



industriales
etsii

Escuela Técnica
Superior
de Ingeniería
Industrial

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial

Análisis en banco de ensayos de un aerogenerador de 1kW acoplado a diferentes cargas.

TRABAJO FIN DE GRADO

GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES



Universidad
Politécnica
de Cartagena

Autor: Guillermo García Torres
Director: Antonio Sánchez Káiser

Cartagena, Septiembre de 2018

Tabla de contenido

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	3
1.1. INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES.....	3
1.2. OBJETIVOS DEL TRABAJO	3
1.3. DESCRIPCIÓN DE LAS PARTES DEL TRABAJO.....	4
CAPÍTULO 2. SITUACIÓN ENERGÉTICA MUNDIAL.....	6
2.1. BREVE EVOLUCIÓN HISTÓRICA.....	6
2.2. SITUACIÓN ACTUAL DE LA ENERGÍA EÓLICA.....	7
2.3. LA ENERGÍA MINIEÓLICA.....	9
2.3.1. TECNOLOGÍA MINIEÓLICA EN ESPAÑA.	12
2.3.2. SITUACIÓN INTERNACIONAL DE LA TECNOLOGÍA MINIEÓLICA	12
CAPÍTULO 3. DESCRIPCIÓN DE LA INSTALACIÓN.....	15
3.1. INTRODUCCIÓN.....	15
3.2. ESTRUCTURA	16
3.3. ACTUADORES: VENTILADORES Y VARIADORES DE FRECUENCIA.	18
3.3.1. VENTILADORES	18
3.3.2. VARIADORES.....	19
3.4. SISTEMA DE MEDIDA.....	20
3.4.1. SENSORES Y TRANSDUCTORES.....	21
3.4.2. SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS.....	34
3.5. AEROGENERADOR.....	36
3.6. OTROS EQUIPOS.....	38
3.6.1. REGULADOR DE CARGA.....	38
3.6.2. BATERÍAS	39
3.6.3. INVERSOR	40
CAPÍTULO 4. PLANIFICACIÓN Y REALIZACIÓN DE LOS ENSAYOS.	42
4.1. INTRODUCCIÓN	42
4.2. DISTRIBUCIÓN DE LA TOMA DE DATOS.....	42
4.3. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS.	44
• VELOCIDADES PROMEDIO DEL PLANO VERTICAL.	46
• VELOCIDADES PROMEDIO DEL PLANO HORIZONTAL.....	49
• VELOCIDAD PROMEDIO TOTAL.	51
4.4. CÁLCULO DE LA POTENCIA ELÉCTRICA.....	55
4.5. CONCLUSIONES	59
CAPÍTULO 7. MANUAL DE PRÁCTICAS.....	60

1. OBJETO DE LA PRÁCTICA.....	60
2. FUNDAMENTO TEÓRICO.....	60
2.1. POTENCIA DEL RECURSO EÓLICO	60
2.2. POTENCIA ELÉCTRICA DE UN AEROGENERADOR	61
3. DESCRIPCIÓN Y FUNCIONAMIENTO DE LA INSTALACION.....	63
3.1. Descripción de los elementos.....	64
3.2. Funcionamiento de la instalación	66
4. TOMA DE DATOS.....	68
a) ENSAYO SIN PANEL DE REJILLA INTERMEDIO: se realizará un ensayo sin la presencia de la rejilla intermedia. A continuación, se exponen los objetivos a realizar.....	69
b) ENSAYO CON PANEL DE REJILLA INTERMEDIO.....	73
5. PROCESADO Y PRESENTACIÓN DE RESULTADOS.....	77
Bibliografía.....	79

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

1.1. INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES

El presente documento se ha realizado a raíz del trabajo de investigación propuesto por el laboratorio de Ingeniería Térmica y de Fluidos. Se enmarca dentro de los proyectos del campo de la energía eólica, concretamente en el ámbito de la tecnología minieólica. Se trata de un sector que está en auge, ya que las grandes potencias mundiales están aportando fuertemente por él.

El proyecto se centra principalmente en el estudio del comportamiento de un aerogenerador de pequeña potencia. El aerogenerador se encuentra instalado en un banco de ensayos situado en el laboratorio “Minieólica, túnel de viento y “ del edificio “ELDI”. Esta instalación ha sido frecuentemente utilizada en otros proyectos de fin de carrera y de fin de master. Gracias a su versatilidad en cuanto a la realización de los ensayos, ya que permite la utilización de diferentes aerogeneradores, y a su capacidad de asimilación de constantes mejoras, ya sea en cuanto a sensores y equipos o en cuanto a software, convierte a este banco de ensayos en una instalación idónea y moderna para la realización de proyectos.

Entre los proyectos con más relevancia realizados en esta instalación se encuentra el de Juan Carlos Serrano Collazo. Este proyecto consistía en el diseño y montaje del sistema de generación de viento y del sistema de adquisición de datos de ensayos, con el fin de que en futuras investigaciones sirviera para optimizar los parámetros aerodinámicos de los mismos y mejorar con ello su eficiencia. Otro proyecto destacado es el de Francisco Javier Pardo Balibrea, en el cual se realiza una completa caracterización del comportamiento fluido-mecánico y eléctrico del aerogenerador de eje vertical híbrido tipo Savonius-Darrieus DS-300 y se comprueba su eficiencia para establecer si era económicamente viable su adquisición para autoconsumo. Otros dos proyectos reseñables son el del Pablo Conde Calero, cuyo objetivo fue diseñar un prototipo de un aerogenerador horizontal sencillo, económico y ligero, que pudiera montarse en cualquier casa con pocas herramientas y que sus materiales fueran fácilmente accesibles por el público; y el de Natanael Rolffot Feliciano, en el cual se caracterizó un aerogenerador de eje horizontal de un 1 kW y se compararon los resultados con otro aerogenerador de eje vertical de pequeña potencia previamente caracterizado.

1.2. OBJETIVOS DEL TRABAJO

En el presente proyecto se realiza la puesta a punto y caracterización del comportamiento eólico y eléctrico de una instalación eólica de pequeña potencia. Además, tiene la finalidad de elaborar un manual de prácticas que permita a los futuros alumnos de la UPCT conocer el funcionamiento y comportamiento de este tipo de aerogeneradores y servir de una guía de eso. El banco de ensayos cuenta con un aerogenerador de 1 kW de potencia el cual es incidido por un flujo de viento originado por unos ventiladores con el propósito de simular las condiciones reales a las que estaría expuesto. De esta forma, se podría obtener el

comportamiento de dicho aerogenerador en función de las diferentes condiciones de velocidad del viento, temperatura y presión.

Durante la realización de este proyecto se ha realizado la puesta a punto del banco de ensayos. A pesar de que este no era el objetivo inicial, la configuración de la instalación estaba incompleta y necesita algunos ajustes para su correcto funcionamiento. En concreto, se ha ajustado el valor que proporcionaba en el “Data Logger” el transductor de tensión, el cuál proporcionaba un valor erróneo. También se ha solucionado el problema que generaba la desconexión del propio sistema “Data Logger”. Este fallo era debido a la inclusión de ruido producido por la conexión ModBus proveniente de los variadores. La solución provisional fue desconectarlo, y posteriormente se intentó dar una solución definitiva mediante la instalación de una interfaz aislada para la conexión ModBus y evitar así la inclusión de ruido.

Uno de los dos objetivos más importantes del presente proyecto es la caracterización de la instalación eólica de pequeña potencia. Mediante los ventiladores disponibles se incide un flujo de aire sobre el aerogenerador que consigue mover las aspas. Mediante los anemómetros que dispone el sistema de medida se tomarán datos de vientos para cuatro posiciones distintas del plano horizontal y mediante una barra corredera los anemómetros se moverán de posición en el plano vertical. De esta manera se obtienen 16 datos distintos para una frecuencia, lo que permite la elaboración de un mapa de vientos. También se tomarán datos de voltaje de intensidad y voltaje generados por el rotor de la turbina eólica, para poder calcular así la curva de potencia.

En segundo lugar, se elaborará un guión de prácticas para que el futuro sirva de guía para la realización de ensayos o sesiones de prácticas por parte de los alumnos de la asignatura “Energía Eólica” de la UPCT. Este manual facilitaría la utilización de la instalación a cualquier alumno, ya que es un guía completa donde se describe tanto el aspecto teórico de aerogeneradores eólicos como el funcionamiento y la estructura del banco de ensayos.

1.3. DESCRIPCIÓN DE LAS PARTES DEL TRABAJO.

Para facilitar la lectura de este documento, se va a exponer y detallar las partes de las que consta el trabajo. Además de este capítulo de introducción, el documento consta de cuatro capítulos más cuyo contenido se desarrolla a continuación.

El Capítulo 2 titulado “La Energía Eólica” trata sobre la situación actual de la energía eólica. El capítulo comienza exponiendo una breve reseña histórica sobre la evolución de las turbinas eólicas desde el año 3000 A.C. hasta la actualidad. En su contenido principal se desarrolla el estado actual en cuanto a potencia instalada de la energía eólica y como ha crecido en los últimos años. También se ofrece una visión detallada sobre la energía o tecnología minieólica a nivel nacional e internacional y se aportan datos obtenidos de la WWEA para ofrecer una visualización gráfica de su estado en cuanto a potencia y unidades instaladas.

Durante el Capítulo 3 se procederá a la descripción completa de todos los elementos de la instalación. El aerogenerador, la estructura, los sensores y el sistema de adquisición de

datos, los ventiladores, los variadores y el resto de elementos eléctricos se detallan en este capítulo definiendo la utilidad de cada uno de ellos. Se aportarán tablas con sus características más relevantes así como sus curvas de calibración. También se anexarán fotografías reales de las diferentes partes de la instalación para facilitar la distinción y localización de cada una de ellas.

En el Capítulo se procederá a la planificación y realización de los ensayos.

CAPÍTULO 2. SITUACIÓN ENERGÉTICA MUNDIAL.

2.1. BREVE EVOLUCIÓN HISTÓRICA

La energía eólica es una de las fuentes de energía renovable más utilizada hoy en día y la que mayores avances técnicos y desarrollo ha logrado durante las últimas décadas.

Las primeras evidencias del uso y el aprovechamiento de la energía eólica datan en torno al año 3000 A.C en los primeros barcos veleros en el antiguo Egipto. La siguiente evidencia se remonta al siglo XVII A.C en Babilonia, donde se utilizaron molinos de vientos para el bombeo de agua en el riego.

Sin embargo, no es hasta el siglo X cuando queda demostrado mediante documentos que la utilización de la energía eólica es una práctica generalizada. Hacia el año 1000, los primeros molinos de viento comienzan a ser usados en el Medio Oriente y durante los siglos posteriores fue extendiéndose al resto de Europa, principalmente gracias a la cultura del islam.

Durante el siglo XIV, estas máquinas eólicas adquirieron gran importancia en Holanda donde eran utilizados para diversos trabajos donde el hombre carecía de la suficiente fuerza para poder ser realizados por él. Principalmente se empleaba para desecar pantanos y lagunas y además para la molienda de granos. Entre sus características resaltaban que eran molinos multipala, aunque bastantes lentos.



Ilustración 1. Molino de viento en Holanda.

Desde el siglo XV al XIX los molinos de viento sufren una evolución tecnológica progresiva. El primer avance lo sufren las torres, las cuales comienzan a hacerse de ladrillo o piedra y adaptan una sección circular u octogonal. Durante el siglo XVIII, se produce un gran avance y en alto nivel de perfeccionamiento en Europa. Aparecen por primera los sistemas mecánicos para regular la orientación y se comienzan a utilizar piezas metálicas en vez de madera, lo que aumentó su eficacia. A finales del siglo XVIII ya se podían observar molinos de vientos por toda Europa y América.

No fue hasta el siglo XX cuando surgieron los modelos predecesores de los actuales. Estos fueron fabricados para la generación de electricidad en zonas rurales de Estados Unidos,

donde se instalaron equipos de 3 kW durante la década del 30. En 1940 aparecen los primeros molinos de vientos grandes y más rápidos con una capacidad de generación de 1 MW. Durante la segunda guerra, el desarrollo de la energía eólica sufrió un gran declive debido al apogeo del petróleo, el cual era mucho más barato y competitivo en el mercado energético.

El siguiente gran avance en la energía eólica ocurre cuando se vuelve a despertar interés en esta tecnología durante la década de los 70, cuando tiene lugar la crisis del petróleo. A finales de esa década aparecieron los primeros aerogeneradores comerciales, que en 1980 llegaron a generar 55 kW. Además durante los años 80, el avance fue incluso más importante y la energía eólica comenzó a crecer de forma imparable, sobre todo a partir de los movimientos contra la energía nuclear.

En estas dos últimas décadas se ha avanzado mucho tecnológicamente y se han logrado equipos muy eficientes con una gran capacidad de **producción de energía limpia** no solo en tierra sino también en el mar. La energía eólica será una de las principales **fuentes de energías renovables** del siglo XXI en gran cantidad de países, debido a sus excelentes características que ofrecen.



Ilustración 2. Aerogenerador actual de eje horizontal.

2.2. SITUACIÓN ACTUAL DE LA ENERGÍA EÓLICA

Tras finalizar 2017, de acuerdo al informe publicado por World Wind Energy Association (WWEA) la capacidad eólica instalada en todo el mundo alcanzó la cifra de 539.291 MW, energía suficiente para abastecer las necesidades de electricidad del 5% de la población mundial. En ese año la capacidad eólica aumentó en 52.552 MW, cifra ligeramente superior a la del año 2016, año en que la potencia eólica creció en 51.402 MW. La capacidad eólica mundial ha ido aumentando año tras año y fue en 2014 y 2015 cuando las subidas marcaron su máximo hasta día de hoy.

Potencia eólica anual instalada en el mundo. 2001-2017

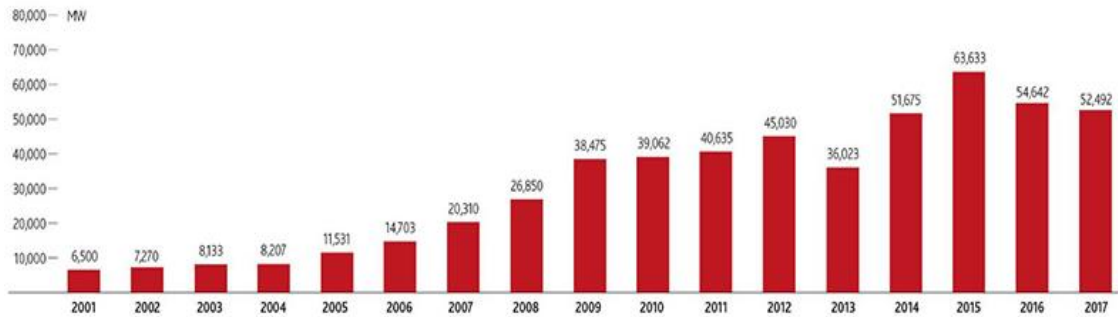
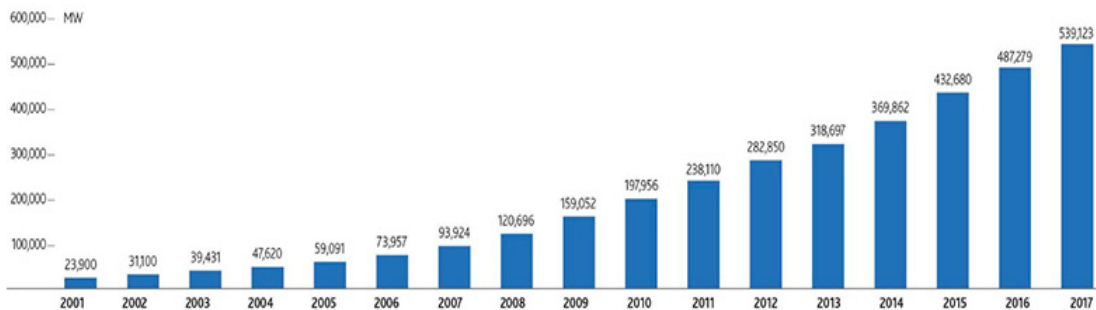


Ilustración 3. Potencia eólica anual instalada en el mundo. 2001-2017

Potencia eólica instalada acumulada en el mundo. 2001-2017



Fuente: GWEC

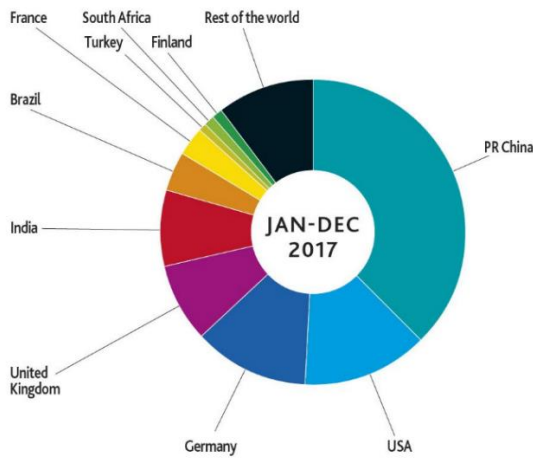
Ilustración 4. Potencia eólica instalada acumulada en el mundo. 2001-2017

Las previsiones, según este mismo informe de la WWEA sugieren que la energía eólica será capaz de satisfacer el 12% de la demanda mundial de energía eléctrica en el año 2020 y el 22% en 2030

El líder indiscutible en este tipo de energía es China, con una capacidad total de 188.392 MW. Detrás de China, se sitúan grandes potencias mundiales como Estados Unidos, con una capacidad instalada de 89.077 MW, y Alemania con 56.132 MW de capacidad eólica instalada. A continuación encontramos a España en quinto lugar tras la India y seguida de Reino Unido, Francia, Brasil, Canadá e Italia, en ese orden.

Con respecto a la capacidad nueva instalada en 2017, vuelve a destacar China situándose en primer lugar en el ranking mundial con 19.000 MW instalados. Estados Unidos y Alemania también incrementaron su capacidad eólica instalada considerablemente con unas cifras de 7.017 MW y 6.581 MW, respectivamente.

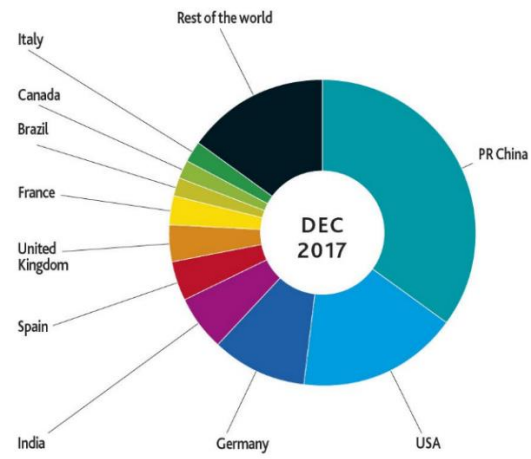
TOP 10 NEW INSTALLED CAPACITY JAN-DEC 2017



Country	MW	% Share
PR China	19,660	37
USA	7,017	13
Germany	6,581	12
United Kingdom	4,270	8
India	4,148	8
Brazil	2,022	4
France	1,694	3
Turkey	766	1
South Africa	618	1
Finland	535	1
Rest of the world	5,182	10
Total TOP 10	47,310	90
World Total	52,492	100

Source: GWEC

TOP 10 CUMULATIVE CAPACITY DEC 2017



Country	MW	% Share
PR China	188,392	35
USA	89,077	17
Germany	56,132	10
India	32,848	6
Spain	23,170	4
United Kingdom	18,872	4
France	13,759	3
Brazil	12,763	2
Canada	12,239	2
Italy	9,479	2
Rest of the world	82,391	15
Total TO P10	456,732	85
World Total	539,123	100

Source: GWEC

Ilustración 5. Potencia nueva instalada en 2017.

Ilustración 6. Potencia acumulada hasta 2017.

Estas cifras demuestran todo lo que se está desarrollando e invirtiendo en este tipo de energía. Este avance ha sido logrado gracias al impulso que han proporcionado tanto los gobiernos de los distintos países comprometiéndose a aumentar la inversiones destinadas al desarrollo de este tipo de energía, así como las grandes empresas, como Nike, Google o Facebook, que han firmado contratos para que su energía consumida sea generada de manera eólica o fotovoltaica. Otro factor muy importante a la hora del gran desarrollo experimentado ha sido la disminución del coste de esta energía. Los precios para la eólica tanto en tierra como en el mar siguen sorprendiendo. Los mercados eólicos en lugares tan diversos como Marruecos, India, México y Canadá oscilan entre US \$ 0,03 / kWh, con una reciente licitación mexicana con precios menores a US \$ 0,02.

En los últimos años, las inversiones han adquirido una tendencia hacia lo que se denomina offshore, es decir, a la instalación de generadores eólicos mar adentro. La principal ventaja de

2.3. LA ENERGÍA MINIEÓLICA

La energía minieólica es el aprovechamiento de los recursos eólicos mediante la utilización de aerogeneradores de potencia inferior a los 100 kW y, de acuerdo a las normas internaciones, con un área de barrido que no supere los 200 m2 o los 8 m de radio. Es un

tipo de energía cuya principal distinción es que es de alcance comercial, es decir, que cualquier persona puede ser propietario y dar uso a este tipo de aerogeneradores.

La idea de estos aerogeneradores surgió a raíz de la necesidad de llevar la energía eléctrica a lugares aislados o alejados de la red. Hoy en día, su principal uso reside en la autoproducción de energía para cubrir la demanda eléctrica en hogares y reducir los costes.

La energía minieólica consiste básicamente en la disminución del tamaño de los aerogeneradores de la gran eólica. No obstante, esto no quiere decir que ambas sean iguales, sino que la energía minieólica tiene una serie características propias que la distinguen y que le otorgan gran utilidad. Entre sus principales características destacan:

- Generación de energía próxima a los puntos de consumo, reduciendo de esta forma las pérdidas durante el transporte.
- Posee una gran versatilidad de aplicaciones y emplazamiento, principalmente ligado al autoconsumo y con posibilidad de integración en sistemas híbridos como el eólico-fotovoltaico.
- Una accesibilidad sencilla para el usuario final, ya que las inversiones requeridas son relativamente bajas y asumibles, con una instalación sencilla (sin apenas necesidad de obra civil) y facilidad de transporte de equipamientos y montaje.
- Funcionamiento con vientos moderados, sin el requerimiento de complejos estudios y análisis de viabilidad.
- Capacidad de aprovechamiento de pequeños emplazamientos o de terrenos con orografías complejas.
- Suministro de electricidad en lugares aislados y alejados de la red eléctrica, característica que propició su origen.
- Bajo coste de operación y mantenimiento y una elevada fiabilidad.
- Optimización del aprovechamiento de las infraestructuras eléctricas de distribución existentes, a las que se conectan directamente, sin requerir infraestructuras eléctricas adicionales de evacuación.
- Reducido impacto ambiental, tanto por su nula contaminación como por su menor tamaño e impacto visual, y por su integración entornos humanizados.

Dentro de la energía eólica, existen dos tipos de aerogeneradores, los cuáles también se distinguen en la tecnología minieólica: los de eje horizontal y los de eje vertical:

- **Los aerogeneradores de eje horizontal** son los más frecuentes. Se caracterizan por ser eficientes y económicos, sin embargo no toleran bien los vientos racheados, débiles o con cambios frecuentes de dirección. Necesitan una veleta para orientarse de cara al viento.
- **Los aerogeneradores de eje vertical** tienen la gran ventaja de adaptarse a cualquier dirección del viento. Generan pocas vibraciones y son los más silenciosos. Por contra, ofrecen un peor rendimiento y son más caros.

En cuanto a la potencia más adecuada del aerogenerador, depende de la energía que el usuario quiera producir. Las potencias más habituales para uso doméstico oscilan entre los 1-4 kW de una vivienda pequeña hasta los 10 kW en el caso de una casa en una urbanización, comunidad de vecinos o zona rural. En caso de industrias, empresas o edificios con una actividad específica se pueden requerir potencias mayores.

Propósito	Potencia Requerida
Ahorrar energía	3 ó 5 kW
Autoabastecimiento para casa normal	5 o 10 kW
Autoabastecimiento para casa con alto consumo de electricidad	10 o 15 kW
Ahorro de energía para pequeña empresa o granja	3, 5, 10 o 15 kW

Ilustración 7. Tamaño apropiado del aerogenerador según Enair.

En España, el promedio de energía consumida según los datos del Banco Mundial (2014) 5356 kWh anuales. No obstante, una casa bien equipada puede llegar a consumir 8000 o 9000 kWh. Los electrodomésticos y el agua caliente rondan los 1900 kWh y la calefacción 5000 kWh. Por lo tanto con un aerogenerador de un 5kW podría cubrir gran parte de la demanda energética.

El primer paso a realizar en una instalación de minieólica es realizar un estudio del recurso eólico. Aunque estos aerogeneradores pueden funcionar con velocidad de 2-3 m/s, en una zona poco ventosa no aportarían la energía suficiente para justificar un ahorro y una rentabilidad. De forma general, la viabilidad de una instalación minieólica empieza a partir de unos 4-5 m/s de velocidad del viento media. Sería conveniente que se marcara una potencia objetivo según las necesidades energéticas del usuario, y mediante la distribución de la frecuencia del viento (velocidad media del viento en intervalos de frecuencia aproximada por la distribución de Weibull) determinar si es posible llegar a generar la potencia solicitada.

El precio de los aerogeneradores domésticos suele rondar entre los 1.000 € y 2.000 € por kilovatio de potencia. Por tanto, si la velocidad es moderadamente elevada es fácil sacar rentabilidad a la energía eólica debido a que la energía producida por un aerogenerador depende de la velocidad del viento al cubo. Por tanto, por poco que aumente la velocidad, la potencia generada aumenta exponencialmente. Por ejemplo, en una zona con un nivel alto de viento como Galicia, la inversión se recupera en 8-10 años.

Los aerogeneradores no producen energía todo el tiempo. Esto depende principalmente del emplazamiento elegido, de la media de la velocidad del viento y de lo constante que sea este. Los aerogeneradores domésticos suelen instalarse en los tejados, con torres de 5 a 10 metros de altura mínima y alejado de obstáculos entre 7 y 10 veces el diámetro del aerogenerador.

En un emplazamiento adecuado, un aerogenerador produce electricidad aproximadamente el 75% del tiempo, aunque no siempre a la potencia nominal. Durante un año es normal que produzca entre el 20 o el 30% de lo que generaría a potencia nominal funcionando durante todo el tiempo. A este valor se le conoce como factor de capacidad.

2.3.1. TECNOLOGÍA MINIEÓLICA EN ESPAÑA.

En España los aerogeneradores de pequeña potencia se han venido utilizando de forma mayoritaria para el autoconsumo de instalaciones aisladas de la red y conectadas a baterías (para almacenamiento) como son los sistemas repetidores para radio o telefonía móvil, los sistemas de vigilancia de carreteras o contra incendios y para el suministro ministro de energía en algunas viviendas situadas en lugares remotos y alejados de la red eléctrica.

Históricamente España ha sido un país pionero en la introducción de la energía eólica, sin embargo, en la tecnología minieólica no se ha conseguido el mismo logro. Para subsanar esta falta de inversión, los fabricantes, promotores y productores nacionales se congregaron con el fin de crear un tejido empresarial nacional que fuese competitivo a nivel internacional y situar a España en un lugar relevante dentro de la tecnología minieólica. Existen una decena de fabricantes de aerogeneradores de pequeña potencia, con una considerable variedad de diseños y productos diferentes de aerogeneradores.

La gran mayoría han venido desarrollando aerogeneradores de eje horizontal en el rango de hasta 10kW, pero en los últimos años, se están consolidando fabricantes de aerogeneradores de eje vertical así como fabricantes de mayor rango de potencia (100kW).

En cuanto a instalaciones, se estima que hay unas 10.000 repartidas por todo el territorio nacional, con claro predominio de las aisladas. Andalucía es una de las regiones donde están más presentes, donde según datos de la Agencia Andaluza de la Energía, en la región hay 0,23 MW de minieólica aislada y un aerogenerador conectado a red para autoconsumo de 0,01 MW. En el otro extremo de la Península, en el País Vasco, la minieólica aporta un 7% de la energía renovable consumida.

Es obvio que, aunque la industria minieólica nacional se encuentra en un periodo de demostración tecnológica, las empresas españolas están bastante bien posicionadas para competir en el mercado, no sólo nacional sin también internacional.

2.3.2. SITUACIÓN INTERNACIONAL DE LA TECNOLOGÍA MINIEÓLICA

Según los informes publicados por la World Wind Energy Association (WWEA), a finales de 2015 la energía minieólica alcanzó un total de 990 MW instalados a nivel mundial. Esto representa un crecimiento del 14% en comparación con 2014, cuando habían registrados 830 MW, y en 2012 la potencia instalada se situó en 678 MW. Este informe confirma el crecimiento dinámico de esta tecnología y la venta de aerogeneradores de pequeña potencia en el mercado mundial.



Ilustración 8. Crecimiento potencia instalada y unidades de la tecnología minieólica.

De acuerdo a estas estadísticas del panorama mundial, los países más destacados en el ámbito de la tecnología minieólica son China, que representa un 43% de la capacidad mundial o 425 MW y Estados Unidos con un 25% o 247 MW. A cierta distancia, les siguen países como Reino Unido (15%), Italia (6%), Alemania, Ucrania, Canadá, Polonia y España y Japón, considerados como mercados de tamaño medio.

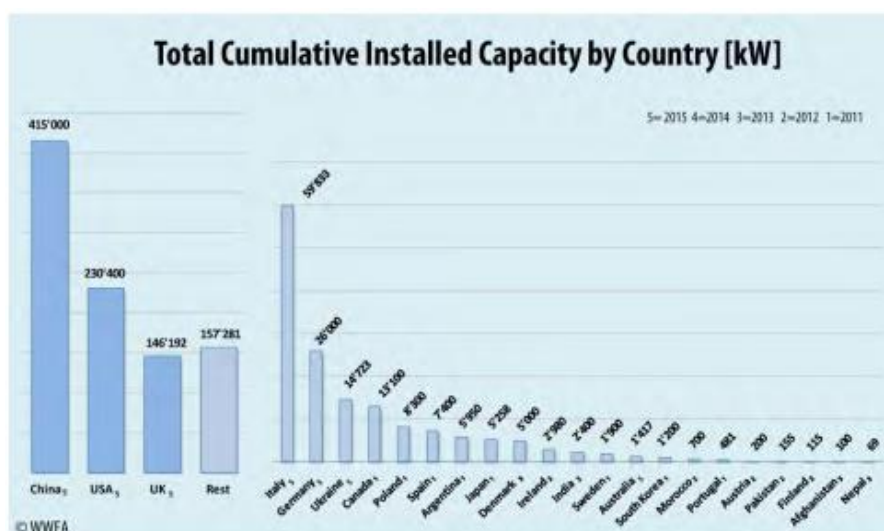


Ilustración 9. Potencia instalada por país.

Con respecto a las unidades instaladas, se ha alcanzado un total de 990.000 pequeñas turbinas eólicas en todo el mundo. Este es un aumento del 5% (8,3% en 2014) en comparación con el año anterior, cuando se registraron 945,000 unidades. El líder vuelve a ser China alcanzando un total de 730.000 unidades instaladas. En 2015, se produjo un aumento en este país de 43.000 unidades con respecto al año anterior, cifra que representa un 93% de la totalidad mundial. En Estados Unidos el número de unidades instaladas es de 161.000.

Las previsiones según la WWEA estiman que la capacidad eólica seguirá una tónica ascendente lineal. En concreto, para 2020 se prevé que la capacidad eólica mundial de pequeña potencia instalada alcanzará los 1.9 GW (cifra que representa un aumento de casi cinco veces respecto a 2010). Además, se estima que el crecimiento anual de potencia instalada sufra un crecimiento de alrededor de 250 MW a partir del año 2020.

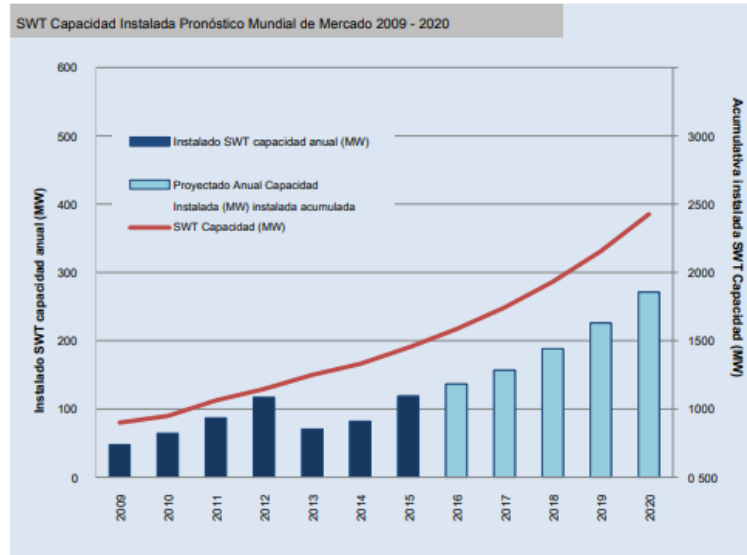


Ilustración 10. Crecimiento esperado de energía minieólica

En todo el mundo existen más de 330 fabricantes de aerogeneradores de pequeña potencia, a los que suman 300 empresas más que se encargan de fabricar complementos o partes de equipos de tecnología minieólica. Estos fabricantes se encuentran distribuidos en 40 países de todo el mundo y se caracterizan por ser solo empresas de pequeño y medio tamaño. No obstante, esta peculiaridad no impide que el potencial de crecimiento del sector sea enorme y que la capacidad de crear empleo de calidad sea alta.

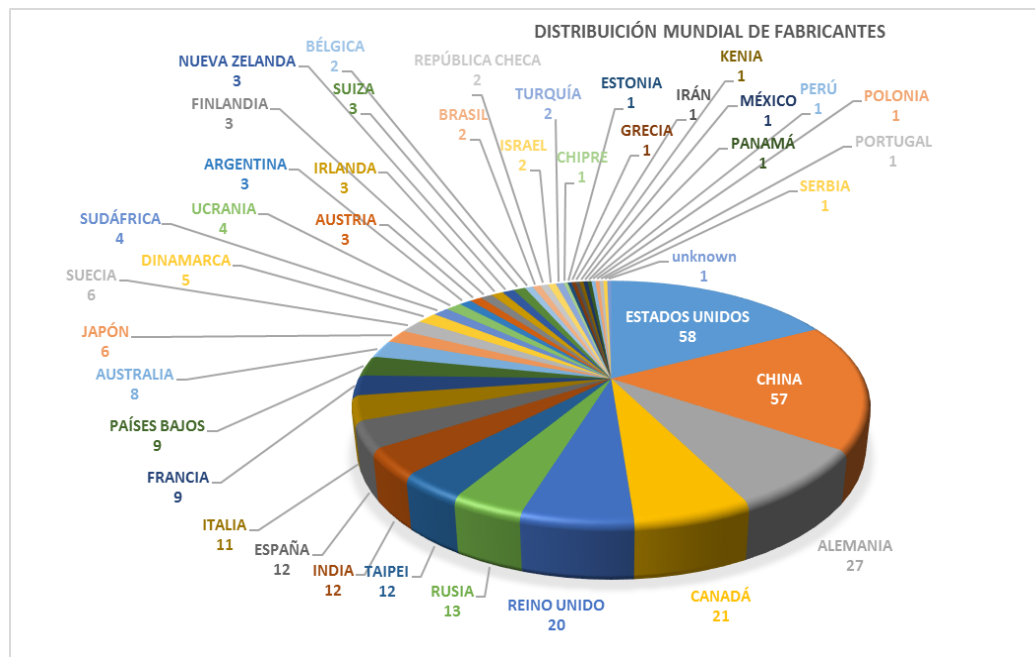


Ilustración 11. Distribución mundial de fabricantes de aerogeneradores de pequeña potencia.

Si se observa el gráfico de distribución de fabricantes, se obtiene en claro que el mercado está dominado por Estados y China, seguidos en un segundo escalón por Alemania, Canadá y Reino Unido. Estos cinco países reúnen más del 50% de los fabricantes mundiales. Con respecto a España, esta se encuentra en un aceptable séptimo lugar con 12 fabricantes en el territorio nacional. A continuación se muestra un gráfico más detallado sobre la distribución de fabricantes de aerogeneradores de pequeña potencia por países:



Ilustración 12. Distribución mundial de fabricantes de aerogeneradores de pequeña potencia

CAPÍTULO 3. DESCRIPCIÓN DE LA INSTALACIÓN.

3.1. INTRODUCCIÓN.

Para realizar este estudio se dispone de una instalación minieólica en el laboratorio de túnel de viento del ELDI. La instalación consiste en un banco de ensayos tipo abierto compuesto principalmente por un pequeño aerogenerador con una potencia máxima de 1kW, cuatro ventiladores capaces de girar a una frecuencia máxima de 50Hz y un sistema de adquisición de datos conformado por serie de sensores y transductores con el fin de obtener los valores de temperatura, presión, velocidad del viento, velocidad del rotor y voltaje e intensidad generados.

Gracias a este banco de ensayos, se pueden recrear las condiciones reales con las que este pequeño aerogenerador se encontraría y con las que generaría una potencia eléctrica. Este estudio es muy útil, ya que posibilita evaluar el comportamiento real y no teórico de

aerogeneradores de pequeña potencia en las condiciones atmosféricas más comunes que se darían en su entorno, sin necesidad de disponer de una cantidad de datos de vientos acumulados durante meses que cuantifique la variaciones estacionales del mismo.

Estas distintas condiciones de viento son generadas gracias a los variadores de frecuencia instalados, pudiéndose controlar así los diferentes parámetros de tensión e intensidad generados. Estos variadores de frecuencia controlan la frecuencia de la f.e.m. (fuerza electromotriz) de los motores asíncronos acoplados a unos ventiladores. Los valores de tensión e intensidad adquieren gran importancia en este trabajo, ya que se va a realizar una comparativa entre la curva de potencia obtenida en los ensayos y la proporcionada por el fabricante, así como un estudio sobre la influencia de la carga en la instalación.

A continuación se enumeran los distintos componentes y equipos que conforman el banco de ensayo:

1. Estructura.
2. Actuadores: ventiladores y variadores de frecuencia.
3. Sistema de medida: sensores, transductores y sistema de adquisición de datos.
4. Equipos auxiliares de medida de parámetros eléctricos:
 - Multímetro digital.
5. Aerogenerador.
6. Otros equipos:
 - Batería.
 - Inversor.
 - Regulador de carga

3.2. ESTRUCTURA

La estructura de la instalación está constituida por una serie de perfiles de aluminio ligero con unas dimensiones de 45 mm x 45 mm y por paneles de rejilla de aluminio. En total, el banco de ensayo presenta unas longitudes de 2700 mm de ancho y 4000 mm largo. Dicha estructura está diseñada para ser capaz de soportar hasta 9 ventiladores helicoidales distribuidos en tres filas con un peso aproximado de 60 kg cada uno. No obstante, este banco de ensayos está constituido únicamente por 4 ventiladores distribuidos en dos filas.

Entre las características de la instalación destacan la ligereza, debido al aluminio, la sencillez en el montaje y que tiene un modular. Su diseño fue realizado en base a una resistencia suficiente para resistir tanto el peso de los ventiladores como el conjunto de vibraciones y movimientos producidos bajo la carga estática y dinámica de los mismos ventiladores, pudiendo ocasionar la fatiga y ruptura de la estructura.

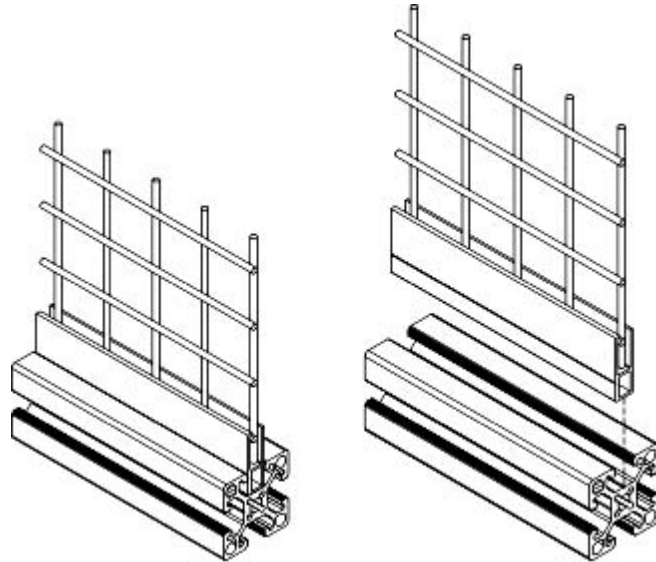


Ilustración 13. Perfiles y rejillas de aluminio.

En este banco de ensayos es posible añadir a la estructura unos elementos homogeneizadores del flujo de aire. Esto se realiza con el objetivo de disminuir la turbulencia generada en el flujo de aire, la cual se produce por el esfuerzo cortante del viento, consiguiéndose así la homogeneización del flujo y, por ende, unas condiciones mucho más realistas.

Para lograr esta homogeneización del flujo ventoso, se han instalado unos paneles de rejillas desmontables cuyas secciones de paso son 50 mm x 50 mm. Se dispone de dos paneles homogeneizadores, uno de los cuales permanecerá siempre fijo junto a los ventiladores y el otro podrá ser montado opcionalmente a medio camino entre el aerogenerador y el otro panel.

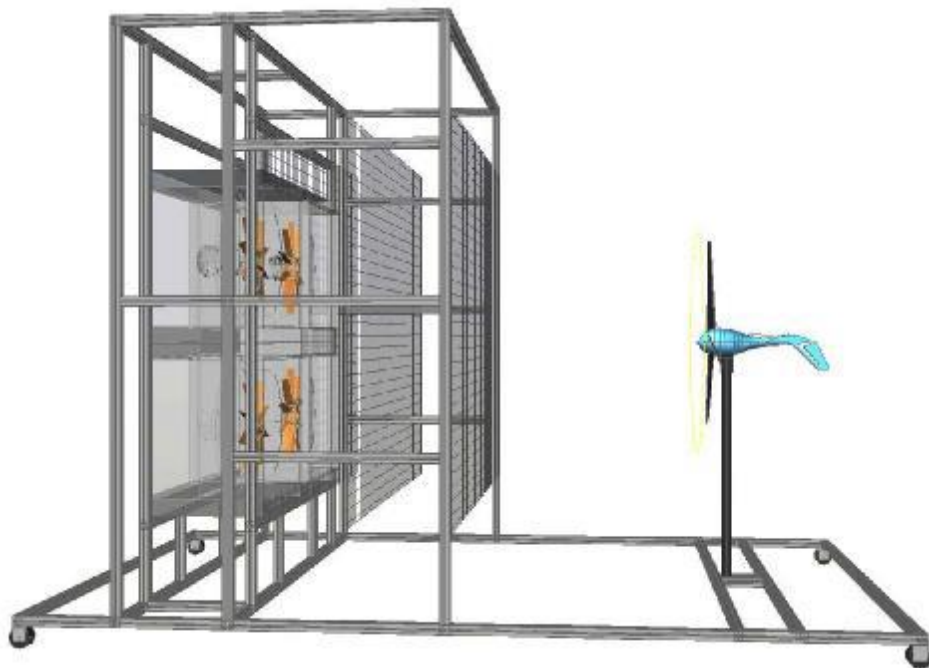


Ilustración 14. Vista general de la estructura soporte del banco de ensayo

La situación del aerogenerador en el banco de ensayos durante las pruebas realizadas fue la siguiente:

- El eje vertical situado a 2,10 metros de distancia de la cara externa de los ventiladores y a 1,35 metros de distancia de las parrillas laterales.
- El eje horizontal situado a 1,75 metros de altura respecto al suelo.

3.3. ACTUADORES: VENTILADORES Y VARIADORES DE FRECUENCIA.

El banco de ensayos cuenta con dos equipos de actuadores para emular una velocidad de viento determinada. Estos elementos indispensables de la instalación son los ventiladores y los variadores de frecuencia. La función de los ventiladores consiste en generar el flujo de aire necesario para que las palas del aerogenerador roten y generar potencia de esta forma, mientras que los variadores de frecuencia se encargan de fijar las distintas frecuencias de giro de dichos ventiladores de manera indirecta con la frecuencia eléctrica de sus motores.

3.3.1. VENTILADORES

Los ventiladores instalados en el banco de ensayos son compactos y de tipo helicoidal. La instalación requería unos ventiladores capaces de generar una elevada velocidad de salida de viento, por lo que se optó por los de tipo helicoidal. Estos ventiladores tienen la capacidad de mover grandes cantidades con muy baja presión y la transferencia de energía se produce de forma dinámica.

En cuanto a la disposición de los ventiladores, el banco de ensayos cuenta con cuatro ventiladores dispuestos contiguamente en dos niveles de altura. El modelo se trata del CJHCH – 56 – 4T – 2 de Sodeca, el cual integra aislamiento acústico interior, tapas de registro desmontables y estructura en acero galvanizado. Disponen de 10 hélices de poliamida reforzada con fibra de vidrio. Las hélices son de un diámetro de 56 cm.



Ilustración 15. Ventilador helicoidal modelo CJHCH-56-4T-2 de Sodeca.

Las características técnicas de este modelo son las siguientes:

Ventilador helicoidal modelo CJHCH – 56 – 4T – 2 de Sodeca	
Parámetro	Valor

Caudal máximo (m3/h)	15.300
Potencia (kW)	1,5
Intensidad máxima (A)	6.41 a 230 V
	3.70 a 400 V
Velocidad de giro (rpm)	1.450
Nivel de presión sonora (dBA)	72
Peso aproximado (kg)	59,3
Dimensiones (mm)	Ancho: 1.000
	Alto: 850
	Profundidad: 650

Tabla 1. Parámetros ventilador helicoidal modelo CJHCH-56-4T-2 de Sodeca

Para obtener la velocidad de rotación de las aspas, basta con aplicar la ecuación fundamental de una máquina eléctrica ya que los ventiladores están controlados por motores eléctricos asíncronos. Esta ecuación es aplicable indistintamente a máquinas síncronas y asíncronas:

$$w = 2 \cdot \pi \cdot f = p \cdot w_m = p \cdot 2 \cdot \pi \cdot \frac{n}{60} \rightarrow f = \frac{n \cdot p}{60}$$

$w =$ velocidad angular de la f.e.m. ($\frac{rad}{s}$)

$w_m =$ velocidad angular de giro del eje ($\frac{rad}{s}$)

$f =$ frecuencia de la f.e.m. (Hz)

$p =$ nº pares de polos

$n =$ r.p.m. de velocidad de giro de la máquina

3.3.2. VARIADORES

Para modificar la velocidad de giro de los ventiladores y en consecuencia la velocidad del flujo de aire, la instalación cuenta con dos variadores de frecuencia modelo 3G3MX2-A4030-E de la marca Omron, donde cada uno de ellos se encarga de controlar una pareja distinta de ventiladores. Se caracterizan por ser trifásicos, alimentados a una tensión de 400 VAC, y con una potencia máxima de salida de 3 kW:



Ilustración 16. Variadores de frecuencia 3G3MX2-A4030-E de Omron

A continuación, se muestran en la siguiente tabla las principales características que definen a este modelo de variador:

Variador de frecuencia modelo 3G3MX2-A4030-E de Omron		
Parámetro	Valor	
Tamaño del motor aplicable (kW)	VT (*)	4,0
	CT (**)	3,0
Capacidad nominal (kVA) a 380 V	VT (*)	5,7
	CT (**)	4,7
Tensión nominal de entrada	Trifásica: 380 v – 15 % a 480 V + 10 %, 50/60 Hz ± 5 %	
Tensión nominal de salida	Trifásica: 380 a 480 V (proporcional a la tensión de entrada)	
Corriente nominal de salida (A)	VT (*)	8,8
	CT (**)	7,2
(*) VT = Ciclo de trabajo normal: 60 s a 120 %		
(**) CT = Ciclo de trabajo intenso: 60 s a 150 %		

Tabla 2. Parámetros del variador de frecuencia 3G3MX2-A4030-E de Omron

3.4. SISTEMA DE MEDIDA.

El sistema de medida es el encargado de la adquisición, procesamiento y distribución de datos. Los elementos que realizan todas estas funciones son: sensores, transductores y sistema de adquisición de datos.

3.4.1.SENSORES Y TRANSDUCTORES

Primeramente, es necesario obtener la magnitud física a medir (presión, temperatura, entre otras) y convertirla a una señal eléctrica (tensión o intensidad). Esta función es realizada por los sensores. Los sensores deben tener salidas eléctricas de [0 – 10] V y/o [4 – 20] mA, para que el sistema de adquisición de datos pueda procesar los datos medidos. Si esto no fuera así, entonces se necesitaría de acondicionadores de señal, los cuales convierten el parámetro que varía del sensor en una señal eléctrica normalizada.

3.4.1.1. ANEMÓMETROS

Un anemómetro de hilo caliente consiste en un filamento calentado que queda expuesto al paso de un flujo. Este filamento está conectado a un circuito eléctrico que es capaz de monitorear las variaciones de resistencia eléctrica por la acción del flujo. Entonces, se puede establecer una relación de pertinencia entre la velocidad del flujo y la resistencia observada en el filamento calentado, Martín *et al* 2014.

Para medir la velocidad de viento se utiliza un total de cuatro anemómetros de hilo caliente de la marca “Sensovant”, concretamente el modelo EE671.

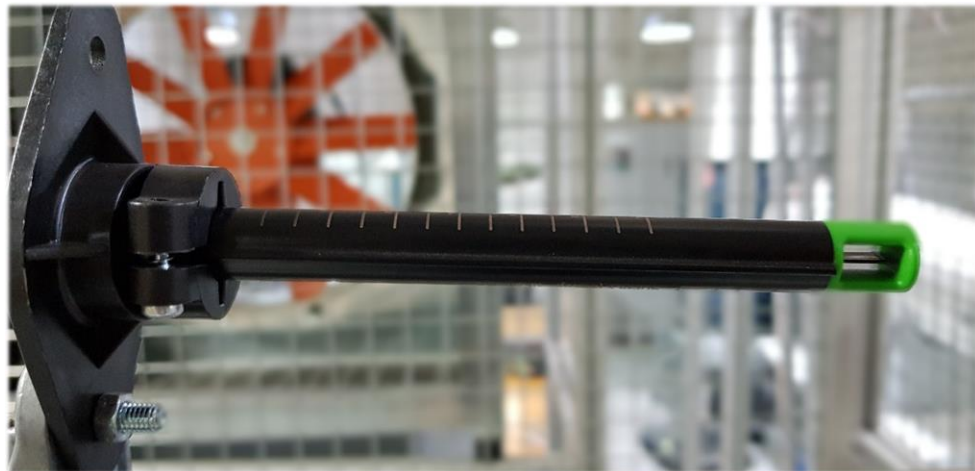


Ilustración 17. Anemómetro modelo EE671 de Sensovant.

Anemómetro modelo EE671-V2xDKA	
Parámetro	Valor
Señal de salida (V)	0 - 5 V

Rango de medida (m/s)	0 - 10 m/s
Longitud del cable (m)	2 m

Tabla 3. Parámetros del anemómetro modelo EE671 de Sensovant.

Se trata de un sensor activo, y que por lo tanto debe ser alimentado por una fuente externa. Para ello, se utilizan los transductores de tensión de 230 VAC a 24 VDC.



Ilustración 18. Fuentes de alimentación de 230VAC a 24VDC.

Curva de calibración de los anemómetros

Para obtener la curva de la calibración se necesita, en primer lugar, conocer los valores de tensión correspondientes a los anemómetros que se recogen en el sistema de adquisición de datos cuando los ventiladores estén en reposo. Estos valores son denominados “valores de calibración”.

Para cada una de las posiciones definidas sobre el plano horizontal, se adquieren unos determinados valores de calibración, que son prácticamente análogos. Los valores de velocidad de punta, medio y eje (V_{punta} , V_{medio} y V_{eje} , respectivamente) tienen unos valores de calibración de [0,11 – 0,15] V. En el caso que no se den esos valores de tensión, los anemómetros están defectuosos, o bien, su cableado no es el adecuado. Ya que sólo se cuenta con dos anemómetros se debe volver a medir en una de las posiciones para poder completar el mapa eólico, en dichas posiciones.

$$V(m/s) = \left(\frac{20(m/s)}{10(V)} - V_{calibración} \right) \times (V_{lectura} - V_{calibración})$$

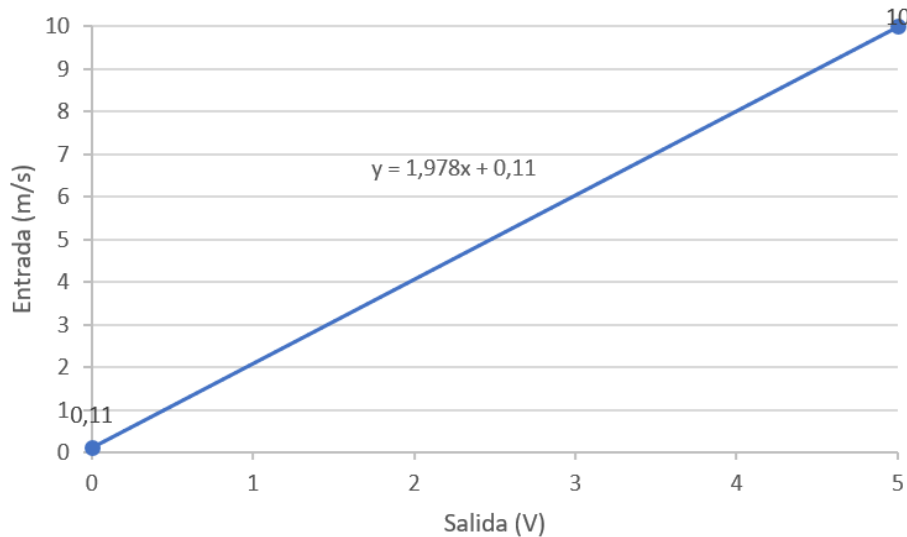


Ilustración 19. Curva de calibración los anemómetros EE671-V2xDKA.

3.4.1.2. SENSOR DE TEMPERATURA

Para obtener la temperatura de ambiente a la que se encuentra el aerogenerador, se emplea un sensor Pt100 y un transductor TxRail 4 – 20 mA del fabricante Novus.

3.4.1.2.1. Sensor Pt100

El Pt 100 es un sensor de temperatura de tipo resistivo o termorresistencias. Las termorresistencias más utilizadas son las de platino, cuya denominación genérica es Pt-X, donde Pt es el símbolo químico del platino y X es un número que expresa la resistencia eléctrica a 0°C en Ω . Su funcionamiento en la obtención de una señal de resistencia eléctrica distinta en función de la temperatura del entorno.



Ilustración 20. Sensor de temperatura Pt100.

Curva de calibración de los sensores de temperatura Pt100.

La fórmula fundamental que se utiliza para obtener la variación de la resistencia en función de la temperatura es:

$$R = R_0 \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta T)$$

Donde:

R = Resistencia a la Tª del entorno en Ω.

R0= Resistencia a la Tª de referencia T0 en Ω.

ΔT = Desviación/Incremento de temperatura respecto a T0.

α = Coeficiente de Tª del conductor especificado a 0ºC. Para el platino su valor es de 0.00385 Ω.

Su curva de calibración sigue una progresión lineal y es la siguiente:

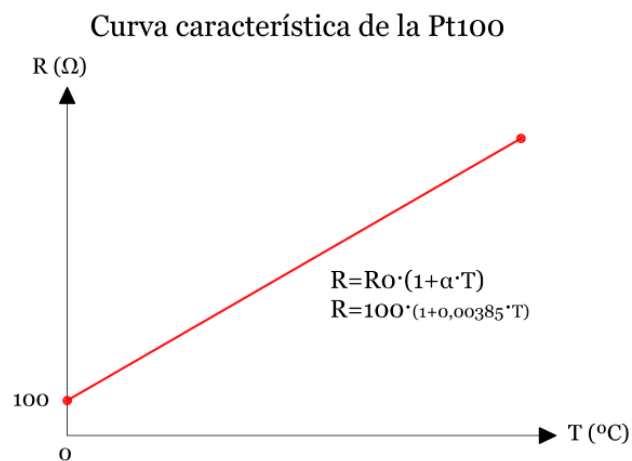


Ilustración 21. Curva de calibración para Pt100.

3.4.1.2.2. Transductor TxIsoRail 4 – 20 mA

En segundo lugar, es necesaria la conversión de la señal del sensor de temperatura hacia una salida que pueda ser reconocida por el sistema de adquisición de datos, siendo en este caso [4 – 20] mA. Partiendo de que el intervalo de entrada considerado en este convertidor es de [0 – 50] mV, su ecuación y curva característica es la siguiente:

$$T(^{\circ}C) = 3.125 \left(\frac{mV}{mA} \right) \times \left(I_{lectura}(A) \times \frac{1000 mA}{1 A} - 4 \right)$$

Curva de calibración del transductor TxIsoRail.

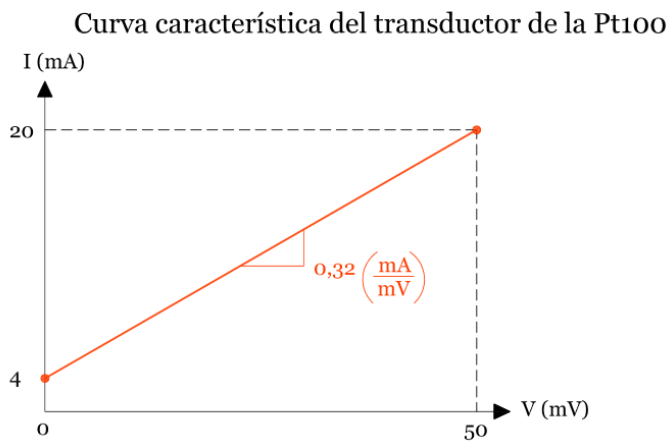


Ilustración 22. Curva de calibración para transductor de la Pt100.

3.4.1.3. SENSOR DE PRESIÓN

En este banco de ensayos se utilizó el sensor de presión HD 9408T BARO. Se trata de un barómetro electrónico con salida analógica y que proporciona una medida con una gran precisión, veracidad y repetitividad de la presión atmosférica. Además, presenta un buen funcionamiento independientemente de la temperatura.

Barómetro electrónico HD 9408T BARO de DELTA OHM	
Parámetro	Valor
Tipo de sensor	Piezorresistivo
Señal de salida (V)	0 - 10
Rango de medida (mbar)	800 - 1100
Alimentación (VDC)	8 - 35
Salida Analógica	4 - 20 mA (Posibilidad en 0 - 1V, 0 - 5V y 0 - 20mA)
Precisión	± 0.5 mbar a 20°C
Presión de sobrecarga (bar)	2 - 3
Tª de Operación (°C)	- 30 a 60
Tiempo de respuesta (ms)	< 200

Tabla 4. Parámetros del barómetro electrónico HD 9408T BARO de DELTA OHM.

Curva de calibración del sensor de presión.

El sensor de presión o barómetro HD 9408T BARO se caracteriza, a diferencia del resto de sensores, por no necesitar ningún tipo de transmisor o transductor para adaptar la señal a la entrada del sistema de adquisición de datos. En su caso, el propio barómetro proporciona una salida que se encuentra dentro del rango de 4 – 20 mA. Esto supone una ventaja en el montaje, así como en la puesta en marcha y en la velocidad de adquisición de datos.

No obstante, como todos los sensores electrónicos, este sensor tiene una curva característica que relaciona la intensidad de la señal con la presión barométrica. La curva característica es la siguiente:

Curva característica del barómetro

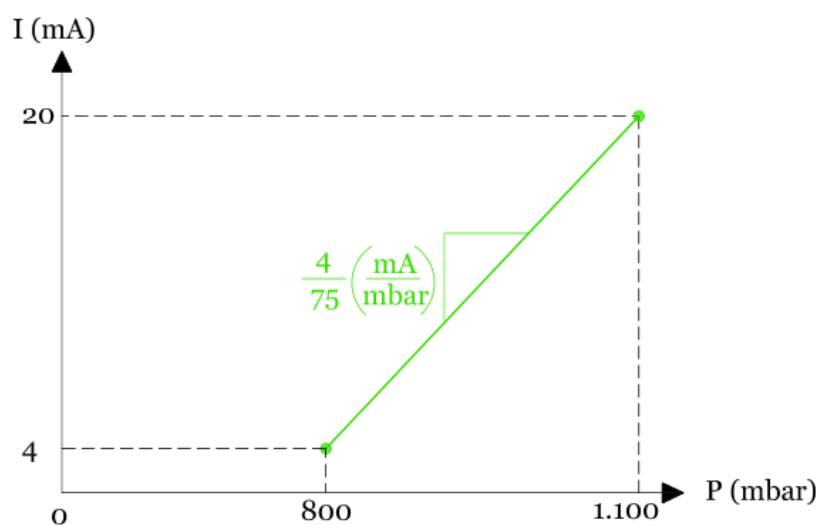


Ilustración 23. Curva de calibración para el sensor de presión.

Por lo tanto, si se despeja a presión barométrica de la ecuación anterior, se tiene lo siguiente:

$$P(\text{mbar}) = 18.75 \left(\frac{\text{mbar}}{\text{mA}} \right) \cdot \left(I_{\text{lectura}}(\text{A}) \cdot \frac{1000\text{mA}}{1\text{A}} - 4 \right) + 800$$

3.4.1.4. SENSORES DE VELOCIDAD DE GIRO

La velocidad de giro es una magnitud difícil de medir y se realiza mediante la contabilización de pulsos de frecuencia de giro con su posterior conversión a una señal de intensidad. Los sistemas de medición únicamente tienen la capacidad de interpretar valores de intensidad o voltaje, por tanto, se intuye necesario la adaptación de esta frecuencia de pulsos a un valor de intensidad, en este caso, entre 4 y 20 mA.

Para realizar una correcta obtención de este parámetro, el banco de ensayo cuenta con un contador de pulsos y un convertidor de frecuencia TACO Flex. A continuación se describen las características y el funcionamiento de cada uno de ellos:

3.4.1.4.1. Contador de pulsos BES M12MI – PSC40B – BV03 de Balluff.

El sensor captador de pulsos M12MI – PSC40B – BV03 del fabricante Balluff se trata de un sensor inductivo de tipo PNP capaz de captar pulsos de una frecuencia máxima de 300 Hz. La distancia estándar a la cual es capaz de detectar un material ferroso imantado es de 4mm, según el fabricante. Este material ferroso imantado se ha acoplado en la parte inferior de una de las palas mediante un soporte adherido. Además, el captador posee un LED, cuya función será encenderse cada vez que se realice una revolución y se envíe un pulso al convertidor de frecuencia.

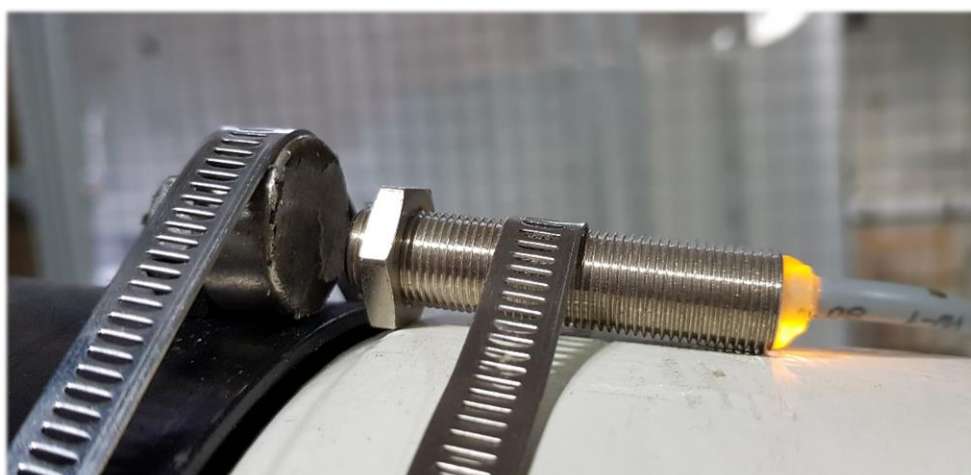


Ilustración 24. Sensor captador de pulsos tipo PNP.

Las características más importantes de este sensor se resumen en la tabla expuesta a continuación:

Contador de pulsos BES M12MI - PSC40B - BV03 de Balluff	
Parámetro	Valor
Tipo de sensor	Hall
Frecuencia máxima (Hz)	300
Tipo de conexión	Cableada
Alimentación (VDC)	24
Salida de Conmutación	PNP
Función de Conmutación	Normalmente abierto
Distancia de Seguridad (mm)	3.2
Tª de Operación (°C)	- 25 a 70
Resistencia del encapsulado	IP68

Tabla 5. Parámetros del contador de pulsos BES M12MI-PSC40B-BV03 de Balluff.

3.4.1.4.2. Convertidor de frecuencia Taco Digi

El convertidor de frecuencia elegido para convertir la señal procedente del captador de pulso es el Taco Digi del fabricante DPF Sensors. Tras analizar previamente las condiciones a las que se va a someter el aerogenerador, se llegó

a la conclusión de que la frecuencia de trabajo no superará los 16,66 Hz. Esto quiere decir que se trabajarán con frecuencias, por lo que se ha optado por elegir un convertidor de frecuencia capaz de trabajar con precisión en estas frecuencias.



Ilustración 25. Convertidor de frecuencia Taco Digi de DPF Sensors.

El convertidor de frecuencia Taco Digi se trata de un convertidor-aislador de frecuencia universal para todo tipo de captadores de pulsos. Posee una gran precisión y estabilidad. Convierte la frecuencia en una señal proporcional y aislada en forma de corriente o tensión. Es capaz de trabajar en un amplio rango de frecuencias, aunque está especializado en trabajar a frecuencias muy bajas, con un mínimo de 0/0,4Hz y un máximo de 0/10Hz. Para ello dispone de un filtro exclusivo para bajas frecuencias, el cual se activa mediante un interruptor. Este convertidor recibirá la señal de frecuencia del contador de pulsos y la convertirá en una señal de intensidad entre 4 y 20 mA para que el sistema de adquisición de datos la reconozca.

Convertidor de frecuencia Taco Digi de DPF Sensors		
Parámetro		Valor
Tipo de salida		4 - 20mA (Con posibilidad en 0 - 5V, 0 - 10V y 0 - 20mA)
Rango de frecuencia		20Hz - 60KHz
Consumo máximo (W)		1.8
Tensión de alimentación	Alterna(V)	100 - 250
	Continua(V)	20 - 30
Máximo error global		0.2%
Error de linealidad		0.15%

Tiempo de respuesta (s)	1.2
Tª de Operación (°C)	- 10 a 60
Tiempo de calentamiento (min)	5

Tabla 6. Parámetros del convertidor de frecuencia Taco Digi de DPF Sensors.

Curva característica del convertidor de frecuencia Taco Digi

En primer lugar, se debe fijar el tipo de salida de señal eléctrica del convertidor de frecuencia, que en nuestro caso presenta un valor entre 4 y 20 mA, aunque también sería posible variar a otras escalas y unidades como indican las características proporcionadas por el fabricante.

Como ocurre en el caso de los anemómetros, este convertidor de frecuencia se calibrará con respecto a dos puntos: la sensibilidad (pendiente) y el cero (Offset). La curva característica se muestra en la siguiente figura:

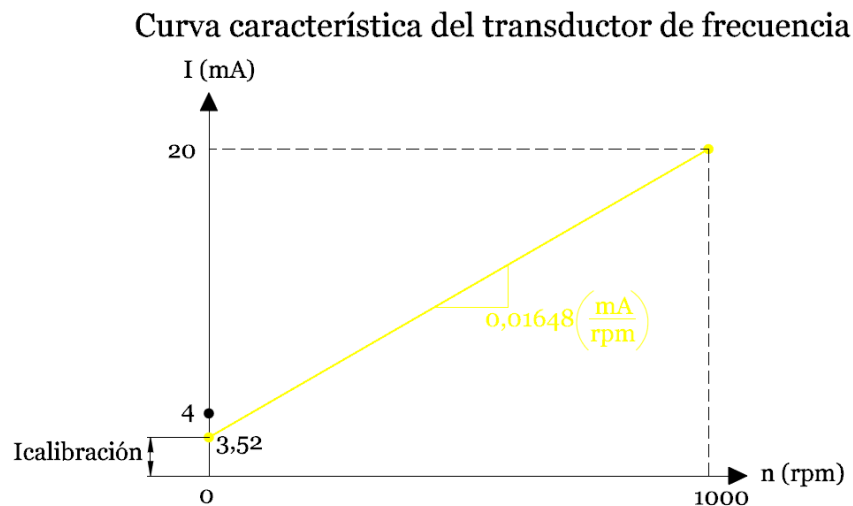


Ilustración 26. Curva característica del convertidor de frecuencia.

Figura 2.12. Curva característica del convertidor de frecuencia

La ecuación fundamental que se obtiene de esta curva y que nos permite dar un valor de revoluciones por minuto a las que gira el aerogenerador es la siguiente:

$$n(\text{rpm}) = \left(\frac{(I_{\text{lectura}} - I_{\text{calibración}}) \text{mA}}{\frac{(20 - I_{\text{calibración}}) \text{mA}}{1000 \text{ rpm}}} \right)$$

Donde $I_{\text{calibración}} = 3,52 \text{ mA}$

3.4.1.5. TRANSDUCTOR DE TENSIÓN

La función de los transductores de tensión consiste en la medición de la tensión en paralelo de una línea y convertirla en una señal normalizada. En nuestro caso, se ha instalado el transductor de tensión MCR-VDC-UI-B-C del fabricante Phoenix Contact que se emplea para medir la tensión en los bornes de las baterías instaladas y convertida en una señal analógica normalizada para el sistema de adquisición de datos “Data Logger” pueda procesarla.



Ilustración 27. Transductor de tensión MCR-VDC-UI-B-C.

A continuación, se exponen las principales características proporcionadas por el fabricante del transductor de tensión de la instalación:

Transductor de tensión MCR-VDC-UI-B-C de Phoenix Contact	
Parámetro	Valor
Voltaje de salida (V)	-10 – 10
Máximo voltaje de salida (V)	±15
Corriente de Salida (mA)	-20 – 20
Voltaje de alimentación (V)	18.5 – 30.2
Consumo (mA)	< 50

Frecuencia Límite (Hz)	40
Tiempo de Respuesta (ms)	12
Máximo error de transmisión	< 1%
Tª de Operación (°C)	- 25 a 50
Resistencia del encapsulado	IP20

Tabla 7. Parámetros transductor de tensión MCR-VDC-UI-B-C de Phoenix Cptact.

Curva de calibración del transductor de tensión.

Este transductor es capaz de leer en su entrada valores situados dentro del rango [0 – 24] VDC. Posteriormente, el transductor se encarga de transformar la señal arrojando una señal cuadrada cuyos valores se encuentran dentro del rango [0 – 10] VDC. Además, como no existe ningún offset que modifique los 0 V en estado de tensión nula, la curva de calibración es la siguiente:

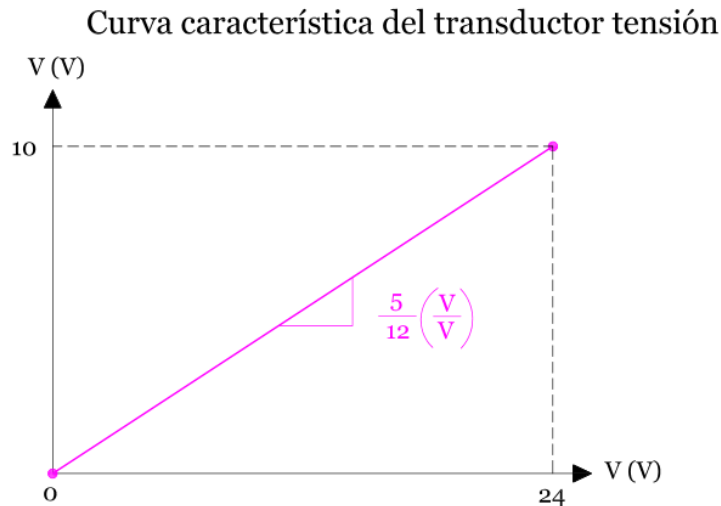


Ilustración 28. Curva de calibración del transductor de tensión.

De esta gráfica se obtiene la ecuación característica propio del transductor de tensión, la cual permite calibrar el transductor de tensión y obtener el valor real de tensión a partir de la tensión de lectura. Esta ecuación es la siguiente:

$$V(V_{DC}) = 2.4 \cdot V_{Lectura}(V_{DC})$$

3.4.1.6. TRANSDUCTOR DE INTENSIDAD

El transductor de intensidad utilizado en esta instalación es el modelo DHR 100 C420 del fabricante LEM y su función consiste en medir la intensidad que circula por las baterías. Se trata de un transductor toroidal de efecto Hall. Este proceso tiene lugar cuando un campo magnético transversal es aplicado sobre un conductor por el que

circula corriente eléctrica. Este campo magnético es generado por un núcleo magnético toroidal que se encuentra en el interior del transductor de tensión.

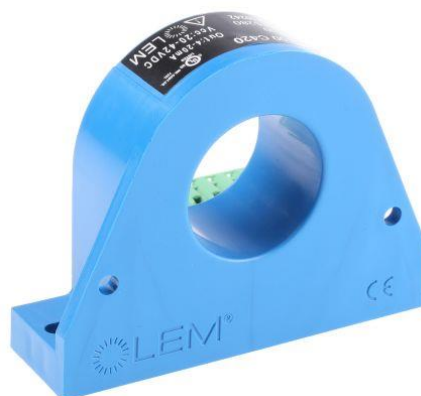


Ilustración 29. Transductor de intensidad DHR 100 C420 de LEM.

La utilidad de los transductores de corriente reside en transformar corrientes de proceso en señales normalizadas. En este caso, el transductor de intensidad se encarga de transformar la corriente generada por el aerogenerador, admitiendo un rango de 0 a 100 A, en una señal normalizada en un rango de 4 a 20 mA para que el sistema de adquisición de datos pueda leerla.

A continuación, se exponen diversas características del transductor de intensidad DHR 100 C420 de LEM:

Transductor de intensidad DHR 100 C420 de LEM:	
Parámetro	Valor
Rango Intensidad de entrada (A)	0 – 100
Rango intensidad de salida (mA)	4 – 20
Voltaje de alimentación (V DC)	20 – 50
Consumo (mA)	$30 + I_{out}$
Frecuencia Límite (Hz)	20 – 60000
Tiempo de Respuesta (ms)	< 150
Máximo Error	$\pm 1 \%$
Tª de Operación (°C)	- 40 a 70
Resistencia del encapsulado	IP20

Tabla 8. Parámetros transductor de tensión MCR-VDC-UI-B-C de Phoenix Contact.

Curva de calibración del transductor de intensidad.

El fabricante proporciona la curva de calibración de este transductor toroidal de efecto Hall para medida de intensidad:

Curva característica del transductor de intensidad

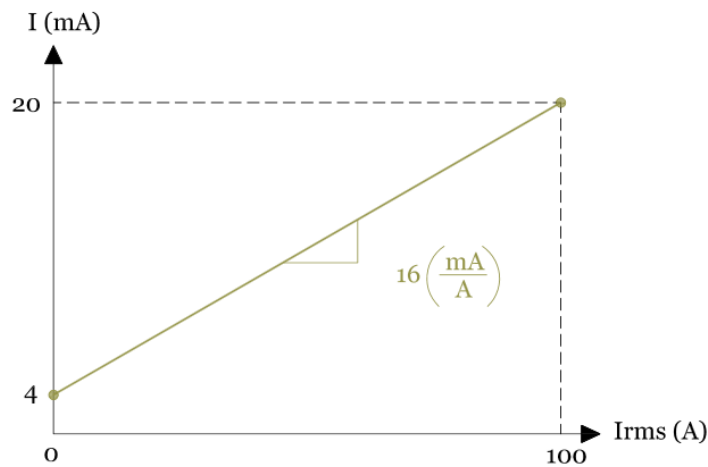


Ilustración 30. Curva de calibración de transductor de intensidad.

Destacar que esta curva de calibración es para un único paso del conductor eléctrico por el transductor. Sin embargo, en la presente instalación el mismo conductor se hace pasar seis veces por el núcleo toroidal magnético de este transductor. Por lo tanto, la intensidad eficaz real se calculará dividiendo por seis el valor de la anterior curva de calibración:

$$I_{rms} = \frac{1}{3} * \left(\frac{I_{lectura}(A) - 0.004 A}{0.00016} \right)$$

De esta forma se aumenta la sensibilidad del sensor, intentando ajustarse lo más posible al campo de medida de intensidad de batería en los microaerogeneradores.

3.4.2. SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS.

Para que las muestras de señales tomadas puedan ser convertidas en datos y así ser susceptibles de interpretación y manipulación por un ordenador u otros dispositivos electrónicos es necesaria la presencia de un sistema de adquisición de datos. Este dispositivo se encarga de recopilar las señales físicas, tomadas previamente por los distintos sensores, convertirlas en tensiones eléctricas y digitalizarlas de manera que puedan ser procesadas.

En el presente banco de ensayos se utiliza un sistema centralizado de sistema de medida, en el que el núcleo es un registrador de datos, conocido como "Data logger". Este sistema centralizado es utilizado cuando hay pocas variables para medir y las distancias entre sensores y núcleo son pequeñas.

El modelo instalado de “Data Logger” es el 34980A de Agilent Technologies, el cual destaca por su gran funcionamiento en procesos de medición en los cuales es necesario la toma de un gran número de muestras en un intervalo de tiempo reducido. Este tiempo de muestreo característico es posible gracias al funcionamiento interno de “Data Logger” basado en la conmutación de relés.



Ilustración 31. Data logger 34980A

El inconveniente del “Data Logger” es que no tiene la capacidad de interpretar directamente las señales eléctricas que provienen de la instrumentación, es decir, de los sensores y transductores. Para subsanar esta carencia, es necesaria la incorporación de una tarjeta multiplexora encargada de recopilar y agrupar todas estas señales recibidas y enviar todos esos datos al “Data Logger” en un único bus de comunicación.

Con respecto a la tarjeta multiplexora, el modelo utilizado es el 34921^a, también de Agilent Technologies. Este modelo cuenta con 40 canales de 2 hilos cada uno, subdivididos en dos bancos de 20 canales cada uno, y se utilizan para registrar entradas de tensión. Adicionalmente, posee otros 4 canales con relés para la toma de intensidad. Según el fabricante, esta tarjeta es capaz de trabajar con 100 canales por segundo. No obstante, en este banco de ensayos solo se utilizarán 8 canales, 5 para tensión y 3 para intensidad. Por tanto, el tiempo mínimo de muestreo será:

$$T_{min} = \left(\frac{100 \text{ canales/s}}{8 \text{ canales}} \right)^{-1} = 0.08 \text{ s} = 80 \text{ ms}$$

$$f_{max} = \frac{1}{T_{min}} = 12.5 \text{ Hz}$$

En la siguiente tabla se adjunta un resumen de todos los componentes del sistema de medida, relacionando cada uno de ellos con el parámetro de medida:

SISTEMA DE MEDIDA:			
Sensores, transductores y sistema de adquisición de datos			
Parámetro a medir	Sensor y/o transductor	Canal/es en tarjeta multiplexora 34921A	Señal de salida de 34980A

Velocidad de viento	Anemómetros EE575 de E+E Elektronik	1001 (*); 1005; 1022; 1025	[0 – 10] V
Temperatura del ambiente	Sensor de temperatura Pt100 y transductor TxRail 4 – 20 mA de Novus	1043	[4 – 20] mA
Presión absoluta del ambiente	Barómetro electrónico HD 9408T BARO de DELTA OHM	1044	[4 – 20] mA
Velocidad de giro del aerogenerador	Captador de pulsos BES M12MI – PSC40B – BV03 de Balluff y convertidor de frecuencia TACO digi del fabricante DPF Sensors:	1042	[4 – 20] mA
Tensión de batería	Transductor de tensión MCR-VDC-UI-B-C de Phoenix Contact	1036	[0 – 10] V
Intensidad de batería	Transductor toroidal de efecto Hall DHR 100 C420 de LEM	1041	[4 – 20] mA
(*) El canal 1001 no se utiliza en los ensayos del presente proyecto, aunque está habilitado para posteriores ensayos.			

Tabla 9. Relación entre parámetros, tarjeta multiplexora y data logger

3.5. AEROGENERADOR

El presente banco de ensayos dispone de un microaerogenerador de tipo horizontal. Se trata del modelo Whisper 200 del fabricante Southwest Windpower, capaz de producir una potencia máxima de 1 KW. Es, por tanto, un aerogenerador de pequeña potencia, enmarcado dentro de la energía minieólica. En este rango se encuentran todos los aerogeneradores con una potencia nominal inferior a 100 kW y con un área barrida por las aspas que no rebase los 200 m² o los 8 m de radio.



Ilustración 32. Aerogenerador Whisper 200.

Este aerogenerador posee una serie de características que son expuestas en la siguiente tabla:

Aerogenerador Whisper 200 de Southwest Windpower	
Parámetro	Valor
Potencia Nominal	1000 W
Voltaje	12V/24V/48V
Eje de rotación	Horizontal
Número de Palas	3
Material de las palas	Polipropileno / carbono reforzado
Diámetro del rotor (m)	2.72

Velocidad del viento nominal (m/s)	11.6 – 13
Inicio/corte de velocidad del viento (m/s)	3.1
Recortar la velocidad del viento (m/s)	16-18
Velocidad del viento de supervivencia (m/s)	55
Área Barrida m ²	5.8
Velocidad de Rotación	1200

Tabla 10. Parámetros característicos Aerogenerador Whisper 200.

Para que nuestro aerogenerador se adecue al resto de componentes de nuestro banco de ensayos, como pueden ser el regulador de carga o las baterías, será necesario modificar el valor del voltaje establecido de forma estándar por el fabricante de 24V a 12V.

La curva de potencia proporcionada por el fabricante se muestra en la siguiente figura:

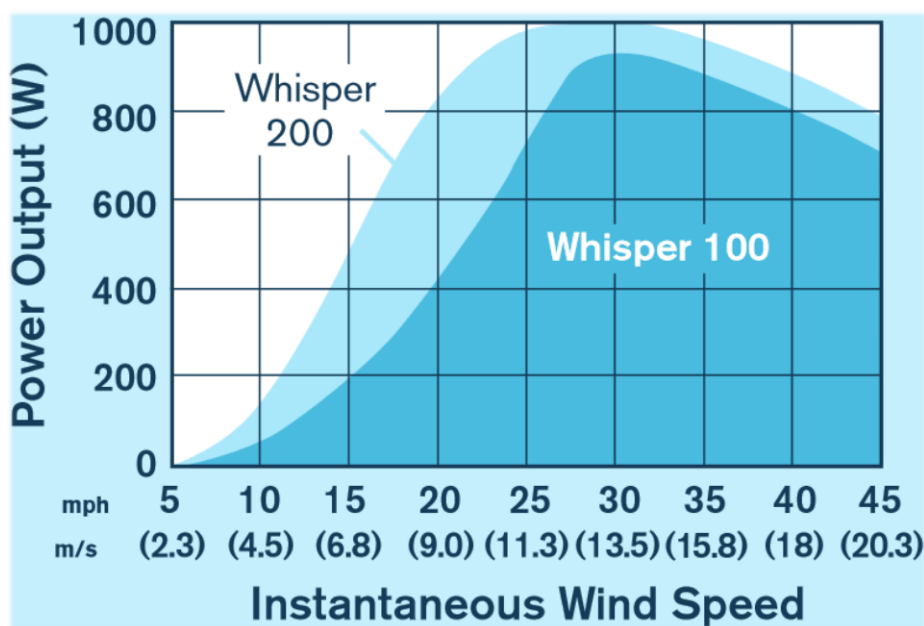


Ilustración 33. Curva de potencia del aerogenerador Whisper 200.

3.6. OTROS EQUIPOS.

3.6.1. REGULADOR DE CARGA.

El regulador de carga eólico se encarga de controlar y regular la energía que se transfiere desde el aerogenerador, que es donde se origina, hasta las baterías con el objetivo de protegerlas frente a sobrecargas o descargas profundas. También pueden controlar la

descarga si existen consumidores eléctricos en corriente continua. Como es lógico, este debe estar situado entre ambos equipos.

Para llevar a cabo el control del flujo de energía, es necesaria la parametrización de las magnitudes de Intensidad (I) y Voltaje (V) que llegan a la batería. Estos parámetros se ajustarán dependiendo del estado de carga de las baterías y de la energía generada por el sistema eólico. Con todo esto se consigue un correcto y óptimo almacenamiento de la carga en las baterías, consiguiendo de esta forma prolongar su vida útil.

Regulador de carga Luminous 3000W	
Parámetro	Valor
Potencia Nominal / Capacidad	1000 W
Voltaje	12V/24V/48V
Temperatura Máxima de Operación	52°C
Arquitectura base	PWM
Valores de Monitorización	Batería alta/baja/estado
Otras características	Construcción modular
	Recubrimiento antipolvo
	Resistente a la corrosión
	Modo de frenado automático
	Protección contra sobretensiones

Tabla 11. Parámetros del regulador de carga Luminous 1000W.

3.6.2. BATERÍAS

En esta instalación, se dispone de dos baterías de gel modelo UP-SP070 del fabricante U-power. Se caracterizan por tener una tensión nominal de 12V y una capacidad de carga de 70 Ah.

Este sistema, al tratarse de uno autónomo cuando se ponga en práctica, necesita de las baterías cuya función consiste en almacenar la energía producida por el aerogenerador

así como suministrar dicha energía acumulada a la carga si esta trabaja en corriente continua.



Ilustración 34. Batería 12V DC UP-SP070.

Las baterías representan gran parte de la inversión de la instalación, pero suelen tener el ciclo de vida más corto de todos los elementos presentes en ella. Normalmente suelen durar entre 2 y 20 años, dependiendo de las condiciones a las que hayan sido sometidas y la calidad de la batería. Con respecto a la capacidad nominal de la batería, se debe elegir una que proporcione entre 3 y 8 veces la energía consumida por la carga durante un día o un ciclo de utilización.

3.6.3. INVERSOR

Un inversor es un equipo electrónico capaz de transformar la energía de corriente continua procedente de las baterías del aerogenerador en corriente alterna. Suelen ser utilizados en instalaciones eólicas, ya que en numerosas ocasiones hay que abastecer cargas eléctricas alternas. Se conectan aguas abajo de la batería y a su vez se subdividen en: inversores aislados e inversores conectados a la red, que a día de hoy son los más utilizados.

En este banco de ensayos se ha instalado el inversor modelo Phoenix Inverter 12/1200 del fabricante Victron Energy.



Ilustración 35. Inversor monofásico 12V.

CAPÍTULO 4. PLANIFICACIÓN Y REALIZACIÓN DE LOS ENSAYOS.

4.1. INTRODUCCIÓN

En este capítulo se va a plantear el procedimiento llevado a cabo para la realización de los diferentes ensayos y cuáles son los objetivos de cada uno. Se expondrán los valores obtenidos por el sistema de medida correspondiente y se analizarán los resultados correspondientes mediante gráficas, razonamientos y conclusiones.

En primer lugar, se elaborará el mapa de vientos a partir de los datos obtenidos por los anemómetros y se graficaran los diferentes perfiles de velocidad del viento. Junto a ello, se llevará a cabo un análisis de dichos resultados y se expondrán justificaciones a los diferentes casos particulares y relevantes que se muestren en los datos.

A continuación, se procederá a elaborar la curva de potencia del aerogenerador a partir de los datos de tensión e intensidad generados. La potencia generada y que circula del aerogenerador hacia las baterías será representada en función de la velocidad promedio del viento. La curva de potencia obtenida se comparará con la que proporciona el fabricante.

Con respecto a la rejilla intermedia, es importante aclarar que la función de esta tiene como objetivo homogeneizar el flujo de aire generado por los ventiladores para que el aerogenerador reciba el viento distribuido de la misma manera en todos sus puntos. De esta forma, se recrearía con más similitud las condiciones reales de vientos que se darían en su entorno. En el presente proyecto únicamente se realizarán ensayos con la rejilla intermedia, ya que de esta forma se simulan condiciones más representativas de un flujo de viento real .

4.2. DISTRIBUCIÓN DE LA TOMA DE DATOS

El primer objetivo de este trabajo consiste en la realización del mapa de vientos correspondiente a cada una de las diferentes condiciones de flujo de aire a las que vamos a someter al ventilador. El principal parámetro que hay que medir para la obtención de un mapa de vientos es la velocidad del viento. Para ello, se realizarán varios ensayos modificando la frecuencia de giro de los ventiladores.

En segundo lugar, es necesario realizar mediciones a distintas alturas ya que sólo se dispone de cuatro anemómetros equidistantes situados en el mismo plano horizontal. Para ello, la instalación cuenta con una barra corredera en la cual se han situado los anemómetros, permitiendo de esta forma desplazarla y realizar mediciones a distintos niveles de altura.

Definiremos cuatro niveles de altura situados entre sí a la misma distancia, concretamente a 27 cm. En total se cubre un rango de 81 cm. Se han elegido estas posiciones debido a que la altura máxima que el cableado permitía mover la barra era de 2m sobre el nivel del suelo, donde se ha situado la posición 2, y la altura mínima permitida por la instalación es alrededor de 1.20 m. Aunque no se obtiene una distribución simétrica, de esta forma se abarcan algunos puntos interesantes, como son:

- La posición cercana al centro de rotor: posición +1.
- La posición donde se sitúa la superficie común de los ventiladores y donde se mezclan los flujos de viento de los ventiladores: posición -1.
- Posición en el radio exterior del rotor: posición -2.

En la siguiente figura se puede la distribución de las posiciones elegidas con respecto a los ventiladores y el aerogenerador:

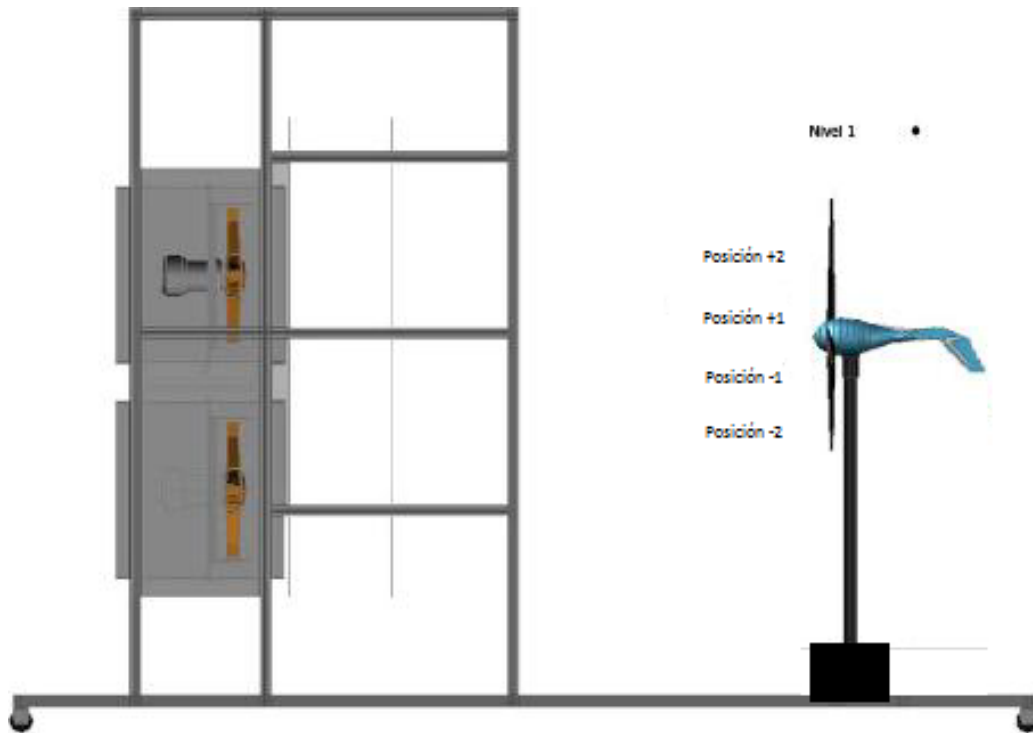


Ilustración 36. Vista en perfil del banco de ensayos.

En cuanto a la distribución de los anemómetros, se dispone de 4 de ellos separados entre sí 51 cm. Esta distribución fue realizada por el anterior alumno y mejora las condiciones de la instalación, ya que no contaba con 4 anemómetros sino con 3. En la siguiente fotografía se puede observar su distribución:



Ilustración 37. Distribución de los anemómetros.

4.3. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS.

En este apartado se muestran los datos obtenidos en los ensayos para los valores de velocidad del viento, temperatura y presión atmosférica. Se exponen en las siguientes tablas donde se observan los datos mencionados para cada anemómetro y cada posición en función de la frecuencia de giro de los ventiladores. Los datos monitoreados se han registrado para las siguientes frecuencias: **[15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50] Hz**. Estas tablas nos muestran una distribución detallada de la velocidad del flujo de viento incidente de viento y constituyen un mapa de vientos numérico.

Velocidad del viento, temperatura y presión atmosférica para 15 Hz						
15 Hz	v_{anem1} (m/s)	v_{anem2} (m/s)	v_{anem3} (m/s)	v_{anem4} (m/s)	$T^a(^{\circ}C)$	$P_{manométrica}$ (mbar)
Posición -2	0,92	1,15	0,68	0,64	26,05	1008,75
Posición -1	1,69	2,10	1,60	1,45	26,10	1007,99
Posición +1	1,78	1,84	1,89	0,89	26,20	1008,15
Posición +2	0,64	1,92	1,57	1,06	26,19	1008,64
Velocidad del viento, temperatura y presión atmosférica para 20 Hz						
20 Hz	v_{anem1} (m/s)	v_{anem2} (m/s)	v_{anem3} (m/s)	v_{anem4} (m/s)	$T^a(^{\circ}C)$	$P_{manométrica}$ (mbar)
Posición -2	0,76	1,38	0,69	0,66	25,94	1008,75
Posición -1	2,42	3,09	2,01	1,93	26,14	1008,07
Posición +1	2,33	2,40	2,68	1,34	26,22	1008,28
Posición +2	0,91	2,69	2,12	1,12	26,21	1008,61

Velocidad del viento, temperatura y presión atmosférica para 25 Hz						
25 Hz	v_{anem1} (m/s)	v_{anem2} (m/s)	v_{anem3} (m/s)	v_{anem4} (m/s)	$T^a(^{\circ}C)$	$P_{manométrica}$ (mbar)
Posición -2	1,13	1,50	1,57	1,27	26,04	1009,02
Posición -1	3,13	3,73	2,84	2,61	26,18	1008,32
Posición +1	3,16	2,80	3,34	1,42	26,26	1008,59
Posición +2	1,04	3,28	2,71	1,30	26,38	1008,86
Velocidad del viento, temperatura y presión atmosférica para 30 Hz						
30 Hz	v_{anem1} (m/s)	v_{anem2} (m/s)	v_{anem3} (m/s)	v_{anem4} (m/s)	$T^a(^{\circ}C)$	$P_{manométrica}$ (mbar)
Posición -2	1,56	1,78	2,85	2,28	25,98	1009,07
Posición -1	3,94	4,60	3,34	2,97	26,24	1008,33
Posición +1	3,98	3,12	4,29	2,49	26,49	1008,64
Posición +2	1,79	4,05	3,63	1,65	26,55	1008,66
Velocidad del viento, temperatura y presión atmosférica para 35 Hz						
35 Hz	v_{anem1} (m/s)	v_{anem2} (m/s)	v_{anem3} (m/s)	v_{anem4} (m/s)	$T^a(^{\circ}C)$	$P_{manométrica}$ (mbar)
Posición -2	2,08	2,57	3,56	3,13	26,49	1008,38
Posición -1	4,93	5,09	4,68	4,05	26,61	1007,81
Posición +1	4,57	3,94	4,94	2,90	26,56	1007,99
Posición +2	2,46	5,09	4,88	2,46	26,52	1008,74
Velocidad del viento, temperatura y presión atmosférica para 40 Hz						
40 Hz	v_{anem1} (m/s)	v_{anem2} (m/s)	v_{anem3} (m/s)	v_{anem4} (m/s)	$T^a(^{\circ}C)$	$P_{manométrica}$ (mbar)
Posición -2	2,29	2,92	4,53	4,23	26,63	1007,96
Posición -1	5,95	6,20	5,75	4,74	26,68	1007,43
Posición +1	5,79	4,60	6,05	3,51	26,80	1007,47
Posición +2	2,84	6,08	5,84	2,93	26,60	1008,68
Velocidad del viento, temperatura y presión atmosférica para 45 Hz						
45 Hz	v_{anem1} (m/s)	v_{anem2} (m/s)	v_{anem3} (m/s)	v_{anem4} (m/s)	$T^a(^{\circ}C)$	$P_{manométrica}$ (mbar)
Posición -2	3,85	4,35	5,39	5,25	26,82	1008,04
Posición -1	7,02	7,07	6,94	5,85	26,80	1007,34
Posición +1	5,99	5,68	6,83	4,19	26,82	1007,44
Posición +2	3,81	7,16	7,13	3,68	26,84	1007,74

Velocidad del viento, temperatura y presión atmosférica para 50 Hz						
50 Hz	v_{anem1} (m/s)	v_{anem2} (m/s)	v_{anem3} (m/s)	v_{anem4} (m/s)	$T^a(^{\circ}C)$	$P_{manométrica}$ (mbar)
Posición -2	6,24	5,44	5,61	5,66	26,70	1007,20
Posición -1	8,18	7,97	8,53	6,41	26,66	1006,64
Posición +1	7,14	6,54	7,71	4,75	26,45	1006,80
Posición +2	3,88	8,03	8,43	5,09	27,01	1006,94

Tabla 12. Resultados de viento obtenidos.

Aunque esta tabla de datos nos proporciona prácticamente toda la información respecto a la distribución del flujo de viento, es cierto que se necesita una visión más gráfica o ilustrativa para poder comprender y comparar las variaciones de la velocidad del viento en función de la posición y la frecuencia. Para ello, se han dividido los datos pertenecientes al plano vertical y al plano horizontal.

- VELOCIDADES PROMEDIO DEL PLANO VERTICAL.

Para obtener las velocidades promedio del flujo de viento en el plano vertical, se ha obtenido el valor promedio de la velocidad tomada por los 4 anemómetros para cada posición. La tabla y las gráficas que se obtienen del perfil vertical de vientos son las siguientes:

VELOCIDAD PROMEDIO PARA CADA POSICIÓN A DIFERENTES FRECUENCIAS								
Frecuencia	15 Hz	20 Hz	25 Hz	30 Hz	35 Hz	40 Hz	45 Hz	50 Hz
Posición -2	0,85	0,87	1,37	2,12	2,84	3,49	4,71	5,74
Posición -1	1,71	2,36	3,08	3,71	4,69	5,66	6,72	7,77
Posición +1	1,60	2,19	2,68	3,47	4,09	4,99	5,67	6,33
Posición +2	1,30	1,71	2,08	2,78	3,72	4,42	5,45	6,36
Promedio	1,36	1,78	2,30	3,02	3,83	4,64	5,64	6,55

Tabla 13. Velocidad promedio en el plano vertical.

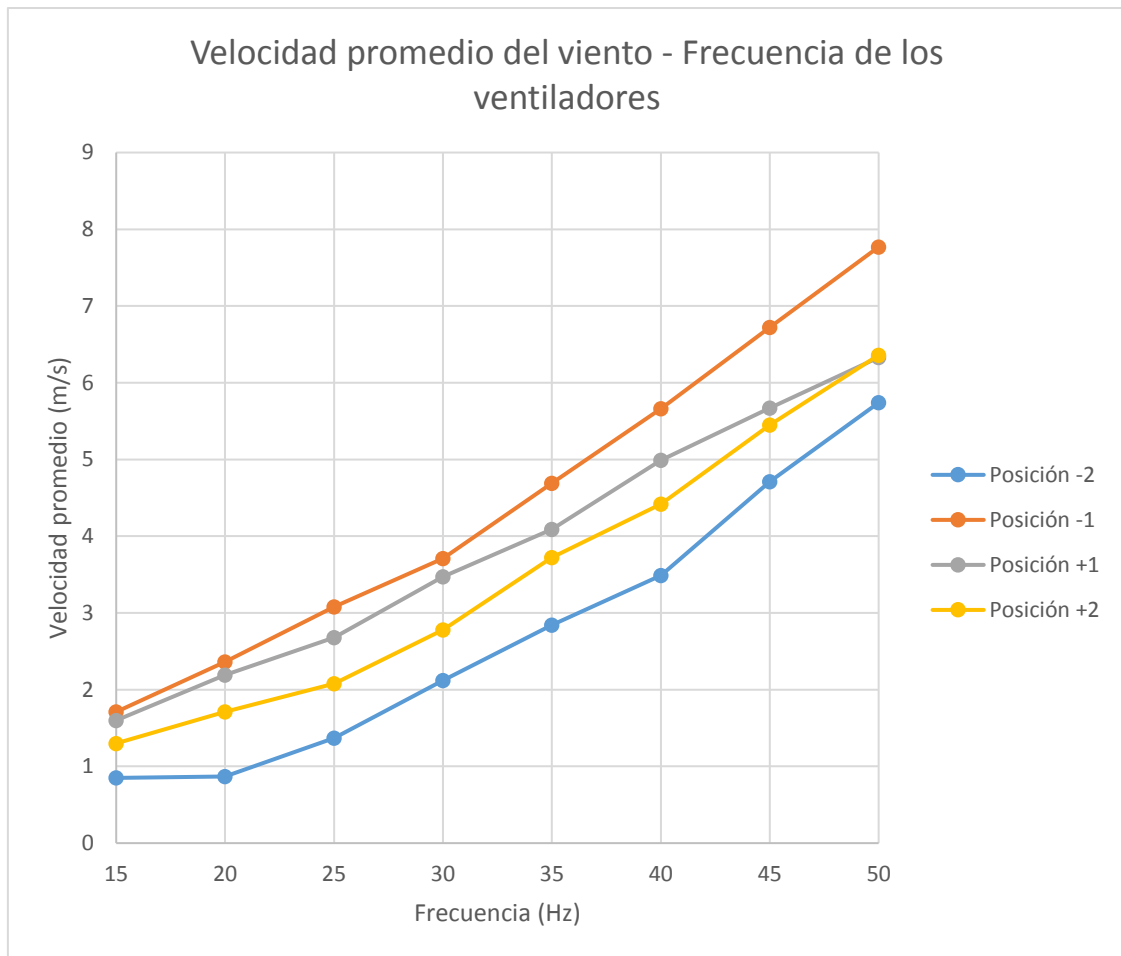


Ilustración 38. Velocidad promedio del viento en función de la frecuencia de los ventiladores en el plano vertical.

A partir de lo mostrado en la tabla y en la gráfica se puede sacar en claro que la posición -2 la velocidad del viento es sensiblemente menor a la de las otras posiciones. Esto es absolutamente lógico, ya que la posición -2 está situada en la zona inferior de los ventiladores y cerca del extremo inferior de las aspas, por lo que recibirá menos flujo de viento que las otras tres.

También es destacable la mayor velocidad que adquiere el viento en la posición -1, principalmente a partir de una frecuencia de 35 Hz. Esto puede ser debido a que se sitúa en a la altura del eje de los ventiladores inferiores, que es donde debe haber más caudal de viento

Las posiciones +1 y +2 reciben una velocidad más intermedia entre las otras dos posiciones. Al no ser posiciones simétricas no tienen por qué coincidir, además de que con un flujo de viento generado por un ventilador suelen haber zonas con mayor velocidad que otras. Estas están situadas en la zona central entre los ventiladores. La posición +1 recibirá mayor cantidad de flujo de los ventiladores inferiores, mientras que la posición +2 recibirá un flujo mayor del ventilador superior.

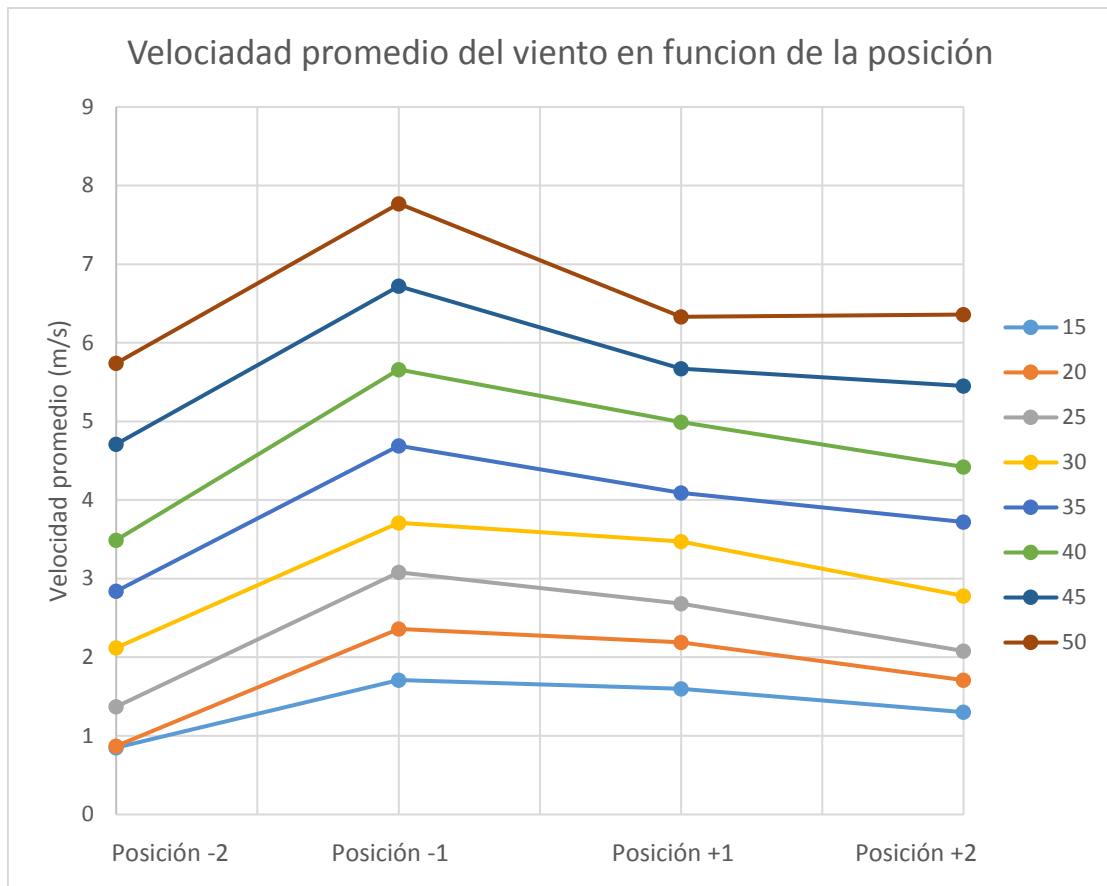


Ilustración 39. Velocidad promedio del viento en función de la posición de la barra.

Lo aportado por la gráfica de la velocidad promedio del viento en función de la posición vertical para cada frecuencia sigue la tendencia de lo explicado sobre la anterior gráfica. La posición que claramente recibe un flujo de viento mayor es la (-1) debido a su situación a la altura del eje de los ventiladores e inferiores, hecho que se hace más notable a frecuencias altas. En las posiciones +1 y +2 la velocidad del viento es muy similar, explicado por su situación simétrica con respecto al eje que separa los ventiladores inferiores y superiores. En la posición -2 se observa de nuevo que la velocidad es ligeramente superior al promedio ya que está situada el eje de los ventiladores inferiores.

Otro aspecto reseñable de esta gráfica es el incremento homogéneo de la velocidad del viento para cada posición en función de la frecuencia. En todas las posiciones aumenta de la misma de forma. Se observa que a mayor frecuencia, el aumento de la velocidad del viento es ligeramente mayor que en salto anterior. No se observan valores atípicos que estén por encima o por debajo de donde deber estar, lo que significa que la toma de datos ha sido correcta.

- VELOCIDADES PROMEDIO DEL PLANO HORIZONTAL.

Para obtener las velocidades promedio del flujo de viento en el plano horizontal, se ha obtenido el valor promedio de la velocidad tomada por en cada posición cada uno de los 4 anemómetros. La tabla y las gráficas que se obtienen del perfil vertical de vientos son las siguientes:

VELOCIDAD PROMEDIO PARA CADA ANEMÓMETRO A DIFERENTES FRECUENCIAS								
Frecuencia	15 Hz	20 Hz	25 Hz	30 Hz	35 Hz	40 Hz	45 Hz	50 Hz
Anem. 1	1,26	1,61	2,12	2,82	3,51	4,22	5,17	6,10
Anem. 2	1,75	2,39	2,83	3,39	4,17	4,95	6,07	7,00
Anem. 3	1,44	1,88	2,62	3,53	4,52	5,54	6,57	7,57
Anem. 4	1,01	1,26	1,65	2,35	3,14	3,85	4,74	5,48
Promedio	1,37	1,79	2,31	3,02	3,84	4,64	5,64	6,54

Tabla 14. Velocidad promedio en el plano horizontal.

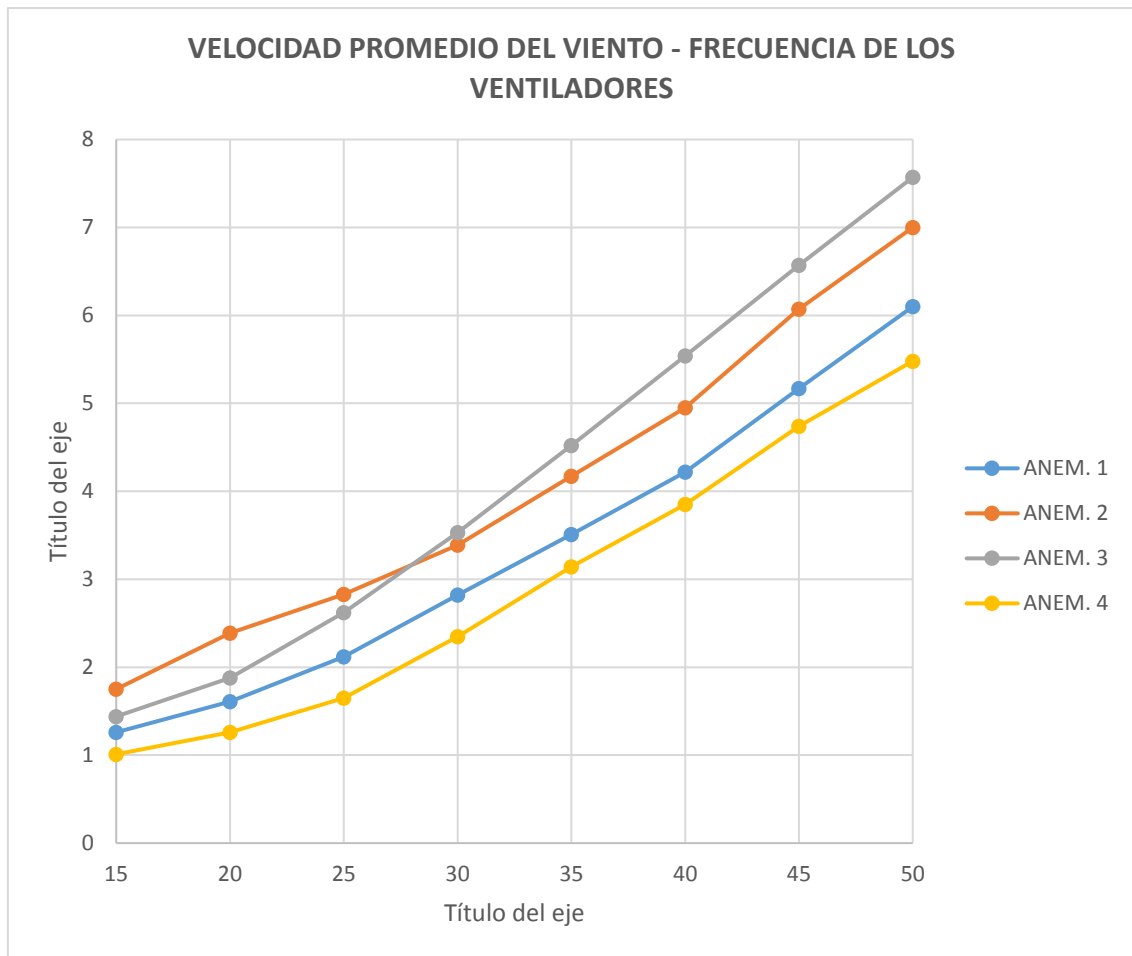


Ilustración 40. Velocidad promedio del viento en función de la frecuencia de los ventiladores en el plano horizontal.

Lo más destacado que nos aporta esta gráfica es que una posición centrada en el eje horizontal recibe más aportación que una posición alejada del centro. Esto se observa claramente con anemómetros interiores, que son el 2 y el 3, cuya velocidad es considerablemente mayor que la de los exteriores, el 1 y el 4.

Además, el anemómetro 4 es el que más retirado se encuentra del punto central de los ventiladores, de ahí que su velocidad sea la más baja de los cuatro anemómetros. No obstante, su valor es más que necesario ya que proporciona información sobre la velocidad que se recibe en el radio exterior de las aspas. Es evidente que en los puntos exteriores la velocidad es menor que en el interior, pero ambos valores son necesarios para el cálculo del potencial eólico.

También es destacable el cambio de zona que mayor velocidad de viento recibe. A partir de los 30 Hz, la zona del anemómetro 3 comienza a recibir un caudal de viento más rápido que el anemómetro, circunstancia que no sucedía a una frecuencia inferior. Esto puede ser debido a que, como se verá más adelante, el flujo de viento incidente puede estar influido por el propio viento que puede generar hacia adelante el propio giro de las aspas.

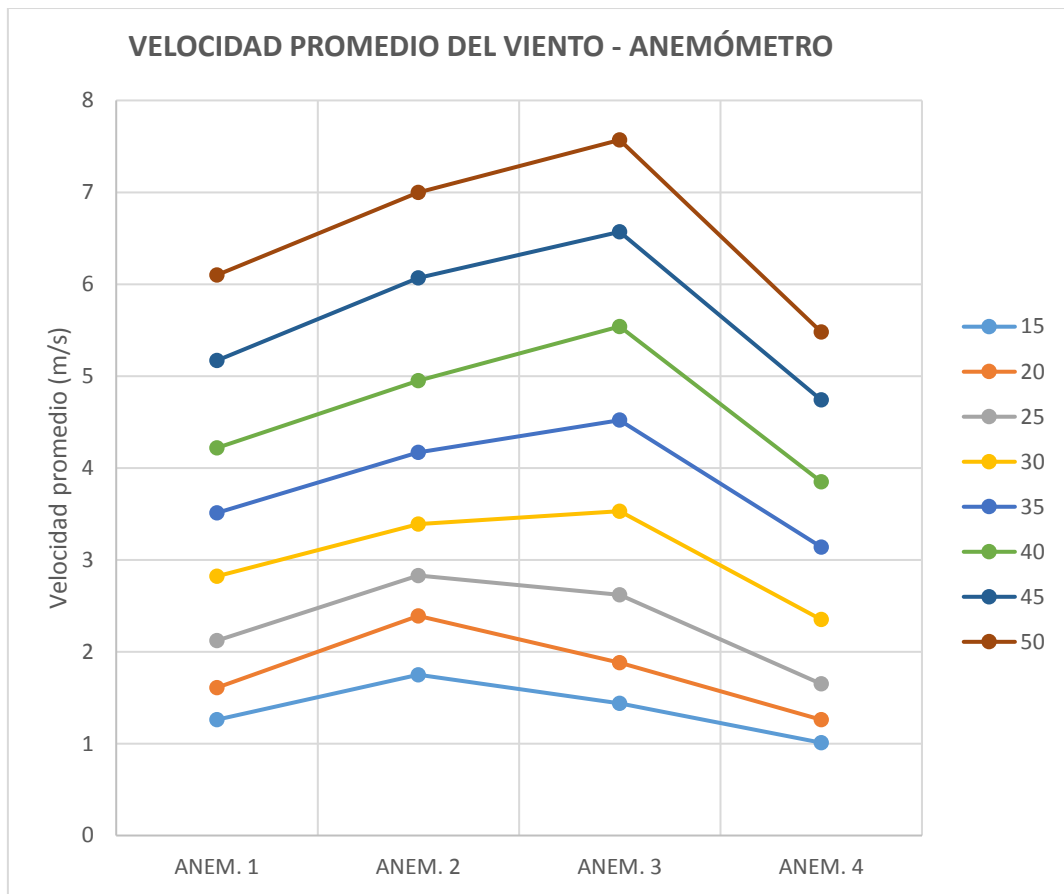


Ilustración 41. Velocidad promedio del viento en función del anemómetro.

En esta gráfica se observa nuevamente lo detallado en la anterior, donde se explicaron las causas de esta distribución de viento en función de la posición de los anemómetros. Para altas frecuencias, la velocidad mayor se da en el anemómetro 3 seguido a continuación por el anemómetro 2, ambos en posiciones centrales. La menor velocidad se registra en el anemómetro 4, influenciado por su posición más exteriorizada

Además, la variación de la velocidad del viento en función de la frecuencia sufre un incremento equilibrado en todos los anemómetros, sin oscilaciones. Al igual que sucedió para la gráfica de la velocidad del viento en función del nivel de altura, en esta también se observa un mayor aumento de la velocidad para frecuencias más altas.

- VELOCIDAD PROMEDIO TOTAL.

Para finalizar con el apartado de mapa de vientos, se ha realizado un análisis de la velocidad promedio total obtenida en función de la frecuencia. Lo que se pretende con esto es conseguir una visión global de como varía el perfil de velocidades de viento con respecto a

la frecuencia de giro de los ventiladores. Para ello se ha realizado la media aritmética de las velocidades obtenidas para cada anemómetro y cada posición. Los resultados obtenidos son los siguientes:

VELOCIDAD PROMEDIO TOTAL A DIFERENTES FRECUENCIAS								
Frecuencia (Hz)	15 Hz	20 Hz	25 Hz	30 Hz	35 Hz	40 Hz	45 Hz	50 Hz
Promedio (m/s)	1,37	1,78	2,30	3,02	3,84	4,64	5,64	6,55

Tabla 15. Velocidad promedio total.

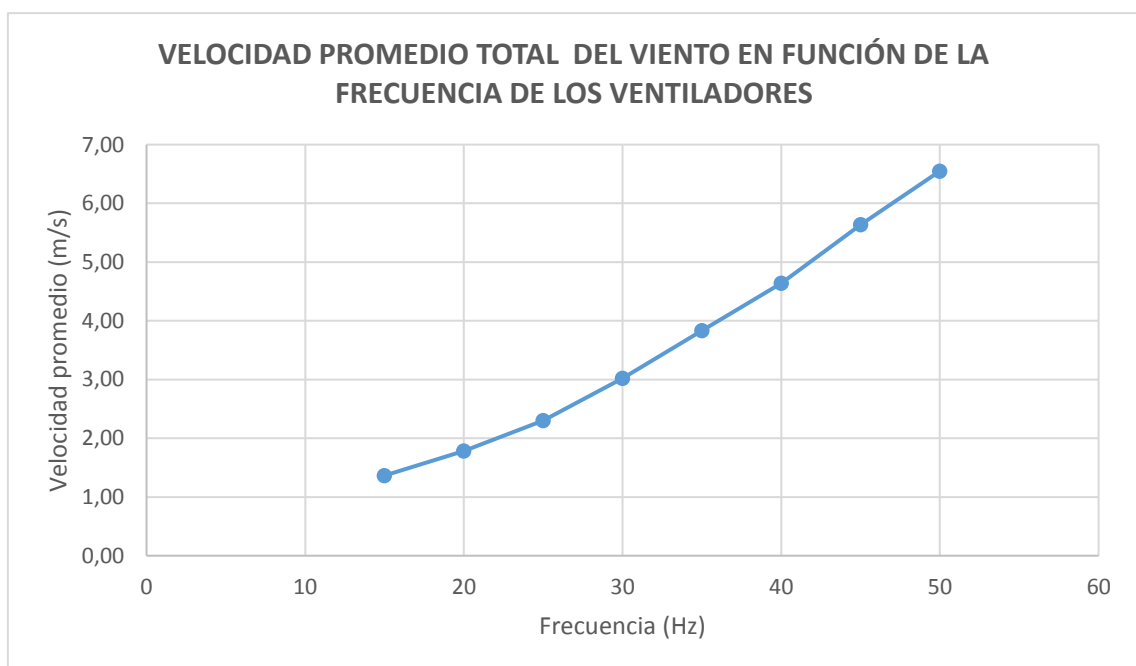


Ilustración 42. Velocidad promedio del viento total función de la frecuencia de los ventiladores.

Para corroborar que estos datos son correctos, además de estos datos tomados a 30 cm de distancia en el plano horizontal con respecto a las aspas y que son lo que nos permiten obtener el potencial eólico incidente, también se han obtenido los datos a 90 cm de las aspas, es decir, a una distancia intermedia entre los ventiladores y el aerogenerador. Para no realizar de nuevo todo el mismo procedimiento, se ha decidido presentar los datos de velocidad del viento promedio total. De esta forma, procederá a comparar los valores promedios de la velocidad a 30 cm y a 90 cm de las aspas. Si las medidas son correctas, a mayor distancia de los ventiladores, la velocidad debe ser menor.

VELOCIDAD PROMEDIO TOTAL A DIFERENTES FRECUENCIAS								
Frecuencia (Hz)	15 Hz	20 Hz	25 Hz	30 Hz	35 Hz	40 Hz	45 Hz	50 Hz
Promedio (m/s)	2,32	2,97	3,73	4,81	5,73	6,95	8,03	9,33

Tabla 16. Velocidad promedio total a 90 cm.

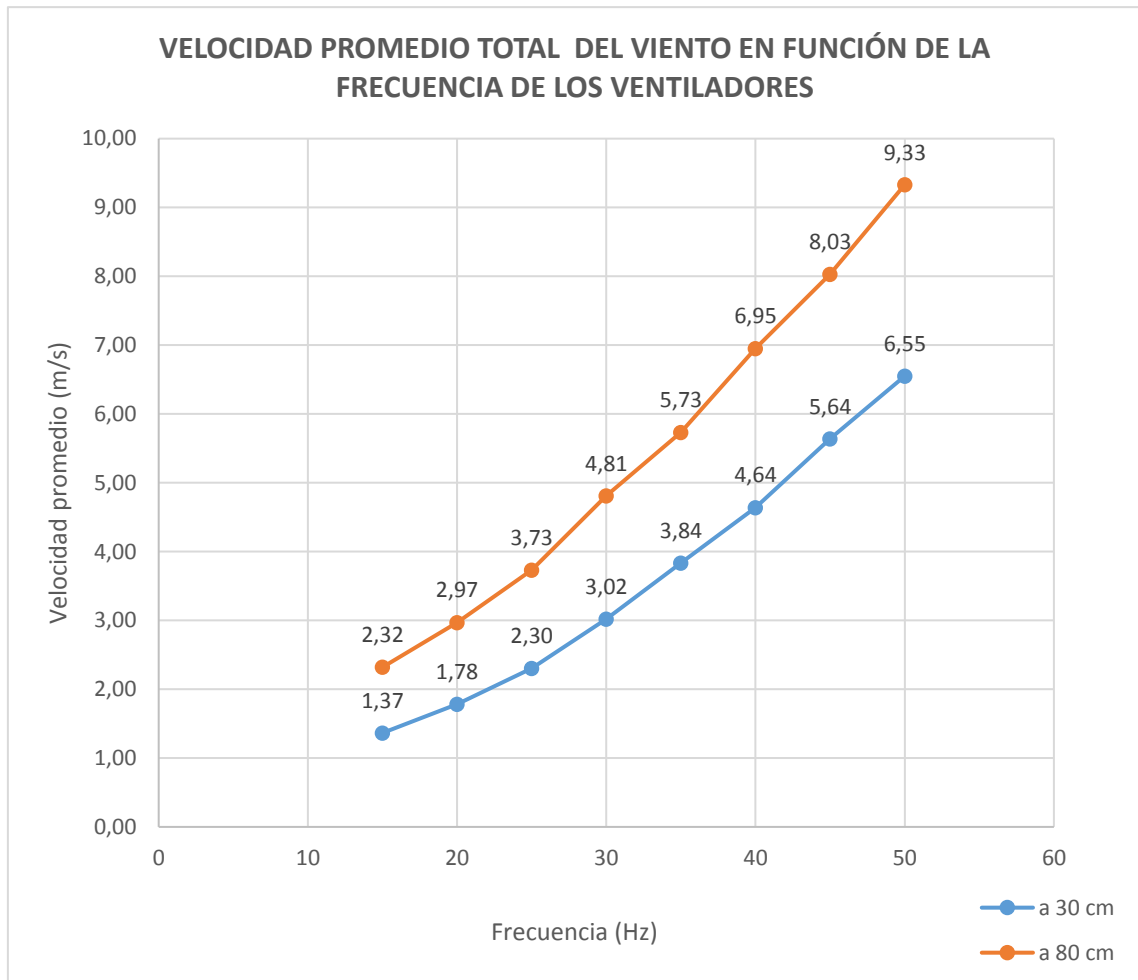


Ilustración 43. Velocidad promedio del viento total función de la frecuencia de los ventiladores para las dos distancias.

Como se puede observar, los datos de la velocidad del viento para la posición situada a 90 cm del aerogenerador son considerablemente mayores que para la situada a 30 cm del mismo. Principalmente, esta diferencia, que supera el valor de 1 m/s para altas frecuencias, tiene su explicación lógica en que la velocidad disminuye con la distancia ya que los ventiladores pueden mover un caudal más grande y a mayor distancia en función de su potencia. No obstante, la generación de algo de flujo de viento en dirección contraria por parte del aerogenerador, también tiene algo de influencia. Este hecho se verá a continuación.

Durante la toma de datos se sospechó que el giro a altas velocidades de las aspas del aerogenerador pudiera provocar cambios en el flujo de viento producido por el aerogenerador. Al estar tan cerca los anemómetros de las aspas pueden recibir algo de flujo producido por el giro a altas velocidades de las aspas. Para comprobar este hecho, se realizaron dos nuevos ensayos. La posición elegida fue la (-1) y la frecuencia 50 Hz. En el primer ensayo, se permitió el libre funcionamiento del aerogenerador como se ha realizado hasta ahora. En el segundo ensayo se restringió el giro del aerogenerador para comprobar si se producían diferencias. Ambos ensayos se realizaron de forma contigua, para que tuvieran las mismas condiciones. Los resultados obtenidos fueron los siguientes:

Velocidad del viento, temperatura y presión atmosférica para 15 Hz						
15 Hz	v_{anem1} (m/s)	v_{anem2} (m/s)	v_{anem3} (m/s)	v_{anem4} (m/s)	$T^a(^{\circ}C)$	$P_{manométrica}$ (mbar)
CON GIRO	8,18	8,11	8,30	6,39	26,05	1008,75
SIN GIRO	9,35	11,37	9,17	7,41	26,10	1007,99

Tabla 17. Datos de velocidad a 50 Hz con y sin giro de las aspas.

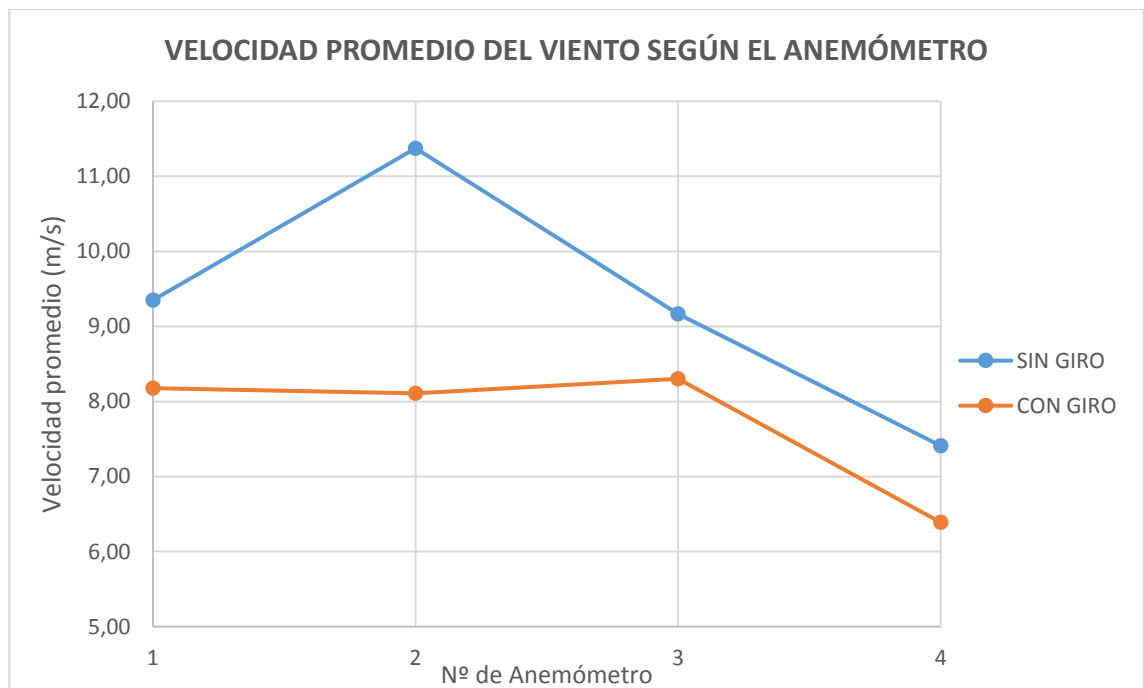


Ilustración 44. Velocidad promedio del viento total función del anemómetro a 50 Hz con y sin giro de las aspas.

Como indica tanto la tabla de datos como la gráfica, es evidente que con el aerogenerador parado la velocidad de viento es mayor, haciéndose en el anemómetro 2 la velocidad máxima que llega a superar los 11 m/s. En el ensayo permitiendo el giro, la velocidad es sensiblemente menor y el flujo parece estar más homogeneizado, ya que tanto el anemómetro 1, 2 y 3 datan una velocidad parecida.

4.4. CÁLCULO DE LA POTENCIA ELÉCTRICA.

Este apartado tiene como objetivo caracterizar la potencia producida por el aerogenerador en distintas condiciones de viento. Concretamente, se exponen los resultados de la potencia generada por la turbina a raíz de los valores de tensión e intensidad dictaminados por el sistema de medida. A partir de estos valores de potencia eléctrica es posible calcular la curva de potencia característica del aerogenerador, la cual nos otorga una idea sobre el grado de eficiencia del aerogenerador en función de la velocidad del viento.

Un aerogenerador es comercializado en función de la potencia nominal, que la máxima potencia que dicho aerogenerador puede producir a una velocidad determinada. No obstante, esta potencia solamente es alcanzable a partir de velocidad de 11 y 14 m/s, las cuales se tratan de velocidad bastante altas y poco probables, según los datos estadísticos de viento. Por lo tanto, el aerogenerador trabajará por debajo de su potencia nominal en un porcentaje elevado de tiempo, y es por ello por lo que es interesante conocer la producción energética del aerogenerador a diferentes velocidades de viento.

En la tabla expuesta a continuación, se exponen los principales parámetros que influyen a la hora de la producción potencia. La densidad es un factor influyente, ya que cuanto mayor sea el valor de esta, mayor será la producción de energía de la turbina. La potencia se ha calculado mediante el producto de la intensidad y el voltaje generados.

Para calcular la potencia P_0 , o potencial del recurso eólico se ha utilizado la fórmula que lo define:

$$P = 1/2 \rho \cdot A \cdot v^3$$

El coeficiente de potencia de un aerogenerador se define como el rendimiento con el cual funciona el mismo y expresa la fracción de la potencia total del viento incidente que es capturada y aprovechada realmente por el rotor de dicho aerogenerador. Su valor se obtiene dividiendo la potencia eléctrica entre la eólica:

$$C_p = \frac{\text{Potencia eléctrica}}{\text{Potencial Eólico}} = \frac{V * I}{1/2 \rho \cdot A \cdot v^3}$$

Frecuencia	\bar{v} (m/s)	ρ (m^3/kg)	P_0 (W)	Voltaje (V)	Intens. (A)	P(W)	C_p
15 Hz	1,37	1,176	8,74	22,62	0,09	2,04	0,23
20 Hz	1,78	1,176	19,17	22,76	0,11	2,50	0,13
25 Hz	2,30	1,176	41,53	23,00	0,17	3,91	0,09
30 Hz	3,02	1,175	93,53	23,26	0,41	9,54	0,10
35 Hz	3,84	1,174	192,11	23,75	1,43	33,96	0,18

40 Hz	4,64	1,173	338,65	24,30	2,63	63,91	0,19
45 Hz	5,64	1,172	607,66	25,02	3,89	97,33	0,16
50 Hz	6,55	1,171	951,00	25,65	5,30	135,95	0,14

Tabla 18. Datos de velocidad, densidad, potencias eólico, voltaje, intensidad, potencia y Cp obtenidos.

A continuación, se han elaborado distintas gráficas con el objetivo de mostrar la curva de potencia obtenida, así como la relación existente entre la potencia producida y las revoluciones del rotor y las de los ventiladores.

A continuación, se han elaborado distintas gráficas con el objetivo de mostrar la curva de potencia obtenida, así como la relación existente entre la potencia producida y las revoluciones del rotor y las de los ventiladores.

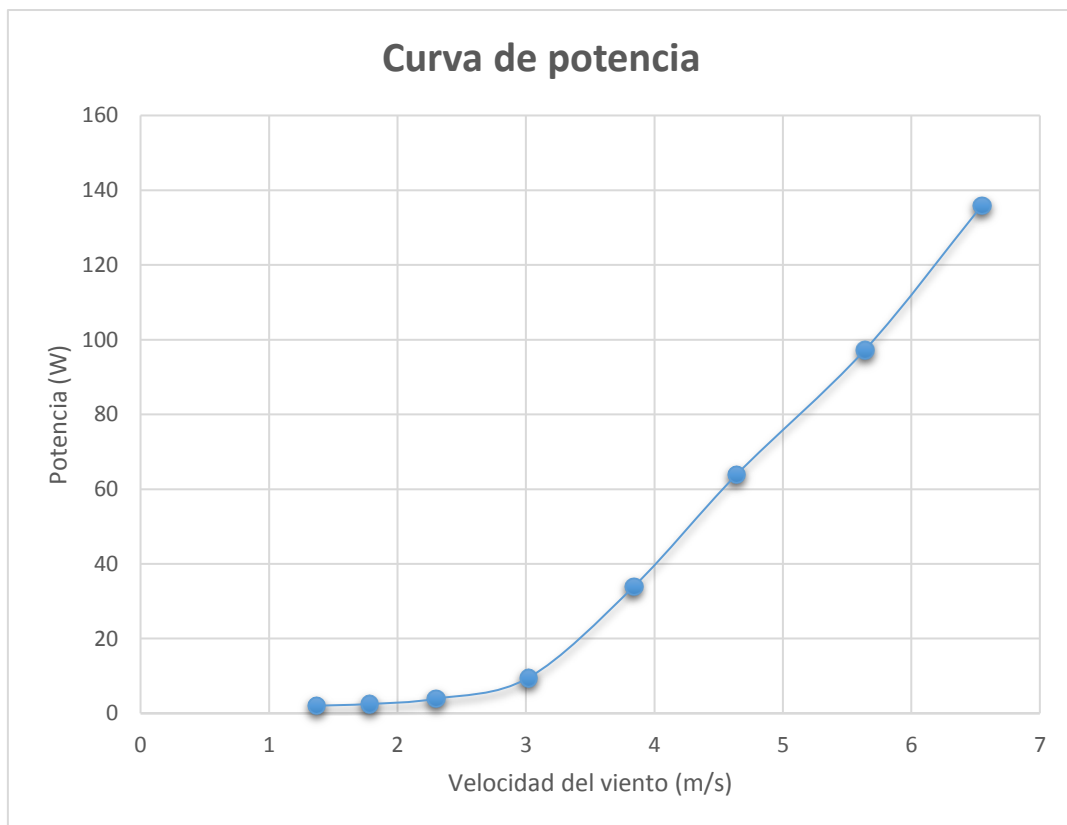


Ilustración 45. Curva de potencia.

En la curva de potencia obtenida se puede observar claramente la tendencial potencial de la función. Generalmente, la parte inicial de las curvas de potencia siguen este tipo de función para, posteriormente, continuar con un crecimiento más lineal hasta que se alcanza el límite de potencia nominal del aerogenerador. Una vez alcanzado este valor, la turbina eólica no podrá producir más potencia por más que aumente la velocidad del viento. Incluso es frecuente que para velocidades muy altas, se produzca el frenado del rotor o un cambio de orientación de las aspas con el fin de evitar que se provoquen daños.

En los ensayos realizados en este proyecto, la velocidad media ha sido de 6,65 m/s, por lo que está gráfica representa una parte de la curva de potencia y no la completa. Para elaborarla completamente se necesitan velocidades de viento mayores. No obstante, la mayor velocidad media alcanzada ha sido para la posición -1 en el anemómetro, con un valor de 8,53 m/s. Sin embargo, esta velocidad solo se alcanza para posiciones centrales y por lo tanto lo más correcto es calcular la velocidad media total de distintos puntos del área barrida por las aspas del aerogenerador. Además, la rejilla intermedia que produce la homogeneización del flujo, también provoca una disminución en la velocidad del viento.

Si comparamos el sector de curva obtenido con la curva de potencia que proporciona el fabricante, se puede apreciar que en el tramo disponible ambas coinciden en su tendencia, aunque en nuestro caso no se alcanzan los valores tan altos de potencia.

Con el fin de explicar por qué se obtiene una potencia menor a la indicada, resaltar que los datos tomados siempre han sido en posiciones dentro del área barrida por las aspas. Para un cálculo correcto de la velocidad se tienen que tomar el mayor número de valores interiores y exteriores. En este ensayo ha resultado imposible obtener valores a posiciones suficientemente altas o suficientemente bajas ya que el cableado de la instalación lo impedía. Esto constatará en una propuesta de mejora de la instalación.

La generación máxima de potencia ha sido de 136 W para una velocidad de 6,5 m/s. Se debe constatar que los datos han sido tomados en función de la frecuencia de los ventiladores decreciente, es decir, se comenzó en 50 Hz y se finalizó en 15 Hz. Se eligió este procedimiento debido a que el aerogenerador no se ponía en marcha hasta frecuencias ligeramente superiores a los 30 Hz, que en término de velocidad media se sitúa en torno a 3,1 m/s. Esto es justamente lo que indica el fabricante.

Constatar que estos ensayos son en condiciones simuladas, donde el viento generado por los ventiladores no es igual que un flujo real de viento. Para caracterizar con mayor precisión el aerogenerador debería realizarse en un emplazamiento exterior, aunque también sería mucho más complicado ya que el viento suele ser intermitente e inestable.

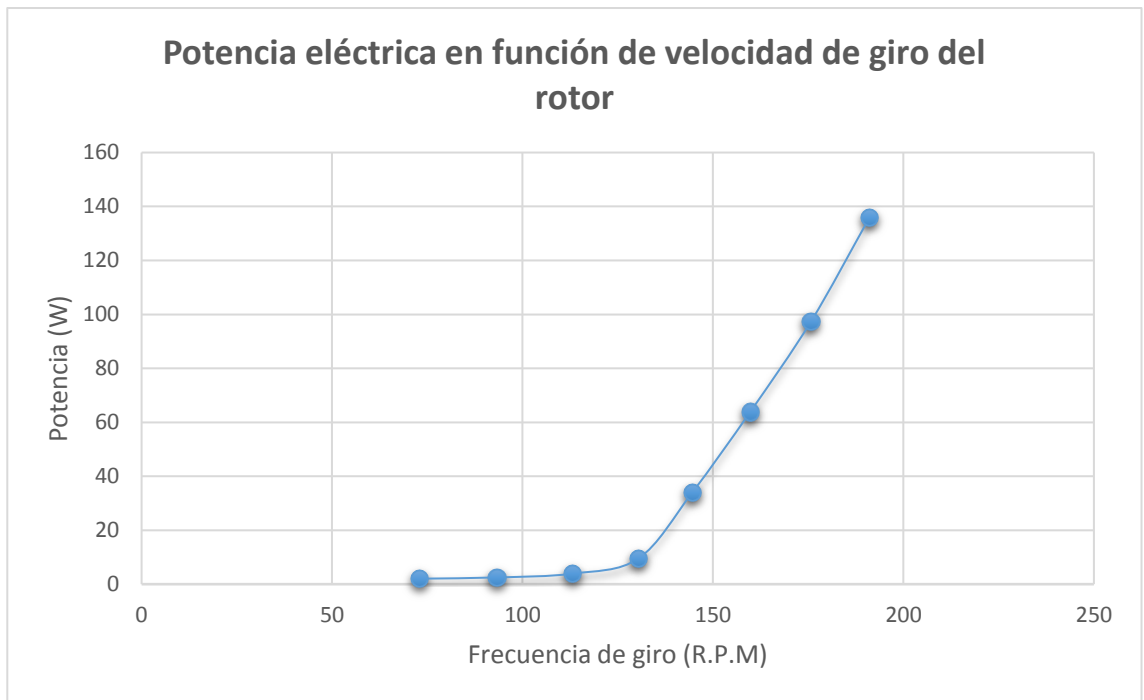


Ilustración 46. Potencia eléctrica en función de la frecuencia de giro del rotor.

En esta ilustración se puede observar el gran crecimiento de potencia que se produce a partir de las 130 revoluciones por minuto del rotor. Este mayor crecimiento coincide con una frecuencia de los ventiladores de 30 Hz y una velocidad de viento superior a 3,1 m/s. Este punto se trata del inicio de funcionamiento del aerogenerador. Hasta las 130 rpm apenas se produce potencia, pero cuando aumenta a 200 rpm la potencia se incrementa hasta potencias superiores a 130 W.

“Aunque la curva potencia - frecuencia de giro del rotor no sea tan utilizada, en este ensayo muestra una representación más ajustada al funcionamiento real del aerogenerador en comparación con la curva de potencia obtenida. Esto es debido a que cada frecuencia de giro suele ir asociada a cierto valor de la velocidad de un flujo de viento real, el cual es bastante más homogéneo que el obtenido en este caso. Si el fabricante proporcionara esta correspondencia de velocidad del viento y velocidad de giro del rotor, entonces sería posible obtener otra representación de la curva de potencia que podría ajustarse a las condiciones de viento terrestres.”

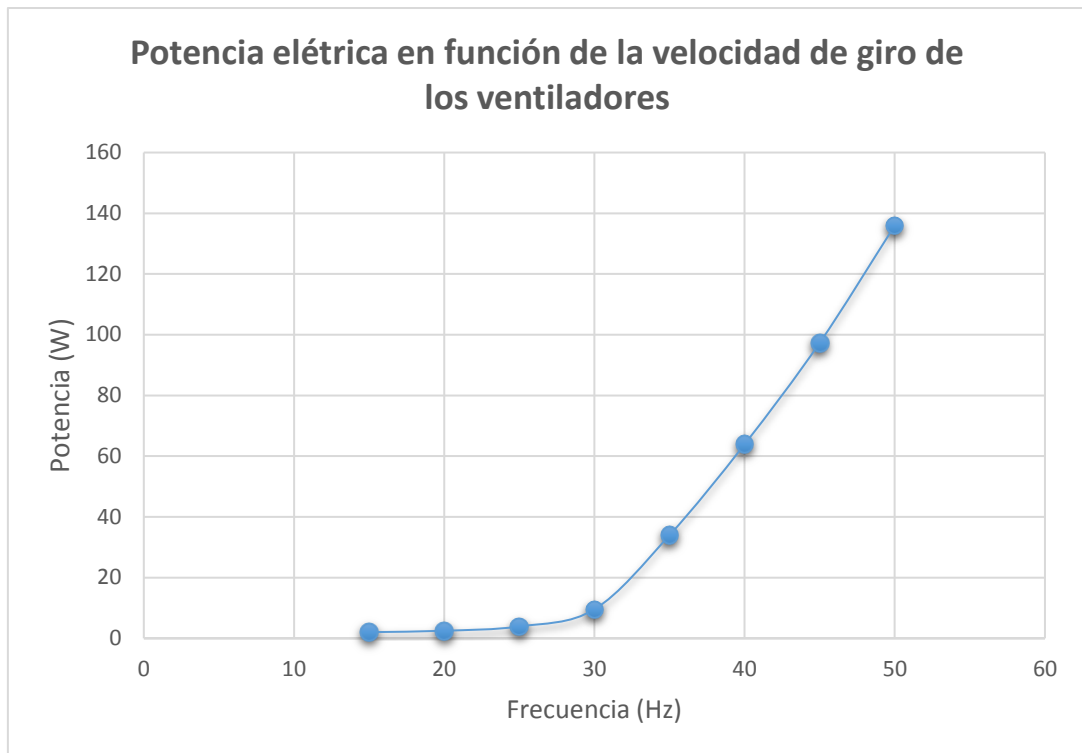


Ilustración 47. Potencia eléctrica en función de la frecuencia de los ventiladores.

Por último, esta gráfica es otra manera distinta de representar las dos anteriores, ya que tanto la velocidad del viento medida como la frecuencia de giro del rotor están relacionadas de forma de forma directamente proporcional a la frecuencia de giro de los ventiladores. En este caso se vuelve a apreciar que el máximo crecimiento de la función se produce a partir de los 30 Hz.

4.5. CONCLUSIONES

En este apartado se van a exponer una serie de conclusiones a la que se ha llega tras el análisis de los datos obtenidas y de las representaciones gráficas realizadas, las cuales permiten una visión

- Al ser la distribución de vientos poco homogénea en comparación con un flujo real de viento, la curva de potencia queda ligeramente desvirtuada.
- Aunque la medición de la velocidad del viento producido por lo ventiladores sea realizada en varias posiciones y utilizando varios anemómetros,

CAPÍTULO 7. MANUAL DE PRÁCTICAS.

1. OBJETO DE LA PRÁCTICA.

El objetivo principal de esta práctica es conocer el funcionamiento in situ de un aerogenerador de pequeña potencia y caracterizarlo en función de las condiciones del viento. Para ello, en esta práctica se pretende obtener el mapa de vientos generado por los ventiladores a diferentes frecuencias, el cuál es siempre el primer paso a realizar cuando se pretende instalar un aerogenerador ya sea de pequeña o de gran potencia. En segundo lugar, se realizará la caracterización del aerogenerador mediante la obtención de la curva de potencia del mismo. Por último, se estudiará el comportamiento del aerogenerador en función de la potencia de la carga que tenga conectada a sus baterías.

2. FUNDAMENTO TEÓRICO.

Para lograr un aprovechamiento eficaz de la energía contenida por el viento, es muy importante realizar la caracterización del comportamiento del viento en la zona de implantación de los aerogeneradores, ya sea para un aerogenerador pequeño que instalas en tu casa o para un parque eólico. El fundamento de esta aseveración es que el viento suele tener unas direcciones predominantes para cada zona y, aunque existan mecanismos para cambiar la orientación de las palas, es mucho más eficiente instalar el aerogenerador orientado o dirigido hacia la dirección más frecuente.

Esta práctica tiene como objetivo obtener el potencial eólico de un aerogenerador de pequeña potencia.

El instrumento encargado de medir la velocidad del viento es el anemómetro. En esta instalación se dispone de cuatro anemómetros de hilo caliente. Un anemómetro de hilo caliente consiste en un filamento calentado el cual está conectado a un circuito eléctrico que es capaz de monitorear las variaciones de resistencia eléctrica por la acción del flujo. Entonces, se puede establecer una relación de entre la velocidad del flujo y la resistencia observada en el filamento.

2.1. POTENCIA DEL RECURSO EÓLICO

Un aerogenerador obtiene su potencia de entrada convirtiendo la fuerza del viento que actúa sobre las palas del rotor en un par o fuerza de giro. La cantidad de energía transferida por el viento al rotor depende de la densidad del aire, del área de barrido y de la velocidad del viento.

El área de barrido viene determinada por el diámetro de las aspas y, por consiguiente, a mayor área de barrida mayor es la potencia generada. La densidad del aire a presión

atmosférica y a 15 °C es de $1,225 \text{ kg/m}^3$. No obstante, la expresión para calcular el valor de la densidad cuando se dan otras condiciones es la siguiente:

$$\rho = \frac{P}{Rg \cdot T}$$

El tercer factor y más determinante del que depende la energía disponible por el aerogenerador es la velocidad del viento.

Esta energía cinética del viento viene determinada por la conocida ecuación:

$$E = \frac{1}{2} m \cdot v^2$$

m = masa del viento v = velocidad del viento

La masa queda determinada por el volumen y la densidad del aire:

$$m = \rho \cdot V$$

V= volumen de barrido ρ = densidad del aire

Suponiendo un volumen barrido de tipo cilíndrico, tenemos $V = A \cdot L$ donde A es la superficie barrida y L la longitud del cilindro.

La longitud del cilindro se puede expresar en función de la velocidad del aire: $L = v \cdot t$ siendo t el tiempo que tarde la corriente de aire en atravesar el volumen cilíndrico de longitud L.

Sustituyendo en la ecuación de la energía cinética quedaría:

$$E = \frac{1}{2} \rho \cdot V \cdot v^2 = \frac{1}{2} \rho \cdot A \cdot L \cdot v^2 = \frac{1}{2} \rho \cdot A \cdot v^3 \cdot t$$

Finalmente, al dividir esta ecuación por el tiempo tenemos la potencia disponible en el viento que atraviesa el volumen de control cilíndrico indicado:

$$P_0 = E/t = \frac{1}{2} \rho \cdot A \cdot v^3$$

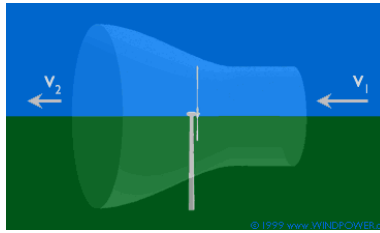
Analizando esta ecuación se puede afirmar que la potencia no depende del número de palas sino del área barrida por estas, la densidad del viento (que a su vez depende de Tº y P) y de la velocidad del viento, por lo que interesará que sea lo más elevada posible siempre y cuando la estructura y el sistema de control lo admita.

2.2. POTENCIA ELÉCTRICA DE UN AEROGENERADOR

El fin de un aerogenerador consiste en transformar la energía del viento en energía eléctrica. Sin embargo, no toda esa energía eólica disponible se puede transformar en energía útil. Así pues, hay un factor de aprovechamiento máximo de la energía eólica del viento, que está definido por la Ley de Betz.

La teoría de Betz se basa en el principio de conservación de la energía. Si el aerogenerador extrae una cierta cantidad de energía de la vena fluida, ésta debe perder la misma cantidad

de energía cinética, por lo que la velocidad a la salida será menor que a la entrada al aerogenerador.



Un aerogenerador no va a ser nunca capaz de extraer el 100 % de la energía contenida en el viento incidente, sino que la potencia capturada por la máquina es significativamente menor.

Por ello se define el coeficiente de potencia de un aerogenerador, que es el rendimiento con el cual funciona el mismo y expresa la fracción de la potencia total del viento incidente que es capturada y aprovechada realmente por el rotor de dicho aerogenerador. Aplicando la teoría de Betz se obtiene la expresión del coeficiente de potencia o C_p y se define como:

$$C_p = \left(\frac{1}{2} (1 + a)^2 \cdot (1 - a) \right)$$

$$\text{donde } a = \frac{v_2}{v_1}, \text{ siendo}$$

$v_1 =$ velocidad del viento a la entrada de la turbina

$v_2 =$ velocidad del viento a la salida de la turbina

El valor máximo que se obtiene de la relación para que la potencia aprovechada sea máxima es $a = \frac{1}{3}$

Finalmente, la potencia aprovechada por el rotor será:

$$P = C_p * \frac{1}{2} \rho \cdot A \cdot v^3$$

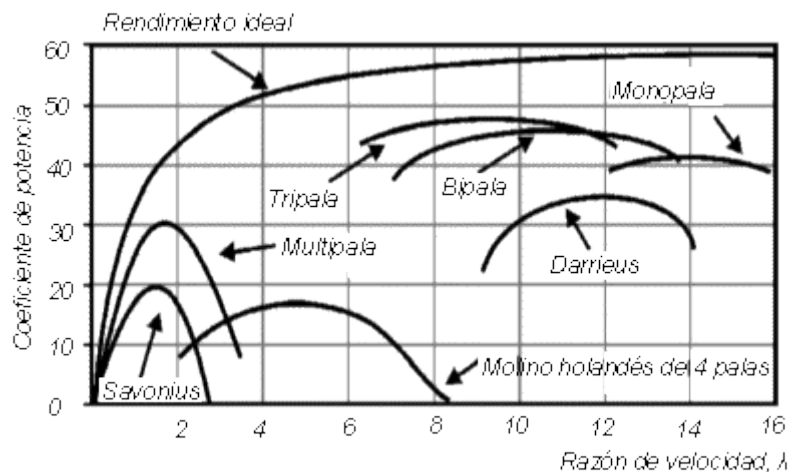
El coeficiente de potencia, al igual que la curva de potencia, son dos parámetros que definen a un aerogenerador. Otra forma de obtener el coeficiente de potencia es simplemente el cociente entre la potencia eléctrica generada por el rotor y la energía eólica disponible en ese momento, es decir:

$$C_p = \frac{\text{Potencia eléctrica}}{\text{Potencial Eólico}} = \frac{V * I}{\frac{1}{2} \rho \cdot A \cdot v^3}$$

El coeficiente de potencia máximo teórico máximo se denomina el límite de Betz, siendo su valor $16/27$ (59%) para un aerogenerador ideal, y nos proporciona el porcentaje máximo de energía que podemos extraer de una corriente de aire. Normalmente el valor medio del coeficiente de potencia de un aerogenerador horizontal oscilará entre un 40% y un 50%.

No obstante, cada tipo de rotor tiene un rango de velocidades para el cual es más eficiente o tiene un mayor coeficiente de potencia. Para clasificarlos se utiliza el parámetro razón de velocidad λ , que es la relación entre la velocidad de punta de la pala o de arrastre y la velocidad del viento $\lambda = (\omega R / V_0)$.

Una turbina eólica con un diseño específico puede operar en un rango de velocidades de punta, pero operará con la mayor eficiencia a una determinada razón de velocidad de punta, es decir, cuando la velocidad de la punta de su álabe sea un valor múltiple determinado de la velocidad del viento. En la siguiente figura se muestra la relación $C_p - \lambda$ de distintos tipos de rotores:



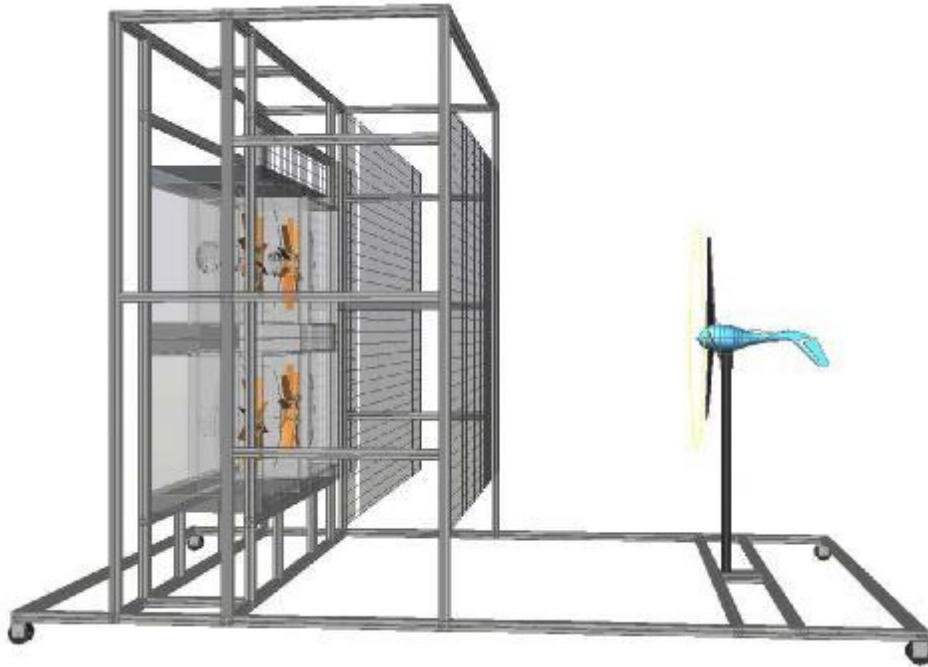
Sin embargo, como el coeficiente de potencia varía considerablemente al variar la velocidad del viento es bastante complicando predecir el rendimiento de los aerogeneradores. Lo que los fabricantes utilizan experimentalmente para medir el rendimiento del aerogenerador es típicamente la curva de potencia, la cual proporciona una relación entre la velocidad de viento a la altura del buje de una turbina y la potencia eléctrica salida.

Mediante las curvas de potencia, es posible predecir el rendimiento de generación de energía de cualquier generador eólico sin considerar cada uno de sus componentes individualmente. La curva de potencia de un aerogenerador es un gráfico que indica cuál será la potencia eléctrica disponible en el aerogenerador a diferentes velocidades del viento. La curva de potencia se obtiene mediante la adquisición de una considerable cantidad de datos de la velocidad del viento (referida al centro del rotor) y de la potencia eléctrica de salida. La medición de ambas variables se debe realizar de forma simultánea con una velocidad de muestreo de 0.5 Hz durante al menos 10 minutos.

3. DESCRIPCIÓN Y FUNCIONAMIENTO DE LA INSTALACION

La instalación consiste en un banco de ensayos tipo abierto compuesto principalmente por un pequeño aerogenerador con una potencia máxima de 1kW, cuatro ventiladores capaces de girar a un frecuencia máxima de 50Hz y un sistema de adquisición de datos conformado por una serie

de sensores y transductores con el fin de obtener los valores de temperatura, presión, velocidad del viento, velocidad del rotor y voltaje e intensidad generados.



3.1. Descripción de los elementos

La instalación, además del aerogenerador, el sistema de medición y los ventiladores, cuenta con otra serie de elementos cuya función también son imprescindibles. A continuación, se describen todos los elementos que constituyen la instalación:

- Aerogenerador: se trata de un microaerogenerador de tipo horizontal con una potencia máxima de 1kW, el cual está formado por tres aspas de radio 2.72 m, con un área barrida de 5.8 m². La potencia nominal de este aerogenerador se da para velocidades del viento comprendidas entre 13.6 y 16 m/s, mientras que la velocidad mínima para que se ponga en funcionamiento es de 3.3 m/s.



Aerogenerador Whisper 200.

- Estructura: está constituida por un una serie de perfiles de aluminio ligero con unas dimensiones de 45 mm x 45 mm y por paneles de rejilla de aluminio cuya función consiste en dar sustento a todos los elementos de la instalación. Se caracteriza por su ligereza, montaje sencillo y modular y gran resistencia al peso y vibraciones. La estructura mide en total 2.7 m de ancho y 4 m de alto.
- Ventiladores: la instalación dispone de 4 ventiladores situados dos a dos de forma contigua en dos niveles de altura distintos y sostenidos por la estructura de aluminio. Los ventiladores son de tipo helicoidal, con la capacidad de generar una elevada velocidad de salida de viento. El diámetro de los ventiladores es de 56 cm y están formados por 10 hélices de poliamida con aislamiento acústico. De acuerdo a las condiciones de la presente instalación, su velocidad máxima de giro es de 50 Hz.
- Variadores: su función en consiste en controlar y modificar de forma electrónica la velocidad de giro de los ventiladores y, en consecuencia, la velocidad del flujo del aire. Se caracterizan por ser trifásicos, alimentados a una tensión de 400 VAC, y con una potencia máxima de salida de 3 kW.
- Sensores y transductores
 - ✘ Anemómetros: la instalación cuenta con 4 anemómetros de hilo caliente situados equidistantemente en una barra corredera transversal de la estructura metálica. Su función consiste en medir la velocidad del viento generada por los ventiladores, en un rango de 0 a 10 m/s.
 - ✘ Sensor de temperatura: formado por el sensor Pt100, para medir la temperatura del tiempo, y un transductor que permite que los datos puedan ser interpretados por el sistema de medida.

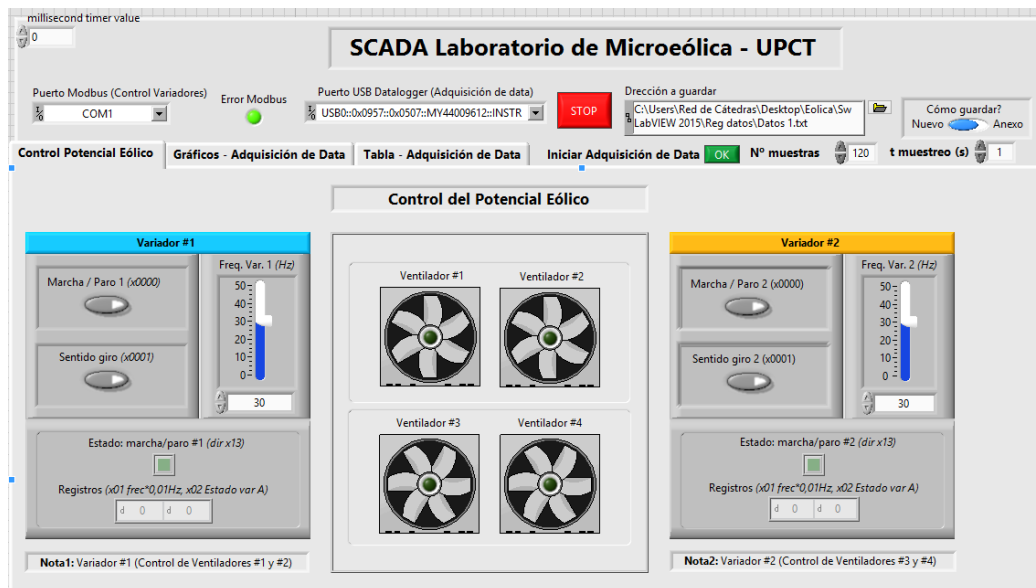
- ✘ Sensor de presión: permite obtener los valores de la presión atmosférica y se caracteriza por su precisión, repetitividad y un buen funcionamiento independientemente de la temperatura.
 - ✘ Sensor de velocidad de giro: formado por un captador de pulsos, que se encarga de captar el número de revoluciones del aerogenerador, y un convertidor de frecuencia para que los datos sean leídos por el sistema de adquisición de datos.
 - ✘ Transductor de tensión.
 - ✘ Transductor de intensidad.
- Otros equipos
 - ✘ Baterías: dos baterías de gel para almacenar la energía producida por el aerogenerador. Tienen una capacidad de 70 Ah.
 - ✘ Regulador de carga.
 - ✘ Inversor.

3.2. Funcionamiento de la instalación

El funcionamiento y la puesta en marcha de la instalación es bastante sencillo, ya se realiza en muy pocos pasos. No obstante, al tratarse de una práctica en fase primeriza, es posible que la activación de los ventiladores no pueda ser realizada desde el programa LabView, sino que deba ser efectuada de forma manual directamente desde los variadores. A continuación, se expondrá más detalladamente como han de realizarse cada uno de los procesos:

a) Método mediante Labview

1. Comprobar que los dos cuadros eléctricos están conectados a la red y los magnetotérmicos están conectados.
2. A continuación, se debe abrir el programa LabView.
3. En el apartado "Control Potencial Eólico", se debe tener la siguiente configuración:

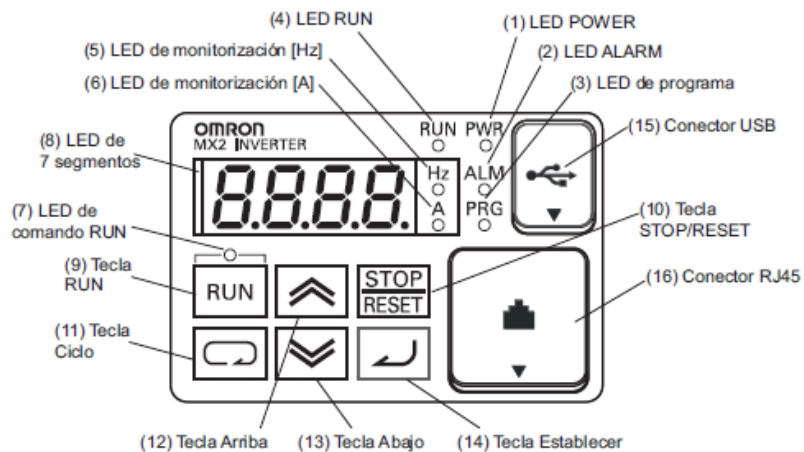



Si los botones de sentido de giro están activados, se deben desactivar porque en tal caso impulsarían el aire hacia atrás.


4. Ajustar mediante el control de pantalla la frecuencia deseada, tanto del “Variador #1” como del “Variador #2”
5. Para poner en marcha los ventiladores, basta con accionar el botón “Marcha/Paro” de cada variador.
6. Para detener el funcionamiento se debe pulsar nuevamente el botón “Marcha/Paro” de cada variador.

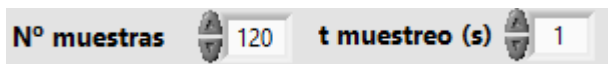
b) Método manual.



1. En primer lugar, se debe comprobar que el cuadro de los variadores (inferior) esté conectado a la red trifásica y el cuadro del resto de elementos eléctrico (superior) también esté conectado a la red.
2. A continuación, se debe comprobar que los magnetotérmicos de ambos cuadros estén levantados o conectados.
3. El siguiente paso consiste en manipular los variadores de frecuencia, con el objetivo de poner en marcha los ventiladores y establecer y/o variar su frecuencia de giro. Para ello se seguirá el siguiente procedimiento:




1) Pulsar la tecla “Ciclo”  hasta llegar a f001.

2) Pulsar la tecla “Establecer”  para entrar en este modo.



3) Ajustar la frecuencia mediante las teclas “Arriba”  y “Abajo” .



4) Para poner en marcha los ventiladores, pulsar la tecla “RUN” .

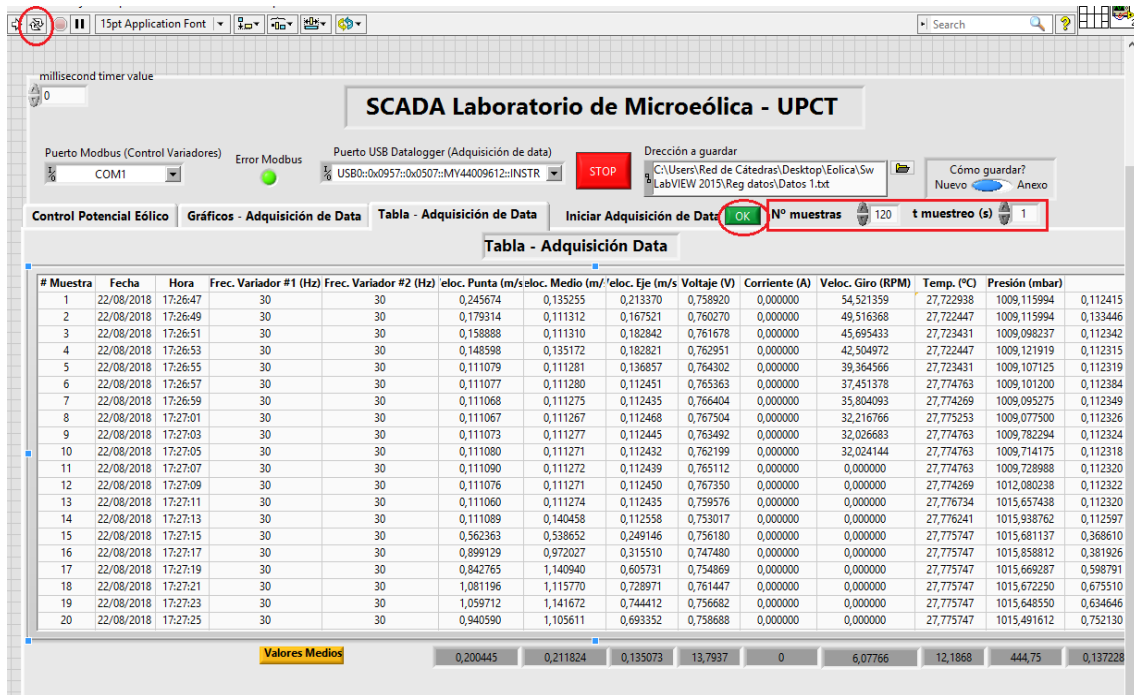
5) Para detener los ventiladores, basta con pulsar la tecla “STOP/RESET” .

4. Una vez realizadas todas las mediciones y se ha completado el uso de la instalación, se deben desconectar todos los magnetotérmicos de los dos cuadros eléctricos, así como los cables de la red eléctrica.

4. TOMA DE DATOS

En esta práctica se llevarán a cabo dos tipos de ensayos para la obtención del perfil de vientos dependiendo de si se le acopla a la instalación un elemento homogeneizador de flujo o no. En concreto, se realizaran dos ensayos: uno con un panel de rejilla intermedio situado entre los ventiladores y el aerogenerador y otra sin la presencia de este elemento. El fin de este ensayo consiste en analizar la influencia del grado de homogeneización del viento en la distribución de los perfiles y en la generación de potencia.

Con respecto a la toma de datos, esta será controlada y recopilada por el programa LabView. Una vez puestos en marcha los ventiladores, el proceso para realizar la toma de datos es muy sencilla. Para comenzar la recopilación de datos se pulsar la tecla  y a continuación la tecla . Es posible modificar el número de muestras que se quieran tomar, así como el tiempo entre muestras. Esto se puede modificar en:



a) ENSAYO SIN PANEL DE REJILLA INTERMEDIO: se realizará un ensayo sin la presencia de la rejilla intermedia. A continuación, se exponen los objetivos a realizar.

1. MAPA DE VIENTOS

El primer objetivo de esta práctica consiste en realizar una toma de valores de la velocidad del viento en distintas posiciones con el fin de obtener que cantidad de energía incide sobre el aerogenerador. Para ello, se recopilarán los valores de la velocidad del viento de los 4 anemómetros, la temperatura y la presión atmosférica. La operación se debe repetir para un mínimo de 4 alturas diferentes, con el fin de obtener un mapa de vientos completo. Para ello se modificará la posición de la barra corredera donde están instalados los anemómetros.

Los ensayos se realizarán a diferentes frecuencias en un rango de 15 Hz a 50 Hz (frecuencia máxima de los variadores) para poder obtener una representación fidedigna. Las frecuencias con las que se va a trabajar son las siguientes: [15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50] Hz

Velocidad del viento, temperatura y presión atmosférica para 15 Hz						
15 Hz	v_{anem1} (m/s)	v_{anem2} (m/s)	v_{anem3} (m/s)	v_{anem4} (m/s)	$T^a(^{\circ}C)$	$P_{manométrica}$ (mbar)
Posición -2						
Posición -1						
Posición +1						

Posición +2						
Velocidad del viento, temperatura y presión atmosférica para 20 Hz						
20 Hz	v_{anem1} (m/s)	v_{anem2} (m/s)	v_{anem3} (m/s)	v_{anem4} (m/s)	$T^a(^{\circ}C)$	$P_{manométrica}$ (mbar)
Posición -2						
Posición -1						
Posición +1						
Posición +2						
Velocidad del viento, temperatura y presión atmosférica para 25 Hz						
25 Hz	v_{anem1} (m/s)	v_{anem2} (m/s)	v_{anem3} (m/s)	v_{anem4} (m/s)	$T^a(^{\circ}C)$	$P_{manométrica}$ (mbar)
Posición -2						
Posición -1						
Posición +1						
Posición +2						
Velocidad del viento, temperatura y presión atmosférica para 30 Hz						
30 Hz	v_{anem1} (m/s)	v_{anem2} (m/s)	v_{anem3} (m/s)	v_{anem4} (m/s)	$T^a(^{\circ}C)$	$P_{manométrica}$ (mbar)
Posición -2						
Posición -1						
Posición +1						
Posición +2						

Velocidad del viento, temperatura y presión atmosférica para 35 Hz						
35 Hz	v_{anem1} (m/s)	v_{anem2} (m/s)	v_{anem3} (m/s)	v_{anem4} (m/s)	$T^a(^{\circ}C)$	$P_{manométrica}$ (mbar)
Posición -2						
Posición -1						
Posición +1						
Posición +2						
Velocidad del viento, temperatura y presión atmosférica para 40 Hz						
40 Hz	v_{anem1} (m/s)	v_{anem2} (m/s)	v_{anem3} (m/s)	v_{anem4} (m/s)	$T^a(^{\circ}C)$	$P_{manométrica}$ (mbar)
Posición -2						

Posición -1						
Posición +1						
Posición +2						
Velocidad del viento, temperatura y presión atmosférica para 45 Hz						
45 Hz	v_{anem1} (m/s)	v_{anem2} (m/s)	v_{anem3} (m/s)	v_{anem4} (m/s)	$T^a(^{\circ}C)$	$P_{manométrica}$ (mbar)
Posición -2						
Posición -1						
Posición +1						
Posición +2						
Velocidad del viento, temperatura y presión atmosférica para 50 Hz						
50 Hz	v_{anem1} (m/s)	v_{anem2} (m/s)	v_{anem3} (m/s)	v_{anem4} (m/s)	$T^a(^{\circ}C)$	$P_{manométrica}$ (mbar)
Posición -2						
Posición -1						
Posición +1						
Posición +2						

2. POTENCIA GENERADA

En esta práctica, también se pretende caracterizar energéticamente al aerogenerador mediante el cálculo de su potencia generada. Se deben tomar los datos de voltaje e intensidad para distintas velocidades del viento y poder obtener así la curva de potencia de este aerogenerador. De esta forma, se puede estudiar el comportamiento real del mismo y comparar la curva de potencia obtenida con la que proporciona el fabricante.

También debemos recopilar la frecuencia a la que gira el rotor del aerogenerador, ya que esta nos permitirá calcular la razón de velocidad (λ). La utilidad de este parámetro reside en relacionarlo con el coeficiente de potencia, pudiendo determinar así qué grado de eficiencia posee el aerogenerador para distintas velocidades de viento.

Las frecuencias elegidas para realizar este estudio son las mismas que para la realización del mapa de viento. **[15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50] Hz.**

Estos datos deben obtenerse simultáneamente al ensayo de mapa de vientos anterior. No obstante, las baterías deben estar descargadas para que haya una circulación de energía desde el aerogenerador a las mismas. De esta forma, el

transductor de intensidad situado aguas arriba de la batería, captará los valores de la intensidad valores de esta, ya que se encuentra aguas arriba de la batería.

FRECUENCIA	15 Hz	20 Hz	25 Hz	30 Hz
VOLTAJE (V)				
INTENSIDAD (A)				
FR. ROTOR(RPM)				
FRECUENCIA	35 Hz	40 Hz	45 Hz	50 Hz
VOLTAJE (V)				
INTENSIDAD (A)				
FR. ROTOR (RPM)				

3. ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DE LA CARGA:

En tercer lugar, se estudiará la influencia en la curva de potencia del aerogenerador cuando se conectan diferentes cargas a la salida de las baterías. En concreto, se conectarán cargas de 50 W, 100 W y 150 W (u otros valores que se elijan). Gracias a la presencia del inversor, se pueden conectar la mayor parte de equipos electrónicos los cuales funcionan mediante corriente alterna. Se deberá realizar un ensayo distinto para cada carga y se deben recopilar los datos de intensidad y voltaje generados. Para agilizar la práctica, el resto de parámetros que se necesiten se pueden tomar del ensayo anterior.

Las frecuencias elegidas para realizar este ensayo serán las mismas que en el anterior: **[15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50] Hz.**

- **CARGA 50 W**

FRECUENCIA	15 Hz	20 Hz	25 Hz	30 Hz
VOLTAJE (V)				
INTENSIDAD (A)				
FRECUENCIA	35 Hz	40 Hz	45 Hz	50 Hz
VOLTAJE (V)				
INTENSIDAD (A)				

- **CARGA 100 W**

FRECUENCIA	15 Hz	20 Hz	25 Hz	30 Hz
VOLTAJE (V)				
INTENSIDAD (A)				
FRECUENCIA	35 Hz	40 Hz	45 Hz	50 Hz
VOLTAJE (V)				
INTENSIDAD (A)				

- **CARGA 150 W**

FRECUENCIA	15 Hz	20 Hz	25 Hz	30 Hz
VOLTAJE (V)				
INTENSIDAD (A)				
FRECUENCIA	35 Hz	40 Hz	45 Hz	50 Hz
VOLTAJE (V)				
INTENSIDAD (A)				

b) ENSAYO CON PANEL DE REJILLA INTERMEDIO

En este ensayo se procederá de igual forma que en el anterior. La diferencia radica en que para este caso se instalará un panel de rejilla de aluminio a la salida de los ventiladores, con el objetivo de que el flujo de aire recibido por el aerogenerador esté más homogeneizado. Con este ensayo se pretende concluir si el grado de homogeneidad de flujo de aire induce una mayor o menor potencia producida por el aerogenerador.

1. MAPA DE VIENTOS:

Se tiene el mismo objetivo que en su homólogo sin rejilla. En este ensayo, las frecuencias vuelven a ser las mismas: [15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50] Hz.

Velocidad del viento, temperatura y presión atmosférica para 15 Hz						
15 Hz	v_{anem1} (m/s)	v_{anem2} (m/s)	v_{anem3} (m/s)	v_{anem4} (m/s)	$T^a(^{\circ}C)$	$P_{manométrica}$ (mbar)
Posición -2						

Posición -1						
Posición +1						
Posición +2						
Velocidad del viento, temperatura y presión atmosférica para 20 Hz						
20 Hz	v_{anem1} (m/s)	v_{anem2} (m/s)	v_{anem3} (m/s)	v_{anem4} (m/s)	$T^a(^{\circ}C)$	$P_{manométrica}$ (mbar)
Posición -2						
Posición -1						
Posición +1						
Posición +2						
Velocidad del viento, temperatura y presión atmosférica para 25 Hz						
25 Hz	v_{anem1} (m/s)	v_{anem2} (m/s)	v_{anem3} (m/s)	v_{anem4} (m/s)	$T^a(^{\circ}C)$	$P_{manométrica}$ (mbar)
Posición -2						
Posición -1						
Posición +1						
Posición +2						
Velocidad del viento, temperatura y presión atmosférica para 30 Hz						
30 Hz	v_{anem1} (m/s)	v_{anem2} (m/s)	v_{anem3} (m/s)	v_{anem4} (m/s)	$T^a(^{\circ}C)$	$P_{manométrica}$ (mbar)
Posición -2						
Posición -1						
Posición +1						
Posición +2						

35 Hz	v_{anem1} (m/s)	v_{anem2} (m/s)	v_{anem3} (m/s)	v_{anem4} (m/s)	$T^a(^{\circ}C)$	$P_{manométrica}$ (mbar)
Posición -2						
Posición -1						
Posición +1						
Posición +2						
Velocidad del viento, temperatura y presión atmosférica para 40 Hz						
40 Hz	v_{anem1} (m/s)	v_{anem2} (m/s)	v_{anem3} (m/s)	v_{anem4} (m/s)	$T^a(^{\circ}C)$	$P_{manométrica}$ (mbar)
Posición -2						
Posición -1						
Posición +1						
Posición +2						

Velocidad del viento, temperatura y presión atmosférica para 45 Hz						
45 Hz	v_{anem1} (m/s)	v_{anem2} (m/s)	v_{anem3} (m/s)	v_{anem4} (m/s)	$T^a(^{\circ}C)$	$P_{manométrica}$ (mbar)
Posición -2						
Posición -1						
Posición +1						
Posición +2						
Velocidad del viento, temperatura y presión atmosférica para 50 Hz						
45 Hz	v_{anem1} (m/s)	v_{anem2} (m/s)	v_{anem3} (m/s)	v_{anem4} (m/s)	$T^a(^{\circ}C)$	$P_{manométrica}$ (mbar)
Posición -2						
Posición -1						
Posición +1						
Posición +2						

Velocidad del viento, temperatura y presión atmosférica para 50 Hz						
50 Hz	v_{anem1} (m/s)	v_{anem2} (m/s)	v_{anem3} (m/s)	v_{anem4} (m/s)	$T^a(^{\circ}C)$	$P_{manométrica}$ (mbar)
Posición -2						
Posición -1						
Posición +1						
Posición +2						

2. POTENCIA GENERADA

Nuevamente, se debe obtener la potencia generada por la turbina. Para ello se deben recopilar los datos de intensidad y voltaje correspondientes a cada frecuencia de ventiladores. También se tomarán los datos de frecuencia de giro del rotor. Se debe comprobar que la corriente pueda circular hacia las baterías. Frecuencias: **[15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50] Hz.**

FRECUENCIA	15 Hz	20 Hz	25 Hz	30 Hz
VOLTAJE (V)				
INTENSIDAD (A)				
FR. ROTOR (RPM)				

FRECUENCIA	35 Hz	40 Hz	45 Hz	50 Hz
VOLTAJE (V)				
INTENSIDAD (A)				
FR. ROTOR (RPM)				

3. ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DE LA CARGA.

Por último, se realizará de nuevo la conexión de diferentes cargas a las baterías del aerogenerador (50 W, 100 W y 150 W) y se comprobará su influencia en la curva de potencia del aerogenerador. Habrá que realizar los tres últimos ensayos y tomar los datos de intensidad y voltaje.

- **CARGA 50 W**

FRECUENCIA	15 Hz	20 Hz	25 Hz	30 Hz
VOLTAJE (V)				
INTENSIDAD (A)				
FRECUENCIA	35 Hz	40 Hz	45 Hz	50 Hz
VOLTAJE (V)				
INTENSIDAD (A)				

- **CARGA 100 W**

FRECUENCIA	15 Hz	20 Hz	25 Hz	30 Hz
VOLTAJE (V)				
INTENSIDAD (A)				
FRECUENCIA	35 Hz	40 Hz	45 Hz	50 Hz
VOLTAJE (V)				
INTENSIDAD (A)				

- **CARGA 150 W**

FRECUENCIA	15 Hz	20 Hz	25 Hz	30 Hz
VOLTAJE (V)				
INTENSIDAD (A)				
FRECUENCIA	35 Hz	40 Hz	45 Hz	50 Hz

VOLTAJE (V)				
INTENSIDAD (A)				

5. PROCESADO Y PRESENTACIÓN DE RESULTADOS.

Se debe realizar un informe en el que se procesen todos los datos obtenidos, con los cuales se deben obtener los siguientes enunciados para el **ensayo sin rejilla intermedia** y el **ensayo con rejilla intermedia**:

1. ELABORAR UN MAPA DE VIENTOS:

- 1.1. Mostrar en las tablas proporcionadas los valores promedio obtenidos de la velocidad del viento por cada anemómetro en cada una posiciones o niveles de altura para todas las frecuencias solicitadas
- 1.2. Obtener el mapa de vientos del plano vertical. Esto quiere decir que se debe obtener la velocidad promedio del viento para cada una de las posiciones o niveles (independientemente del anemómetro) en función de la frecuencia. Se deben incluir gráficos y un análisis de los resultados obtenidos.
- 1.3. Obtener el mapa de vientos del plano horizontal. Se debe obtener la velocidad promedio del viento para cada una de anemómetros (independientemente del nivel de altura) en función de la frecuencia. Se deben incluir gráficos y un análisis de los resultados obtenidos.
- 1.4. Realizar una comparación entre los resultados obtenidos en el ensayo sin rejilla intermedia y en el ensayo con la presencia de la rejilla. Se debe obtener cuál de los dos perfiles de viento tiene un mayor grado de homogeneidad. El procedimiento de este apartado consiste en discernir cual tiene una mayor desviación típica media total.

2. ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO ENERGÉTICO DEL AEROGENERADOR:

- 2.1. Obtener la curva de potencia del aerogenerador. Como se ha indicado en el capítulo de toma de datos, tanto los valores de velocidad de viento como de intensidad y voltaje, se han de obtener del primer ensayo para el mapa de vientos. Comparar la curva de potencia obtenida con la proporcionada por el fabricante.
- 2.2. Calcular el potencial eólico del viento que incide sobre el aerogenerador.
- 2.3. Obtener el coeficiente de potencia y la razón de velocidad. Calcular su función y compararla con la gráfica proporcionada.

Nuevamente, se ha de proporcionar análisis y justificaciones para los apartados. También se deben comparar los resultados obtenidos para los ensayos con y sin rejilla.

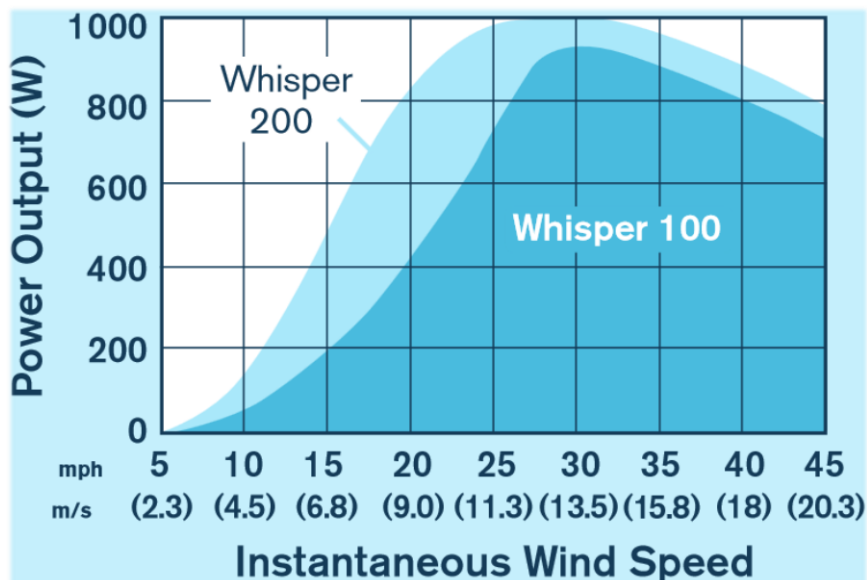
3. ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DE LA CARGA.

- 3.1. Calcular la curva de potencia para cada una de las tres cargas. Realizar una comparación entre ellas y analizar los resultados.
- 3.2. Finalmente, realizar una comparación entre los ensayos con el elemento homogeneización de flujo y sin él.

NOTA: los datos obtenidos son mediante una hoja de Excel para cada frecuencia. Se deben procesar esos datos y realizar sus valores promedio para incluirlos en las tablas.

El informe de la práctica debe incluir las circunstancias o incidencias especiales que se produjeran durante la misma. Igualmente debe incluir las tablas anteriores con los datos en bruto, los cálculos realizados durante el procesado correspondiente y la presentación de los resultados en forma de tablas o gráficas según convenga.

Es importante indicar en las tablas y gráficos los nombres y unidades de las variables representadas. En los gráficos se deben elegir las escalas y rotular los ejes para presentar los resultados de la forma más clara y eficiente posible.



Bibliografía

1. SANCHEZ KAISER, ANTONIO. *Energía Eólica*. s.l. : Horacio Escarabajal, 2003.
2. *GUÍA SOBRE TECNOLOGÍA MINIEÓLICA*. MADRID : s.n., 2012.
3. WWEA. *Small Wind World Report Summary*. 2017.
4. VILORIA, JOSÉ ROLDÁN. *Energía renovables. Lo que hay que saber*. 2013.
5. VILLARRUBIA LÓPEZ, MIGUEL. *Ingeniería de la energía eólica*. s.l. : Marcombo, 2011.
6. ESCUDERO, J.M. *Manual de energía eólica*. s.l. : Mundi-Prensa,, 2008.
7. FERNÁNDEZ SALGADO, JOSÉ MARÍA. *Guía completa de la energía eólica*. s.l. : Antonio Madrid Vicente, 2011.
8. Española, Foro de la Industria Nuclear. *Energía 2017*. 2017.
9. BEZZIA. Historia de la energía eólica. <https://www.renovablesverdes.com/origenes-e-historia-de-la-energia-eolica/>. [En línea] 2017.
10. VALLEJOS CAMPOS, LUIS. Energía minieólica: 6 cosas que debes saber. [En línea] 2015. <http://clickrenovables.com/blog/energia-minieolica-6-cosas-que-debes-saber/>.
11. ENAIR. Aerogeneradores. [En línea] <https://www.enair.es/es/aerogeneradores>.
12. MUNDIAL, BANCO. Consumo de energía eléctrica per cápita. [En línea] <https://datos.bancomundial.org/indicador/EG.USE.ELEC.KH.PC>.

