

SERIE PONENCIAS



MINISTERIO
DE CIENCIA
E INNOVACIÓN

Ciemat

Centro de Investigaciones
Energéticas, Medioambientales
y Tecnológicas

AEROGENERADORES DE PEQUEÑA POTENCIA

MATERIAL EDUCATIVO

Coordinador:

Luis M. Arribas de Paz

Publicación disponible en el [Cátalogo general de publicaciones oficiales](#).

© CIEMAT, 2020

NIPO: 832-20-024-3

Maquetación y Publicación:

Editorial CIEMAT

Avda. Complutense, 40 28040-MADRID

Correo: editorial@ciemat.es

[Novedades editoriales CIEMAT](#)

El CIEMAT no comparte necesariamente las opiniones y los juicios expuestos en este documento, cuya responsabilidad corresponde únicamente a los autores.

Reservados todos los derechos por la legislación en materia de Propiedad Intelectual. Queda prohibida la reproducción total o parcial de cualquier parte de este libro por cualquier medio electrónico o mecánico, actual o futuro, sin autorización por escrito de la editorial.

ÍNDICE

Introducción	1
Capítulo 1: Introducción a la evaluación de recurso eólico en micro eólica. <i>Gabriel Usera</i>	3
Capítulo 2: El rotor. <i>Alexeis Fernandez, Ernesto Fariñas, Andrés Zappa</i>	13
Capítulo 3: Generadores Eléctricos. <i>Javier de la Cruz</i>	25
Capítulo 4: Control y acondicionamiento de potencia. <i>Luis Arribas, Javier de la Cruz, Timo Karlsson, Mariano Amadío</i>	37
Capítulo 5: Normativa de aerogeneradores de pequeña potencia. <i>Oscar Izquierdo, Luis Cano, Ignacion Cruz, Luis Arribas</i>	49
Capítulo 6: Ensayos de aerogeneradores de pequeña potencia. <i>Andrés Zappa, Mariano Amadío</i>	59
Capítulo 7: Aplicaciones: integración del aerogenerador en el sistema. <i>Andrés Zappa, Mariano Amadío, Luis Arribas</i>	75
Capítulo 8: Mercado de aerogeneradores de pequeña potencia. <i>Luis Arribas, Carolina García Barquero, Andrés Zappa, Mariano Amadío, Javier de la Cruz, Alexeis Fernández, Gabriel Usera, Timo Karlsson</i>	90
Capítulo 9: Evaluación económica de sistemas eólicos de baja potencia. <i>Javier de la Cruz</i>	102
Capítulo 10: Manejo de la Información Existente. <i>Gabriel Usera</i>	110

INTRODUCCIÓN

Este documento se ha generado dentro del Proyecto titulado “*Small Wind Turbine Optimization and Market Promotion*” ([SWTOMP](#)), un proyecto ERANET-LAC.

El principal objetivo del proyecto SWTOMP es la promoción, el desarrollo y la puesta en práctica de la utilización de aerogeneradores de pequeña y mediana potencia, para aplicaciones aisladas y para la conexión a redes débiles, incluida la optimización de las turbinas eólicas de pequeña y mediana escala para satisfacer los regímenes eólicos locales y los requisitos de infraestructura regional.

La organización del Proyecto contemplaba cuatro Tareas, de las cuales la primera era la Promoción del mercado de turbinas eólicas en pequeña y mediana escala en los países participantes en el proyecto. Dentro de esta Tarea, se contemplaban tres actividades: análisis del mercado de aerogeneradores de pequeña potencia; realización de talleres para la difusión de la tecnología; y la elaboración de un material educativo que sirviera para acercar la tecnología de pequeños aerogeneradores a los distintos posibles interesados. Ésta última actividad es en la que se engloba este trabajo.

La actividad para la elaboración de material educativo sobre minieólica comenzó con un mapeo de los recursos existentes, principalmente en internet, en los diferentes países del SWTOMP, y en los otros más países activos en minieólica también (como EE.UU., Reino Unido y Canadá). Después de este ejercicio de mapeo, el siguiente paso fue preparar una guía para navegar a través de estos recursos; este trabajo queda recogido en el Capítulo 10 de esta publicación. Y, finalmente, elaborar un nuevo material, en forma de una publicación, escrita por los socios participantes del SWTOMP en algunos de los temas más interesantes sobre minieólica abordados en este proyecto. En particular: el capítulo 1 introduce el recurso eólico para aerogeneradores de pequeña potencia; a continuación, hay un bloque de tres capítulos en los que, siguiendo la secuencia física, se describen los componentes del aerogenerador: el rotor (Capítulo 2), el generador eléctrico (Capítulo 3) y el control y acondicionamiento de potencia electrónicos (Capítulo 4). El siguiente bloque está relacionado con la normativa (Capítulo 5) y el ensayo de pequeños aerogeneradores (Capítulo 6) y el último bloque agrupa temas de aplicaciones (Capítulo 7), mercado (Capítulo 8) y análisis económico (Capítulo 10). Cierra la publicación una guía para el manejo de la información disponible, como ya se ha comentado.

Puesto que los socios que han participado en esta publicación son de países de habla hispana, se ha optado por seleccionar el español como idioma para el mismo.

Desde el principio de la elaboración de esta publicación, la audiencia objetivo de la misma ha sido un tema de debate constante. De hecho, es posible que incluso lo siga siendo. Hacer una publicación divulgativa, o de carácter más técnico, o con orientación académica (y en ese caso, de qué nivel), o una publicación científica (dado que las entidades participantes son universidades y

centros de investigación). Finalmente, se ha optado por un nivel básico, con cierto carácter divulgativo, pero también con conexiones para ampliar información en aquellos puntos en los que el lector quiera ampliar información. Y, es posible, que en los temas en los que los autores están más directamente implicados, el nivel técnico sí sea un poco más elevado.

Es la intención de los autores que, a través de esta publicación, una amplia audiencia pueda acceder a un conocimiento veraz y accesible del mundo de los aerogeneradores de pequeña potencia, envuelto muchas veces en mitos y leyendas que no siempre se corresponden con la realidad.

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN A LA EVALUACIÓN DE RECURSO EÓLICO EN MICRO EÓLICA

GABRIEL USERA

Facultad de Ingeniería, Universidad de la República, calle J. Herrera y Reissig 565, 11300, Montevideo

INTRODUCCIÓN

En las siguientes secciones se presentan aspectos principales de este proceso y se referencia material bibliográfico para profundizar en varios de estos aspectos. Este material bibliográfico, en el cual se apoya el desarrollo de los distintos puntos del documento de acuerdo a lo indicado en cada sección, se reporta en la última sección y está libremente disponible para el lector. El presente documento no pretende sustituir la necesaria consulta a dichas fuentes de información bibliográfica. Se recomienda especialmente al lector una consulta general a los trabajos de Olsen [1] y Forsyth [7], documentos especialmente pertinentes a los aspectos expuestos en este capítulo y que son referidos frecuentemente en él mismo.

La sección 2 se dedica a introducir algunos conceptos fundamentales vinculados al recurso eólico. En la sección 3 se aborda la caracterización física del sitio candidato, la cual es normalmente objeto de una visita física al sitio y genera información imprescindible para las siguientes etapas. En la sección 4 se abordan las distintas fuentes para la obtención de datos climáticos relevantes, la consideración de ajustes por topografía, perfil de viento y apantallamientos, y su utilización para la generación de estimativos de producción. En la sección 5 se consideran aspectos de regulaciones locales y aspectos ambientales. En la sección 6 se presentan algunas conclusiones generales y en la sección 7 se reporta la bibliografía consultada para la elaboración de este documento y recomendada para profundizar en diversos aspectos del mismo.

CARACTERÍSTICAS DEL VIENTO

Los aprovechamientos eólicos extraen energía del flujo de viento en la capa más baja de la atmósfera, convirtiéndola en energía mecánica en la punta de un eje, la cual se puede aplicar directamente para realizar un trabajo, como el bombeo de agua, o de forma más habitual modernamente, para la generación de energía eléctrica. Esta capa más baja de la atmósfera, en la que se encuentra inmersa la mayor parte de la actividad humana y en particular los aprovechamientos eólicos, es llamada capa límite atmosférica. Corresponde a la zona de la tropósfera directamente influenciada por la presencia de la superficie terrestre, en particular por la fricción derivada de la rugosidad de la superficie. Su espesor típicamente se encuentra comprendido entre algunos cientos de metros y unos pocos kilómetros desde la superficie. La fricción provocada por la rugosidad de la superficie terrestre reduce la velocidad del viento en las capas más bajas induciendo gradientes verticales de velocidad y turbulencia. Estos gradientes dependen de las condiciones locales de topografía, rugosidad del terreno, y parámetros climáticos, generándose los gradientes más intensos sobre los terrenos de mayor rugosidad.

En estas condiciones, el viento varía entonces con la ubicación geográfica y características topográficas, el momento del día y las estaciones, la altura respecto del suelo, y el estado del clima regional. Las principales características del viento que determinan el recurso eólico disponible en un sitio son las siguientes.

VELOCIDAD DEL VIENTO

La velocidad del viento es uno de los parámetros más críticos en lo que respecta a la generación eólica, variando en función de parámetros espaciales y temporales. La descripción de su variación se realiza en términos estadísticos adoptando distribuciones de probabilidad adecuadas, siendo la más utilizada la distribución de Weibull [10]. Esta distribución está caracterizada por la función de densidad de probabilidad f :

$$f(\bar{u}, k, \lambda) = \frac{k}{\lambda} \left(\frac{\bar{u}}{\lambda}\right)^{k-1} \exp\left(-\left(\frac{\bar{u}}{\lambda}\right)^k\right) \quad (1)$$

donde λ es un factor de escala estrechamente vinculado con la velocidad media de viento en sitio \bar{u} , y k es el factor de forma que mide el ancho de la distribución. Estos parámetros pueden ser estimados de un análisis estadístico de las velocidades de viento medidas en el sitio.

La Figura 1, adaptada de [10], presenta gráficamente distribuciones de Weibull típicas para distintas velocidades medias de viento.

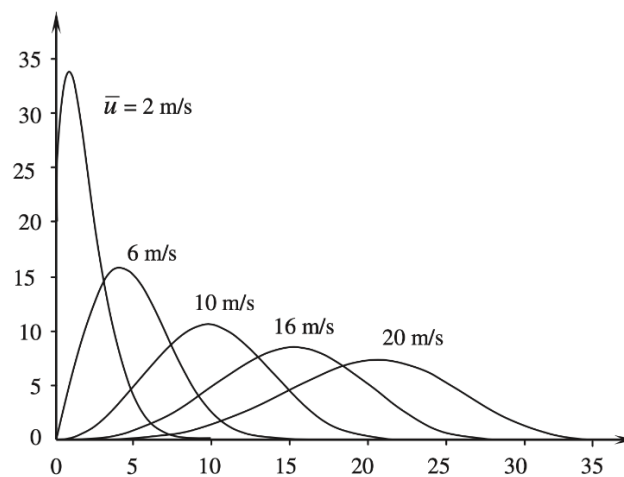


Figura 1. Distribuciones de Weibull típicas para distintas velocidades medias de viento ([10])

TURBULENCIA

El flujo turbulento presenta fluctuaciones en el campo de velocidades en escalas temporales y espaciales pequeñas. La velocidad del viento en un instante cualquiera puede considerarse compuesta de una contribución media, o velocidad media, y una componente fluctuante. La turbulencia tiene un impacto significativo en las fluctuaciones de potencia generada por una turbina eólica y puede inducir cargas fluctuantes importantes que afectan la vida útil de la turbina

por fatiga. La intensidad de turbulencia, dada por el cociente entre la desviación estándar de las fluctuaciones y la velocidad media, es un parámetro de consideración para la selección las turbinas eólicas adecuadas a un sitio particular.

$$I = \frac{\sigma_u}{\bar{u}} \quad (2)$$

DIRECCIÓN DE VIENTO

La distribución estadística de las direcciones de viento debe ser considerada para la selección del sitio y el diseño del emplazamiento de las turbinas en el mismo. La rosa de los vientos es una herramienta adecuada para analizar la distribución de direcciones de viento, que permite representar la frecuencia de ocurrencia de vientos en cada dirección, y en ocasiones se combina con la información sobre velocidades medias asociadas a cada dirección. La Figura 2, adaptada de [10], presenta una rosa de vientos indicando la frecuencia relativa de eventos de viento en cada dirección, para un sitio particular.

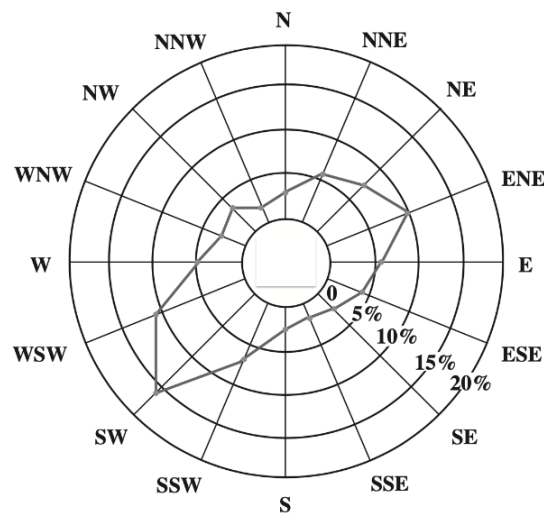


Figura 2. Una rosa de vientos ([10])

CORTANTE O CIZALLADURA

El gradiente vertical en la velocidad de viento, inducido por la fricción con la superficie, implica que la velocidad de viento aumenta normalmente con la altura. La ley potencial de aumento de la velocidad con la altura es generalmente aceptada para representar este efecto y será presentada en la sección 4, al considerar los ajustes por altura en la velocidad de viento, junto con algunos valores habituales del exponente característico de la distribución, cuyos valores típicamente se encuentran en el rango 0,05 a 0,5. Alternativamente a la ley potencial, puede considerarse también la ley logarítmica de distribución vertical de velocidades, basada en estimaciones del parámetro de rugosidad de la superficie.

CARACTERIZACIÓN FÍSICA DEL SITIO

Típicamente la determinación de un sitio para la ubicación de un aprovechamiento de micro eólica es un proceso que comienza con fuertes restricciones, no pocas veces acotadas directamente al predio o edificación propiedad del interesado en desarrollar el emprendimiento. Este aspecto contrasta fuertemente con el proceso de selección de un sitio para un aprovechamiento eólico de gran escala, en los cuales se procede normalmente con una selección o elección del sitio con relativamente escasas restricciones y priorizando criterios de optimización del recurso disponible. Por tanto, es apropiado comenzar el análisis e evaluación del recurso para un micro aprovechamiento eólico por una etapa de caracterización del sitio, la cual determinará además el enfoque a seguir para la siguiente etapa de estimación de condiciones climáticas y producción esperable. Esto resulta especialmente cierto para los micro aprovechamientos en entornos urbanos.

La realización de una visita física al sitio considerado para la instalación es en general imprescindible para evaluar aspectos como i) obstrucciones locales al flujo de viento como las derivadas de edificios vecinos, vallas y árboles, que pueden determinar zonas inadecuadas para la ubicación del aprovechamiento y otras más propicias y ii) características generales de la infraestructura disponible que pueden determinar la accesibilidad del sitio, vías aéreas o soterradas de conexión y posibles alojamientos para las conexiones eléctricas. Las principales consideraciones relativas a las características físicas del sitio son las siguientes:

CONSIDERACIONES DE USO DEL SUELO Y LA PROPIEDAD

Distintos elementos ajenos a los aspectos técnicos específicos de la adecuación del sitio a un aprovechamiento eólico deben ser considerados que hacen a la factibilidad de la instalación, ya sea por cuestiones físicas, normativas o prácticas. Entre ellas se destacan i) los límites de la propiedad considerada para el emplazamiento y las normativas locales relativas a retiros y alturas máximas de edificación, así como en algunos casos los reglamentos de copropiedad del inmueble; ii) consideraciones estéticas o arquitectónicas del propietario y eventualmente de los vecinos; iii) condiciones del suelo y del acceso al sitio; iv) condiciones y disponibilidad de infraestructura para la conexión a la red local o general, y las normativas respectivas; v) condiciones de seguridad para las personas y los bienes. Eventualmente puede ser necesario evaluar características del suelo y su estabilidad, las que puedan afectar las obras de cimentación necesarias para la instalación del aerogenerador, incluyendo ensayos de muestras de suelo si esto es especificado por el fabricante.

TOPOGRAFÍA LOCAL

Como se describirá en mayor detalle en una sección subsiguiente, los elementos de la topografía local como colinas afectan el flujo de viento, generando zonas más propicias y otras menos adecuadas para aprovechamientos eólicos. Excepto para emplazamientos esencialmente planos, es importante obtener una descripción de las principales características en un área de 200 a 300 metros alrededor del posible emplazamiento [1], incluyendo la forma, altura, ancho, distancia y

dirección en relación al mismo. Las características topográficas locales resultarán determinantes para evaluar si los datos de viento disponibles de locaciones cercanas deben ser corregidos en altura. Las zonas altas de la topografía local serán típicamente preferibles a las zonas bajas.

DATOS CLIMÁTICOS Y ESTIMACIÓN DE LA PRODUCCIÓN

La obtención y procesamiento de datos climáticos relevantes y confiables para el sitio considerado es de principal importancia en la evaluación de la adecuación del sitio, y permitirá realizar estimaciones de la producción esperable para determinar la viabilidad económica del proyecto.

MAPAS DE VIENTO

En algunos países y zonas pueden estar disponibles mapas de viento compilados por instituciones nacionales o internacionales. Estos mapas pueden aportar información valiosa de velocidades medias anuales esperables en una zona, las cuales pueden ser extrapoladas de forma conservativa utilizando hipótesis sobre el perfil vertical de vientos. Debe tenerse en cuenta sin embargo que estos mapas carecen en general de información importante sobre la distribución estadística de velocidades de viento, las direcciones de vientos más frecuentes, e intensidades de turbulencia. Por otra parte, la resolución espacial de los mismos impide en general que tomen en cuenta elementos locales de topografía. El recurso estimado en estos mapas generalmente aplica para lugares que no tienen obstrucciones de viento, como planicies y crestas de montañas. Las características locales del terreno pueden causar diferencias significativas, por lo que la información provista por los mismos debe ser utilizada de manera conservadora.

MEDICIONES LOCALES

En algunos sitios se podrá disponer de series de viento medidas previamente en ubicaciones cercanas o bien correspondientes a otros proyectos previos. Ejemplos de estas posibles fuentes de datos son típicamente estaciones meteorológicas, aeropuertos y otras infraestructuras. En caso de estar disponibles deberá verificarse en general la integridad de los datos y las condiciones de instalación de los instrumentos, especialmente en cuanto a su altura y a la presencia cercana de obstáculos que pudieran afectar las medidas para ciertas direcciones.

La realización de campañas de medida de viento en el sitio, a la altura estimada de ubicación de la turbina y por lapsos de al menos un año, constituirá la fuente de información de mejor calidad, si bien puede acarrear costos significativos. Referencias para el diseño de una campaña de medida en sitio puede encontrarse en [5] y [11]. Un sistema de medida incluye al menos anemómetro, veleta y sensores de temperatura, y debe ser montado idealmente a la altura esperada para la turbina [12]. A los efectos de obtener una caracterización del cortante local en el perfil de viento deberán ubicarse al menos dos anemómetros a distintas alturas. Esto permitirá evaluar la conveniencia económica de seleccionar una torre más alta. A partir de las series temporales obtenidas los parámetros principales a calcular serán las velocidades promedio y extremas, la rosa

de direcciones de viento, las distribuciones y parámetros de Weibull, intensidades de turbulencia y parámetros de cortante [5], ya mencionados en la sección 2.

AJUSTES POR TOPOGRAFÍA

La topografía afecta de manera importante el recurso eólico, generando zonas de mayores velocidades, como las crestas de las elevaciones, y otras zonas de menores velocidades y mayores intensidades de turbulencia, que resultaran por tanto menos adecuadas para un aprovechamiento eólico [6]. Esta situación prototípica es representada en la Figura 3 (adaptada de [1]), donde se observa una zona de mayor velocidad sobre la colina y una zona de menor velocidad y mayores fluctuaciones en la ladera opuesta a la dirección del viento

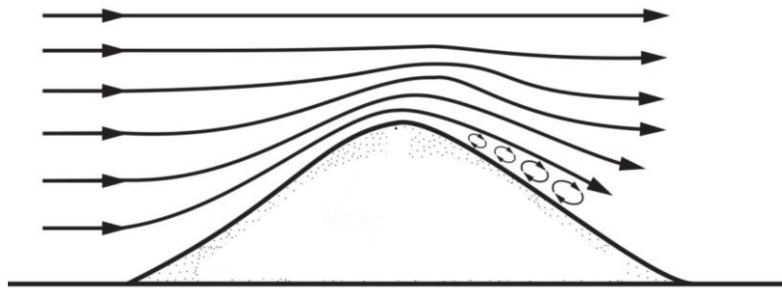


Figura 3. Influencia de colina ([1])

Las cimas de colinas elongadas en dirección perpendicular a la dirección predominante del viento resultan especialmente adecuadas para la ubicación de aprovechamientos eólicos, observándose aumentos significativos de la velocidad a lo largo de su cima, para la dirección predominante de viento.

Las topografías abruptas y con quebradas, como las de la Figura 4 (adaptada de [1]) propician zonas de alta intensidad de turbulencia que deben ser evitadas en la ubicación de aerogeneradores, o bien asegurar que la altura de la torre es suficiente para escapar estas zonas. Un mismo emplazamiento puede resultar inadecuado para una torre más baja, pero propicio para una torre 10 a 20 m más alta.

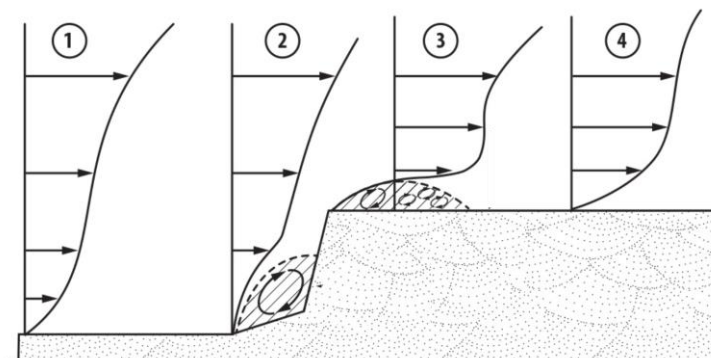


Figura 4. Influencia de topología abrupta y quebrada ([1])

AJUSTES POR PERFIL VERTICAL DE VIENTO

La fricción entre capas de aire en movimiento y la fricción con el suelo y elementos de rugosidad determina un perfil vertical de viento con un gradiente positivo, es decir que la velocidad del viento típicamente aumenta en altura. Correspondientemente se observan velocidades bajas y moderadas para alturas bajas, comparables a la altura de los elementos de rugosidad predominantes. Este aspecto es un factor clave en la determinación de las velocidades de viento esperables a la altura del eje o cubo del aerogenerador, especialmente cuando las medidas de velocidad de viento disponibles corresponden a otras alturas. La topografía escarpada y elementos de rugosidad como árboles, arbustos y vallas, incrementan el gradiente vertical del viento y la intensidad de turbulencia, conduciendo incluso al establecimiento de una altura de desplazamiento, debajo de la cual la velocidad del viento es prácticamente nula. Esta altura de desplazamiento se relaciona típicamente con la altura predominante de los elementos de rugosidad, siendo por ejemplo típicamente de entre 60% y 75% de la altura de los árboles, para árboles con distinta compacidad de distribución. Típicamente los primeros 20m a 30m desde la superficie se encuentran fuertemente afectados por el efecto de fricción.

La ley potencial de variación de la velocidad del viento con la altura es generalmente aceptada para estos casos. La misma establece:

$$V = V_{\text{ref}} \left(\frac{h}{h_{\text{ref}}} \right)^a \quad (2)$$

Dónde: V la velocidad del viento a la altura de interés h , V_{ref} la velocidad del viento a la altura h_{ref} para la cual se tienen las mediciones, y a el exponente característico de la distribución, cuyos valores típicamente se encuentran en el rango 0,05 a 0,5.

La **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** presenta algunos valores típicos de guía del exponente, adaptados de [8]

TIPO DE TERRENO	EXPONENTE	RUGOSIDAD (m)
Hielo	0,07-0,20	0,00001
Nieve	0,09-0,20	0,0001
Mar calma	0,09-0,20	0,0001
Zona costera con vientos del mar	0,11	0,001
Pasto corto	0,14-0,25	0,007
Praderas cultivadas	0,19-0,30	0,02
Vallas y árboles dispersos	0,24-0,35	0,15
Suburbios y bosques dispersos	0,3	0,4
Ciudades	0,6	1,00

Tabla 1. Parámetros característicos para el perfil vertical

AJUSTES POR APANTALLAMIENTOS

La presencia de obstáculos sólidos como edificaciones provoca zonas de fuerte reducción de la velocidad del viento e incremento de la intensidad de turbulencia, cuya extensión es proporcional a las dimensiones del obstáculo, como se esquematiza en la Figura 5, adaptada de [2].

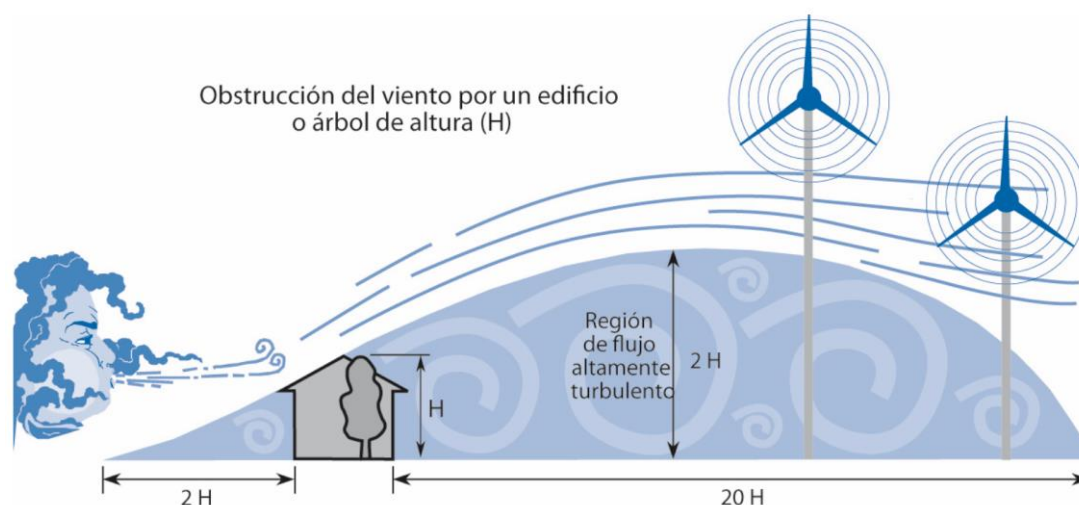


Figura 5. Ajustes por apantallamientos ([2])

Como recomendación general aproximada, el borde inferior del área barrida por el rotor debería ubicarse al menos 10 a 20 m por encima de la altura máxima de los obstáculos presentes en 30 a 50 metros a la redonda, especialmente en las direcciones predominantes del viento, si bien esta recomendación puede resultar difícil de cumplir en la práctica en la mayoría de los casos.

ESTIMACIONES DE PRODUCCIÓN

La estimación de la producción bruta anual se puede obtener a partir de la distribución de viento estimada, ajustada de acuerdo con los lineamientos expuestos anteriormente, y la curva de potencia del aerogenerador provista por el fabricante (ver Capítulo 6: Ensayos de aerogeneradores de pequeña potencia). Ajustes finales por el nivel de turbulencia esperado y el efecto de los apantallamientos deben ser aplicados para cada sector de dirección de viento, considerando los obstáculos presentes corriente arriba en cada dirección. Una estimación de la producción neta anual puede obtenerse a continuación, deduciendo de la producción bruta las pérdidas estimadas por factores tales como el tiempo de no disponibilidad por mantenimiento y fallas, tiempo de no disponibilidad de la red eléctrica, etc.

REGULACIÓN Y CONDICIONES AMBIENTALES

En una etapa temprana del desarrollo del proyecto deberán considerarse las restricciones asociadas a la regulación local en materia de edificaciones, uso del suelo, limitaciones a emprendimientos productivos en zonas residenciales, normativas de emisión de ruidos, etc. En base a las regulaciones existentes deberán tramitarse los permisos correspondientes en forma

temprana para evitar que obstáculos normativos obliguen a cancelar el proyecto en un estado avanzado. Estos procesos suelen incluir al menos una instancia de audiencia pública y la manifestación de resistencias por parte de otros agentes interesados (vecinos, por ejemplo) puede resultar en incertidumbres para la aprobación de los permisos requeridos, por lo que estos trámites deberían estar concluidos antes de incurrir en costos mayores asociados a la inversión prevista. Para proyectos localizados en las cercanías de aeropuertos puede ser necesaria la tramitación de permisos especiales frente a las autoridades locales competentes.

Los impactos ambientales de los aprovechamientos eólicos de pequeña escala deben ser considerados en el contexto de la normativa local. Aspectos como la recuperación del terreno con posterioridad a las obras, impactos en la fauna aviar y local. La emisión de ruido puede estar sujeta así mismo a normativas locales de contaminación sonora y debe ser tomada en cuenta.

CONCLUSIONES

Este documento presenta los principales lineamientos a ser tenidos en cuenta en un estudio técnico de evaluación de recurso eólico para un emplazamiento de micro eólica urbana. En el mismo se han referenciado diversas fuentes de información bibliográfica consideradas para la elaboración del documento y que presentan los distintos aspectos de forma más extensa y específica en cada caso. Se recomienda al lector su lectura para complementar y profundizar los lineamientos presentados.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Olsen(2015) "Small Wind Site Assessment Guidelines" NREL
- [2] MIEM(2010) "Sistemas eólicos pequeños para generación de electricidad conectados a la red eléctrica" MIEM - Uruguay
- [3] INTI(2015) "Generadores Eólicos" INTI - Argentina
- [4] Syngellakis(2007) "Urban Wind Resource Assessment in the UK" WINEUR
- [5] Bailey(1997) "WIND RESOURCE ASSESSMENT HANDBOOK" NREL
- [6] Wegley(1980) "A Siting Handbook for Small Wind Energy Conversion Systems" US DOE.
- [7] Forsyth(2018) "MICRO-SITING SMALL WIND TURBINES FOR HIGHLY TURBULENT SITES" IEA WIND
- [8] Sagrillo(2011) "Small Wind Site Assessor Training Syllabus", IREC, 2011
- [9] Shi & Erdem (2017) "Estimation of Wind Energy Potential and Prediction of Wind Power"
- [10] Tong (2010) "Fundamentals of Wind Energy"

[11] MEASNET (2016) “Evaluation of Site-Specific wind Conditions”

[12] IEC 61400 (2017) Wind energy generation systems - Part 12-1: Power performance measurements of electricity producing wind turbines

AGRADECIMIENTOS

La preparación de este documento estuvo apoyada por proyectos con financiación ANII-Uruguay, ERANET-LAC y CYTED.

CAPÍTULO 2: EL ROTOR

ALEXEIS FERNANDEZ ¹, ERNESTO FARIÑAS ¹, ANDRÉS ZAPPA ²

¹ INTEC. Avenida de Los Próceres #49, Los Jardines del Norte 10602, Santo Domingo

² Departamento de Energías Renovables Patagonia, INTI, Ruta 7 km 5, Mercado Concentrador 8300, Neuquén, (Argentina)

INTRODUCCIÓN

Un aerogenerador es un conjunto de mecanismos pensado para generar corriente eléctrica (trabajo mecánico) mediante unas palas que están unidas por un eje. El diseño de las palas está pensado para aprovechar al máximo las corrientes del viento en el giro de las palas, estas al hacer girar el eje transforman la energía de la corriente de viento en energía mecánica, la cual, posteriormente, se transforma en energía eléctrica por el generador.

NOCIONES SOBRE EL FUNCIONAMIENTO DEL ROTOR

Mediante el Rotor se produce la transformación de energía cinética del viento en energía mecánica de rotación en un eje. En primera instancia, debe conocerse la cantidad de potencia cinética que tiene el viento, es decir si se considera una vena fluida de área A, en la cual el aire fluye con una densidad ρ , a una velocidad de viento U_{inf} , la energía cinética que posee este viento es:

$$P = \frac{1}{2} \rho \cdot A \cdot U_{inf}^3 \quad (1)$$

De esta potencia, que se obtiene considerando la energía cinética de una porción de fluido y la ecuación de continuidad, solo es posible extraer una fracción mediante un rotor.

Un parámetro adimensional que indica la fracción de energía capturada por el aerogenerador respecto a la energía cinética del viento, es el coeficiente de potencia C_p , el cual se define como:

$$C_p = \frac{\text{Potencia generada por el aerogenerador}}{\text{Potencia cinética del viento}} \quad (2)$$

En esta definición de C_p se refiere a un rendimiento global del aerogenerador, dentro del cual tiene influencia el desempeño del rotor, sistema mecánico de transmisión (si lo hubiere), rendimiento de la máquina eléctrica, sistema de conversión electrónica, etc.

TEORIA DE MOMENTO UNIDIMENSIONAL Y LIMITE DE BETZ:

Suponiendo que en la vena fluida se intercala un dispositivo, indicado como Disco actuador en la Figura 6, no puede extraerse del viento toda su potencia cinética, ya que esto significaría que la velocidad del viento detrás de este dispositivo fuese nula. Como se observa en la Figura 6, a

medida que nos acercamos al rotor, disminuye la velocidad de viento, desde un valor U_{inf} a un valor U_d , y finalmente a un valor U_{estela} en una posición lejana al plano del rotor.

Este grado de disminución se denomina factor de velocidad inducida $a = (U_{inf} - U_d)/U_{inf}$. Cuando a toma el valor de $1/3$ se maximiza la transferencia de energía cinética de la corriente libre al rotor.

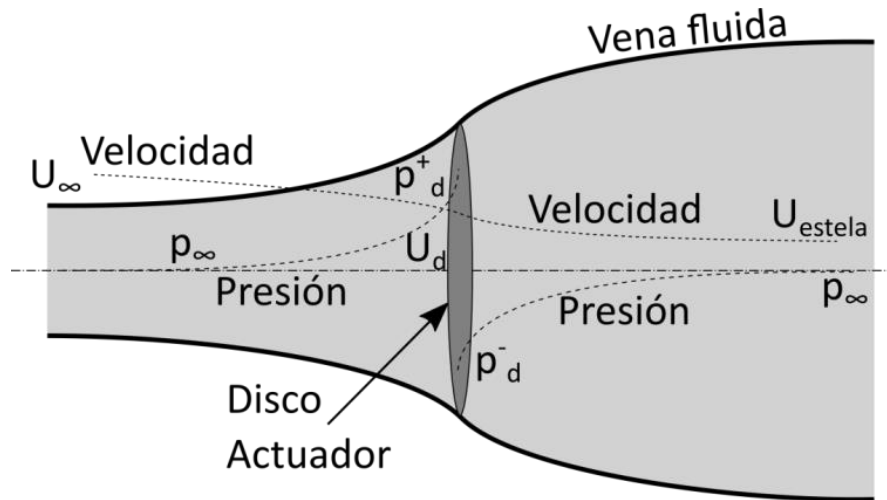


Figura 6. Esquema de disco actuador, adaptado de [6]

En el esquema se observan la expansión de la vena fluida (considerando que la densidad del aire permanece constante), la variación de la velocidad del aire, y la presión antes y después del rotor la cual presenta una discontinuidad en este punto.

Considerando las siguientes hipótesis:

- Flujo homogéneo, incompresible en estado estacionario.
- Ausencia de fricción.
- Infinito número de palas del rotor.
- Empuje uniforme sobre el área del rotor.
- Ausencia de rotación de la estela después del rotor. (Es decir. considerando que no hay variación de cantidad de movimiento angular en la vena fluida)
- Presión estática de la corriente lejos del rotor (aguas arriba y aguas abajo) es igual a la presión ambiente.

Aplicando la conservación de cantidad de movimiento lineal a un volumen de control determinado por la vena fluida, se obtiene la máxima cantidad de potencia que puede obtenerse mediante un rotor, la cual corresponde al límite de Betz:

$$P_{\text{maximarotor}} = 0,59 \left(\frac{1}{2} \rho \cdot A \cdot U_{inf}^3 \right) \quad (3)$$

El desarrollo de este resultado puede obtenerse de numerosa bibliografía, como por ejemplo [5].

Téngase en cuenta que la potencia entregada por un aerogenerador será siempre inferior a esta cota, debido a que un rotor real nunca podrá alcanzar este valor límite teórico de diseño. Sumado a ello existirán pérdidas en otros subsistemas de la máquina, lo que provoca que en los mejores aerogeneradores disponibles el C_p sea del orden de 0,45.

ROTOR IDEAL CON ROTACIÓN DE ESTELA

Si se considera que al disco actuador o rotor se le imparte un torque al extraer potencia del viento, por conservación de cantidad de movimiento angular, el aire luego de atravesar esta superficie tendrá un momento angular igual y opuesto al del rotor. El siguiente esquema ilustra el fenómeno:

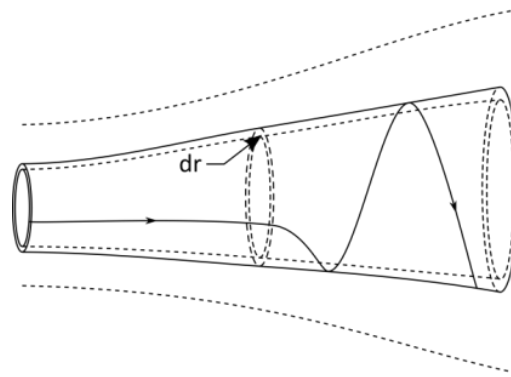


Figura 7. Imagen de vena fluida con rotación de estela detrás del rotor ([5])

La generación de energía rotacional en la estela provoca una menor extracción de energía en el rotor. En general los rotores que giran a mayor velocidad imparten menor rotación en la estela, (recordar que, para una potencia determinada, el torque es menor si la velocidad angular es mayor) por el contrario los rotores lentos tendrán mayores pérdidas por rotación de estela. En la Figura 8 se muestra el efecto de pérdida por rotación de estela en función del parámetro adimensional Lambda o TSR.

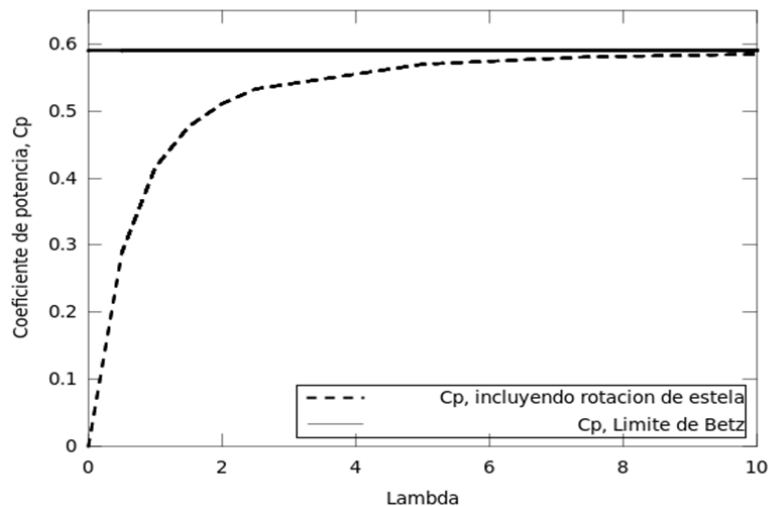


Figura 8. Coeficiente de potencia máximo teórico, en función de Lambda para una turbina de eje horizontal, considerando y sin considerar la rotación de la estela ([5])

En la referencia [5], se presenta el desarrollo para obtener las perdidas por estela. Se define asimismo el parámetro Lambda o TSR, el cual es utilizado para referir las condiciones de diseño y operativas de los rotores.

PERFILES AERODINÁMICOS, PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO

Considérese un perfil aerodinámico inmerso en una corriente de aire. La acción del aire sobre el cuerpo se traduce en una fuerza resultante, generalmente oblicua respecto a la dirección de la velocidad relativa, como se indica en la Figura 9.

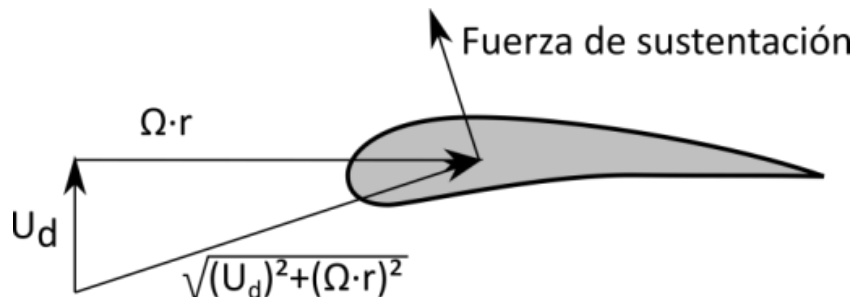


Figura 9. Triangulo de velocidades y fuerza de sustentación sobre un perfil alar ([5])

Siendo U_d la velocidad del aire incidente sobre el plano del rotor, y $\Omega \cdot r$ la velocidad tangencial del perfil a una distancia r del eje del rotor, la velocidad relativa que incide sobre el perfil es la hipotenusa del triángulo de velocidades conformado. Se observa que la componente debida a la rotación es de vital importancia para las condiciones de operación.

El origen de esta fuerza obtenida se debe a la distribución de presión que se genera sobre la superficie del cuerpo, en la Figura 10 puede observarse una simulación del campo de presión generado sobre un perfil FX63-137 inmerso en una corriente de aire en un régimen del flujo con un número de Reynolds de 1×10^5 . Se grafican unas curvas isobaras de ± 120 Pa (valor positivo en el intrados, cara convexa y negativo en el extrados cara cóncava), que ilustran la diferencia de presiones y la distancia respecto al perfil en la cual se desarrollan.

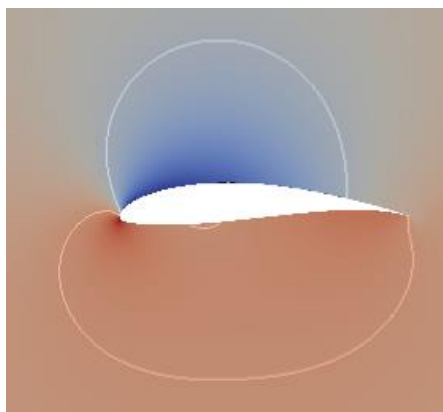


Figura 10. Simulación de distribución de presión sobre un perfil FX63-137 utilizando OpenFoam®. (Elaboración propia)

La fuerza resultante puede descomponerse en un sistema coordinado adecuado para el cálculo de los esfuerzos aplicados al rotor; en una dirección tangencial, la cual será la componente que genere el torque aplicado, y en una componente normal que dará origen a las fuerzas de empuje sobre la estructura.

COMBINACIÓN DE LA TEORÍA DE CONSERVACIÓN DEL MOMENTO Y TEORÍA DE ELEMENTO DE PALA

De la teoría de conservación de momento, se obtienen ecuaciones que representan los fenómenos de empuje y torque producidos sobre el rotor, provenientes de la transferencia de cantidad de movimiento axial y angular de la vena fluida. Por otra parte, del principio de funcionamiento de un perfil aerodinámico se obtienen ecuaciones que representan los esfuerzos en las direcciones perpendicular y tangencial al plano del rotor. Igualando las ecuaciones obtenidas por estos dos abordajes, se obtiene un sistema de ecuaciones que permite definir los parámetros geométricos de las palas para el funcionamiento en las condiciones ideales de diseño.

Una vez obtenida la solución geométrica para estas condiciones ideales de diseño y cambiando los parámetros operativos (velocidades de viento y de rotación distintas a las de diseño, es decir λ distinto de λ de diseño), se puede predecir el desempeño del rotor para distintas condiciones de operación.

En la bibliografía de referencia se desarrolla en detalle la metodología de cálculo. Existen a su vez programas de simulación de licencia libre, como *Qblade*, que permiten resolver el diseño del rotor y observar los parámetros de desempeño en todo el rango de condiciones operativas posible.

PRINCIPIO DE SUSTENTACIÓN Y ARRASTRE

Los aerogeneradores pueden tener rotores que giren basados en los principios aerodinámicos de “sustentación” o de “arrastre”, en función de cuál es la fuerza predominante o motriz.

Las turbinas que utilizan el principio de sustentación; a diferencia de las de arrastre, el viento circula por ambas caras de la pala, que al tener perfiles geométricos distintos, posibilitan la formación de un área de depresión en la cara superior respecto a la presión en la cara inferior. Esta diferencia de presiones genera la llamada fuerza de sustentación aerodinámica sobre la superficie de la pala, de forma similar a lo que sucede en las alas de los aviones.

Las turbinas Savonius se basan en la fuerza de arrastre diferencial sobre dos superficies; observando desde arriba, las palas forman la figura parecida a una S. Debido a la curvatura de las palas experimentan menos resistencia cuando se mueven en contra de viento que a favor de él.

Esta diferencia causa que la turbina gire. Como es un artefacto de arrastre, este rotor extrae mucho menos de la fuerza del viento que las turbinas de sustentación de tamaño similar. Soporta las turbulencias y puede empezar a girar con vientos de baja velocidad. Es un tipo de turbina relativamente económica y fácil de implementar, pero apenas se utiliza en la práctica, sobre todo

en la generación de electricidad, siendo aún utilizadas para el bombeo de agua en lugares de poco desarrollo tecnológico.

VELOCIDAD ESPECÍFICA DEL ROTOR

Debido a que las turbinas eólicas pueden tener en el rotor diferentes números de palas, la regla general, en principio, es un menor número de palas en el rotor, lo que permite mayor velocidad de giro y por lo tanto mejores condiciones para generar electricidad. Al analizar la variación del parámetro que caracteriza este comportamiento, al cual se le denomina velocidad específica (*Tip Speed Ratio* en inglés, TSR), cuyo valor resulta del cociente entre la velocidad tangencial de la punta de pala por su longitud y la velocidad del viento.

En las turbinas eólicas pequeñas para la generación de electricidad es conveniente que el rotor gire a mayor número de revoluciones, lo que contribuye a la reducción del tamaño y peso del generador eléctrico y a la simplificación o eliminación del paso de multiplicación, posibilitando la disminución del costo de la máquina. Si bien el rendimiento aerodinámico aumenta con el número de palas, este aumento se hace poco significativo para hélices con más de dos o tres palas, por tal razón, en este tipo de turbinas, denominadas rápidas, el número de palas es bajo, encontrándose modelos de 1; 2; 3 ó 4 palas, conocidas genéricamente como multipalas. Un importante aspecto a tener en consideración por el usuario es que el número de palas es proporcional al costo, el cual puede llegar hasta el 28% de la máquina, sin embargo, los rotores emiten más ruido aerodinámico a medida que disminuye el número de palas, por lo que su instalación cerca de lugares habitados es molesta en muchas ocasiones.

La relación existente entre el rendimiento aerodinámico y el número de palas del rotor, así como se delimita el efecto aerodinámico utilizado en el funcionamiento de los distintos tipos de rotores los rotores multipalas y Savonius obtienen su máximo rendimiento aerodinámico para bajas velocidades específicas, es decir, giran a baja velocidad; así mismo funcionan con velocidades del viento bajas, por lo que el rendimiento aerodinámico y la potencia útil es superior en los rotores Darrieus y de hélice. Para estas condiciones, como era de esperar el rendimiento aerodinámico se mantiene siempre por debajo del límite de Betz o rendimiento ideal.

Si la velocidad específica es mayor que 3,5 las palas funcionan principalmente por empuje ascensional o sustentación, siendo esta la fuerza originada en la dirección perpendicular a la dirección de la corriente de viento, debido a la geometría de la sección transversal de la pala, en caso de ser menor a 3,5; el efecto aerodinámico que hace girar el rotor eólico es el arrastre, producto de la fuerza que aparece en el mismo sentido de la dirección del viento.

Los rotores de tres palas al ser sus velocidades de rotación más bajas que las de los monos y bipalas poseen menores velocidades de punta de pala, característica que le ha hecho ganar adeptos debido a la reducción en los niveles de ruido. La característica fundamental, de esta configuración sobre los de menos palas, es su mayor suavidad durante el funcionamiento y un mejor efecto visual. Estas propiedades se ven potenciadas, al utilizarse las turbinas eólicas de

pequeña potencia, donde generalmente la máquina eólica debe ser emplazada en las cercanías de viviendas, por lo que es conveniente minimizar las perturbaciones introducidas en el hábitat natural y social.

TIPOS DE AEROGENERADORES

En función de la tecnología de construcción, los aerogeneradores pueden dividirse en dos grandes familias: Aerogeneradores de eje vertical – VAWT (Vertical Axis Wind Turbine) y Aerogeneradores de eje horizontal – HAWT (Horizontal Axis Wind Turbine).

Otras clasificaciones también han debido ser definidas que incluyen el tipo de generador eléctrico, el sistema de orientación y protección, el número de aspas del rotor y otras muchas especificaciones que van apareciendo a medida que se desarrolla la tecnología en este campo.

Para los principios aerodinámicos a utilizar en la captación de la energía del viento en el rotor se establecen las anteriormente citadas, de sustentación y de arrastre. Por regla general, pero no única, casi todas las máquinas de eje horizontal se basan en la sustentación, mientras que los verticales pueden utilizar inclusive ambos principios en un mismo rotor.

AEROGENERADORES DE EJE HORIZONTAL –HAWT (HORIZONTAL AXIS WIND TURBINE)

En la actualidad, el tipo de turbina eólica más ampliamente asociada con la energía eólica es la turbina de eje horizontal (HAWT). El rotor de tipo propulsor está montado en un eje horizontal. El rotor necesita colocarse en la dirección del viento, lo cual en general logra por una veleta de cola. Los HAWT son muy sensibles a los cambios en la dirección del viento y la turbulencia que tienen un efecto negativo en el rendimiento, debido al reposicionamiento requerido para captar la energía del viento. ([3])

Las mejores ubicaciones para HAWT son áreas abiertas con flujo de aire libre y pocos obstáculos, por lo tanto, no son adecuados para entornos urbanos. Además, en general, las pequeñas turbinas eólicas están diseñadas con una relación de velocidad punta alta comparable con las grandes turbinas eólicas, por lo tanto, la velocidad angular es muy alta emitiendo más ruido que sus homólogos verticales. En estas turbinas la superficie giratoria se pliega hacia arriba o hacia los lados para evitar la sobre rotación, lo cual es una característica muy indeseable en entornos urbanos.

CONFIGURACIÓN DEL AEROGENERADOR

La utilización de un aerogenerador de eje horizontal con el eje paralelo a la dirección del viento es la propuesta más usual, siendo estas máquinas en la actualidad las más difundidas por tener un rendimiento superior a las otras disposiciones.

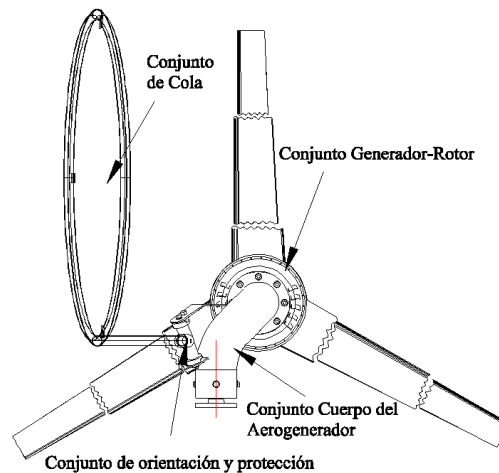


Figura 11. Vista posterior de un pequeño aerogenerador horizontal (Elaboración propia)

Las hélices de tres palas en las máquinas horizontales garantiza suavidad de funcionamiento, fácil balanceo y bajo nivel de ruido originado en su marcha, mientras que para el sistema de transmisión y tipo de configuración del aerogenerador no es frecuente el uso de aerogeneradores con caja multiplicadora para potencias por debajo de los 10 kW, mientras que en el segmento de 20 a 100 kW son más utilizadas, pero no generalizadas; para mayores potencias son muy comunes y hasta recomendadas dado el costo de los generadores de imanes permanentes para estas potencias. Las relaciones de masa y potencia no son favorables para la utilización de cajas multiplicadoras, recomendándose para estos casos el uso de generadores acoplados directamente con generadores de imanes permanentes (PMG); siendo una razón de peso el espacio físico disponible, que no permite la inserción del mecanismo de caja multiplicadora.

Mientras que para la selección del sistema de regulación y protección se realiza después de elegida la estructura del aerogenerador y es un tema que se tratara en un capítulo de este libro.

Las posiciones de ubicación del rotor vienen dadas por la dirección del viento aprovechable, por lo que se dispone el eje del rotor o hélice en la dirección perpendicular al viento, en general se considera ventajosa la configuración para el rotor a barlovento de la torre, debido a la influencia de la sombra aerodinámica de la torre en las de sotavento. Otro aspecto importante es que la disposición a sotavento tiene una marcada sensibilidad para el trabajo de los sistemas de orientación frente a cambios bruscos en la dirección del viento, y dadas las condiciones externas hostiles a las que se pretende esté sometido el aerogenerador, conllevarían a la utilización de algún sistema de amortiguación angular que vincule al sistema del rotor-nacelle o góndola con la torre fija mediante su anclaje al suelo, ocasionando mayor complejidad en el diseño y en el costo de la máquina. No obstante, algunos de los modelos más famosos son a sotavento.

La desventaja básica de una configuración a sotavento es la fluctuación de la potencia del viento al pasar el rotor por la sombra de la torre, lo que origina cargas que conllevan a la fatiga, en mayores proporciones que en los sistemas a barlovento.

SISTEMA DE ORIENTACIÓN

Las posiciones de ubicación del rotor vienen dadas por la dirección del viento aprovechable, por lo que se dispone el eje del rotor o hélice en la dirección perpendicular al viento. Las turbinas pueden diseñarse para que funcionen en la configuración de barlovento (cuando el rotor se encuentra delante de la torre, en la dirección entrante del viento) o sotavento (cuando el rotor se encuentra detrás de la torre). En general se considera ventajosa la configuración para el rotor a barlovento de la torre, debido a la influencia de la sombra aerodinámica de la torre en las de sotavento.

Las máquinas en posición de barlovento necesitan un sistema de orientación específico que mantenga la máquina alineada con el viento. El sistema de orientación mayoritario para los aerogeneradores a barlovento es por veleta de cola. El timón veleta de orientación utilizado es, indistintamente, recto o elevado (con el fin de disminuir la acción de la estela del rotor sobre el timón).

AEROGENERADORES DE EJE VERTICAL –VAWT (VERTICAL AXIS WIND TURBINE)

Las turbinas de viento de eje vertical generalmente son instaladas en ambientes turbulentos tales como ciudades, debido a su teóricamente mayor eficiencia respecto a las de eje horizontal en este tipo de regímenes, marcados por las variaciones de la dirección del viento, los cuales tienen menores efectos negativos en la generación de potencia y en las cargas de fatiga, al no tener que posicionarse constantemente.

A su vez los aerogeneradores VAWT se subdividen en: tipo Savonius, tipo Darrieus y aerogeneradores híbridos Darrieus-Savonius. La configuración de rotor VAWT más antigua es el rotor Savonius, con una geometría sencilla para su fabricación en varios materiales, su característica aerodinámica más marcada es que gira gracias a la fuerza de arrastre. El otro más difundido es el Darrieus, el cual actualmente posee muchas variantes y combinaciones del original.

Son aerogeneradores en los que la posición de las aspas y el eje del rotor se encuentran vertical, perpendiculares al suelo y a la dirección del viento. El movimiento de las aspas se produce a causa de la fuerza de sustentación generada por el flujo de viento que incide en las aspas o bien por la fuerza de arrastre, según sea el diseño de la turbina. Existen prototipos que han logrado diseños híbridos, combinando el uso de la fuerza de sustentación y la fuerza de arrastre simultáneamente.

SISTEMA DE REGULACIÓN DE VELOCIDAD

La mayor parte de los aerogeneradores en el mercado son aerogeneradores de eje horizontal a barlovento. Existe una gran variedad de soluciones utilizadas para regular la potencia y la velocidad de giro en los pequeños aerogeneradores. Estos sistemas de regulación están pensados para controlar la máxima potencia que el aerogenerador debe generar, pero se basan típicamente en la velocidad de rotación como parámetro de regulación, de forma que suelen estar constituidos por sistemas de regulación centrífugos. A continuación, se describen algunas de las opciones de

regulación en el rotor que con mayor frecuencia se pueden encontrar en pequeños aerogeneradores comerciales.

SIN REGULACIÓN

El aerogenerador se diseña para poder soportar las cargas que se produzcan en todas las condiciones de operación, incluidas las velocidades de giro que puedan presentarse en funcionamiento en vacío.

REGULACIÓN POR DESORIENTACIÓN O "FURLING"

En el que el eje del rotor se desalinea en el plano horizontal respecto a la dirección del viento incidente. Existen distintas soluciones para que se produzca esta desorientación del rotor, si bien la más utilizada es mediante un diseño en el que el centro de empuje del rotor no queda alineado con el centro del rodamiento de orientación.

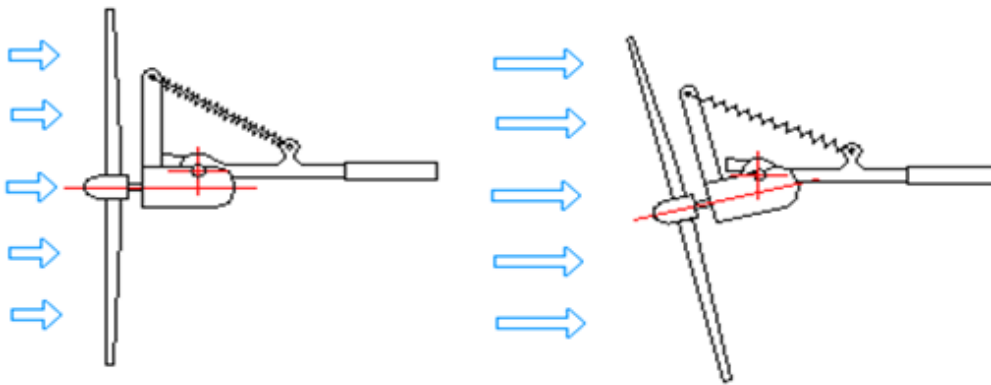


Figura 12. Mecanismo de regulación por desorientación [3]

REGULACIÓN POR CABECEO

Similar al anterior, pero en el que la desalineación se produce en el plano vertical.

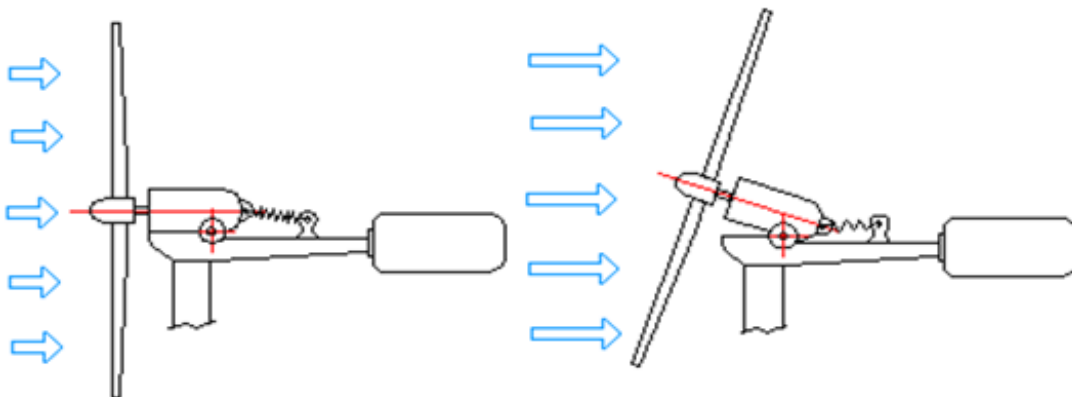


Figura 13. Mecanismo de regulación por cabeceo [4]

REGULACIÓN POR CAMBIO DE PASO O PITCH

Consiste en un mecanismo que permite girar las palas para reducir su capacidad de captación. Se distinguen sistemas de regulación por cambio de paso activos, es decir, con control electrónico que actúa sobre motores que accionan servomecanismos que controlan la posición de las palas. Éste es el sistema utilizado en los aerogeneradores más grandes; en el mundo de los pequeños aerogeneradores, son más frecuentes en tamaños por encima de los 10 kW. En los aerogeneradores más pequeños que utilizan este sistema de regulación, en su mayoría se utilizan sistemas de cambio de paso pasivos, en los que la variación del ángulo de ataque de las palas se produce mediante sistemas centrífugos actuados por sistemas de muelles.

REGULACIÓN POR PÉRDIDA AERODINÁMICA O STALL

Este mecanismo de control pasivo, reacciona como respuesta a los cambios de velocidad del viento, las palas están fijas al cubo del rotor, por lo tanto, su ángulo de paso y/o ataque son constantes para todas las condiciones de velocidad en el aire incidente, si bien la pala es dimensionada de manera que se obtenga un máximo rendimiento para condiciones nominales.

Al variar la velocidad del viento sobre el perfil aerodinámico de las palas, se producirá un aumento en el ángulo de ataque efectivo entre la velocidad del aire relativa al perfil de la pala. Por lo que para un determinado ángulo característico del perfil utilizado, se llegará a una situación en que la capa límite del perfil se desprende entrando en pérdida y perdiendo sus propiedades de elevada sustentación y baja resistencia aerodinámica. Así, disminuye drásticamente el rendimiento y la energía captada por la pala.

SISTEMA DE FRENADO

Existe una cierta indefinición, pues se ha encontrado frecuentemente en la documentación técnica descriptiva de los aerogeneradores, que los fabricantes indican el sistema de control de vueltas como sistema de frenado, lo que de acuerdo con la definición de la norma resultaría correcto, pero que no sería suficiente para detener el aerogenerador en todas las condiciones de funcionamiento.

En los aerogeneradores que sólo llevan un sistema de frenado, la solución mayoritaria es mediante cortocircuito del generador eléctrico (se verá en el Capítulo 3: Generadores Eléctricos). En el caso en que usen dos sistemas de frenado, el primero de ellos es mayoritariamente freno mecánico o aerodinámico mediante posicionamiento de las palas en la posición de “bandera”. Para el segundo sistema se utiliza freno mecánico, aerodinámico o por cortocircuito del generador eléctrico, dependiendo fundamentalmente de la solución utilizada para el primer sistema de frenado.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Varios Autores. Desarrollo Tecnológico de Sistemas Aislados con Energía Eólica. Serie Ponencias. CIEMAT. 2003

- [2] Sánchez, T.; Chiroque, J. E.; Ramírez S.: Evaluación y caracterización de un aerogenerador de 100 W, disponible en <https://docplayer.es/18592909-Evaluacion-y-caracterizacion-de-un-aerogenerador-de-100w.html> , último acceso Marzo 2020.
- [3] Belessis, M. A.; Stamos, D. G., Voutsinas, S. G.: Investigation of the capabilities of a genetic optimization algorithm in designing wind turbine rotors, disponible en <http://www.fluid.mech.ntua.gr/wind/belga/belga.html> , Enero 2006, último acceso Agosto 2020
- [4] Manattini. Martin; “Diseño de Sistema Conversor de Energía”; disponible en: http://usuarios.arnet.com.ar/marman/proyecto/proyecto_final.html . Acceso diciembre 2019
- [5] Wind Energy Explained, J.F. Manwell, J.G. MCGOWAN, A.L. Rogers, Wiley 2009
- [6] Wind Energy Handbook, Tony Burton, David Sharpe, Nick Jenkins, Ervin Bossanyi, Wiley 2001
- [7] Energía Eólica, Désiré Le Gourierés, Masson 1983.
- [8] Energía del Viento y Diseño de Turbinas Eolicas, Ricardo Bastianon, Tiempo de Cultura Ediciones 1994.

CAPÍTULO 3: GENERADORES ELÉCTRICOS

JAVIER DE LA CRUZ

Gerencia de Energías Renovables, INEEL, Reforma 113 C.P. 62490 Cuernavaca, México.

INTRODUCCIÓN

El generador eléctrico es la interfaz de conversión, entre el rotor eólico y el convertidor de potencia. Esto quiere decir que las especificaciones técnicas de operación entre ellos, deben ser compatibles para operar en regímenes específicos de viento.

Este capítulo describe los tipos de generadores más utilizados en energía eólica de baja potencia, incluyendo algunos parámetros de desempeño y características de construcción de un generador síncrono de imanes permanentes.

Este capítulo tiene como propósito proporcionar especificaciones técnicas requeridas en el proceso de selección de generadores eléctricos, para su uso en turbinas eólicas de baja potencia. Se inicia dando una descripción de las clasificaciones de las máquinas eléctricas rotativas, para posteriormente identificar cuáles son las utilizadas en energía eólica de baja potencia. Se describen las especificaciones típicas de operación de aerogeneradores comerciales con potencia de salida entre 0,5 kW y 10 kW, y se indican algunos parámetros de desempeño de la máquina. Finalmente se describe un proceso de diseño y manufactura.

CLASIFICACIÓN DE LOS GENERADORES ELÉCTRICOS

Un generador eléctrico es cualquier máquina que convierte energía mecánica en electricidad. Existen muchos tipos de máquinas y clasificaciones de acuerdo a sus características de operación. En la Figura 14 se describen 8 tipos de máquinas [1].

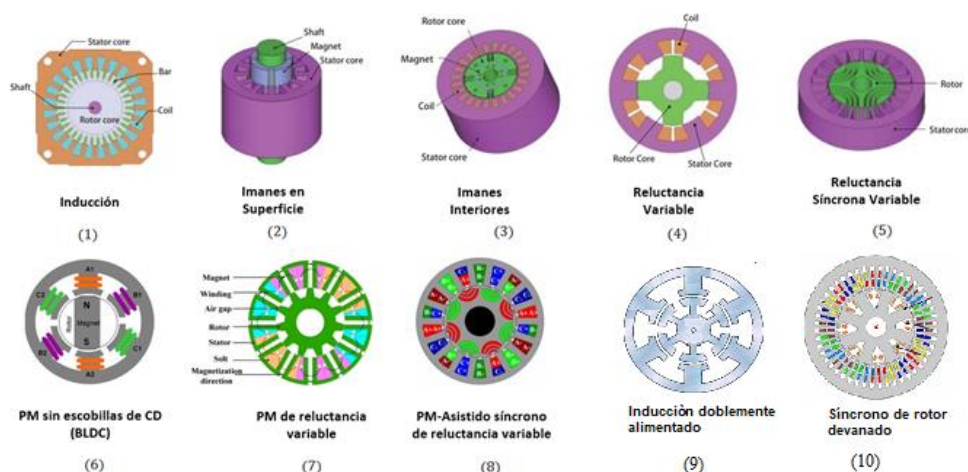


Figura 14. Tipos de máquinas eléctricas rotativas

La descripción de ventajas y desventajas para cada una de las máquinas, se muestran en la Tabla 2 [2-3].

TIPO DE MÁQUINA	VENTAJAS	DESVENTAJAS
(1) Máquina de inducción	1.- Más ampliamente utilizado 2.- Estructura simple y robusta	1.- Relativamente baja eficiencia.
(2) Máquina de imanes en superficie	1.- Alta densidad de torque 2.- Fácil control.	1.- Mayor entrehierro y baja inductancia del motor. 2.- Problemas en retención de los imanes.
(3) Máquina de imanes interiores	1.- Alta densidad de torque. 2.- Capacidades para debilitamiento de flujo.	1.- No muy susceptible para altas velocidades de operación.
(4) Reluctancia variable	1.- Rotor robusto, bueno para altas velocidades	1.- Elevada ondulación de torque. 2.- Alto ruido acústico.
(5) Reluctancia síncrona	1.- Máquina de polos salientes sin imanes	1.- Bajo factor de potencia 2.- Difícil de diseñar barreras y portadores de flujo magnético
(6) Máquina de CD sin escobillas	1.- Aceleración sensible y rápida 2.- Alta velocidad de operación 3.- Alta confiabilidad	1.- Necesita utilizar conmutación electrónica en lugar de mecánica
(7) Máquina de PM de reluctancia variable	1.- Estructura robusta del motor 2.- Alta densidad de torque 3.- PM en el estator y fácil de enfriar	1.- Difícil de fabricar 2.- Requiere más material de PM
(8) PM-As síncrono de reluctancia variable	1.- Mejora factor de potencia 2.- Alta densidad de potencia 3.- CPSR más amplia	1.- Complicada estructura del rotor 2.- No adecuado para altas velocidades, debido a la integridad mecánica del rotor
(9) Máquina de inducción doblemente alimentada	1.- Velocidad variable de operación	1.- Pobre respuesta ante falla en la red
(10) Máquina síncrona de rotor devanado	1.- Menos susceptible a temperaturas y condiciones medioambientales extremas	1.- Control más complejo

Tabla 2. Ventajas y desventajas de las máquinas eléctricas rotativas

El generador eléctrico suele considerarse como el elemento central del sistema eléctrico del aerogenerador y frecuentemente el elemento a partir del cual se dimensionan otros componentes. La industria eólica, a lo largo de los años, ha probado los siguientes tipos de generadores:

- Asíncronos de inducción jaula de ardilla
- Asíncronos de inducción doblemente alimentado
- Síncronos de rotor devanado
- Síncronos de imanes permanentes
 - Flujo radial

- Flujo axial
- Flujo transversal

Si bien, la máquina de inducción doblemente alimentada es el generador más utilizado en aerogeneradores de gran potencia. Vale la pena destacar que, en aerogeneradores de baja potencia, el generador eléctrico más utilizado es el síncrono de imanes permanentes debido a que son máquinas de baja velocidad de operación que no necesitan transmisión.

GENERADOR DE FLUJO RADIAL

El generador síncrono de imanes permanentes (GSIP) de flujo radial, Figura 15, es el más convencional entre los GSIPs. Su proceso de fabricación está bien establecido, en comparación con el generador axial y transversal. Se consigue incrementar su potencia mediante el aumento de su longitud o diámetro [4, 5], el estator y rotor están separados por un entrehierro cilíndrico, que idealmente es concéntrico con el eje de giro [5].

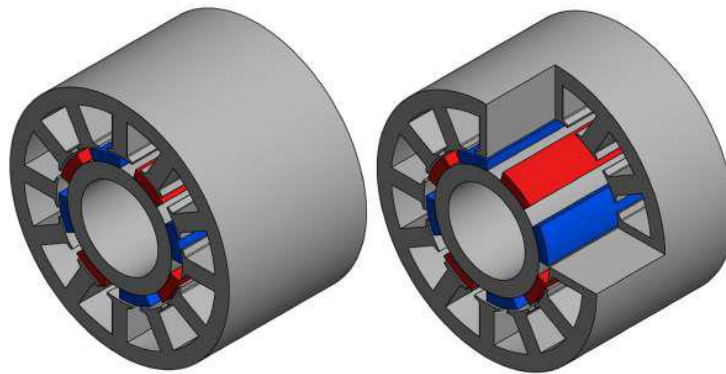


Figura 15. GSIP de flujo radial [6]

Una de las principales configuraciones de este tipo de maquina es a través de la colocación de los imanes sobre la superficie del rotor de tipo (ver Figura 16):

- Rotor externo
- Rotor interno

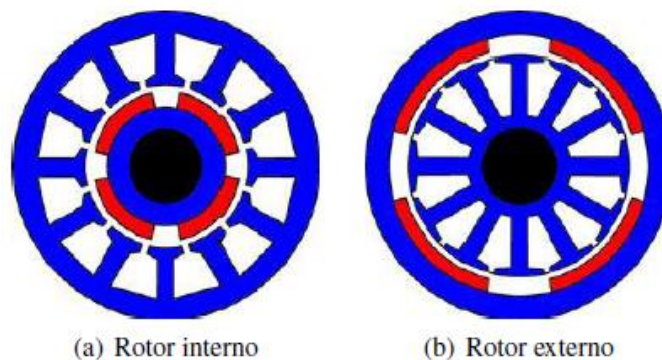


Figura 16. Configuraciones del GSIP de flujo radial [6]

Debido a que la mayor parte del calor se genera en los devanados del estator, la máquina de rotor interno permite contar con una ruta de enfriamiento más corta. Un número importante fabricantes de aerogeneradores elige máquinas de rotor interno [7].

GENERADOR DE FLUJO AXIAL

En un GSIP de flujo axial, el flujo en el entrehierro cuenta con dirección axial en relación al eje de giro, ver Figura 17 [5]. El rotor tiene forma de disco, con imanes colocados en el perímetro, y el estator tiene ranuras de forma radial. Este diseño se caracteriza por ser más compacto y difícil de fabricación.

En general, las máquinas de flujo axial tienen longitud mucho menor en comparación con las máquinas de flujo radial. Su ventaja principal es la alta densidad de par, por lo que se recomienda para aplicaciones con restricciones de tamaño en dirección axial [4].

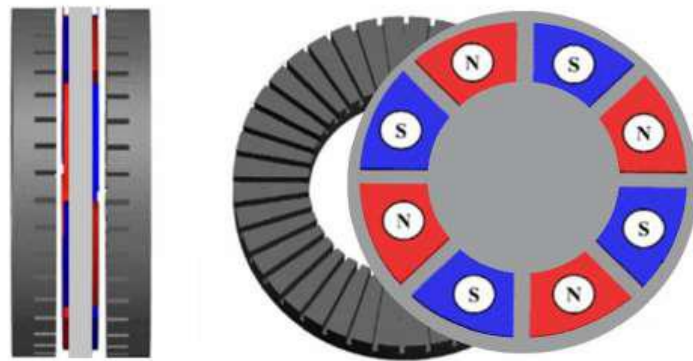


Figura 17. GSIP de flujo axial

Una de las desventajas con las máquinas de flujo axial es que no son equilibradas en un solo rotor. Por lo general, para un mejor rendimiento del rotor se acoplan entre dos estatores o viceversa, a diferencia de las máquinas de flujo radial.

GENERADOR DE FLUJO TRANSVERSAL

Los GSIP de flujo transversal presentan densidad de torque muy alta y un devanado con mayor simplicidad. Por este motivo, es de interés para aplicaciones en la energía eólica. No obstante, las máquinas de flujo transversal tienen desventajas, tales como una ruta del flujo tridimensional, un factor de potencia bajo y una densidad de potencia. Es probable que, por estos motivos, su uso en grandes turbinas eólicas no haya aun sucedido. En pequeños aerogeneradores solo se tiene referencia de su uso a nivel prototipo pre-comercial. Este tipo de generadores tiene una orientación radial de entrehierro y tiene una orientación transversal en el ranurado del estator. La orientación transversal en el estator permite que el área de la bobina sea independiente de la elección del paso del polo [8].

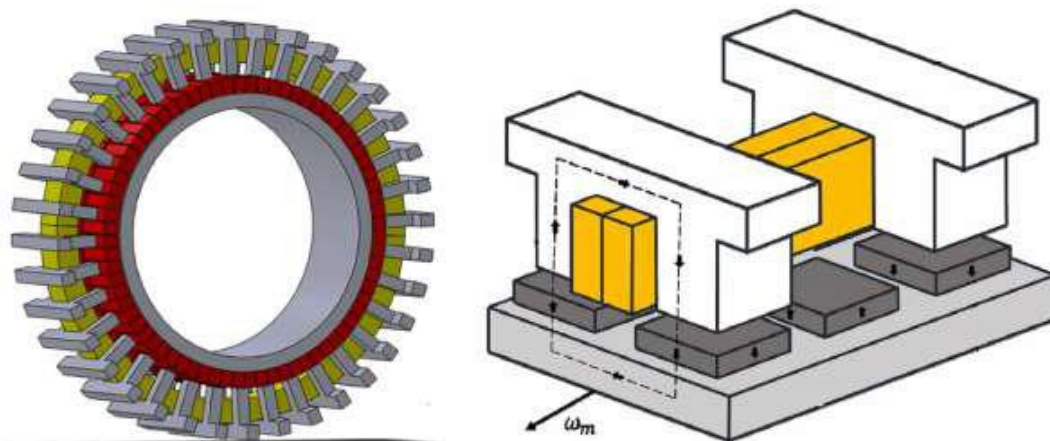


Figura 18. GSIP de flujo transversal [6]

REQUERIMIENTOS DE OPERACIÓN EN TURBINAS EÓLICAS DE PEQUEÑA ESCALA

Los aerogeneradores de pequeña escala (≈ 10 kW o inferiores) suelen contar con una configuración de accionamiento directo, sin necesidad de utilizar una transmisión para incrementar la velocidad de operación del generador eléctrico. Esto ayuda a disminuir el costo, peso y mantenimiento del aerogenerador. Sin embargo, representa retos adicionales para el generador eléctrico, debido a que cuanto menor sea la velocidad de operación, mayor será el volumen de la máquina.

Desde el punto de vista del diseño o selección de generadores eléctricos para aerogeneradores de baja potencia, los parámetros que más influyen para determinar su uso son:

- Velocidad de operación
- Voltaje de salida (Inversores o Cargadores de baterías)

Si la velocidad de operación del generador no corresponde a la velocidad de operación del rotor eólico, no podrá ser extraída la energía contenida en el viento. Lo mismo sucede con el voltaje de salida, es decir, debe tener un rango en el cual un inversor red o una carga local pueda extraer la potencia que pueda suministrar el generador.

Vale la pena destacar que existen otros parámetros de desempeño que serán descritos en secciones posteriores.

En la Figura 19 se muestra la velocidad de rotación nominal de aerogeneradores comerciales que tienen capacidades desde 500 W, hasta 10 kW [9-18].

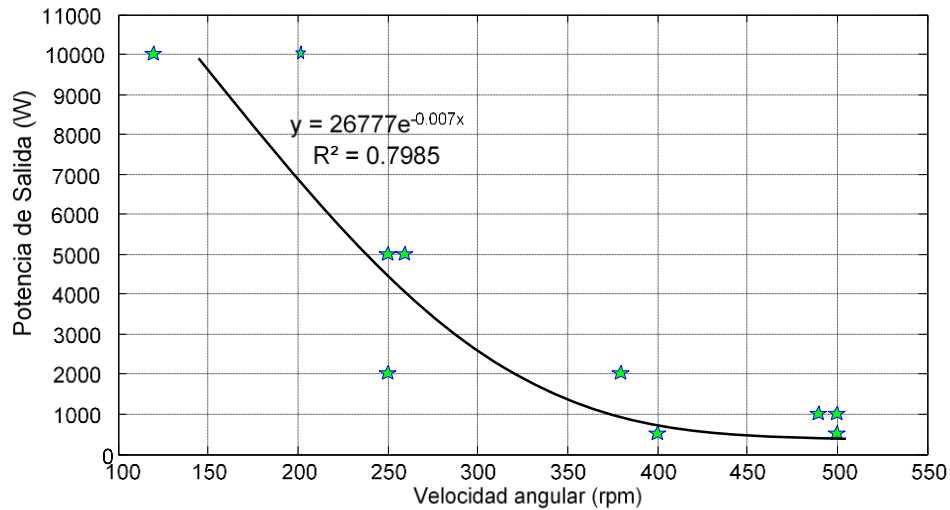


Figura 19. Potencia nominal vs RPM de aerogeneradores comerciales

Los aerogeneradores de 500 W a 1 kW suelen tener velocidades nominales de operación entre 400 y 500 rpm. En el caso de aerogeneradores de 2 kW, las velocidades de operación encontradas son de 250 y 375 rpm. Las máquinas de kW suelen tener velocidades de giro a potencia nominal de 250 rpm. Para máquinas de 10 kW, las velocidades de operación, rondan entre las 125 y 200 pm.

La Figura 20 el rango de operación del voltaje de salida del generador en CA (por fase) y su valor correspondiente a la entrada del inversor en CD [19-24].

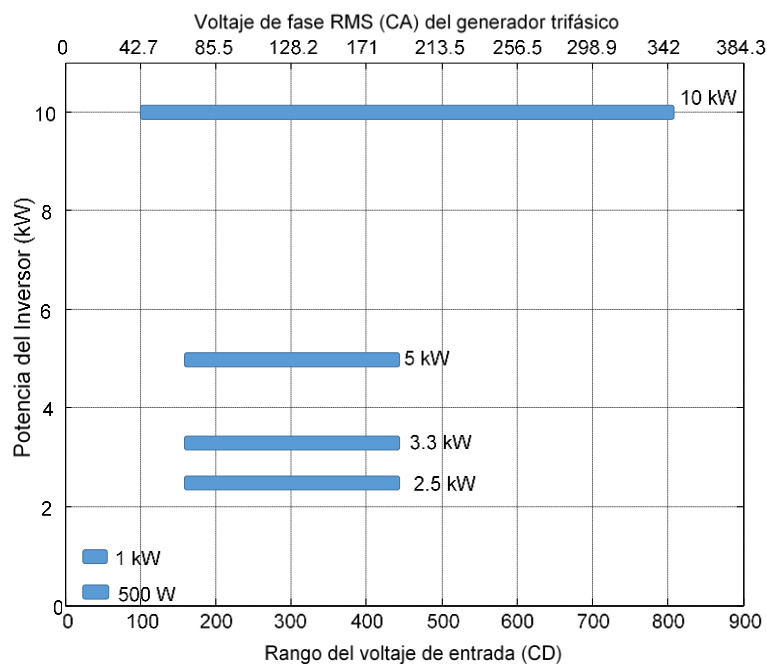


Figura 20. Rango de voltaje de entrada en inversores comerciales

Una característica de los aerogeneradores de baja potencia, es que cuentan con un amplio rango de voltaje a la salida del generador (y entrada en CD al inversor), el cual es proporcional a las

variaciones de la velocidad del giro. En algunos inversores, la potencia de salida suele asociarse a su voltaje CD de entrada. Por este motivo, para diseñar o seleccionar un generador eléctrico, se debe conocer el rango de voltaje de operación a la entrada del inversor (dentro o fuera de la red).

SELECCIÓN DE GENERADORES COMERCIALES

Como se mencionó anteriormente y una vez determinada la potencia del aerogenerador, la selección de un generador eléctrico comercial, dependerá principalmente de parámetros como la velocidad de operación y el voltaje de salida requerido en la aplicación. La velocidad de operación se encuentra ligada a las características operativas del rotor eólico. El voltaje de salida se asocia a las especificaciones de entrada de los inversores o cargadores de baterías.

A manera de ejemplo, la Figura 21 muestra el voltaje de salida de un generador síncrono de imanes permanentes. La potencia de salida se muestra en la Figura 22.

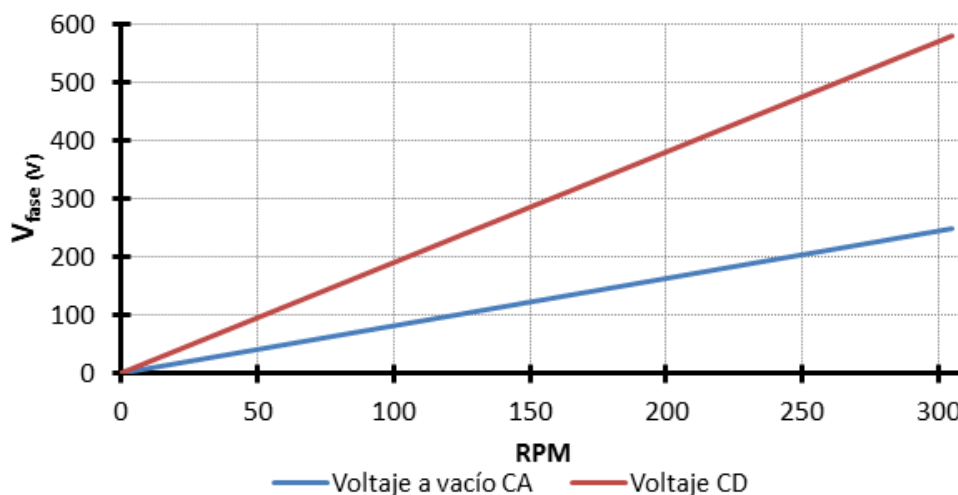


Figura 21. Voltaje de circuito abierto de un generador síncrono de imanes permanentes [20]

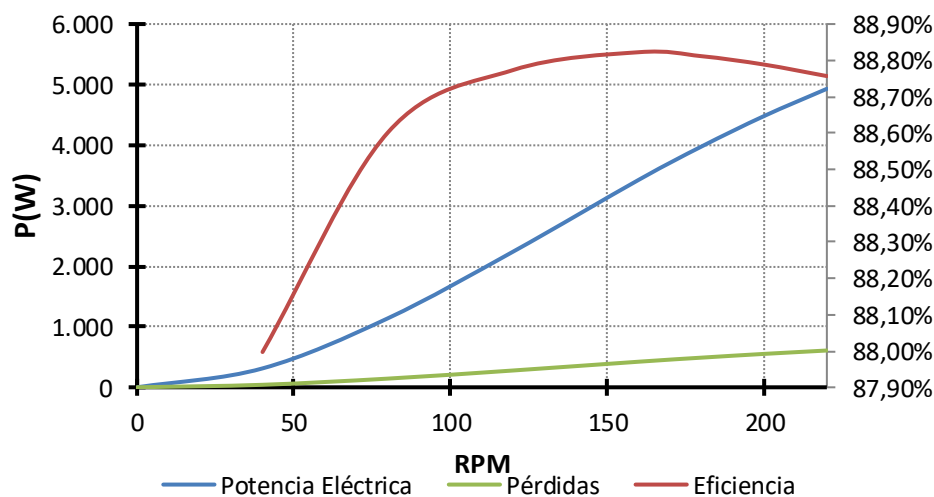


Figura 22. Potencia de salida del generador de imanes permanentes [6]

Las características de operación del rotor eólico, el generador eléctrico y el inversor, deberán contar con las condiciones técnicas para ser adaptados y operar de manera conjunta.

PARÁMETROS DE DESEMPEÑO

Existen varios parámetros que ayudan a determinar el nivel de desempeño de una máquina eléctrica rotativa. Para mayor información, revisar [25-29]:

- Eficiencia
- Distorsión armónica del voltaje
- Regulación de voltaje
- Torque en vacío
- Ondulación de torque

PROCESO DE DISEÑO Y MANUFACTURA

DISEÑO

El diseño de generadores eléctricos es un proceso iterativo que debe iniciar con una clara definición de los requerimientos técnicos de operación. Se deben indicar y documentar especificaciones nominales como el torque, velocidad de giro, potencia y el voltaje. También debe indicarse si existen restricciones de volumen.

Posteriormente se debe seleccionar una topología. Por ejemplo, se podría llevar a cabo el diseño de un generador síncrono de rotor externo, de rotor interno o de flujo axial. A partir de los requerimientos, se realiza el pre-dimensionamiento de la máquina y se modela en CAD.

Se llevan a cabo las simulaciones de elemento finito para verificar el desempeño de la máquina desde un punto de vista electromagnético, térmico y estructural.

Al construir el prototipo se deben llevar a cabo pruebas de laboratorio para verificar el desempeño. A partir de los resultados de estas pruebas, se debe optimizar el diseño para futuras la fabricación de futuras versiones del mismo.

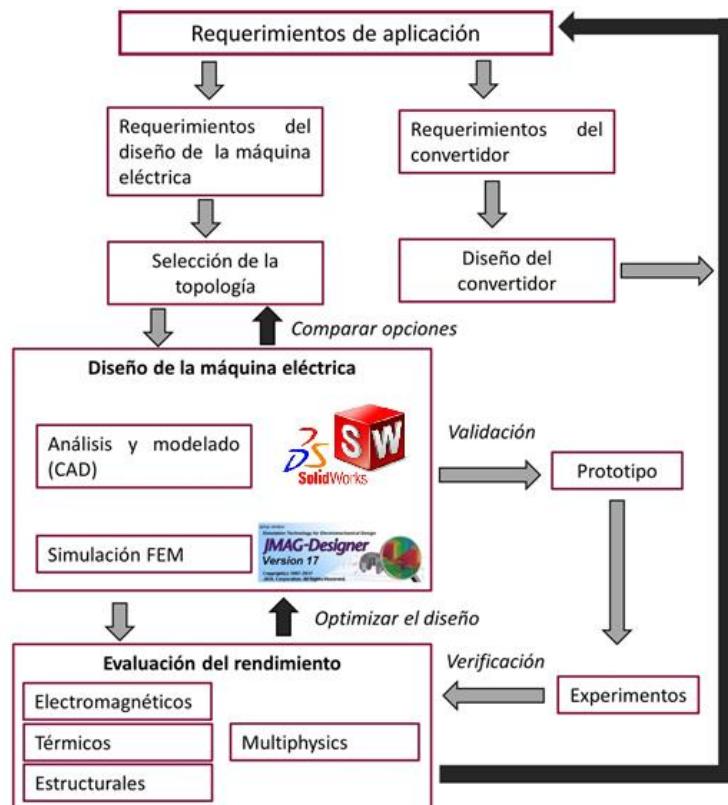


Figura 23. Potencia de salida del proceso de manufactura

MANUFACTURA

El proceso de manufactura de generadores eléctricos se muestra en la Figura 24, Figura 25 y Figura 26. En este caso, las láminas del núcleo del estator se cortan mediante una máquina laser. Sin embargo, el corte se puede llevar a cabo mediante un troquel. El devanado del estator se construye siguiendo un diagrama de conexiones. El devanado puede ser fabricado en talleres locales de reparación de motores de inducción.

El rotor está compuesto por un núcleo magnético e imanes de neodimio, los cuales han sido adheridos mediante el uso de pegamento epóxico. En ensamble final del generador eléctrico se muestra en la Figura 27.



Figura 24. Construcción del núcleo del estator



Figura 25. Devanado del estator



Figura 26. Construcción de la carcasa del estator (izquierda) y del rotor de imanes permanentes (derecha)

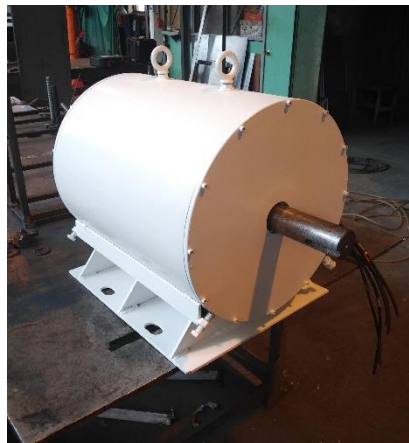


Figura 27. Generador síncrono de imanes permanentes de 10 kW construido en el INEEL

REFERENCIAS

- [1] JMAG, Simulation Technology for Electromechanical Design, “Application Catalog”. [Internet] 2020 [Consultado 17 Dic 2020]. Disponible en: <https://www.jmag-international.com/catalog/>
- [2] Jing Zhao et al, “Influence of Different Rotor Teeth Shapes on the Performance of Flux Switching Permanent Magnet Machines Used for Electric Vehicles”. *Energies* 2014, 7(12), 8056-8075; doi:10.3390/en7128056
- [3] Xiao Chen et al, “Permanent Magnet Assisted Synchronous Reluctance Machine with Fractional-Slot Winding Configurations” *IEMDC*, 2013 IEEE International.

- [4] N. Madani, "Design of a Permanent Magnet Synchronous Generator for a Vertical Axis Wind Turbine". M. Sc. thesis. Royal Institute of Technology Stockholm, Sweden 2011.
- [5] M. R. J. Dubois, "Optimized Permanent Magnet Generator Topologies for Direct-Drive Wind Turbine". Ph. D. dissertation. Delf University of Technology, 2004.
- [6] W. Durante Gómez, "Diseño de generadores síncrono multipolo de imanes permanentes para su uso en aerogeneradores de baja potencia" Tesis de Maestría. UNISTMO, 2019.
- [7] M. Mueller and H. Polinder, Electrical drives for direct drive renewable energy systems, USA, Woodhead Publishing Limited, 2013.
- [8] H. Polinder, "Overview of and trends in wind turbine generator systems", Proceedings of IEEE Power and Energy Society General Meeting, July 2011.
- [9] Shandong Hua Ya Industry Co., Ltd, Aerogenerador de 500 W. [Internet] 2020 [Consultado 17 Dic 2020]. Disponible en: http://www.huayaturbine.com/te_product_a/2008-04-09/23.shtml
- [10] PowerTech, 500 W 24 VDC Wind Generator. [Internet] 2020 [Consultado 17 Dic 2020]. Disponible en: http://www.colgantoolmaking.com.au/green_power/green_power_manuals/MG4540%20500W%20Wind%20Generator%20User%20Manual%20Rev090313_new.pdf
- [11] EnergyPower, S1000. [Internet] 2020 [Consultado 17 Dic 2020]. Disponible en: <https://energypower.gr/wp-content/uploads/2015/12/technika-charaktiristika11.pdf>
- [12] WATT U NEDD, 1kW Bergey Excel wind turbine 24V or 48V (charging models). [Internet] 2020 [Consultado 17 Dic 2020]. Disponible en: <https://www.wattuneed.com/en/wind-turbine/1593-1kw-bergey-excel-wind-turbine-24v-or-48v-charging-models-0712971129535.html>
- [13] Aerogenerador de 2 kW. [Internet] 2020 [Consultado 17 Dic 2020]. Disponible en: <http://www.neicjapan.com/smallwindmill/Aeolos-H%202kW%20Brochure.pdf>
- [14] Shandong Hua Ya Industry Co, 2 kW Wind Turbine. [Internet] 2020 [Consultado 17 Dic 2020]. Disponible en: http://www.huayaturbine.com/te_product_a/2008-04-09/22.shtml
- [15] Shandong Hua Ya Industry Co, 5 kW Wind Turbine. [Internet] 2020 [Consultado 17 Dic 2020]. Disponible en: http://www.huayaturbine.com/te_product_a/2008-04-09/20.shtml
- [16] ENAIR, wind turbine E70 PRO [Internet] 2020 [Consultado 17 Dic 2020]. Disponible en: <https://www.enair.es/en/small-wind-turbines/e70pro>
- [17] ENAIR, wind turbine E200L Wind turbine [Internet] 2020 [Consultado 17 Dic 2020]. Disponible en: <https://www.enair.es/en/small-wind-turbines/e200l>

- [18] Shandong Hua Ya Industry Co, 10 kW Wind Turbine. [Internet] 2020 [Consultado 17 Dic 2020]. Disponible en: http://www.huayaturbine.com/te_product_a/2008-04-09/17.shtml
- [19] Inversor de 500 W. [Internet] 2020 [Consultado 17 Dic 2020]. Disponible en: https://mwands.com/es_MX/shop/product/500-watt-pure-sine-solar-grid-tie-micro-inverter?category=276
- [20] Avant Garde, 1 kW Small Wind Turbine + 1.5 kW On Grid Inverter + Wind Converter + 20ft Pole. [Internet] 2020 [Consultado 17 Dic 2020]. Disponible en: <https://avantgarde.energy/product/avatar-5kw/1-kw-small-wind-turbine-1-5-kw-on-grid-inverterwind-controller-20ft-pole/>
- [21] Ingeteam, Inverter for small wind energy plants up to 2.5 kW. [Internet] 2020 [Consultado 17 Dic 2020]. Disponible en: https://www.ingeteam.com/Portals/0/Productos/Documentos/fotovoltaico/fichas_ingles/13_Wind_contrans_ING.pdf
- [22] Ingeteam, Inverter for small wind energy plants up to 3.3 kW. [Internet] 2020 [Consultado 17 Dic 2020]. Disponible en: https://www.ingeteam.com/Portals/0/Productos/Documentos/fotovoltaico/fichas_ingles/13_Wind_contrans_ING.pdf
- [23] Ingeteam, Inverter for small wind energy plants up to 5 kW. [Internet] 2020 [Consultado 17 Dic 2020]. Disponible en: https://www.ingeteam.com/Portals/0/Productos/Documentos/fotovoltaico/fichas_ingles/13_Wind_contrans_ING.pdf
- [24] Windpowercn, Wind Grid tie invertir. [Internet] 2020 [Consultado 17 Dic 2020]. Disponible en: <https://www.windpowercn.com/products/24.html>
- [25] IEEE Std, (2014). Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems, in IEEE Std 519-2014 (Revision of IEEE Std 519-1992), 1(1), 1-29, 2014.
- [26] International Electrotechnical Commission (IEC), Rotating electrical machines – Part 31: Selection of energy-efficient motors including variable speed applications – Application guide- IEC 60034-31:2014.
- [27] S. J. Chapman, Máquinas Eléctricas, Quinta ed., México, D.F., Mc Graw Hill, 2012.
- [28] Duane C. Hanselman, Brushless Permanent Magnet Motor Design, 1st. ed. USA, McGraw-Hill, Inc, 1994.
- [29] J. R. Hendershot and T. J. E. Miller, Design of Brushless Permanent Magnet Machines, 2nd. ed. Motor Design Books LLC, 2010.

CAPÍTULO 4: CONTROL Y ACONDICIONAMIENTO DE POTENCIA

LUIS ARRIBAS ¹, JAVIER DE LA CRUZ ², TIMO KARLSSON ³, MARIANO AMADÍO ⁴

¹ Unidad de Energía Eólica, CIEMAT, Av. Complutense 40 28040 Madrid (España).

² Gerencia de Energías Renovables, INEEL, Reforma 113 C.P. 62490 Cuernavaca, México.

³ Wind Power Technologies, Tekniikantie 21, FI-02044 VTT, Finland

⁴ Departamento Energías Renovables - Lab. de Energía Eólica, Subgerencia Operativa Patagonia Norte , Instituto Nacional de Tecnología Industrial (INTI), Ruta prov. 7 Km 5 Mercado Concentrador | Neuquén Capital | CP 8300INTI, Argentina

INTRODUCCIÓN

Se han presentado los sistemas de regulación y control aerodinámicos y/o mecánicos que pueden aparecer en el rotor y en la góndola del aerogenerador de pequeña potencia. Una vez que la energía cinética del viento es capturada por el rotor y transmitida mecánicamente al generador, que la convierte en energía eléctrica, ésta puede ser también regulada por medio de equipos electrónicos.

Existe una gran variedad en cuanto a las posibles tecnologías, tanto de rotor como de generador eléctrico, incluso en el método de control del aerogenerador, a la hora de elegir aerogenerador de pequeña potencia. Con objeto de limitar un poco la descripción de la electrónica en pequeños aerogeneradores, se selecciona una configuración tipo para el aerogenerador, formada por los siguientes elementos (ver un ejemplo en la Figura 28):

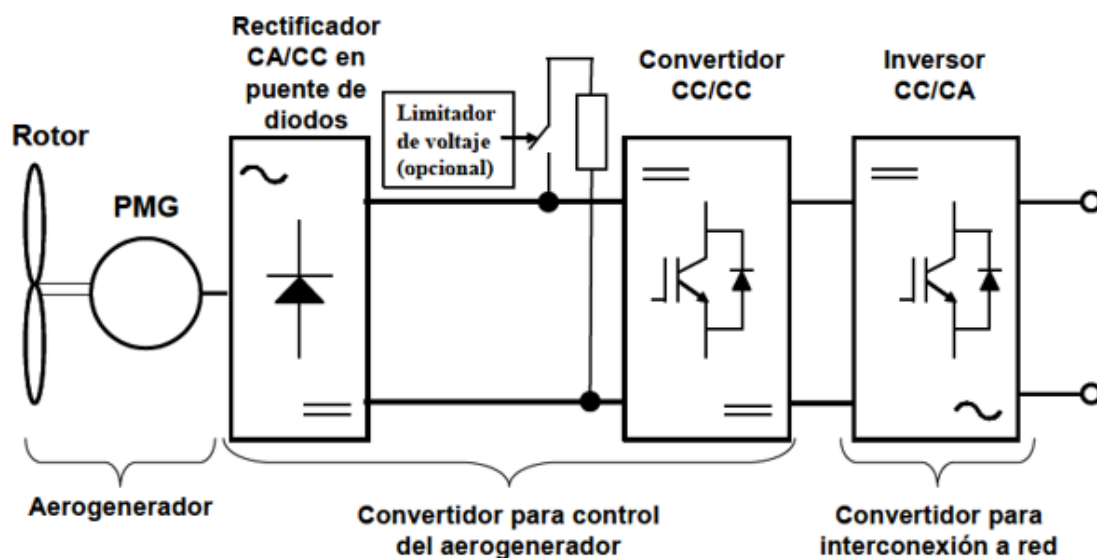


Figura 28. Esquema de conexión de aerogenerador de pequeña potencia a la red mediante convertidor para control compuesto por rectificador en puente de diodos y, opcionalmente, convertidor de carga de disipación y convertidor CC/CC. En este caso, se trata de una aplicación de conexión a red, por lo que se usa un inversor para ese propósito.

- El generador eléctrico. En lo que respecta al tipo de generador, se selecciona un generador síncrono de imanes permanentes (GSIP ó PMG de sus siglas en inglés), sin multiplicadora: ésta será la configuración que se describirá a continuación. En el caso de los pequeños aerogeneradores se ha aprovechado especialmente la posibilidad de eliminar la multiplicadora gracias a la facilidad para incorporar un alto número de polos en este tipo de generadores.
- Convertidor para control y acondicionamiento de potencia del aerogenerador. Incluye el dispositivo para convertir la CA a CC, el rectificador, y opcionalmente el o los elementos de control que regulan la generación procedente del aerogenerador.
- Convertidor para control y acondicionamiento de potencia para la interconexión a la aplicación. Este convertidor es el encargado de mantener (controlar) los parámetros eléctricos de la aplicación en la que se usa la energía producida, ya sea una red aislada, la red convencional o un bombeo eléctrico.

Puesto que el generador eléctrico ya ha sido descrito en el capítulo anterior, se presentan a continuación algunas características de los otros dos bloques implicados en el funcionamiento eléctrico y de control electrónico del aerogenerador, que son: el convertidor electrónico para el control del aerogenerador y el convertidor para la interconexión a la aplicación.

CONTROL Y ACONDICIONAMIENTO DE POTENCIA ELECTRÓNICOS PARA EL AEROGENERADOR

Las pequeñas turbinas eólicas normalmente generarán energía usando un alternador de CA trifásico. A continuación, la alimentación de CA se rectifica a CC. El voltaje y la corriente cambiarán con las condiciones cambiantes del recurso eólico. Un pequeño aerogenerador puede ser muy variable con cambios rápidos de voltaje y potencia en respuesta a las ráfagas de viento. La potencia de CC rectificada se conoce a menudo como "corriente continua salvaje", y es la que típicamente regulará los equipos electrónicos de control y protección que en este apartado se describen. Este bloque es la configuración básica del control y acondicionamiento de potencia del aerogenerador, pues es la que está asociada a él. Aunque hay distintas opciones entre los distintos aerogeneradores, cada aerogenerador suele mantener este bloque con independencia de la aplicación, siendo el bloque de acondicionamiento según la aplicación el que, si acaso, puede cambiar. A continuación, se describen brevemente los elementos que pueden aparecer en este bloque.

CORTOCIRCUITO DEL GENERADOR (CROWBAR)

Una de las características del generador de imanes permanentes, utilizado por la inmensa mayoría de pequeños aerogeneradores, es que se frena al cortocircuitar su salida trifásica. Esta característica es muchas veces utilizada como sistema de frenado. Puesto que supone una maniobra brusca, algunos modelos incluyen una resistencia para que el cortocircuito no sea

directo. El cortocircuito se puede en alterna, antes del rectificador, o en continua, a la salida del rectificador. En este último caso hay que tener la precaución de asegurar que no se cortocircuite también la aplicación a la que esté conectado (que podría ser, por ejemplo, una batería).

EL RECTIFICADOR

La configuración más comúnmente empleada en aerogeneradores de pequeña potencia, está constituida por un generador de imanes permanentes, trifásico, e incluye un rectificador trifásico en puente de diodos. En este caso, al estar constituido por un puente de diodos trifásico, se trata de un rectificador no-controlado.

Los rectificadores trifásicos, tipo puente de diodos, son comúnmente utilizados para aplicaciones de alta potencia, debido a su bajo costo y a que cuentan con un alto factor de utilización para un sistema trifásico. Es decir, tiene una alta relación de potencia de salida en corriente continua, respecto a la potencia eléctrica de entrada en corriente alterna. A la salida del rectificador se suele incluir algún tipo de filtrado para reducir el rizado de la onda rectificada.

EL CONVERTIDOR CC/CC

Este componente, el convertidor continua – continua (CC/CC), no está presente en el control de todos los pequeños aerogeneradores, pero la tendencia es que cada vez aparezca con más frecuencia, dado que es el encargado del seguimiento del punto de máxima potencia. Los convertidores CC/CC (continua – continua) son una parte integral de la vida moderna. Mediante ellos se convierte de un nivel de voltaje a otro mediante el uso de alta frecuencia. En este caso se añade un grado de libertad más para el control de aerogenerador. El convertidor CC-CC permite independizar la tensión a la entrada de la tensión a la salida, lo que le permite poder regular la tensión CC a la entrada de forma que obligue al aerogenerador a trabajar en el punto óptimo de funcionamiento, el punto de máxima potencia para esas condiciones, de ahí sea el encargado del seguimiento del punto de máxima potencia. Al mismo tiempo, es capaz de mantener a la salida una tensión CC adecuada para el funcionamiento del sistema. Los convertidores CC/CC son sistemas no lineales de estructura variable, que están sujetos a disturbios como cambios en el voltaje de entrada y cambios en la carga de salida. Hay distintos tipos de convertidores CC/CC:

- Dispositivos para convertir a un voltaje inferior (Convertidor reductor, *Buck*)
- Dispositivos para convertir a un voltaje superior (Convertidor elevador, *Boost*)
- Dispositivo capaz de convertir a un voltaje superior o inferior (Convertidor reductor-elevador, *Buck-Boost*)

CONTROL DE CARGA DE VOLCADO

Opcionalmente, junto al rectificador en puente de diodos, se puede incluir un control de carga del aerogenerador, formado por una carga resistiva (resistencia de frenado, *dump load*) cuya

intensidad es controlada por un elemento de control (conocido como *Chopper*). Este circuito se encarga de mantener la tensión en el camino en CC (*bus DC*) por debajo de un valor de consigna, y lo consigue derivando a un elemento resistivo toda la potencia excedentaria, es decir, toda la potencia que supondría que subiera la tensión CC. Esta regulación electrónica tiene su efecto sobre la velocidad de rotación del aerogenerador (se comporta como un freno electrónico), pues tiende a llevarla hacia un valor más bajo, al ofrecer una carga resistiva de potencia más elevada. Este elemento de control tiene por función limitar la tensión en el tramo en CC, suponiendo un circuito de protección frente a sobretensión, por lo que su uso es muy frecuente, incluso cuando está presente la regulación serie mediante un convertidor CC/CC.

Puesto que la disipación de potencia en la resistencia en forma de calor produce un aumento considerable de la temperatura, hay que prever las medidas apropiadas para evitar daños a personas y a las instalaciones.

DISPONIBILIDAD DE EQUIPOS

Se presenta a continuación una revisión de los equipos electrónicos para regulación y control de la potencia generada por los pequeños aerogeneradores. La revisión engloba:

- Productos propietarios, es decir, de fabricación propia y uso exclusivo de algunos fabricantes de aerogeneradores de pequeña potencia;
- Productos de uso general existentes a nivel comercial: se trata de equipos fabricados por empresas fabricantes de equipos electrónicos, y que pueden ser utilizados por distintos modelos de aerogenerador;
- Y los diseños de uso libre, es decir, diseño que se encuentran disponibles en la literatura y/o en internet, y que permiten su fabricación por uno mismo.

En ningún caso la revisión pretende ser exhaustiva, sino tan sólo dar una orientación de algunas de las soluciones disponibles.

Productos propietarios

Algunos de los modelos de mayor utilización durante estos últimos años, usan sistemas de control propietarios, es decir, de fabricación propia. A modo de ejemplo, se pueden citar los casos del Skystream, fabricado inicialmente por Southwest Windpower y posteriormente por Xzeres; o del Windera, aerogenerador fabricado por Ennera. En el siguiente esquema se presenta la solución adoptada por Ennera para la regulación electrónica del aerogenerador Windera, que incluye los siguientes elementos, ya descritos: Crowbar en el lado AC; rectificador trifásico; convertidor CC-CC (Booster) encargado del seguimiento del punto de máxima potencia; un circuito de protección frente a sobretensión (Brake Chopper); y el inversor (Inverter) que convierte la CC en CA. Este componente será descrito en el apartado 3.

Cuando se trata de aplicaciones de conexión a red, existe la posibilidad de que el seguimiento del punto de máxima potencia se realice desde el inversor de conexión a red, evitando por lo tanto la necesidad de un convertidor CC/CC externo.

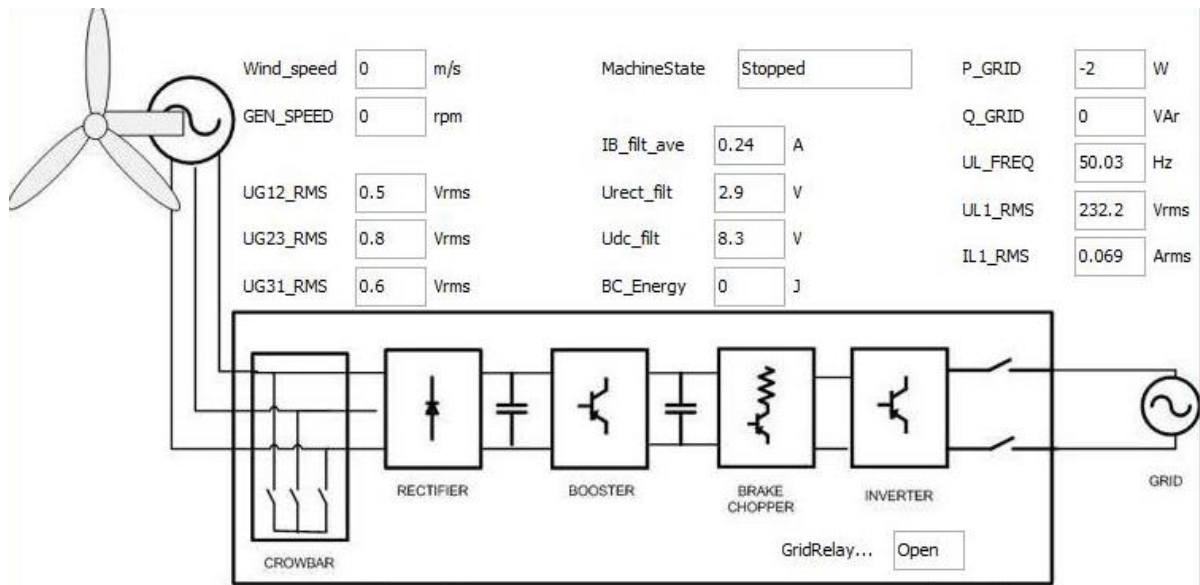


Figura 29. Diagrama de bloques del sistema de regulación electrónica del aerogenerador WINDERA ([2])

Equipos comerciales existentes

No son muchos los equipos de regulación electrónica para uso general en aerogeneradores de pequeña potencia existentes en el mercado hoy en día. La razón seguramente tenga relación con que se trata actualmente de un mercado limitado, por lo que algunos de los fabricantes de equipos de uso general han abandonado su fabricación. A continuación se presentan algunos de los existentes (al menos en el momento de realizar esta revisión, porque es éste un mundo muy cambiante).

Wind box interface (WBI)

Este equipo fue diseñado por la empresa *Power One* (adquirida posteriormente por ABB). ABB lo considera como un equipo “heredado” (*Legacy small wind inverters*, [3]), y todavía lo oferta en su página web, si bien indica expresamente que no dedica recursos para su diseño. Está pensado para trabajar con la familia de inversores Aurora, también diseño de *PowerOne*, pero se puede adquirir de forma independiente para un uso general ([4]).

En la Figura 30 se muestra un diagrama de bloques del WBI, compuesto por: rectificador trifásico en puente de diodos, un sistema de control de la potencia derivada a la resistencia de volcado (*Diversion Load*) y los elementos de protección frente a sobrecorrientes (fusibles) y sobretensiones (*crowbar*). Nótese que en este caso aparece en el lado CC.

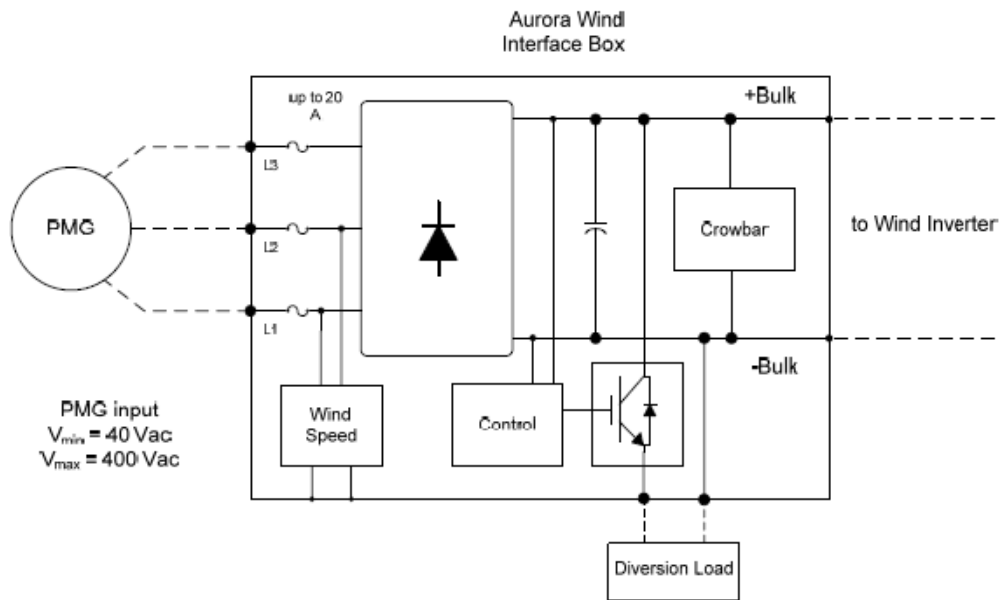


Figura 30. Diagrama de bloques del WBI ([5])

Morningstar: Tristar

Los controladores TriStar MPPT de Morningstar están diseñados para aplicaciones solares fotovoltaicas. Sin embargo, también son compatibles con otras fuentes de alimentación de CC, como turbinas eólicas e hidroeléctricas, en un rango que va aproximadamente desde los 3 hasta los 13 kW, colocando equipos en paralelo. No obstante, el propio fabricante advierte de la necesidad de revisar todos los parámetros de funcionamiento para determinar la compatibilidad.

El controlador rastreará la potencia y el voltaje de CC de la turbina. La configuración incluye una curva de voltaje frente a potencia que se introducirá para la turbina que se está utilizando. El controlador ajusta continuamente la entrada de alimentación de CC salvaje para que funcione de acuerdo con la curva de voltaje frente a la curva de potencia. A medida que la potencia de la turbina aumenta el voltaje aumenta para optimizar el rendimiento de la turbina. La programación de una curva de tensión frente a la curva de potencia implica conocer los voltajes operativos de la turbina: tensión de corte (o el nivel de voltaje que la turbina tiene suficiente velocidad de rotación para comenzar a generar energía eléctrica), tensiones de aumento de rampa de potencia máxima, el rango máximo de voltaje/potencia y los voltajes máximos de circuito abierto de la turbina. En la Figura 31 se muestra un ejemplo de curva de voltaje CC de entrada frente a potencia del aerogenerador, programada en el controlador y que utilizará como referencia para su control.

El sistema de controlador MPPT TriStar requerirá además de un medio para mantener la velocidad de rotación de la turbina bajo control durante los períodos de regulación de voltaje. No puede simplemente empezar a reducir la energía cuando las baterías están llenas, ya que eso haría que la velocidad de rotación aumentara fuera de control. Una opción es utilizar el controlador de la resistencia de volcado TriStar. Esta configuración permite que el controlador TriStar MPPT funcione a plena potencia (modo de carga masiva) continuamente mientras que el controlador de

resistencia de volcado se encarga del control de voltaje de regulación. Esto mantendrá el funcionamiento continuo de la operación de carga en todo momento (ver Figura 32)

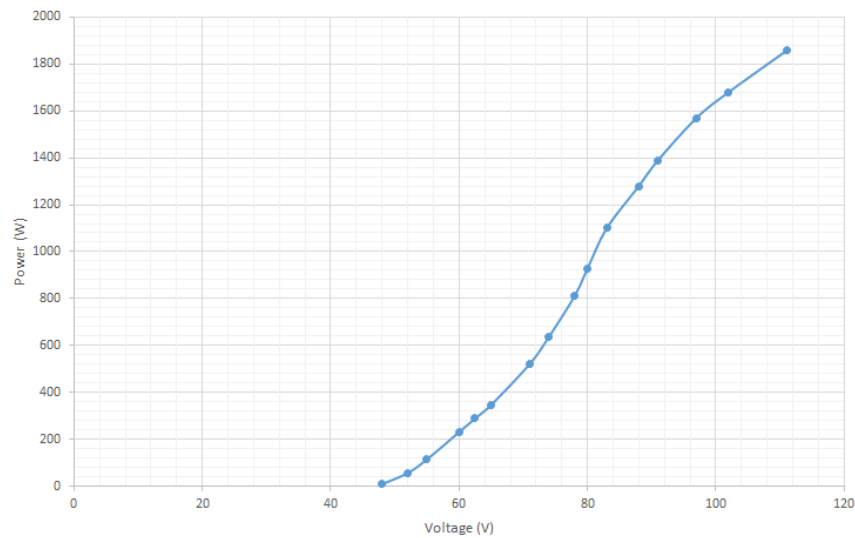


Figura 31. Ejemplo de curva voltaje CC frente a Potencia de referencia en el controlador TriStar

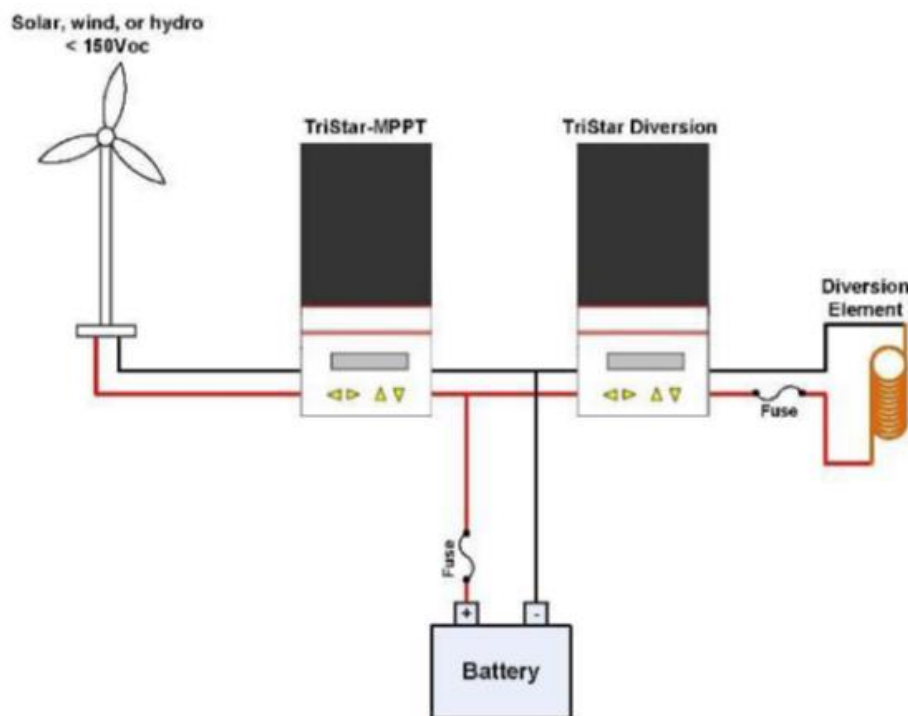


Figura 32. Sistema de control de resistencia de volcado junto con controlador MPPT ([6])

Diseños libres disponibles

Existen varios diseños de uso libre disponibles, para la fabricación de elementos de regulación y control de aerogeneradores de pequeña potencia y, en particular, para el convertidor de control de la carga de disipación, dado que se trata de un convertidor que puede realizarse de forma más sencilla. Estos equipos suelen estar pensados para los aerogeneradores de menor potencia

(típicamente de menos de 1kW), al manejar tensiones e intensidades de menor riesgo eléctrico. Se presentan a continuación dos de ellos.

Diseño libre

Este prototipo de controlador de carga es el resultado de un proyecto que ha estado en ejecución entre abril y septiembre de 2016 por los miembros de *WindEmpowerment* (WE), *Ti'éole* and *Wisions* ([7]). WE es una organización para el desarrollo de pequeños aerogeneradores contruidos localmente. En esta red, el aerogenerador Piggott ([8]) se ha convertido en un estándar porque su construcción requiere materiales básicos, herramientas y habilidades. Gracias a la simplicidad de su diseño y su licencia de código abierto, se ha promovido en todo el mundo y particularmente en países donde el suministro de electricidad no está disponible o asequible. Incluye regulación por modulación del ancho del pulso (PWM, en inglés), y está diseñado para tensiones CC de 24/48V.

Protección de Sobretenión del aerogenerador

Se trata del diseño de una protección redundante realizado para los equipos de Power One – ABB (Wind Box Interface, inversor Aurora), que se presentaron anteriormente. Su función es, de una forma sencilla, garantizar que no se van a producir daños ni en la electrónica ni en el aerogenerador en el caso de que el sistema de regulación electrónica entre en algún modo inesperado de operación que deje el aerogenerador en vacío, con el consiguiente embalamiento y la consiguiente sobretensión. El sistema es simplemente un relé de tensión ajustado para conmutar a la tensión que se designe como protección frente a la sobretensión. ([9])

CONVERTIDOR PARA CONTROL Y ACONDICIONAMIENTO DE POTENCIA PARA LA INTERCONEXIÓN A LA APLICACIÓN

Puesto que la mayor parte de las aplicaciones actuales funcionan en corriente alterna, la función esencial de este convertidor es convertir la salida en CC del rectificador (o del convertidor CC/CC) en corriente alterna, con la calidad de energía que la aplicación requiere. En función del tipo de aplicación (ver Capítulo 8: Mercado de aerogeneradores de pequeña potencia), el acondicionamiento de potencia será distinto. Además, puede incorporar otras funciones, como el SPMP, la monitorización y la gestión de la generación.

Por simplicidad, se resumen aquí en dos los tipos de acoplamiento: acoplamiento en continua y acoplamiento en alterna. Se añade un tercer apartado de Otros, para aplicaciones especiales.

ACOPLAMIENTO EN CONTINUA: REGULADOR DE CARGA

El acoplamiento en continua está asociado a la presencia de baterías electroquímicas, que operan en corriente continua. Como se ha visto anteriormente, la salida en alterna del pequeño aerogenerador se rectifica y se convierte a continua, por lo que el acoplamiento en continua no supondría añadir más convertidores que los descritos en el apartado 2.A. Tan solo hay que

asegurar que las funciones de regulación de la batería (frente a sobrecarga y sobredescarga) se encuentren en los diferentes convertidores que constituyen el sistema. Hay que tener en cuenta también que algunos de los equipos presentados están diseñados para trabajar con baterías, por lo que su utilización como sistemas de regulación para ser posteriormente conectados a la red eléctrica, sin baterías, puede presentar particularidades no contempladas en esos equipos, por lo que podrían tener comportamientos distintos de los esperados.

ACOPLAMIENTO EN ALTERNA: INVERSOR

El acoplamiento en alterna es válido tanto para configuraciones basadas en baterías, en las que el acoplamiento puede ser en continua (a la batería, como se ha descrito en el apartado anterior) o en alterna (a la red formada por el inversor de la batería), como para aplicaciones de conexión a red en alterna, ya sea la red convencional o configuraciones basadas en grupos electrógenos (ver Capítulo 8: Mercado de aerogeneradores de pequeña potencia).

En lo que respecta al convertidor electrónico para acoplar el aerogenerador en alterna es similar para todas las aplicaciones mencionadas, y se describirá a continuación, pero hay que tener en cuenta dos salvedades importantes para el caso del inversor para acoplamiento en alterna en aplicaciones aisladas:

- En las especificaciones del inversor, hay que asegurar que el rango de variación de la tensión y de la frecuencia, así como la calidad de red, permitidos sea suficientemente amplio como para trabajar en sistemas aislados, que puede ser mayor que en conexión a una red convencional.
- En sistemas aislados con baterías con acoplamiento en alterna, existirán dos tipos de inversores que hay que diferenciar con claridad: el inversor de la batería, que es el encargado de formar la red y puede gestionar los demás componentes; y el inversor de conexión en alterna (o los inversores, si hay más de un generador).

Un aspecto importante en la conexión a red en alterna de aerogeneradores de pequeña potencia es la disponibilidad de convertidores electrónicos. Se revisan a continuación las tendencias en cuanto a utilización de convertidores del lado de red.

DISEÑADOS PARA AEROGENERADORES DE PEQUEÑA POTENCIA

Dentro de los inversores diseñados expresamente para la conexión a red de aerogeneradores de pequeña potencia, hay que diferenciar aquellos de uso general de aquellos propios de fabricantes concretos.

Propietarios

La tendencia en inversores propios de fabricantes concretos es bien distinta: en los últimos años, son varios los fabricantes de aerogeneradores de pequeña potencia que incluyen inversores de diseño y uso propios, tales como el Skystream (de la empresa XZERES) o el Windera (de la empresa ENNERA, ver Figura 6). Esta tendencia hacia el uso de convertidores propios podría venir marcada

por la mencionada escasez de inversores de uso general para minieólica, y marca una dirección completamente distinta de lo que ocurre en otros sectores, como la fotovoltaica, donde la utilización de convertidores de uso general es la práctica más común.

Comerciales

Dentro de los inversores de uso general, el Windy Boy de SMA fue durante un tiempo una referencia a nivel internacional. Cuando SMA dejó de fabricar el Windy Boy, Power One pasó a convertirse en una referencia. Tras ser adquirida esta compañía por ABB, se ha anunciado que no los fabricará más, ofreciendo tan sólo soporte técnico. Por lo tanto, la presencia de inversores de uso general a nivel comercial empieza a ser escasa.

DISPONIBLES COMERCIALMENTE PARA USO COMÚN EN GENERACIÓN DISTRIBUIDA (FOTOVOLTAICA)

Dada la escasez de inversores propiamente eólicos y la abundancia de inversores fotovoltaicos (FV) en el mercado, una posibilidad muy apetecible es adaptar los inversores FV para su uso en eólica. Aunque el lado de red del convertidor puede ser considerado común para ambas tecnologías, no ocurre lo mismo para el lado del generador, donde los algoritmos de control son diferentes. Las diferencias se derivan del comportamiento distinto de ambas tecnologías de generación. En particular, aspectos como la característica tensión – intensidad, o los tiempos de respuesta, son diferentes en una y otra tecnología, lo que debe ser tenido en cuenta en la configuración de los equipos. La variabilidad de los recursos correspondientes (radiación y viento) también son diferentes, lo que puede afectar también a los parámetros de operación del inversor.

Y no hay que olvidar tampoco que, mientras que un generador FV puede quedar en circuito abierto (en vacío) sin tener que sufrir daño alguno, muchos aerogeneradores de pequeña potencia no permitirán este modo de trabajo de manera continuado, bajo riesgo de sufrir daños importantes. Por ello, será necesario incorporar en estos casos un sistema de protección electrónico que evite que el aerogenerador permanezca en vacío, tal y como se describió anteriormente.

OTROS: BOMBEO

El acoplamiento entre el aerogenerador y el motor de inducción que acciona la bomba puede ser: mecánico, eléctrico, hidráulico y neumático. Dentro del acoplamiento eléctrico, se planea la posibilidad del acoplamiento directo y, más frecuentemente, a través de un convertidor electrónico. Dadas las características de esta aplicación, se hace especialmente atractivo el uso de un convertidor de frecuencia como convertidor electrónico. Un convertidor de frecuencia es un equipo diseñado para acoplar frecuencias de trabajo diferentes en sus extremos; esto es, permite trabajar con una frecuencia a la entrada y otra diferente a la salida. Su uso se halla tremendamente extendido para el control de motores de inducción, consiguiendo frecuencias y/o tensiones variables a partir de la frecuencia y tensión fijas de la red eléctrica.

Aprovechando el gran desarrollo tecnológico y el precio altamente competitivo alcanzados en estos equipos, se han utilizado para el acoplamiento entre aerogenerador y motor de inducción.

Un convertidor de frecuencia consiste, básicamente, en un rectificador que convierta la alterna en continua, seguido de un bus en continua donde suele existir un filtro y un condensador que estabiliza la tensión en continua y, finalmente, un equipo inversor que proporciona la señal de salida en alterna. Presentan unas posibilidades de programación muy variadas y sencillas.

La etapa rectificadora es no controlada (están diseñados para tener la red eléctrica convencional a la entrada) y, por ello, no regulan la tensión de entrada. Con objeto de mantener la tensión de entrada dentro de unos márgenes aceptables, puede aprovecharse la posibilidad de conectarse directamente al bus en continua, regulando la tensión en el bus en continua con una tarjeta reguladora (un comparador de tensión) y una resistencia de disipación, análogos a los utilizados en sistemas con baterías. La necesidad de la resistencia de disipación viene impuesta por la conveniencia de no dejar en circuito abierto el aerogenerador en caso de ausencia de carga.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Varios Autores. Desarrollo Tecnológico de Sistemas Aislados con Energía Eólica. Serie Ponencias. CIEMAT. 2003
- [2] Installation and Maintenance Manual. Windera S wind turbine. Ennera Energy and Mobility S.L. Code: I.H4.V10.3003, Version: 07
- [3] Legacy small wind inverters. Página web de ABB, accedida el 16 de noviembre de 2020. <https://new.abb.com/power-converters-inverters/wind-turbines/small-wind/legacy-small-wind-inverters-old>
- [4] Wind Interface. Página web de ABB, accedida el 16 de noviembre de 2020. <https://new.abb.com/power-converters-inverters/wind-turbines/small-wind/legacy-small-wind-inverters-old/wind-interface-15-kw-25-kw>
- [5] AURORA Wind Box Interface - INSTALLATION AND OPERATOR'S MANUAL, Rev. 4.0
- [6] TriStar MPPT (150V and 600V) Wind Charging Control Info. <http://support.morningstarcorp.com/wp-content/uploads/2019/08/TriStar-MPPT-150V-and-600V-Wind-Charging-Control-Info.pdf>, accedida el 16 de noviembre de 2020
- [7] C. Gangneux. Designing your own charge controller. First prototype for Wind Turbine installations in isolated áreas. 2017.
- [8] H. Piggot. How to build a wind turbine. 2003. <https://www.scoraigwind.com/pirate%20oldies/Hugh%20Piggott%20Axial-flow%20PMG%20wind%20turbine%20May%202003.pdf>

- [9] Wind Turbine Overvoltage Protection – Página web de Solarcity.
<https://s1.solacity.com/docs/Wind%20Turbine%20Overvoltage%20Protection.pdf>
- [10] L. Arribas, I. Cruz. Revisión de algunos aspectos relacionados con la integración en red de pequeños aerogeneradores. REGEDIS Soria, 2018

CAPÍTULO 5: NORMATIVA DE AEROGENERADORES DE PEQUEÑA POTENCIA

OSCAR IZQUIERDO, LUIS CANO, IGNACIO CRUZ, LUIS ARRIBAS

Unidad de Energía Eólica, CIEMAT, Av. Complutense 40 28040 Madrid (España).

NORMALIZACIÓN

La normativa ha sido uno de los campos de actividad más destacados en el sector de los aerogeneradores de pequeña potencia durante los últimos veinte años. La razón de ello es doble: por un lado, comenzó siendo la falta de normativa apropiada, dado que la normativa referente a la tecnología eólica había derivado hacia los grandes aerogeneradores; por otro lado, al no ser de obligado cumplimiento, los fabricantes no solían tener interés en certificar sus equipos de acuerdo a la normativa aplicable, puesto que el coste relativo del proceso de certificación resultaba inviable.

Con la actividad desarrollada en los últimos años en este sector, hoy en día se encuentra disponible una cantidad notable de normativa de aplicación y, gracias a los programas de fomento de esta tecnología en determinados países, que exigían que los equipos instalados estuvieran certificados de acuerdo a esta normativa, se ha conseguido cambiar la situación, existiendo un número importante de equipos comerciales que sí han sido certificados. En este capítulo se dan unas nociones básicas sobre estos aspectos normativos de pequeños aerogeneradores.

La normalización, también llamada estandarización, es la actividad que aporta soluciones, para aplicaciones repetitivas que se desarrollan, fundamentalmente, en el ámbito de la ciencia, la tecnología y la economía, con el fin de conseguir una ordenación óptima en un determinado contexto. La normalización favorece el progreso técnico, el desarrollo económico y la mejora de la calidad en la vida.

La normalización tiene como objetivo la elaboración de una serie de especificaciones técnicas, normas, que son utilizadas por las organizaciones, de manera voluntaria, como garantía para probar la calidad y la seguridad de sus actividades y productos. Fundamentalmente, con la normalización se persiguen 3 objetivos básicos:

- Unificación: para posibilitar el intercambio de mercancías y servicios a nivel internacional.
- Simplificación: para poder reducir el número de elementos y dejar únicamente los que realmente son precisos.
- Especificación: para dejar claras las condiciones que debe tener un bien o servicio y evitar de esta manera errores.

La normalización por sí misma, no logra un aumento de la calidad, sino que dicha mejoría sólo se logra cuando la norma recomendada es “alta”; esto significa que los requisitos constituyen una mejoría en relación con la práctica común.

Las ventajas de la normalización pueden clasificarse en tres grupos, según sean para los fabricantes, para los consumidores o usuarios y para las administraciones públicas.

- Para los fabricantes: Racionaliza variedades y tipos de productos; Disminuye el volumen de existencias en almacén y los costes de producción; Mejora la gestión y el diseño; Agiliza el tratamiento de los pedidos; Facilita la comercialización de los productos y su exportación; Simplifica la gestión de compras.
- Para los consumidores: Establece niveles de calidad y seguridad de los productos y servicios; Informa de las características del producto; Facilita la comparación entre diferentes ofertas;
- Para la Administración: Simplifica la elaboración de textos legales; Establece políticas de calidad, medioambientales y de seguridad; Ayuda al desarrollo económico; Agiliza el comercio.

NORMAS

Una Norma es un acuerdo documentado que contienen especificaciones técnicas y otros criterios precisos para su uso consecuente como reglas, directrices o definiciones, con el objetivo de asegurar que los materiales, productos, procesos y servicios sean apropiados a su fin (ISO, 1996).

Son de aplicación voluntaria, garantizan unos niveles de calidad y seguridad que permiten a cualquier empresa posicionarse mejor en el mercado y constituyen una importante fuente de información para los profesionales de cualquier actividad económica.

Las normas pueden ser de diferentes tipos según el organismo que los haya elaborado. En la clasificación tradicional de normas se distingue entre:

- Normas nacionales son elaboradas, sometidas a un período de información pública y sancionadas por un organismo reconocido legalmente para desarrollar actividades de normalización en un ámbito nacional.
- Normas regionales son elaboradas en el marco de un organismo de normalización regional (normalmente de ámbito continental) que agrupa a un determinado número de Organismos Nacionales de Normalización.
- Normas internacionales tienen características similares a las normas regionales en cuanto a su elaboración, pero se distinguen de ellas en que su ámbito es mundial.

ORGANISMOS DE NORMALIZACIÓN

El estudio y desarrollo de las normas es competencia de una serie de instituciones que tiene la potestad legal para su realización. A nivel internacional hay diversas instituciones (encargadas de elaborar las normas internacionales) entre las que podemos destacar, en el ámbito de los pequeños aerogeneradores, las siguientes:

- ISO: Organización Internacional para la Normalización. (International Standard Organization), institución internacional fundada en 1947, con sede en Ginebra, que está formada por 157 agencias de normalización de sus respectivos países y es la encargada de las Normas ISO, normas Internacionales y más importantes.
- IEC: Comisión Electrotécnica Internacional. (International Electrotechnical Commission). Es una organización de normalización en los campos: eléctrico, electrónico y tecnologías relacionadas. Fue fundada en 1906 y tiene su sede en Ginebra. Está integrada por los organismos nacionales de normalización, en las áreas indicadas, de los 83 países miembros.
- IEEE: Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos. (Institute of Electrical and Electronics Engineers)

A nivel nacional, cada país tiene su propia institución que elaboran sus normas nacionales. Como ejemplo tenemos las siguientes:

- España - AENOR: Asociación Española de Normalización y Certificación, es el único Organismo de Normalización en España, y como tal ha sido designado por el Ministerio de Economía, Industria y Competitividad ante la Comisión Europea. Difunde a través del boletín oficial del estado (BOE), las normas españolas que se identifican con las siglas UNE, que significa Una Norma Española.
- Alemania - DIN: Instituto Alemán de Normalización. (Deutsches Institut für Normung).
- Estados Unidos - ANSI: Organización Nacional de Normalización Norteamericana (American National Standards Institute).
- Gran Bretaña – BS: Organismo Británico de estandarización (British Standards Institution).
- Japón - JISC: Comité Japonés de normalización industrial (Japanese Industrial Standards Committee)

Estos Organismos están debidamente coordinados entre sí. En determinadas ocasiones (en muchas) existe una total coincidencia entre sus normas, como ocurre, por ejemplo, con la norma ISO 9000 (mundial), la EN 29000 (europea), UNE-EN ISO 9000 (española) que marca las normas sobre el control de calidad.

NORMAS IEC DE AEROGENERADORES DE PEQUEÑA POTENCIA

Al hablar de aerogeneradores de pequeña potencia, la IEC establece que un aerogenerador se considera de pequeña potencia cuando el área de barrido por su rotor es inferior a 200m^2 , lo que corresponde a un diámetro de 7,98 m.

Las normas IEC que aplican específicamente a aerogeneradores de pequeña potencia, y en las que se recogen los ensayos más importantes que hay que realizar sobre ellos, son las siguientes:

IEC 61400-2 PEQUEÑOS AEROGENERADORES

Esta norma se aplica a aerogeneradores con un área barrida del rotor menor o igual a 200m^2 , generando electricidad a una tensión inferior de 1000 V en corriente alterna o de 1500 V en corriente continua para aplicaciones en red y fuera de red. Su propósito es fijar un nivel apropiado de protección contra daños por riesgos causados en estos sistemas durante su vida útil planificada.

Esta norma concierne a todos los subsistemas de aerogeneradores de pequeña potencia tales como los mecanismos de protección, los sistemas eléctricos internos, los sistemas mecánicos, las estructuras soporte, las cimentaciones y la interconexión eléctrica con la carga. Un sistema de aerogenerador pequeño comprende la turbina eólica propiamente dicha, incluyendo la estructura soporte, el regulador de la turbina, el controlador de carga /inversor (si se requiere), el cableado y conectores, los manuales de instalación y de utilización y otra documentación.

Esta norma es similar a la Norma IEC 61400-1 Requerimientos de diseño, de aplicación a aerogeneradores de mayor tamaño; la simplifica y aporta cambios significativos para que sea aplicable a los aerogeneradores pequeños. Pueden modificarse cualquiera de los requisitos de esta norma si se puede demostrar apropiadamente que no se compromete la seguridad del aerogenerador. Tiene dos partes fundamentales:

- Evaluación del diseño: Recoge los requisitos mecánicos y técnicos que permiten garantizar la seguridad de los sistemas estructurales, mecánicos, eléctricos y de control de un aerogenerador y se aplica en su diseño, fabricación, instalación y mantenimiento y en los procesos de gestión de la calidad, junto con una documentación apropiada y suficiente.
- Ensayos de tipo: Las muestras de ensayo deben ser representativas del diseño, del tipo de aerogenerador o del componente. Deben utilizarse instrumentos calibrados y frecuencias de muestreo apropiadas. Debe presentarse un informe con una descripción completa de los métodos de ensayo, las condiciones de ensayo, las especificaciones de la máquina y los resultados de ensayo.

Los ensayos incluidos en esta norma se encuentran descritos en el Capítulo 6: Ensayos de aerogeneradores de pequeña potencia.

IEC 61400-11 TÉCNICAS DE MEDIDA DE RUIDO ACÚSTICO

Esta norma recoge los procedimientos de medida que permiten caracterizar las emisiones de ruido de un aerogenerador de una forma precisa y consistente con respecto al rango de velocidades del viento y de direcciones. La normalización de los procedimientos de medida facilitará las comparaciones entre diferentes aerogeneradores.

Estos procedimientos implican el uso de métodos de medida apropiados para la evaluación de la emisión de ruido en localizaciones próximas a la máquina, para evitar errores debidos a la propagación de sonido, pero lo suficientemente lejanas como para permitir una fuente de tamaño finito. Estos procedimientos comprenden las siguientes etapas:

- Localización de las posiciones de medidas acústicas
- Requisitos para la adquisición de datos acústicos, meteorológicos y operacionales
- Análisis de los datos obtenidos y del contenido del informe de datos;
- Definición de los parámetros específicos de emisión acústica.

Esta norma se aplica a aerogeneradores de cualquier tamaño y en el anexo F se describe un método para las mediciones de ruido simplificado que puede utilizarse para aerogeneradores de menos de 100 kW. El Ensayo de ruido se encuentra descrito en el Capítulo 6: Ensayos de aerogeneradores de pequeña potencia.

IEC 61400-12-1 MEDIDA DE CURVA DE POTENCIA DE AEROGENERADORES PRODUCTORES DE ELECTRICIDAD (ANEXO H)

El propósito de esta norma es suministrar una metodología uniforme que asegure consistencia, precisión y reproductividad en la medición y análisis de la curva de potencia de aerogeneradores (tanto grandes como pequeños).

La norma proporciona una guía en la medida, análisis e informes de ensayo de rendimiento de aerogeneradores. El Anexo H de esta norma recoge las particularidades en el ensayo de curva de potencia para pequeños aerogeneradores.

Una curva de potencia es una tabla o curva de valores de potencia de salida de un aerogenerador, que están corregidos y normalizados, y que son función de la velocidad de viento, medido todo ello según un procedimiento de medida bien definido. El Ensayo de curva de potencia se encuentra descrito en el Capítulo 6: Ensayos de aerogeneradores de pequeña potencia.

OTRAS NORMAS IEC

Está claro que la mayor parte de la normativa IEC existente ha sido elaborada para grandes aerogeneradores conectados a la red; esta situación actual es lógica si se tiene en cuenta el enorme desarrollo sufrido por esta tecnología eólica durante los últimos años. Sin embargo, la tecnología eólica de pequeña potencia, sólo porque es "tecnología eólica", se ve afectada de

forma general por la normativa aplicable a las turbinas eólicas más grandes, salvo en los tres casos descritos anteriormente, donde se especifican las peculiaridades de las normas para los pequeños aerogeneradores. Por lo tanto, las normas que, con carácter general, afectan también a la generación mini-eólica son:

- 61400-13: Medición de cargas mecánicas.
- 61400-14: Declaración del nivel aparente de potencia acústica y los valores de tonalidad.
- 61400-21: Medida y evaluación de las características de la calidad de suministro de los aerogeneradores conectados a la red.
- 61400-23: Ensayos estructurales de palas a escala real.
- 61400-24: "Protección contra el rayo.
- 61400-25-1: Comunicaciones para la monitorización y el control de parques eólicos. Descripción general de principios y modelos.

OTRAS NORMAS DE AEROGENERADORES DE PEQUEÑA POTENCIA

Además de la normativa IEC aplicable a la generación eólica que se ha descrito en el anterior epígrafe, existen otras normas que pueden ser de aplicación, según el lugar y la aplicación donde se instale el equipo. A continuación se revisan algunas de las principales.

NORMAS NACIONALES

En los países donde se han llevado a cabo los planes de desarrollo más importantes de promoción de la mini-eólica se han elaborado normas nacionales, de obligado cumplimiento para aquellos aerogeneradores que quieran acogerse a las ayudas incluidas en los planes de promoción. Los estándares actuales relacionados con los pequeños aerogeneradores son:

- Reino Unido: RenewableUK Small Wind Turbine Standard - 15 de enero de 2014 (anteriormente conocido como BWEA Small Wind Turbine Performance and Safety Standard) Válido para el área barrida del rotor $<200 \text{ m}^2$ ($D < 16 \text{ m}$)
- Estados Unidos: Estándar de rendimiento y seguridad de turbinas eólicas pequeñas AWEA de la Asociación Americana de Energía Eólica AWEA. AWEA 9.1-2009. Válido para el área barrida del rotor $< 200 \text{ m}^2$ ($D < 16 \text{ m}$)
- Dinamarca: Agencia Danesa de la Energía. Certificación de MINIEÓLICA BEK 73 (Bekendtgørelse om teknisk certificeringsordning for vindmøller). Realizado por DTU Wind Division ($P < 25 \text{ kW}$ o $A < 200 \text{ m}^2$) Versión simplificada para el área barrida del rotor $< 40 \text{ m}^2$.
- Japón: Estándares de la Asociación Japonesa de Turbinas de Viento Pequeñas. Estándar de rendimiento y seguridad de turbinas eólicas pequeñas JSWTA0001 Válido para el área

barrida del rotor < 200 m², P < 20 kW Los estándares incluidos en los puntos 2, 3, 4 y 5 son todos ellos basados en la norma IEC 61400-2.

NORMAS PARA AEROGENERADORES EN SISTEMAS AISLADOS

También se está desarrollando alguna actividad en la IEC para el desarrollo de la IEC 62257 “Recomendaciones para sistemas de pequeña potencia e híbridos con energías renovables en aplicaciones de electrificación rural”, (recomendaciones de la serie para sistemas de energía renovable, en el TC82), que abarcan una lista completa de recomendaciones sobre los principales aspectos del diseño de sistemas de energía renovable, aerogeneradores como uno de los posibles componentes.

NORMAS PARA AEROGENERADORES CONECTADOS A RED

La aplicación consistente en conectar a la red eléctrica convencional los aerogeneradores de pequeña potencia es relativamente novedosa, frente a la aplicación tradicional de los mismos conectados a sistemas aislados de la red. Esta aplicación, que en algunos países como EE.UU. o Reino Unido ya resulta frecuente, cuenta con la particularidad que supone la conexión a la red eléctrica convencional. A modo de resumen, se exponen a continuación algunos de los ámbitos normativos que afectarían a la conexión:

- Generales
 - Marcado CE, en el entorno de la CE
 - Reglamento Electrotécnico para Baja Tensión
- Leyes de regulación del sector eléctrico
 - Regulación local:
 - Procedimiento para la conexión a red de pequeña potencia
- Regulación del Autoconsumo
 - Códigos de red: Para sistemas conectados a red, es necesario cumplir con los requisitos propios del país y/o de la IEC.

OTRAS NORMAS

Aparte de las normas, recomendaciones y estándares mencionados, hay muchas referencias normativas que se aplican o pueden aplicarse a pequeños aerogeneradores, cubriendo diferentes temas como aspectos medioambientales, condiciones de montaje (tanto en suelo como en edificios), gestión de residuos, etc. Estos aspectos muchas veces quedan recogidos en ordenanzas municipales.

CERTIFICACIÓN Y ETIQUETADO DE PEQUEÑOS AEROGENERADORES

Se necesitan procedimientos de prueba y evaluación acordados internacionalmente en el campo de la energía eólica pequeña para ayudar al desarrollo de la industria, fortalecer la confianza en la tecnología y prevenir el caos en el mercado. Mientras que el proceso de certificación de la generación eólica ha seguido su curso a través de la normativa elaborada dentro de la IEC, en el caso de la generación minieólica, a medida que aumenta el mercado de los pequeños aerogeneradores, se reconoció que los consumidores tienen la necesidad de comparar fácilmente los diferentes productos disponibles en el mercado, de forma similar a como ocurría con algunos electrodomésticos. En una colaboración entre la Tarea 27 del Acuerdo Eólico de la AIE y el MT2 del TC88 de la IEC, se ha desarrollado la implementación de etiquetas de turbinas eólicas pequeñas para consumidores y actualmente forma parte de la norma IEC 61400-2 Ed. 3, en su Anexo M.

CERTIFICACIÓN DE PEQUEÑOS AEROGENERADORES

La certificación es un procedimiento mediante el cual un tercero otorga una garantía escrita (certificado) de que un pequeño aerogenerador está en conformidad con una o varias normas. El tercero que lleva a cabo la certificación se llama organismo de certificación o certificador y no puede tener ningún interés directo en el producto o servicio que certifica. El certificador puede realizar la inspección o contratar a otro organismo para que la haga.

Los organismos de certificación tiene que estar acreditados por un organismo de acreditación que suele ser una institución gubernamental o paraestatal que evalúa el cumplimiento de las directrices establecidas. Cada país suele tener su organismo de acreditación: En España se llama ENAC (Entidad Nacional de Acreditación), en Alemania DakKS (*Deutsche Akkreditierungsstelle GmbH*), en Japón JAB (Japan Accreditation Board), en Estados Unidos ANAB (*ANSI National Accreditation Board*) y IAS (*International Accreditation Service*), en Gran Bretaña UKAS (*United Kingdom Accreditation Service*), etc.

Los organismos que establecen las normas también pueden acreditar a organismos de certificación específicos de su competencia. La acreditación garantiza el reconocimiento de los organismos de certificación a nivel internacional.

Para obtener la certificación de tipo, un pequeño aerogenerador debe superar satisfactoriamente los ensayos de funcionamiento y seguridad, duración, medida de ruido acústico y medida de curva de potencia. Estos ensayos deben ser llevados a cabo por laboratorios acreditados

ETIQUETADO DE PEQUEÑOS AEROGENERADORES

A partir de la necesidad de los consumidores de aerogeneradores de comparar fácilmente los diferentes productos disponibles en el mercado, se elabora una Etiqueta de consumo de energía eólica para aerogeneradores de baja potencia. Esta iniciativa surgió dado los altos costos de una certificación de diseño de aerogenerador hace que sea imposible solventar tales gastos para máquinas de bajo costo. Para tener una noción de tal proporción, los costos de certificación superan 20:1 al costo de un aerogenerador de baja potencia instalado. A su vez esto no tiene el

mismo impacto en aerogeneradores de alta potencia ya que la proporción se invierte y los riesgos asociados a la falla de una de las partes de estos aerogeneradores es muy alta.

El objetivo de generar esta etiqueta es que el consumidor pueda tomar decisiones de compra a partir de información relevante a partir de un resumen de datos obtenidos en ensayos de métricas comparables: producción de energía estimada, indicador de durabilidad, parámetros acústicos. Y de fomentar pruebas de alta calidad haciendo que la etiqueta se base en estándares internacionales.

Una etiqueta de certificación es un símbolo que indica que el cumplimiento de las normas recogidas en ella ha sido verificado. El objetivo de una etiqueta es que los resultados que muestra sean comparables con los de otras etiquetas, independientemente del organismo que la publica.

La norma IEC 61400-2, en su Anexo M, recoge todas las directrices para el etiquetado de pequeños aerogeneradores: requisitos para etiquetar, contenido y colocación de las etiquetas, etc. Además establece que debe resumir los resultados de los tres siguientes ensayos que han de documentarse en los informes de medida que cumplen con los requisitos de la Norma ISO/IEC 17025:

- Ensayo de duración según la Norma IEC 61400-2
- Ensayo de curva de potencia según la Norma IEC 61400-12-1
- Ensayo de ruido acústico según la Norma IEC 61400-11

La norma recomienda suministrar una etiqueta para cada modelo de aerogenerador. Esta etiqueta debe basarse en ensayos realizados según las normas IEC correspondientes en uno o varios aerogeneradores individuales (de igual modelo pero números de serie diferentes).

La etiqueta puede fijarse sobre los contenedores de embarque o embalajes, sobre el aerogenerador mismo, en los manuales de utilización y de mantenimiento y en los documentos comerciales relativos a este modelo de aerogenerador.

Resultados de ensayo	
Fabricante	Fabricante
Modelo	Modelo
Energía Anual de Referencia <small>a la velocidad del viento media de 5 m/s, la producción real variará dependiendo de las condiciones del lugar</small>	### kWh/año
Nivel de Potencia Acústica Declarada <small>a 8 m/s</small>	## dB(A)
Clase de Aerogenerador de Ensayo <small>(I-IV o S para Especial)</small>	II
Ensayado por	Organismo de Ensayo
Fecha de Publicación <small>(Año-Mes-Día)</small> <small>Para más información, véase</small>	2011-03-04
www.ieawind.org	

Figura 1. Ejemplo de etiqueta (Fuente IEC 61400-12-1)

CONCLUSIONES

El creciente interés en las cuestiones normativas de los pequeños aerogeneradores debería afectar positivamente a la mayor integración de esta tecnología con mayores garantías de fiabilidad, rendimiento y funcionamiento silencioso. La certificación es una actividad costosa y este costo constituye un obstáculo para su aplicación, pero algunas soluciones están sobre la mesa con el fin de facilitar el proceso compartiendo el conocimiento, la simplificación y la adecuación de los procedimientos, etc. Dado que el control de la calidad del mercado no es posible hoy en día en este sector, es deseable que todo tipo de pequeña subvención a los aerogeneradores se vincule a los requisitos para la homologación de acuerdo a las normas, por parte de terceros, como el camino hacia el aseguramiento de la calidad.

CAPÍTULO 6: ENSAYOS DE AEROGENERADORES DE PEQUEÑA POTENCIA

ANDRÉS ZAPPA, MARIANO AMADÍO

Departamento de Energías Renovables Patagonia, INTI, Ruta 7 km 5, Mercado Concentrador 8300,
Neuquén, (Argentina)

INTRODUCCIÓN

Un ensayo o prueba pueden ser considerados como una operación técnica que consiste en la determinación de una o más características de un determinado producto, en nuestro caso un aerogenerador evaluado mediante un procedimiento especificado o “método de ensayo”. Los métodos de ensayo son procedimientos documentados, generalmente estandarizados en alguna norma, que describen con detalle todos los aspectos que un analista debe ejecutar para obtener resultados de calidad.

En el ámbito de la energía eólica, la norma internacional IEC 61400 agrupa en 27 partes (algunas descritas en el Capítulo 5: Normativa de aerogeneradores de pequeña potencia) todos los aspectos de diseños y análisis de funcionamiento que debe cumplir un aerogenerador. En esta sección se detallarán los tres ensayos más relevantes con que cualquier pequeño aerogenerador debe contar para que el fabricante y el usuario final conozcan en profundidad características específicas clave de su funcionamiento.

En las siguientes sub secciones se profundizará en tres ensayos: Curva de potencia, Emisiones sonoras y Duración; que son detalladas en la norma IEC 61400 las partes 12-1, 11, y 2 cap. 13.4 respectivamente. Los tres ensayos indicados son los que se indican en el anexo M de la norma IEC61400-2 para el etiquetado de producto.

ENSAYO DE CURVA DE POTENCIA

El ensayo de curva de potencia consiste en obtener la curva de generación de potencia eléctrica en función de la velocidad de viento, y a su vez determinar la cantidad de energía que produciría un aerogenerador a lo largo de un año para una velocidad de viento determinada. Para ello se requiere que la realización de las mediciones de las condiciones meteorológicas a las que está expuesto el aerogenerador y su producción de energía sean simultáneas. Estos pasos serán descriptos a continuación y se encuentran resumidos en el siguiente diagrama de flujo.

Para determinar la curva de potencia, se inicia recopilando la información necesaria del equipo a ensayar, con esta información se realiza la configuración de los sistemas de medición y determinación de rangos de validez de las magnitudes medidas.

Posteriormente se determinan los sectores de exclusión, es decir, las direcciones de viento válidas. Por ejemplo, si el viento incide sobre el rotor del aerogenerador y aguas abajo se encuentra el anemómetro, la velocidad de viento que se mida será inferior a la que realmente está presente sobre el rotor. Por ello deben determinarse los sectores de medición en los cuales las mediciones sean representativas del viento que incide sobre el rotor.

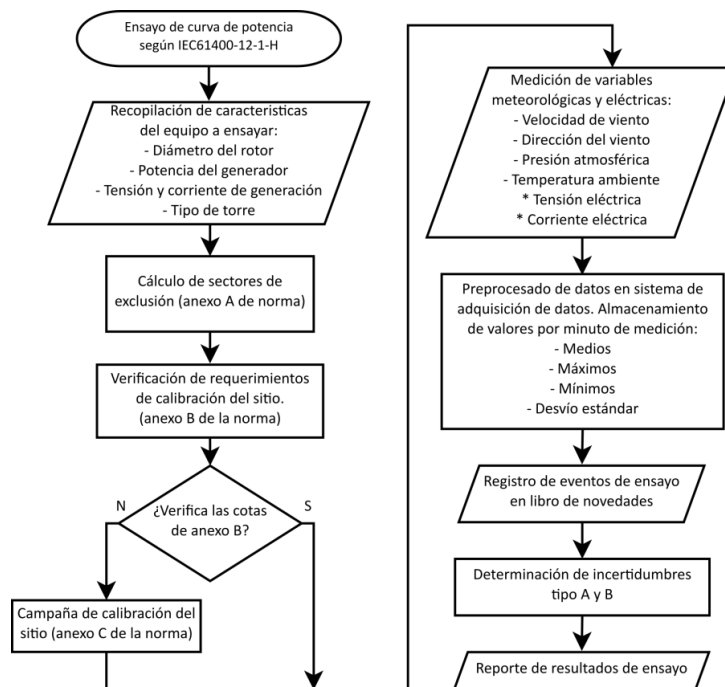


Figura 33. Diagrama de flujo proceso de determinación de curva de potencia.

El sitio se debe calibrar para corregir las distorsiones que pudieran haber sido provocadas por las características topográficas del terreno. Es decir, si hay accidentes topográficos pronunciados en la zona de ensayo, puede ocurrir que las mediciones del anemómetro no sean representativas del viento incidente sobre el rotor, lo cual se salva mediante una calibración del sitio.

Una vez que se cuenta con el sistema de medición configurado, se realizan las mediciones simultáneas de recurso eólico (velocidad de viento, dirección, presión y temperatura) y producción de energía eléctrica (tensión y corriente) a una frecuencia de 1 Hz.

Debido a que la cantidad de información recopilada es muy grande (se miden como mínimo 6 magnitudes por segundo), se realiza un promediado de los datos almacenando los resultados en períodos minutales. Esto permite obtener los primeros resultados del método de la curva de potencia, que son los *Scatter Plots* mediante los cuales se presentan los valores máximos, mínimos y promedio de la potencia generada en función del valor promedio de la velocidad de viento, para cada minuto de medición. Este gráfico es de particular interés debido a que permite observar los modos de funcionamiento del aerogenerador, se pueden discernir los momentos en que comienza la generación, cuando se activa el sistema de regulación, el valor máximo de potencia generada, las fluctuaciones en la generación, etc.

Para obtener la curva de potencia, que corresponde al promedio de las mediciones realizadas, es preciso realizar un filtrado de los datos medidos. Es decir, no tener en cuenta las situaciones en las cuales los registros no son válidos; por ejemplo una falla en el sistema de medición, o una parada de funcionamiento del aerogenerador por motivos ajenos al ensayo, o mediciones fuera de los rangos válidos de medición.

Toda medición se encuentra sujeta a variabilidades propias del proceso de medición. Esto implica que se deben determinar las incertidumbres del ensayo. En el anexo E de la norma se presenta una metodología para abordar este aspecto.

RESULTADOS DEL ENSAYO DE CURVA DE POTENCIA

Los resultados obtenidos de las mediciones para un ensayo a tensión nominal de 50,6 V, se presentan en la Figura 34 siguiente, conformando la “nube de puntos” o *Scatter Plot* correspondiente a la base de datos almacenada, donde por cada minuto de datos válidos se obtiene un valor de potencia promedio minutil, máxima, mínima y desvío estándar.

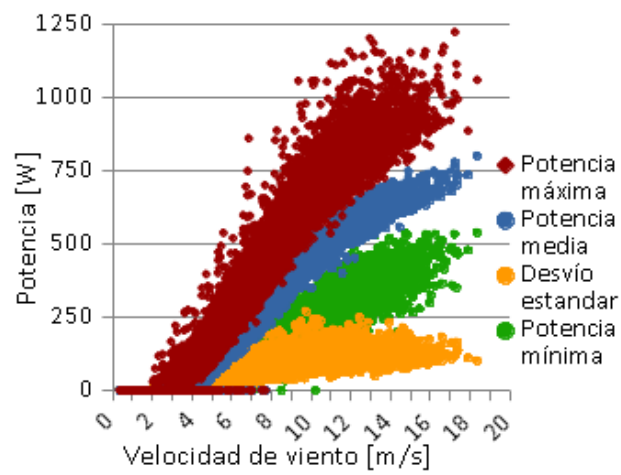


Figura 34. Dispersión de los datos minutilales

En la etapa de post procesamiento se obtiene la curva de potencia, mediante el promediado de los valores presentados en el *Scatter Plot*. Debido a que la densidad del aire influye en la energía cinética del viento, debe realizarse un proceso de normalización para que los resultados de la curva de potencia sean independizados de la particularidad de las condiciones meteorológicas (presión y temperatura) del momento del ensayo, y de este modo poder comparar las curvas de potencia realizadas en distintos sitios y momentos.

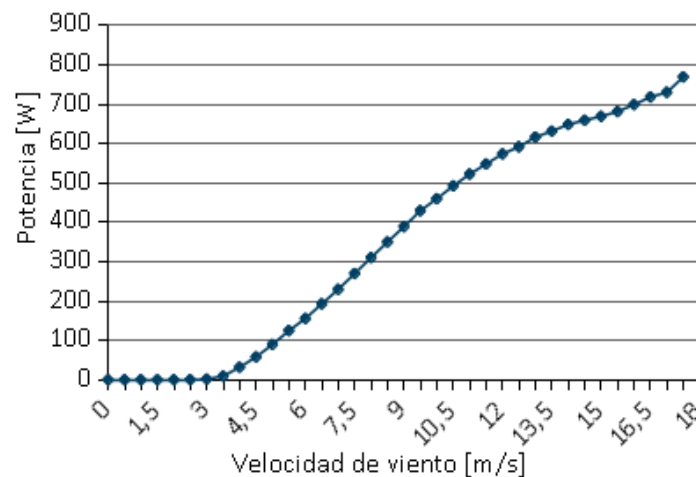


Figura 35. Curva de Potencia

RESULTADOS DERIVADOS DE LA CURVA DE POTENCIA

Coeficiente de potencia

Si se compara la potencia eléctrica generada con la potencia cinética del viento, se obtiene el coeficiente de potencia C_p , que brinda una indicación del desempeño del equipo. Recuérdese que el límite de Betz establece una cota de 59,6% de energía aprovechable, por lo que el C_p permite realizar una comparación del diseño de equipos. Un valor de C_p de los mejores equipos disponibles en el mercado suele ser del orden de 0,45, cabe tener en cuenta que el C_p incluye todos los subsistemas del aerogenerador (no solo el rotor, cuyo máximo posible es el límite de Betz).

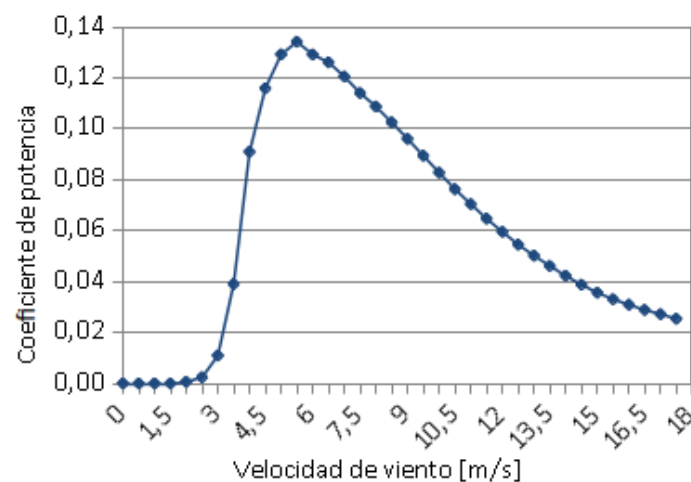


Figura 36. Coeficiente de Potencia frente a velocidad de viento

Estimación de energía anual producida

Conociendo la Curva de Potencia es posible realizar una estimación de la producción de energía para unas condiciones de viento determinadas. Para poder realizar una rápida y genérica comparación de desempeño relativo a la generación de energía, se aplica la curva de potencia a unas condiciones de viento estandarizadas. Ésta se denomina distribución de Rayleigh para la función de probabilidad de la velocidad de viento, y se realiza el cálculo de la producción de energía que realizaría el aerogenerador a distintas velocidades medias de viento con esta distribución. En la Tabla 3 se presentan resultados de la estimación de producción de energía anual para distintas velocidades medias de viento.

PROMEDIO DE VELOCIDAD ANUAL DE VIENTO A LA ALTURA DEL EJE (RAYLEIGH) [m/s]	EAP MEDIDA (CURVA DE POTENCIA MEDIDA)	INCERTIDUMBRE EN EAP [kWh]	INCERTIDUMBRE EN EAP [%]	EAP EXTRAPOLADO (CURVA DE POTENCIA EXTRAPOLADA)	Estado
4,00	635,91	34,27	5,39	635,91	Completo
5,00	1.108,31	43,66	3,94	1.108,32	Completo
6,00	1.619,08	51,17	3,16	1.619,19	Completo
7,00	2.126,42	56,55	2,66	2.128,38	Completo
8,00	2.599,77	60,08	2,31	2.611,62	Completo
9,00	3.012,21	62,23	2,07	3.051,16	Completo
10,00	3.342,43	63,40	1,90	3.430,28	Completo
11,00	3.580,13	63,83	1,78	3.735,41	Completo

Tabla 3. Estimación de la energía anual producida

EJEMPLO DE APLICACIÓN DEL ENSAYO DE CURVA DE POTENCIA.

Con los resultados obtenidos pueden realizarse comparaciones de características de equipos, permitiendo al usuario una selección adecuada de acuerdo a las particularidades del recurso disponible.

En la Figura 37, se presentan los *scatter plots* de dos equipos con módulo de potencia similar, el equipo A (a la izquierda) declara una potencia nominal de 1,1 kW y el equipo B una potencia nominal de 1,2 kW.

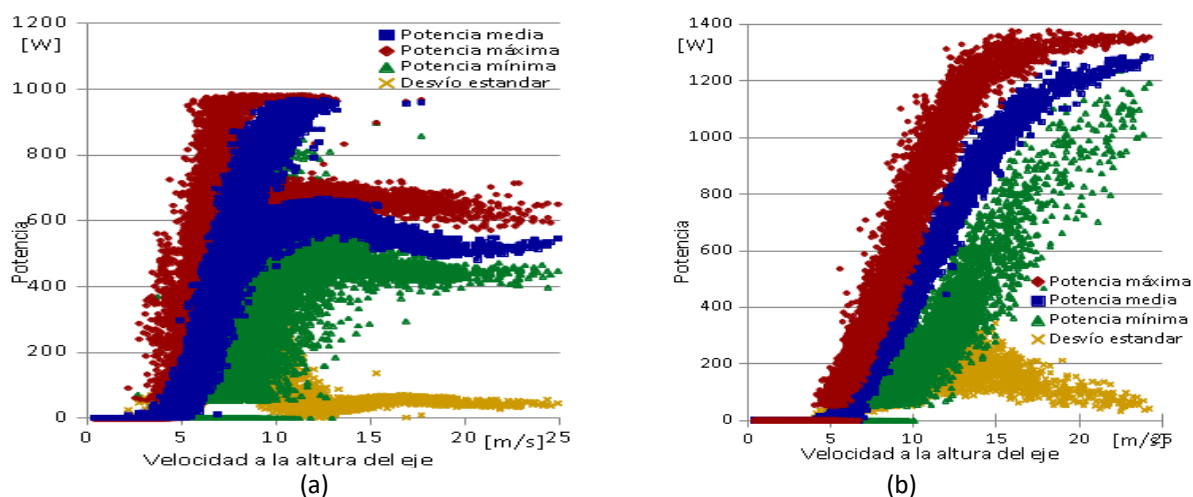


Figura 37. Scatter Plots de dos equipos de módulo de potencia similar: (a) 1,1 kW; (b) 1,2 kW

Puede observarse que el equipo A no llega a generar la potencia declarada de 1,1 kW, asimismo se observa que cuando la velocidad de viento es superior a los 12 m/s aproximadamente, la potencia media tiende a ser de 500 W, esto se debe que se activa un modo de protección que limita la velocidad de giro.

Por otro lado en el equipo B, se logra superar la potencia nominal declarada, pero a una velocidad de aproximadamente 17 m/s, se observa también que la curva de potencia es creciente con el

aumento de la velocidad de viento, indicando que el sistema de regulación no consigue controlar cabalmente la generación de energía.

Al realizar los promedios indicados en el proceso de “bineado”, para potencia y velocidad de viento, se obtiene la curva de potencia. En Figura 38 se presentan las curvas correspondientes a estos equipos, superpuestas para facilitar la comparación:

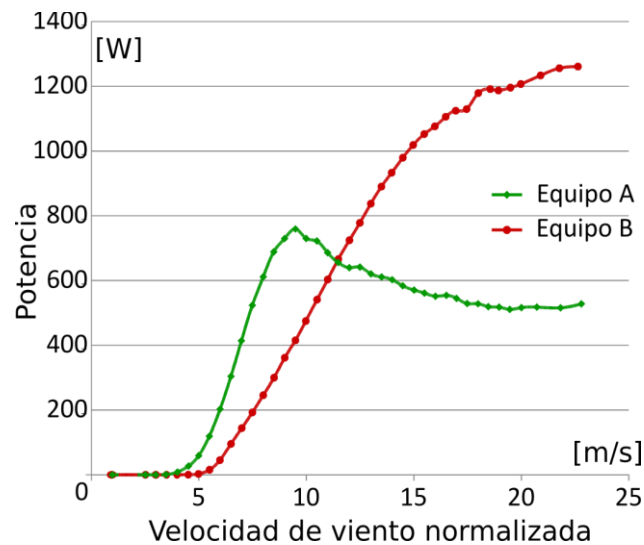


Figura 38. Curvas de potencia de los equipos A y B

Mediante el gráfico de las curvas de potencia se observa que la potencia promedio máxima del equipo A no llega a los 800 W, pero se pudo observar en el *scatter plot* que la potencia máxima, antes del comienzo de la regulación era cercana a 1 kW. Este descenso se debe a la histéresis que posee el sistema de protección, el cual tiene una demora en la desactivación cuando disminuye la velocidad de viento. También se observa que la curva del equipo A se desarrolla con velocidades de viento inferiores a las del equipo B, teniendo como consecuencia una mayor generación del equipo A que el B en sitios con menor velocidad media. En los siguientes cuadros se presenta la generación de energía de ambos equipos:

PROMEDIO DE VELOCIDAD ANUAL DE VIENTO A LA ALTURA DEL EJE (RAYLEIGH) [m/s]	EAP MEDIDA (CURVA DE POTENCIA MEDIDA)	INCERTIDUMBRE EN EAP [kWh]	INCERTIDUMBRE EN EAP [%]
4	867,00	178,00	20,53 %
5	1.658,00	255,00	15,38 %
6	2.398,00	311,00	12,97 %
7	2.990,00	348,00	11,64 %
8	3.424,00	369,00	10,78 %
9	3.713,00	380,00	10,23 %
10	3.878,00	382,00	9,85 %
11	3.942,00	378,00	9,59 %

Tabla 4. Estimación de generación de energía anual para el equipo A. Densidad de referencia: 1,225 kg/m³ y velocidad máxima del viento: 25 m/s

PROMEDIO DE VELOCIDAD ANUAL DE VIENTO A LA ALTURA DEL EJE (RAYLEIGH) [m/s]	EAP MEDIDA (CURVA DE POTENCIA MEDIDA)	INCERTIDUMBRE EN EAP [kWh]	INCERTIDUMBRE EN EAP [%]
4	309,00	106,00	34,30 %
5	769,00	162,00	21,07 %
6	1.387,00	222,00	16,01 %
7	2.095,00	280,00	13,37 %
8	2.818,00	331,00	11,75 %
9	3.491,00	374,00	10,71 %
10	4.061,00	406,00	10,00 %
11	4.499,00	428,00	9,51 %

Tabla 5. Estimación de generación de energía anual para el equipo B. Densidad de referencia: 1,225 kg/m³ y velocidad máxima del viento: 25 m/s

Como puede observarse, el equipo A prácticamente triplica la generación de energía para sitios con una velocidad media anual de 4 m/s, mientras que el equipo B supera al A en sitios con altas velocidades medias. Esto se debe principalmente al tamaño del rotor, donde el equipo A posee un rotor de 3,3 m de diámetro mientras que el B es de 2,15 m.

Por lo mencionado se puede concluir que la elección del equipo adecuado, depende principalmente del sitio en el cual se va a instalar, debiendo el equipo cumplir con los requisitos de clase de viento a la cual va a ser expuesto. Si bien para determinar la clase es necesario realizar una certificación de equipo, mediante el etiquetado y el ensayo de duración, puede determinarse la clase de viento a la cual el equipo se desempeña satisfactoriamente.

ENSAYO DE EMISIONES SONORAS

Este ensayo permite caracterizar las emisiones de ruido de un aerogenerador, conforme a los procedimientos definidos en la norma IEC 61400 parte 11. Esta metodología busca garantizar la coherencia y la precisión de las mediciones acústicas y no acústicas: variables meteorológicas y de energía (si el caso lo requiere). Como resultados de la ejecución de este ensayo, se obtendrán niveles de potencia acústica aparente con ponderación tipo A, espectros en frecuencia, y tonalidad a valores de velocidad de viento de operación del aerogenerador. En el siguiente diagrama de flujo se indican las principales etapas de las que consiste el ensayo de emisiones sonoras.

Las mediciones se realizan en lugares cercanos a la turbina con el fin de minimizar la influencia de los efectos del terreno, e interferencia con otros obstáculos. Para ello se utiliza una distancia de referencia basada en las dimensiones del generador y la altura a la cual está situado. Se deben hacer las mismas verificaciones de sectores de exclusión, calibración de sitio, etc. cómo fueron detalladas para curva de potencia.

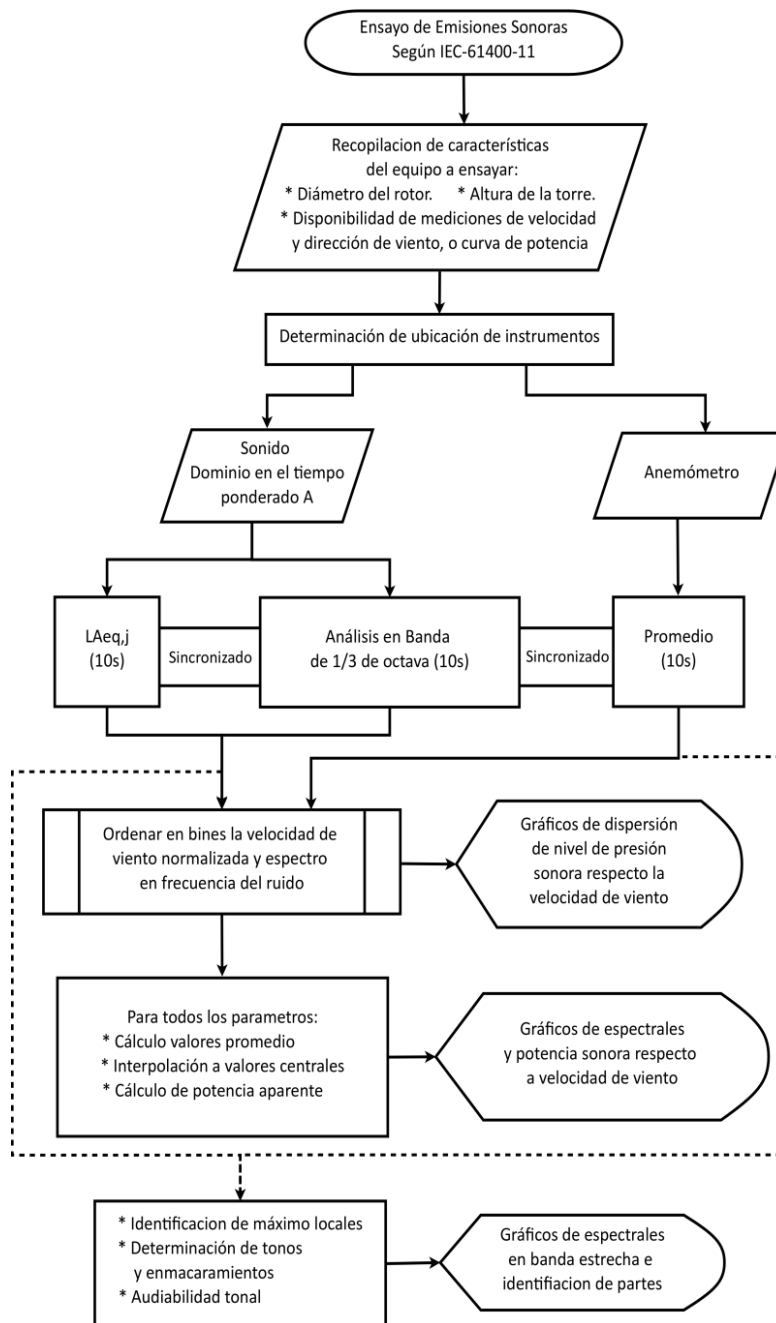


Figura 39. Diagrama de flujo de las etapas ensayo de emisiones sonoras

MEDICIONES ACÚSTICAS

Las mediciones acústicas proporcionarán la información necesaria para determinar la emisión de ruido del aerogenerador, como resultados se obtendrán:

- El nivel de potencia acústica aparente;
- Los niveles por bandas de tercio de octava;
- La tonalidad;

Para la medición del nivel de potencia acústica aparente, se realiza una ponderación tipo A; representándose como dB(A) cuando el nivel sonoro esté ponderado en A.

Como la medición de ruido en campo varía permanentemente, es necesario promediar la energía del sonido por un período de tiempo. A este se lo denomina nivel continuo equivalente, se expresa como Leq_T , y se usa para cuantificar el nivel de presión sonora promedio en un período de tiempo T. A diferencia del ensayo de curva de potencia, los promedios de las mediciones durante el ensayo de ruido en un aerogenerador se establecen un período de tiempo 10 segundos para que sea representativa la variación del ruido generado por aerogenerador con la variación de la velocidad de viento.

Además de medir el nivel de presión sonora, es necesario medir simultáneamente el espectro en frecuencia continuo equivalente ponderado tipo A del ruido del aerogenerador. El espectro debe ser medido en bandas de tercio de octava con frecuencias centrales de 20Hz a 10kHz, como mínimo. Para la determinación de tonalidad también se deberá contar mediciones en banda angosta a cada valor de bin de velocidad del viento.

Como durante la medición de ruido del aerogenerador se incluyen a la influencia de otras fuentes, es necesario realizar una nueva medición sin que el aerogenerador esté funcionando. A esta, se la denomina medición de ruido de fondo y se utiliza para discriminar el ruido que emite solo el aerogenerador. A la medición del ruido obtenida del aerogenerador funcionando (sumadas las otras fuentes de ruido) se la denomina medición de ruido total.

MEDICIONES NO ACÚSTICAS

Los datos de velocidad del viento, recogidos de la misma manera que en curva de potencia (cada 1 Hz), serán sincronizados con las mediciones acústicas y promediadas aritméticamente durante el mismo período (10 s).

La dirección del viento se promedia durante el mismo período que las mediciones de ruido. La dirección se deberá garantizar que los lugares de medición se mantienen dentro de los $\pm 45^\circ$ y verificar si la medición se encuentra dentro de un sector de exclusión o no.

PROCESADO DE MEDICIONES

Las mediciones realizadas y sincronizadas de velocidad de viento, nivel de presión sonora y el espectro en banda de tercios, para el ruido total y el ruido de fondo, deben ser tratadas para que cumplan los lineamientos establecidos por la norma.

Para el caso de la velocidad de viento debe corregirse en función de la rugosidad de la superficie, altura del anemómetro, etcétera. Para ello esta velocidad se ajusta teniendo en cuenta la altura del eje del rotor de aerogenerador, la altura de anemómetro (si son diferentes), la rugosidad del terreno y un valor de referencia. Los valores de rugosidad se encuentran tabulados en la norma

IEC 61400 y en distintas bibliografías especializadas en capa límite atmosférica y rugosidad del terreno. Luego los valores de velocidad de viento se agrupan por el método de bineo.

Para el ruido, luego de obtener las mediciones con ponderación tipo A y en períodos de 10 s, se hace un ajuste entre el espectro de banda de tercios con los niveles de presión sonora, a este proceso la norma IEC 61400-11 lo denomina espectro normalizado.

Correcciones debidas al ruido de fondo

Todos los niveles de presión sonora medidos se deben corregir por la influencia del ruido de fondo presente a la hora de hacer la medición. Para ello, los niveles de presión sonora para el ruido total y el ruido de fondo: normalizados, promediados e interpolados a los valores centrales de los bins de velocidad de viento; se deberán restar (al ruido total se le debe restar el ruido de fondo) para obtener el ruido producido solo por el aerogenerador. Esto se realiza para cada frecuencia del espectro de ruido obtenido. En la Figura 40 se observan en un gráfico de dispersión todas las mediciones obtenidas de ruido respecto la velocidad de viento, se encuentran diferenciados el ruido total del ruido de fondo. Por otro lado también se encuentra presente en la gráfica los valores promedios al centro del bin para cada caso. En la Figura 41 se presentan resultados de mediciones que muestran el espectro en frecuencia para distintas velocidades de viento.

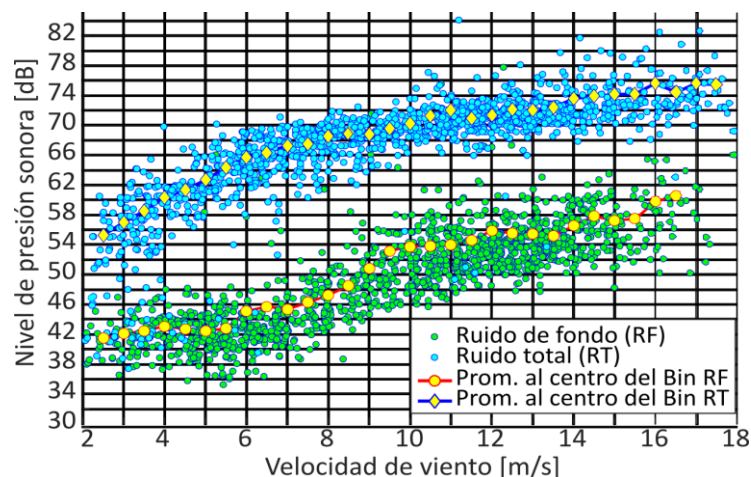


Figura 40. Dispersión de niveles de presión sonora respecto velocidad de viento

Nivel de potencia acústica aparente

Los valores obtenidos hasta el momento corresponden al sitio donde se encontraba ubicado el micrófono en nuestro parque de ensayo. Para obtener el ruido emitido por el aerogenerador como si fuese una fuente puntual de ruido, se proyecta los valores medidos como niveles de energía (sonora para cada frecuencia) en un área de referencia (S_0) de un metro cuadrado a la distancia R_1 del aerogenerador, luego puede presentarse este resultado como una curva de Nivel de Potencia Acústica Aparente en función de la velocidad de viento, como se muestra en la Figura 42.

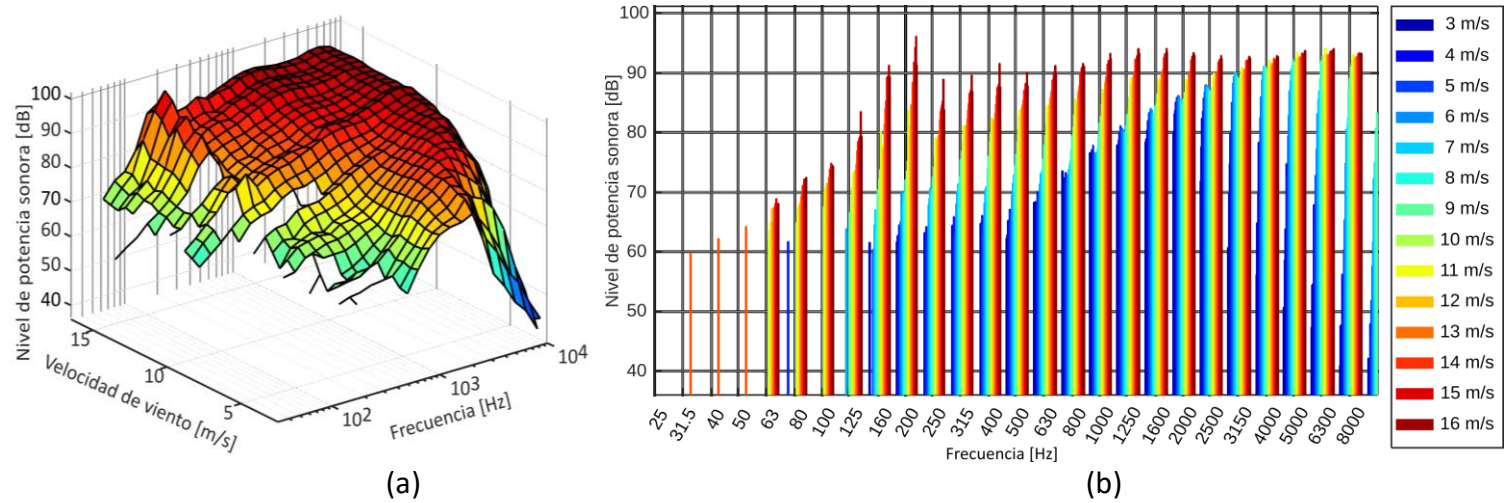


Figura 41. Representación en frecuencias y velocidad de viento del nivel de presión sonora: (a) en 3D y (b) en barras

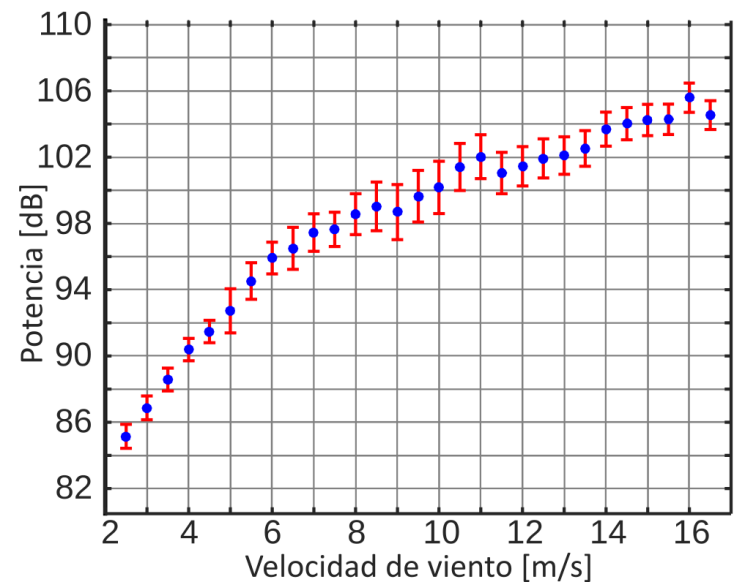


Figura 42. Nivel de potencia sonora aparente

Tonalidad

Es de interés, y así también lo define la IEC61400-11, determinar y medir la presencia de tonos en el ruido a diferentes velocidades de viento. Este análisis tonal abarca las mismas velocidades de viento que utilizadas para el cálculo de la potencia sonora.

El nivel de presión sonora del tono es determinado como la suma de la energía de todas las líneas espectrales dentro de la banda crítica.

Para tener una comparación con el análisis de ruido el aerogenerador, se debe garantizar que los tonos no se originan desde el ruido de fondo. Luego se determina la tonalidad como diferencia entre los niveles de presión sonora del tono y del enmascaramiento y realizando el promedio de todas las muestras para cada velocidad de viento.

RESULTADOS

La norma IEC 61400-11 detalla explícitamente que información debe ser incluida en el reporte o informe de ensayo, como características del aerogenerador y modos de operación, características del sitio donde se realizó el ensayo, información de los instrumentos y sistema de medidas, y los datos obtenidos con sus respectivas incertidumbres.

Con respecto a los datos obtenidos se informan en forma de tabla y gráficos como se ilustraron durante la presentación de los datos medidos.

Además, para el caso de los aerogeneradores de baja potencia se debe incluir en el informe un mapa de inmisión indicando gráficamente como varia el nivel de presión sonora a distintas velocidades de viento a medida que nos alejamos del aerogenerador. Esto se determina realizando una extrapolación calculando una propagación esférica en función de la distancia, a partir de los valores de potencia sonora aparente obtenida anteriormente. En la Figura 43 se presenta un mapa de inmisión, el cual indica el nivel de presión sonora aparente en función de la distancia al aerogenerador, para distintas velocidades de viento.

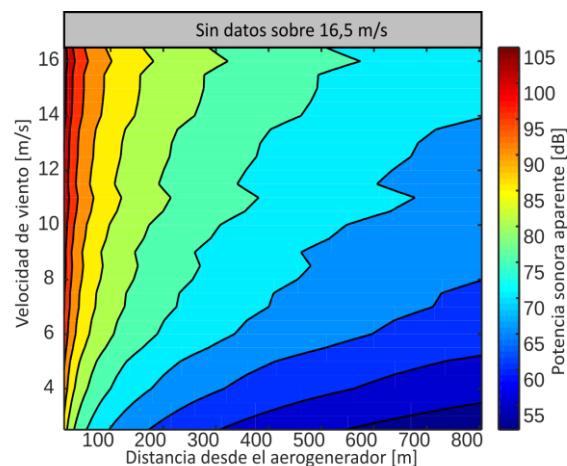


Figura 43. Mapa de inmisión

ENSAYO DE DURACIÓN

En ensayo de duración se establece para determinar los siguientes aspectos de la turbina eólica:

- integridad estructural y degradación ambiental (corrosión, deformaciones, grietas).
- calidad de la protección medioambiental de aerogenerador.
- comportamiento dinámico de la máquina.

PROCESO DE MEDIDA

Para lograr estas determinaciones, se debe implementar un sistema de medición de curva de potencia, según IEC61400-12, y realizar las mediciones por un período de tiempo de forma tal que se cumplan las siguientes condiciones:

- operación fiable durante el período de ensayo.
- al menos 6 meses de operación
- al menos 2500 horas de producción de energía con vientos de cualquier velocidad.
- al menos 250 horas de producción de energía con vientos de 1,2 Vave y superiores.
- al menos 25 horas de producción de energía con vientos de 1,8 Vave y superiores.
- al menos 10 minutos en vientos superiores a 2,2 Vave y superiores, pero no menor a los 15 m/s, durante los cuales la máquina debe estar en funcionamiento normal.

Para definir la operación fiable de la máquina, se deben cumplir las siguientes condiciones:

- fracción de tiempo de operación de al menos 90%.
- no ocurrencia de fallos graves ni en la turbina ni en los componentes del sistema de la turbina.
- inexistencia de desgastes, corrosiones, o daños significativos en los componentes de la turbina.
- inexistencia de degradaciones significativas de la producción de potencia a velocidades de viento comparables.

Para determinar la fracción de tiempo operacional, se clasifican y cuantifican los registros de medición, indicando los eventos en los que ocurra alguna anomalía en las condiciones normales de medición. Dicha clasificación es:

- TT tiempo total del período considerado.
- TN tiempo durante el cual se sabe que la turbina no está en operación.
- TU tiempo durante el cual el estado de la turbina es desconocido.
- TE tiempo que está excluido del análisis.

El índice de factor operacional se obtiene mediante la siguiente operación:

$$O = \frac{T_T - T_N - T_U - T_E}{T_T - T_U - T_E} \cdot 100\% \quad (1)$$

Con la información compilada de la producción energética discriminada por velocidad de viento, con los valores obtenidos del factor operacional e incorporando el registro de velocidad de ráfaga máxima, se confecciona un cuadro resumen de ensayo con el siguiente formato:

MES	$V > V_{\text{cut-in}}$	$1,2 \cdot V_{\text{ave}}$	$1,8 \cdot V_{\text{ave}}$	$2,2 \cdot V_{\text{ave}}$	RÁFAGA MÁX [m/s]	INTENSIDAD DE TURBULENCIA [%]	T_T [hs]	T_U [hs]	T_E [hs]	T_N [hs]	O [%]
General	5661,33	611,50	51,33	440,00	-	-	5018,67	0,00	45,50	78,17	98,44
1	303,00	63,33	19,00	30,00	24,26	2,04	253,50	0,00	0,00	0,00	100,00
2	579,50	81,50	3,83	0,00	23,19	1,06	504,83	0,00	0,00	0,00	100,00
3	588,00	70,33	2,50	10,00	31,97	2,49	554,33	0,00	7,17	0,00	100,00
4	524,17	63,17	0,67	0,00	19,35	0,80	505,17	0,00	0,00	0,00	100,00
5	412,83	35,67	0,17	0,00	18,58	20,95	454,33	0,00	0,00	78,17	82,80
6	467,67	21,33	0,00	0,00	16,77	Inf	367,00	0,00	5,17	0,00	100,00
7	321,50	25,33	0,33	0,00	19,53	4,10	268,83	0,00	2,17	0,00	100,00
8	420,17	40,33	1,17	0,00	21,58	8,90	329,67	0,00	0,00	0,00	100,00
9	210,50	38,33	10,00	180,00	28,81	3,57	194,83	0,00	0,00	0,00	100,00
10	520,50	42,00	7,00	220,00	31,63	2,59	355,17	0,00	3,50	0,00	100,00
11	477,17	79,33	5,83	0,00	21,49	3,00	399,83	0,00	0,00	0,00	100,00
12	450,00	41,67	0,83	0,00	21,88	3,81	420,50	0,00	27,50	0,00	100,00
13	386,33	9,17	0,00	0,00	15,08	Inf	410,67	0,00	0,00	0,00	100,00

Tabla 6. Resumen de resultados de ensayo de duración

RESULTADOS

La aparición o inexistencia de degradación en la producción de potencia, se observa mediante la presentación de un gráfico de producción de potencia en función del tiempo, agrupado en distintas velocidades de viento (bins). La Figura 44 ilustra lo descrito.

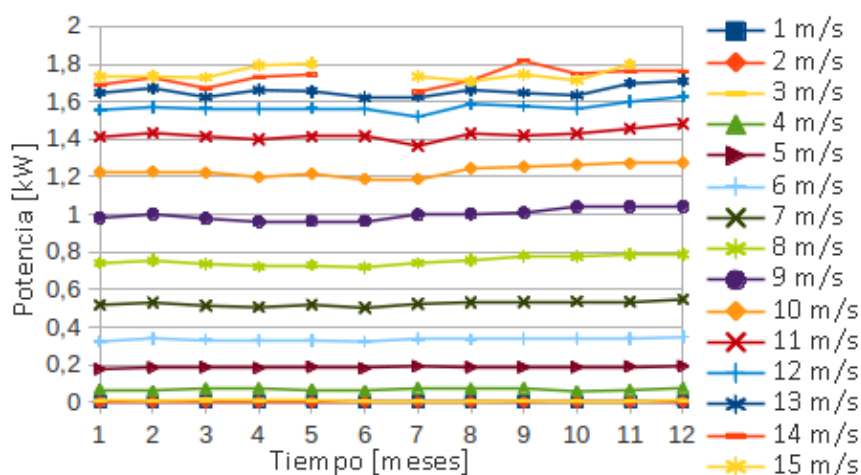


Figura 44. Degradación de curva de potencia en el tiempo

CONCLUSIONES

Se presentaron las metodologías de los ensayos de Curva de Potencia, Emisiones Sonoras y Duración. Estos son los ensayos requeridos para la emisión de la etiqueta de producto indicada en el anexo M de la norma IEC61400-2-3edición.

El ensayo de curva de potencia consiste en la medición simultánea de variables eléctricas y meteorológicas, que luego de un procesamiento estadístico de las mediciones permite obtener una curva de potencia eléctrica generada en función de la velocidad de viento. Con la curva obtenida y los datos característicos del aerogenerador se deriva el coeficiente de potencia, que describe el desempeño de la máquina a diversas velocidades de viento. Otra de los resultados derivados de la curva de potencia es la estimación de la generación anual de energía, quizás uno de los factores más importantes en la elección de un aerogenerador, debido a que este resultado es el que permite valorizar el desempeño de la máquina y elaborar flujos de fondo para la evaluación de proyectos.

Respecto al ensayo de emisiones sonoras, se describieron las características de las magnitudes que se miden y la metodología de pre y pos procesamiento de información que permite caracterizar al aerogenerador.

Finalmente, se describen los requisitos y resultados que brinda el ensayo de Duración. Básicamente este ensayo surge como una simplificación de los requisitos normativos y de ensayos que se solicitan a aerogeneradores de alta potencia, para ser aplicado a baja potencia. Se busca describir el comportamiento de la máquina, obtener resultados cuantificables respecto a la operatividad/confiabilidad de la misma y verificar el mantenimiento de estas características en el tiempo.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] International Standard IEC61400-12-1 “Wind energy generation systems - Part 12-1: Power performance measurements of electricity producing wind turbines” Edition 1.0 (2005) IEC, Geneva, Switzerland.
- [2] International Standard IEC61400-11 “Wind turbines - Part 11: Acoustic noise measurement techniques” Edition 3.0 (2012) IEC, Geneva, Switzerland.
- [3] International Standard IEC61400-2 “Wind turbines - Part 2: Small wind turbines” Edition 3.0 (2013) IEC, Geneva, Switzerland.
- [4] International Energy Agency IEA Wind 2011 “Recommended Practices for Wind Turbines Testing and Evaluation, 12 Consumer label for small wind turbines”, Edition 2011
- [5] Oliva R. “Estación meteorológica de construcción modular orientada a la prospección eólica en Argentina” Thesis for: Magister en Energías Renovables UNSa/UNPSJB. DOI: 10.13140/RG.2.2.24096.33289

AGRADECIMIENTOS

La preparación de este documento estuvo apoyada por proyectos con financiación INTI, ERANET-LAC y CYTED.

CAPÍTULO 7: APLICACIONES: INTEGRACIÓN DEL AEROGENERADOR EN EL SISTEMA

ANDRÉS ZAPPA¹, MARIANO AMADÍO¹, LUIS ARRIBAS²

¹ Departamento de Energías Renovables Patagonia, INTI, Ruta 7 km 5, Mercado Concentrador 8300, Neuquén, (Argentina)

² Unidad de Energía Eólica, CIEMAT, Av. Complutense 40 28040 Madrid (España).

INTRODUCCIÓN

Los generadores eólicos también pueden conectarse en conjunto con otras fuentes de energía formando parte de un sistema híbrido, permitiendo mucha más robustez y aumentando la versatilidad al sistema como solución energética. En este capítulo se verán distintos sistemas de generación o dispositivos que pueden acompañar a un generador eólico en una instalación. Por ejemplo, en una zona con alta radiación solar y vientos frecuentes, se puede conectar paneles solares (fotovoltaicos) y generadores eólicos con el objetivo de cubrir las demandas de energía eléctrica en momentos en donde hay sol, pero no viento y viceversa. En el mismo sentido, los generadores eólicos pueden conectarse con grupos electrógenos alimentados con combustibles fósiles, evitando el consumo de estos combustibles en los momentos en que hay viento disponible. De esta manera, si se requiere de energía ininterrumpida es habitual instalar sistemas híbridos (como es el caso de los sistemas de comunicaciones, que se consideran un servicio crítico).

En el caso de los generadores eólicos interconectados a la red (no suele haber necesidad de acumular energía en baterías), se deben incorporar medidores bidireccionales y de protecciones eléctricas para evitar que se genere energía cuando se interrumpe el suministro de la red (el funcionamiento en isla), entre otros aspectos de seguridad.

Dentro de las tecnologías involucradas más comunes en los sistemas híbridos, son: la eólica de baja potencia, solar fotovoltaica y mini hidráulica. También se pueden encontrar casos con biogás y biomasa, siempre dependiendo del recurso disponible en el lugar donde se requiere la instalación y la viabilidad del proyecto.

Actualmente el tipo de energía renovable que cuenta con un mayor nivel de desarrollo en lo que se refiere a alimentación de sistemas aislados de pequeña potencia es sin duda la energía solar fotovoltaica. La solución fotovoltaica ha conseguido transmitir una imagen de fiabilidad y calidad de la instalación siendo aceptada a todos los niveles (profesional, usuario, decisión) como una solución válida; que combinándose con la energía eólica permite paliar limitaciones de la fotovoltaica en cuanto a suministrar grandes cantidades de energía.

CONFIGURACIÓN DE SISTEMAS BASADOS EN ACUMULACIÓN ELECTROQUÍMICA

Si se hiciera foco en una instalación híbrida eólica-solar aislada, sin posibilidad de contar con la red eléctrica, se debe tener en cuenta que la señal eléctrica entregada por el panel fotovoltaico es corriente continua de tensión variable frente a cambios en los niveles de radiación solar. En cambio un generador eólico entrega una corriente alterna de una tensión y frecuencia variables proporcionales a la velocidad de giro del rotor, lo que hace indispensable una adecuación de esta señal eléctrica para pasarla a corriente continua.

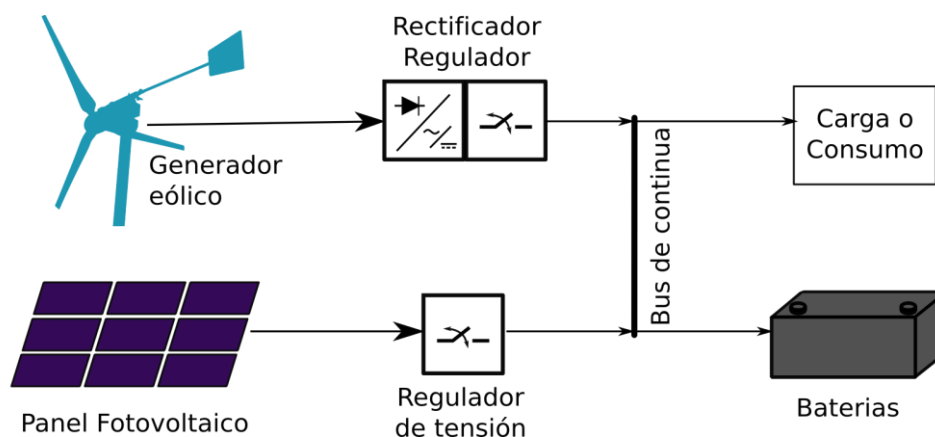


Figura 45. Esquema general de sistema eólico-solar

Si bien las señales eléctricas del panel fotovoltaico, las baterías y el generador eólico (luego de la adecuación) trabajan en corriente continua, estas deben ser de la misma tensión para formar el “bus de corriente continua”. En estos casos luego de la salida del panel fotovoltaico como del generador eólico la señal eléctrica continua debe ser regulada y, conectada junto con las baterías, se entrega esa energía a la carga o consumo.

Los sistemas de adecuación de energía, los sistemas de control que gestionan el flujo de energía hacia el consumo o disipar los excesos a resistencias, o bien los inversores de corriente (CC/CA) son detallados en el capítulo anterior.

Algunos de los elementos que complementan, o bien, que forman parte del sistema híbrido junto al generador eólico (el generador eólico ya ha sido descrito previamente en capítulos anteriores), se describen a continuación:

PANEL FOTOVOLTAICO

Los paneles solares fotovoltaicos están basados en dispositivos semiconductores que convierten directamente la luz del sol en electricidad en corriente continua. Aunque esto permitiría su conexión directa a la batería, se suele incluir un regulador para realizar una gestión de carga adecuada y así proteger el estado de la batería y maximizar su vida útil.

La célula solar es el elemento básico de un generador fotovoltaico y se agrupan para formar un módulo fotovoltaico, típicamente de 0,5-1 m² de tamaño, 50-100 Wp de potencia pico. Las células

generalmente están encapsuladas en un material protector transparente y típicamente alojadas en un bastidor de aluminio permitiendo una amplia gama de módulos comercialmente disponibles para las distintas aplicaciones fotovoltaicas. Actualmente, la mayor parte de los sistemas FV utilizan módulos de Silicio mono-cristalino, o bien policristalino. Si bien se han conseguido eficiencias de conversión de más del 30% en células solares con sistemas de concentración, la eficiencia típica de los módulos utilizados está entre 11 y 13%.

Los módulos FV no tienen partes móviles, son altamente seguros, de larga vida y requieren poco mantenimiento. Los módulos FV son de larga duración con garantías que abarcan hasta 20 años.

LAS BATERÍAS

En aplicaciones aisladas el uso de bancos de baterías es indispensable si se desea disponer de energía para cargas controladas por el usuario en los momentos en que el viento y la radiación son insuficientes o bien para nivelar la energía entregada por el recurso con los requerimientos de los consumos.

Los tipos de baterías, o también llamados acumuladores, más utilizados son de plomo-ácido, pero también se suelen encontrar de Níquel-Cadmio, Níquel-Hidruro metálico, de iones de Litio, entre otras.

La batería consiste en una o más celdas electro químicas que pueden convertir en corriente eléctrica, la energía química almacenada. El elemento constructivo básico de la batería se la denomina celda electroquímica y consta de electrodos: positivo o ánodo y negativo o cátodo; y de electrolíticos que permiten que los iones se muevan entre los electrodos. Cada celda trabaja con tensiones nominales muy bajas (dependiendo del tipo de batería) y con capacidades de almacenamientos proporcionales a su dimensión física, por esta razón es necesario conectarlas con configuraciones serie-paralelo para proporcionar niveles de voltaje, corriente de entrega y capacidad deseada.

Pero la batería no solo desempeña una evidente misión de sistema de acumulación: también desempeña un papel decisivo en el funcionamiento del sistema, estabilizando la tensión del bus CC. Ya se ha visto que la mayor parte de los aerogeneradores de pequeña potencia no son capaces de mantener la tensión de salida estable por sí mismos; por ello, es necesario que algún elemento ajeno al aerogenerador estabilice la tensión. Puede hacerse mediante el control, pero en este tipo de sistemas de pequeña potencia tradicionalmente se han utilizado controles sencillos, que no desempeñan esta función. Así que es la batería la encargada de mantener el rango de tensión de trabajo del aerogenerador dentro de unos límites aceptables.

GRUPO ELECTRÓGENO

Estos dispositivos ampliamente utilizados cuando hay déficit en la generación de energía eléctrica de algún lugar realizándolo a través de un motor de combustión interna. Este desempeña una solución válida como fuente de energía auxiliar o de apoyo.

Existen equipos cargadores-inversores que arrancan automáticamente el grupo electrógeno cuando la demanda de energía es mayor que la entregada por el sistema renovable.

APLICACIONES DE SISTEMAS BASADOS EN ACUMULACIÓN ELECTROQUÍMICA

Se presentan los casos donde la presencia de energía eólica es más típica, así como las peculiaridades de cada configuración y su relación con la presencia de dicha energía eólica. Las aplicaciones que no figuran en esta descripción, están englobadas en la visión general como sistema híbrido, viniendo definida la solución óptima por el recurso eólico y el recurso solar, así como por los consumos y la calidad de servicio requerida.

SISTEMAS CON AEROGENERADORES MUY PEQUEÑOS.

Los denominados aerogeneradores muy pequeños (normalmente de potencia menor de 500W) se usan para cargar la batería, pero no en aplicaciones de producción eléctrica como tal, sino para proporcionar poca potencia de mucho valor añadido, tales como iluminación o telecomunicaciones.

Sorprende el elevado número de este tipo de máquinas que se venden (decenas de miles de unidades al año) siendo ésta, con mucha diferencia, la aplicación de sistemas aislados con energía eólica de mayor implantación a escala mundial. Estos sistemas se usan principalmente en barcos, caravanas, y aplicaciones remotas. En estos casos, aunque solo sea por no tener que desplazar las pesadas baterías para su carga, el coste del sistema queda justificado.

En cuanto al uso en el mundo de la Electrificación rural, la idea de los Sistemas Eólicos Domésticos (WHS, *Wind Home Systems*) convive con los ya consagrados Sistemas Solares Domésticos (SHS, *Solar Home systems*), ya establecidos como la solución más veces utilizada para la pre-electrificación con renovables. La inclusión de energía eólica en estos sistemas, no obstante, no pretende sustituir el módulo fotovoltaico por el pequeño aerogenerador, sino más bien el incluir el pequeño aerogenerador en el SHS, para dotar al sistema de un mayor aporte energético con un bajo coste.

SISTEMAS DE MUY ALTA FIABILIDAD.

Para tratar los sistemas de muy alta fiabilidad, hay que definir la probabilidad de pérdida de carga (LOLP, del inglés *Loss Of Load Probability*), parámetro directamente relacionado con la medida de la fiabilidad del sistema. La LOLP representa el tiempo que el sistema de generación no ha sido capaz de satisfacer la demanda, respecto al tiempo total de análisis. Si bien en aplicaciones para viviendas se admiten valores de LOLP de 10^{-2} , para aplicaciones más exigentes, donde se precisa más fiabilidad, los valores de LOLP que se exigen al sistema son del orden de 10^{-4} . Conseguir estos niveles de calidad de suministro solo con renovables no es sencillo, debido a la variabilidad de los recursos. Las posibles opciones se resumen a continuación:

- Sólo FV: Llegar a tan altas calidades normalmente supone aumentar el coste del sistema de forma no asumible
- Solo eólica: normalmente no se puede llegar a tan altas calidades
- Eólico/FV: suele ser la opción más viable, tanto técnica como económicamente.

La combinación de las dos tecnologías, la eólica y la solar, se refuerzan mutuamente en una base estacional, principalmente. Por ello, la unión de ambas aporta una mayor fiabilidad a la instalación. A medida que el consumo aumenta, el tamaño relativo del generador solar disminuirá, debido a su mayor coste comparado con el eólico.

- Telecomunicaciones

En aplicaciones de telecomunicación, la altura y lo despejado del lugar que necesita la antena propicia la selección de lugares de alto potencial eólico, con lo que la solución se presenta como muy apropiada. Y esto, unido a lo remoto de los emplazamientos, lo que dificulta las tareas logísticas, favorece a la opción con energía renovable como solución óptima para alimentar los equipos.

- Electrificación rural: Centros de Salud...

La razón por la que esta aplicación es incluida en el apartado de aplicaciones de alta fiabilidad es la Cadena de Frío: es un sistema de gente y equipos presente en casi todos los países que intentan mantener vacunas a la temperatura adecuada conforme distribuyen los fabricantes a las localidades donde se administran. La falta de seguridad dentro del rango especificado de temperatura (entre 0 °C y 8°C), desde el punto de fabricación hasta el punto de utilización, es crítica para la misión de la Cadena de Frío. Una vez que las vacunas han sido expuestas a las temperaturas fuera de este rango, su potencia se pierde para siempre. Esta particularidad es la que normalmente motiva que esta aplicación, la de los centros de salud, requiera una fiabilidad de suministro tan elevada. Si además cuenta con servicio de cirugía, tratamientos de emergencia, nacimientos o atención de maternidad, la necesidad de la alta fiabilidad será todavía más evidente.

SISTEMAS INDIVIDUALES DE MAYOR POTENCIA: ACTIVIDADES PRODUCTIVAS.

Presenta las siguientes peculiaridades respecto al sistema genérico visto hasta ahora:

- Se trata de sistemas individuales (un único usuario) de potencia relativamente alta, para el tipo de sistemas de los que estamos hablando.
- Ya aparecen cargas de cierta potencia, correspondientes a un cierto nivel de industrialización de baja potencia, como motores, arcones frigoríficos y pequeña maquinaria.

- Aplicaciones productivas: Granjas, hoteles, etc.

Las aplicaciones productivas son uno de los campos donde las instalaciones con energía eólica suponen una alternativa importante. Y la razón para ello hay que buscarla en el incremento en potencia que llevan consigo estos sistemas.

Además, esta buena adecuación de la eólica con aplicaciones productivas no es exclusiva de los sistemas del mundo desarrollado: una de las motivaciones que está haciendo que las organizaciones que llevan a cabo programas de electrificación en países en vías de desarrollo miren a los sistemas con eólica, es precisamente la limitación que presenta la energía fotovoltaica a la hora de proporcionar una cantidad de energía de cierta importancia, a un coste asumible.

- Electrificación rural: Cargador de baterías

Todavía una batería de coche de plomo-ácido convencional es una fuente barata y fiable de energía eléctrica para pequeñas aplicaciones en viviendas de muchas partes de países en vías de desarrollo (comunidades remotas, islas, etc.). Incluso la pequeña cantidad de energía (en torno a 1 kWh) que estas baterías almacenan puede mejorar suficientemente la calidad de vida de estas áreas, dando así acceso a la gente a iluminación eléctrica, TV/radio, y otras comodidades. Es práctica común para los habitantes de zonas rurales en países en vías de desarrollo adquirir suministro eléctrico cargando baterías de 12 voltios, 50-100 amperios en pequeñas redes alimentadas por un grupo diesel. La mayor ventaja de una estación de carga de baterías centralizada es que puede suministrar servicio eléctrico a un segmento de la población de ingresos muy bajos. El uso de estaciones de carga de baterías con energía eólica representa una alternativa a las estaciones convencionales alimentadas con un grupo diesel en muchos países en vías de desarrollo en el mundo.

SISTEMAS CON DIVERSOS USUARIOS: MINI-REDES

Presenta las mismas características que los sistemas individuales de mayor potencia (se suele ir a una tensión del bus DC mayor) pero con una particularidad que los hace muy diferentes: existen varios usuarios. Esta distinción obliga a:

- Encontrar una forma de gestionar la energía de manera colectiva
- Tendido de cableado en función de la distancia
- “Profesionalización” del mantenimiento

Cobra aquí especial importancia la existencia en todo el mundo de un gran número de mini-(y no tan mini-) redes donde la inclusión de energías renovables puede tener sentido. Y este es el punto donde se entronca con los sistemas eólico-diesel: si la potencia de la instalación es mayor de 50 kW, seguramente interese estudiar la posibilidad del eólico diesel como solución (también influirá

si ya existe el grupo diesel, y qué tipo de grupo es). De esta forma, puede afirmarse que en un rango desde centenas de vatios hasta el orden de algún megavatio, existe una solución con renovables apropiada para cada caso.

CONFIGURACIÓN DE SISTEMAS BASADOS EN GRUPOS ELECTRÓGENOS

A igual modo que la sección anterior se describirán brevemente los componentes utilizados para sistemas híbridos eólico-diésel.

ACUMULACIÓN DE ENERGÍA

Anteriormente se describió las distintas tecnologías existentes de acumulación de energía, y el tipo utilizado en sistemas eólico-diésel con alta penetración de eólica es el denominado de corto plazo (menor a 1 minuto). Este permite filtrar las rápidas variaciones del viento y dotar al sistema suministro eléctrico durante el tiempo que demora en arrancar el grupo electrógeno. Si hubiese buen viento solo funcionaria el eólico. Los sistemas eólico-diésel con baja penetración de eólica no necesitan acumulación ya que el grupo electrógeno se encuentra funcionando en forma permanente.

Existen sistemas eólico-diésel que utilizan baterías como sistema de acumulación de corto plazo, pero resulta interesante analizar también la utilización de los volantes de inercia como acumulación a corto plazo en sistemas eólico-diésel de alta penetración eólica. Existen dos filosofías de utilización de volantes de inercia:

- Volantes muy pesados, metálicos, girando relativamente a bajas vueltas: entre 3.000 y 5.000 rpm; (no es raro que giren solidarios con el motor diésel). Estos no necesitan control alguno pues el balance de potencia es mecánico en función de las vueltas, pero el rango de velocidades permitidas es pequeño y la frecuencia eléctrica de la red depende directamente de la velocidad de giro. La frecuencia tiene un rango admisible limitado.
- Volantes ligeros, que incluyen materiales compuestos, girando a altas revoluciones (entre 30.000 a 50.000 rpm). Estos necesitan de un convertidor electrónico para conectarse a la red eléctrica (del sistema eólico-diésel) y un sistema de control que regule el momento que deben entregar o absorber potencia al sistema. El rango de velocidades de giro permitido es mucho mayor (el convertidor electrónico desacopla la velocidad de giro de la frecuencia eléctrica de la red), con lo que las posibilidades de utilización de la energía acumulada son mayores. Pero tiene por contra que el control es mucho más sofisticado.

CONTROL

El sistema de control o control supervisor del Sistema Eólico-Diésel coordina y supervisa la operación del Sistema con control distribuido, es decir que permite que los componentes del sistema usen sus propios sistemas de regulación y control para salvaguardar la operación. El control supervisor es responsable de seleccionar el mejor modo de operación del sistema,

teniendo en cuenta los objetivos específicos de operación, la configuración del sistema y las restricciones. El control supervisor también puede determinar las consignas de funcionamiento de los diferentes componentes para los diferentes modos de operación y enviárselos a los respectivos controladores locales.

La robustez del sistema se garantiza dejando que los componentes sean auto-regulados y con una estrategia de control flexible para adaptar a diferentes configuraciones y aplicaciones.

GRUPO ELECTROGENO

El mismo nombre del sistema, "Eólico-diésel", nos informa de la importancia del grupo diésel en el funcionamiento del sistema. A diferencia del grupo en los sistemas híbridos, donde desempeña una labor de apoyo y no forma parte de esencia de su funcionamiento, en los sistemas eólico-diésel el grupo electrógeno desempeña una labor fundamental: arranca la red eléctrica, mantiene la estabilidad eléctrica en gran parte de los modos de funcionamiento, y es parte imprescindible para garantizar un correcto funcionamiento del sistema.

CONSUMOS

En estos sistemas, se trata de pequeñas redes de distribución, con lo que los consumos son los típicos que se puedan encontrar en este tipo de redes. No obstante, se recomienda que aquellos consumos que puedan ser controlados por el control supervisor (cargas regulables), puedan ser gestionados por éste para una optimización de la gestión energética del sistema. Dentro de estos consumos se encuentran: bombeo de agua, plantas desalinizadoras, plantas de fabricación de hielo, sistemas de precalentamiento, etc.

APLICACIONES DE SISTEMAS BASADOS EN GRUPOS ELECTRÓGENOS

En cuanto a los sistemas eólico-diésel, puesto que sólo se suelen emplear en sistemas de cierta potencia (>50 kW), la gama de aplicaciones en cuanto a uso final queda prácticamente reducida a electrificación de núcleos rurales. Se presenta a continuación un ejemplo de sistema eólico-diésel de alta penetración eólica.

Ejemplo: Sistema eólico-diésel de Chorriaca

El proyecto Chorriaca [2] es un sistema híbrido impulsado desde el EPEN (Ente Provincial de Energía de Neuquén) con el objetivo de brindar a la una población de 600 habitantes energía eléctrica en forma ininterrumpida. Previo a la instalación de los aerogeneradores en el año 2013, el EPEN ya había erigido una torre de medición de viento en la zona en el año 2006 a para estudiar el recurso y analizar la viabilidad del proyecto.

Este proyecto está compuesto por tres aerogeneradores de 25 kW acoplados a un generador diésel de alta eficiencia a fin de complementar la producción de energía cuando la demanda es

superior a la capacidad de generación eólica. Los tres aerogeneradores son situados en la cima de una colina no lejos del pueblo.

La combinación de energía eólica y diésel se modula a través de un adecuado sistema de control. Como característica adicional, se incluyeron resistencias de disipación para los momentos en que la producción de energía eólica supera a la demanda. El sistema de control híbrido-generator diésel se encuentra en el parque de maniobras junto a la planta de energía existente, ubicado cerca del pueblo. La lógica del sistema de control es asegurar el máximo uso de energía eólica.

Los aerogeneradores se montan en una torre arriostrada de 18 m de altura y están conectados a la red mediante una línea eléctrica de baja tensión de 500 metros que se extienden desde la cima de la colina hasta la base, pasando por el control del sistema híbrido.

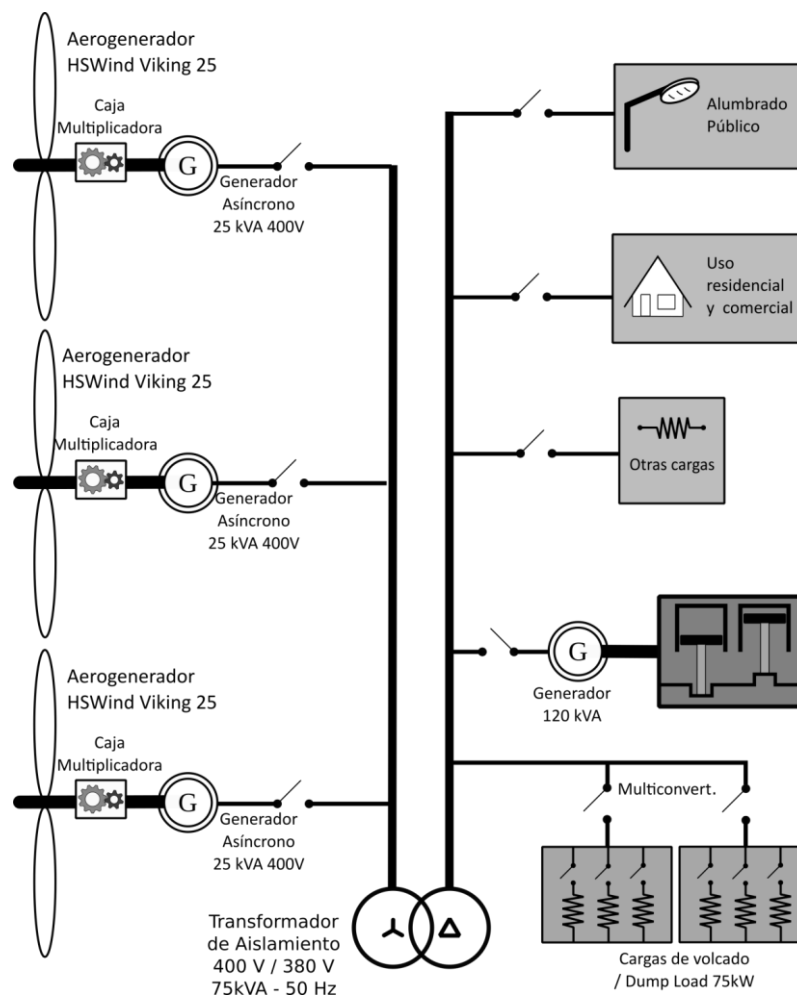


Figura 46. Esquema general del sistema eólico-diésel

Las unidades diésel existentes solo se utilizarán como respaldo del nuevo sistema híbrido en caso de cortes después de la puesta en servicio de la nueva central eléctrica. Con este diseño, la penetración anual del viento podría alcanzar un promedio 226.000 kWh / año durante el primer año de operaciones, lo que representa hasta un 44% de la demanda total.

Características del sistema híbrido:

- Potencia Máxima: 75 kW Eólicos y 120 kW Diésel
- Ahorro de combustible: 50000 l/año
- Factor de capacidad eólico: Hasta 44%
- Generación de energía eólica anual: 226.000 kWh/año aproximadamente

Componentes del sistema

- Aerogeneradores: 3 unidades de 25 kW de 13 m de diámetro de rotor
- Estructura: Torre tubular arriostrada de 18 m de altura
- Generador Diesel: 120 kW
- Sistema de control híbrido: Cabina de control de automático, regulación de voltaje y disipación de energía.
- Línea de transmisión: Aproximadamente 500 m, a 400 V, desde los aerogeneradores hasta la sala de control

A raíz del conocimiento por parte de los pobladores de la fuente de suministro, el consumo original de energía de la localidad aumento. Esto trajo como consecuencia que el EPEN tenga que disponer de los sistemas de generación Diesel originales para el abastecimiento de energía a la localidad.

Se prevé para el futuro, la extensión de la red de media tensión para interconectar la localidad, en este caso los aerogeneradores se conectarían al sistema de distribución, cambiando la modalidad de generación aislada a generación distribuida.

CONFIGURACIÓN DE SISTEMAS SIN ACUMULACIÓN ELECTROQUÍMICA Y SIN GRUPOS ELECTRÓGENOS

A diferencia de los sistemas vistos hasta ahora, los sistemas tratados en este capítulo no disponen de una referencia eléctrica estable: en el caso de sistemas híbridos, la referencia eléctrica estable se establece a partir de la batería; en el caso de sistemas eólico-diésel, se establece a partir del grupo diésel.

Los sistemas que se verán en esta sección, normalmente están libres de cumplir este requisito de estabilidad eléctrica, lo cual puede permitir una mayor sencillez en la solución en cuanto a los componentes que aparecen. Dentro de las simplificaciones más notables se observa la posibilidad de eliminar el sistema de almacenamiento de energía eléctrica (en comparación con los sistemas

híbridos con baterías), junto con la posibilidad de eliminar el grupo diésel (en comparación con los sistemas eólico-diésel).

ACUMULACIÓN

Una de las posibilidades que brinda esta solución es la eliminación del sistema de almacenamiento de energía eléctrico a largo plazo (batería). La razón es que en este tipo de sistemas el almacenamiento se realiza en el producto final (agua, hielo, calor,...), y no el producto intermedio (electricidad).

Para que esta configuración sea viable, el producto final debe poderse almacenar de una forma sencilla a un bajo costo.

CONTROL

La ausencia de una necesidad de mantener la estabilidad eléctrica (tensión y frecuencia) puede permitir la simplificación del control del sistema, contemplándose incluso la posibilidad de la conexión directa del aerogenerador a la aplicación (resistencia, motor, ...). No obstante, incluso esta conexión tan sencilla necesita de un control mínimo para proteger el sistema frente a situaciones de vientos muy altos y/o consumos muy bajos.

A partir de aquí, existen soluciones que cuentan con un control más sofisticados para conseguir un mejor funcionamiento del sistema.

CONSUMOS: CARGAS REGULABLES, NO DEDICADAS

Desde luego esta configuración es especialmente apropiada para cargas regulables, aquellas que pueden ser actuadas de forma independiente del momento en el que se produce el consumo del producto final. No son apropiados, por tanto, en aplicaciones de cargas principales, en las que el consumo eléctrico se produce exactamente en el momento que el usuario lo desee.

La aplicación más tradicional de este tipo de sistemas sin acumulación de energía eléctrica ha sido, y es, el bombeo de agua, tanto mecánico como eléctrico. Pero existen otras aplicaciones con unas posibilidades de utilización tremendas a escala mundial, como es la desalinización de agua de mar o producción de hidrógeno, por ejemplo.

Es mucho más frecuente la aplicación con motor de inducción. El acoplamiento de forma directa de un aerogenerador con un motor de inducción es un concepto que se presenta muy atractivo, pues son muchas las aplicaciones accionadas por un motor de inducción: compresores, motores, sistemas de frío, determinados sistemas de desalinización, bombeo, etc.

APLICACIÓN TÍPICA: BOMBEO DE AGUA

Históricamente, el uso de la energía eólica para el bombeo de agua ha sido la aplicación eólica más veces utilizada, fundamentalmente mediante una aerobomba, o bomba eólica mecánica. Más

recientemente, se ha incorporado la posibilidad de realizar el bombeo eólico con un acoplamiento eléctrico, en lugar de utilizar uno mecánico, dando lugar a los sistemas eléctricos de bombeo eólico.

Cada uno de ellos (bombeo eléctrico y bombeo mecánico) presenta una serie de ventajas e inconvenientes: el bombeo mecánico tiene la ventaja de ser una tecnología sencilla y muy probada, además de ser válido para sitios de bajo recurso eólico. Por el contrario, tiene el inconveniente de la obligatoriedad de tener que ser instalado en el mismo lugar donde se encuentra el pozo, por el tipo de transmisión mecánica, y además no es válido en aplicaciones de grandes potencias hidráulicas.

En lo que respecta al bombeo eólico eléctrico, en general compensa los inconvenientes del bombeo mecánico, y viceversa, los inconvenientes del bombeo eólico eléctrico son las ventajas del bombeo mecánico: el bombeo eólico eléctrico permite un desacoplamiento entre el emplazamiento del aerogenerador y la localización del pozo, además de poder utilizar grandes potencias hidráulicas, pero no es una tecnología tan probada y necesita además un recurso eólico medio/alto.

La selección de la solución más idónea dependerá por tanto de cada caso concreto, siendo más apropiado en general el bombeo eólico mecánico para aplicaciones de pequeña potencia y en emplazamientos de recurso eólico escaso, mientras que el bombeo eólico eléctrico será en general más apropiado en aplicaciones de potencias hidráulicas mayores y que cuenten con un recurso eólico apreciable.

APLICACIONES DE SISTEMAS CON INTERCONEXIÓN A LA RED ELÉCTRICA

Habiendo visto diferentes aplicaciones de sistemas con energía eólica, siempre se idearon con el fin de consumir el 100% de la energía generada. Surge la siguiente pregunta: “¿Qué ocurre si se genera más energía de la que se puede consumir y además se cuenta con la red eléctrica cercana a la instalación en cuestión?”. Actualmente los gobiernos de distintos países han aprobado legislaciones para regular la inyección de energía a la red de distribución eléctrica a partir de fuentes de energía renovables, también conocido como generación distribuida.

La generación distribuida tiene dentro de sus principales características la reducción de la cantidad de energía que se pierde en la red de transporte, al reducir los flujos de energía por la misma debido a que esta electricidad se genera muy cerca de donde se consume. Esto hace que también se reduzcan el tamaño y número de las líneas eléctricas que deben construirse y mantenerse en óptimas condiciones.

Al igual que los sistemas detallados en la sección anterior, los sistemas con inyección a la red permiten la posibilidad de eliminar tanto los sistemas de almacenamiento (baterías) como los generadores diésel, pero requieren el uso de inversores adecuados para la interconexión a la red.

INVERSORES

Estos convertidores de corriente continua a corriente alterna, ya detallado en un capítulo previo, deben cumplir con ciertas características para que sean aptos para la interconexión a la red. Más allá de deber garantizar una tensión y frecuencia constante deben garantizar mantener una sincronía con los parámetros de la red, también debe funcionar en modo anti isla, esto quiere decir que si la energía de la red se ve interrumpida durante un determinado tiempo, el inversor se debe desconectar de ella inmediatamente.

Si bien, además de cumplir con las características anteriores y los parámetros de calidad de energía exigidos por cada distribuidor, los inversores para interconexión a la red varían en función del tipo de energía renovable que deben convertir.

MEDIDORES BIDIRECCIONALES

Más allá de que los medidores son provistos por el distribuidor de energía eléctrica, los viejos medidores electromecánicos (qué todavía se encuentran en alguna instalación) o medidores electrónicos unidireccionales no discriminan el sentido del flujo eléctrico, por lo que si en una instalación se consume energía o se inyecta a la red, estos siempre incrementarían sus kWh. Debido a esta razón es necesario reemplazarlos por medidores bidireccionales que permiten registrar la diferencia entre energía consumida e inyectada. También se encuentran casos de dos medidores unidireccionales en paralelo pero en sentido contrario donde se contabiliza por separado el consumo de la inyección; la diferencia entre ambas la realiza la distribuidora de energía en una instancia de posprocesado.

Actualmente, algunos de estos medidores cuentan con la posibilidad de acceder remotamente para la monitorización de sus parámetros de medida a través de internet o algún protocolo de comunicación a distancia específico.

EJEMPLO: PRIER AMSTRONG

El Proyecto de Redes Inteligentes con Energías Renovables[3] ([PRIER](#)) es un proyecto piloto de generación energía eléctrica desarrollado en la ciudad de Armstrong provincia de Santa Fe (Argentina). El objetivo fue implementar, poner en marcha, evaluar y sistematizar una experiencia de generación distribuida de energías renovables en redes de baja y media tensión con elementos incorporados de operación inteligente.

Esta experiencia consta de la instalación de un parque fotovoltaico de 200 kW, 6 aerogeneradores de baja potencia de entre 1,2 a 1,5 kW cada uno ubicados en zona periurbana y 50 instalaciones fotovoltaicas en techos residenciales por un total de 75 kW.

Los “techos solares”, están instalando en las casas de los vecinos de la ciudad que han cedido a tal fin el techo de su vivienda, con una potencia instalada individual de 1,5 kW, conexión directa a la

red eléctrica a través de su inversor específico para esa tecnología y potencia; y cada uno con su correspondiente medidor inteligente.

Los aerogeneradores instalados y conectados a la red eléctrica de baja tensión en distintos puntos de la ciudad, son de 2 fabricantes distintos dado la naturaleza del proyecto. Tres de ellos son marca Giacobone de 1,2 kW y 2,15 m de diámetro de rotor fueron instalados en torres de 18 m de altura. Los tres aerogeneradores restantes son marca EBH de 1,5 kW y 3,4 m de diámetro de rotor y fueron instalados a 15 m de altura, estos utilizan inversores ABB Uno-Wind de 2 kW.



Figura 47. Algunas instalaciones renovables en la ciudad de Armstrong

El control y la verificación del funcionamiento de la red se utiliza un sistema integrador de monitoreo y gestión de energía MyGE permitiendo abarcar todos los dispositivos existentes en la red, de modo de visualizar en conjunto estados del sistema, parámetros de medida y alarmas. Tanto en los módulos de generación fotovoltaica: plantas de piso o techos solares, como pequeños eólicos, se monitorean los parámetros de potencia, energía, tensiones, corrientes y frecuencias, el estado de disponibilidad de cada una, el rendimiento, y cualquier otro que se requiera.

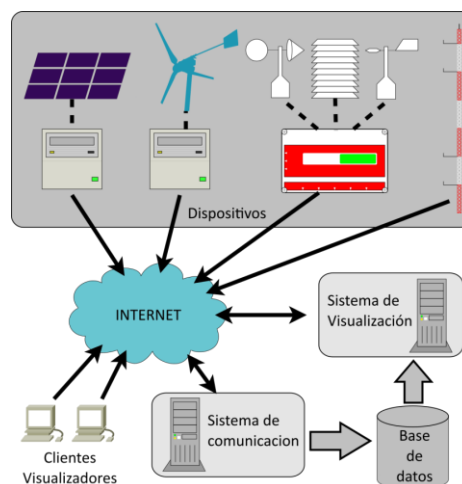


Figura 48. Arquitectura general del sistema de monitoreo

La gestión y el almacenamiento los datos es realizado en un servidor propio con el fin realizar la operación del sistema, y se generar una instancia de aprendizaje e investigación a través del análisis el comportamiento de la red de modo integral. El sistema está pensado con la flexibilidad necesaria para contemplar futuras ampliaciones y conexiones de nuevos equipos.

CONCLUSIONES

Se han presentado los principales casos que pueden encontrarse los aerogeneradores en las distintas instalaciones detallando en cada caso los dispositivos y equipamientos que suelen acompañarlos, y experiencias de instalaciones distintas locaciones y con distintas necesidades. La generación distribuida es el nuevo desafío en la aplicación de sistemas interconectados a la redes eléctricas exigiendo cada vez más, mayor eficiencia en la gestión de la energía los distintos sistemas.

Las redes inteligentes como nuevo desarrollo de sistemas de gestión energética son una condición necesaria para poder cumplir con los objetivos de penetración de las energías renovables siendo capaces de integrar y coordinar de forma eficiente las necesidades y comportamiento de todos los generadores, operadores de red y usuarios finales.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Arribas L.M. Capítulo: Aplicaciones aisladas. En libro: Principios de conversión de la energía eólica. Serie Ponencias - CIEMAT; 2010.
- [2] Neuquén Informa. Sapag inauguró el nuevo sistema de energía eléctrica en Chorriaca. [Internet] 2013 [Consultado 12 Nov 2020]. Disponible en: <https://www.neuqueninforma.gob.ar/sapag-inauguro-el-nuevo-sistema-de-energia-electrica-en-chorriaca/>
- [3] Prier Armstrong [Internet]. [Consultado 12 Nov 2020]. Disponible en: <http://igc.org.ar/prier/>

CAPÍTULO 8: MERCADO DE AEROGENERADORES DE PEQUEÑA POTENCIA

**LUIS ARRIBAS¹, CAROLINA GARCÍA BARQUERO¹, ANDRÉS ZAPPA², MARIANO AMADÍO²,
JAVIER DE LA CRUZ³, ALEXEIS FERNÁNDEZ⁴, GABRIEL USERA⁵, TIMO KARLSSON⁶**

¹ Unidad de Energía Eólica, CIEMAT, Av. Complutense 40 28040 Madrid (España).

² Departamento de Energías Renovables Patagonia, INTI, Ruta 7 km 5, Mercado Concentrador 8300, Neuquén, (Argentina)

³ Gerencia de Energías Renovables, INEEL, Reforma 113 C.P. 62490 Cuernavaca, México

⁴ INTEC. Avenida de Los Próceres #49, Los Jardines del Norte 10602, Santo Domingo, R. Dominicana

⁵ Facultad de Ingeniería, U. de la República, calle J. Herrera y Reissig 565, 11300, Montevideo, Uruguay

⁶ Wind Power Technologies, Tekniikantie 21, FI-02044 VTT, Finlandia

INTRODUCCIÓN

El desconocimiento del mercado de aerogeneradores de pequeña potencia ha sido una constante histórica, en contraste con el conocimiento cada vez más detallado del mercado de otras tecnologías renovables. Tan sólo a partir de la primera década del siglo XXI, seguramente animados por el auge de la tecnología, empezaron a publicarse estudios de mercado a nivel mundial que, si bien eran sesgados al estar basados en encuestas a fabricantes concretos, y no cubrir por lo tanto todas las instalaciones, empezaron al menos a aportar información de referencia en los países más activos. El seguimiento anual de dichos estudios ha presentado discontinuidades hasta la actualidad, donde tanto la tecnología como los estudios de mercado asociados se encuentran en una época de incertidumbre.

En este capítulo se presenta un resumen de la información existente relativa al mercado de pequeños aerogeneradores, desde los distintos puntos de vista en un enfoque general, y de actividad en algunos de los países involucrados en el Proyecto SWTOMP. Este capítulo se ha elaborado a partir del correspondiente informe ([1]), elaborado en el ámbito del proyecto SWTOMP. Surgen diferentes aproximaciones cuando se aborda el mercado de aerogeneradores de pequeña potencia, tales como: la evaluación de la idoneidad del mercado, es decir, cómo son de favorables las condiciones para el desarrollo de esta tecnología en cada región; la evaluación del desarrollo del mercado, es el análisis más común y se basa en cuantificar, ya sea por unidades y/o por potencia, la magnitud de la implantación de la tecnología, en términos de ventas e instalación; aspectos sociales del desarrollo de la tecnología, lo que incluye obstáculos o dificultades para su implantación.

En este capítulo, estas diferentes aproximaciones serán analizadas sucesivamente en los siguientes capítulos, para el caso del mercado de pequeños aerogeneradores. Finalmente, se ha incluido también un capítulo con el análisis del mercado de pequeños aerogeneradores en algunos de los países que participan en el Proyecto SWTOMP, pues es el marco en el que se ha desarrollado esta publicación.

EVALUACIÓN DE LA IDONEIDAD DEL MERCADO

Se presenta en este apartado un resumen de la evaluación del mercado mundial de aerogeneradores de pequeña potencia que *Wind Empowerment* ([3]) ha llevado a cabo, y que intenta definir los criterios técnicos, políticos y socioeconómicos que hacen de la mini-eólica un método favorable de electrificación rural para un país determinado. Los países con altos niveles de ingresos, altas tasas de electrificación o bajos recursos eólicos están descalificados de la consideración, dado que la intención es que la electrificación rural conduzca a un desarrollo acelerado y sostenible en la ubicación objetivo.

La principal dificultad para realizar una evaluación a una escala tan amplia es decidir sobre un nivel de detalle adecuado. El compromiso es a menudo necesario, ya que si bien es deseable basar las decisiones en todos los factores que influyen, esto se vuelve prohibitivamente complejo. Ciertos indicadores (como la capacidad de pago, la financiación local, etc.) fueron descartados. Los indicadores pueden solaparse o estar en conflicto con otros, por lo tanto es necesario un razonamiento cuidadoso y una justificación de toda toma de decisiones cuando se trata de un sistema interconectado.

No se consideraron todos los países, obviamente algunos países no necesitan pequeños aerogeneradores para la electrificación rural, y algunos no tienen recursos eólicos adecuados. Se usaron filtros sobre la velocidad de viento media, el PIB y el nivel de electrificación, en tanto por ciento. Los países que pasaron los filtros se muestran en el mapa en la Figura 49. Vale la pena reiterar que no todas las regiones de estos países son adecuadas para proyectos de mini-eólica, y algunos países (por ejemplo, Brasil) tienen sólo un pequeño porcentaje de su superficie sujeta a condiciones favorables.

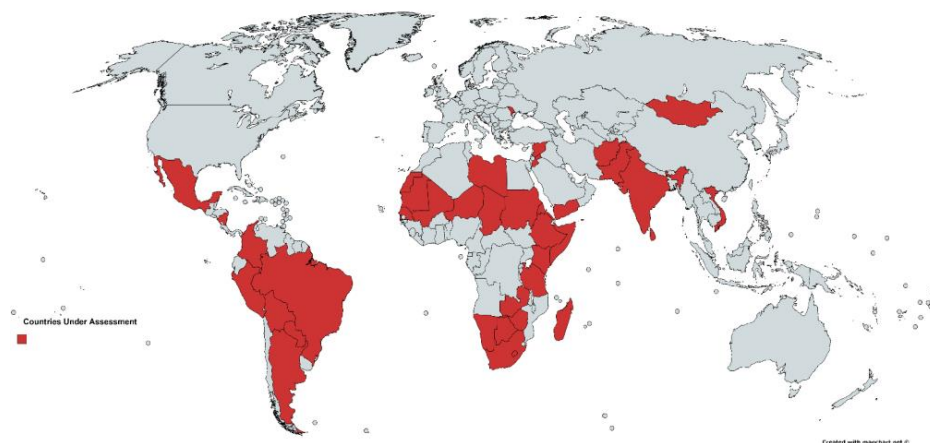


Figura 49. Países que pasan todos los filtros, sin las naciones que son pequeñas islas ([2])

La Figura 49 muestra en forma de mapa la puntuación final en cada país. Los países resaltados en verde más oscuro son más favorables, el verde más pálido indica una puntuación más baja. La puntuación final depende en gran medida de la ponderación, por lo que cualquier desacuerdo con lo esperado puede deberse a la incertidumbre dentro de las ponderaciones aplicadas, o la

incertidumbre dentro de las puntuaciones del indicador. Cabe señalar aquí, que para las puntuaciones de los indicadores de los países de los que no se disponía de datos se han introducidos valores medios como una "mejor conjetura".



Figura 50. Resultados de la evaluación de la idoneidad del uso de aerogeneradores de pequeña potencia para electrificación rural (mayor cuanto más oscuro es el verde) ([2])

Puede observarse en la Figura 50 que en el área latinoamericana, la mayoría de países presentan niveles de idoneidad medio – altos para la implantación de mini-eólica, según estos criterios.

EVALUACIÓN DEL DESARROLLO DEL MERCADO

Se presentará un breve resumen de la información disponible sobre el mercado mundial de aerogeneradores de pequeña potencia. Para ello se han utilizado dos fuentes principales de información: el Informe Mundial de Mini-Eólica, publicado anualmente por la Asociación Mundial de Energía Eólica (WWEA) entre 2012 a 2017 ([3]), y que ha sido la referencia más común a nivel mundial para el estado de despliegue del mercado de pequeños aerogeneradores; sin embargo, como las cifras del último de estos informes (el de 2017) se refieren a 2015, el Informe del Mercado de Eólica Distribuida, elaborado en EE.UU. desde 2012, constituye la otra referencia del mercado mundial de pequeños aerogeneradores usada para los años posteriores a 2015.

Las cifras presentadas aquí se basan en los datos disponibles e incluso excluyen los principales mercados como la India. Por lo tanto, WWEA estima un número total real de cerca de un millón de unidades instaladas en todo el mundo, totalizando cerca de 1.000 MW, lo que conduce a un tamaño medio de aerogenerador instalado de 1 kW.

Basado en la distribución mundial de fabricantes de pequeños aerogeneradores, la producción se concentra en pocas regiones del mundo: en China, en América del Norte y en varios países europeos. Los países en vías de desarrollo siguen desempeñando un papel menor en la fabricación eólica de pequeña potencia, pero mantienen cierta actividad.

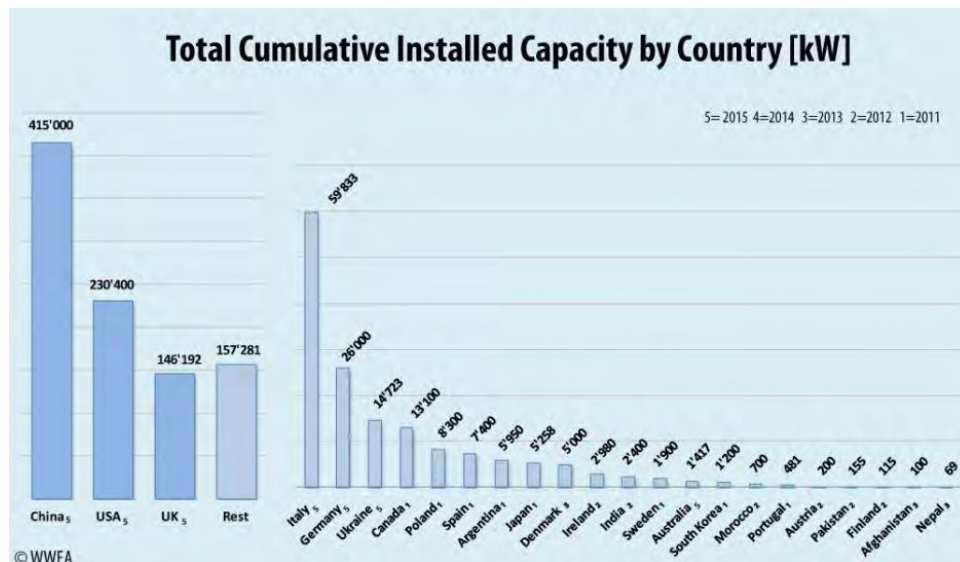


Figura 51. Desglose por países de potencia instalada de aerogeneradores de pequeña potencia ([3])

Tras una recuperación durante 2014, el mercado mundial de la eólica de pequeña potencia ha vuelto a superar un difícil 2015 con un pequeño crecimiento en términos de unidades y un gran crecimiento en términos de instalaciones. Los principales mercados, China, Estados Unidos y Reino Unido, sufrieron de nuevo una disminución en el número de unidades instaladas en un año. Un nuevo gigante en el pequeño sector eólico, el mercado italiano, ha salvado el año para muchos en la industria. En 2017, se documentaron 114 MW de nueva pequeña capacidad eólica en 10 países. Este número es aproximadamente un 6% inferior al documentado para 2016, de 122 MW. El despliegue en mercados en crecimiento anterior, como China y el Reino Unido, ha disminuido drásticamente, cayendo 38% y 95%, respectivamente entre 2016 y 2017. Otros mercados, como Japón e Italia, han aumentado considerablemente sus capacidades internas con un crecimiento del 200% y del 34%, respectivamente.

A pesar de que un vistazo rápido en la Tabla 7a la evolución de las cifras globales podría traer una idea equivocada de estabilidad durante los últimos cinco años en los principales mercados, esta impresión sería engañosa, ya que la aparente estabilidad se basa en mercados que cambian rápidamente (véase evolución de los mercados del Reino Unido y Estados Unidos, que fueron los mercados occidentales más importantes hace cinco años, y ahora están casi desaparecidos). Incluso China, que tradicionalmente ha sido el principal mercado de pequeños aerogeneradores está evolucionando durante los últimos años a una preocupante disminución. Por otro lado, el equilibrio aparente global ha sido mantenido por otros mercados, como Japón y, principalmente, Italia (en el rango de potencia media). Pero estos dos mercados parecen estar también en una actividad descendente, según la última información. Por lo tanto, la evolución esperada del mercado de mini-eólica se enfrenta a una alta incertidumbre para los años siguientes.

PAIS	2013 (MW)	2014 (MW)	2015 (MW)	2016 (MW)	2017 (MW)	Acumuladas (MW)	RANGO DE AÑOS
China	72,25	69,68	48,60	45,00	27,70	532,81	2007-2017
Japón	-	-	0,36	0,95	2,85	8,43	a partir de 2017
Korea del Sur	0,01	0,06	0,09	0,79	0,08	4,02	a partir de 2017
Reino Unido	14,71	28,53	11,64	7,73	0,39	140,60	a partir de 2017
Dinamarca	1,65	1,28	5,84	4,45	0,96	21,88	a partir de 2017
Alemania	0,02	0,24	0,44	2,25	2,25	30,75	a partir de 2017
Italia	7,00	16,27	9,81	57,90	77,46	189,43	a partir de 2017
Canadá	-	-	-	-	-	13,47	a partir de 2017
EE.UU.	5,60	3,70	4,30	2,40	1,70	148,00	2003-2017
Brasil	0,03	0,02	0,11	0,04	0,11	0,31	2013-2017
Australia	-	0,02	0,03	-	0,02	1,46	2001-2017
Nueva Zelanda	-	-	-	-	-	0,19	Hasta 2015
Global	101,27	119,8	81,22	121,51	113,52	1091,35	

Tabla 7. Capacidad global total acumulada de mini-eólica instalada durante los últimos cinco años en función de la instalación ([4])

En cambio, los resultados para 2018 ([6]), aparecidos durante la elaboración de este trabajo, muestran una disminución en el volumen global hasta los 47,1 MW que, frente a la media anual en torno a 100 MW de los cinco años anteriores, confirma las peores sospechas respecto a la evolución del mercado.

ASPECTOS SOCIALES

Estas encuestas tratan de poner en común la profundidad y precisión de la información que la gente común tiene sobre los aerogeneradores de pequeña potencia, que es fundamental para entender las posibilidades y obstáculos para el mercado.

Se presentan a continuación los resultados de la encuesta llevada a cabo en el Reino Unido ([7]), uno de los principales mercados europeos de pequeños aerogeneradores. Utilizando un formulario postal nacional, la encuesta tenía como objetivo identificar qué factores influyen en las actitudes públicas hacia los pequeños aerogeneradores en el Reino Unido. Concretamente, se centró en las siguientes preguntas:

- ¿Cuál es el grado de aceptación por parte del público británico de los aerogeneradores de pequeña potencia?
- ¿Qué importancia tiene el contexto de su instalación (por ejemplo, en qué entornos / áreas están instalados) para determinar lo aceptables que son?
- ¿La preocupación por el cambio climático influye en las actitudes hacia ellos?
- ¿Qué factores, incluida la familiaridad con las turbinas y los factores demográficos, influyen en las actitudes?

Las conclusiones de los resultados fueron las siguientes: la mayoría de los encuestados aceptan los aerogeneradores de pequeña potencia. Sin embargo, esta constatación general no garantiza la aceptación de desarrollos específicos de estos aerogeneradores por tres razones principales:

- En primer lugar, la aceptación de los aerogeneradores de pequeña potencia distaba mucho de ser universal. Poco menos de una cuarta parte de los encuestados consideró que eran inaceptables con una proporción similar directamente en contra de tener un pequeño aerogenerador a la vista de sus hogares, lo que hace probable que siempre haya cierta oposición a la propuesta de nuevos desarrollos.
- En segundo lugar, como se ha visto en el caso de los desarrollos de los parques eólicos, una aceptación general puede no traducirse fácilmente en la aceptación de una propuesta de instalación específica. Es probable que las propuestas de desarrollo local causen preocupaciones sobre los impactos específicos de ese sitio, incluso entre aquellos que generalmente sí los aceptan.
- En tercer lugar, estos resultados están sesgados hacia los varones mayores y, por lo tanto, actualmente no podemos cuantificar la aceptación de la evolución de la mini-eólica en otros sectores del público del Reino Unido.

Es necesario obtener una orientación de planificación más clara para las instalaciones de pequeños aerogeneradores en el Reino Unido. Los resultados de esta encuesta proporcionan algunos conocimientos útiles para los responsables de la formulación de políticas, y para los desarrolladores que desean minimizar la oposición pública a una instalación propuesta:

- En primer lugar, se ha demostrado que la configuración de un aerogenerador de pequeña potencia tiene un impacto significativo en la aceptación, por lo que la instalación en entornos más aceptados puede ayudar a limitar cualquier oposición.
- Otras investigaciones que examinan la aceptación en otros entornos, como los polígonos industriales, pueden destacar entornos bien aceptados adicionales.
- En tercer lugar, los vínculos encontrados entre el conocimiento y la preocupación por el cambio climático y la aceptación de la mini-eólica, junto con los comentarios de los encuestados que solicitan más información sobre los posibles impactos, ponen de relieve un papel para la educación específica y un fácil acceso a información en la creciente aceptación de la mini-eólica en una amplia gama de entornos.

MERCADO EN PAÍSES DEL PROYECTO SWTOMP

Los siguientes países participantes en el proyecto SWTOMP han preparado información sobre el mercado de la mini-eólica en sus respectivos países, tal y como se expone a continuación. Tanto el desarrollo de la tecnología como la información relativa aportada, presenta niveles diferentes en los distintos países, por lo que no se puede establecer una comparación directa. No obstante, se

considera que la información aportada sí sirve para tener una visión del desarrollo de la mini-eólica en los diferentes países.

ARGENTINA

En base a los resultados obtenidos en esta primera experiencia ([7], [9]), se formulan las conclusiones que se detallan a continuación. Si bien no fue simple acceder a los datos de contacto, la cantidad de proveedores de aerogeneradores encontrados en este primer sondeo superó la estimación inicial. Se recabaron los siguientes datos con el objeto de realizar un diagnóstico inicial de la situación del sector industrial.

PARÁMETRO	VALOR
Cantidad de fabricantes encuestados	14,00
Cantidad de personas empleadas directamente	67,00
Facturación aproximada anual	6.400.000 \$
Potencia total instalada	5 MW

Tabla 8. Datos de la situación del sector en Argentina, según estimaciones publicadas por la Asociación Argentina de Energía Eólica

En primer lugar, se detectó una gran dificultad para la interacción con los proveedores, desde la dificultad para identificarlos unívocamente, hasta la desorganización u omisión de información de contacto disponible en Internet. Asimismo se encontró poca infraestructura virtual, aparejada a una escasa formalidad institucional.

A continuación, se describen un resumen de las consideraciones realizadas sobre el relevamiento: los proveedores contactados ofrecen un total de 32 modelos diferentes de aerogeneradores; el 53% de los proveedores ofrece más de un modelo de aerogenerador. Se incluyen a continuación la Figura 52 que da cuenta de características del grupo proveedor.

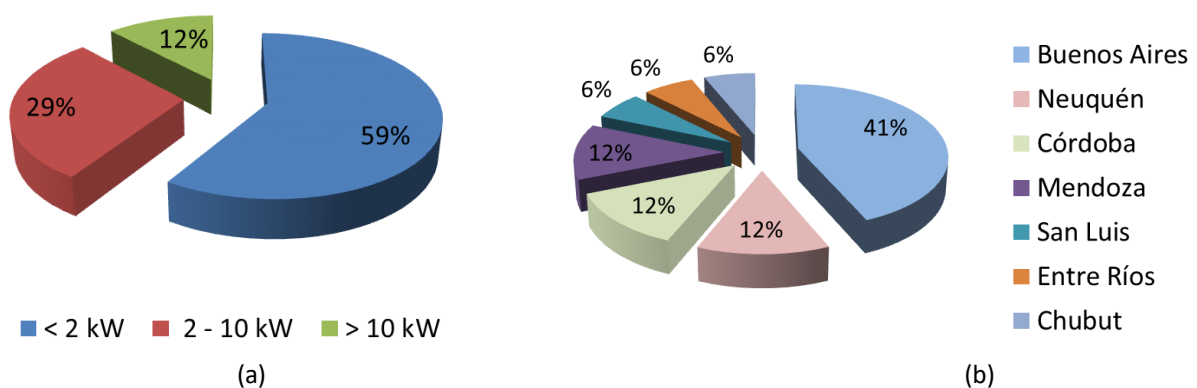


Figura 52. Caracterización de los fabricantes en Argentina según: (a) Potencia; (b) provincia

REPÚBLICA DOMINICANA

La encuesta en la República Dominicana (RD) se ha desarrollado de una manera diferente, ya que no se ha identificado ningún fabricante o distribuidor oficial de pequeños aerogeneradores en el país. Por lo tanto, se ha obtenido información sobre la Oficina de Importaciones, en relación con la descripción "Energía eólica", para el período 2013-2018, mostrando los siguientes resultados:

- Los datos facilitados por la Oficina de Aduanas sobre importaciones de energía eólica identifican 19 unidades importadas en RD durante el período 2013-2018
- Aunque la información disponible no es detallada, parece que la mayor parte son aerogeneradores es de eje horizontal, pero se puede identificar al menos un eje vertical.
- El presupuesto total involucrado en estas importaciones es de alrededor de 57000 dólares americanos a lo largo de todo el período, con un promedio anual de casi 10000 US\$, aunque los años 2013, 2014 y 2015 fueron especialmente activos, mientras que la actividad en 2016 y 2017 se redujo drásticamente y en 2018 las importaciones casi desaparecieron.
- Estos equipos tienen su origen en diferentes países, principalmente China (29000 \$), Estados Unidos (13500 \$) y España (12250 \$).
- Cuando se identifica, la potencia nominal de las importaciones oscila entre 400 W y 3500 W.

FINLANDIA

Gaia Consulting hizo una estimación sobre el tamaño del mercado finlandés en 2014 ([10]). El estudio se basó en entrevistas con proveedores y distribuidores locales y estimó el mercado en base a sus experiencias. Para ello dividieron el mercado de turbinas eólicas pequeñas en Finlandia en cuatro segmentos basados en el tamaño de la turbina y el caso de uso:

- micro turbinas instaladas de forma privada (conectadas a baterías, potencia nominal <1kW),
- pequeñas instalaciones comerciales en zona suburbana (<5kW)
- grandes instalaciones comerciales y agrícolas (5 - 50 kW) y
- telecomunicaciones (casos especiales, tamaño pocos kilovatios instalados en las telecomunicaciones).

El mercado es relativamente pequeño, y el número de instalaciones se puede estimar en función del número de unidades enviadas. Las cifras de ventas se pueden dividir en las categorías definidas anteriormente. El número de unidades instaladas es de alrededor de 100-200 en la categoría 1, alrededor de 10 por año en las categorías 2) y 4) y sólo unas pocas instalaciones en la categoría 3).

Estas estimaciones son ligeramente superiores que el número de WWEA ([4]) de 115 kW para Finlandia.

MÉXICO

Los principales resultados del estudio ([11]) llevado a cabo que permita conocer el estatus del mercado y el potencial actual para la implementación de sistemas eólicos de pequeña y mediana escala en México, son los siguientes:

- Hasta 2018, se han instalado 23 kW en sistemas interconectados a la red y se han identificado 490.3 kW de capacidad instalada de sistemas fuera de red.
- Se contabilizaron 48 turbinas instaladas en 2017 sin interconexión a la red, cuya capacidad oscila entre 1 y 350 kW.
- Los proyectos se encuentran instalados en estados como: Quintana Roo, Yucatán, Baja California Sur, Hidalgo, Chiapas y Baja California.
- México cuenta con potencial eólico en diferentes estados del país de acuerdo a los mapas de viento desarrollados por el [INEEL](#).
- Actualmente se cuenta con el registro de 4 fabricantes (2 activos), 9 distribuidores y 12 empresas dedicadas a la distribución e instalación de pequeñas máquinas en México.
- El marco regulatorio especifica las condiciones para la interconexión de proyectos de GD y electrificación rural.
- No existe regulación específica en materia ambiental y social aplicable al desarrollo de proyectos en pequeña y mediana escala. Pero sí en términos generales.
- Existen mecanismos de financiamiento para el desarrollo de proyectos (públicos, privados y mixtos).
- México cuenta con capacidades tecnológicas y de desarrollo humano para el desarrollo tecnológico de turbinas eólicas en pequeña y mediana escala.

ESPAÑA

Esta información es un resumen de un informe ([12]) más detallado sobre el mercado español de aerogeneradores de pequeña potencia. La primera estimación del mercado en España se publicó en los informes de la WWEA (presentados en el capítulo 3). Según este registro, en España se habían instalado 7250 aerogeneradores en aplicaciones aisladas (la mayoría) y para autoconsumo. En ([12]) se muestra información sobre los distintos registros de instalaciones existentes, como el mapa que se reproduce a continuación con la distribución por comunidades autónomas de instalaciones aisladas de minieólica.

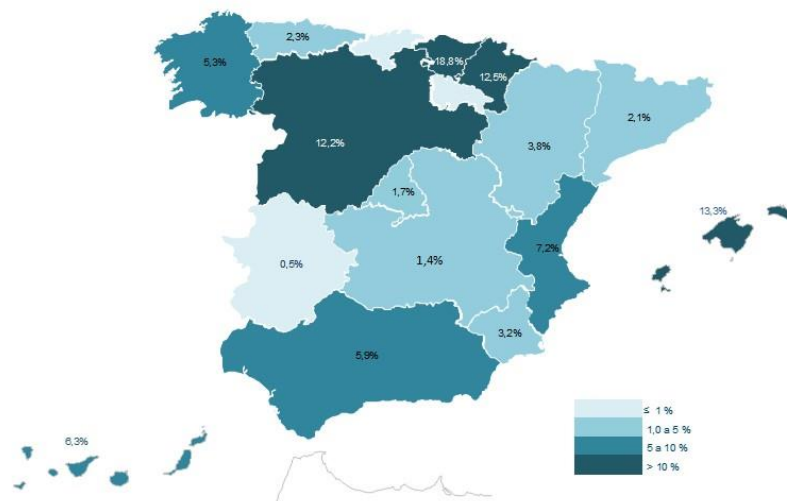


Figura 53. Distribución geográfica de la minieólica en España ([12])

Sin embargo, el potencial de mercado de la tecnología de turbinas eólicas pequeñas en España se definió en el Plan de Energías Renovables 2011-2020 ([13]), que estableció un objetivo de 300 MW de capacidad de generación de energía eólica instalada para 2020. Se preveía que ese objetivo incluyera una tarifa de alimentación para esta tecnología.

Hoy en día, en 2020, este objetivo ni siquiera se ha cumplido, y la capacidad instalada está lejos de ese objetivo, principalmente debido a que las tarifas de alimentación se suprimieron en España precisamente en 2011. Así, el registro de productores conectados a la red para el pequeño aerogenerador, que incluiría esta generación de energía eólica, sólo incluye las siguientes cifras:

Hoy, en 2019, este objetivo ni siquiera se ha abordado, y la potencia instalada está muy lejos de ese objetivo. Así, en el registro de productores conectados a red de aerogeneradores de pequeña potencia, donde figuraría esta generación eólica, tan sólo constan las siguientes potencias:

COMUNIDAD AUTÓNOMA	POTENCIA INSTALADA (kW)
Canarias	10.350
Navarra	34
País Vasco	100
Andalucía	13
Total General	10.496

Tabla 9. Potencia eólica inscrita en el Registro de autoconsumo en España

La potencia instalada total que aparece en la Tabla 9, aproximadamente 10,5 MW, está muy lejos del objetivo de los 300 MW, y la desviación es todavía más drástica si tenemos en cuenta que en la mencionada Tabla 9 aparecen incluidas las potencias de grandes aerogeneradores conectados a desaladoras en la modalidad de autoconsumo, por lo que la potencia real de pequeña eólica en aplicaciones de autoconsumo estaría por debajo de los 0,2 MW.

URUGUAY

La penetración de la red eléctrica en el territorio nacional es muy alta, alcanzando a casi la totalidad de los habitantes del país y siendo la más alta de Latino América. Entre otros factores que explican esta situación se encuentra la relativamente poco accidentada topografía del país, la distribución homogénea de tierras productivas y población y la acotada extensión del territorio.

La normativa que habilita la instalación de microgeneración conectada a la red eléctrica data de 2010. Existen así mismo incentivos fiscales para la instalación de generación de origen renovable a nivel de las industrias y hogares. Estos incentivos sin embargo han logrado impulsar sobre todo las instalaciones de tipo solar térmico (a nivel de hogares e industrias) y solar fotovoltaico (a nivel de industrias).

Un estudio de rentabilidad de las instalaciones de microgeneración eólica, desarrollado por el Ministerio de Industria Energía y Minería, de 2010, señala que los aprovechamientos eólicos de micro-escala resultan actualmente "rentables sólo para casos de muy buen acceso al recurso eólico, combinado con beneficios fiscales que reduzcan el peso de la inversión inicial en el flujo".

La situación descrita anteriormente establece un escenario donde la inversión en generación eólica de pequeña escala por parte de particulares e industrias tiene pocos atractivos actualmente, lo que a su vez ha redundado en un casi nulo desarrollo de una industria local de pequeños aerogeneradores. La aplicación de estos se reduce actualmente a escasos y pequeños establecimientos rurales que aún no tienen acceso a la red eléctrica.

CONCLUSIONES

Este capítulo muestra una parte de la información recopilada en el Proyecto SWTOMP ([1]) sobre el mercado de aerogeneradores de pequeña potencia, plasmada en el Entregable 1.2: "Sample Survey Results", en el que se muestra los resultados tanto de la revisión bibliográfica sobre este mercado, como del trabajo de análisis llevado a cabo dentro del mencionado Proyecto en algunos de los países de los socios participantes. A modo de conclusión cabe expresar que, si bien las perspectivas de utilización de esta tecnología se han mantenido en general elevadas, la realidad de su implementación ha experimentado altibajos en los últimos años, en función principalmente de los inicios y los finales de los programas de fomento de la tecnología mini-eólica, así como de la evolución tecno-económica de otras tecnologías renovables, muy especialmente la solar fotovoltaica.

En este sentido, el momento actual es incierto, pues la tendencia es la supresión de los programas de fomento de esta (y otras) tecnologías, unido a una muy alta competitividad de la tecnología solar fotovoltaica, lo que enfrenta a la tecnología eólica de pequeña potencia a un entorno poco amigable en el que, salvo el caso de emplazamientos y aplicaciones especialmente favorables, parte con pocas posibilidades de participación.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] L. Arribas et al. Sample Survey Results. SWTOMP Project report. 2020
- [2] J. Leary, M. Czyrnek-Delêtre et al. A review of market assessment methodologies for rural electrification with small scale wind power. Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 133, November 2020, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110240>
- [3] Alsop, A. Eales et al. Small wind for rural development in the Global South: assessing the market. Presentation at the WEPatagonia 2016 Conference.
- [4] WWEA. Small Wind World Report – Summary. 2017. <https://wwindea.org/blog/2017/06/02/wwea-released-latest-global-small-wind-statistics/>
- [5] Orrell, N. Foster et al. 2017 Distributed Wind Market Report. US-DOE report <https://www.energy.gov/sites/prod/files/2018/09/f55/2017-DWMR-091918-final.pdf>
- [6] Orrell, D. Preziuso et al. 2018 Distributed Wind Market Report. US-DOE report. <https://www.energy.gov/sites/prod/files/2019/08/f65/2018%20Distributed%20Wind%20Market%20Report.pdf>
- [7] Tatchley C, Paton H et al. Drivers of Public Attitudes towards Small Wind Turbines in the UK. (2016), PLoS ONE 11(3): e0152033. doi:10.1371/journal.pone.0152033
- [8] Casabona, L. Coppis et al. Estudio metódico del grupo de suministradores de los fabricantes nacionales de aerogeneradores: primer Informe de Progreso. 2010. <https://www.inti.gob.ar/neuquen/pdf/informe1.pdf>
- [9] Casabona, L. Coppis et al. Entrevistas con fabricantes nacionales. Segundo informe de progreso. 2010. <https://www.inti.gob.ar/neuquen/pdf/informe2.pdf?seccion=aerogeneradores>
- [10] Pesola et al., “Sähkön pientuotannon kilpailukyvyyn ja kokonaistaloudellisten hyötyjen analyysi,” 2014.
- [11] INEEL. Avance del análisis del mercado mexicano de aerogeneradores de pequeña y mediana escala. 2018
- [12] El Mercado de aerogeneradores de pequeña potencia en España. Publicación CIEMAT. 2020.
- [13] Plan de Energías Renovables 2011-2020, IDAE, 2011. <https://www.idae.es/en/file/9712/download?token=6MoeBdCb>

CAPÍTULO 9: EVALUACIÓN ECONÓMICA DE SISTEMAS EÓLICOS DE BAJA POTENCIA

JAVIER DE LA CRUZ

Gerencia de Energías Renovables, INEEL, Reforma 113 C.P. 62490 Cuernavaca, México.

INTRODUCCIÓN

Uno de los aspectos más importantes al proponer el despliegue de aerogeneradores de baja potencia, es contar con estimaciones de los beneficios económicos de su instalación. Esta tarea no suele ser parte de las actividades rutinarias de ingenieros que desarrollan la tecnología de aerogeneradores. Sin embargo, su omisión o su incorrecta estimación da como resultado un efecto negativo en la adopción y despliegue de pequeños aerogeneradores. Este capítulo presenta una alternativa para evaluar la viabilidad en el despliegue de aerogeneradores de baja potencia en sistemas interconectados a la red y en sistemas aislados.

ANÁLISIS DE VIABILIDAD ECONÓMICA DE SISTEMAS INTERCONECTADOS

El estudio de factibilidad económica ayuda a predecir ingresos, egresos y en consecuencia la viabilidad de invertir. Estos análisis proveen información económica de utilidad para determinar la alternativa más conveniente, entre diferentes ubicaciones y tecnologías. En [1-3] se pueden encontrar algunos ejemplos de metodologías aplicadas en proyectos de generación eólica. Estas referencias incluyen el cálculo de parámetros de rentabilidad que permiten medir el desempeño de una instalación. En esta sección se considerarán los siguientes parámetros para medir la rentabilidad de un proyecto interconectado:

- Costo Nivelado de Energía
- Valor Presente Neto
- Periodo de recuperación de inversión

Para calcular el costo nivelado de energía (LCOE), se toma en cuenta el costo de inversión inicial (I), los costos de operación y mantenimiento al año (O&M), la tasa de descuento (r), el periodo de tiempo (t) y la energía anual producida (AEP). Ver ecuación 1.

$$LCOE = \frac{I + \sum_{t=1}^n (O\&M_t)(1+r)^{-t}}{\sum_{t=1}^n AEP_t(1+r)^{-t}} \quad (1)$$

El valor presente neto puede ser descrito como la diferencia entre todos los ingresos y gastos, para un periodo de tiempo. Este indicador depende de los flujos netos de caja, es decir, la inversión inicial, la tasa de descuento, O&M, ingresos y vida útil del proyecto, como se muestra en la Ecuación 2.

$$NPV = \left(\sum_{t=1}^n \frac{\text{Net cash inflow}}{(1+r)^t} \right) - I \quad (2)$$

El periodo de retorno de inversión es la cantidad de tiempo que toma recuperar los costos de una inversión. Este es uno de los más importantes indicadores en el mundo de los negocios. Sin embargo, este método omite tomar en cuenta el valor del dinero y algunos otros parámetros con influencia en la factibilidad del proyecto. Es el costo de una inversión, dividida entre los flujos de caja anualizados. Por ejemplo, si un aerogenerador cuesta \$20,000 USD y los ahorros son de \$200 USD cada mes, tomaría 8,4 años para alcanzar el tiempo de retorno de inversión.

En la Tabla 10 se proponen criterios de referencia para determinar si un proyecto puede considerarse como factible. El criterio asociado al LCOE puede variar por el caso bajo estudio.

PARÁMETRO DE RENTABILIDAD	CRITERIO
Costo Nivelado de Energía	0.060 - 0.25 USD / kWh
Valor Presente Neto	> Cero
Periodo de recuperación de inversión	< Vida útil del proyecto

Tabla 10. Criterios de rentabilidad

CASOS DE ESTUDIO

Se analiza el recurso eólico disponible en Puerto Peñasco (Sonora), así como la viabilidad de llevar a cabo el despliegue de un pequeño aerogenerador. En dicho sitio se evalúa una máquina comercial de 5 kW clase II y una máquina teórica de 5 kW clase IV. La Figura 54 muestra el sitio del punto bajo evaluación.

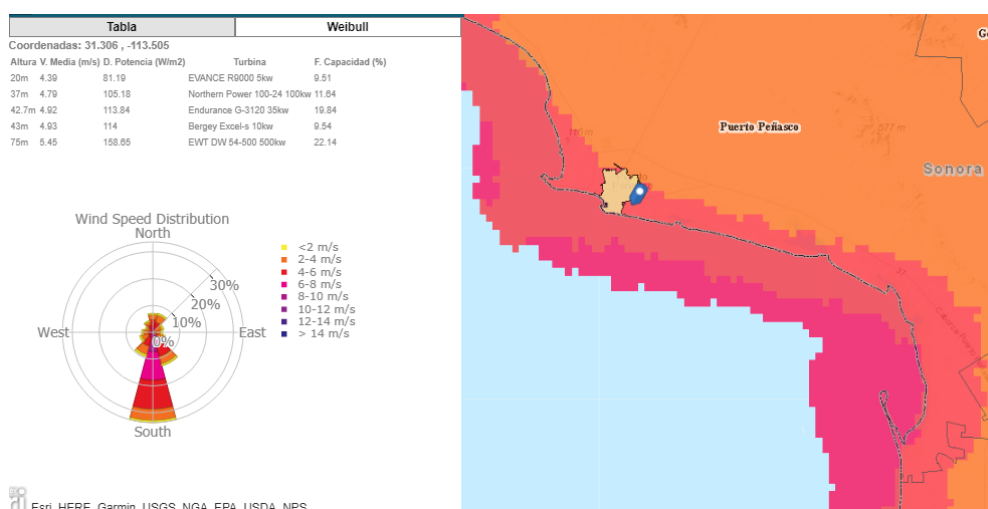


Figura 54. Punto bajo estudio en Puerto Peñasco, Sonora, Coordenadas: 31.306 -113.505

Vale la pena destacar que la información obtenida mediante la rosa de vientos, podría ayudar a definir la posición del aerogenerador a instalar en la zona.

Por medio de un sitio web desarrollado en el [INEEL](#), se obtiene la distribución de probabilidad de Weibull en el sitio, ver Figura 55.

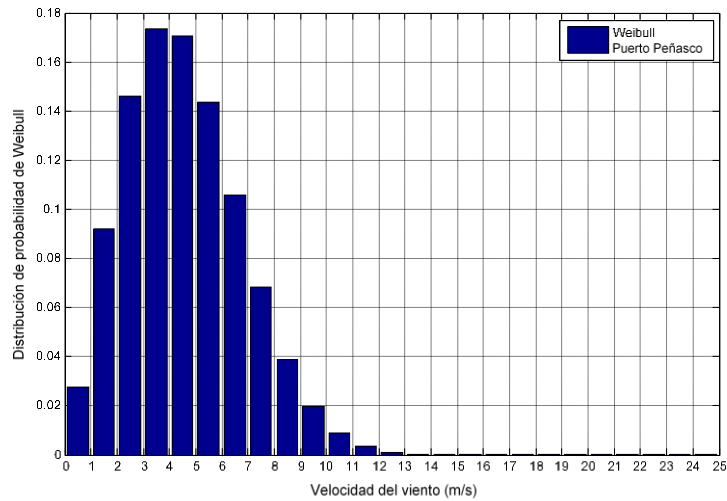


Figura 55. Distribución de probabilidad de Weibull en Puerto Peñasco a 20 m

La Figura 56 muestra la curva de potencia de ambos aerogeneradores.

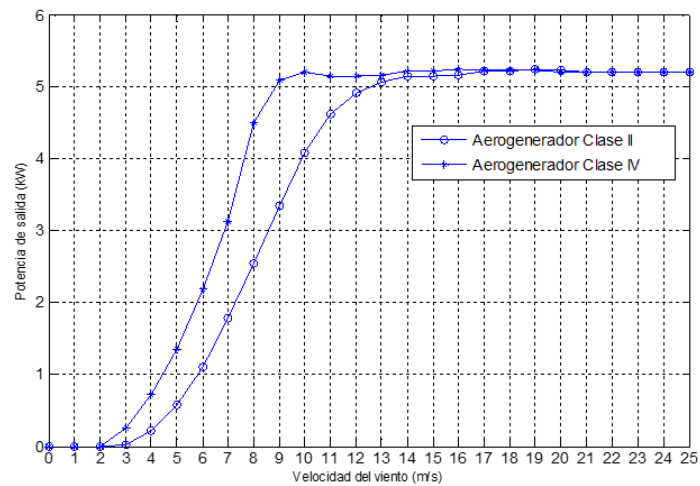


Figura 56. Curvas de potencia de aerogeneradores de 5 kW, Clase II y IV

Caso 1

De acuerdo a la Figura 54, el aerogenerador Clase II cuenta con un factor de capacidad de 9.51 %, y produciría 4.165 kWh al año.

Para estimar la viabilidad económica del proyecto se toman en cuenta los datos de entrada mostrados en la Tabla 11

Parámetro	Valor
Vida útil	20 años
Tasa de descuento	10%
Incremento anual efectivo de la tarifa eléctrica	0,005
Costo de inversión	3.300 USD/kW
Operación y mantenimiento	2% del costo de inversión
Disponibilidad del aerogenerador	95%
Tarifa Eléctrica del Usuario	0,25 USD/kWh

Tabla 11. Parámetros financieros de entrada

Enseguida se muestra el resultado de los parámetros de desempeño:

- Costo nivelado de energía: 0,529 USD/kWh.
- Valor presente neto: 5.494,30 USD.
- Retorno de inversión: 19 años.

Resulta evidente que, por los motivos antes mencionados, no es viable llevar a cabo la instalación de este aerogenerador. Solo el retorno de inversión apenas cumple con los criterios financieros de viabilidad.

Caso 2

En la Figura 57 se muestran los datos introducidos de una curva de potencia Clase IV, en el mismo sitio del Caso 1.

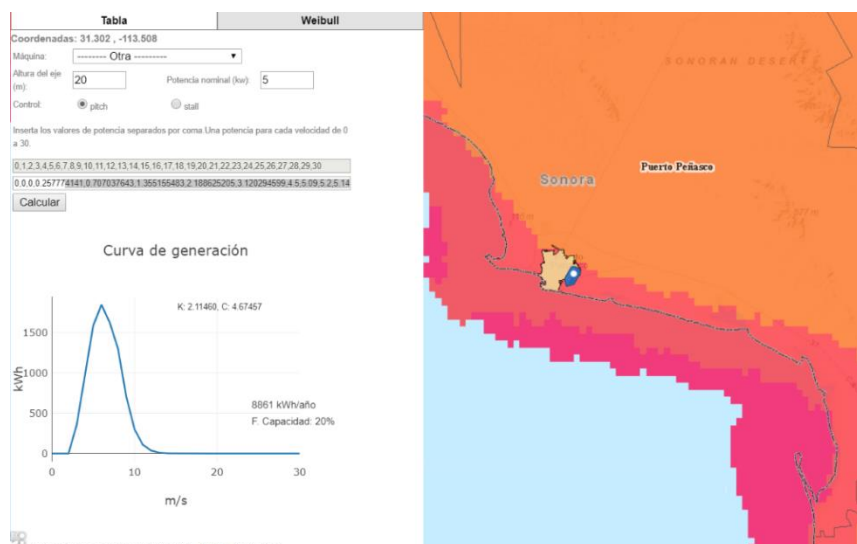


Figura 57. Punto bajo estudio con turbina Clase 4. Coordenadas: 31.306 -113.505

El factor de capacidad es del 20 % y la energía anual producida corresponde a 8.861 kWh. Al modificar la clase del aerogenerador, tanto el factor de capacidad como la energía anual producida se duplican.

Tomando en cuenta los parámetros financieros de la Tabla 11, se calculan los parámetros para medir la rentabilidad:

- Costo nivelado de energía: 0,249 USD/kWh
- Valor presente neto: 10.196,67 USD
- Retorno de inversión: 7 años.

En esta ocasión se considera económicamente viable el despliegue del aerogenerador. Los tres criterios utilizados como referencia se cumplen. Sin embargo, el LCOE está apenas por debajo del valor de referencia.

Vale la pena destacar que la velocidad media en el sitio es baja (4,39 m/s). Conforme dicha velocidad sea superior y utilizando la clase de turbina adecuada, los parámetros financieros mejorar considerablemente.

ANÁLISIS DE VIABILIDAD ECONÓMICA DE SISTEMAS FUERA DE LA RED

Para medir la viabilidad económica de un sistema fuera de la red, se compara la operación de pequeñas turbinas en un sistema híbrido. Se analizan dos casos, el primero incluye un aerogenerador de 5 kW, un sistema fotovoltaico de 6 kW y un banco de baterías de 80 kWh. El segundo caso se omite el aerogenerador, pero se redimensiona el sistema fotovoltaico a 14 kW y el banco de baterías a 87,5 kWh.

En este análisis, el indicador utilizado para medir y comparar la viabilidad del sistema es el LCOE. Este ejemplo considera un conjunto de cargas del tipo residencial. La Figura 58 presenta su demanda horaria durante un año.

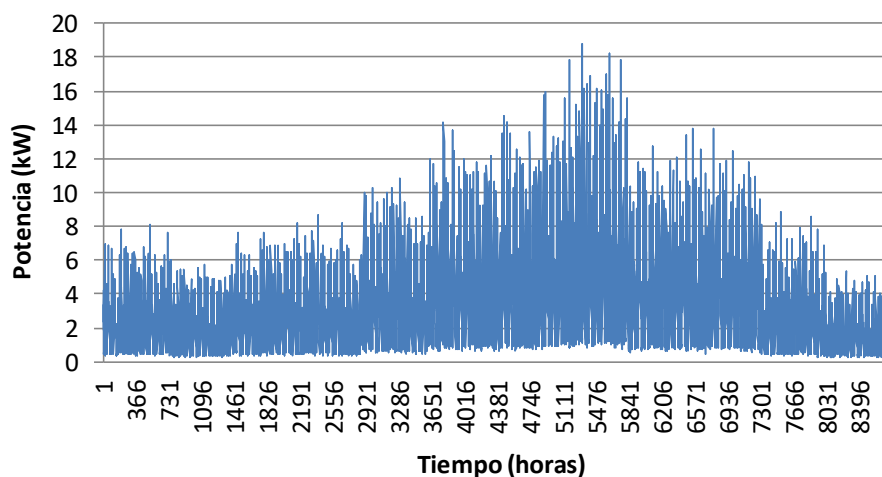


Figura 58. Demanda anual del sistema aislado

La Figura 59 y Figura 60 muestran el registro anual de velocidad del viento y radiación solar de un sitio en el estado de Tamaulipas en México¹.

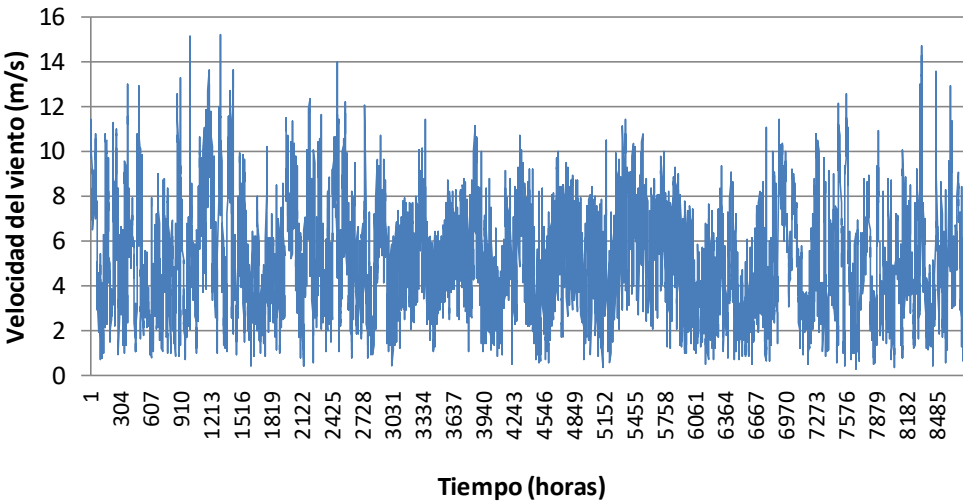


Figura 59. Velocidad del viento

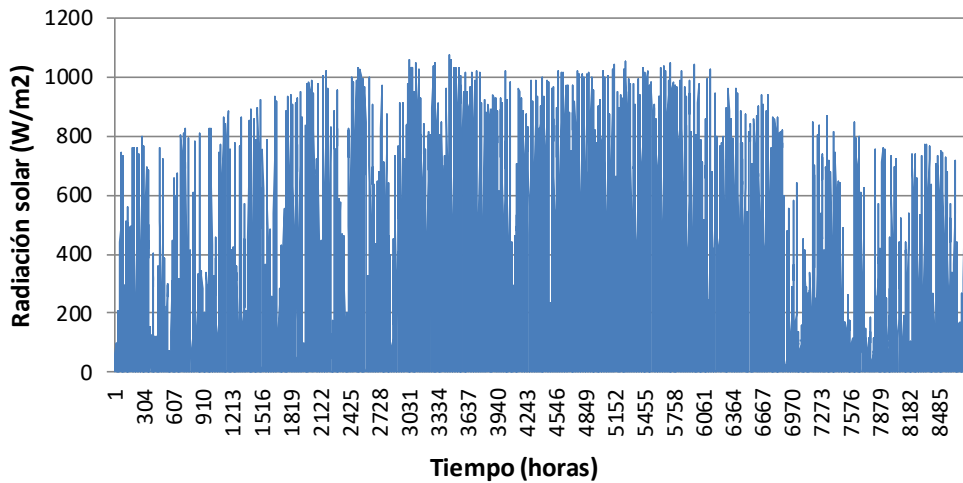


Figura 60. Radiación solar

En cada caso de estudio, las fuentes renovables y el sistema de almacenamiento fueron dimensionadas para satisfacer la demanda, tomando como referencia el recurso renovable del sitio y el perfil de la carga.

En la Tabla 12 se muestran las especificaciones de las fuentes renovables y sistema de almacenamiento en cada caso de estudio.

¹ Latitud = N 25° 1' 19,850", Longitud = W 98° 5' 14,580"

Los parámetros económicos del sistema aislado se muestran en la Tabla 13. El costo de inversión (CAPEX) en ambos casos muy similar ya que solo cuenta con una diferencia del 1,4 %. Sin embargo, el efecto en el mayor número de reemplazos de la batería (por el incremento en su uso) hace que el costo nivelado de energía en el Caso 2 (sin aerogenerador) sea 15% más elevado con respecto al Caso 1 (con aerogenerador).

La producción de energía del aerogenerador en horarios donde no se cuenta con radiación solar, hace que el sistema de almacenamiento sea de menor capacidad, pero sobre todo que se utilice por menos ciclos.

CASO	EÓLICO	FOTOVOLTAICO	ALMACENAMIENTO ANUAL REQUERIDO	CAPACIDAD DE ALMACENAMIENTO	CICLOS AL AÑO	REEMPLAZOS ASUMIENDO VIDA ÚTIL DE 1.500 CICLOS
Caso 1	5 kW	6 kW	11,640 kWh	80 kWh	146	Cada 10,2 años. Un reemplazo en 20 años
Caso 2	0 kW	14 kW	15,865 kWh	87.5 kWh	181	Cada 8.2 años. Dos reemplazos en 20 años

Tabla 12. Especificaciones de las fuentes y sistema de almacenamiento

CASO	COSTO	EÓLICO	FOTOVOLTAICO	BANCO DE BATERÍAS	TOTAL	LCOE
CASO 1	CAPEX	16.500 USD	10.800 USD	30.126 USD (1 reemplazo)	57.426 USD	0,310 USD/kWh
CASO 1	OPEX	412 USD/año	270 USD/año	753 USD/año	1.435 USD/año	0,310 USD/kWh
CASO 2	CAPEX	0 USD	25.200 USD	33.036 USD (2 reemplazos)	58.236 USD	0,359 USD/kWh
CASO 2	OPEX	0 USD/año	630 USD/año	825 USD/año	1.455 USD/año	0,359 USD/kWh

Tabla 13. Parámetros económicos del sistema aislado

CONCLUSIONES

Para contar con viabilidad económica en el uso de aerogeneradores de baja potencia, se deben definir claramente los criterios que se deben cumplir. Uno de los más criterios más importantes es el LCOE, pero existen otros como el VPN y el retorno de inversión. La selección adecuada del aerogenerador para un régimen viento en específico, puede hacer la diferencia entre tener o no viabilidad en una instalación.

En sistemas interconectados, se espera que el LCOE tenga un valor inferior a la tarifa, pero también que el VPN sea positivo. En sistemas aislados, el LCOE en una configuración exitosa, deberá ser menor con respecto a otras opciones disponibles o analizadas en el sistema.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] O. Rodríguez, M. Martinez, C. A. Lopez, and H. García, "Techno-Economic Feasibility Study of Small Wind Turbines in the Valley of Mexico Metropolitan Area" *Energies* 12(5). March 2019.

- [2] Ajayi, O.O.; Fagbenle, R.O.; Katende, J.; Ndambuki, J.M.; Omole, D.O.; Badejo, A.A. Wind Energy Study and Energy Cost of Wind Electricity Generation in Nigeria: Past and Recent Results and a Case Study for South West Nigeria. *Energies* 2014, 7, 8508–8534.
- [3] Johnson, N.H.; Solomon, B.D. A Net-Present Value Analysis for a Wind Turbine Purchase at a Small US College. *Energies* 2010, 3, 943–959.

CAPÍTULO 10: MANEJO DE LA INFORMACIÓN EXISTENTE

GABRIEL USERA

Facultad de Ingeniería, Universidad de la República, calle J. Herrera y Reissig 565, 11300, Montevideo

INTRODUCCIÓN

En forma complementaria al desarrollo del material presentado en los capítulos anteriores, se consideró de interés realizar un relevamiento del material educativo, técnico y de información sobre regulaciones locales, vinculado a pequeños aerogeneradores, desarrollado y disponible abiertamente en distintos países seleccionados.

En este capítulo se describe las características de la búsqueda y clasificación de documentación realizada y se comenta brevemente el contenido de algunos documentos a modo de ejemplo.

Esta colección de material complementa en distintos aspectos el material presentado en capítulos anteriores, teniendo en cuenta que en su mayoría está dirigido a un público más general, no necesariamente técnico, y por lo tanto no desarrolla en profundidad los temas.

La colección de material referida en este capítulo se encuentra disponible en el sitio web del [proyecto SWTOMP](#).

ALCANCE DEL RELEVAMIENTO

La búsqueda de material se orientó principalmente a los países de habla hispana correspondientes a los socios integrantes del proyecto, incluyendo: Argentina, España, México, República Dominicana, Uruguay. No obstante lo anterior se ha incluido en la colección también material de otros países socios del proyecto, entre ellos Finlandia y Rumania, y también material de países referentes como Reino Unido, Estados Unidos y Canadá.

Se prefirió en general incluir material que fuera editado en forma oficial por los estados correspondientes, ya sea por parte de Ministerios, Universidades u otros organismos reconocidos.

El material se clasificó en dos grandes grupos. En primer término, el material técnico, y en un segundo grupo el material correspondiente a regulaciones locales. La colección cuenta actualmente con 34 documentos, siendo de ellos 12 documentos de tipo técnico y 22 documentos relativos a regulaciones y normativas locales.

En el caso de la documentación correspondiente a regulaciones locales se ha procurado recopilar las versiones vigentes de dichos documentos, no obstante lo cual se encomienda al lector verificar que las mismas siguen vigentes y que no han sido derogadas o substituidas recientemente por nuevas versiones en los países respectivos.

DOCUMENTOS TÉCNICOS

Los documentos técnicos incluidos en esta recopilación se organizan a su vez en dos grupos. El primero es correspondiente a documentos orientados a un público general y de carácter informativo, y de promoción del uso de las pequeñas turbinas eólicas. El segundo grupo corresponde a documentos orientados a técnicos con conocimientos específicos en la materia y que presentan prácticas recomendadas a nivel local.

A modo de ejemplo se comentan brevemente a continuación un ejemplo de cada uno de estos grupos de documentos, correspondientes a dos países, Uruguay y España.

En el caso de Uruguay, uno de los documentos seleccionados consiste en la “Guía para Microgeneración en Uruguay” editado en 2013 por la Dirección Nacional de Energía (DNE) del Ministerio de Energía, Industria y Minería. La misma está dirigida al público general, consumidores y pequeñas empresas, que puedan estar interesadas o considerando la instalación de generación renovable para consumo propio y/o para volcar a la red. La guía cubre información relativa a la instalación y los procedimientos necesarios para cumplir con la regulación nacional. Otro documento editado por la misma DNE, en 2010, está específicamente dirigido a la microgeneración de origen eólico y se titula “Sistemas eólicos pequeños para generación de electricidad conectados a la red eléctrica - Una guía para consumidores en Uruguay”. La misma cubre aspectos técnicos relativos a la instalación de pequeños aerogeneradores y aspectos vinculados a la regulación local. Se encuentra basada en documentos técnicos similares editados por instituciones de referencia como NREL de USA.

En el caso de España, se incluye en la colección, entre otros documentos, el “PLAN DE ENERGÍAS RENOVABLES 2011-2020”, emitido por el Consejo de Ministros del Estado en 2011. En este documento se establecen objetivos de expansión de la generación de origen renovable, con objetivos específicos a nivel nacional para la eólica de pequeña escala. Estas proyecciones o metas establecidas están siendo revisadas actualmente, a raíz de la crisis financiera que ha afectado la comunidad europea en la última década.

DOCUMENTOS DE REGULACIÓN

Los documentos incluidos en este grupo corresponden a las versiones actuales, a la fecha de elaboración de este informe, de distintas normativas oficiales en cada país que regulan la instalación y operación de micro aprovechamientos eólicos. En algunos casos establecen los marcos regulatorios de promoción de esta tecnología.

También dentro de este grupo se han seleccionado dos ejemplos de documentos que se describen a continuación, correspondientes a México y Argentina.

En el caso de México, uno de los documentos de normativa seleccionados consiste en el “Manual de Interconexión de centrales de generación con capacidad menor a 0,5 MW”, emitido por el Ministerio de Energía de México, en 2016. El objetivo de este es establecer los lineamientos

generales en materia administrativa y de infraestructura que deberán cumplir los Distribuidores, Generadores Exentos y Generadores que representen Centrales Eléctricas con capacidad menor a 0,5 MW para realizar la interconexión de sus Centrales Eléctricas a las Redes Generales de Distribución de manera ágil y oportuna, garantizando las condiciones de eficiencia, Calidad, Confiabilidad, Continuidad, seguridad y sustentabilidad del Sistema Eléctrico Nacional.

Su alcance es de orden público, interés general, observancia en todo el territorio nacional y de carácter obligatorio para: el Centro Nacional de Control de Energía (CENACE), distribuidores, suministradores, generadores exentos y generadores que representen centrales eléctricas con capacidad menor a 0,5 MW; es aplicable cuando se requiera: agregar un punto de interconexión para una central eléctrica, cambiar un punto de interconexión ya existente o modificar la capacidad instalada de la o las centrales eléctricas que se encuentran interconectadas, siempre que la generación neta, incluyendo la modificación, mantenga las características establecidas para la generación con centrales con capacidad neta menor a 0,5 MW y generación distribuida en términos de la Ley de la Industria Eléctrica (LIE) y de las Reglas del Mercado.

En el caso de Argentina, la colección recopila numerosas normas, tanto de ámbito nacional como de ámbito provincial. Dentro de ellas se incluye el Decreto Reglamentario “Régimen de fomento a la generación distribuida de energía renovable integrada a la red eléctrica pública”, promulgado en 2018. El objetivo de este decreto es reglamentar la ley correspondiente la cual establece que el estado “implementará las políticas y determinará las condiciones jurídicas y contractuales para la generación de energía eléctrica de origen renovable por parte de usuarios de la red de distribución, para su autoconsumo, con eventual inyección de excedentes a la red, así como la obligación de los prestadores del servicio público de distribución de facilitar dicha inyección, asegurando el libre acceso a la red de distribución”.

CONCLUSIONES

En este capítulo se ha presentado y descrito brevemente una recopilación de material oficial editado y disponible en distintos países de habla hispana correspondientes a socios del proyecto SWTOMP. El material se ha clasificado en dos grandes grupos, el primero de material técnico y el segundo de regulaciones y normativas oficiales locales. El material descrito se encuentra disponible en la página web del proyecto SWTOMP.

AGRADECIMIENTOS

La preparación de este documento estuvo apoyada por proyectos con financiación ANII-Uruguay, ERANET-LAC y CYTED.

