



BANCO DE ENSAYO PARA LA EVALUACIÓN DE AEROGENERADORES DE PEQUEÑO PORTE EN AMBIENTE URBANO

Rodrigo García ^a, José Cataldo ^b

^a *IMFIA-FING-UdelaR, Uruguay, rogarcia@fing.edu.uy*

^b *IMFIA-FING-UdelaR, Uruguay, jcataldo@fing.edu.uy*

RESUMEN: En el presente trabajo se describe el banco de ensayo diseñado para evaluar el desempeño energético¹ de aerogeneradores de pequeño porte en ambientes urbanos. Se presenta una descripción detallada de la instalación existente, y la potencial información que esta permite obtener. Las medidas que se realizan en el banco permiten cuantificar la potencia efectiva generada por un sistema de aerogenerador, y compararla respecto a la del flujo de aire que circula a través del área barrida por el rotor. El principal objetivo consiste en evaluar la aplicabilidad de este tipo de sistemas de generación eólica en ambientes urbanos, considerando tanto la potencia generada como el impacto por efectos visuales y sonoros, entre otros. El banco de ensayo diseñado muestra ser una herramienta para la evaluación del diseño y desempeño de aerogeneradores de pequeño porte en ambientes urbanos para diferentes condiciones de operación.

PALABRAS CLAVE: aerogeneradores, ambiente urbano, banco de ensayo.

1 INTRODUCCIÓN

En el caso de aerogeneradores de pequeño porte, la bibliografía respecto a los procedimientos y metodologías adoptadas para la evaluación del desempeño energético de sistemas de aerogeneradores de pequeño porte² en ambientes urbanos es limitada. Como referencia para el diseño y procedimientos en el banco construido se considera lo propuesto por la norma IEC-61400-12-1:2017, a implementarse en el banco de ensayo de aerogeneradores de pequeño porte del Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental – IMFIA - ubicado en la Facultad de Ingeniería UdelaR, Ave Julio Herrera y Reissig 565, 11300 Montevideo, Uruguay.

A diferencia de lo que ocurre en aerogeneradores de grandes dimensiones, los sistemas de aerogeneradores de pequeño porte no requieren de un espacio amplio para su instalación, presentando una gran ventaja para su aplicación en ambientes urbanos donde este puede ser una limitante. Adicionalmente, al presentar una menor área de barrido, el perfil de velocidades en la sección de pasaje por el rotor es aproximadamente uniforme. Es decir que, podría ser válido considerar no significativo el cambio de módulo o dirección del viento en función de la altura sobre el área barrida, despreciándose entonces los efectos de la cizalladura y cambio de dirección del viento.

1 Medida de la capacidad de un sistema de aerogenerador de producir potencia eléctrica y energía

2 Definida en la norma EN 61400-2:2014, 3.65: Comprende la turbina eólica, soporte, regulador de la turbina, controlador de carga/inversor, cableado y conectores, manuales de instalación y utilización y otra documentación. Aplica a aerogeneradores con área de barrido del rotor menor o igual a 200 m², generando electricidad a una tensión inferior de 1000 V en c.a. o de 1500 V en c.c. para aplicaciones en red y fuera de red

Otra incógnita que surge en este ensayo está asociado a las condiciones ambientales propias de los ambientes urbanos. Contrariamente a las zonas rurales, el rotor de un pequeño aerogenerador se encuentra en el seno de la capa límite atmosférica, pero además se ve afectado por los desprendimientos de vórtices y turbulencia generada por la presencia de obstáculos típicos de ambientes urbanizados, tales como edificaciones y árboles.

En virtud de lo expuesto anteriormente, se plantea como pertinente realizar adaptaciones a la norma mencionada - considerando que la misma no ampara fielmente las particularidades que se presentan en aerogeneradores de menor porte y en ambientes urbanos donde el flujo es completamente distinto -, argumentando en cada caso las hipótesis propuestas debido a que dicha normativa describe procedimientos y consideraciones de aerogeneradores de gran porte en otras condiciones.

2 BANCO DE ENSAYO

2.1 Generalidades

La ubicación del predio de la Facultad de Ingeniería es privilegiada. Hacia el Norte y Este el área se conforma por una serie de edificaciones habitacionales de alturas variables; hacia el Oeste se encuentra el Río de la Plata mientras que al Sur es característico la importante presencia de vegetación.

Como se desarrolla en un previo estudio de viabilidad y diseño del proyecto [1], la dirección de viento preferencial en esta zona proviene del Noreste, siendo afectada entonces por la presencia de obstáculos inherentes a la urbanización. Por otra parte, la ocurrencia de eventos extremos es más frecuente desde la dirección Oeste debido a la exposición costera.

La resistencia y durabilidad frente a los distintos factores atmosféricos de los aerogeneradores a ser ensayados es un factor importante a considerar. En virtud de ello, la posición y altura del mástil del aerogenerador fueron determinadas con el fin de minimizar riesgos, tanto frente a las sollicitaciones y esfuerzos del propio flujo como también debido a los efectos por turbulencia y generación de vórtices de distinta escala por la presencia de los edificios.

El diseño del banco se caracteriza por ser independiente del tipo de aerogenerador, pudiéndose ensayar tanto aquellos de eje vertical como horizontal. En el artículo mencionado anteriormente, se tomaron como referencia distintos tipos de potenciales aerogeneradores disponibles en plaza para evaluar el área de barrido, robustez y potencias posibles para trabajar en esta instalación considerando las restricciones de la misma. A partir de esto, se determinó que la potencia máxima de los aerogeneradores a ensayar en la instalación es de 3,9 kW, y un diámetro característico del rotor de hasta 3 m.



Figura 1. Vista aérea de la Facultad de Ingeniería y localización del banco de ensayo. Fuente: Google Maps

2.2 Instrumentos y medidas

Un elemento clave para la evaluación del desempeño energético es la medición de la velocidad del viento. En la instalación diseñada se utilizan anemómetros de tipo ultrasónico. La calibración en túnel de viento de estos dispositivos es un proceso previo necesario realizado según la normativa vigente.

El rango de potencia para el que se diseñó el banco es relativamente amplio. Es imperativo para esta investigación ser capaz de relevar datos a bajas velocidades, con pequeños e intermitentes intervalos de generación de potencia. Este tipo de generación parece ser característico de aerogeneradores de pequeño porte en ambientes urbanos; sin embargo, no se encuentra en plaza un dispositivo capaz de trabajar en todo el rango mencionado. Por ello fue necesario el diseño y construcción de un sistema de adquisición de potencia particular, específicamente para el caso de aerogeneradores de baja potencia.

Para diseñar un sistema de adquisición de las características eléctricas de los generadores de baja potencia se utilizó una tarjeta adquisidora marca National Instruments modelo NI USB-6343 manejada a través de una rutina Matlab creada con ese propósito. Los datos a relevar corresponden a las tensiones y corrientes producidas por las tres fases del generador, para luego deducir la potencia generada. Así fueron diseñados y construidos tres circuitos para adquirir las tensiones de las tres fases y tres circuitos para las corrientes de las tres fases. Estos circuitos también fueron calibrados de forma independiente utilizando un osciloscopio marca Tektronix modelo DPO 2012 como patrón de una fuente marca GW Instek modelo APS-1102A.

En el caso de aerogeneradores de mayor potencia, donde la conexión es directamente a la red, se previó un sistema eléctrico integral que adecua la potencia – que es generada a distintas frecuencias – para poder ser introducida directamente a la red eléctrica trifásica.



Figura 2. Modelo 3D del banco de ensayo de la azotea de la Facultad de Ingeniería. Fuente: [1]

3 TRABAJOS EN CURSO

3.1 *Calibración del sitio*

La calibración del sitio cuantifica y potencialmente reduce los efectos del sitio de ensayo en la medición del desempeño energético. Estos efectos pueden dar lugar a diversos errores producto de algunos factores:

- Existencia de una diferencia sistemática en la medida de velocidad de viento entre la posición de montaje del anemómetro utilizado para la medición del desempeño energético y la altura equivalente³ (H^2) del rotor de la turbina.
- Efectos por variación de la estabilidad atmosférica y del gradiente de velocidades en función de la altura⁴. Debe verificarse si son significativos debido a la diferencia de ubicación de los elementos de medición, especialmente dado que la altura equivalente del rotor y la altura del anemómetro difieren.
- Efectos climáticos, referidos a los cambios de estaciones que afectan la estabilidad atmosférica, turbulencia y gradiente de velocidades.
- Variación de la rugosidad del terreno, producto de los cambios en la vegetación cercana al área de ensayo u otras superficies como agua o tierra.

Con motivo de evitar, cuantificar y reducir estos efectos, debido a la complejidad y multiplicidad de variables a considerar, la calibración es llevada a cabo a lo largo de un período de tiempo amplio. La duración de la calibración debe contemplar un conjunto de condiciones ambientales y un volumen de datos suficiente según la norma de referencia consultada.

3.1.1 *Relevamiento de datos*

Se colocan dos mástiles en el sitio de calibración para ubicar en ambos anemómetros de tipo ultrasónico, marca Young modelo 81000. En el mástil meteorológico se coloca uno de los anemómetros y se define como la posición de referencia; se calibra según la mencionada norma

3 Altura medida desde el piso al centro del rotor de la turbina cuando se encuentra montada en la torre

4 “Wind shear”: El perfil de velocidades de viento se ve afectado por una tensión de cizalladura producida por la rugosidad de la superficie, incrementando en módulo con la distancia a la superficie



[2] y es el mismo – tanto mástil como anemómetro – a utilizar para los ensayos de desempeño energético. El segundo mástil es la propia estructura donde se instalan los rotores, y se ubica entonces el segundo anemómetro en la misma posición que con dichos rotores. Esto permite reproducir los efectos inducidos sobre el rotor por la presencia de la torre de montaje.

La altura equivalente es una variable determinante en la calibración. Se puede considerar que es función de la geometría del rotor ensayado y del soporte implementado para ubicarlo juntamente con el generador al mástil. Es decir que, para cada sistema de rotor, generador y soporte, se tiene una distinta altura equivalente que debe ser objeto de calibración. En cada caso se debe evaluar la adaptabilidad del soporte del rotor para cumplir con dichos parámetros.

Los anemómetros son del mismo tipo con las mismas características operacionales, y trabajan con la misma configuración⁵ en ambos ensayos y entre ellos. Adicionalmente, se calibran en el mismo túnel de viento⁶. La adquisición de datos se realiza de forma continua con la misma frecuencia de muestreo que se va a utilizar en el ensayo de desempeño energético, siendo 32 Hz en este caso. Estos anemómetros generan una señal digital que es adquirida y almacenada por un computador. Cada secuencia de datos de un anemómetro releva las indicaciones consignadas en la configuración mencionada anteriormente. Para ello se creó un programa en Matlab que adquiere de forma simultánea las variables medidas por ambos anemómetros, asociándole una referencia temporal y guardando archivos en intervalos de diez minutos.

3.1.2 *Procesamiento de datos*

Para evaluar el desempeño según lo sugerido por la norma, cada conjunto de datos debe contemplar un período de 10 minutos de medidas contiguas. Según lo establece la norma, el valor medio, la desviación estándar, el valor máximo y mínimo de cada conjunto de datos debe ser calculado y almacenado. Considerando esta imposición es que se decidió guardar, en la etapa previa, archivos con el intervalo especificado.

Posteriormente, se realiza un filtrado, rechazando los conjuntos de datos que presenten alguna de las siguientes incidencias:

- Falla o degradación de la instrumentación utilizada
- Direcciones de viento por fuera de la zona de medición definida
- Velocidad media en el mástil del rotor excepcionalmente altas o bajas
- Condiciones atmosféricas particulares que influyan sobre el resultado y no sean representativas. Las que se filtren para este ensayo también se deben filtrar en el ensayo de desempeño energético.

El conjunto de datos remanente debe ser representativo, con datos para todas las direcciones de viento y un amplio espectro de módulo de velocidades.

3.1.3 *Análisis de datos*

La información que se desea obtener de la calibración del sitio corresponde a:

- a) Una tabla de corrección del flujo para todas las direcciones de viento comprendidas en la zona de medición
- b) Estimación de la incertidumbre estándar asociada a dichas correcciones

La instalación presenta múltiples factores determinantes en el potencial del flujo para la generación de potencia, siendo incierta la incidencia de cada uno. Sin embargo, este procedimiento permite además de la calibración, determinar y verificar las direcciones de viento preferenciales frente a la información disponible [3].

5 Indicaciones: u, v, w, Vs, T, V, elevación, azimut

6 Túnel de viento de la Facultad de Ingeniería UdelaR

Adicionalmente, a partir de los datos recopilados es posible reproducir el espectro de turbulencia de cada dirección. Este estudio genera dos ramas de trabajo: comprender cómo afectan ciertos obstáculos propios del ámbito urbano, significativos de esta instalación en particular como consecuencia de la localización - altura de los edificios, rugosidad de las calles y tránsito, personas, vegetación -, y la combinación de estos; y paralelamente evaluar el diseño de distintos tipos de rotores de aerogeneradores asociados a la sensibilidad a los vórtices producidos en el seno del flujo en estas condiciones.

4 APLICACIONES FUTURAS

Este proyecto pretende establecer y regularizar un procedimiento para la evaluación del desempeño energético de un aerogenerador de pequeño porte que opere en ambientes urbanos, siendo aplicable tanto para el caso en que el mismo se encuentre conectado a la red como si se encuentra conectado a un banco de baterías. La instalación fue diseñada y construida con este fin último, siendo el primer banco de aerogeneradores de estas características.

Considerando la norma, lo propuesto permite presentar una alternativa estandarizada a ser aplicable cuando las condiciones, tanto en referencia con las magnitudes geométricas y de capacidad de producción energética como en lo que respecta a las condiciones ambientales en donde se encuentra instalado disten de lo amparado por dicha norma. Consecuentemente, este proyecto tiene un valor significativo asociados a la micro-generación y se sugiere considerar los resultados que se obtengan y la propia instalación propuesta cuando se trabaja con aerogeneradores de pequeño porte en ambientes urbanos.

El banco de ensayo puede usarse para evaluar el desempeño de un sistema de aerogenerador en una localidad específica, como también para comparar entre varios modelos de turbinas en un sitio dado con condiciones específicas de los ambientes urbanos. Se entiende que esta instalación es innovadora y posibilita una investigación más precisa en lo que respecta a la implementación de pequeños aerogeneradores en ambientes urbanos.

5 REFERENCIAS

- [1] Cataldo, J. y González, F. (2015). *Design of a testing platform for wind turbines*. ICWE15, Porto Alegre.
- [2] IEC. (2017). *Power performance measurements of electricity producing wind turbines*, Norma IEC-61400-12-1, Annex F: “Wind tunnel calibration procedure for anemometers”.
- [3] Instituto Uruguayo de Meteorología (INUMET). Datos de la estación meteorológica ubicada en el Aeropuerto de Carrasco (2012-Actualidad).