



UNIVERSIDAD DEL BÍO-BÍO

FACULTAD DE INGENIERÍA

DEPTO. INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

“Estudio de instalación de un Aerogenerador en el Colegio Concepción Pedro de Valdivia”

AUTORES

LUIS GUSTAVO CARRASCO SANZANA

MARCO AURELIO MARDONES SEPÚLVEDA

SEMINARIO PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO DE EJECUCIÓN EN ELECTRICIDAD

CONCEPCIÓN-CHILE

2015



UNIVERSIDAD DEL BÍO-BÍO

FACULTAD DE INGENIERÍA

DEPTO. INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

“Estudio de instalación de un Aerogenerador en el Colegio Concepción Pedro de Valdivia”

AUTORES

LUIS GUSTAVO CARRASCO SANZANA

MARCO AURELIO MARDONES SEPÚLVEDA

DOCENTE PATROCINANTE
JAVIER RIEDEMANN AROS

DOCENTES ADJUNTOS
FABRICIO SALGADO DÍAZ
JUAN CARLOS DELGADO NAVARRO

Índice

Resumen	2
Objetivos.....	3
Introducción	4
Marco conceptual.....	5
1. Reseña histórica y la utilización de aerogeneradores.....	5
1.1. Origen	5
1.2. La industria eólica.....	7
1.3. La energía eólica en algunos países	8
2. Descripción y funcionamiento de los aerogeneradores.....	9
2.1. Nociones preliminares.....	9
2.2. Tipología de los aerogeneradores	12
2.3. Componentes	16
2.4. Funcionamiento	19
2.5. Recientes avances técnicos en los aerogeneradores	20
3. Modelos para el uso de la energía eólica	20
3.1. Analizando el viento	20
4. Estudio de instalación de un aerogenerador pequeño	33
4.1. Introducción.....	33
4.2. Análisis de velocidad del viento	33
4.3. Cálculo de pérdidas y conductor.....	54
4.5. Generador eólico, regulador de carga, inversor y baterías	57
4.6. Ensayo de laboratorio.....	62
5. Propuesta para cambio de equipos	68
5.1. Transformador de voltaje trifásico.....	68
5.2. Regulador de carga	70
5.3. Inversor	71
5.4. Banco de baterías	72
5.5. Costo total de propuesta.....	73
6. Comentarios y conclusiones	74
Bibliografía	75

Resumen

En el presente seminario se documentará el estudio para desarrollar la instalación de un aerogenerador en el Colegio Concepción Pedro de Valdivia en la comuna de Chiguayante, la finalidad de la instalación es difundir y crear conciencia sobre las energías renovables no convencionales (ERNC).

En el capítulo 1, se revisará el origen del uso del viento para el aprovechamiento del hombre, así como los avances para obtener la máxima utilización del mismo, desde sus orígenes hasta la actualidad.

El capítulo 2, hará referencia sobre la descripción y funcionamiento de un generador eólico pasando desde las nociones preliminares, topologías, componente, funcionamiento y los recientes avances técnicos de los aerogeneradores.

En el capítulo 3, se discutirán los elementos que son necesarios conocer con la finalidad de tener un estudio fiable del viento según la altura y entorno donde se instalará el generador eólico.

En el capítulo 4, se realizará un estudio del viento en la zona donde será instalado el aerogenerador, además de mostrar ensayos de laboratorio para determinar la potencia real generada por el generador eólico.

En el capítulo 5, se realiza una propuesta de cambio de equipos adquiridos debido a que el regulador de carga e inversor son equipos que no están aprobados por la superintendencia de electricidad y combustible, además se realiza una cotización de todos los equipos necesarios para el correcto funcionamiento del generador eólico.

Objetivos

Objetivo General:

Analizar la factibilidad de la instalación de un aerogenerador pequeño, en el Colegio Concepción Pedro de Valdivia.

Objetivos Específicos:

- Analizar las características del viento y la zona de montaje.
- Realizar un proyecto de instalación a partir de la estimación de los datos recopilados.
- Realizar un estudio económico para la conexión independiente (no conectado a la red).
- Visualización de los niveles reales de generación del sistema eólico.

Introducción

La industrialización, explosión demográfica, crecimiento urbano, entre otros procesos sociales, han estado rodeados de desarrollo tecnológico, en el cual destaca la utilización de la energía en sus distintas formas.

Actualmente, la gran cantidad de instrumentos y aparatos que se utilizan para facilitar la vida del ser humano funcionan, a través, de energía eléctrica, razón que provoca un aumento cada año en la construcción de centrales hidroeléctricas y termoeléctricas las que conllevan un alto impacto ambiental.

En la búsqueda de disminuir el costo de producción y al mismo tiempo la contaminación ambiental, hoy en día se utilizan con mayor frecuencia las denominadas Energías Renovables no convencionales, siendo las energías solar y eólica las de mayor desarrollo tecnológico en la actualidad.

En algunas ciudades de Chile ya se encuentran instalados parques de generadores eólicos los cuales ayudan con la generación de electricidad que se consume en el país. Debido a que tiene una buena acogida por parte de las personas, cada vez hay más interesados en instalar aerogeneradores.

El Colegio Concepción Pedro de Valdivia, es uno de los usuarios que quiere adherirse a esta iniciativa, con el objetivo de generar conciencia en su entorno y estudiantes, es por esta razón que el presente seminario se enfoca en el estudio de instalación de un generador eólico en su recinto.

La energía eólica, tiene entre sus ventajas, ser económica e inagotable, además de no producir impactos negativos importantes sobre el medio ambiente. Con el objetivo de evaluar la posibilidad del funcionamiento de un aerogenerador, se analizaron las condiciones de viento en la zona de montaje y se realizaron ensayos y cálculos que permitieron tener una visión clara respecto a la factibilidad de la instalación.

Marco conceptual

1. Reseña histórica y la utilización de aerogeneradores

1.1. Origen

La fuente de energía eólica es el viento, o mejor dicho, la energía mecánica que, en forma de energía cinética transporta el aire en movimiento. El viento es originado por el desigual calentamiento de la superficie de nuestro planeta, originando movimientos de la masa atmosférica.

La Tierra recibe una gran cantidad de energía procedente del Sol. Esta energía, en lugares favorables, puede ser del orden de 2.000 kWh/m² anuales. El dos por ciento de ella se transforma en energía eólica con un valor capaz de dar una potencia de 10×10^{11} GW.

En la antigüedad no se conocían estos datos, pero lo que sí es cierto, es que intuitivamente conocían el gran potencial de esta energía. Las formas de mayor utilización son las de producir energía eléctrica y mecánica, bien sea para autoabastecimiento de electricidad o bombeo de agua. Siendo un aerogenerador los que accionan un generador eléctrico y un aeromotor los que accionan dispositivos, para realizar un trabajo mecánico teniendo estos su principal origen en los molinos de viento.

Actualmente, la contribución de la energía eólica a la generación de electricidad es todavía poco significativa, pero es evidente que esta fuente energética tiene un amplio potencial de crecimiento. En los últimos años, la energía eólica ha experimentado un desarrollo tecnológico considerable y ha incrementado su competitividad en términos económicos en relación con otras fuentes de energía.

1.1.1. Molino de viento

El molino fue y aún es, un avance importante, su invención tuvo como principal objetivo la molienda de granos evitando realizar esta operación en forma manual o empleando la fuerza de animales de tiro; los motores no existían y menos los combustibles que los harían trabajar. Para que la utilidad de los molinos fuera constante, se construyeron en espacios amplios y abiertos, donde las corrientes de aire pudiesen llegar con facilidad. Sin embargo, para llegar a los modernos aerogeneradores se tuvieron que realizar mejoras tanto en el diseño de las palas (aspas) para la

transformación de la energía cinética en mecánica, como de las cajas convertidoras de potencia que operan dentro de los mismos, la figura 1.1 muestra la apariencia física de un molino de viento.



Figura 1.1: Molino de viento.

1.1.2. Cronología de los pioneros de la energía eólica

Charles F. Brush (1849-1929), uno de los fundadores de la compañía eléctrica americana. En el verano de 1887-88 construyó una máquina considerada actualmente como el primer aerogenerador para generación de electricidad. Las dimensiones eran para aquella época enormes: Diámetro de rotor de 17 m y 144 hojas de rotor de madera de cedro. Estuvo en funcionamiento durante 20 años, durante los cuales alimentó una batería colocada en su sótano. A pesar de las dimensiones del rotor, la potencia del aerogenerador era de solamente 12kW.

Poul la Cour (1846-1908), meteorólogo danés. Se le considera el padre de la energía eólica moderna. Sus primeros aerogeneradores comerciales se instalaron después de la primera guerra mundial, como consecuencia de la escasez de combustibles. Fundó la primera academia de energía eólica, de donde salieron los primeros ingenieros especializados. Paralelamente fundó el primer periódico exclusivo con esta temática.

Albert Betz (1885-1968), Físico alemán. En su etapa de director del instituto aerodinámico en Göttingen, formuló la ley Betz, que establecía el máximo valor que se puede aprovechar de la energía cinética del viento, 59,3%. Su teoría sobre la formación de las alas todavía sirve de fundamento para la construcción de aerogeneradores.

Palmer Cosslett Putnam (1910-1986), ingeniero americano, desarrolló en 1941 el aerogenerador Smith Putman, de 1,25 MW. Éste aerogenerador trabajó hasta 1945 sin interrupciones, hasta que un fallo en el material hizo que dejase de funcionar. En aquella época no existían materiales en el mercado aptos para este objetivo.

Ulrich W Hüttner (1910-1990), ingeniero alemán. Su aerogenerador StGW-34 en el año 1957 se considera la primera piedra de la tecnología eólica moderna.

Johannes Juul (1887-1969), ingeniero danés. Estudiante de Poul la Cour. Construyó el primer aerogenerador para corriente alterna de 200 kW, en Dinamarca, en 1957. Es el predecesor de los aerogeneradores actuales.

1.2. La industria eólica

La energía eólica fue utilizada por primera vez en 1890 para producir electricidad. A lo largo de los siguientes cincuenta años, se construyeron miles de pequeños molinos para producir electricidad. En 1941 se construyó en Estados Unidos el primer aerogenerador capaz de producir 1.000 kW. Hoy, con mejores materiales, existen molinos de viento que producen hasta 3.000 kW. Para esto tuvieron que pasar por muchas modificaciones teniendo su auge en el siglo pasado y en lo que llevamos de este.

1.2.1. Industria 1969-1980

En el lapso de estos años los gobiernos de muchos países como los de Europa y los Estados Unidos de Norteamérica financiaron muchos programas para el desarrollo de mejoras e implementaciones en el uso de la energía eólica. El crecimiento de la utilización de energía eólica en ese período de tiempo fue relevante llegando a mostrarse como una fuente de generación de energía rentable en lugares como Hawai y California.

1.2.2. Industria 1981-2000

Aquí se unen muchos países a la generación de energía eléctrica por medios eólicos; entre los países con mayor producción en esta temporada se puede mencionar Japón, Alemania, Dinamarca y Estados Unidos, los resultados mostraron que se tenían más de 20.000 turbinas eólicas con una capacidad instalada de 3.500 MW, y producían un total de 4.000 millones de kWh por año. En 1995 se instalaron en el mundo nuevas turbinas eólicas totalizando cerca de 1.300 MW, aumentando la capacidad instalada global en 37 por ciento a casi 5.000 MW. Nuevas plantas generadoras instaladas en 1996 agregaron otros 1.500 MW a aquel total.

1.2.3. Industria en la actualidad

En la actualidad ya son muchos los países que utilizan este tipo de energía a gran escala, se le agregan muchas variantes en las mejoras de la productividad de los aerogeneradores, entre los cambios que se están realizando son los novedosos aerogeneradores que pueden funcionar con velocidades de viento alta y baja, es decir que pueden ajustarse a los cambios de los vientos y no están sujetos a rangos de velocidades como lo tenían hace pocos años. Las inversiones mundiales en energía eólica ahora llegan a 5.500 millones de dólares convirtiendo a la industria en una creciente fuerza económica global. Y los mercados para el viento crecen más rápido que cualquier otra tecnología, duplicando cada cinco años la capacidad eólica mundial. También entran en este tipo de generación países como España y Holanda, a ser unos de los más grandes del mundo.

1.3. La energía eólica en algunos países

Las nuevas cifras dadas a conocer por el Consejo Mundial de Energía Eólica (GWEC) muestran que la industria eólica mundial creció un 44% en 2014, la instalación de más de 51 GW.

Según el Consejo Mundial de Energía Eólica, llega a un total acumulado en todo el mundo de 369 GW a fines del año 2014. La tabla 1.1 muestra los niveles de generación eólica de los 10 países que tienen mayor nivel de potencia instalada a nivel mundial hasta el año 2014, según el Consejo Mundial de Energía Eólica.”

Tabla 1.1: Países con mayor producción eólica.

País	Potencia instalada al año 2014 (GW)	Porcentaje a nivel mundial (%)
China	114,61	31,01
Estados Unidos	65,88	17,82
Alemania	39,17	10,60
España	22,99	6,22
India	22,47	6,08
Reino Unido	12,44	3,37
Canadá	9,69	2,62
Francia	9,28	2,51
Italia	8,66	2,34

Continuación tabla 2.1: Países con mayor producción eólica.

País	Potencia instalada al año 2014 (GW)	Porcentaje a nivel mundial (%)
Brasil	5,94	1,61
Chile	0,89	0,24
Resto del mundo	57,58	15,58
TOTAL	369,60	100

2. Descripción y funcionamiento de los aerogeneradores

2.1. Nociones preliminares

Para comprender correctamente el funcionamiento de los aerogeneradores se debe tener en consideración algunos conceptos que permitan entender su diseño.

2.1.1. La energía eólica

La energía eólica es la que se obtiene por el aprovechamiento de la fuerza del viento. Todas las fuentes de energía renovables excepto la mareomotriz y la geotérmica, e incluso la energía de los combustibles fósiles, provienen, en último término, del sol. El sol irradia 174.423.000.000.000 kWh de energía hacia la Tierra. Alrededor de un 1 a un 2 por ciento de la energía proveniente del sol es convertida en energía eólica.

- **Formación de los vientos**

El viento es el flujo de gases a gran escala. En la Tierra, el viento es el movimiento en masa del aire en la atmósfera en movimiento horizontal. Günter D. Roth lo define como «la compensación de las diferencias de presión atmosférica entre dos puntos.

- **Fuerza de coriolis**

Se trata de una fuerza no inercial de curvatura que experimenta un cuerpo que se desplaza a una cierta velocidad por la superficie de un planeta con rotación en torno a su eje vertical, esta fuerza, provoca que los cuerpos que se desplacen en el hemisferio norte sufren en su desplazamiento una continua desviación hacia la derecha, mientras que en el hemisferio sur será

hacia la izquierda. La fuerza de coriolis es un fenómeno visible por ejemplo en las cuencas de los ríos que están excavadas más profundamente en una cara que en la otra, la cual depende del hemisferio en que se encuentre: en el hemisferio norte las partículas sueltas son desviadas hacia la derecha. En el hemisferio norte el viento tiende a girar en el sentido contrario al de las agujas del reloj cuando se acerca a un área de bajas presiones. En el hemisferio sur el viento gira en el sentido de las agujas del reloj alrededor de áreas de bajas presiones.

- **Vientos geostróficos**

Los vientos que han sido considerados como vientos globales son en realidad los vientos geostróficos. Los vientos geostróficos son generados, principalmente, por las diferencias de temperatura, así como por las de presión, y apenas son influenciados por la superficie de la tierra. Los vientos geostróficos se encuentran a una altura de 1.000 metros a partir del nivel del suelo. El viento sube desde el ecuador y se desplaza hacia el norte y hacia el sur en las capas más altas de la atmósfera. Alrededor de los 30° de latitud en ambos hemisferios la fuerza de Coriolis evita que el viento se desplace más allá. En esa latitud se encuentra un área de altas presiones, por lo que el aire empieza a descender de nuevo. Cuando el viento sube desde el ecuador existe un área de bajas presiones cerca del nivel del suelo atrayendo los vientos del norte y del sur.

2.1.2. Flujo de fluidos

Los fluidos muestran distintos comportamientos, en especial el viento, aunque si se analizan en una manera más detallada siempre poseen un porcentaje de desorden pero para efectos útiles se pueden clasificar en continuo o laminar y turbulento.

- **El flujo continuo**

Este tipo de flujo es más conocido como flujo laminar y se caracteriza por un movimiento ordenado de las partículas de fluido, existiendo unas líneas de corriente y trayectorias bien definidas.

- **El flujo turbulento**

En el flujo turbulento las partículas presentan un movimiento aleatorio y sin dirección ordenada sin que existan líneas de corriente ni trayectorias definidas.

2.1.3. Energía y potencia

La energía es la capacidad de producir algún tipo de trabajo o poner algo en movimiento. Si bien el término puede definirse desde una variedad amplia de enfoques, lo cierto es que todos ellos guardan algún tipo de relación con la definición provista.

La potencia es la cantidad de trabajo que se realiza por unidad de tiempo. Puede asociarse a la velocidad de un cambio de energía dentro de un sistema, o al tiempo que demora la concreción de un trabajo. Por lo tanto, es posible afirmar que la potencia resulta igual a la energía total dividida por el tiempo.

2.1.4. Funcionamiento aerodinámico

Las palas o aspas de los aerogeneradores poseen un diseño aerodinámico, esto es lo que hace que puedan aprovechar la velocidad del impacto del viento como las diferencias de presiones que provoca la velocidad. Este diseño es muy parecido a las alas de los aviones, la forma del perfil se muestra en la figura 2.1.

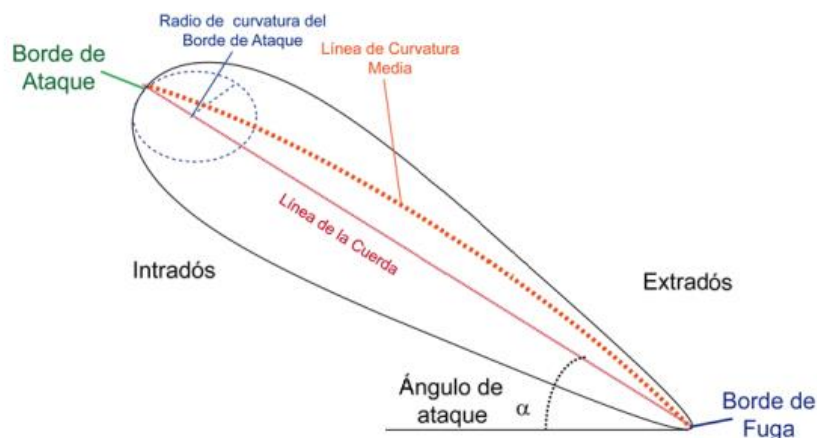


Figura 2.1: Diseño aerodinámico de aspa.

El viento golpea en primera medida el borde de ataque y llegará con una mayor velocidad en la parte de los extradós. Al llegar un poco arriba del borde de salida se crea poca turbulencia y esto le da mayor velocidad al viento, lo cual crea una menor presión que en la parte de los intradós y esa diferencia de presión hace que se eleve la parte del borde de salida, creando con esto la rotación o giro del aerogenerador, ya que no se podrá elevar debido a que están unidas las palas al rotor.

2.2. Tipología de los aerogeneradores

Los aerogeneradores pueden ser clasificados de muchas maneras, las cuales serán descritas a continuación:

2.2.1. Por la posición del aerogenerador

Los aerogeneradores pueden estar en dos posiciones las cuales son:

- **Eje vertical**

Los aerogeneradores de eje vertical (ver figura 2.2) prácticamente ya no se construyen pues su tecnología se quedó estancada al no ser capaces de crecer en el aprovechamiento del viento. La particularidad de estos aerogeneradores es que son mucho más cómodos de reparar pues todos los elementos de transformación de la energía del viento se encuentran en el suelo.



Figura 2.2: Tipos de aerogeneradores de eje vertical.

De allí sale el eje vertical que se extiende al centro de dos palas curvadas que salen de la parte inferior del eje hasta su parte superior final. La forma ovalada de las palas permite hacerlo girar y producir electricidad. El inconveniente de este tipo de turbinas es que el eje no supera mucha altura y las velocidades del viento disminuyen al llegar al suelo por efecto de la rugosidad del mismo. La velocidad del viento es muy superior a más altura, con lo que estos aerogeneradores han ido quedando atrás con respecto a los de eje horizontal. Los aerogeneradores de eje vertical a su vez se clasifican en:

- **Darrieus**

Estos aerogeneradores emplean la sustentación de sus palas, tienen un par de arranque débil y una velocidad de rotación importante, pueden ser de dos, tres o más palas y para mejorar su par de arranque se les suele acoplar un aerogenerador Savonius (pequeño) lo que en contrapartida perjudica su velocidad máxima.

- **Panemonas**

Cuatro o más semicírculos unidos al eje central. Su rendimiento es bajo.

- **Sabonius**

Dos o más filas de semicilindros colocados opuestamente.

• **Eje horizontal**

Los aerogeneradores de eje horizontal (ver figura 2.3), a diferencia de los anteriores, aprovechan más el viento. La altura que se consigue situar el eje que mueve el generador es muy superior a los anteriores y por esto son las más utilizadas en la actualidad, pues su tecnología sigue creciendo no sólo por la altura sino por la calidad y medios mejorados de los componentes que se utilizan en la generación de electricidad.



Figura 2.3: Tipos de aerogeneradores de eje horizontal.

2.2.2. Por la posición del equipo respecto al viento

Dependiendo del ángulo o parte en la cual sea aprovechado el viento se clasifican en:

- **A barlovento**

Este nombre reciben las máquinas que reciben el flujo de corriente del viento en la parte de las palas, es decir que en el aerogenerador el viento será tocado en un principio por las palas, esto tiene algunas ventajas de los diseños a sotavento es que se evita las pérdidas por fricción del viento así como no modificar el viento y aprovecharlo a su máximo en un flujo que sea lo más laminar posible. Con mucho la mayoría de los aerogeneradores tienen este diseño y tiene como desventaja que necesita mecanismos de orientación.

- **A sotavento**

Este tipo de aerogenerador tiene la góndola en la parte frente a la dirección del viento, este tipo posee la ventaja que al poseer la góndola al frente esta misma le funciona como un mecanismo de dirección y no es necesario que cuente entonces con uno, aunque este tipo de direccionamiento es poco confiable para aerogeneradores mayores debido a su peso, posee esta ventaja en los cuales sean de unas dimensiones menores, como desventaja se puede denotar que crea turbulencias en el viento antes que hagan contacto con las aspas lo cual es perjudicial para el aprovechamiento de la energía.

2.2.3. Por número de palas (aspas)

- **Una Pala**

Estos únicamente poseen una pala o aspa como se aprecia en la figura 2.4, al tener sólo una pala estos aerogeneradores precisan un contrapeso en el otro extremo para equilibrar. La velocidad de giro es muy elevada. Su gran inconveniente es que introducen en el eje unos esfuerzos muy variables, lo que acorta la vida útil del equipo.



Figura 2.4: Aerogenerador de una pala.

- **Dos palas**

Este posee dos palas como se aprecia en la figura 2.5, los diseños bipala de aerogeneradores tienen la ventaja de ahorrar el coste de una pala y, por supuesto, su peso. Sin embargo, suelen tener dificultades porque necesitan una mayor velocidad de giro para producir la misma energía de salida. Esto supone una desventaja tanto en lo que respecta al ruido como al aspecto visual.



Figura 2.5: Aerogenerador de dos palas.

- **Tres palas**

Como su clasificación lo indica poseen tres aspas o palas como se aprecia en la figura 2.6, la mayoría de los aerogeneradores modernos tienen diseños tripala, mantenido en la posición corriente arriba, usando motores eléctricos en sus mecanismos de orientación. La gran mayoría de las turbinas vendidas en los mercados mundiales poseen este diseño. El concepto básico fue introducido por primera vez por el célebre aerogenerador de Gedser.



Figura 2.6: Aerogenerador de tres palas.

- **Multipalas**

Con un número superior de palas o multipalas como se aprecia en la figura 2.7. Se trata del llamado modelo americano, debido a que una de sus primeras aplicaciones fue la extracción de agua en pozos de las grandes llanuras en América, este posee el inconveniente que al poseer muchas palas crea turbulencias en el flujo del viento y hace menos productivas al resto de las palas.



Figura 2.7: Aerogenerador multipalas.

2.3. Componentes

Las partes que conforman un aerogenerador son las siguientes:

2.2.1. Góndola

Contiene, los componentes capaces de generar energía eléctrica, el generador eléctrico, el multiplicador, sistemas de enfriamiento y los sistemas de control orientación y freno.

2.3.2. Palas del rotor

Estas son conocidas también como “aspas” las cuales capturan el viento y transmiten su potencia hacia el buje, esto lo hacen sobre la base de la velocidad que tenga el viento así como por la diferencia de presiones que se obtiene por medio de la turbulencia creada por el viento, su diseño es muy parecido al ala de un avión.

2.3.3. Buje

Este es el encargado de comunicar a la barra de baja velocidad, es decir que lleva la potencia y las revoluciones proporcionadas por las palas del rotor este va acoplado al eje de baja velocidad del aerogenerador.

2.3.4. Eje de baja velocidad

Eje de baja velocidad que conecta el buje del rotor al multiplicador. Su velocidad de giro es muy lenta.

2.3.5. Multiplicador

Tiene a su izquierda el eje de baja velocidad, permite que el eje de alta velocidad que está a su derecha gire más rápido que el eje de baja velocidad, esto lo hace a base de un juego de engranajes, los que se encargan de convertir la potencia en velocidad de giro.

2.3.6. Eje de alta velocidad

Este eje lleva una velocidad mayor pero una potencia menor, ya que ha pasado por la caja multiplicadora, este va directamente al generador eléctrico, en él también se encontrarán los frenos de emergencia en caso de que el viento supere la velocidad admisible para el equipo y que el freno aerodinámico no funcione.

2.3.7. Freno mecánico

Este freno será utilizado, cuando los vientos superen velocidades muy altas y el equipo no sea diseñado para su utilización, también se utiliza para cuando se les da mantenimiento a las unidades.

2.3.8. Generador eléctrico

Aquí vendrá el eje de alta velocidad, para darle revoluciones y poder generar la energía eléctrica. Generalmente suele ser un generador sincrónico o de inducción.

2.3.9. Mecanismo de orientación

El mecanismo de orientación será el encargado de responder a las órdenes dadas por el control electrónico, las cuales han sido censadas en ayuda de la veleta, este mecanismo tendrá un motor de corriente continua y con base a engranajes será conectado a una corona dentada que estará en la base alta del sistema de aerogenerador y lo moverá los grados que sean necesarios para un mayor aprovechamiento del flujo del viento.

2.3.10. Unidad de refrigeración

Mecanismo que sirve para enfriar el generador eléctrico

2.3.11. Torre

La torre es la que soporta la góndola. Hay varios tipos de torres, tubulares, tensadas y de celosía. Aunque las de celosía son mucho más económicas, por seguridad se utilizan las tubulares. Las tubulares son mucho más seguras para los operarios que tengan que realizar sus labores de reparación en la góndola. Estas torres tubulares tienen escaleras interiores con "pisos" de seguridad cada varios metros e incluso ya las hay con ascensor.

- **Torre de tubulares**

La mayoría de los grandes aerogeneradores se entregan con torres tubulares de acero, fabricadas en secciones de 6 a 20 metros, poseen bridas en cada uno de los extremos, y son unidas con pernos. Las torres son tronco-cónicas es decir, con un diámetro creciente hacia la base, con el fin de aumentar su resistencia y al mismo tiempo ahorrar material.

- **Torre de mástil tensado**

Muchos de los aerogeneradores pequeños están contruidos con delgadas torres de mástil sostenidas por cables tensores. La ventaja es el ahorro de peso y, por lo tanto, de coste. Las desventajas son el difícil acceso a las zonas alrededor de la torre, lo que las hace menos apropiadas para zonas agrícolas.

- **Torre de celosía**

Las torres de celosía son fabricadas utilizando perfiles de acero soldados. La ventaja básica de las torres de celosía es su costo, puesto que una torre de celosía requiere sólo la mitad de material que una torre tubular sin sustentación adicional con la misma rigidez. La principal desventaja de este tipo de torres es su apariencia visual. En cualquier caso, por razones estéticas, las torres de celosía han desaparecido prácticamente en los grandes aerogeneradores modernos.

- **Torres híbridas**

Algunas torres están hechas con diferentes combinaciones de las ya mencionadas. Es decir una combinación entre algunos de los tipos ya mencionados.

2.3.12. Rotor

En el rotor se incluyen dos componentes, el buje y las palas, por medio del rotor se sujeta el buje que las une las palas.

2.4. Funcionamiento

Los aerogeneradores convierten la energía del viento en energía eléctrica, la eficiencia de conversión de la fuerza del viento en electricidad depende en gran medida del diseño de las palas de la hélice. La energía captada por las palas del aerogenerador es transmitida al rotor, el cual está conectado al eje de baja velocidad, esta es llevada a el engranaje multiplicador que transforma el giro lento del eje de baja velocidad en un giro muy rápido que alimentará el generador. Todos estos mecanismos están colocados en una góndola situada a gran altura sobre el suelo por medio de un soporte. La figura 2.8 muestra los componentes de la góndola de un aerogenerador.

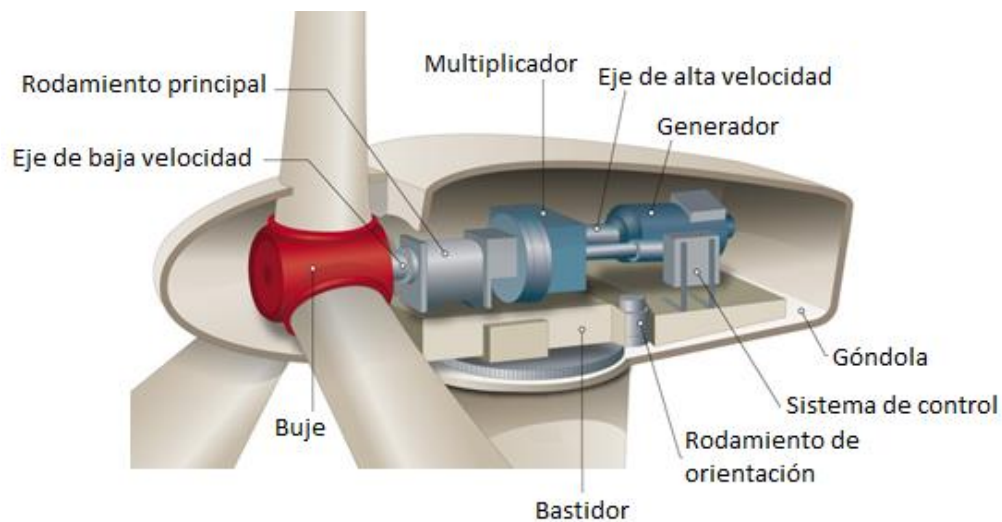


Figura 2.8: Componentes de góndola de aerogenerador.

2.5. Recientes avances técnicos en los aerogeneradores

Los últimos avances han estado en casi todas las partes del aerogenerador, pero los de mayor importancia son los del diseño más aerodinámico y los nuevos generadores que soportan velocidades mayores, esto con el fin de poder ampliar los rangos de velocidad de aprovechamiento del viento, ya que anteriormente podían admitir velocidades muy limitadas y ahora el margen de velocidades se vuelve cada vez más amplio al punto que su funcionamiento es casi continuo salvo en casos críticos.

3. Modelos para el uso de la energía eólica

3.1. Analizando el viento

3.1.1. El recurso eólico, potencia del viento

Una de las características del recurso eólico es su condición aleatoria y variable, por cuanto depende de condiciones atmosféricas. Asimismo, los vientos potencialmente aprovechables para la generación de electricidad se encuentran concentrados en zonas relativamente pequeñas o sitios específicos, por lo que el primer paso para su aprovechamiento es la prospección (o evaluación de las características del viento). Para ello, existen diferentes técnicas, que van desde la referencia popular hasta el uso de imágenes satelitales. Sin embargo, no importa qué tan sofisticados sean los métodos de prospección; la evaluación de la factibilidad técnico-económica de un proyecto eólico eléctrico exige un conocimiento detallado del comportamiento del viento y, para ello, es imprescindible llevar a cabo mediciones anemométricas in situ.

Se conoce que el aire posee masa, se manifiesta en forma de viento que lleva consigo energía cinética que, mediante una turbina eólica, puede transformarse en electricidad.

$$E_{cinética} = \frac{1}{2} \cdot m_{aire} \cdot v^2 \quad (1)$$

Donde:

$E_{cinética}$: Energía cinética del viento en [J].

m_{aire} : Masa el aire en [kg].

v : Velocidad del viento en [m/s].

Para calcular la masa de aire que pasa, se considera el volumen que atraviesa la superficie de las aspas en un tiempo t

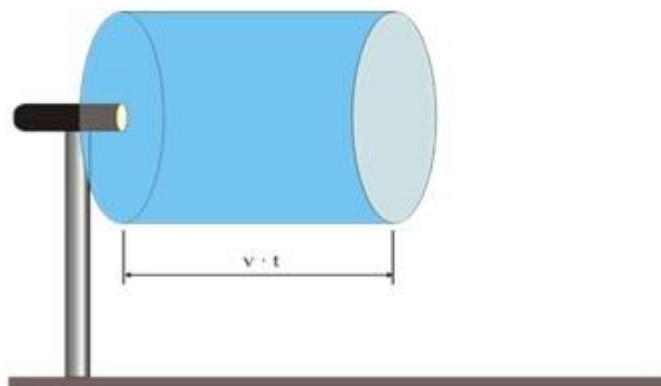


Figura 3.1: Volumen del cilindro de aire de un aerogenerador.

En el dibujo, ese volumen es del cilindro, cuya base es la superficie de las aspas, y la altura es el producto de la velocidad del aire por el tiempo:

$$V = S \cdot (v \cdot t) \quad (2)$$

La masa de aire que pasa en un tiempo t será el producto de la densidad por el volumen de aire que pasa en ese tiempo:

$$m = \rho \cdot V \quad (3)$$

Con lo cual, la ecuación queda como:

$$E_{cinetica} = \frac{1}{2} \cdot m_{aire} \cdot v^2 = \frac{1}{2} \cdot (\rho \cdot V) \cdot v^2 \quad (4)$$

$$E_{cinetica} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot v \cdot t \cdot v^2 = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot t \cdot v^3 \quad (5)$$

Cuando la cantidad de aire que pasa es elevada, no se trabaja con energía (tendríamos cifras enormes), sino con la potencia, y los cálculos se realizan por unidad de tiempo:

$$P = \frac{E_{cinetica}}{t} = \frac{\left(\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot t \cdot v^3\right)}{t} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot v^3 \quad (6)$$

Donde:

S: Superficie [m^2].

ρ : Densidad del aire [kg/m^3] (varía con la temperatura, la altura y la humedad)

v: Velocidad del viento [m/s].

P: Potencia del viento [W]

La ecuación (6) expresa la potencia en función del cubo de la velocidad del viento y proporcional a la superficie de la sección. Se puede afirmar que la potencia sigue un comportamiento cuadrático respecto al diámetro del aerogenerador si se considera la velocidad del viento como constante.

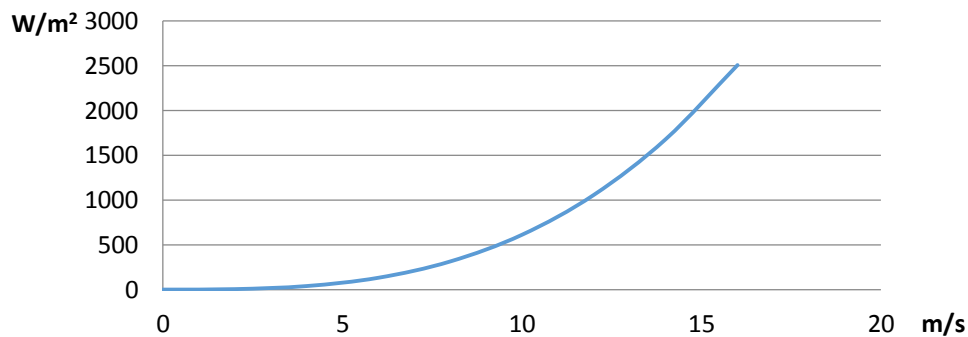


Figura 3.2: Potencia del viento.

El gráfico de la figura 3.1, muestra que si por ejemplo consideramos una velocidad del viento de 8 [m/s] obtendríamos una potencia de 314 [W/m^2] expuesto al viento (viento incidiendo perpendicularmente al área barrida por el rotor). A 16 [m/s] obtendremos una potencia ocho veces mayor, esto es, 2.509 [W/m^2]. En conclusión se obtiene que la potencia crece proporcionalmente con el cubo de la velocidad y al cuadrado respecto al radio del aerogenerador (superficie).

3.1.2. La ley de Betz

La ley de Betz fue formulada por primera vez por el físico alemán Albert Betz en 1919. Su libro “Wind-Energie”, publicado en 1926, proporciona buena parte del conocimiento que en ese momento se tenía sobre energía eólica y aerogeneradores. Betz, define la potencia captada por un obstáculo que frena el libre movimiento del viento.

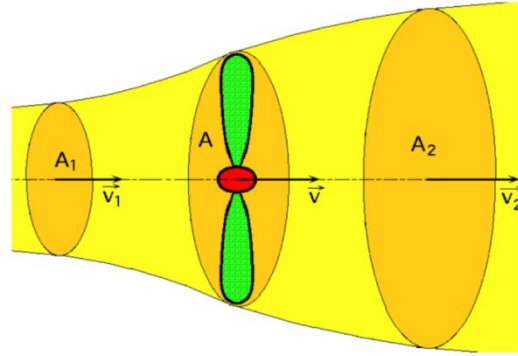


Figura 3.3: Comportamiento del viento frente a un aerogenerador.

La potencia captada por el aerogenerador se define como la diferencia instantánea de la energía cinética del viento antes y después de pasar por el obstáculo en un tiempo Δt .

Demostración de ley de betz

El caudal másico de la corriente de aire a través del rotor es:

$$m \left[\frac{kg}{s} \right] = \rho \cdot A(V_1 + V_2)/2 \quad (7)$$

Donde:

m : Masa por segundo [kg/s].

ρ : Densidad de aire.

A : Área barrida por el rotor [m^2].

$(V_1 + V_2) / 2$: Velocidad del viento promedio a través del área del rotor.

La potencia del viento extraída por el rotor es igual a la masa por la diferencia de los cuadrados de la velocidad del viento.

$$P = \frac{1}{2} \cdot m \cdot (V_1^2 - V_2^2) \quad (8)$$

Sustituyendo la expresión (7) en (9), tenemos:

$$P = \frac{\rho}{4} \cdot (V_1^2 - V_2^2) \cdot (V_1 + V_2)A \quad (9)$$

Al comparar el resultado con la potencia total de una corriente de viento no perturbada a través de exactamente la misma área A, sin ningún rotor que bloquee el viento. Se llamará a esta potencia P_0 :

$$P_0 = \frac{\rho}{2} \cdot V_1^3 \cdot A \quad (10)$$

La relación entre la potencia que extrae del viento y la potencia del viento sin perturbar es:

$$P/P_0 = \frac{1}{2} \cdot \left(1 - \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^2\right) \cdot \left(1 + \left(\frac{V_2}{V_1}\right)\right) \quad (11)$$

Se puede dibujar P/P_0 en función de V_2/V_1 :

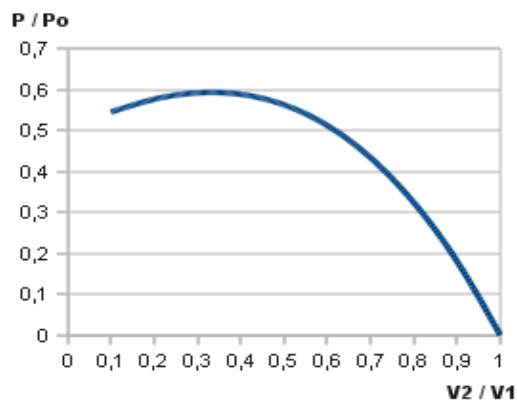


Figura 3.4: Curva de eficiencia de Betz.

La curva obtenida en la figura 3.4, define un máximo en $V_2/V_1 = 1/3$ con una potencia máxima captada de $P_{\text{captada}} = (16/27) \cdot P_{\text{viento}}$. Como resumen se define entonces la siguiente ecuación (1), que se denomina Ley de Betz que representa la máxima cantidad de energía del viento que se puede transformar en energía mecánica rotacional.

$$P_{captado} = 0,59 \cdot P_{viento} \quad (12)$$

Esta ecuación representa un límite teórico ideal ya que no considera los siguientes factores reales de operación:

- Resistencia aerodinámica de las palas.
- La compresibilidad del fluido.
- La interferencia de las palas.

3.1.3. La distribución de Weibull

Se mide las velocidades de viento a lo largo de un año, observará que en la mayoría de áreas los fuertes vendavales son raros, mientras que los vientos frescos y moderados son bastante comunes. La variación del viento en un emplazamiento típico suele describirse utilizando la llamada distribución de Weibull formula mostrada a continuación:

$$f(t) = \frac{k}{A} \cdot \left(\frac{v}{A}\right)^{k-1} \cdot \exp\left[-\left(\frac{v}{A}\right)^k\right] \quad (13)$$

Donde:

f(t): Densidad de la Probabilidad de Weibull

k: Parámetro de forma

A: Parámetro de escala

v: Velocidad media del viento

Cálculo del parámetro de forma k:

Se puede determinar mediante la relación entre la media del conjunto y la desviación estándar:

- La media del conjunto:

$$\bar{v} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n v_i \quad (14)$$

Donde:

n: Tamaño de la muestra

- Varianza:

$$\sigma^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (v_i - \bar{v})^2 \quad (15)$$

La desviación estándar está definida como la raíz cuadrada de la varianza.

Dado que es necesario recurrir a datos del pasado a menudo se dispone tan solo de medidas de la velocidad media y de una indicación de la variabilidad del viento. En estos casos se puede obtener una estimación de los parámetros como sigue:

$$k = \begin{cases} 1,05 \cdot \bar{v}^{1/2} & \text{para baja variabilidad } (\sigma/\bar{v} \approx 0,1) \\ 0,94 \cdot \bar{v}^{1/2} & \text{para media variabilidad } (\sigma/\bar{v} \approx 0,5) \\ 0,83 \cdot \bar{v}^{1/2} & \text{para alta variabilidad } (\sigma/\bar{v} \approx 0,9) \end{cases}$$

Ejemplo:

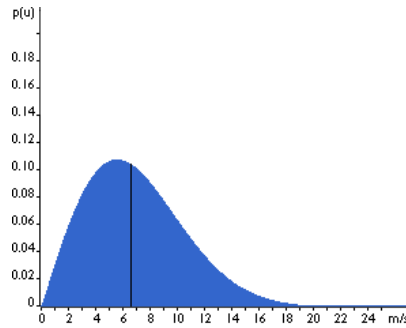


Figura 3.5: Distribución de viento de Weibull.

Este emplazamiento particular tiene una velocidad media del viento de 6 [m/s] y la forma de la curva está determinada por un parámetro de forma de 2. El área bajo la curva siempre vale exactamente 1, la mitad del área azul está a la izquierda de la línea negra vertical a 6,6 [m] por segundo. Los 6,6 [m/s] son la mediana de la distribución. Esto significa que la mitad del tiempo el viento soplará a menos de 6,6 [m/s] y la otra mitad soplará a más de 6.6 [m/s]. Por otro lado, las velocidades del viento de 5,5 [m/s] son las más comunes. Los 5,5 [m/s] es el llamado valor modal de la distribución. La distribución de Weibull puede variar tanto en la forma, como en el valor medio.

3.1.4. La rugosidad

Es importante cuantificar el efecto de la morfología del territorio circundante al aerogenerador sobre la velocidad del viento. Lo que se conoce como rugosidad. La siguiente ecuación (16), define la rugosidad, la cual se modifica dependiendo de los obstáculos físicos presentes en el entorno que inciden sobre el desplazamiento del aire:

$$V_z = V(ref) \cdot \left[\frac{\ln\left(\frac{Z}{Z_0}\right)}{\ln\left(\frac{Z_{ref}}{Z_0}\right)} \right] \quad (16)$$

Donde:

V_z : Velocidad del viento a altura Z.

Z: Altura que se desea.

$V_{(ref)}$: Velocidad medida a una altura $Z_{(ref)}$.

Z_0 : Longitud de la rugosidad (ver tabla 3.2).

$Z_{(ref)}$: Altura en la cual se midió el viento.

La tabla 3.1 muestra la clase de rugosidad según el tipo de paisaje.

Tabla 3.1: Rugosidad.

Rugosidad	Tipo de paisaje
0	Superficie del agua
0,5	Terreno completamente abierto con una superficie lisa
1	Agrícola abierta sin cercados ni setos y con edificios muy dispersos
1,5	Agrícola con algunas casas y setos (dist. 1250[m])
2	Agrícola con algunas casas y setos (dist. 500[m])
2,5	Agrícola con muchas casas, arbustos y plantas (dist. 250[m])
3	Pueblos, ciudades pequeñas, terreno agrícola
3,5	Ciudades más grandes con edificios altos
4	Ciudades muy grandes con edificios altos y rascacielos

La tabla 3.2 muestra la longitud de rugosidad según la clase de rugosidad, la longitud de rugosidad es la distancia medida desde el nivel del suelo donde todavía la velocidad de viento es 0 m/s.

Tabla 3.2: Coeficientes de rugosidad.

Clase de rugosidad	Longitud de rugosidad [m]
0	0,0002
0,5	0,0024
1	0,03
1,5	0,055
2	0,1
2,5	0,2
3	0,4
3,5	0,8
4	1,6

3.1.5. Emplazamiento

Los aerogeneradores deben ubicarse en zonas con un mínimo de obstáculos ya que estos pueden disminuir la velocidad del viento de forma significativa y a menudo crean turbulencias en torno a ellos como se aprecia en la figura 3.6. La zona de turbulencia puede extenderse hasta una altura alrededor de tres veces superior a la altura del obstáculo.

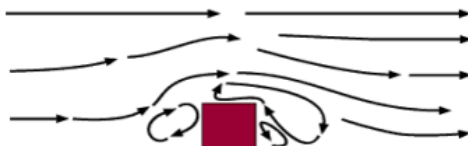


Figura 3.6: Emplazamiento viento vista lateral.

También hay que tener en cuenta la orografía del terreno, deben situarse en zonas elevadas, si se toma un paso estrecho entre dos montañas, la velocidad del viento crecerá considerablemente por medio del efecto túnel. Se debe tener en cuenta la rugosidad del terreno ya que cuanto más pronunciada sea, mayor será la ralentización que experimente el viento.

3.1.6. Función de la densidad de potencia.

Se sabe que la potencia varía proporcionalmente al cubo de la velocidad del viento y proporcionalmente a la densidad del aire. Se puede obtener una aproximación a la potencia producida por la turbina como se aprecia en el siguiente gráfico de la figura 3.7.

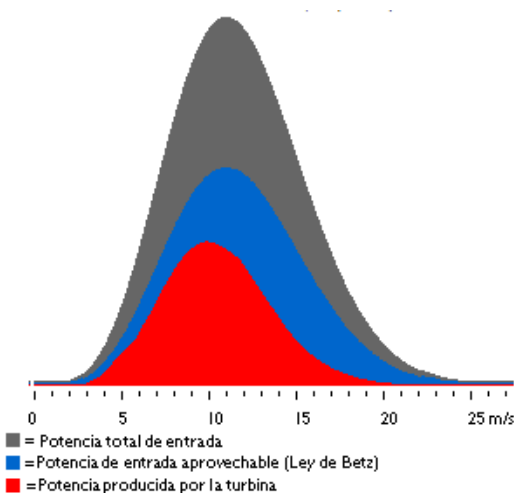


Figura 3.7: Potencia del viento.

El área bajo la curva gris es la cantidad de potencia eólica por metro cuadrado de flujo del viento que puede esperarse en este emplazamiento en particular. En este caso se tiene una velocidad del viento media de 7 [m/s] y un Weibull $k=2$, por lo que obtiene 402 [W/m²]. Se observa que esta potencia es casi el doble de la obtenida cuando el viento sopla constantemente a la velocidad media. El área bajo la curva azul indica que cantidad de potencia puede ser teóricamente convertida en potencia mecánica ley de Betz. El área total bajo la curva roja indica cuál será la potencia eléctrica que un aerogenerador producirá en dicho emplazamiento.

3.1.7. Escala de Beaufort

Las estimaciones exactas de la velocidad del viento son críticas al momento de evaluar su potencial aprovechable en cualquier localización. Los recursos eólicos son caracterizados por una escala de clases de viento según su velocidad, que se extiende de la clase 1 (la más baja) a la 12 (la más alta), llamada escala de Beaufort (ver tabla 3.3). Los desniveles de la superficie a través de la cual sopla el viento antes de llegar a la turbina, determinan la cantidad de turbulencia que esta experimentará.

Tabla 3.3: Escala de Beaufort.

Escala de Beaufort	Velocidad del viento (Km/h)	Denominación del viento
0	Menos de 1	Calma
1	1 a 5	Brisa muy débil
2	6 a 11	Brisa débil
3	12 a 19	Brisa ligera
4	20 a 28	Brisa moderada
5	29 a 38	Brisa fuerte
6	39 a 49	Viento
7	50 a 61	Viento fuerte
8	62 a 74	Temporal
9	75 a 88	Temporal fuerte
10	89 a 102	Temporal duro
11	103 a 117	Temporal muy duro
12	Más de 117	Temporal Huracanado

3.1.8. Rendimiento de aerogeneradores

Teniendo en cuenta la ley de Betz, sabemos que no se puede convertir toda la energía del viento en energía mecánica rotacional. El límite de Betz se ve disminuido por varios elementos que conllevan distintas pérdidas en el proceso de conversión de energía. Lo anterior se expresa de la siguiente forma:

$$P_{mec} = C_p \cdot P_{viento} = C_p \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^3 \quad (17)$$

Donde:

C_p : Coeficiente de potencia (no puede superar el límite de Betz).

Y adicionalmente:

$$P_{electrica} = C_e \cdot P_{mec} = C_e \cdot C_p \cdot P_{viento} = C_e \cdot \frac{1}{2} \cdot A \cdot v^3 \quad (18)$$

Donde:

C_e : Diferencia (aproximadamente un 90%) de la maquina eléctrica.

C_p : Constante y varia principalmente con la velocidad del viento.

Una manera más útil para determinar la eficiencia del aerogenerador es utilizando la relación de velocidad tangencial. Es un término que sustituye al número de revoluciones por minuto de la turbina; sirve para comparar el funcionamiento de máquinas eólicas diferentes, por lo que también se le suele denominar velocidad específica.

Lo anterior se define como:

$$\lambda = \frac{r_{aer} \cdot \omega_{aer}}{v_{viento}} \quad (19)$$

En donde:

λ : Relación de velocidad tangencial.

r_{aer} : Radio aerogenerador en [m].

ω_{aer} : Velocidad angular de la turbina en [rad/s].

v_{viento} : Velocidad del viento en [m/s].

Lo anterior se puede observar en la figura 3.7 donde se pueden apreciar los rendimientos de distintos modelos de aerogeneradores. Se tiene que los aerogeneradores Darrieus y de tripala horizontal pueden alcanzar velocidad rotacional muy elevada y esto hace que la variable w_r se desligue de la velocidad del viento e inclusive que la supere en su componente tangencial, logrando relación de velocidad tangencial > 1 . Mientras que para otros modelos como los aerogeneradores verticales sería difícil superarlos. Pero esto no implica que se puedan lograr buenos coeficientes de potencia con baja relación de velocidad tangencial.

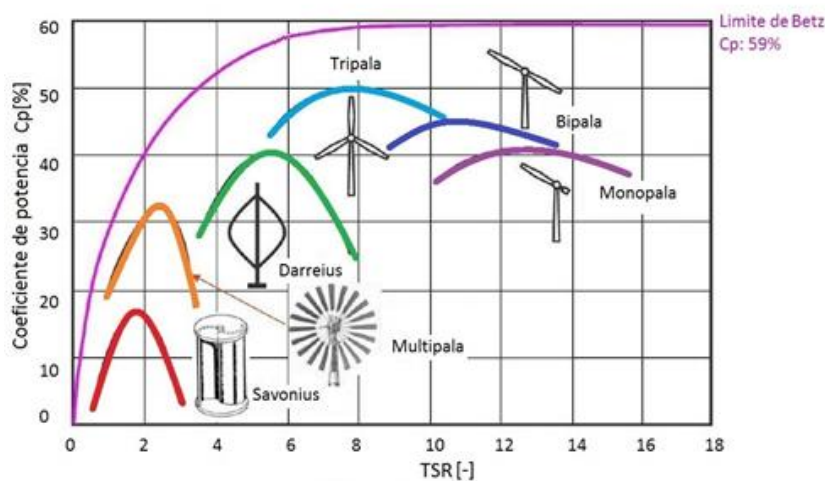


Figura 3.7: C_p v/s Relación de velocidad tangencial (TSR).

La tabla 3.4, muestra los distintos coeficientes de potencia para varios modelos de aerogeneradores.

Tabla 3.4: Características generales de distintos generadores eólicos.

Tipo de aerogenerador	Velocidad de operación	Torque	Construcción	C_p
Eje horizontal				
De moderadas RPM	Moderada	Bajo	Moderada	0,2-0,35
De altas RPM	Alta	Muy bajo	De precisión	0,3-0,45
Eje vertical				
Savonius	Moderada	Medio	Moderada	0,15
Darreus	Moderada	Muy bajo	De precisión	0,25-0,35
De moderadas RPM	Moderada	Muy bajo	De precisión	0,2-0,35

4. Estudio de instalación de un aerogenerador pequeño

4.1. Introducción

El objetivo de este seminario de titulación es estudiar la factibilidad de instalación de un aerogenerador pequeño de eje horizontal tripala a solicitud del colegio mencionado anteriormente que se encuentra ubicado en la Avenida Pedro de Valdivia 1945, ciudad de Concepción, Región del Bío Bío.

La zona en que se encuentra ubicado el colegio presenta una brisa intermitente, la que según el clima y horario aumenta o disminuye. Específicamente, el espacio donde se solicita la instalación del aerogenerador, está ubicado a un costado del establecimiento (ver figura 4.1) y se caracteriza por ser un terreno elevado a 76 metros sobre el nivel de mar que se encuentra rodeado de árboles y plantas.



Figura 4.1: Ubicación instalación generador eólico.

4.2. Análisis de velocidad del viento

El análisis y estudio de las variaciones del viento en la zona de instalación es fundamental a la hora de realizar cualquier proyecto eólico. Específicamente, se deben obtener datos sobre la intensidad y dirección del viento, ya que estos permiten la estimación de la potencia total generada por el aerogenerador en un intervalo de tiempo.

El presente estudio, cuenta con datos obtenidos por mediciones realizadas 3 veces por semana en el lugar de montaje durante el mes de junio y julio, además de los datos entregados por el

explorador de energía eólica de la Facultad de ciencias físicas y matemáticas de la Universidad de Chile, realizado por encargo del ministerio de energía del Gobierno de Chile y la Agencia de Cooperación Internacional Alemana (GIZ).

Los datos entregados por el explorador de energía eólica se muestran en la figura 4.2 y corresponden a información del viento en base a la simulación numérica de la atmosfera con un avanzado y utilizado modelo de masoescala llamado Wheater Research and forecasting (WRF). Los datos se obtienen de forma gratuita y libre acceso en la página web.

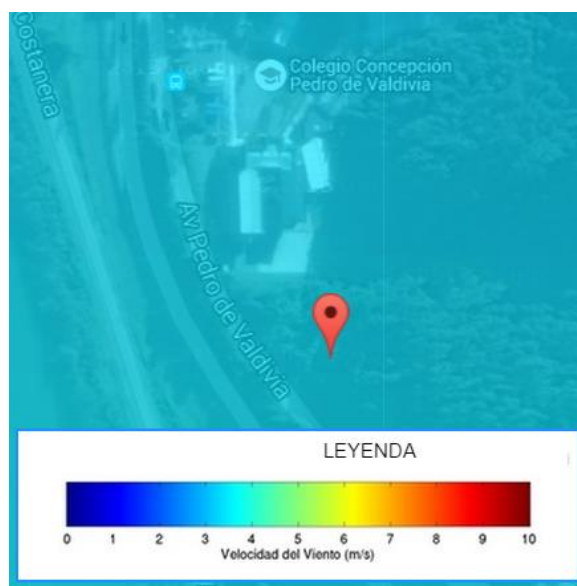


Figura 4.2: Ubicación instalación generador eólico con estadística de viento.

4.2.1 Antecedente velocidad promedio del viento año 2010

En el presente apartado se adjuntan los datos de la velocidad del viento arrojados por el explorador de energía eólica de la Facultad de ciencias físicas y matemáticas de la Universidad de Chile mencionado anteriormente.

Concretamente, se presentan los datos de la velocidad media del viento arrojados por el programa a una altura de 5,5 metros sobre la zona de montaje y 75,8 metros sobre el nivel del mar, por el promedio de cada hora de todos los meses del año 2010.

Al mismo tiempo, se incluyen tablas y gráficos con el cálculo de velocidad promedio mensual y anual, con el objetivo de simplificar los cálculos de potencia y probabilidad.

La figura 4.3, muestra las velocidades del viento del año 2010 de todo el año, además la velocidad dividida por las 24 horas del día.

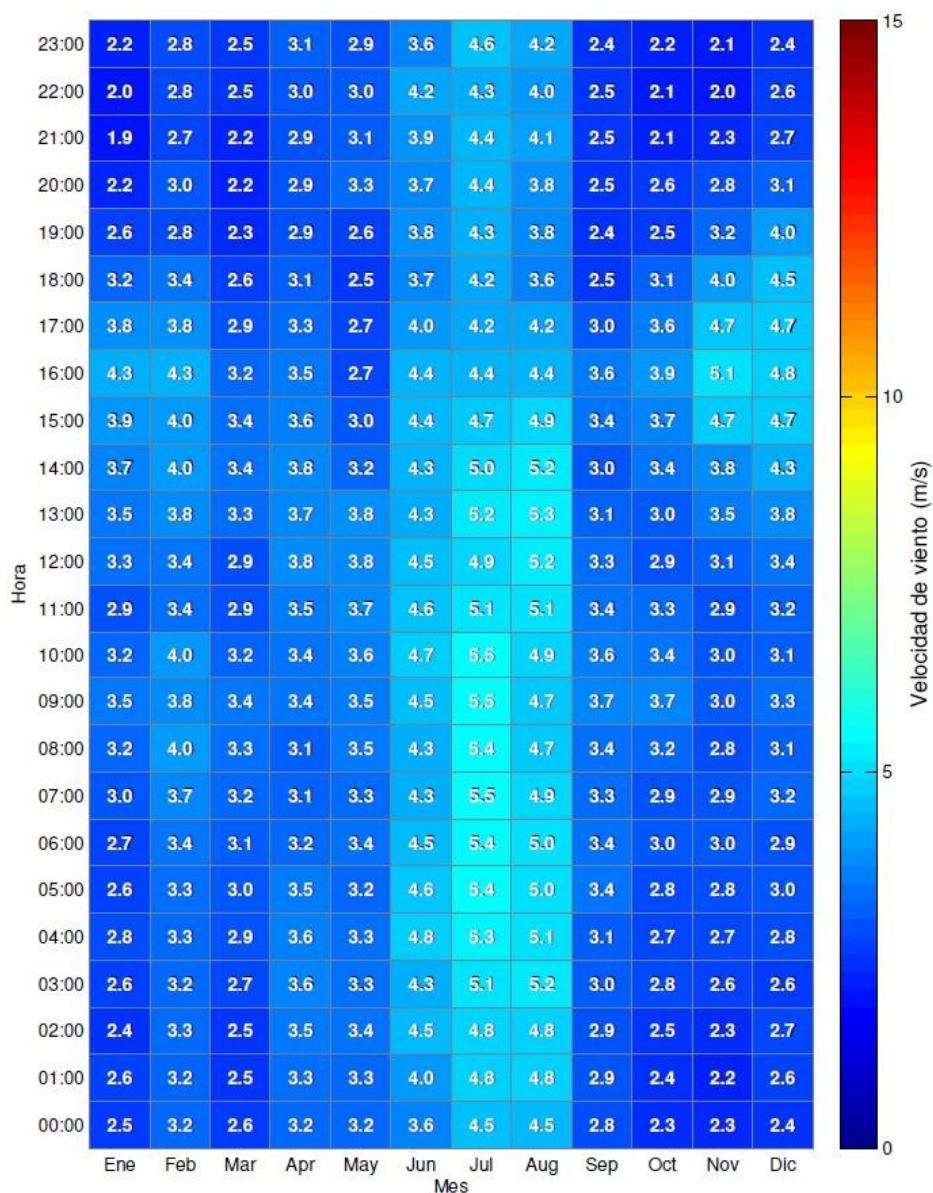


Figura 4.3: Velocidad promedio de viento.

La tabla 4.1, muestra el valor promedio mensual de la velocidad de viento en el año 2010.

Tabla 4.1: Velocidad promedio de viento.

Meses	Velocidad promedio m/s
Enero	2,94
Febrero	3,44
Marzo	2,86
Abril	3,33
Mayo	3,22
Junio	4,40
Julio	4,78
Agosto	4,64
Septiembre	3,04
Octubre	2,92
Noviembre	3,07
Diciembre	3,32
Anual	3,50

La figura 4.4 es un gráfico entregado por la página explorador de energía eólica del gobierno de Chile la cual indica que la velocidad máxima que alcanzo en el 2010 es de 4,78 m/s en el sector donde será instalado el aerogenerador y la mínima es de 2,94 m/s.

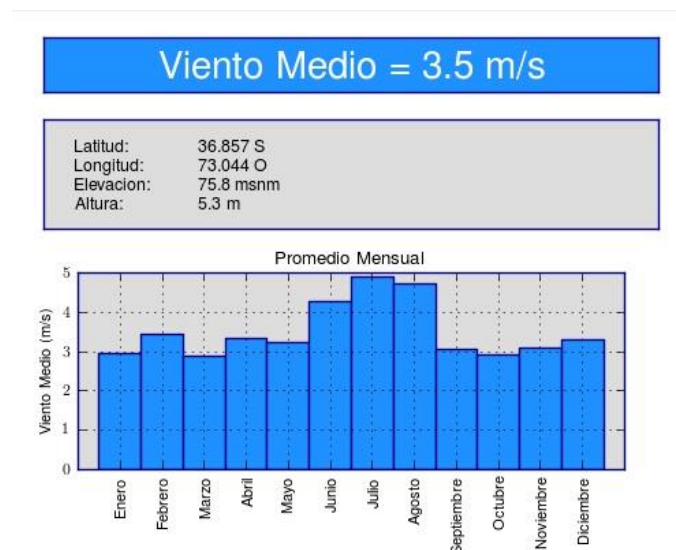


Figura 4.4: Velocidad promedio de viento.

4.2.2. Antecedente velocidad promedio del viento año 2015

Los datos del viento obtenidos durante el año 2015, se recogieron para el presente seminario en la zona de montaje a una altura de 6 metros sobre el suelo a través del uso de un anemómetro y una pértiga. Concretamente, se puede observar en las siguientes tablas 4.2 y 4.3 los datos de la velocidad del viento por hora y la velocidad promedio del viento diaria, solo se tomaron velocidades en esos horarios debido a que más tardes no se podía ingresar por tema de seguridad del colegio, se midió la velocidad del mes de Junio y Julio. Además, se presentan los datos de la temperatura máxima, mínima y el estado climático del día (ver tabla 4.3) de la obtención de los datos.

Tabla 4.2: Velocidad medida in situ.

Fecha	Hora	Velocidad promedio medida (m/s)
Miércoles 17 Junio	10:10	0,1
Miércoles 17 Junio	10:50	3,7
Miércoles 17 Junio	11:10	3,0
Miércoles 17 Junio	14:15	3,4
Miércoles 17 Junio	14:25	4,4
Miércoles 17 Junio	15:00	2,6
Viernes 19 Junio	10:30	0,7
Viernes 19 Junio	11:45	0,5
Viernes 19 Junio	14:00	0,1
Viernes 19 Junio	14:55	0,4
Lunes 22 Junio	14:05	0,9
Lunes 22 Junio	15:00	0,8
Lunes 22 Junio	15:30	2,1
Viernes 26 Junio	14:00	0,3
Viernes 26 Junio	14:30	2,8
Viernes 26 Junio	15:15	1,5
Miércoles 1 Julio	10:20	4,0
Miércoles 1 Julio	11:15	4,3

Continuación tabla 4.2: Velocidad medida in situ.

Fecha	Hora	Velocidad promedio medida (m/s)
Miércoles 1 Julio	11:45	3,6
Viernes 3 Julio	14:15	3,2
Viernes 3 Julio	15:00	2,1
Viernes 3 Julio	15:30	2,8
Lunes 6 Julio	10:10	1,6
Lunes 6 Julio	11:05	1,4
Lunes 6 Julio	11:45	0,9

La tabla 4.3 muestra el promedio de viento obtenido durante los días medidos y además indica el estado del clima, ya que afecta en la velocidad del viento.

Tabla 4.3: Velocidad promedio de viento por día.

Fecha	Velocidad promedio del viento m/s	Temperatura mínima / máxima °C	Estado climático
Miércoles 17 junio	2,86	4 / 13	Nubosidad parcial / Despejado
Viernes 19 Junio	0,42	4 / 15	Nublado
Lunes 22 Junio	1,26	4 / 16	Nubosidad parcial / Despejado
Viernes 26 Junio	1,53	11 / 17	Nubosidad parcial / Despejado
Miércoles 1 Julio	3,96	4 / 13	Nublado / Nubosidad parcial
Viernes 3 Julio	2,7	3 / 14	Despejado / Nublado
Lunes 6 Julio	1,3	10 / 15	Nublado

4.2.3. Cálculo de rugosidad del viento

En base a los datos mencionados anteriormente y con el objetivo de conocer la posible extrapolación de los datos en base a las características del viento y la zona de montaje los cuales se pueden observar en las tablas 4.4 y 4.5, además se realizó el cálculo de rugosidad, el cual se ve modificado según la presencia o ausencia de obstáculos físicos en el entorno, ya que estos inciden sobre el desplazamiento del aire.

Se realizó el presente cálculo con los datos del año 2010 y 2015 buscando alcanzar los datos posibles a una altura de 9 metros, considerando la zona de montaje como un terreno agrícola con muchas casas, arbustos y plantas.

Utilizando la ecuación (16) se determina la rugosidad:

$$V_z = V(ref) \cdot \left[\frac{\ln(Z/Z_0)}{\ln(Z_{ref}/Z_0)} \right]$$

Se utiliza clase de rugosidad de 2,5, el cual es equivalente a 0,02 m

Tabla 4.4: Extrapolación datos del 2010.

Mes	Velocidad a 5,5 metros. m/s	Velocidad a 9 metros. m/s
Enero	2,94	3,37
Febrero	3,44	3,95
Marzo	2,86	3,28
Abril	3,33	3,82
Mayo	3,22	3,69
Junio	4,40	5,06
Julio	4,78	5,49
Agosto	4,64	5,33
Septiembre	3,04	3,49
Octubre	2,92	3,29
Noviembre	3,07	3,53
Diciembre	3,32	3,82

Tabla 4.5: Extrapolación datos 2015.

Día	Velocidad a 6 metros m/s	Velocidad a 9 metros m/s
Miércoles 17 junio	2,86	3,20
Viernes 19 Junio	0,42	0,47
Lunes 22 Junio	1,26	1,41
Viernes 26 Junio	1,53	1,71
Miércoles 1 Julio	3,96	4,43
Viernes 3 Julio	2,70	3,02
Lunes 6 Julio	1,30	1,45

En la tabla 4.6 se indica el promedio del viento obtenido en el año 2015 en el lugar de instalación, muestra los meses que corresponden a junio y julio los cuales por estadísticas anteriores son los meses con más velocidad de viento.

Tabla 4.6. Velocidad media año 2015.

Mes	Velocidad a 9 metros m/s
Junio	1,69
Julio	2,96

Al observar los cálculos de rugosidad para cada dato utilizado, se puede apreciar una variación en la extrapolación de los datos del año 2010 y 2015 en base a la altura esperada de 9 metros, ya que en el año 2010 se obtuvo una velocidad promedio entre 5,06 y 5,49 mientras que en el año 2015 se obtuvo una velocidad promedio entre 1,69 y 2,96 en los meses de junio y julio.

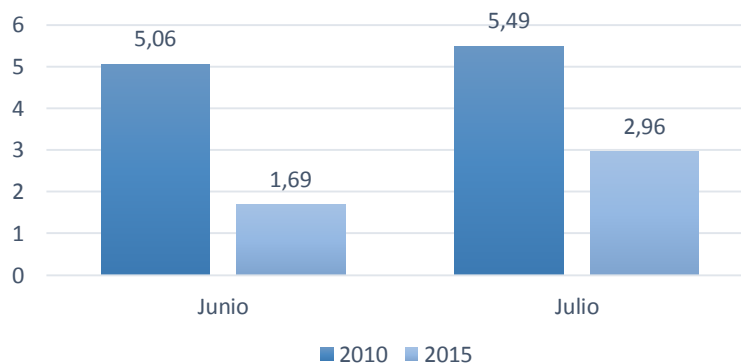


Figura 4.5: Comparativa meses Junio y Julio, rugosidad a altura de 9 metros.

4.2.5. Distribución de Weibull y potencia de entrada

Para el cálculo de la probabilidad se usaron los datos del año 2010, ya que para dicho cálculo es necesario tener las medidas anualmente.

Por ecuación (13):

$$f(t) = \frac{k}{A} \cdot \left(\frac{v}{A}\right)^{k-1} \cdot \exp\left[-\left(\frac{v}{A}\right)^k\right]$$

Cálculo del parámetro de forma k:

Se puede determinar mediante la relación entre la media del conjunto y la desviación estándar.

La desviación estándar está definida como la raíz cuadrada de la varianza.

Cálculo de la media:

$$\bar{v} = \frac{1}{12} (3,37 + 3,95 + 3,28 + 3,82 + 3,69 + 5,06 + 5,49 + 5,33 + 3,49 + 3,29 + 3,53 + 3,82) = 3,96 \text{ (m/s)}$$

Cálculo de la varianza:

$$\begin{aligned} \sigma^2 = \frac{1}{11} [& (3,37 - 3,96)^2 + (3,95 - 3,96)^2 + (3,28 - 3,96)^2 + (3,82 - 3,96)^2 \\ & + (3,69 - 3,96)^2 + (5,06 - 3,96)^2 + (5,49 - 3,96)^2 + (5,33 - 3,96)^2 \\ & + (3,49 - 3,96)^2 + (3,29 - 3,96)^2 + (3,53 - 3,96)^2 + (3,82 - 3,96)^2] = 0,77 \end{aligned}$$

Cálculo de la desviación estándar:

$$\sigma = \sqrt{0,77} = 0,87$$

Como no se conocen los datos del pasado, solo se tiene la velocidad media y la variabilidad del viento, se recurre a la estimación de los parámetros.

$$k = \begin{cases} 1,05 \cdot \bar{v}^{1/2} & \text{para baja variabilidad } (\sigma/\bar{v} \approx 0,1) \\ 0,94 \cdot \bar{v}^{1/2} & \text{para media variabilidad } (\sigma/\bar{v} \approx 0,5) \\ 0,83 \cdot \bar{v}^{1/2} & \text{para alta variabilidad } (\sigma/\bar{v} \approx 0,9) \end{cases}$$

Para nuestro caso $\sigma/\bar{v}=0,22$, por lo tanto k será igual a:

$$k = 1,05 \cdot 3,96^{1/2} = 2,08$$

Cálculo del parámetro de escala A:

$$A = \frac{\bar{v}}{\Gamma(1 + \frac{1}{k})}; \quad v \text{ en m/s}$$

Donde Γ es la función gamma:

Reemplazando

$$A = \frac{3,96}{\Gamma(1 + \frac{1}{2,08})}$$

Y como:

$$\Gamma\left(1 + \frac{1}{2,08}\right) \approx \Gamma\left(\frac{3}{2}\right) = 0,88$$

Por lo tanto:

$$A = \frac{3,96}{0,88} = 4,47$$

Entonces reemplazando en (13) se obtendrá:

$$f(t) = \frac{2,08}{4,47} \cdot \left(\frac{v}{4,47}\right)^{2,08-1} \cdot \exp\left[-\left(\frac{v}{4,47}\right)^{2,08}\right]$$

Se ingresará una determina velocidad para poder así obtener la probabilidad de Weibull:

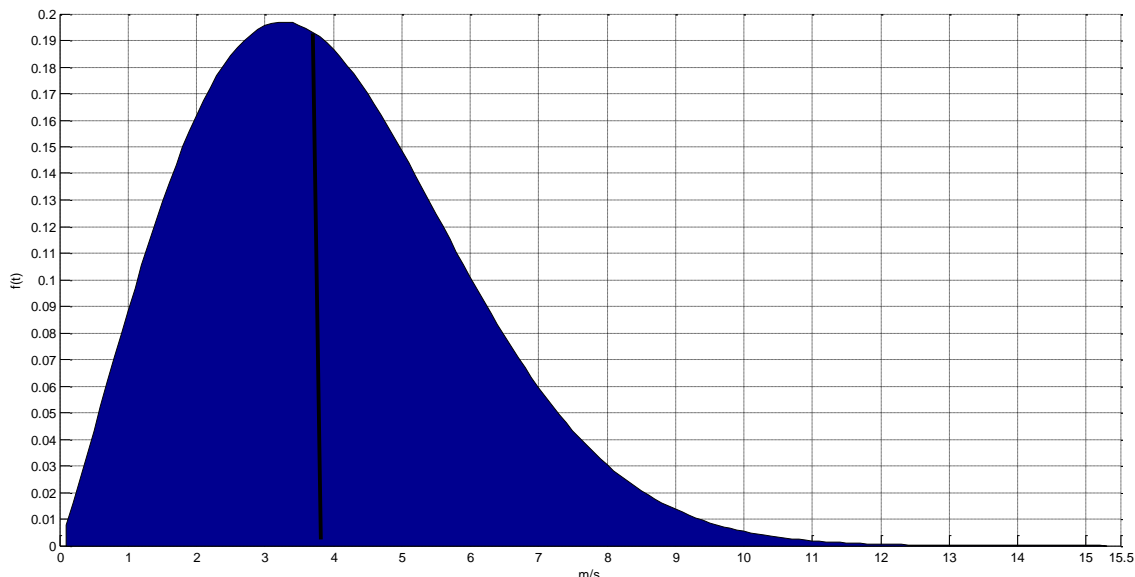


Figura 4.6: Distribución de Weibull.

En la distribución de Weibull de la figura 4.6 se observa que la probabilidad de viento varía entre los 0,1 [m/s] y los 15,3 [m/s] esto se debe a que la media y la varianza, definen la forma de la onda en la cual se observa que la media será de 3,96 [m/s].

En la tabla 4.7 se observa la potencia total y la potencia de entrada que habrá en el generador eólico, para poder determinar la potencia de entrada del aerogenerador es necesario multiplicar la potencia total por la probabilidad de Weibull.

Tabla 4.7: Probabilidad de Weibull, potencia y potencia de entrada.

Velocidad promedio (m/s)	Probabilidad de Weibull f(t)	$P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \pi \cdot r^2 \cdot v^3$ (W/m ²)	Potencia entrada $P_{entrada} = P \cdot f(t)$ (W/m ²)
0,1	0,0076	0,00	0,00
0,2	0,0162	0,06	0,00
0,4	0,0341	0,49	0,01
0,6	0,0523	1,66	0,087
0,8	0,0705	3,94	0,27
1,0	0,0883	7,69	0,67
1,2	0,1053	13,30	1,40

Continuación tabla 4.7: Probabilidad de Weibull, potencia y potencia de entrada.

Velocidad promedio (m/s)	Probabilidad de Weibull f(t)	$P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \pi \cdot r^2 \cdot v^3$ (W/m ²)	Potencia entrada $P_{entrada} = P \cdot f(t)$ (W/m ²)
1,4	0,1214	21,12	2,56
1,6	0,1363	31,52	4,29
1,8	0,1498	44,88	6,72
2,0	0,1618	61,57	9,96
2,2	0,1721	81,95	14,10
2,4	0,1806	106,40	19,22
2,6	0,1874	135,28	25,35
2,8	0,1924	168,96	32,50
3,0	0,1955	207,81	40,63
3,2	0,1969	252,21	49,66
3,4	0,1966	302,51	59,47
3,6	0,1947	359,10	69,91
3,8	0,1913	422,34	80,80
4,0	0,1866	492,60	91,92
4,2	0,1807	570,24	103,05
4,4	0,1738	655,65	113,96
4,6	0,1660	749,18	124,39
4,8	0,1575	851,21	134,13
5,0	0,1486	962,11	142,97
5,2	0,1392	1.082,24	150,71
5,4	0,1297	1.211,98	157,19
5,6	0,1200	1.351,69	162,30
5,8	0,1152	1.501,75	165,93
6,0	0,1010	1.662,53	168,06
6,2	0,0919	1.834,38	168,66
6,4	0,0831	2.017,69	167,77
6,6	0,0747	2.212,82	165,46
6,8	0,0668	2.420,15	161,81
7,0	0,0594	2.640,03	156,96
7,2	0,0525	2.872,85	151,03
7,4	0,0462	3.118,96	144,20
7,6	0,0404	3.378,75	136,63
7,8	0,0351	3.652,58	128,49
8,0	0,0304	3.940,81	119,94
8,2	0,0261	4.243,82	111,15
8,4	0,0224	4.561,98	102,27
8,6	0,0190	4.895,66	93,44
8,8	0,0161	5.245,22	84,78

Continuación tabla 4.7: Probabilidad de Weibull, potencia y potencia de entrada.

Velocidad promedio (m/s)	Probabilidad de Weibull f(t)	$P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \pi \cdot r^2 \cdot v^3$ (W/m ²)	Potencia entrada $P_{entrada} = P \cdot f(t)$ (W/m ²)
9,0	0,0136	5.611,04	76,40
9,2	0,0114	5.993,48	68,38
9,4	0,0095	6.392,92	60,79
9,6	0,0078	6.809,72	53,69
9,8	0,0065	7.244,26	47,11
10,0	0,0053	7.696,90	41,07
10,2	0,0043	8.168,01	35,57
10,4	0,0035	8.657,96	30,62
10,6	0,0028	9.167,13	26,18
10,8	0,0023	9.695,87	22,25
11,0	0,0018	10.244,57	18,80
11,2	0,0014	10.813,59	15,78
11,4	0,0011	11.403,29	13,16
11,6	0,0009	12.014,06	10,91
11,8	0,0007	12.646,25	8,99
12,0	0,0005	13.300,24	7,37
12,2	0,0004	13.976,40	6,00
12,4	0,0003	14.675,09	4,85
12,6	0,0002	15.396,69	3,91
12,8	0,0001	16.141,57	3,12
13,0	0,0001	16.910,09	2,48
13,2	0,0001	17.702,62	1,96
13,4	0,00	18.519,54	1,54
13,6	0,00	19.361,21	1,20
13,8	0,00	20.228,01	0,93
14,0	0,00	21.120,29	0,72
14,2	0,00	22.038,44	0,55
14,4	0,00	22.982,82	0,42
14,6	0,00	23.953,80	0,32
14,8	0,00	24.951,75	0,24
15,0	0,00	25.977,04	0,18
15,2	0,00	27.030,04	0,13
15,3	0,00	27.567,04	0,00

En la figura 4.7 se observa la curva característica de la potencia de entrada según la probabilidad de Weibull, a través de dicha estimación se obtiene una potencia estimada de 8.781,62 [W/m²] por año, además dicha curva sirve para visualizar de mejor forma los valores determinados en la tabla 4.7.

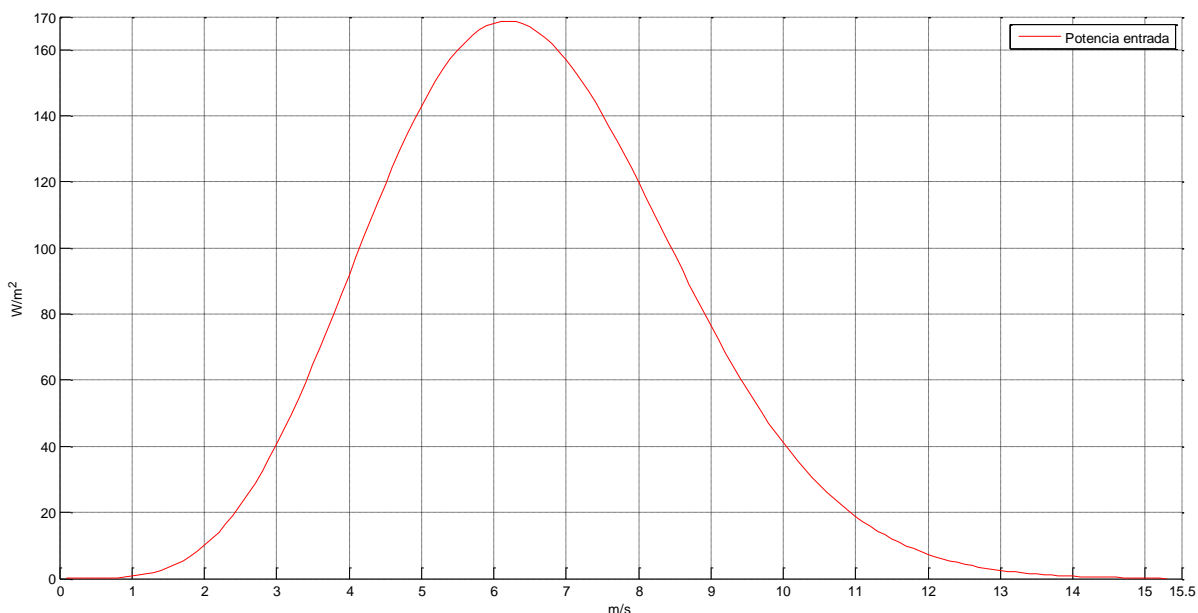


Figura 4.7: Potencia entrada por probabilidad de Weibull.

4.2.6. Potencia entrada aprovechable (Ley de Betz)

Según la Ley de Betz, para calcular la potencia de entrada-útil de la turbina se considera un límite máximo equivalente al 59% para que el aerogenerador convierta la potencia de entrada en potencia aprovechable. Los datos se ilustran en la tabla 4.8.

Tabla 4.8: Potencia entrada y potencia entrada útil.

Velocidad promedio (m/s)	Potencia entrada $P_{entrada} = P \cdot f(t)$ (W/m ²)	Potencia entrada aprovechable $P_{e. aprovechable} = P_{entrada} \cdot 0,59$ (W/m ²)
0,1	0,00	0,00
0,2	0,00	0,00
0,4	0,01	0,00
0,6	0,08	0,05
0,8	0,27	0,16
1,0	0,67	0,40
1,2	1,40	0,82

Continuación tabla 4.8: Potencia entrada y potencia entrada útil.

Velocidad promedio (m/s)	Potencia entrada $P_{entrada} = P \cdot f(t)$ (W/m²)	Potencia entrada aprovechable $P_{e. aprovechable} = P_{entrada} \cdot 0,59$ (W/m²)
1,4	2,56	1,51
1,6	4,29	2,53
1,8	6,72	3,96
2,0	9,96	5,87
2,2	14,10	8,32
2,4	19,22	11,34
2,6	25,35	14,96
2,8	32,50	19,18
3,0	40,63	23,97
3,2	49,66	29,30
3,4	59,47	35,09
3,6	69,91	41,25
3,8	80,80	47,67
4,0	91,92	54,23
4,2	103,05	60,80
4,4	113,96	67,23
4,6	124,39	73,39
4,8	134,13	79,14
5,0	142,97	84,35
5,2	150,71	88,92
5,4	157,19	92,74
5,6	162,30	95,75
5,8	165,93	97,90
6,0	168,06	99,15
6,2	168,66	99,51
6,4	167,77	98,98
6,6	165,46	97,62
6,8	161,81	95,47
7,0	156,96	92,60
7,2	151,03	89,11
7,4	144,20	85,08
7,6	136,63	80,61
7,8	128,49	75,80
8,0	119,94	70,76
8,2	111,15	65,57
8,4	102,27	60,34
8,6	93,44	55,13
8,8	84,78	50,02

Continuación tabla 4.8: Potencia entrada y potencia entrada útil.

Velocidad promedio (m/s)	Potencia entrada $P_{entrada} = P \cdot f(t)$ (W/m²)	Potencia entrada aprovechable $P_{e. \text{aprovechable}} = P_{entrada} \cdot 0,59$ (W/m²)
9,0	76,40	45,07
9,2	68,38	40,34
9,4	60,79	35,87
9,6	53,69	31,68
9,8	47,11	27,79
10,0	41,07	24,23
10,2	35,57	20,99
10,4	30,62	18,06
10,6	26,18	15,45
10,8	22,25	13,13
11,0	18,80	11,09
11,2	15,78	9,31
11,4	13,16	7,76
11,6	10,91	6,44
11,8	8,99	5,30
12,0	7,37	4,34
12,2	6,00	3,54
12,4	4,85	2,86
12,6	3,91	2,30
12,8	3,12	1,84
13,0	2,48	1,46
13,2	1,96	1,16
13,4	1,54	0,91
13,6	1,20	0,71
13,8	0,93	0,55
14,0	0,72	0,42
14,2	0,55	0,32
14,4	0,42	0,25
14,6	0,32	0,19
14,8	0,24	0,14
15,0	0,18	0,10
15,2	0,13	0,08
15,3	0,00	0,00

Con la tabla 4.8 se obtiene una potencia total de entrada útil de 5.181,12 [W/m²] por año.

En la figura 4.8 se observa la curva característica de la potencia de entrada y la potencia de entrada útil, dichas curvas sirven para visualizar de mejor forma los valores determinados en la tabla 4.7 y 4.8, lo cual ayuda a realizar una comparativa de la potencia entre la potencia de entrada y potencia por efecto de la Ley de Betz.

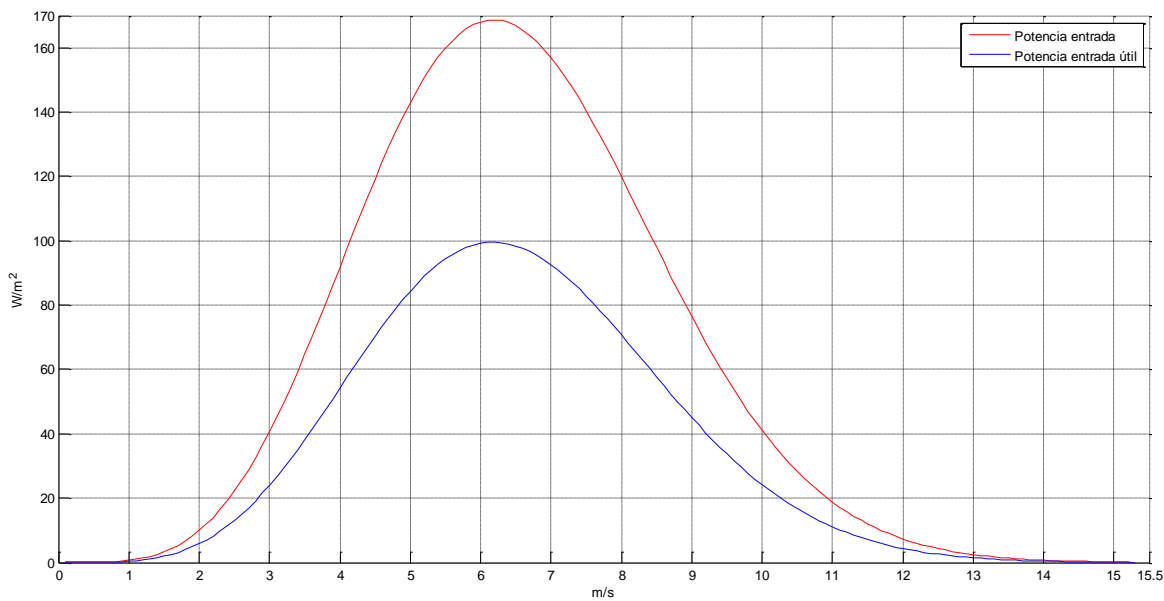


Figura 4.8: Potencia de entrada y potencia entrada útil v/s velocidad viento.

4.2.7. Potencia producida por el aerogenerador

Ahora para obtener la potencia neta generada por un aerogenerador real, se debe tomar la “Curva de Potencia del Aerogenerador” (ver figura 4.9) y multiplicarla por la probabilidad de ocurrencia de las distintas velocidades de viento según la distribución de Weibull.

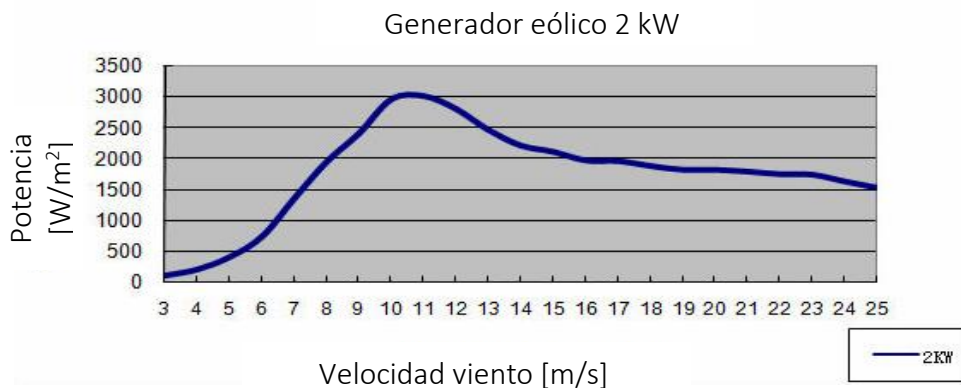


Figura 4.9: Potencia entregada por fabricante.

Con la ayuda de AutoCAD, se determina para que valor de potencia corresponde una determinada velocidad, lo cual se puede visualizar en la tabla 4.9, además se observa cual será la potencia producida por el generador eólico.

Tabla 4.9: Potencia Producida por generador eólico.

Velocidad (m/s)	Potencia entregada por fabricante (W/m ²)	Probabilidad de Weibull f(t)	Potencia Producida $P_{producida} = P \cdot f(t)$ (W/m ²)
3,0	77,90	0,1955	15,23
3,2	104,82	0,1969	20,64
3,4	127,88	0,1966	25,14
3,6	156,03	0,1947	30,38
3,8	177,22	0,1913	33,90
4,0	200,36	0,1866	37,39
4,2	229,61	0,1807	41,49
4,4	259,68	0,1738	45,13
4,6	303,59	0,1660	50,41
4,8	346,10	0,1575	54,54
5,0	404,10	0,1486	60,05
5,2	454,71	0,1392	63,32
5,4	508,92	0,1297	66,00
5,6	576,71	0,1200	69,2
5,8	647,06	0,1152	71,49
6,0	732,20	0,1010	74,01
6,2	838,81	0,0919	77,12
6,4	967,79	0,0831	80,47
6,6	1.100,18	0,0747	82,26
6,8	1.225,19	0,0668	81,91
7,0	1.352,43	0,0594	80,40
7,2	1.476,94	0,0525	77,64
7,4	1.590,56	0,0462	73,54
7,6	1.721,45	0,0404	69,61
7,8	1.832,48	0,0351	64,46
8,0	1.944,51	0,0304	59,18
8,2	2.051,70	0,0261	53,73
8,4	2.121,50	0,0224	47,56
8,6	2.208,47	0,0190	42,15
8,8	2.295,71	0,0161	37,10
9,0	2.392,57	0,0136	32,57
9,2	2.493,89	0,0114	28,45
9,4	2.640	0,0095	25,10

Continuación tabla 4.9: Potencia Producida por generador eólico.

Velocidad (m/s)	Potencia entregada por fabricante (W/m ²)	Probabilidad de Weibull f(t)	Potencia Producida $P_{producida} = P \cdot f(t)$ (W/m ²)
9,6	2.753,62	0,0078	21,71
9,8	2.874,21	0,0065	18,69
10,0	2.940,50	0,0053	15,69
10,2	2.989,47	0,0043	13,02
10,4	3.001,32	0,0035	10,61
10,6	3.008,24	0,0028	8,59
10,8	3.002,68	0,0023	6,89
11,0	2.988,56	0,0018	5,48
11,2	2.958,76	0,0014	4,31
11,4	2.920,95	0,0011	3,37
11,6	2.887,06	0,0009	2,62
11,8	2.819,68	0,0007	2,00
12,0	2.774,62	0,0005	1,53
12,2	2.712,61	0,0004	1,16
12,4	2.646,15	0,0003	0,87
12,6	2.574,21	0,0002	0,65
12,8	2.501,91	0,0001	0,48
13,0	2.434,85	0,0001	0,35
13,2	2.382,59	0,0001	0,26
13,4	2.321,95	0,00	0,19
13,6	2.276,17	0,00	0,14
13,8	2.229,65	0,00	0,10
14,0	2.191,20	0,00	0,07
14,2	2.161,59	0,00	0,05
14,4	2.143,23	0,00	0,03
14,6	2.121,00	0,00	0,02
14,8	2.106,05	0,00	0,02
15,0	2.084,19	0,00	0,01
15,2	2.054,76	0,00	0,01
15,3	2.041,32	0,00	0,00

En la figura 4.10 se observan las curvas característica de la potencia de entrada, la potencia de entrada útil y la potencia del aerogenerador, dichas curvas sirve para visualizar de mejor forma los valores determinados en la tabla 4.7, 4.8 y 4.9, la que muestra una caída en la densidad de potencia que se obtendrá anualmente.

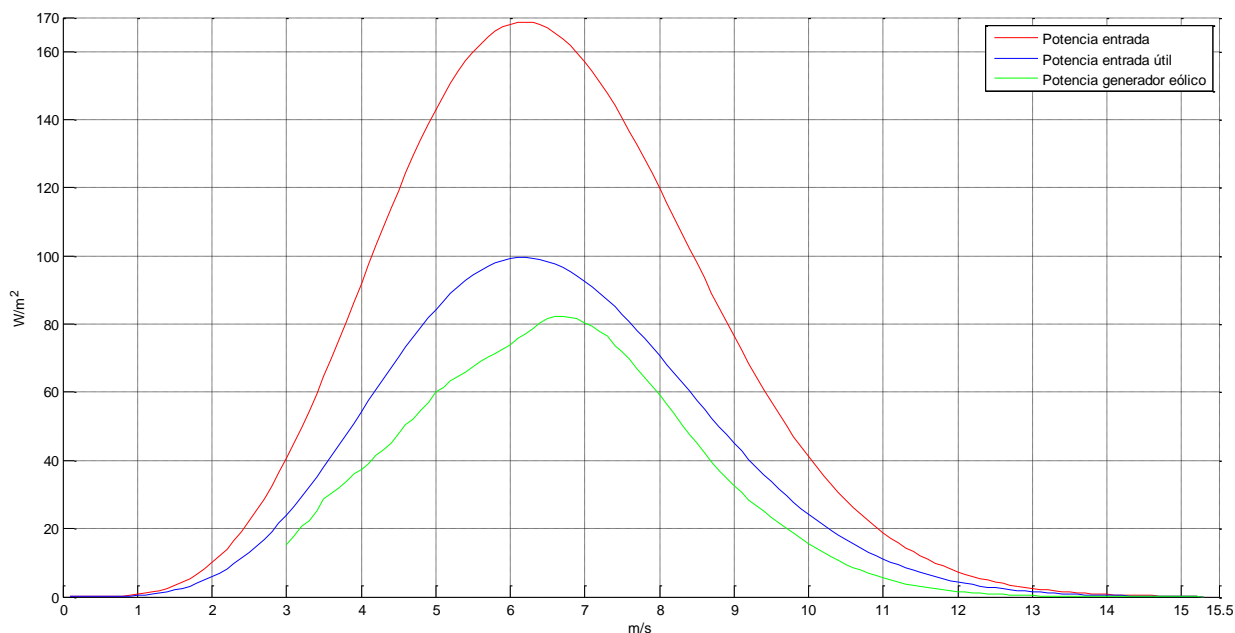


Figura 4.10: Potencia de entrada, potencia entrada útil y potencia del generador eólico v/s velocidad viento.

Los cálculos realizados permiten deducir la potencia promedio que puede ser obtenida de aerogeneradores situados en emplazamientos específicos. En general se produce un error de cálculo que puede conllevar errores serios de dimensionamiento, específicamente el valor de la potencia promedio obtenida con las curvas de potencia puede diferir del valor que se obtiene al calcular la potencia como función cúbica de la velocidad promedio del viento. En este caso, la potencia promedio real anual descendió a 3.775,26 [W/m²].

4.2.8. Distribución de viento medido

Con el objetivo de conocer la distribución del viento medido, se utilizó un anemómetro digital que permitió obtener la velocidad del viento máxima y promedio.

Para obtener los datos necesarios, se concurrió a la zona de instalación donde se utilizó el anemómetro en un extremo de una pértiga que se encontraba a una distancia de 6 metros sobre el suelo. Con lo anterior se lograr medir el viento a una altura cercana a la ubicación de la cabeza del aerogenerador (buje).

Las mediciones se hicieron un total de 25 mediciones, en diversos horarios, los cuales se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 4.10: Mediciones de velocidades de viento promedio.

Fecha	hora	Velocidad promedio medida a 6 metros (m/s)	Velocidad promedio extrapolados a 9 metros (m/s)
Miércoles 17 Junio	10:10	0,1	0,11
Miércoles 17 Junio	10:50	3,7	1,79
Miércoles 17 Junio	11:10	3,0	4,48
Miércoles 17 Junio	14:15	3,4	0,78
Miércoles 17 Junio	14:25	4,4	4,14
Miércoles 17 Junio	15:00	2,6	1,57
Viernes 19 Junio	10:30	0,7	3,36
Viernes 19 Junio	11:45	0,5	4,81
Viernes 19 Junio	14:00	0,1	0,56
Viernes 19 Junio	14:55	0,4	4,03
Lunes 22 Junio	14:05	0,9	1,01
Lunes 22 Junio	15:00	0,8	0,11
Lunes 22 Junio	15:30	2,1	0,34
Viernes 26 Junio	14:00	0,3	1,01
Viernes 26 Junio	14:30	2,8	3,81
Viernes 26 Junio	15:15	1,5	3,58
Miércoles 1 Julio	10:20	4,0	4,92
Miércoles 1 Julio	11:15	4,3	3,13
Miércoles 1 Julio	11:45	3,6	0,45
Viernes 3 Julio	14:15	3,2	2,91

Continuación tabla 4.10: Mediciones de velocidades de viento promedio.

Fecha	hora	Velocidad promedio medida a 6 metros (m/s)	Velocidad promedio extrapolados a 9 metros (m/s)
Viernes 3 Julio	15:00	2,1	0,90
Viernes 3 Julio	15:30	2,8	2,35
Lunes 6 Julio	10:10	1,6	1,68
Lunes 6 Julio	11:05	1,4	2,35
Lunes 6 Julio	11:45	0,9	3,13

La tabla 4.10, muestra la distribución de la velocidad del viento medida a 6 y 9 metros. Se puede observar, que las características del viento en dicha zona varían dependiendo de la hora y altura, específicamente, las mayores velocidades de viento se alcanzan cercanas al medio día.

4.3. Cálculo de pérdidas y conductor

Para este cálculo, se considerará un factor de potencia de 0,98 y se calculan los valores de corriente nominal y corriente de referencia, dichos valores calculados son:

$$I_n = \frac{P_w}{\sqrt{3} \cdot V_{ll} \cdot Fp} \quad (20)$$

Donde:

I_n =corriente nominal máxima del aerogenerador

P_w =potencia generada

V_{ll} =voltaje en terminales del aerogenerador

Fp = factor de potencia

$$I_n = \frac{2.000}{\sqrt{3} \cdot 96 \cdot 0,98} = 12,27 (A)$$

Con el valor I_n , podemos obtener el valor de I_T para determinar el conductor más apropiado.

Para determinar la corriente de referencia será necesario utilizar algunas tablas las cuales se encuentran especificadas en el anexo 1.

$$I_{ref} = \frac{I_n \cdot F_s}{N_c \cdot F_n \cdot F_t} \quad (21)$$

Donde:

I_{ref} = Corriente de referencia

F_s = Factor de seguridad

N_s = Número de conductores por fase

F_n = Factor de número

F_t = Factor de temperatura

$$I_T = \frac{12,27 \cdot 1,25}{1 \cdot 1 \cdot 1,04} = 14,75(A)$$

Con el valor de corriente ya determinado se propone usar el conductor XTU de 5,26 mm² (N°10 AWG) que soporta hasta 40 (A) (ver anexo 1).

Impedancia del conductor:

$$Z_L = \left(R + jX \left(\frac{f_r}{60} \right) \right) \cdot \frac{L}{30,48} [\Omega] \quad (22)$$

Donde:

Z_L = Impedancia del conductor según parámetros chilenos

$R+jx$ = Impedancia del conductor según parámetros estadounidenses

f_r = Frecuencia de red

L = Longitud del conductor

$$Z_L = \left(0,1230 + j0,00564 \left(\frac{50}{60} \right) \right) \cdot \frac{80}{30,48} = 0,323 \angle 2,19^\circ [\Omega] = 0,332 + j0,13 [\Omega]$$

Cálculo pérdidas de potencia trifásica por efecto joule:

$$P[W] = 3 \cdot I^2 \cdot r \quad (23)$$

Donde:

P[W]: potencia disipada en la línea (W)

I: corriente de línea (A)

r: resistencia de la línea (Ω)

$$P[W] = 3 \cdot 12,27^2 \cdot 0,332 = 149,95 [W]$$

Por lo tanto la potencia al final de la línea será de 1.850,05 [W]

- **Análisis**

Se observa que las pérdidas no afectarán tanto el rendimiento de generador eólico ya que solo se tendrá una pérdida de 149,95 [W], lo cual es bueno considerando que la distancia en donde serán instalados los equipos faltantes es de 80 metros.

4.5. Generador eólico, regulador de carga, inversor y baterías

4.5.1. Generador eólico



Parámetros técnicos:

Tabla 4.11: Información generador eólico entregada por fabricante.

Modelo	FD-4.0-2kW
Poder	2.000 (W)
Tipo de generador	De imán permanente - 3 Fases ac
Diámetro de la hoja	4,0 (m)
Material de la lámina	FRP (fibra de vidrio reforzada * 3)
Velocidad nominal del rotor	400 (rpm)
Iniciar velocidad	8 (m/s)
Potencia nominal	2.000 (W)
Máximo poder	3.000 (W)
Tensión de salida	DC96 V / AC220 V / 50 HZ
Puesta en marcha, velocidad del viento	3 (m/s)
Velocidad de trabajo	3 a 25 (m/s)
Velocidad del viento de seguridad	40 (m/s)
Sistema de controlador de salida	Controlador, Inversor
Puede suministrar la energía	Nevera, lavadora, bomba de agua, pan eléctrico, TV en color, más ligero, agricultor, cargador

Diseño:

Consta de un generador trifásico de corriente alterna, de una potencia de 2.000 W. Este generador se caracteriza por ser de imanes permanentes. En la cabeza de aerogenerador posee una cola de guía, que lo orienta en la dirección correcta del flujo del viento. En el rotor posee 3 palas de fibra de vidrio reforzada, es de eje horizontal y tiene orientación de barlovento. Este aerogenerador se encuentra a 9 metros de altura sostenido por una torre de acero de 3 segmentos de 3 metros de longitud cada uno (Ver anexo 2). Para el giro de la cabeza del aerogenerador posee un anillo deslizante ubicado entre la base de la cabeza del aerogenerador y la parte superior de la torre. En la parte inferior 3 conductores los cuales entrega corriente alterna hacia exterior.

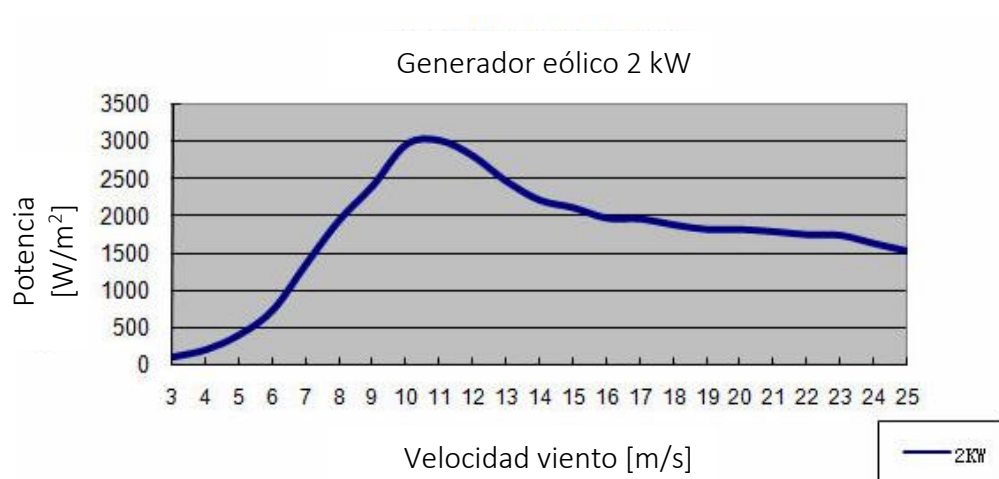


Figura 4.11: Curva de potencia v/s velocidad del viento, entregada por fabricante.

4.5.2. Regulador de carga

Dispositivo que se instala entre aerogenerador y el banco de baterías y tiene como objetivo proteger las baterías frente a situaciones de sobre cargas y descargas. Posee un panel con indicadores luminosos, para la entrada y salida al banco de baterías y/o conexión directa a una carga determinada.

No se encontró ninguna información sobre el regulador de carga.



Figura 4.12: Regulador de carga 96V.

4.5.3. Resistencia fantasma

Esta encargada de regular la velocidad del generador eólico una vez que el aerogenerador alcanza su límite de velocidad.

No se encontró alguna información de la resistencia solo se pudo obtener el valor de ella, a través, del multitester Fluke 79-III, los cuales fueron: A-B= 10,7 Ω , B-C=10,7 Ω y C-A=10,5 Ω .



Figura 4.13: Resistencia fantasma.

4.5.4. Inversor

Tiene una salida de onda sinusoidal pura puede manejar cualquier aparato electrodoméstico. Protección: sobre voltaje, bajo voltaje, sobre protección de la carga, protección del cortocircuito, protección de temperatura.

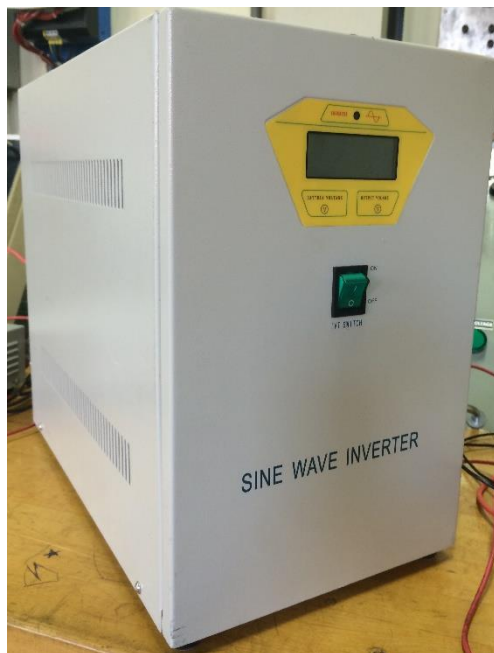


Figura 4.14: Inversor de voltaje 96 Vdc a 220 Vca.

Parámetros técnicos:

Tabla 4.13: Información inversor entregada por fabricante.

Modelo del producto	WI20-96
Capacidad nominal de salida	2kVA
Tensión nominal de la batería	96 V _{DC}
Durante el cierre del voltaje	136 V _{DC}
Más de recuperación de tensión	132 V _{DC}
Bajo voltaje de apagado	84 V _{DC}
Bajo voltaje de recuperación	96 V _{DC}
Peso neto	20 kg
Dimensiones (largo x ancho x alto)	400 × 243 × 352 mm
De onda de salida	De onda sinusoidal pura
Modo de visualización	LCD
Refrigeración	Ventilador
Tensión de salida nominal	110/120/220/230/240 V _{AC}
Distorsión de la onda	≤ 4%
Frecuencia de salida	50/60 Hz ± 0.5 Hz

Continuación tabla 4.13: Información inversor entregada por fabricante.

Respuesta dinámica	5%
Factor de potencia	≥ 0.8
Capacidad de la sobrecarga	120% 1 minutos, 150% 10 segundos
Invierta eficiencia	90% Max
Modo de aislamiento	Transformador toroidal
Ruido (1 m)	≤ 40 dB
Resistencia de aislamiento	1.500 V _{AC} , 1 minuto
Funciones de protección	Entrada sobre la protección del voltaje , Batería Bajo protección del voltaje, Batería Anti-protección de conexión inversa, protección de sobrecarga, Salida de protección del cortocircuito, sobre protección de la temperatura.
Temperatura ambiente	-20 + 55 ° C
Altura de trabajo	≤ 4.000 m
Humedad ambiente	0 ~ 90%, sin condensación

4.5.5. Banco de baterías.

La energía generada será almacenada en un conjunto de 8 baterías de 12 V y una capacidad de 100 Ah cada una, se espera que al banco de baterías lleve la energía generada por el aerogenerador. Estas baterías tienen la característica de ser de ciclo profundo.



Figura 4.15: Batería de ciclo profundo 12V.

Parámetros técnicos:

Tabla 4.14: Información batería entregada por fabricante.

Voltaje nominal	12 V
Capacidad nominal (10hr)	100 Ah
Dimensión	Largo: 330 mm, ancho:173 mm, Altura:220 mmm
Peso	28,8 kg. Aprox.
Terminal	T11
Capacidad nominal	107,2 Ah/5,36 A (20hr, 1,80V / T°= 25 °C) 100 Ah/10 A (10hr, 1,80V / T°= 25 °C) 87,7 Ah/17,5 A (5 h, 1,75V / T°= 25 °C) 79,5 Ah/ 26,5 A (3 horas, 1,75V / T°= 25 °C) 64,6 Ah/ 64,6 A (1 hora, 1,60V / T°= 25 °C)
Rango operativo T°	Descarga: -15 a 50 °C Carga: 0 a 40 °C Almacenamiento: -15 a 40 °C
T° funcionamiento nominal	25,3 °C
Ciclo de uso	Corriente de carga inicial de menos de 30,0 A. Voltaje 14,4 V a 15,0 V a 25 °C.
Capacidad afectados por T°	40 °C 103 % 25 °C 100 % 0 °C 86 %
Auto descarga	Se pueden almacenar durante un máximo de 6 meses a 25 ° C y luego se requiere una carga de reposición.

4.6. Ensayo de laboratorio

Se realizaron pruebas de laboratorio con instrumentos de medición en la Universidad de Bío Bío con el objetivo de conocer el funcionamiento del generador eólico en distintas condiciones, bajo aplicación de carga, visualizando la capacidad de potencia de salida y de voltaje generado. Al mismo tiempo se acoplo un motor de inducción en su eje, para simular condiciones de movimiento del aerogenerador. Específicamente, a través, de un variador se obtuvieron distintos valores de velocidad los que fueron medidos en revoluciones por minuto los que permitieron transformar a velocidad angular y finalmente realizar el traspaso a la velocidad lineal con la que el viento impactaría las palas del rotor.



Figura 4.16: Generador eólico acoplado a un MIRB para pruebas.

En relación al voltaje de salida del aerogenerador se simuló el movimiento del rotor mediante la conexión a un motor de inducción jaula de ardilla para obtener su voltaje. Concretamente se conectó el motor de inducción en delta para obtener velocidad. El acople se realizó mediante una copla apernada, entre el eje del motor y el rotor de aerogenerador como se puede apreciar en la figura 4.16.

4.6.1. Relación velocidad angular y revoluciones por minuto

Para los ensayos en laboratorio fue necesario saber a qué velocidad corresponde las rpm que se aplicarán, a través, del generador y para eso se aplicará la siguiente formula.

$$n = \frac{60 \cdot \lambda \cdot v}{\pi \cdot D} \quad (24)$$

Donde:

n: Revoluciones por minuto (rpm)

v: Velocidad viento (m/s)

D: Diámetro del rotor (metros)

λ : Razón de velocidad específica del rotor eólico

Para definir λ , existe una aproximación que depende del ancho y del ángulo de calado de las palas comprendido aproximadamente entre 0,8 y 14.

$$(\lambda_0) \cong 2\pi/nk \tag{25}$$

Se determina que $k = 0,5$, por lo que para n turbina de n palas se cumple:

$$(\lambda_0) \cong 4\pi/n \tag{26}$$

Por tanto el valor de λ será 4,2.

Tabla 4.15. Relación entre rpm y m/s.

Velocidad (rpm)	$v = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{60 \cdot \lambda}$	Velocidad (rpm)	$v = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{60 \cdot \lambda}$
10	0,49	105	5,23
15	0,74	110	5,48
30	1,49	120	5,98
40	1,99	130	6,48
50	2,49	140	6,98
60	2,99	150	7,48
70	3,49	160	7,97
80	3,98	170	8,47
87	4,33	180	8,97
89	4,43	190	9,47
91	4,53	200	9,97
93	4,63	210	10,47
95	4,73	220	10,97
97	4,83	240	11,96
99	4,93	260	12,96
101	5,03	280	13,96
103	5,13	300	14,96

4.6.2 Análisis de laboratorio

Para el desarrollo de esta experiencia se utilizó el osciloscopio digital “Rigol DS1052E” con el cual visualizaremos la forma de onda de salida y los valores de voltaje.

- Generador eólico:

El Generador eólico entrega una corriente alterna, la cual tiene un voltaje peak de 272 V aprox. como se observa en la siguiente imagen:

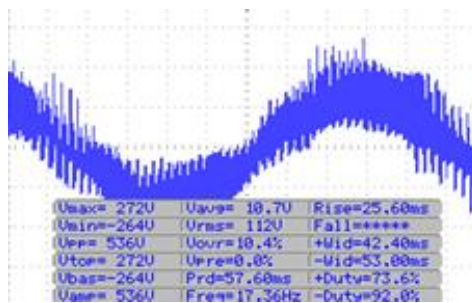


Figura 4.17: Onda de voltaje peak del generador eólico.

Como el aerogenerador se conectará a un banco de baterías de 96 V y teniendo en cuenta las condiciones de viento en la zona, se podría tener un problemas de bajo voltaje a la entrada del regulador de carga, el generador eólico tendrá que sobre pasar el valor de 4,43 [m/s], para que el inversor comience a funcionar con una tensión de 84 V (tensión mínima de funcionamiento del inversor).

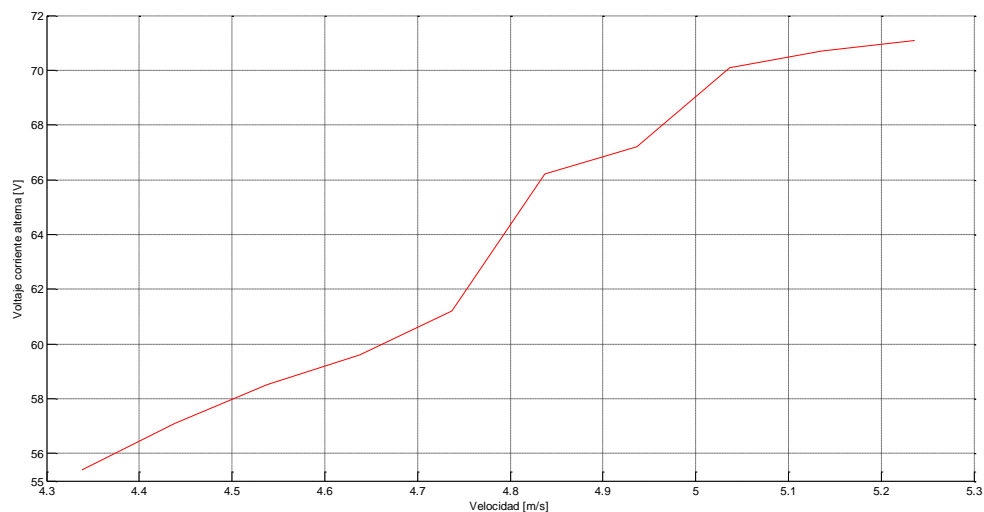


Figura 4.18: Voltaje rms de salida del generador eólico.

- Regulador de carga:

El regulador de carga tiene una entrada trifásica de corriente alterna, y una salida de 96 V, comienza a funcionar a los 63 Vac y su límite es de 105 Vac.

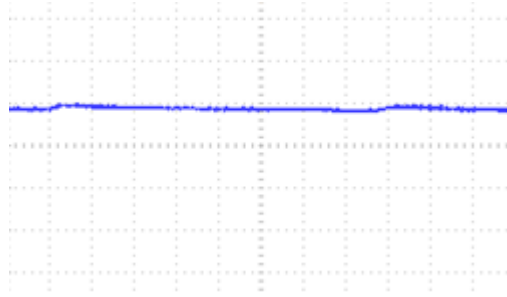


Figura 4.19: Voltaje rms de salida de regulador de carga.

Es posible observar en la figura 4.19 que el voltaje rms de salida tiene unas leves perturbaciones, pero en general el voltaje entregado por el regulador de carga es de muy buena calidad.

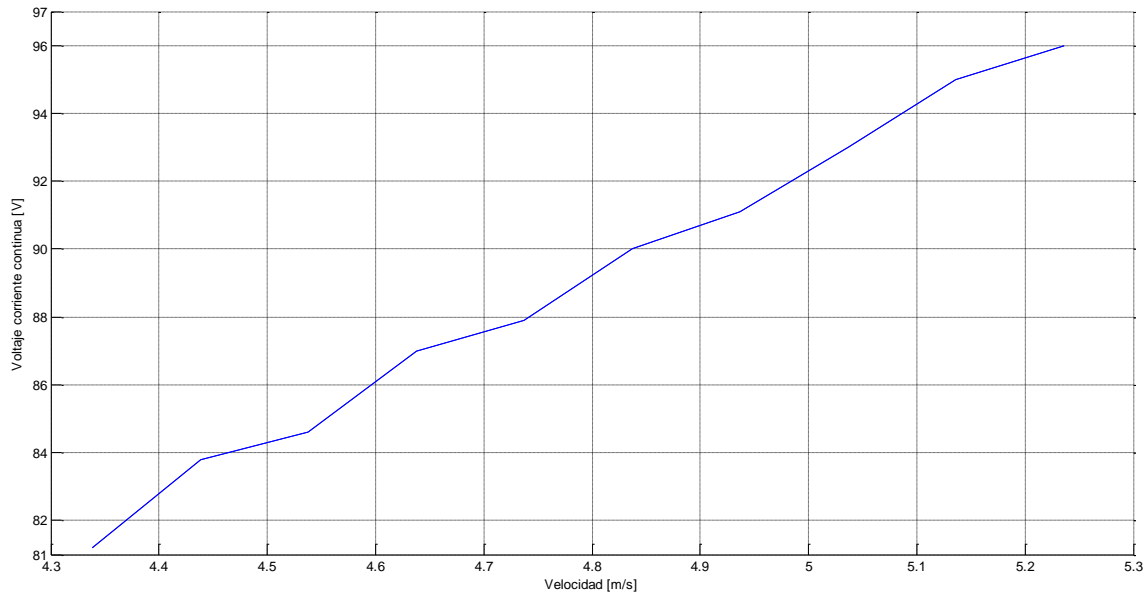


Figura 4.20: Voltaje rms de salida de regulador de carga.

Con los valores medidos de voltajes, se puede graficar la relación de transformación que existe en el regulador de carga.

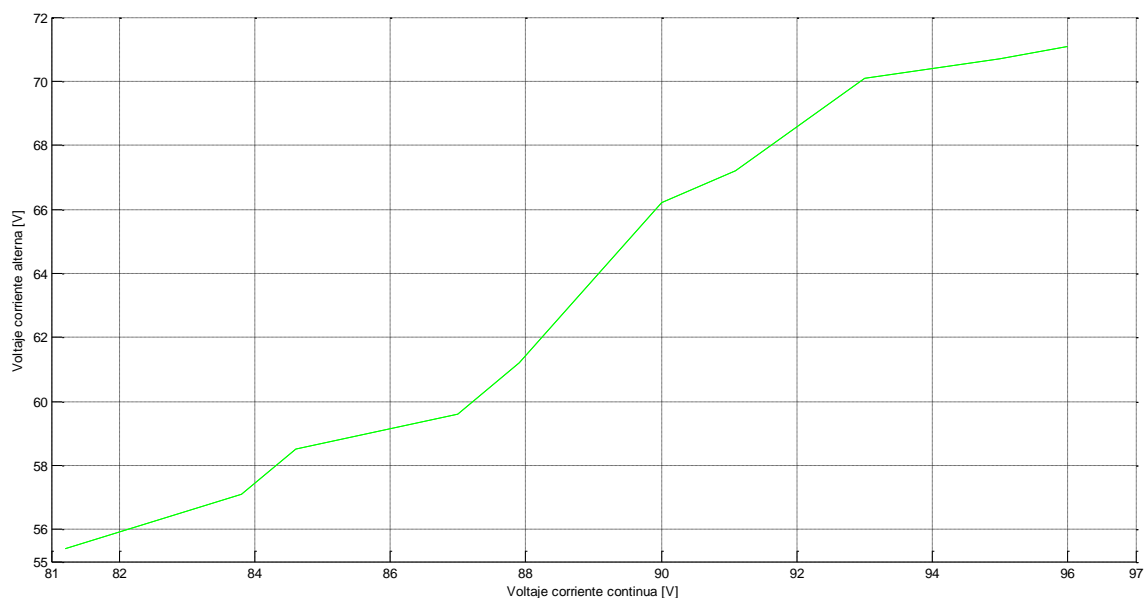


Figura 4.21: Relación de voltaje rms de entrada y salida, regulador de carga.

- Inversor:

El inversor comienza su funcionamiento cuando el regulador de carga entrega un voltaje mayor o igual a 84 Vdc, además es capaz de entregar una potencia total de 1,87 kW. La ubicación de este será a la salida de las baterías. Posee un sistema de protección frente a alzas y bajas de voltaje.

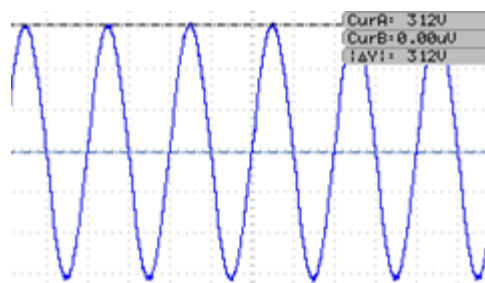


Figura 4.22: Salida de voltaje rms del inversor.

Como se observa en la figura 4.22 el inversor entrega una onda sinusoidal y un voltaje de 220 V, su operación comienza a los 84 Vdc, pero cuando esta por debajo de este voltaje comienza a emitir una alarma y en la pantalla de display indica que el voltaje es bajo, y dicha alarma se mantiene hasta que el voltaje se eleva de los 84 Vdc mencionados.

5. Propuesta para cambio de equipos

Debido a que los equipos adquiridos no están bajo la aprobación de la superintendencia de electricidad y combustibles (SEC), a excepción del generador eólico, se propone adquirir los siguientes equipos aprobados por la SEC.

5.1. Transformador de voltaje trifásico

El transformador de voltaje trifásico, tiene que soportar una potencia máxima de 2 kW, solo puede trabajar para un cierto rango de velocidad de viento debido a la relación de transformación la cual impide que el transformador trabaje con todas las velocidades deseadas, la relación de transformación será de 3. El rango de velocidad en el que podrá operar esta especificado en la tabla 5.1, este rango específico fue determinado por el voltaje de operación del regulador de carga el cual opera entre los 19 Vcc y 30 Vcc.

Tabla 5.1: Relación velocidad vs Voltaje de entrada y salida.

Velocidad (m/s)	Voltaje de entrada (V)	Voltaje de salida (V)
4,43	57	19
4,63	60	20
4,73	63	21
4,83	66	22
4,93	69	23
5,23	72	24
5,43	75	25
5,63	78	26
5,93	81	27
6,23	84	28
6,33	87	29
6,53	90	30

La cotización fue realizada en la empresa “Transformadores Mora”, dicha empresa esta ubicada en Santiago, y en la figura 5.1 se puede observar dicha cotización.

Cotización N° : 20424 Emisión : 13/10/2015 Vencimiento : 13/10/2015 Fono : Fax :

Item	Código	Unid.	Cantidad	Precio Unit.	Total \$
<input type="checkbox"/> 001	18230-060 TRAFO TRIFA 3 KVA	UNI	1	\$ 380,000	380,000
Neto					\$ 380,000
IVA					\$ 72,200
Total					\$ 452,200

Figura 5.1: Cotización del transformador requerido.

La ficha técnica del transformador se puede observar en la figura 5.2, características enviadas por el fabricante

Transformador Trifásico Tipo Seco Barnizado
 Potencia : 3 KVA ; 2.4kw
 Refrigeración : Natural, por convección.
 Tensión Primario : 90 Volts
 Conexión : Delta
 Tensión Secundaria : 30 Volts
 Conexión : Delta
 Frecuencia : 50 Hz
 Impedancia : 4 % +/- 10 %
 Aislación Térmica : Clase H
 Altura de operación : 1.000 m.s.n.m.
 Factor de Operación : K 1
 T° de Operación : 115° C
 Polaridad : Sustractiva
 Terminación : Gabinete metálico fabricado bajo norma IP-21, ángulos, bornes de conexión en su interior.

Pruebas y Ensayos :

- * Razón de transformación de enrollados en cada una de sus posiciones
- * Resistencia de aislación
- * Resistencia de enrollados
- * Entrega Protocolo de Pruebas.

- 1.- Los materiales utilizados y que conforman la fabricación de esta cotización, son 100 % nuevos.
- 2.- El o los productos que se detallan en esta oferta son de diseño exclusivo según lo solicitado.
- 3.- La garantía técnica de este producto es válida por un año, siendo efectiva en nuestro servicio técnico, el cual cubre sólo defectos de diseño o de fabricación, no imputables a fallas por mal uso u operación de terceros, siendo efectiva en nuestras dependencias de San Isidro N° 1849, Santiago. Está no incluye el traslado de los equipos.

Plazo de entrega : 08-10 días hábiles
 Forma de pago : 50 % Contado inicio y 50 % contra entrega.
 Validez de la Oferta : 10 días hábiles.

Figura 5.2: Características técnicas del transformador.

5.2. Regulador de carga

El regulador de carga que se utilizará se observa en la figura 5.3, el equipo fue cotizado fuera del país debido a que en Chile no es comercializado ya que la potencia requerida es mayor.



Figura 5.3: Regulador de carga.

Específicamente, fue cotizado en la pagina: <http://es.aliexpress.com/item/High-Performance-PWM-Wind-Charge-Controller-For-24V-power-2000w-Wind-Turbine-GeneratorController/341965912.html>

A continuación se indican las características técnicas del equipo entregadas por el fabricante.

Tabla 5.1: Relación velocidad vs Voltaje de entrada y salida.

Modelo	G103-24-Z
Tensión nominal de la batería (Vdc)	24 V
Corriente (A)	50 A
Corriente máxima de entrada (A)	100 A
Aerogenerador Potencia nominal	1.000 W
Potencia máxima de entrada	2.000 W
Función de protección	Batería sobre protección de la carga, protección reversa de la conexión, turbina de viento de descarga automática y manual.
Control de temperatura	Ventilador de refrigeración (sistema de control de temperatura)
Ruido	Menos que 50 dB
Temperatura ambiente de trabajo	30° C
Humedad	0-90%, sin condensación
Tamaño (ancho, largo, alto)	230 x 203 x 101(mm)
Peso (kg)	2

El equipo, tiene un costo de US \$ 424 dolares, equivalente a \$290.000 pesos chilenos.

5.3. Inversor

El inversor que se utilizará será de la marca Victron Energy Modelo Phoenix C 24V 2000VA 230 V 50 Hz VEBUS, el cual es de onda sinusoidal pura.

El equipo es comercializado por tienda solar y la página donde se cotizo el equipo es: http://tiendasolar.cl/index.php?option=com_mijoshop&Itemid=146&route=product/product&manufacturer_id=12&product_id=240&sort=p.price&order=ASC&page=2&limit=100



Figura 5.4: Inversor Victron Energy.

A continuación se indican las características técnicas del equipo entregadas por el fabricante.

Tabla 5.2 : Características técnicas del inversor Victron Energy.

Inversor Phoenix		C 24/2000 230V
INVERSOR		
Rango de tensión de entrada (V CC)	19 – 33 V	
Salida	Tensión de salida: 230 VAC ± 2% Frecuencia: 50 Hz ± 0,1% (1)	
Potencia cont. de salida a 25 °C (VA) (3)	2000	
Potencia cont. de salida a 25 °C (W)	1600	
Potencia cont. de salida a 40 °C (W)	1450	
Pico de potencia (W)	3500	
Eficacia máxima (%)	94	
Consumo en vacío (W)	10	
Consumo en vacío en modo de búsqueda (W)	3	
GENERAL		
Relé programable (4)	sí	
Protección (2)	a - g	
Características comunes	Temperatura de funcionamiento: -20 a + 50°C (refrigerado por aire) Humedad (sin condensación) : máx. 95%	
CARCASA		
Características comunes	Material y color: aluminio (azul RAL 5012) Tipo de protección: IP 21	
Conexiones de la batería	Cuatro pernos M8	
Conexión 230 V CA	Bornes de tornillo de 6 mm ² (10 AWG)	
Peso (kg)	12	
Dimensiones (al x an x p en mm.)	520 x 255 x 125	
NORMATIVAS		
Seguridad	EN 60335-1, EN 60335-2-29	
Emisiones / Normativas	EN55014-1, EN 55014-2, EN 61000-3-3	

Tiene un costo de \$ 865.000 pesos chilenos.

5.4. Banco de baterías

Las baterías a usar son: AGM ciclo profundo 100 Ah 12 V KUHN GD100-12.
Batería de ciclo profundo de AGM recomendadas para uso en sistemas solares (Entrega aprox. 10 Amperes durante 10 horas, o 100 Amp durante 1 hora).



Figura 5.5: Batería de ciclo profundo 12V.

- Modelo GP100-12
- Batería de plomo tipo VRLA-AGM de ciclo profundo y libre de mantención.
- Voltaje: 12V.
- Capacidad: 100Ah
- Medidas: 330mm de largo x 173mm de ancho x 212 mm de alto
- Alto total: 220 mm (Considerando los terminales)
- Peso: 28.8 kgs

Este producto tiene un costo de \$ 141.733. pesos chilenos (IVA incluido), y fue cotizado vía internet en la pagina:

http://www.kuhn.cl/webstore/energiasolar/fotovoltaica/baterias/bateriaa_gmcicloprofundo-100ah-12v-kuhn-gd100-12.html

Debido a que son necesarias dos baterías, el valor asciende a \$ 283.466. pesos chilenos.

5.5. Costo total de propuesta

El costo total de los equipos necesarios, según la cotización realizada es de \$ 1.890.666 pesos chilenos.

Equipo	Precio
Transformador	\$ 452.200
Regulador de carga	\$ 290.000
Inversor	\$ 865.000
Banco de baterías	\$ 283.466
TOTAL	\$ 1.890.666

6. Comentarios y conclusiones

El presente seminario tuvo como objetivo realizar un estudio de instalación de un generador eólico en el Colegio Concepción Pedro de Valdivia. Para realizar el análisis, se tomaron datos de viento en la zona de montaje y se utilizaron los datos de viento estimados por el explorador de energía eólica de la facultad de ciencias físicas y matemáticas de la Universidad de Chile.

A modo de comentario general y en base a la información recopilada y el análisis realizado en el desarrollo del seminario, es importante destacar que hoy en día, el viento es considerado como una fuente de energía perdurable, inagotable y gratuita, que aporta un potencial eléctrico libre de contaminación al medio ambiente. Este aspecto se puede observar en el crecimiento de la producción mundial de energía eléctrica a través de la utilización de aerogeneradores, situación que se puede observar a modo micro en el interés del colegio por generar energía a través de este equipo.

Específicamente, en relación al análisis de la instalación del aerogenerador en el colegio mencionado, es necesario indicar que los equipos adquiridos por éste son de 96[V] de tensión de trabajo, situación que complico el estudio de instalación, ya que en Chile los equipos de generación eólica suelen ser de 24-48[V]. Además, parte de los equipos adquiridos por el colegio no se encontraban certificados por la superintendencia de electricidad y combustibles (SEC), razón que motivo la decisión de realizar una cotización de equipos de mejor calidad y certificados, que permitieran entregar un proyecto duradero y confiable al demandante. Al mismo tiempo, se realizó una cotización de equipos que permitirían reducir el nivel de tensión de 96[V] a 24[V], ajustándose a los estándares chilenos.

Finalmente, en cuanto al análisis del nivel del viento realizado en la zona el año 2015 y la comparación con los datos obtenidos el año 2010, se puede observar que el nivel de viento durante el año 2015 es menor al del año 2010, situación que se relaciona a que en la zona de instalación del aerogenerador aún no se realizan los trabajos de roce y volteo de árboles que impiden la circulación de viento en todo su potencial. En base a la situación actual del lugar de instalación y las condiciones del viento observada, se puede concluir que la probabilidad de potencia que podría producir el aerogenerador sería baja.

Bibliografía

- [1] Muñoz Troncoso, Daniel Matías. (2012). Seminario de título “Centro Inter-comunal de Fomento a las ERNC en la Granja Educativa de la Comuna de Chiguayante-Hualqui: Generador Eólico y Generador Fotovoltaico”
- [2] Libro: “Norma Energía Renovables: Aerogeneradores.” (2008). Libro de Normas Aerogeneradores, programa de Naciones Unidas para el desarrollo, Gobierno de Chile: Comisión de Energía. Santiago.
- [3] Análisis para la instalación y mantenimiento de aerogeneradores.
Web: http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_0350_MI.pdf
- [4] Estudio, diseño y construcción de un prototipo de generador eólico para el sector costero de la xiv región, en corral.
Web: <http://cybertesis.uach.cl/tesis/uach/2010/bmfciv434e/doc/bmfciv434e.pdf>
- [5] Una, dos tres...: ¿cuántas palas?
Web: <http://www.cubasolar.cu/Biblioteca/Energia/Energia57/HTML/articulo03.htm>
- [6] Explorador de energía eólica.
Web: <http://walker.dgf.uchile.cl/Explorador/Eolico2/>
- [7] ¿Qué es la energía eólica?
Web: <http://www.ammonit.com/es/informacion-eolica/energia-eolica>
- [8] Asociación de la industria eólica Danesa.
Web: http://www.motiva.fi/myllarin_tuulivoima/windpower%20web/es/tour/wres/weibull/index.htm

[9] Energías renovables.

Web: https://books.google.cl/books?id=bl6L8E_9t1kC&pg=PA330&lpg=PA330&dq=relaci%C3%B3n+de+velocidades+%CE%BB&source=bl&ots=r7jtghV9Li&sig=LZtvJCnxwJbKKzi2HYrKQEzQ&hl=es&sa=X&ved=0CC8Q6AEwA2oVChMIuzuwtLZxwIVxYmQCh1B9QSG%20%20v=onepage&q=relaci%C3%B3n%20de%20velocidades%20CE%BB&f=false#v=snippet&q=relaci%C3%B3n%20de%20velocidades%20CE%BB&f=false

[10] Aerogeneradores: Generadores de electricidad y productores de agua.

Web: <http://www.monografias.com/trabajos82/aerogeneradores-generadores-electricidad-y-productores-agua/aerogeneradores-generadores-electricidad-y-productoresagua2.shtml#ixzz3kia3LHQB>

[11] Función gama.

Web: https://es.wikipedia.org/wiki/Funci%C3%B3n_gamma#Valores_de_la_funci.C3.B3n_Gamma

[12] Estadística de viento.

Web: http://www.fing.edu.uy/imfia/rige/cur_pas/material/Cuba/Cap8.pdf

[13] Aerogenerador FD4-0-2kW.

Web: http://www.alibaba.com/product-detail/FD4-0-2KW-Small-windturbine_1624443244.html

[14] Calculadora para distribución de Weibull.

Web: <https://www.easycalculation.com/es/statistics/Weibull-distribution.php>

“ANEXOS”

AUTORES

LUIS GUSTAVO CARRASCO SANZANA
MARCO AURELIO MARDONES SEPÚLVEDA

CONCEPCIÓN-CHILE

2015

77

Anexo [1]

Tabla Nº 8.6a
Características y Condiciones de Uso de Conductores Aislados. Secciones AWG

Características constructivas	Letras de identificación	Condiciones de uso	Máxima temperatura de servicio [° C]	Espesores de aislación		Tensión de servicio [V]	Chaqueta Exterior
				Sección nominal [mm ²]	Espesor [mm]		
Conductor unipolar; aislación PVC	THW	Ambientes secos y húmedos; canalizados en tuberías, bandejas, escalerillas, molduras	75	2,08 a 5,26 8,37 a 33,6 42,4 a 107 126,7 a 253 304 a 506	1,14 1,52 2,03 2,41 2,79	600	No tiene
Conductor unipolar; aislación PVC	THWN	Ambientes secos y húmedos; canalizados en tuberías, bandejas, escalerillas, molduras. La cubierta lo hace resistente a la acción de aceites, grasas, ácidos y gasolina	75	2,08 a 3,31 5,26 8,37 a 13,3 21,2 a 33,6 42,4 a ,107 126,7 a 253 304 a 506	0,38 0,51 0,76 1,02 1,27 1,52 1,78	600	Nylon
Conductor unipolar; aislación PVC	THHN	Ambientes secos y húmedos; canalizados en tuberías, bandejas, escalerillas, molduras. La cubierta lo hace resistente a la acción de aceites, grasas, ácidos y gasolina	90	2,08 a 3,31 5,26 8,37 a 13,3 21,2 a 33,6 42,4 a ,107 126,7 a 253 304 a 506	0,38 0,51 0,76 1,02 1,27 1,52 1,78	600	Nylon
Conductor cableado, mono o multipolar. Aislación y chaqueta de etil vinil acetato	EVA	En interiores, tuberías, bandejas, escalerillas, muy retardante a la llama, autoextinguente, se quema sin emitir gases tóxicos ni corrosivos, libre de materias halógenas. Indicado para uso en ambientes de trabajo cerrados como minas o túneles, o lugares de reunión de personas	90	1,5 a 2,5 4 a 16 25 a 35 50 a 70 95 a 120 150 185 240 300 400 500 a 630	0,8 1,0 1,2 1,4 1,6 1,8 2,0 2,2 2,4 2,6 2,8	1000	EVA

Tabla Nº 8.8
Factor de Corrección de Capacidad de Transporte de Corriente
por Cantidad de Conductores en Tubería.

Cantidad de conductores	Factor de corrección f_n
4 a 6	0,8
7 a 24	0,7
25 a 42	0,6
sobre 42	0,5

Tabla Nº 8.9
Factor de Corrección de la Capacidad de Transporte de Corriente
por Variación de Temperatura Ambiente. Secciones Métricas.

Temperatura ambiente [°C]	Factor de corrección f_t
10	1,22
15	1,17
20	1,12
25	1,07
30	1,00
35	0,93
40	0,87
45	0,79
50	0,71
55	0,61
60	0,50
65	-

Tabla Nº 8.9a
Factor de Corrección de la Capacidad de Transporte de Corriente
por Variación de Temperatura Ambiente. Secciones AWG

Temperatura ambiente [°C]	Factor de corrección f_t		
	Temperatura de servicio del conductor [°C]		
	60	75	90
21-25	1,08	1,05	1,04
26-30	1,00	1,00	1,00
31-35	0,91	0,94	0,96
36-40	0,82	0,88	0,91
41-45	0,71	0,82	0,87
46-50	0,58	0,75	0,82
51-55	0,41	0,67	0,76
56-60	-	0,58	0,71
61-70	-	0,33	0,58
71-80	-	-	0,41

Tabla N° 8.7a
Intensidad de Corriente Admisible para Conductores Aislados
Fabricados según Normas Norteamericanas. Secciones AWG.
Temperatura Ambiente de: 30° C.

Sección [mm ²]	Temperatura de servicio [°C]					
	60		75		90	
	Tipos TW, UF		Tipos THW, THWN, TTU, TTMU, PT, PW		Tipos THHN,XTU, XTMU, EVA, USE-RHH, USE-RHHM, ET, EN	
	Grupo A	Grupo B	Grupo A	Grupo B	Grupo A	Grupo B
2,08	20	25	20	30	25	35
3,31	25	30	25	35	30	40
5,26	30	40	35	50	40	55
8,37	40	60	50	70	55	80
13,3	55	80	65	95	75	105
21,2	70	105	85	125	95	140
26,7	85	120	100	145	110	165
33,6	95	140	115	170	130	190
42,4	110	165	130	195	150	220
53,5	125	195	150	230	170	260
67,4	145	225	175	265	195	300
85	165	280	200	310	225	350
107,2	195	300	230	360	260	405
126,7	215	340	255	405	290	455
151,8	240	375	285	445	320	505
177,3	250	420	310	505	350	570
202,7	280	455	335	545	380	615
253,2	320	515	380	620	430	700
303,6	355	575	420	690	475	780
354,7	385	630	460	755	520	855
379,5	400	655	475	785	535	885
405,4	410	680	490	815	555	920
456,0	435	730	520	870	585	985
506,7	455	780	545	935	615	1055
633,4	495	890	590	1065	665	1200
750,1	520	980	625	1175	705	1325
886,7	545	1070	650	1280	735	1455
1.013	560	1155	665	1385	750	1560

Tabla resistencia, reactancia e impedancia

Conductor: Monopolar

La siguiente tabla son características promedio en base a los datos de varios fabricantes de conductor de cobre. Valores de diferentes fuentes varían debido a las temperaturas de funcionamiento, trenzado de alambre, materiales de aislamiento, espesores, diámetros globales y otras divergencias en los materiales, las condiciones de ensayo y métodos de cálculo.

Esta tabla es para los conductores de 600 V, a una temperatura media de 75°C para cables de media tensión, las diferencias entre los fabricantes son considerablemente grandes debido a las variaciones más amplias en los materiales de aislamiento y espesores, blindaje, revestimiento, diámetros globales, y similares. Por lo tanto, los datos para el cable de media tensión se obtienen del fabricante del cable a utilizar.

Calibre cable, AWG o MCM	Conductores de cobre					
	Cable magnético			Cable no magnético		
	R	X	Z	R	X	Z
14	0,31300	0,00780	0,31310	0,31300	0,00624	0,31310
12	0,19680	0,00730	0,19690	0,19680	0,00584	0,19690
10	0,12300	0,00705	0,12320	0,12300	0,00564	0,12310
8	0,07890	0,00691	0,07920	0,07890	0,00553	0,07910
6	0,04900	0,00640	0,04940	0,04900	0,00512	0,04930
4	0,03180	0,00591	0,03230	0,03180	0,00473	0,03210
2	0,02030	0,00548	0,02100	0,02030	0,00438	0,02080
1	0,16200	0,00533	0,01710	0,01620	0,00426	0,01680
1/0	0,01300	0,00519	0,01340	0,01290	0,00415	0,01360
2/0	0,01040	0,00511	0,01159	0,01030	0,00409	0,01108
3/0	0,00843	0,00502	0,00981	0,00803	0,00402	0,00898
4/0	0,00696	0,00489	0,00851	0,00666	0,00391	0,00772
250	0,00588	0,00487	0,00763	0,00578	0,00390	0,00697
300	0,00512	0,00484	0,00705	0,00501	0,00387	0,00633
350	0,00369	0,00480	0,00619	0,00380	0,00384	0,00540
400	0,00369	0,00476	0,00602	0,00356	0,00381	0,00521
450	0,00330	0,00467	0,00595	0,00310	0,00374	0,00486
500	0,00297	0,00458	0,00546	0,00275	0,00366	0,00458
600	0,00261	0,00455	0,00525	0,00241	0,00364	0,00437
700	0,00247	0,00448	0,00512	0,00247	0,00358	0,00435
750	0,00220	0,00441	0,00493	0,00198	0,00353	0,00405

Anexo [2]

Características técnicas de estructura de montaje para generador eólico.

1. Mástil:

Estructurado por tres secciones de 3 metros cada una, ensambladas por medio de sistema de flanges y pernos.

2. Accesorios:

- a. Plataforma de montaje estructurada por 2 flanges perforados de 500 mm. de diámetro x 25 mm. de espesor.
- b. Anclaje a la fundación por medio de 6 pernos “J” de 1” de diámetro x 800 mm. de largo.
- c. Base de anclaje de cables tensores en un número de 4 unidades de 250 mm. de diámetro x 16 mm. de espesor.

Especificaciones de la obra civil y montaje del generador eólico.

1. Fundación del mástil:

Según manual del equipo se consideran las dimensiones siguientes: 1m x 1m x 1m.
Con hormigón armado HB3 0 con 10.

2. Fundaciones para los tensores:

Según manual del equipo se consideran 4 fundaciones con las siguientes medidas:
0,8 m x 0,8 m x 0,8. Con hormigón armado HB 30 cono 10.

3. Instalación de bases de anclaje:

Según especificaciones letra b. de las características de la estructura de montaje.

4. Montaje de mástil y equipo generador:

Se emplearán andamios para montaje de las tres secciones de la torre principal y del equipo generador eólico.

5. Instalación de los cables tensores:

Se instalarán cuatro cables tensores de 5/16” con los correspondientes elementos de fijación y ajuste.

Nota: todos los elementos de fijación (grilletes, cárcamos, tensores, etc), serán en 3”/8.

Observación: todas las piezas y elementos metálicos serán galvanizados en caliente. Se adjunta dibujo de la estructura.

Los esquemas se presenta a continuación en las páginas 84 y 85.

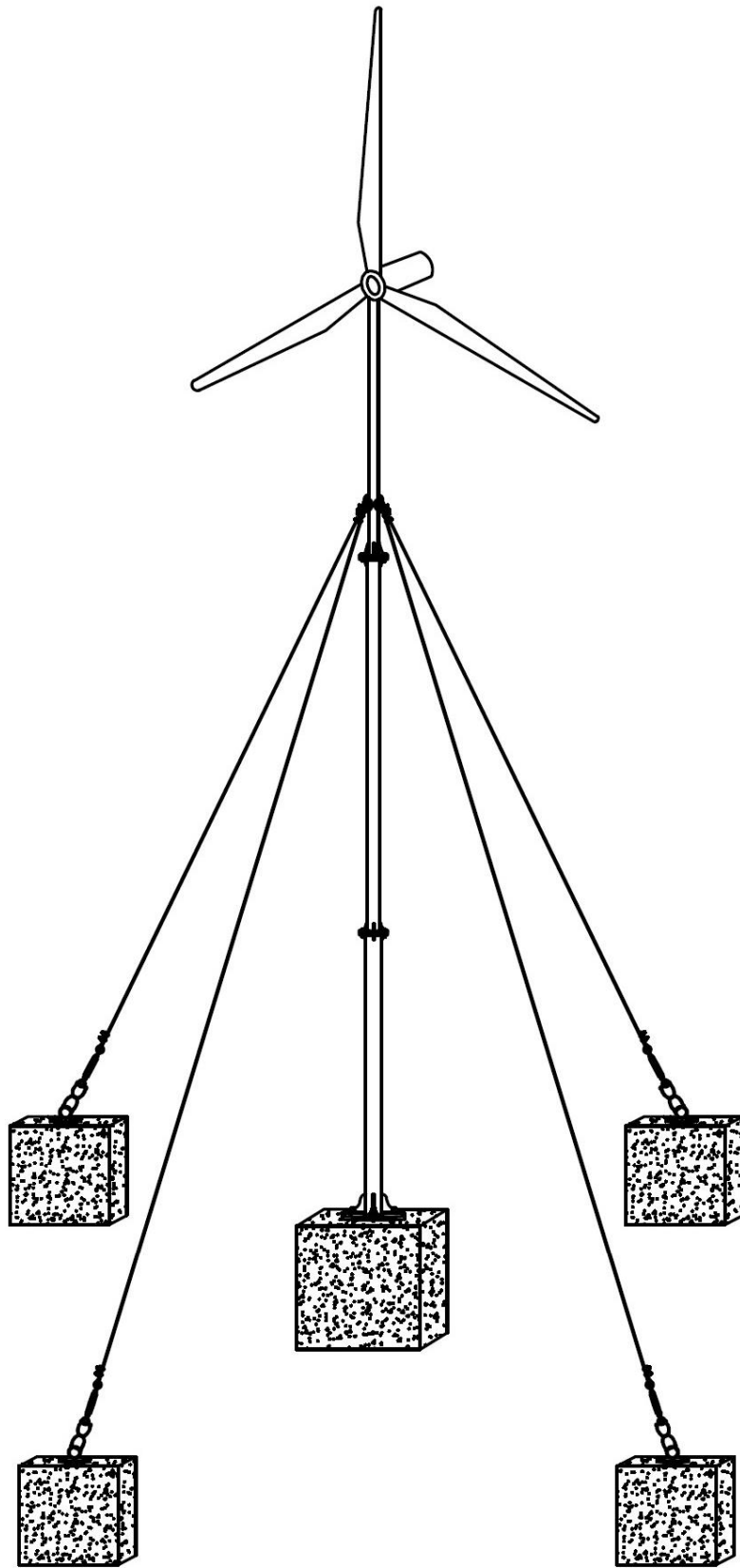


Figura anexo 1.1: Esquema general del Generador Eólico.

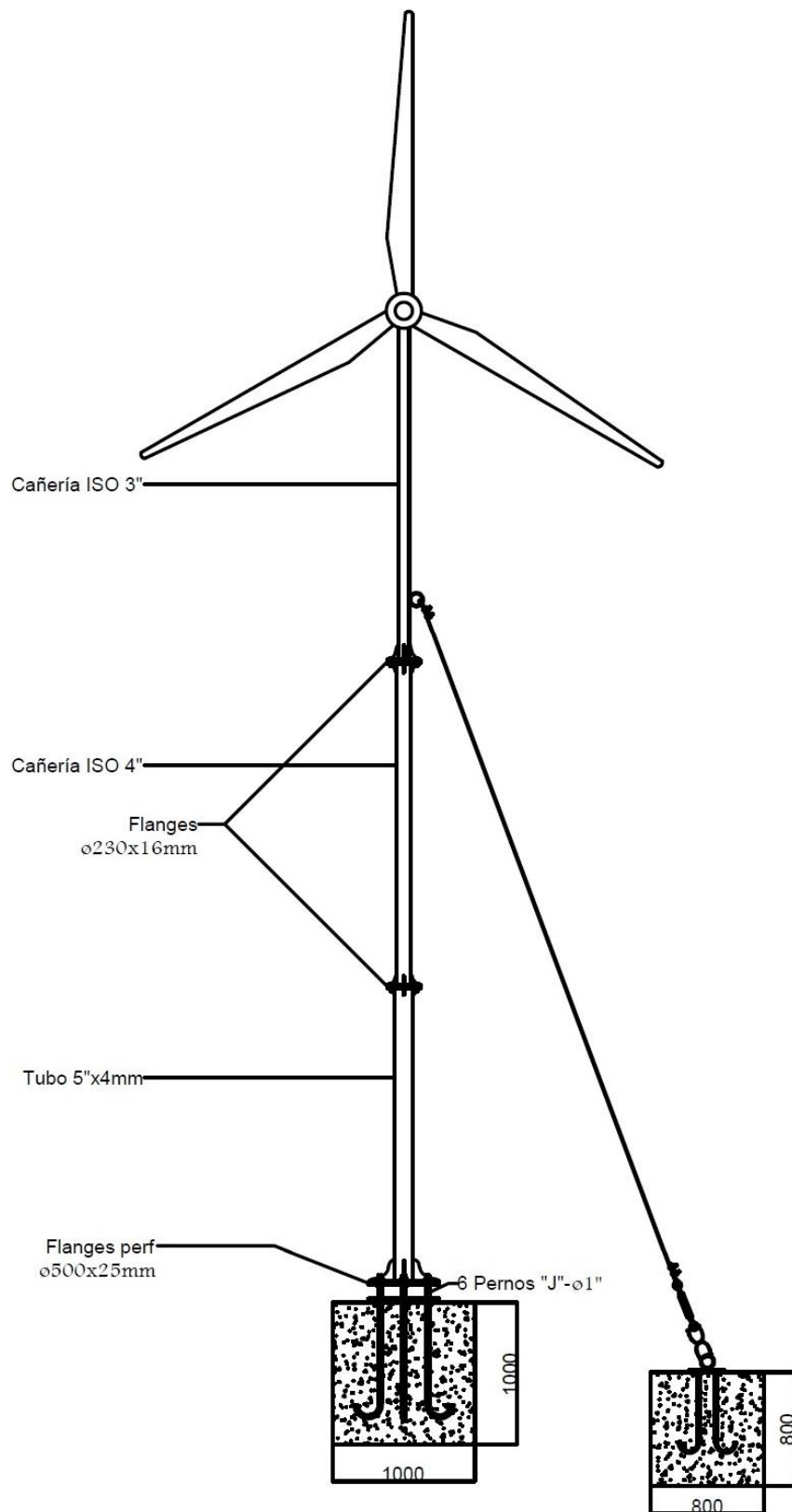


Figura anexo 1.2: Esquema con especificaciones del Generador Eólico.

Anexo [3]

Costo de equipo faltante.

BATERIA AGM CICLO PROFUNDO 100AH 12V KUHN GD100-12.

Batería de ciclo profundo de AGM recomendadas para uso en sistemas solares (Entrega aprox. 10 Amperes durante 10 horas, o 100 Amp durante 1 hora.)

- Modelo GP100-12
- Batería de plomo tipo VRLA-AGM de ciclo profundo y libre de mantención.
- Voltaje: 12V.
- Capacidad: 100Ah
- Terminal: T11
- Medidas: 330mm de largo x 173mm de ancho x 212 mm de alto
- Alto total: 220 mm (Considerando los terminales)
- Peso: 28.8 kgs

Este producto tiene un costo de \$ 141.733. pesos chilenos (IVA incluido), y fue cotizado vía internet en la pagina:

<http://www.kuhn.cl/webstore/energiasolar/fotovoltaica/baterias/bateriaagmcicloprofundo100ah12v-kuhn-gd100-12.html>

Debido a que son necesarias ocho baterías, el valor asciende a \$ 1.133.864. pesos chilenos.

Anexo [4]

4. Normativa de instalación para proyectos de energía eólica

La normativa sobre instalaciones eléctricas en Chile tiene su origen en normas internacionales que han sido adaptadas y equiparadas con la realidad nacional. Específicamente, el Instituto Nacional de Normalización (INN) es el organismo sin fines de lucro creado por la Corporación de Fomento de la Producción (CORFO) que es reconocido en el país para los asuntos de normalización, ya que tiene a su cargo el estudio y preparación de las normas técnicas, además de ser miembro de la International Organization For Standardization (ISO) y de la Comisión Panamericana De Normas Técnicas (COPANT).

Los objetivos institucionales del INN son: (1) Estudiar las normas técnicas requeridas por los distintos sectores del país. (2) Estudiar y disponer los mecanismos que permitan la aplicación de las normas técnicas que aprueba. (3) Realizar las actividades que sean necesarias para contribuir al desarrollo de las normas técnicas, la metrología y la evaluación de la conformidad.

En relación a la elaboración de una norma, esta sigue el siguiente proceso; en primer lugar se realiza la detección de la necesidad de regular ciertas áreas, la que puede ser detectada por el sector público o privado, y/o por el mismo INN. Luego de la detección es necesario tener en cuenta las normativas internacionales acerca del tema, si no existieran por tratarse de materias muy específicas o nuevas se buscan normas regionales o de empresas de ese sector.

En segundo lugar se constituye un comité técnico que elabora el anteproyecto de la norma, el que luego es sometido a consulta pública, instancia en la que participan las autoridades competentes, los productores y los representantes del mundo de la ciencia y la tecnología. Después, las observaciones de la consulta pública son llevadas nuevamente al Comité Técnico, quien resuelve su pertinencia. Finalmente se llega a un texto oficial y aceptado por todos que se propone al Consejo del INN para su aprobación.

Debido a que el tema de este seminario se basa en el estudio de la instalación de un sistema eólico, las normas que se describen posteriormente son parte de la Norma Chilena oficial Nch1437/415.of2005 de Energías Renovables, Aerogeneradores, la cual se elaboró a solicitud de la Comisión Nacional de Energía y el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo en el marco del Proyecto GEF-PNUD-CNE CHI/ 00/G32 *Remoción de Barreras para la Electrificación Rural con Energías Renovables en Chile*.

4.1. Norma Chilena Oficial: NCh1437/415.Of2005

Norma de referencia: **IEC60050-415: 1999**
Vocabulario Electrotécnico Internacional
Parte 415: AEROGENERADORES.

El apartado 415 del Vocabulario Electrotécnico Internacional presenta las definiciones que son utilizadas en los documentos actuales del TC 88 de la Comisión Electrotécnica Internacional (CEI). Concretamente, adjunta conceptos que son específicos de los aerogeneradores, por lo que los conceptos utilizados en los documentos existentes del TC 88 y que están definidos en otros lugares del Vocabulario Electrotécnico Internacional (VEI), como las definiciones de carácter general y las relativas a temas electrotécnicos, no están incluidas. Puede ocurrir que algunos términos de uso general ya definidos en el VEI tengan un significado especial y/o diferente para el TC 88 de la definición existente: en estos casos el atributo (para los aerogeneradores) es añadido al término.

Específicamente, el documento contiene las siguientes secciones:

Sección 415-01: Turbinas Eólicas y Aerogeneradores.

Sección 415-02: Parámetros de Diseño y de Seguridad.

Sección 415-03: Características del viento.

Sección 415-04: Interconexiones Eléctricas.

Sección 415-05: Medida del Rendimiento de Potencia.

Sección 415-06: Medidas Acústicas.

La presente norma se utilizó en el proceso de especificación de los aspectos técnicos del seminario, es decir, en el estudio de la instalación del aerogenerador a través del uso de lenguaje técnico y uniforme de los parámetros y elementos a considerar. Al mismo tiempo se utilizaron algunas definiciones en el análisis de las condiciones del viento de la zona y parámetros del diseño del aerogenerador.

4.2. Norma Chilena Oficial: NCh2946/1.Of2005

Norma de referencia: **IEC 61400-1: 1999**

Aerogeneradores Parte 1: Requisitos de Seguridad.

En la norma NCh2946/1.Of2005 se especifica lo relativo al aseguramiento de calidad e integridad y los requisitos mínimos de seguridad para los aerogeneradores. Precisamente, se presenta el diseño, instalación, mantenimiento y su operación en condiciones externas y específicas ya que su objetivo es fijar un nivel adecuado de protección contra los riesgos y daños que pueden generar durante su tiempo de vida estos sistemas.

Concretamente, el documento contiene las siguientes disposiciones:

1. Generalidades (Referencias normativas, Términos y definiciones, Símbolos, Unidades y abreviaturas).
2. Elementos Principales.
3. Condiciones externas: vientos.
4. Diseño estructural (Tipos de cargas).
5. Sistema de control y Protección.
6. Sistema Mecánico.
7. Sistema Eléctrico.
8. Evaluación de las condiciones externas.
9. Montaje, Instalación y construcción.
10. Puesta en Marcha, operación y mantenimiento.
11. Anexos – Figuras – Tablas.

Esta norma se ocupa de todos los subsistemas de aerogeneradores; mecanismos de control y protección, sistemas eléctricos internos, sistemas mecánicos, estructuras de soporte y equipo de interconexión eléctrica de aerogeneradores con una superficie barrida mayor o igual que 40 m² (equivalente a palas del orden de 3,5 m de longitud), razón por la que no se utilizó para el presente seminario, debido a que la longitud de palas del aerogenerador con el que se trabajó es de 1 metro, dimensión que lo ubica en la categoría de aerogeneradores pequeños.

4.3. Norma Chilena Oficial: NCh2946/2.Of2005

Norma de referencia: **IEC 61400-2:1996**

Aerogeneradores Parte 2: Seguridad de los Aerogeneradores Pequeños.

En la norma NCh2946/2.Of2005 se presenta lo relativo a la seguridad, al aseguramiento de la calidad e integridad de la ingeniería, y los requisitos referentes a la seguridad de los aerogeneradores pequeños (AGP), incluidos su diseño, su instalación y su mantenimiento, así como su explotación en condiciones externas específicas. El objetivo de esta norma es fijar un nivel de protección contra los riesgos y daños que estos sistemas pueden causar durante su tiempo de vida.

Concretamente, esta norma cuenta con el siguiente contenido:

1. Generalidades (Referencias normativas, Términos y definiciones, Símbolos, Unidades y abreviaturas).
2. Elementos Principales.
3. Diseño de la estructura.
4. Protección de los Aerogeneradores pequeños (AGP).
5. Estructura Soporte.
6. Sistema Eléctrico de los Aerogeneradores pequeños.
7. Documentación (Instalación; Funcionamiento; Inspección y mantenimiento).
8. Ensayos.
9. Anexos – Figuras – Tablas.

A diferencia de la norma mencionada anteriormente, esta norma se aplica a los aerogeneradores que tienen una superficie barrida menor que 40 m² (equivalente a palas del orden de 3,5 m de longitud) y que funcionan a una tensión menor que 1000 V en corriente alterna o menor que 1500 V en corriente continua. Debido a estas características, es que se utilizó esta normativa en el seminario, ya que la longitud de palas del aerogenerador con el que se trabajó es de 2 metro, dimensión que lo ubica en la categoría de aerogeneradores pequeños.

Específicamente, esta norma se consideró para verificar las condiciones de seguridad a utilizar necesarias en una instalación de un aerogenerador, es decir, las condiciones del sistema eléctrico, seguridad de los dispositivos y las personas en el lugar, firmeza de las estructuras, grado de carga

en funcionamiento que pudiese tener el aerogenerador en condiciones extremas de viento, entre otras.

4.4. Norma Chilena Oficial: NCh2946/12.Of2005

Norma de referencia: **IEC 61400-2:1996**

Aerogeneradores Parte 12: Ensayo de Curva de Potencia.

La norma NCh2946/12.Of2005 se realizó para especificar y proporcionar metodologías y procedimientos uniformes que aseguren la coherencia y precisión en la medida y análisis de la curva de potencia de un aerogenerador, independiente del tipo o tamaño, ya que el objetivo es que pueda ser aplicada por fabricantes de aerogeneradores, organismos públicos o privados reconocidos como certificadores de productos, operadores de aerogeneradores, posibles compradores y planificadores o reguladores de estos.

La característica de la curva de potencia del aerogenerador se determina por la curva de potencia medida y la producción anual de energía estimada (PAE). Para determinar la curva de potencia medida se debe adquirir medidas simultáneas de la velocidad del viento y la salida de potencia, durante un periodo suficientemente largo para tener una base de datos de diferentes velocidades de viento en el lugar de ensayo.

1. Generalidades (Referencias normativas, Términos y definiciones, Símbolos, Unidades y abreviaturas).
2. Condiciones de ensayo.
3. Equipos de Ensayo.
4. Procedimiento de medida.
5. Resultados.
6. Anexos – Figuras – Tablas.

Esta normativa no se utilizó en el presente seminario debido a que no se cumplían las condiciones necesarias para tomar los datos que aseguren la coherencia y precisión del ensayo de la curva de potencia del aerogenerador, ya que no se cuenta con la instalación de una torre de

meteorología, ni un anemómetro de cazoletas que mida constantemente parámetros de velocidad de viento, temperatura, presión atmosférica, dirección promedio del viento a través de una veleta y pluviómetro para medición de precipitaciones con el fin de determinar periodos húmedos o secos.

4.5. Norma Chilena Oficial: NCh2946/13.Of2005

Norma de referencia: **IEC/TS 61400-13:2001**

Aerogeneradores Parte 13: Medida de Cargas Mecánicas.

La norma NCh2946/13.Of2005 especifica las mediciones de carga mecánica de las turbinas eólicas de aerogeneradores con una superficie barrida mayor o igual a 40 m² (equivalente a palas del orden de los 3,5 m de longitud). Su objetivo es describir la metodología y técnicas correspondientes para la determinación experimental de la carga mecánica en turbinas eólicas, actuando como una guía para realizar mediciones usadas para la verificación de códigos y/o determinación directa de la carga estructural.

Esta normativa, cuenta con el siguiente contenido:

1. Generalidades (Referencias normativas, Términos y definiciones, Símbolos, Unidades y abreviaturas).
2. Seguridad durante los ensayo.
3. Programa de mediciones de carga.
4. Técnicas de medición.
5. Procesamiento de datos medidos.
6. Informes.
7. Anexos – Figuras – Tablas.

Al igual que la norma NCh2946/1.Of2005, esta no se aplicó debido a que el aerogenerador a instalar se encuentra dentro de la categoría de aerogeneradores pequeños, por tener una longitud de aspas de 1,75 metro.

4.6. Norma Chilena Oficial: NCh2946/24.Of2006

Norma de referencia: **IEC/TR 61400-24: 2002**

Aerogeneradores Parte 24: Protección Contra Rayos

La norma NCh2946/24.Of2006 fue desarrollada para informar el estado del arte de la tecnología sobre protección contra rayos de las turbinas eólicas a diseñadores, compradores, operadores, organismos de certificación e instaladores de turbinas. Específicamente, esta norma permite: (1) Identificar los problemas genéricos involucrados en la protección contra rayos de las turbinas eólicas. (2) Redactar y sistematizar la experiencia existente en relación a antiguos y nuevos diseños de turbinas eólicas. (3) Describir métodos apropiados para evaluar el riesgo de daño de rayos a las turbinas eólicas, por lo tanto, hacer evaluaciones confiables costo-beneficio de alternativas de la protección contra rayos. (4) Describir y bosquejar métodos apropiados para la protección contra rayos de los componentes de las turbinas eólicas, considerando la naturaleza especial de las turbinas y el amplio uso de materiales mixtos.

El contenido mencionado, se presenta en los siguientes apartados:

1. Generalidades (Referencias normativas, Términos y definiciones, Símbolos, Unidades y abreviaturas).
2. Condiciones de ensayo.
3. Equipos de Ensayo.
4. Procedimiento de medida.
5. Resultados.
6. Anexos – Figuras – Tablas.

Debido a que el aerogenerador utilizado no posee un sistema de para-rayos y se desconocen las especificaciones sobre el material de fabricación de las aspas del rotor no se utilizó esta norma.

4.7. Norma Chilena Oficial: NCh2955/24.Of2006

Norma de referencia: **IEC WT 01: 2001**

Sistema IEC para Ensayo de Conformidad y Certificación de Aerogeneradores – Reglas y Procedimientos

Finalmente, la norma NCh2955/24.Of2006 se realizó para especificar un sistema de certificación para aerogeneradores que incluye reglas para los procedimientos y manejo para llevar a cabo la evaluación de conformidad de los aerogeneradores con respecto a las normas específicas y otros requisitos técnicos, relativos a seguridad, fiabilidad, comportamiento, ensayo e interconexión con redes eléctricas, ya que su objetivo es el facilitar el comercio internacional de aerogeneradores en el país con el cumplimiento de la normativa de certificación y que se reduzca el número de pasos necesarios para su aprobación a nivel nacional mientras se mantiene un nivel apropiado de seguridad.

Concretamente, este documento presenta el contenido en los siguientes apartados:

1. Generalidades (Referencias normativas, Términos y definiciones, Símbolos, Unidades y abreviaturas).
2. Aprobación de organismos de operación.
3. Manejo del sistema de Certificación.
4. Extensión de la Certificación.
5. Certificación de tipo.
6. Certificación de Proyecto.
7. Anexos – Figuras – Tablas.

Debido a que esta norma está orientada a fabricantes y proveedores, para proporcionar la información adecuada de las características de los aerogeneradores con el fin de facilitar el comercio internacional de dichos dispositivos, no se aplicó esta norma.