- Loredo-Souza A. M., Schettini E. B. C. and Paluch M. J.** (2004). “Simulação da camada limite atmosférica em túnel de vento. ”. In: MOLLER, V. S. & SILVESTRINI, J. H. (eds.) *Turbulência. 4ta Escola de Primavera de Transição e Turbulência*. ISBN. 85-85769-19-X. Porto Alegre, Brasil.
- Tamura Y. and Kareem A.** (2013). “Advanced Structural Wind Engineering”, Springer, ISBN: 978-4-431-54337-4, Tokyo-Heidelberg-New York-Dordrecht-London. (eBook). extraído de <http://dx.doi.org/10.1007/978-4-431-54337-4.Japan> en octubre 2015.
- Von Kármán T.** (1948), “Progress in the statistical theory of turbulence”. In: SCIENCES, N. A. O., ed., vol. 34, pp. 530-539. *Proceedings of the National Academy of Sciences, USA*.
- WMO** (2010). “Guidelines for converting between various wind averaging periods in tropical cyclone conditions”. WMO/TD-No.1555. World Meteorological Organization. Geneva, Switzerland.