

PROPUESTA DE METODOLOGÍA PARA BENCHMARKING DE AEROGENERADORES DE BAJA POTENCIA

Juan P. Duzdevich¹, Mauricio Troviano²

¹Consultor en Energías Renovables

E mail: juanpabloduz@gmail.com

²Departamento de Electrotecnia (FAIN-UNCo) e Instituto de Investigación y Desarrollo en Ingeniería de Procesos, Biotecnología y Energías Alternativas (PROBIEN, CONICET-UNCo), Buenos Aires 1400, CP 8300, Neuquén, Argentina

E mail: mauricio.troviano@probien.gob.ar

RESUMEN: En la definición de una Etiqueta del Consumidor que hace en su tercera edición la norma IEC61400-2, se desarrolla un nuevo enfoque para la presentación de información técnica de los aerogeneradores de baja potencia. Pero aún con esta etiqueta, la comparación de productos puede ser una tarea difícil de realizar para personas sin conocimientos en la materia y no se facilita a los consumidores el proceso de selección de productos adecuados a sus necesidades y expectativas.

En este trabajo se propone una metodología para cuantificar tres aspectos de comparación de aerogeneradores de baja potencia: la eficiencia, la seguridad y la comunicación del producto. Para ello, se desarrolla una propuesta para comparar un aerogenerador con un aerogenerador equivalente ideal. Cada uno de los tres aspectos estudiados se cuantifican en una escala entre cero y uno que permite la comparación simple entre aerogeneradores para un consumidor sin conocimientos previos. Esta propuesta se desarrolla con el enfoque de Benchmarking de productos y se aplica a un caso de ejemplo para un generador eólico de baja potencia comercial.

Palabras clave: Energía eólica. Aerogeneradores de baja potencia. Curva de potencia. Eficiencia. Benchmarking. Etiqueta de consumidor.

INTRODUCCIÓN

La generación de electricidad a partir de energías renovables ayuda a la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero, y de este modo representan una alternativa y una necesidad para acompañar el desarrollo humano y hacerlo sostenible. En eólica de baja potencia, la World Wind Energy Association estimaba a 2016 una capacidad total instalada de 949 MW en el mundo (WWEA, 2021) (991 mil unidades), de los cuales más de 6 MW se instalaron en Argentina. Según el mismo estudio (el último publicado a la fecha) el crecimiento del mercado se sostiene en una tendencia sólida a nivel global. A pesar de los bajos precios de la fotovoltaica aún existen nichos como las micro redes aisladas o los proyectos en latitudes como las de la Patagonia en las que la introducción de aerogeneradores aún implica la optimización de costos, incluso hay situaciones en la que se impone la necesidad de hibridación por otros motivos.

En el ámbito rural o en zonas de suministro eléctrico deficiente, la energía eólica de baja potencia puede representar la única posibilidad de acceder a un suministro eléctrico. En el ámbito urbano se aprecia cada vez más como una alternativa a la energía suministrada por la red.

La generación distribuida de energías renovables ha sido reglamentada durante el año 2018 en el ámbito nacional, a partir de la sanción de la Ley 27.424, y en la actualidad varias provincias cuentan con esquemas regulatorios para la inyección a la red de energías renovables a escala domiciliaria. Este panorama implica un incremento continuo de personas que toman contacto por primera vez con esta tecnología como usuarios finales.

Se define a los aerogeneradores de baja potencia en función de la norma IEC 61400-12.1 (IEC 61400-12.1, 2017), para aerogeneradores cuyo rotor barre un área de hasta 200 m², tanto en eje vertical como horizontal. Partiendo de la base de la comparación propuesta por el etiquetado de consumidor IEA Wind Task 27 (EAWind, 2011), este trabajo se propone ampliar la información brindada a través de una etiqueta complementaria que detalle en aspectos de eficiencia lograda en el diseño y realización del producto, la seguridad para los bienes y las personas y por último los elementos de comunicación del producto.

Contar con herramientas de comparación de productos que permitan identificar aspectos relevantes en la toma de decisiones desde el punto de vista de un comprador o usuario, es importante ya que favorece un desarrollo de la actividad serio, sostenible y a la medida de éstos. A esta práctica se la puede denominar benchmarking y en este trabajo se implementa en base a información de los productos que brindan laboratorios de ensayo independientes, acreditados por entidades reconocidas.

Distintas organizaciones han publicado listados de aerogeneradores ensayados y resultados de los mismos. Es el caso de los organismos de certificación como Intertek (Intertek, 2021) o UL (UL, 2021) a nivel mundial, o asociaciones internacionales como la WWEA (Small-Wind, 2021), así mismo organizaciones que promocionan y regulan la actividad en distintos países, como el INTI (INTI, 2021) en Argentina, el SWCC (SWCC, 2021) y el NREL (Baring-Gould, 2016) en Estados Unidos, el Folkcenter (Folkcenter, 2021) y el EGV (EGV, 2021) de Dinamarca, el MCS (MCS, 2021) de Inglaterra y ClassNK (ClassNK, 2021) de Japón. Se estima que en el mundo se han certificado más de 50 aerogeneradores bajo la norma IEC61400 y los estándares de estos países. En términos de comparativas, en 2015 la consultora Ecology Management, de Svend Enelvoidsen, elaboró un benchmarking ad-hoc, aplicado a su análisis del mercado danés (Enevoldsen, 2015).

En el año 2011 la IEA Wind publicó su esquema de etiquetado de aerogeneradores de baja potencia, el cual ha sido incorporado a la norma IEC 61400-2 como un aspecto opcional y ha tenido gran aceptación entre los fabricantes de todo el mundo como una alternativa a la Certificación de Tipo (IEC 61400-2, 2013) ya que representa mayor simplicidad y menores costos en su obtención. Esta etiqueta informa al usuario de parámetros básicos de desempeño, como son la Energía Anual Producida y las Emisiones de Ruido Sonoro. A pesar de que tuvo gran impacto en el medio en los últimos años, la información brindada es poco útil para una persona con baja o nula formación en el tema y no incorpora otros aspectos de interés para un consumidor final como la seguridad o la calidad del soporte que brinda la empresa. Por ello es necesaria una etiqueta complementaria que incorpore estos aspectos y presente de forma simple y clara la información de forma tal que un usuario final pueda comparar entre distintos productos.

METODOLOGÍA

A continuación se describen los métodos seguidos para la comparación de aerogeneradores basados en los tres ejes propuestos. En primer lugar describe el cálculo del parámetro definido para la eficiencia del aerogenerador. Luego los aspectos que hacen a la seguridad. Y por último la comparación en términos de comunicación de producto.

Definición del aerogenerador ideal

Por la compleja forma en que interaccionan los subsistemas de un aerogenerador entre sí, con el recurso eólico y con la carga eléctrica abastecida, se propone evaluar el diseño del aerogenerador de una manera indirecta, por la comparación contra un patrón ideal. Para ello, se define un aerogenerador ideal a partir de la ecuación que describe la potencia disponible en el viento en un área determinada, pero afectada por el límite del máximo teórico establecido por el coeficiente de Betz (Betz, 2013) ($C_{p,máx} = 16/27$). La curva de potencia de un aerogenerador ideal P_I se puede calcular como

$$P_I(v) = \frac{1}{2} \rho A v^3 C_{p,máx} \quad (1)$$

donde, ρ es la densidad del aire (1,225 kg/m³), A es el área barrida por el rotor y v es la velocidad del viento.

En función de identificar con mejor detalle el comportamiento de los aerogeneradores y de destacar la limitación de la potencia máxima generada como un aspecto positivo en el diseño, la curva creciente de la ec. (1) se limita a partir de la velocidad de diseño (IEC 61400-2, 2013) $v_{diseño} = 1,4 v_{ave}$ donde v_{ave} es la velocidad media anual del viento a la altura del eje. En la fig. 1, se muestra una versión normalizada de estas curvas donde se observa que las curvas de potencia ideales se limitan a partir de 14, 12, 10,5 y 8,5 m/s para las clases I, II, III y IV, respectivamente.

Para determinar la Energía Anual Producida (EAP) del aerogenerador ideal con una curva de potencia $P_I(v)$ descrita según la ec. (1) y limitada a partir $v_{diseño}$, se sigue la metodología de la IEC61400-12 y se calcula como muestra la expresión (2):

$$EAP_{ideal,X} = N_h \sum_{i=1}^N (F(v_i) - F(v_{i-1})) \frac{P_{I,i-1} P_{I,i}}{2} \quad (2)$$

donde, $EAP_{ideal,X}$, es la EAP producida por el aerogenerador ideal clase X , N_h es la cantidad de horas en un año (8.760), N es el número de bins, v_i es la velocidad de viento del bin i , promediada y normalizadas, $P_{I,i}$ es la potencia de salida del bin i , promediada y normalizada del aerogenerador ideal, y F es la función de distribución de probabilidad acumulativa de Rayleigh que viene dada por

$$F(v) = 1 - \exp\left(-\frac{\pi}{4} \left(\frac{v}{v_{ave}}\right)^2\right) \quad (3)$$

donde v es la velocidad del viento.

La sumatoria inicia definiendo v_{i-1} igual a $v_i - 0,5$ m/s y v_{i-1} igual a 0 kW y a partir de una tabla de velocidades de viento de 40 bins, entre 0 y 20 m/s, es decir cada 0,5 m/s, se obtiene el correspondiente valor de la potencia de la ideal de Betz y para estos valores se calcula la EAP para cada una de las cuatro clases.

Definición de la clase determinada

Con la $EAP_{ideal,X}$ obtenida para cada una de las cuatro clases y la EAP medida EAP_{medida} según la informa el laboratorio de ensayos que emite el informe de curva de potencia del aerogenerador bajo estudio, se define el coeficiente de comparación C_{comp} en función de la velocidad media anual del viento, como se ve en la expresión (4):

$$C_{comp,X}(v_{ave}) = \frac{EAP_{Medida}(v_{ave})}{EAP_{ideal,X}(v_{ave})} \quad (4)$$

Para obtener la clase determinada $C_{determinada}$, se calcula el valor medio y el desvío estándar de cada una de las cuatro curvas $C_{comp,X}(v_{ave})$. Finalmente, al aerogenerador en estudio se le asigna la clase X correspondiente a la $C_{comp,X}(v_{ave})$ que presenta el menor desvío estándar.

Cabe destacar que este método se interpreta como un criterio válido para determinar la clase de un aerogenerador, sólo en términos de la adecuación de su curva de potencia a una ideal. Esto no significa que el aerogenerador pueda identificarse como estructuralmente apto para esa clase de vientos. La determinación de clase según la norma se realiza a partir del estudio de los planos y memorias de cálculo, analizando aspectos de robustez en el diseño, así como en base a los resultados del “Ensayo de duración” de la IEC 61400-2. Sin embargo, se puede identificar algunos resultados importantes para el usuario a partir del criterio propuesto. Por ejemplo, si se conociera por resultados de ensayo o declaración del fabricante, que un aerogenerador es clase IV pero en función del criterio propuesto se ve que responde de mejor forma a vientos de clase I, tendría que someterse a una exigencia mecánica inapropiada para obtener el mejor provecho de su curva de potencia. Por el contrario, si un aerogenerador exhibe resultados de ensayo para clase I y tiene su óptimo según este criterio para vientos de clase IV, se puede decir que es un aerogenerador más robusto y seguro. En este caso extremo el sobre-dimensionamiento podría impactar en mayores costos, pero para el general de los casos no será un inconveniente sino una ventaja. El sobre-dimensionamiento de los componentes es una práctica muy difundida en la industria de aerogeneradores de baja potencia, por motivos cuyo detalle no alcanza este trabajo.

BENCHMARKING PARA EFICIENCIA DEL DISEÑO

Para unificar un coeficiente relativo a la eficiencia lograda en el diseño y realización del aerogenerador, se propone ponderar la adecuación que guarda la clase del aerogenerador según los resultados de ensayo, C_{ensayo} , con la $C_{determinada}$ obtenida mediante el método propuesto en este trabajo.

El valor a asignar a este aspecto se obtiene de evaluar el polinomio ponderado de la ec. (5)

$$Benchmarking_{Eficiencia} = \frac{Puntaje\ obtenido}{Puntaje\ máximo} = \frac{RP_{EA} + RP_{EB} + RP_{EC} + RP_{ED}}{P_{EA} + P_{ED}} \quad (5)$$

donde, P_{EA} a P_{ED} son las constantes de ponderación propuestas para relativizar la importancia de cada criterio, k_{EA} a k_{ED} los factores de cuantificación que se extraen de datos del aerogenerador bajo ensayo y R_{PEA} a R_{PED} los resultados de ponderación de cada criterio. Cada una de estas variables se cuantifican según la Tabla 1.

Criterio	Ponderación por criterio	Cuantificación del criterio	Resultado ponderado de eficiencia en el diseño
Clase determinada igual a clase según ensayo	$P_{EA} = 10$	$\begin{aligned} Si C_{determinada} = C_{ensayo} &\Rightarrow k_{EA} = 1, \\ Si C_{determinada} \neq C_{ensayo} &\Rightarrow k_{EA} = 0 \end{aligned}$	$RP_{EA} = P_{EA} \cdot k_{EA}$
Clase determinada mayor a clase según ensayo	$P_{EB} = 20$	$\begin{aligned} Si C_{determinada} > C_{ensayo} &\Rightarrow k_{EB} = \frac{C_{determinada} - C_{ensayo}}{3} \\ sino &\Rightarrow k_{EB} = 0 \end{aligned}$	$RP_{EB} = P_{EB} \cdot k_{EB}$
Clase determinada menor a clase según ensayo	$P_{EC} = -1$	$\begin{aligned} Si C_{determinada} < C_{ensayo} &\Rightarrow k_{EC} = C_{determinada} - C_{ensayo} \\ sino &\Rightarrow k_{EC} = 0 \end{aligned}$	$RP_{EC} = P_{EC} \cdot k_{EC}$
EAP medida vs Ideal	$P_{ED} = 50$	$k_{ED} = \frac{\sum_{n=4}^{11} \frac{EAP_{ideal}^n}{EAP_{medida}^n}}{8}$	$RP_{ED} = P_{ED} \cdot k_{ED}$

Tabla 1: Cuantificación de variables para el benchmarking de eficiencia del diseño.

Debe notarse que, las situaciones de las primeras tres filas son mutuamente excluyentes, por lo que cuando una es cierta las demás suman cero al polinomio (RP_{EA} , RP_{EB} y RP_{EC}). Asimismo, debe tenerse

en cuenta que el valor de la EAP_{ideal} se considera el máximo posible y que por esto, el valor máximo para RP_{ED} es P_{ED} . La máxima calificación se define como la suma de P_{EA} y P_{ED} , es decir cuando $C_{comp} = 1$ y $C_{determinada} = C_{ensayo}$. De este modo, la situación ideal es aquella en que $C_{determinada} = C_{ensayo}$ y en la que $EAP_{ideal} = EAP_{medida}$, para todos los valores de v_{ave} entre 4 y 11 m/s. El puntaje obtenido por el aerogenerador se divide por este valor máximo ideal posible y de ese modo se define el puntaje de Benchmarking para este aspecto, de manera que siempre arrojará valores entre cero y uno.

Se penaliza severamente el caso en que $C_{determinada} > C_{ensayo}$, puesto que para funcionar en condiciones óptimas de generación de energía debería instalarse el aerogenerador en un sitio cuyos vientos no está preparado resistir. Por otra parte se penaliza, levemente la situación en que $C_{determinada} < C_{ensayo}$, ya que si bien supone cierto grado de sobre-dimensionamiento, es una práctica más favorable que lo opuesto y da más tranquilidad al usuario.

BENCHMARKING PARA SEGURIDAD DEL AEROGENERADOR

Definir la seguridad de un aerogenerador es un aspecto muy amplio y complejo que no se pretende abarcar en su totalidad en este trabajo, en cambio se simplifica el análisis a la consideración de los resultados de comparación de clases en base a resultados de ensayos bajo norma, ya que estos implican entre 60 y 2500 horas según el ensayo y no menos de 6 meses bajo ensayo y la identificación de comportamientos específicos de Seguridad y Funcionamiento, según la IEC61400-2, bajo la observación de técnicos de ensayo con formación específica.

Desde el punto de vista propuesto, se considera que un aerogenerador cuya clase determinada por la metodología propuesta sea, por ejemplo clase I, pero haya sido determinado en el diseño que es apto para sitios clase IV es el caso extremo del aerogenerador ineficiente e inseguro, ya que debería someterse a cargas por sobre las que fue diseñado para resistir para llegar a entregar la energía que de él se espera. Por el contrario, el caso más virtuoso es el opuesto, en el que un aerogenerador tiene una clase determinada IV, pero cuyo informe de ensayo de duración asegura que puede resistir vientos clase I.

Para obtener el valor del Benchmarking de seguridad se propone el polinomio ponderado de la ec. (6)

$$Benchmarking_{Seguridad} = \frac{Puntaje\ obtenido}{Puntaje\ máximo} = \frac{RP_{SA} + RP_{SB} + RP_{SC} + RP_{SD} + RP_{SE}}{P_{SA} + P_{SB} + P_{SD} \cdot 1,5} \quad (6)$$

donde, P_{SA} a P_{SE} son constantes de ponderación, k_{SA} a k_{SE} los factores de cuantificación afectados por los datos provenientes del aerogenerador y RP_{SA} a RP_{SE} los resultados de ponderación de cada criterio. Estas variables se cuantifican según la Tabla 2.

Criterio	Ponderación por criterio	Cuantificación del criterio	Resultado Ponderado
Ensayó curva de potencia	$P_{SA} = 10$	$Ensayó\ curva\ de\ potencia \Rightarrow k_{SA} = 1,$ $No\ ensayó\ curva\ de\ potencia \Rightarrow k_{SA} = 0$	$RP_{SA} = P_{SA} \cdot k_{SA}$
Ensayó duración	$P_{SB} = 20$	$Ensayó\ duración \Rightarrow k_{SB} = 1,$ $No\ ensayó\ duración \Rightarrow k_{SB} = 0$	$RP_{SB} = P_{SB} \cdot k_{SB}$
Clase determinada igual a clase según ensayo	$P_{SC} = 10$	$Si\ C_{determinada} = C_{ensayo} \Rightarrow k_{SC} = 1,$ $Si\ C_{determinada} \neq C_{ensayo} \Rightarrow k_{SC} = 0$	$RP_{SC} = P_{SC} \cdot k_{SC}$

Clase determinada mayor a clase según ensayo	$P_{SD} = 40$	$\text{Si } C_{determinada} > C_{ensayo} \Rightarrow k_{SD} = \frac{C_{determinada} - C_{ensayo}}{C_{determinada}}$ $\text{sino } \Rightarrow k_{SD} = 0$	$RP_{SD} = P_{SD} \cdot k_{SD}$
Clase determinada menor a clase según ensayo	$P_{SE} = -20$	$\text{Si } C_{determinada} < C_{ensayo} \Rightarrow k_{SE} = C_{determinada} - C_{ensayo}$ $\text{sino } \Rightarrow k_{SE} = 0$	$RP_{SE} = P_{SE} \cdot k_{SE}$

Tabla 2: Cuantificación de variables para el benchmarking de seguridad.

Para componer el aspecto de seguridad se ponderó el cumplimiento de los períodos de ensayo, para curva de potencia y duración además de la comparación entre las clases determinada y de ensayo.

Completar un ensayo de curva de potencia requiere que se reúna una significativa cantidad de datos, de este modo se valoró positivamente tener una curva de potencia completa según lo que establece IEC 61400-12. De igual forma, pero más obviamente, se ponderó desde el punto de vista de la seguridad a los equipos que hayan completado con éxito un ensayo de duración según IEC 61400-2. Se supone como premisa general que un aerogenerador ensayado siempre será más seguro y confiable que uno que no se sometió al ensayo de un laboratorio independiente. La situación de los aerogeneradores ensayados con resultados no satisfactorios, en el marco de este trabajo, se asimila a la de los equipos no ensayados.

En este caso que se focaliza la seguridad del aerogenerador, se valora positivamente la situación de sobre-dimensionamiento, cuando la $C_{determinada} < C_{ensayo}$ y se penaliza la situación en que la $C_{determinada} > C_{ensayo}$, ya que esto conlleva un gran riesgo para los bienes y las personas.

Nótese, que las tres situaciones relativas a la clase del aerogenerador se excluyen mutuamente y que cuando se da una las demás no aportan al polinomio del denominador del Benchmarking de seguridad.

El puntaje máximo obtenible, se define para relativizar el benchmark en la situación de que el aerogenerador cuente con curva de potencia y ensayos de duración informados, y que $C_{determinada} > C_{ensayo}$, afectando este último en un 50% más para darle mayor preponderancia en el cálculo.

BENCHMARKING PARA COMUNICACIÓN DEL PRODUCTO

El término “comunicación del producto” se toma de la acepción utilizada en Diseño Industrial (Fernández et al., 2015), por la que un producto diseñado y el conjunto de elementos que lo componen, desde el nombre de su modelo, la marca, su logo, los materiales utilizados y las formas, así como el contenido de cada documento que lo acompaña, están implicados en la comunicación que se establece entre el producto y el usuario. En este trabajo no se pretende estudiar tal proceso, sino reflejar aspectos que son relevantes en el esquema de trabajo iniciado, para obtener resultados relevantes y significativos a partir de información disponible en informes de ensayo públicos y hojas de datos de los productos.

La identificación de la potencia nominal de un aerogenerador, es un tema controversial en la industria de la eólica de baja potencia. La gran mayoría de los aerogeneradores en el mercado no cumplen con informar correctamente este dato, es muy frecuente que se informe una potencia nominal por encima de lo que van a generar como potencia máxima a velocidades de viento razonables.

Tanto AWEA como BWEA, identificaron este inconveniente y para subsanarlo definieron la velocidad a la cual debe alcanzarse la potencia nominal en 10 y 11 m/s, respectivamente. Lo que en la práctica

significa definir a la potencia nominal por el valor que alcanza según su ensayo de curva de potencia a esas velocidades. Esto solucionó muchas situaciones comprometidas, y las diferencias que aún persisten residen en que muchos fabricantes optaron por declarar la potencia nominal según el estándar que le corresponde al equipo. Algunos muestran rastros en la denominación del modelo y otros debieron renombrar su producto, mientras que otros productos con inconvenientes similares que no se certificaron bajo estos estándares, aún no corrigen su situación.

Para establecer el aspecto en cuanto a comunicación del producto, se define el polinomio ponderado de la ec. (7) dado por

$$\text{Benchmarking}_{\text{Comunicación}} = \frac{\text{Puntaje obtenido}}{\text{Puntaje máximo}} = \frac{RP_{CA} + RP_{CB} + RP_{CC} + RP_{CD} + RP_{CE} + RP_{CF} + RP_{CG} + RP_{CH} + RP_{CI} + RP_{CJ} + RP_{CK}}{P_{CA} + P_{CB} + P_{CC} + P_{CD} + P_{CE} + P_{CF} + P_{CG} + P_{CH} + P_{CI} + P_{CJ} + P_{CK}}, \quad (7)$$

donde, P_{CA} a P_{CK} son las constantes de ponderación, k_{CA} a k_{CK} los factores de cuantificación obtenidos de datos del aerogenerador y RP_{CA} a RP_{CK} los resultados de ponderación de cada criterio. Estas variables se cuantifican según la Tabla 3.

Criterio	Ponderación por criterio	Cuantificación del criterio	Resultado Ponderado
Ensayó curva de potencia	$P_{CA} = 10$	<i>Ensayó curva de potencia</i> $\Rightarrow k_{CA} = 1$, <i>No ensayó curva de potencia</i> $\Rightarrow k_{CA} = 0$	$RP_{CA} = P_{CA} \cdot k_{CA}$
Publica curva de potencia	$P_{CB} = 10$	<i>Publica curva de potencia</i> $\Rightarrow k_{CB} = 1$, <i>No publica curva de potencia</i> $\Rightarrow k_{CB} = 0$	$RP_{CB} = P_{CB} \cdot k_{CB}$
Publica curva tabular	$P_{CC} = 8$	<i>Publica curva tabular</i> $\Rightarrow k_{CC} = 1$, <i>No publica curva tabular</i> $\Rightarrow k_{CC} = 0$	$RP_{CC} = P_{CC} \cdot k_{CC}$
Ensayó duración	$P_{CD} = 10$	<i>Ensayó duración</i> $\Rightarrow k_{CD} = 1$, <i>No ensayó duración</i> $\Rightarrow k_{CD} = 0$	$RP_{CD} = P_{CD} \cdot k_{CD}$
Publica Clase	$P_{CE} = 10$	<i>Publica clase</i> $\Rightarrow k_{CE} = 1$, <i>No publica clase</i> $\Rightarrow k_{CE} = 0$	$RP_{CE} = P_{CE} \cdot k_{CE}$
Potencia a 11 m/s igual a potencia nominal	$P_{CF} = 10$	<i>Si es igual</i> $\Rightarrow k_{CF} = 1$; <i>si no</i> $k_{CF} = 0$	$RP_{CF} = P_{CF} \cdot k_{CF}$
Potencia a 11 m/s mayor a potencia nominal	$P_{CG} = 20$	<i>Si es mayor</i> $\Rightarrow k_{CG} = 1 - \frac{P_{11m/s}}{P_{nominal}}$; <i>si no</i> $k_{CG} = 0$	$RP_{CG} = P_{CG} \cdot k_{CG}$
Potencia a 11 m/s menor a potencia nominal	$P_{CH} = -2$	<i>Si es menor</i> $\Rightarrow k_{CH} = -1 + \frac{P_{11m/s}}{P_{nominal}}$; <i>si no</i> $k_{CH} = 0$	$RP_{CH} = P_{CH} \cdot k_{CH}$
Potencia máxima igual a potencia nominal	$P_{CI} = 10$	<i>Si es igual</i> $\Rightarrow k_{CI} = 1$; <i>si no</i> $k_{CI} = 0$	$RP_{CI} = P_{CI} \cdot k_{CI}$
Potencia máxima mayor a potencia nominal	$P_{CJ} = 20$	<i>Si es mayor</i> $\Rightarrow k_{CJ} = 1 - \frac{P_{máxima}}{P_{nominal}}$; <i>si no</i> $k_{CJ} = 0$	$RP_{CJ} = P_{CJ} \cdot k_{CJ}$
Potencia máxima menor a potencia nominal	$P_{CK} = -2$	<i>Si es menor</i> $\Rightarrow k_{CK} = -1 + \frac{P_{máxima}}{P_{nominal}}$; <i>si no</i> $k_{CK} = 0$	$RP_{CK} = P_{CK} \cdot k_{CK}$

Tabla 3: Cuantificación de variables para el benchmarking de comunicación del producto.

De los 11 puntos definidos, los primeros cinco, abarcan tanto la contratación de ensayos realizados por terceros independientes, como la publicación de los mismos. Si bien es cierto que la mera realización de ensayos no implica por definición que se comuniquen sus resultados, en general los productos ensayados cuyos informes no son públicos, igualmente informan datos de ensayo en sus hojas de datos. Aquí subyace un aspecto central para el desarrollo de la eólica de baja potencia,

manejar información fidedigna no es barato y muchas veces penaliza a los productos que invirtieron en certificaciones frente a los que nunca pasaron por ningún ensayo pero se venden con astucia y muy baratos.

Los otros seis criterios abarcan los aspectos que hacen a la información sobre la potencia nominal del producto. Se verifica si la potencia nominal declarada por el fabricante es igual, mayor o menor que la potencia alcanzada a 11 m/s, y del mismo modo si es igual, mayor o menor que la potencia máxima alcanzada. El máximo puntaje se otorgó al criterio de igualdad, pero el de excedencia se ponderó mejor que el de déficit. La comparación de potencias se resuelve ponderando sobre la proporción del desvío respecto de la nominal, el signo cambiado penaliza el caso en que la potencia encontrada sea menor que la nominal.

La ponderación del ensayo de duración, y de la publicación de la clase, es menor que para el caso de curva de potencia por el motivo de ser éste un ensayo muy costoso, al que sólo acceden las empresas más consolidadas o con mayor presupuesto. Subyace aquí que la definición que hace la norma de este ensayo, y de la certificación de tipo, parten de los previstos para aerogeneradores de alta potencia, y que por tal razón sus costos no guardan una lógica de proporcionalidad para la eólica de baja potencia.

APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA PROPUESTA A UN CASO DE ESTUDIO

Se analiza como ejemplo de aplicación, el aerogenerador Windspot 3.5kW de la empresa Sonkio. El fabricante detalla (Windspot, 2021) entre otros puntos que este aerogenerador de eje horizontal, tiene tres aspas de fibra de vidrio, generador sincrónico de imanes permanentes y regulación de paso de las aspas por fuerza centrífuga. Este modelo es upwind y se orienta de modo pasivo con veleta de cola. El generador eléctrico tiene 250 RPM nominales, lo que garantiza un bajo nivel de emisión de ruido. El área barrida por las aspas es de 13,2 m², tiene un diámetro de 4,05 m y en total pesa 185 kg. Además, se sugiere alturas de montaje entre 9 y 18 m.

Si bien es INTERTEK el Organismo de Certificación que emite los informes y la etiqueta de consumidor, este equipo fue ensayado por el CEDER-CIEMAT en Soria, España. Cuenta con etiquetado IEA Wind – IEC 61400-2 para clase 1, aunque el análisis del diseño lo define para un aerogenerador clase 4. Evidentemente, a pesar de haber sido diseñado para satisfacer los requisitos de velocidades de viento inferiores, distintos factores favorecen que pase un ensayo de duración exitosamente en un sitio con velocidades de viento mucho mayores. Los factores de seguridad, aplicados a los cálculos de selección de los materiales y a las cargas previstas, podrían garantizar la supervivencia, sumados a otros factores aleatorios relativos al ensayo o a las características de los componentes. Por último, con esa salvedad aclarada en el informe un laboratorio de referencia a nivel global, que trabaja en un sistema de calidad de laboratorios ISO 17025 acreditado, define a partir del conocimiento del criterio técnico de sus especialistas que el equipo cumple con los requerimientos para ser etiquetado como clase 1 por lo que no es necesario validar nuevamente esa definición

En la fig. 1 se observan las curvas de potencias en función de la velocidad del viento del aerogenerador normalizada (negra) y sus ideales de Betz para clase I (azul), II (rojo), III (amarillo) y IV (verde). Se puede apreciar la similitud de la curva de potencia normalizada del aerogenerador con la del caso de ideal de Betz de clase 2.

En la fig. 2 se muestran los coeficientes de comparación, en función de la velocidad media anual del viento clase I (azul), II (rojo), III (amarillo) y IV (verde). En la figura se presenta además, el desvío estándar y el promedio obtenido para cada curva.

Si bien los cocientes del ideal de Betz clase IV tienen valores más altos, y en algunos casos superiores a la unidad, lo que se debe buscar es el mínimo desvío estándar de los valores de la serie, como se vio anteriormente. A pesar de que pueda parecer ilógico tener valores de energía sobre los que otorgaría

el ideal, este resultado es esperable, siempre que se compare entre aerogeneradores de distinta potencia. Recordemos que, éste es el caso del aerogenerador ideal de Betz clase IV, según la definición de este trabajo, puesto que se limita a una velocidad menor de viento, y por consiguiente, a un valor menor de potencia (ver fig. 1) y, consecuentemente, menor EAP que los demás casos. Esto se debe a que, cuando se supera la velocidad de diseño por clase deja de tener validez el método de evaluación, ya que se está comparando el desempeño de la máquina real contra un valor constante de potencia, y no contra la curva de un rotor ideal, no limitada y tendiendo a infinito.

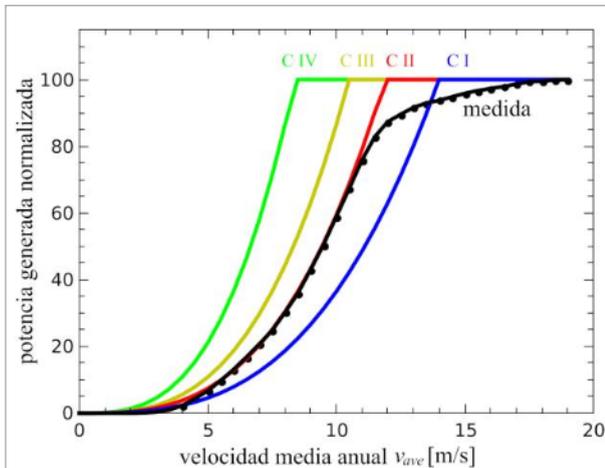


Figura 1: Curva de potencia del Windspot 3.5kW y sus ideales de Betz normalizadas a la potencia máxima.

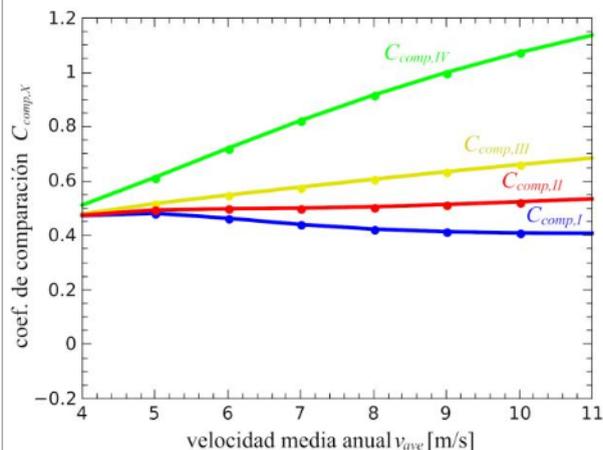


Figura 2: Coeficientes de comparación $C_{comp,X}$ del Windspot 3.5 kW.

$C_{comp,X}$	Desvío Estándar	Promedio
I	0,030	0,439
II	0,019	0,506
III	0,071	0,589
IV	0,222	0,850

La clase determinada por el método se obtiene de seleccionar aquella que presenta el menor desvío estándar. En este caso, se obtiene que $C_{determinada} = 2$ ya que para la curva de coeficiente de comparación de esta clase se tiene desvío de 0,019. Además, se puede decir que en promedio, el aerogenerador alcanza un 0,506 de su ideal de Betz.

Éste equipo cuenta con un ensayo de duración para clase 1, de modo que para optimizar su generación de energía requiere de velocidades de viento menores a las que puede soportar estructuralmente, según consta en su certificado.

Al evaluar el Benchmarking de Eficiencia de la ec. (5) se obtiene, en base a la cuantificación de la Tabla 1 que

$$Benchmarking_{Eficiencia} = \frac{RP_{EA} + RP_{EB} + RP_{EC} + RP_{ED}}{P_{EA} + P_{ED}} = 0,53$$

donde $RP_{EA} = 0$, $RP_{EB} = 20 \frac{2-1}{3} = 6,67$, $RP_{EC} = 0$ y $RP_{ED} = P_{ED} \cdot k_{ED} = 50 \cdot 0,51 = 25,29$.

Para el Benchmarking de Seguridad se puede apreciar el aporte central que hace la realización de ensayo de duración y de curva de potencia, junto a, nuevamente, la diferencia de clase positiva. Un aerogenerador de clase 1 por el ensayo de duración que genera energía por clase 2 es una buena situación desde el punto de vista de la seguridad. Por ello al aplicar la ec. (6) para el Benchmarking de seguridad se obtiene que

$$Benchmarking_{Seguridad} = \frac{RP_{SA} + RP_{SB} + RP_{SC} + RP_{SD} + RP_{SE}}{P_{SA} + P_{SB} + P_{SD} \cdot 1,5} = 0,62$$

donde $RP_{SA} = 10$, $RP_{SB} = 20$, $RP_{SC} = 0$, $RP_{SD} = 13,33$ y $RP_{SE} = 0$.

Finalmente para obtener el valor del Benchmarking de Comunicación del Producto, se cuantifica la ec. (7) obteniendo

$$Benchmarking_{Comunicación} = \frac{RP_{CA} + RP_{CB} + RP_{CC} + RP_{CD} + RP_{CE} + RP_{CF} + RP_{CG} + RP_{CH} + RP_{CI} + RP_{CJ} + RP_{CK}}{P_{CA} + P_{CB} + P_{CC} + P_{CD} + P_{CE} + P_{CF} + P_{CG} + P_{CH} + P_{CI} + P_{CJ} + P_{CK}} = 0,74$$

donde $RP_{CA} = 10$, $RP_{CB} = 10$, $RP_{CC} = 8$, $RP_{CD} = 10$, $RP_{CE} = RP_{CF} = 0$, $RP_{CG} = 0,5$, $RP_{CH} = RP_{CI} = 0$, $RP_{CJ} = 2,06$, $RP_{CK} = 10$ según se desprende de la Tabla 3.

Observe que $RP_{CJ} = 2,06$ se obtiene de considerar el desvío entre la potencia máxima y la nominal. Siempre que haya diferencia se penalizará, pero en caso de que la máxima exceda la nominal es lo más esperable y no se penaliza tanto como el caso en que nunca se alcance la potencia nominal.

Los principales aportes en este equipo lo hacen la disponibilidad de curva de potencia y ensayos de duración, además de la publicación de estos datos. Por otro lado, la obtención de valores de potencia a velocidad de diseño y de potencia máxima por encima de la nominal lo penalizan con cuantificaciones negativas que al resultado ponderado sólo le agregan un valor spoco incidente.

BENCHMARKING GLOBAL Y ETIQUETA COMPLEMENTARIA

Para simplificar aún más la comparación para un usuario final, se propone un Benchmarking global según el polinomio ponderado de la ec. (8) dado por

$$Benchmark_{Global} = 0,4 Benchmark_{Eficiencia} + 0,4 Benchmark_{Seguridad} + 0,2 Benchmark_{Comunicación} \quad (8)$$

Para el aerogenerador en estudio se obtiene un $Benchmark_{Global} = 0,6$.

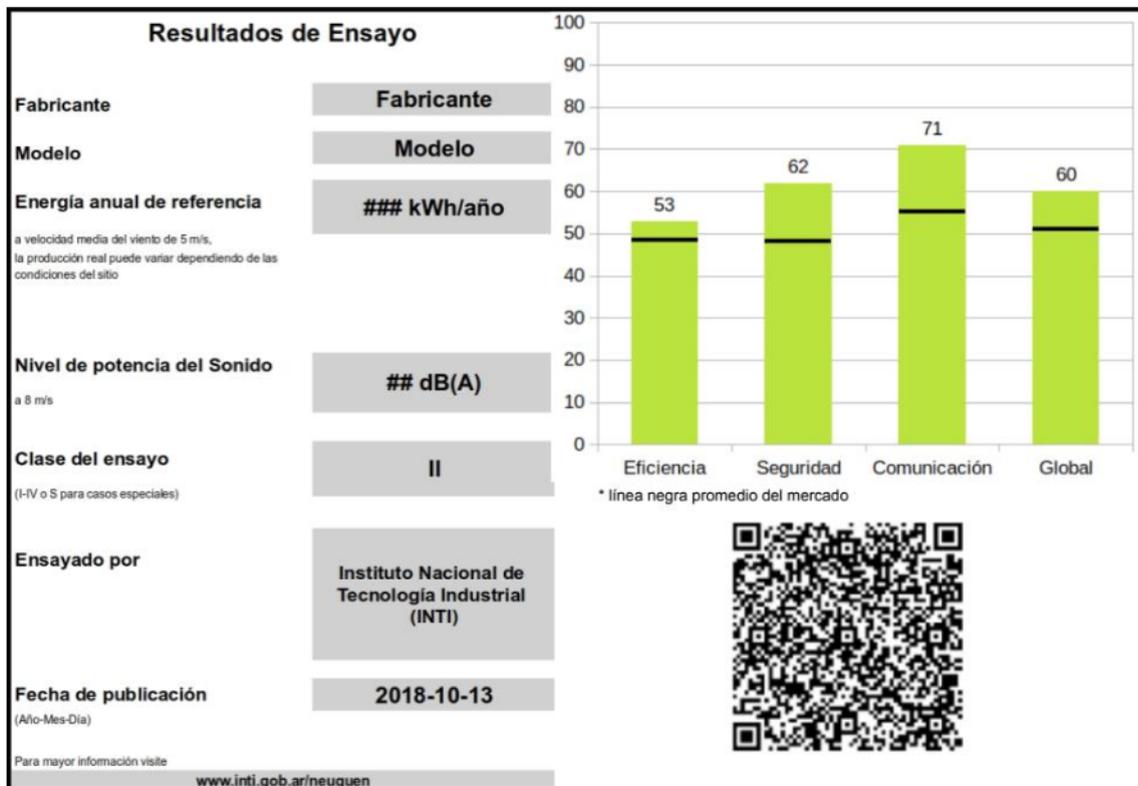


Figura 3: Ejemplo de etiqueta del producto que incorpora la evaluación realizada en este trabajo.

Como se puede apreciar este producto supera al promedio en los tres ejes considerados, pero el factor de eficiencia, dominado por un coeficiente de comparación de clases de 0,506 y con una diferencia de +1 entre clases, domina el puntaje general, mitigando los 0,71 obtenidos para comunicación del producto.

CONCLUSIONES

Con el objetivo de brindar información necesaria para que un usuario final sin conocimientos técnicos específicos tenga la posibilidad de seleccionar un aerogenerador de baja potencia, en este trabajo se desarrolló una propuesta de etiquetado con información comparativa que complementa a la propuesta por la norma IEC 61400-2, que abarca tres ejes: eficiencia, seguridad y comunicación del producto siguiendo un enfoque de Benchmarking.

Para ello, se elaboró un método para calificar cuantitativamente el desempeño de los aerogeneradores de baja potencia en base estos aspectos y se propuso una etiqueta con esta información para simplificar el proceso comparativo de productos a un potencial consumidor. El valor aportado por los esquemas de Benchmarking, consta en brindar herramientas de comparación configurables a las preferencias del usuario que simplifiquen el análisis en un sólo índice o un ranking.

Además, se desarrolló una estrategia de definición de la clase del aerogenerador, adicional a las definidas por la norma (clase de ensayo y clase de diseño), que posibilitó el análisis de aspectos centrales en benchmarking de aerogeneradores, que hacen tanto a la eficiencia y a la seguridad de los aerogeneradores por la comparación entre la clase determinada durante el ensayo y la que optimiza la generación de energía.

Se aplicó el método desarrollado a un caso de referencia.

Un esfuerzo posterior en el sentido de este trabajo, podría incluir el desarrollo de una plataforma web que admita el cálculo en línea de todo el método, la personalización del perfil de Benchmarking y la incorporación de herramientas de comparación de costos de productos.

REFERENCIAS

- Betz A. (2013). The Maximum of the Theoretically Possible Exploitation of Wind by Means of a Wind Motor. *Wind Engineering* 37(4), 441–446. doi:10.1260/0309-524x.37.4.441
- ClassNK [en línea] Type Certification for Wind Turbines. Dirección URL: <<https://www.classnk.or.jp/hp/en/authentication/renewableenergy/windturbine.html>> [consulta: 18 de agosto de 2021]
- Duzdevich J. P. (2020). Propuesta de etiquetado de aerogeneradores de baja potencia orientado a consumidores. Universidad Nacional del Comahue.
- EA Wind Task 27. (2011). Recommended Practices For Wind Turbine Testing And Evaluation – 12. Consumer Label For Small Wind Turbines. España.
- Enevoldsen S. W. (2015). Markedsanalyse Europa og B2B markedet. En analyse under WP5 i Small Wind EUDP projekt nr. 64014-061. Dinamarca.
- EGV [en línea] Technical certification and servicing of wind turbines. Dirección URL: <<https://cas.ens.dk/home/info/>> [consulta: 18 de agosto de 2021]
- Fernández Ferreras D. I. A., Llorente Fernández D. I., Fadruga González M. R., Daniel D. I. (2015). La Comunicación en los productos de diseño industrial. *Revista de la Universidad Cubana de Diseño* Número 3, pp. 99-142.
- Folkcenter [en línea] The Small Wind Turbine Catalogue. Dirección URL: <<https://www.folkcenter.eu/pages/Small-wind-turbine-catalogue.html>> [consulta: 18 de agosto de 2021]
- IEC 61400-2. (2013). Wind turbines - Part 2: Small wind turbines.

- IEC 61400-12.1. (2017). Wind energy generation systems - Part 12-1: Power performance measurements of electricity producing wind turbines.
- Intertek [en línea] Wind Certification Program Directory. Dirección URL: <<https://www.intertek.com/wind/directory/>> [consulta: 18 de agosto de 2021]
- INTI [en línea] Sistema de obtención de curva de potencia para aerogeneradores de baja potencia. Dirección URL: <<https://www.inti.gob.ar/areas/asistencia-regional/patagonia/neuquen>> [consulta: 18 de agosto de 2021]
- <https://mcs-certified.com/about-us/>
- MCS [en línea] About us. Dirección URL: <<https://mcs-certified.com/about-us/>> [consulta: 18 de agosto de 2021]
- Small-Wind [en línea] Consumer Labels: IEC (international) and AWEA (USA). Dirección URL: <<http://small-wind.org/quality/labels/>> [consulta: 18 de agosto de 2021]
- SWCC [en línea] SWCC Certified Turbines – Small: Compare Ratings. Dirección URL: <<https://smallwindcertification.org/certified-small-turbines/>> [consulta: 18 de agosto de 2021]
- UL [en línea] Wind Certification. Dirección URL: <<https://aws-dewi.ul.com/markets/wind-energy-services/wind-certification/>> [consulta: 18 de agosto de 2021]
- Windspot [en línea] Tested and Certified - Sonkyo Energy Wind Turbines. Dirección URL: <https://www.intertek.com/uploadedFiles/Intertek/Divisions/Commercial_and_Electrical/Media/PDF/Energy/Wind/AWEAcertificate100386839CRT-001b.pdf> [consulta: 18 de agosto de 2021]
- WWEA [en línea] WWEA released latest Global Small Wind Statistics. Dirección URL: <<https://wwindea.org/wwea-released-latest-global-small-wind-statistics/>> [consulta: 18 de agosto de 2021]

ABSTRACT:

In the third edition, the IEC61400-2 standard defines a Consumer Label with a new approach for the presentation of technical information on low-power wind turbines. But the comparison of products is complex to carry out for people without knowledge in the matter, making it difficult to select the right product for their needs and expectations.

To improve this situation, this work proposes a methodology to quantify three aspects of comparison of low power wind turbines: efficiency, safety and communication of the product. To do this, a proposal is developed to compare a wind turbine with an ideal equivalent wind turbine. Each of the three aspects studied are quantified on a scale between zero and one that allows a simple comparison between wind turbines for a consumer without previous knowledge and also incorporates a global evaluation that integrates the three aspects studied. This proposal is developed with the product benchmarking approach and to exemplify, the methodology is applied to a commercial low power wind turbine. The results obtained are incorporated into a complementary label that presents the information graphically and contrasts it with the averages obtained from applying this methodology to a sample of 48 wind turbines.

KEYWORDS: wind energy, small wind turbines, power curve, efficiency, benchmarking, consumer label.