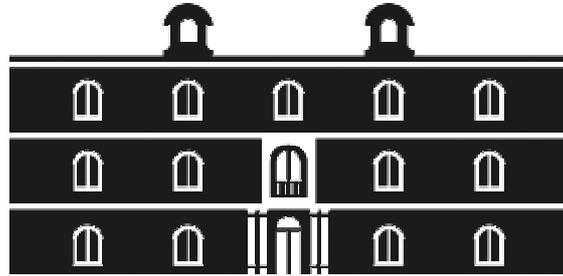




Universidad
Politécnica
de Cartagena



industriales
etsii UPCT

DESARROLLO DE UN BANCO DE ENSAYO PARA LA EVALUACIÓN DE LAS PRESTACIONES DE AEROGENERADORES DE PEQUEÑA POTENCIA.

Titulación: MÁSTER ENERGIAS RENOVABLES

Alumno: Juan Carlos Serrano Collazo

Director: Antonio Sánchez Káiser

Cartagena, 8 de Julio de 2011

ÍNDICE

| | |
|--|----|
| Capítulo 1. INTRODUCCIÓN | 6 |
| 1.1. Introducción y justificación | 6 |
| 1.2. Objetivos del trabajo | 8 |
| 1.3. Desarrollo del trabajo | 8 |
| Capítulo 2. CARACTERÍSTICAS DE LOS SISTEMA EÓLICOS DE PEQUEÑA POTENCIA | 9 |
| 2.1. Introducción | 9 |
| 2.2. Breve reseña histórica | 9 |
| 2.3. El recurso eólico | 14 |
| 2.3.1. Estimación del recurso eólico | 18 |
| 2.3.2. Representación estadística del viento | 21 |
| 2.4. Parámetros que caracterizan el comportamiento de un aerogenerador | 22 |
| 2.5. Sistemas eólicos de pequeña potencia | 29 |
| 2.5.1. Elementos de una instalación eólica de pequeña potencia | 31 |
| 2.5.2. Elementos de las instalaciones eólicas aisladas | 32 |
| 2.6. Descripción general del sistema | 33 |
| 2.6.1. La turbina eólica o aerogenerador | 33 |
| 2.6.2. Las baterías o acumuladores | 34 |
| 2.6.3. El regulador de carga | 34 |
| 2.6.4. El Inversor | 35 |
| Capítulo 3. DISEÑO DEL BANCO DE ENSAYOS | 37 |
| 3.1. Introducción | 37 |
| 3.2. La estructura | 38 |
| 3.3. Los ventiladores | 39 |
| 3.4. Sistema de control de velocidad de los ventiladores | 41 |
| 3.5. Elemento homogenizadores de la vena fluida | 43 |
| 3.5.1. Rejillas de panal | 43 |
| 3.5.2. Pantallas o rejillas de aire | 43 |
| 3.6. El aerogenerador | 44 |
| 3.7. Sistema de adquisición de datos | 46 |
| 3.8. Presupuesto de la instalación | 46 |
| Capítulo 4. DISEÑO DEL SISTEMA DE MEDIDA | 48 |
| 4.1. Introducción | 48 |
| 4.2. Medición de la velocidad del aire | 49 |
| 4.2.1. Anemómetro de rotación | 49 |
| 4.2.2. Anemómetro de compresión | 49 |
| 4.2.3 Anemómetro de hilo caliente, térmico | 50 |

| | |
|---|--------|
| 4.3. Medición de la temperatura | 52 |
| 4.3.1. Detectores de temperatura resistivos | 52 |
| 4.3.2. Sonda de temperatura Pt 100 | 52 |
| 4.3.3. Convertidor de temperatura TxRail 4-20 mA | 54 |
| 4.4. Medición de la presión barométrica | 55 |
| 4.5. Medición de la velocidad de giro del aerogenerador | 56 |
| 4.5.1. El tacómetro | 56 |
| 4.6. Medición de voltaje, corriente directa | 58 |
| 4.6.1. Transductor de medición de voltaje para voltaje de corriente directa | 58 |
| 4.7. Medición de Intensidad, corriente directa | 59 |
| 4.7.1. Transductor toroidal de efecto Hall | 59 |
| 4.8. Sistema de adquisición de datos | 60 |
| 4.8.1. Elementos que componen un sistema de adquisición de datos | 61 |
| 4.8.2. Sistema de adquisición de datos: Data logger 34980A | 62 |
| 4.8.3. Tarjeta multiplexora 34921A | 63 |
| 4.8.4. Software para la adquisición de datos | 65 |
| 4.8.4.1 Configuración del software de adquisición de datos Agilent | 66 |
| 4.8.4.2. Exportación de base de datos | 70 |
| Capítulo 5. PLANIFICACIÓN DE LOS ENSAYOS | 71 |
| 5.1. Introducción | 71 |
| 5.2. Tipos de ensayos y tablas de medidas | 72 |
| 5.2. Metodología de la medición | 73 |
| 5.3.1. Elección de los puntos de toma de muestras | 73 |
| 5.3.2. Velocidad del aire | 73 |
| 5.3.3. Temperatura y la presión barométrica | 75 |
| 5.3.4. Velocidad de giro del aerogenerador | 77 |
| 5.3.5. Intensidad de corriente generada por el aerogenerador, corriente directa | 77 |
| 5.3.6. Tensión de corriente generada por el aerogenerador | 78 |
| 5.3.7. Organización de la información | 79 |
| Capítulo 6. OBTENCIÓN Y TRATAMIENTO DE LOS RESULTADOS | 80 |
| 6.1. Introducción. | 80 |
| 6.2. Potencial eólico | 80 |
| 6.2.1. Tabla de datos | 81 |
| 6.2.2. Curva potencial eólico | 81 |
| 6.2.3. Mapa de velocidades | 82 |
| 6.3. Potencia de la máquina | 85 |
| 6.4. Coeficiente de potencia C_p | 88 |
| Capítulo 7. CONCLUSIONES Y PROPUESTAS DE MEJORA | 91 |
| BIBLIOGRAFÍA | 93 |

LISTA DE FIGURAS

| | | |
|-----|--|----|
| 1. | Molino de eje vertical tipo chino | 10 |
| 2. | Molino tipo mediterráneo | 10 |
| 3. | Molino de viento en Holanda | 11 |
| 4. | Molino mediterráneo en Playa de los Genoveses | 11 |
| 5. | Molino multipala americano con caja reductora | 12 |
| 6. | Fotografía de Charles Brush | 13 |
| 7. | Circulación del aire en la atmósfera | 14 |
| 8. | Dirección del aire en el Ecuador | 14 |
| 9. | Obstáculos naturales | 15 |
| 10. | Obstáculos artificiales | 15 |
| 11. | Rosa de los vientos eólica | 15 |
| 12. | Variaciones de la velocidad del viento con la altura, exponencial de Hellmann | 18 |
| 13. | Velocidad media a una altura de 30 m | 20 |
| 14. | Distribución de frecuencia de la velocidad del viento | 22 |
| 15. | Curva de eficiencia de Betz | 23 |
| 16. | Aprovechamiento energético del viento | 23 |
| 17. | Curva de rendimiento de diferentes tipos de aerogeneradores | 24 |
| 18. | Coefficiente de potencia (C_p) de turbina eólica en función de la velocidad específica (λ) y ángulo de paso (β). | 25 |
| 19. | Superficie de control del coeficiente de potencia | 26 |
| 20. | Curva de potencia de un aerogenerador | 27 |
| 21. | Curva de potencia de un aerogenerador de 800 kW de potencia nominal | 27 |
| 22. | Distribución de la velocidad del viento y energía | 28 |
| 23. | Pérdidas de energía en los aerogeneradores | 28 |
| 24. | Microeólica en aplicaciones residenciales | 30 |
| 25. | Instalación eólica de pequeña potencia para cargar baterías | 32 |
| 26. | Diferentes tipos de aerogeneradores de pequeña potencia | 33 |
| 27. | Batería monobloque | 34 |
| 28. | Regulador de carga | 35 |
| 29. | Inversor de onda senoidal pura | 35 |
| 30. | Perfiles y rejillas de aluminio | 38 |
| 31. | Vista general de la estructura soporte del banco de ensayo | 39 |
| 32. | Ventilador helicoidal modelo CJHCH-56-4T-2 | 40 |
| 33. | Curva de potencia del ventilador CJHCH-56-4T-2 | 40 |
| 34. | Distribución de los ventiladores en la instalación, parte posterior de la instalación | 41 |
| 35. | Diagrama del variador de frecuencia | 41 |
| 36. | Distribución de los variadores de frecuencia MX2 en la instalación | 42 |
| 37. | Rejillas de panal | 43 |
| 38. | Distribución de las pantallas metálicas de reducción de turbulencia | 44 |
| 39. | Aerogenerador Air X 400 | 45 |
| 40. | Anemómetro de cazoleta | 49 |

| | | |
|-----|--|----|
| 41. | Tubo de Pitot en el interior del flujo de aire | 50 |
| 42. | Anemómetro basado en el tubo de Pitot | 50 |
| 43. | Anemómetro de hilo caliente y circuito con el puente de Wheatstone | 51 |
| 44. | Anemómetro de hilo caliente EE575 | 51 |
| 45. | Sonda Pt 100 | 52 |
| 46. | Curva característica de resistencia de un sensor Pt 100 | 53 |
| 47. | Modo de conexión de 3 hilos | 53 |
| 48. | Convertidor de temperatura TxRail 4-20 mA | 54 |
| 49. | Conexión eléctrica del convertidor de temperatura TxRail 4-20 mA | 54 |
| 50. | Barómetro electrónico HD 9408T BARO | 56 |
| 51. | Tacómetro digital de mano | 56 |
| 52. | Convertidores universales de frecuencia TACO flex | 57 |
| 53. | Sensor magnético de efecto Hall 1GT101DC | 57 |
| 54. | Transductor de medición de voltaje para voltaje de corriente directa | 58 |
| 55. | Esquema de conexión de transductor MCR-VDC-UI-B-DC | 59 |
| 56. | Núcleo magnético toroidal | 59 |
| 57. | Transductor toroidal de efecto Hall DHR-C420 | 60 |
| 58. | Esquema de conexión al sistema de adquisición de datos | 60 |
| 59. | Diagrama de bloque de un sistema de adquisición de datos | 61 |
| 60. | Sistema de adquisición de datos data logger 34980A | 63 |
| 61. | Conector de entrada de 50 pines | 64 |
| 62. | Tarjeta multiplexora 34921A | 65 |
| 63. | Ventana principal del software de registro de datos Agilent BenchLink Data Logger Pro | 66 |
| 64. | Crear una configuración de adquisición de datos | 67 |
| 65. | Identificación de la tarjeta multiplexora 34921A | 67 |
| 66. | Pantalla de configuración de los canales a muestrear | 68 |
| 67. | Definición de secuencia e intervalo de muestreo | 68 |
| 68. | Etapa de monitoreo continuo | 69 |
| 69. | Exportación de datos | 69 |
| 70. | Representación gráfica de los canales muestreados | 70 |
| 71. | Fichero exportado en formato Excel | 70 |
| 72. | Cable flexible de acero y accesos de montaje | 73 |
| 73. | Vista frontal, niveles de muestreo | 74 |
| 74. | Vista superior, perfiles de muestreo de velocidad | 74 |
| 75. | Configuración de la instrumentación para la medición de la velocidad del aire | 75 |
| 76. | Colocación de las sondas de temperatura y velocidad | 75 |
| 77. | Ubicación del barómetro electrónicos HD 9408T BARO | 76 |
| 78. | Configuración del sistema de adquisición de dato y el barómetro | 76 |
| 79. | Ubicación del sensor magnético de efecto Hall 1GT101DC | 77 |
| 80. | Configuración del sistema para la medición de intensidad | 78 |
| 81. | Configuración del sistema para la medición de tensión | 78 |
| 82. | Curva de potencial real del aire | 81 |
| 83. | Comportamiento de la velocidad del aire para diferentes puntos de muestreo | 82 |
| 84. | Comportamiento de la velocidad del aire para diferentes frecuencias | 83 |
| 85. | Distribución de los ventiladores | 83 |
| 86. | Comportamiento de la velocidad para diferentes velocidades de los ventiladores | 84 |

| | | |
|-----|--|----|
| 87. | Distribución de la velocidad del aire en los perfiles analizados | 84 |
| 88. | Curva de potencia del aerogenerador a densidad media del aire de 1,205 kg/m ³ | 86 |
| 89. | Comportamiento de la potencia en función de la velocidad de rotación del aerogenerador | 87 |
| 90. | Comportamiento de la velocidad de rotación del aerogenerador en función de la velocidad del aire | 87 |
| 91. | Comparación entre la curva de potencia estimada y curva de potencia teórica | 88 |
| 92. | Coefficiente de potencia en función de la velocidad del aire. Densidad 1,205 kg/m ³ | 88 |
| 93. | Coefficiente de potencia Cp en función de la velocidad específica λ | 89 |

LISTA DE TABLAS

| | | |
|-----|--|----|
| 1. | Escala de Beaufort | 17 |
| 2. | Criterio de apreciación en tierra de la escala de Beaufort | 17 |
| 3. | Valores del exponente de Hellmann en función de la rugosidad del terreno | 18 |
| 4. | Clasificación estándar de clases de viento | 21 |
| 5. | Clasificación en función de su potencia. Fuente: Artículo Energía Eólica IDEA | 30 |
| 6. | Características de diferentes modelos de aerogeneradores de pequeña potencia | 31 |
| 7. | Características técnicas del ventilador CJHCH-56-4T-2 | 40 |
| 8. | Características técnicas del aerogenerador Air X 400 | 45 |
| 9. | Tabla del presupuesto de los elementos estructurales | 46 |
| 10. | Tabla del presupuesto de la instrumentación de la instalación | 47 |
| 11. | Parámetros a medir en los ensayos | 48 |
| 12. | Configuración de los canales de salida de la tarjeta multiplexora 34921A | 64 |
| 13. | Recogida de datos para determinar el potencial eólico | 72 |
| 14. | Recogida de datos para determinar la curva de potencia | 72 |
| 15. | Recogida de datos para determinar el coeficiente de potencia Cp | 72 |
| 16. | Hoja de recogida de datos | 79 |
| 17. | Tabla de datos, potencial del viento | 81 |
| 18. | Comportamiento de la velocidad del aire a velocidad máxima de los ventiladores | 82 |
| 19. | Potencia generada para diferentes velocidades de rotación de los ventiladores | 85 |

INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1. Introducción y justificación

Hoy en día, la demanda de energía está creciendo junto con la preocupación por los numerosos problemas asociados con las fuentes de suministros convencionales. El uso generalizado de las fuentes de energía basados en la combustión, y la contaminación asociada con ellos, ha dado lugar a serios desafíos para la sociedad que se manifiesta a través de los convenios firmados en la cumbre de de Kioto lo que ha generado la necesidad de energía alternativas limpias y renovables.

La combustión de los hidrocarburos ha sido una fuente importante de energía para el mundo occidental desde hace muchos años. Sin embargo, las disponibilidades de fuentes convencionales son cada vez menores y expuestas a disminuir a largo plazo.

La energía eólica es una fuente de energía, que tiene poco impacto ambiental, completamente renovable y limpia al no contaminar el medio ambiente con gases ni agravar el efecto invernadero, y es una valiosa alternativa frente a los combustibles no renovables como el petróleo. Otra característica de la energía producida por el viento es su infinita disponibilidad para ser utilizada en aplicaciones en tierra como en el mar.

El aprovechamiento de la energía eólica constituye una alternativa muy importante y competitiva a nivel mundial tanto en sistemas eólicos aislados, como en grandes parques eólicos interconectados directamente a la red energética. De esta manera se reemplazan los combustibles tradicionales, sin originar contaminación ni cambios ecológicos en el ambiente.

En la actualidad, la energía eólica presenta el crecimiento más rápido a nivel mundial de todas las energías. Datos del Global Wind Energy Council revelar a 31 de diciembre de 2010 que la potencia eólica instalada en España era de 19.959 MW (20 % del total del sistema eléctrico nacional), cubriendo durante ese año el 16 % de la demanda eléctrica. Convirtiendo así el tercer país a nivel mundial en cuanto a potencia instalada, por detrás de Alemania y los Estados Unidos.

Esto ha impulsado el desarrollo de un amplio campo de investigación asociado al desarrollo de la tecnología con el objetivo de que sus costes sean competitivos frente a las fuentes de energía convencionales. Siendo la aerodinámica del aerogenerador uno de los frentes de investigación más importante para optimizar la potencia generada.

En el campo de la energía eólica, los desarrollos más importantes en la tecnología han ido dirigidos hacia equipos de grandes potencias. Actualmente existen máquinas eólicas capaces de proporcionar potencias superiores a los 7 MW. Sin embargo, el campo de la pequeña eólica esta todavía por desarrollar.

La energía eólica puede satisfacer el 12% de la demanda mundial de energía eléctrica en 2020 y el 22% en 2030, según los datos que ha hecho públicos el Consejo Eólico Mundial (Global Wind Energy Council, GWEC) en su informe 2010 sobre el estado del sector.

El mercado mundial de los pequeños aerogeneradores presenta un desarrollo prometedor. Actualmente, los fabricantes de grandes aerogeneradores empiezan a realizar incursiones en este sector. Para la integración de este tipo de energía a la red es necesario en muchos países el desarrollo de nuevos marcos regulatorios que activen el mercado. Existiendo un prometedor mercado para el empleo de pequeños aerogeneradores en aplicaciones aisladas, donde se está incrementando la demanda de instalaciones híbridas (fotovoltaica y aerogeneradores de pequeña potencia) en sistemas aislados.

En los últimos años se están produciendo avances importantes en este campo de la energía eólica de baja potencia. El líder mundial en este mercado es EE.UU. según la American Wind Energy Association (AWEA), la previsión es alcanzar una capacidad instalada en aerogeneradores de pequeña potencia de 1.700 MW en 2013. En Europa, el Reino Unido es el país más activo, disponiendo de planes para promoción de la energía con aerogeneradores de pequeña potencia que prevén alcanzar una capacidad total instalada de 1.300 W en 2020.

El gran potencial de la energía minieólica o de pequeña potencia en España todavía no se ha desarrollado, aún disponiendo de un razonable recurso eólico y de un sector industrial emergente, cada día más competitivo técnicamente, en el cual se podría replicar el éxito obtenido en la tecnología eólica de gran potencia, pero sin olvidar que el papel de esta tecnología es producir energía eléctrica de forma distribuida, en los mismos emplazamientos en los que se demanda, evitando las consabidas pérdidas de energía en su transporte desde lugares lejanos. Esta filosofía ha calado ya en otros países, como Estados Unidos, donde la tecnología eólica de pequeña potencia ya alcanzaba una capacidad total de 80 MW en 2008, siendo más de 10.500 los aerogeneradores pequeños (la mayoría de ellos con potencias comprendidas entre 0,1 y 10 kW) instalados en el último año con una facturación de 77 millones de dólares. Actualmente, en España los aerogeneradores con potencias inferiores a 100 kW sólo se utilizan para generar electricidad en entornos aislados, alejados de la red y generan en total, aunque es difícil de predecir, una potencia de 7 MW.

En el campo de la investigación, los principales objetivos se centran en incrementar la viabilidad de las aplicaciones eólicas de pequeña potencia a través de la investigación y desarrollo de generadores de pequeña potencia, para su optimización en términos de fiabilidad, reducción de emisiones de ruido y aumento de la energía capturada. E innovación, tanto en los distintos componentes que lo constituyen como en los nuevos desarrollos. Como conclusiones a la situación actual del mercado de la energía eólica de pequeña potencia se puede decir que constituye una importante opción energética, ya que tiene ventajas muy importantes frente a otras tecnologías, como es la posibilidad de ubicar sus instalaciones casi en cualquier sitio con un potencial eólico moderado. Dentro de este marco, existen iniciativas para desarrollar varios proyectos innovadores que sirvan de demostración de este tipo de instalaciones, mostrando su gran utilidad para generación de energía en lugares con viento moderado, como integraciones en los tejados de las viviendas o en polígonos industriales.

1.2. Objetivos del trabajo

El objetivo general del presente Trabajo Fin de Master es la realización de un banco de ensayos para la evaluación de aerogeneradores de pequeña potencia con el propósito de que en futuras investigaciones sirva para optimizar los parámetros aerodinámicos de los mismos y mejorar con ello su eficiencia.

Este objetivo general se puede desglosar a su vez en dos. Por un lado, el diseño y conformación del sistema de generación del viento mediante ventiladores de gran potencia y su sistema de control mediante variadores de frecuencia y por otro lado la selección, montaje y evaluación de los equipos de medidas y del sistema de adquisición de datos que conforman en su conjunto el banco de ensayo.

Una vez estudiado y conformado el banco de ensayo, nos centraremos en evaluar, como forma de comprobación de la efectividad del mismo, un aerogenerador de 400 W de potencia.

El diseño y construcción del banco de ensayo estará dirigido para la evaluación de aerogeneradores de pequeña potencia cuyo radio de pala no sea mayor a 2 m, así como para prototipos a escala de aerogeneradores de gran potencia. En cuanto a la instrumentación requerida en los ensayos se valorará la velocidad del viento, así como las condiciones ambientales de temperatura del aire y presión barométrica. En el aerogenerador se medirá la potencia y la tensión generada como consecuencia de la variación de la velocidad del aire incidente así como la velocidad angular del giro. Todos estos datos se deben registrar periódicamente en un sistema de adquisición de datos, para la cual se hizo necesario estudiar y evaluar las prestaciones de las sondas y traductores utilizados en el ensayo así como sus parámetros de salida que permitan posteriormente ser interpretados y analizados .

1.3. Desarrollo del trabajo

En primer lugar, se definen los parámetros más importantes que se utilizan para caracterizar el comportamiento de los aerogeneradores y se muestran su influencia sobre el mismo. A continuación, se realiza una revisión bibliográfica sobre sistemas eólicos aislados de pequeña potencia. Posteriormente, se presenta el banco de ensayo así como la selección de la instrumentación y el sistema de adquisición de datos. En la sección siguiente se analizan los resultados obtenidos en el ensayo y se caracteriza el comportamiento del aerogenerador de la instalación, dejando para el capítulo final las propuestas de mejoras de la instalación experimental.

CARACTERÍSTICAS DE LOS SISTEMAS EÓLICOS DE PEQUEÑA POTENCIA

2.1 Introducción

En este capítulo se presentan algunos aspectos básicos relacionados con los sistemas eólicos que resultan importantes para la comprensión de su funcionamiento y por tanto para la definición del banco de ensayo a llevar a cabo a través de este proyecto. Se presenta, en primer lugar, una breve reseña histórica de los sistemas eólicos hasta nuestros días. A continuación, se describe el recurso eólico, punto clave en el desarrollo de estos sistemas. Posteriormente se introducen los parámetros que caracterizan el comportamiento de los aerogenerador, para concluir en este capítulo haciendo una descripción más exhaustiva de los sistemas eólicos de pequeña potencia.

2.2 Breve reseña histórica

La energía eólica es la energía obtenida del viento, es decir, la energía cinética generada por efecto de las corrientes de aire, y que es transformada por el hombre para su utilización. El término *eólico* viene del latín *Aeolicus*, relativo a Eolo, dios de los vientos en la mitología griega

La energía del viento se ha utilizado esencialmente en el bombeo de agua, la trilla y molienda de productos agrícolas y en los últimos años en la generación de electricidad.

La fuerza del viento se ha aprovechado durante muchos siglos. Los documentos históricos más antiguos que se conocen acerca del aprovechamiento de la energía eólica son unos grabados egipcios que tratan de la navegación a vela del cuarto o quinto milenio antes de Cristo.

La primera máquina eólica conocida por la historia aparece en el año 1700 a.C., siendo los babilonios los pioneros en utilizar molinos de viento para bombear agua con el fin de regar sus campos. Estas máquinas conocidas como panémonas captaban la energía del viento sobre aspas o velas construidas con maderas y telas.

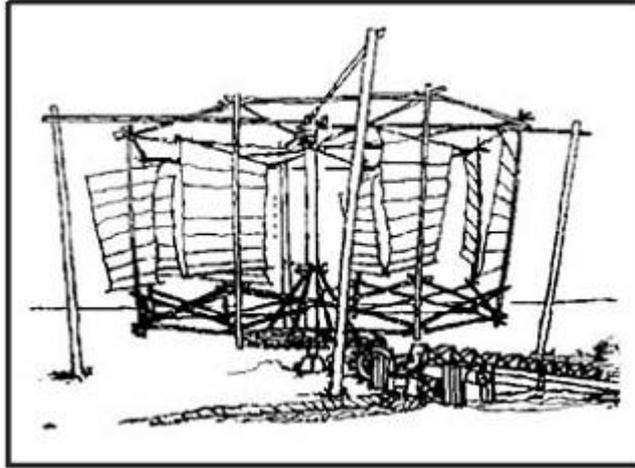


Fig. 1 Molino de eje vertical tipo chino.

Los molinos de eje horizontal debieron surgir por primera vez en la antigua Persia, probablemente con anterioridad a la época islámica. Su invención debió responder a la necesidad de adaptar las máquinas eólicas de eje vertical al bombeo de agua.

Hasta el siglo X no es posible encontrar documentos que mencionen los molinos de viento como práctica generalizada, pero a partir del siglo XI, aparecen en la zona mediterránea molinos con rotores a vela. En estos primeros molinos de eje horizontal, el rotor estaba formado por unas velas que guardaban cierta similitud con las que se utilizaban en la navegación. El eje sobre el que se unían las seis u ocho palas, movía una rueda a la que se acoplaba la noria.

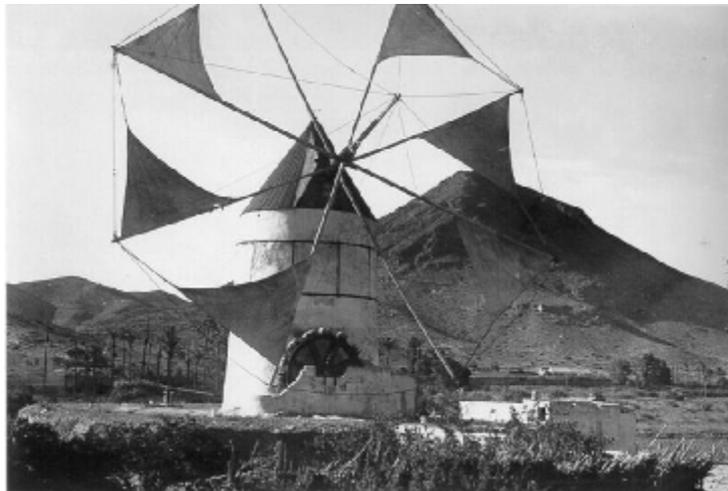


Fig. 2 Molino tipo mediterráneo

La extensión de estos ingenios hacia Europa y por ende a España desde el Oriente Medio se llevó a cabo por medio de la difusión de la cultura islámica hacia los países Mediterráneos. Para los países europeos sin influencia del Islam, como Inglaterra y Holanda, la idea apareció de manera autóctona.



Fig. 3 Molino de viento en Holanda

A partir del siglo XV se extienden por Europa dos tipos de molinos estructuralmente bien diferenciados, y que se desarrollan hasta mediados del siglo XIX. Los molinos de trípode y los de torre. Los primeros molinos torre europeos aparecen en la zona de Bretaña (Francia) a principios del siglo XV, extendiéndose su uso rápidamente hacia Inglaterra y los Países Bajos. Las torres se hacen de ladrillo o piedra y adaptan una sección circular u octogonal.

El siglo XVIII es un siglo de innovaciones tecnológicas, los molinos de viento europeos alcanzan un alto nivel de perfeccionamiento. Aparecen por primera vez los sistemas mecánicos de orientación y regulación, y también se empiezan a sustituir las piezas de madera por elementos metálicos que permitieron obtener de los molinos de vientos actuaciones cada vez más eficaces.

En España su uso se extendió por toda la franja costera Mediterránea, islas Baleares, Valencia, Murcia y Andalucía y también en el interior de la Península. En la región manchega en los siglos XVI y XVII llegaron a ser muy abundantes, aunque también se cuenta con vestigios y referencias a molinos de viento en Castilla, Galicia y País vasco



Fig. 4 Molino mediterráneo en Playa de los Genoveses

Durante el siglo XVIII se empezaron a publicar los primeros tratados teóricos sobre molinos de viento, se trataba de estudios en profundidad sobre el comportamiento aerodinámico de los rotores, sobre los sistemas de regulación automática o de orientación. Algunas de las primeras obras que llegaron a convertirse en clásicos de la literatura eólica fueron *Theatrum Machinarum Hydraulicorum*, de Leopold Jacobs, que se publicó en 1724, *Architectura Mechanica of Moole-Boek*, de P. Linperch publicada en 1729 y la *Architecture Hydraulique de Belidor* publicada en 1759.

La obra más importante del siglo XVIII la desarrolló el inglés Smeaton, con sus trabajos "On the construction and effects of the windmills sails y An experimental enquiry concerning the natural powers of wind and water". Él fue el primero en demostrar que los rotores con un elevado número de palas no proporcionaban mayor potencia que los que solo disponían de tres o cuatro palas con iguales características. También fue el primero en utilizar piezas de hierro colado para la construcción de molinos de viento.

En la segunda mitad del siglo XIX aparece una nueva generación de máquinas eólicas, con una concepción de diseño diferente: los "multipala americano" que abrieron el camino hacia mejoras en el rendimiento de estas máquinas.



Fig. 5 Molino múltipala americano con caja reductora.

No es hasta principios del siglo XX, cuando se aplicaron al diseño de los rotores las teorías aerodinámicas para usos aeronáuticos, así como las investigaciones relacionadas con el sistema de orientación de las máquinas eólicas. Los resultados derivaron a mejoras del diseño dirigidas principalmente a reducir el volumen y el peso de la parte del rotor, así como el diseño de las palas y la introducción de rodamientos y piezas deslizantes en el conjunto del rotor.

A lo largo del siglo XX, las aplicaciones basadas en el aprovechamiento del viento fueron declinando, a medida que se hacía más popular el uso del petróleo. Sin embargo, la crisis energética ha renovado de nuevo el interés por el aprovechamiento del campo eólico.

La historia de la producción de energía eléctrica con aerogeneradores marcó un hito histórico en la evolución de la tecnología eólica y del uso de las turbinas eólicas.

Los intentos de producir electricidad con energía eólica surgen en 1802. Fue Lord Kelvin quien tuvo la idea de acoplar un generador eléctrico a una máquina eólica. No obstante, tuvo que esperarse hasta 1850, cuando se inventó la dinamo, para que llegara el momento de lo que hoy conocemos como aerogenerador.

En 1888 Charles Brush, en EE.UU., construyó la primera turbina eólica de funcionamiento automático para generar electricidad al diseñar y construir la que hoy se cree es la primera turbina eólica de funcionamiento automático para generación de electricidad.



Fig. 6 Fotografía de Charles Brush

En 1890, el Gobierno danés inició un programa de desarrollo eólico dirigido a la producción de electricidad, y se responsabilizó al profesor La Cour con la dirección de los trabajos. La máquina de Poul La Cour (el Edison danés), puesta en marcha en 1892, fue la primera concebida, diseñada y construida para generar electricidad.

Los trabajos de La Cour determinaron que las turbinas eólicas de giro rápido con pocas palas de rotor son más eficientes para la producción de electricidad que aquellas de giro lento, para lo cual construyó su propio túnel de viento para realizar experimentos convirtiéndose en uno de los pioneros de la moderna aerodinámica, pero la teoría aerodinámica estaba todavía insuficientemente desarrollada y sus máquinas eólicas, a pesar de ser las más avanzadas de la época, seguían presentando rotores clásicos de bajo rendimiento.

Desde finales del siglo XIX y principios del siglo XX, los estudios sobre aerodinámica se desarrollaron de manera visible. Joukowski, Drzewieky y Sabinin en Rusia, Prandt y Betz en Alemania, y Constantin y Eiffel en Francia, determinaron los criterios de diseño que debían aplicarse en los perfiles aerodinámicos para la fabricación de alas y las hélices de los aviones. Sólo después de las primeras décadas del siglo XX se tuvieron conocimientos suficientes para aplicarlos a los rotores eólicos. En los años 20 se comienza a aplicar los perfiles aerodinámicos, que habían sido diseñados para las alas y hélices de los aviones, a los rotores eólicos. Los criterios de diseño de estos investigadores se ajustaron a las nuevas generaciones de turbinas eólicas. Prandt y Betz demostraron analíticamente que el rendimiento máximo de los rotores eólicos no podía sobrepasar 59,3 % (límite de Betz). En la actualidad, los rotores más modernos no rebasan 45 %, lo cual certifica la validez de aquellos estudios.

El primer aerogenerador que se construyó provisto de palas con sección aerodinámica fue concebido por el holandés A. J. Dekker. Este aerogenerador fue capaz de alcanzar velocidades de punta de pala cuatro o cinco veces superiores a la del viento incidente. En los molinos multipalas norteamericanos se habían conseguido velocidades máximas de punta de pala de dos veces la velocidad del viento.

Durante la primera mitad del siglo XX se realizaron numerosos aportes al desarrollo de la tecnología eólica. El primer sistema para conexión a la red eléctrica se desarrolló en Rusia con el generador Balaclava de 100 kW. El mayor de ellos se construyó en 1941 en EE.UU. con una potencia de 1.25 MW, implementado por los conocimientos desarrollados en el campo de la aerodinámica. Pero su principal aplicación durante todos estos años, y hasta principios de los años setenta, se limitó a los sistemas multipalas de bombeo mecánico de agua. Esto se debió en gran parte a la dificultad propia del recurso eólico, como lo es la variabilidad del viento, lo poco predecible y su baja densidad energética.

En lo que respecta a la tecnología, las limitaciones estaban en la dificultad para la optimización de las máquinas eólicas. Por otro lado, el bajo costo relativo de las centrales termoeléctricas e hidroeléctricas hacía no competitiva la utilización de las plantas eólicas.

Actualmente, a pesar del rápido desarrollo que está teniendo lugar en los medianos y grandes aerogeneradores conectados a la red, los sistemas eólicos de pequeño tamaño para generación eléctrica en áreas sin acceso a la red, sistemas descentralizados en áreas rurales o países en vía de desarrollo han experimentado un ritmo de desarrollo mucho más lento.

2.3 El recurso eólico

El calentamiento dispar de la superficie terrestre por acción de la radiación solar es el principal causante de los vientos. En las regiones ecuatoriales se produce una mayor absorción de radiación solar que en las polares; el aire caliente que se eleva en los trópicos es reemplazado por las masas de aire fresco superficiales proveniente de los polos. El ciclo se cierra con el desplazamiento, por la alta atmósfera, del aire caliente hacia los polos.

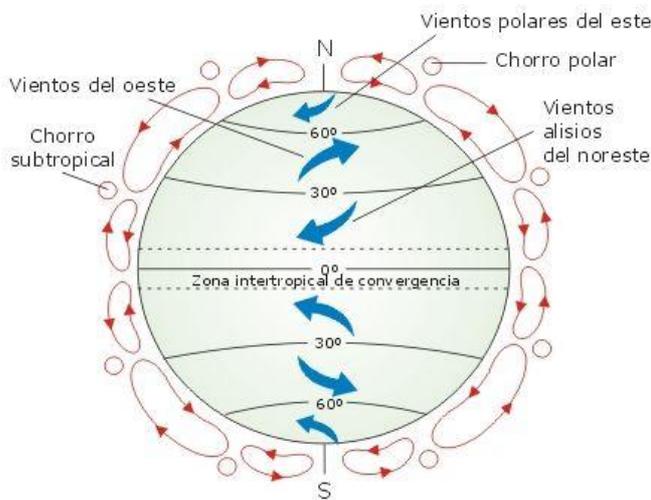


Fig. 7 Circulación del aire en la atmósfera

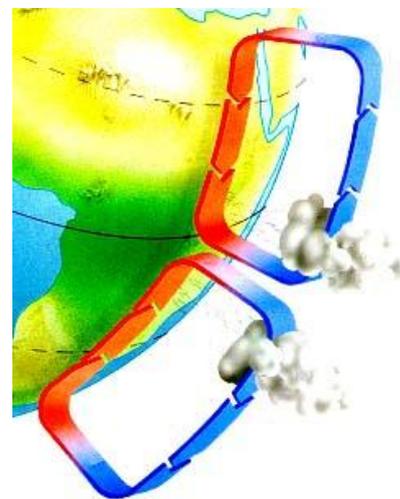


Fig. 8 Dirección del aire en el Ecuador

A lo largo de un año las variaciones estacionales de la radiación solar incidente provocan variaciones en la intensidad y dirección de los vientos dominantes en cada uno de los puntos de la corteza terrestre.

Además del movimiento general de la atmósfera, existen fenómenos de características locales que originan comportamientos particulares de los vientos.

Los accidentes geográficos condicionan la circulación de vientos regionales o locales. Las costas son áreas que frecuentemente disponen de vientos en general suaves. Un fenómeno similar

sucede en zonas montañosas donde las brisas de montaña y de valle son originadas por el calentamiento del aire en contacto con las laderas, generándose corrientes ascendentes durante las horas de sol y descendentes durante la noche.

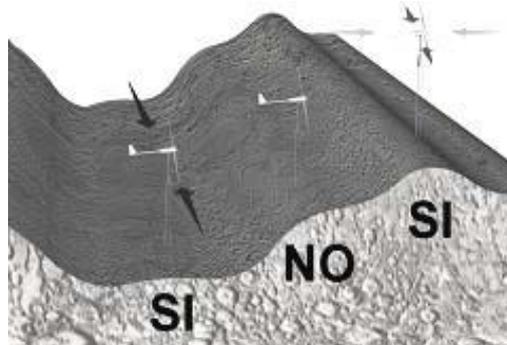


Fig. 9 Obstáculos naturales

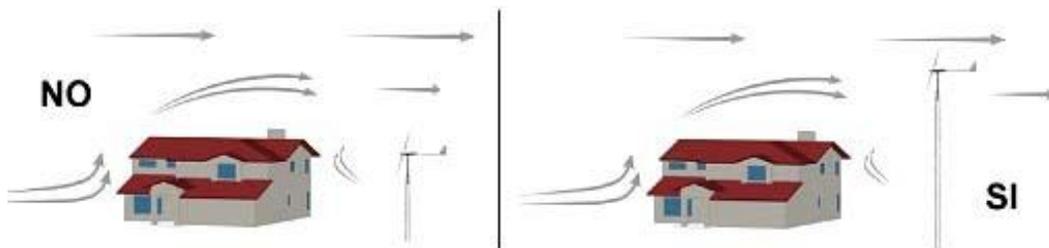


Fig. 10 Obstáculos artificiales

El viento viene definido por dos parámetros esenciales que son, su dirección y su velocidad. La dirección del viento y su valoración a lo largo del tiempo conducen a la ejecución de la llamada rosa de los vientos.

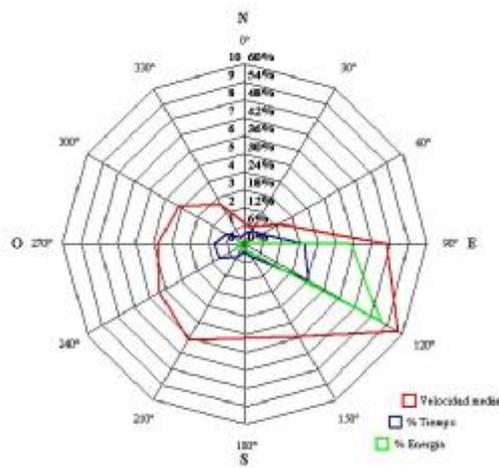


Fig. 11 Rosa de los vientos eólica

La velocidad media del viento varía entre 3 y 7 m/seg, según diversas situaciones meteorológicas; siendo bastante más elevada en las montañas, dependiendo de la altitud y de la topografía. La velocidad media del viento es más débil durante la noche, variando muy poco, y aumenta a partir de la salida del Sol, alcanzado máximo entre las 12 y 16 horas solares.

La correcta estimaciones del aprovechamiento energético es muy importante en temas tan diversos como la rentabilidad de la instalación, el régimen de cargas estructurales que soportan las máquinas, la programación de los trabajos de mantenimiento, la estrategia de operación técnica de los aerogeneradores, la disposición de las máquinas en el terreno, etc.

El instrumento que mide la velocidad del viento es el anemómetro, siendo el más utilizado el de cazoleta, que cuenta con un eje vertical y tres cazoletas que capturan el viento. El número de revoluciones por segundo son registradas electrónicamente.

Además de este tipo de anemómetros también existen otras clases, como algunos que incluyen ultrasonidos o anemómetros provistos de láser que detectan el desfase del sonido o la luz coherente reflejada por las moléculas de aire.

Los anemómetros de hilo electro calentado detectan la velocidad del viento mediante pequeñas diferencias de temperatura entre los cables situados en el viento y en la sombra del viento (cara a sotavento).

En los parques eólicos puede resultar un desastre económico si se dispone de un anemómetro que mide las velocidades de viento con un error del 10%.

En ese caso, se expone a contar con un contenido energético del viento que es $1,1^3 - 1 = 33\%$ más elevado de lo que es en realidad. Pero si lo que se pretende es recalcular las mediciones para una altura de buje del aerogenerador distinta (digamos de 10 a 50 metros de altura), ese error podrá incluso multiplicarse por un factor del 1,3, con lo que sus cálculos de energía acabarán con un error del 75%.

La velocidad del viento se mide en náutica mediante la escala Beaufort. La tabla Beaufort es la referencia internacional que clasifica y define cada tipo de viento en función de su velocidad.

| FUERZA | Velocidad (m/s) | Velocidad (km/h) | Denominación |
|--------|-----------------|------------------|---------------------|
| 0 | 0 - 0.5 | 0 - 1 | Calma |
| 1 | 0.6 – 1.7 | 2 - 6 | Ventolina |
| 2 | 1.8 - 3.3 | 7 - 12 | Suave |
| 3 | 3.4 - 5.2 | 13 - 18 | Leve |
| 4 | 5.3 - 7.4 | 19 - 26 | Moderado |
| 5 | 5.7 - 9.8 | 27 - 35 | Regular |
| 6 | 9.9 - 10.4 | 36 - 44 | Fuerte |
| 7 | 12.5 - 15.2 | 45 - 54 | Muy fuerte |
| 8 | 15.3 - 18.2 | 55 - 65 | Temporal |
| 9 | 18.3 - 21.5 | 66 - 77 | Temporal fuerte |
| 10 | 21.6 - 25.1 | 78 - 90 | Temporal muy fuerte |
| 11 | 25.2 - 29 | 91 - 104 | Tempestad |
| 12 | Más de 29 | Más de 104 | Huracán |

Tabla 1. Escala de Beaufort.

| Grados Beaufort | Criterios de Apreciación en Tierra |
|-----------------|---|
| 0 | El humo se eleva verticalmente |
| 1 | El viento inclina el humo pero no hace girar las veletas |
| 2 | Las hojas se mueven. El viento se siente en el rostro, giran las veletas |
| 3 | Las hojas y ramas pequeñas se mueven continuamente. Las banderas de tejido suave se extienden |
| 4 | El viento levanta el polvo y papeles sueltos, las ramas se agitan |
| 5 | Los árboles pequeños frondosos empiezan a balancearse |
| 6 | Se mueven ramas grandes. Vibran los hilos eléctricos, se oye el silbido. Resulta difícil utilizar el paraguas |
| 7 | Los árboles se agitan. Es molesto caminar contra el viento |
| 8 | Se rompen las ramas pequeñas. Se hace difícil caminar |
| 9 | Las ramas medianas se quiebran. Pequeños daños en las estructuras edilicias (se arrancan sombreretes de chimeneas, tejas de los techos, etc.) |
| 10 | Los árboles son arrancados de cuajo y daños estructurales considerables |
| > 11 | Destrozos extensos. Techos arrancados, etc. |

Tabla 2. Criterio de apreciación en tierra de la escala de Beaufort

2.3.1 Estimación del recurso eólico

Para un aprovechamiento energético del viento es de vital importancia realizar correctamente tanto una valoración energética del viento existente, como una caracterización del comportamiento del viento en la zona de implantación de los aerogeneradores. Para la realización de una correcta evaluación del viento se hace necesario, en primer lugar, una recopilación de todos los datos de carácter histórico existentes en la zona y que puedan orientarnos sobre el viento existente. Además de interrelacionar entre sí elementos como la vegetación existente, la topografía del terreno, el tipo de erosión presente, las orientaciones y características arquitectónicas y constructivas de la zona. La velocidad del viento varía con la altura, siguiendo aproximadamente una ecuación de tipo estadístico, conocida como ley exponencial de Hellmann, de la forma:

$$v_h = v_{10} \left(\frac{h}{10} \right)^\alpha$$

Donde:

v_h : Velocidad del viento a la altura h

v_{10} : Velocidad del viento a 10 metros de altura

α : Exponencial de Hellmann

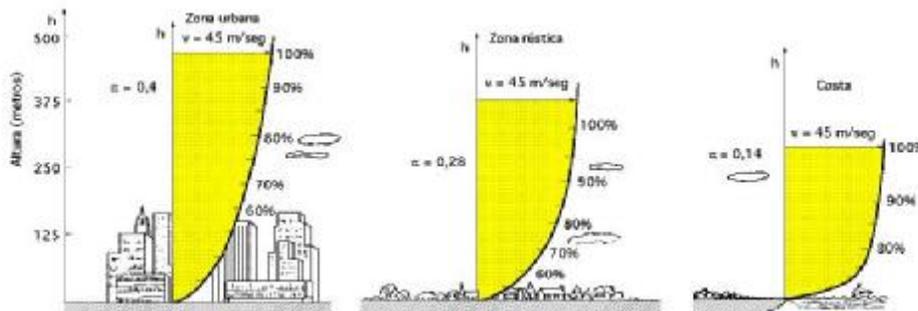


Fig. 12 Variaciones de la velocidad del viento con la altura, según la ley exponencial de Hellmann

| | |
|--------------------------------------|---------------------------|
| Lugares llanos con hielo o hierba | $\alpha = 0,08 \div 0,12$ |
| Lugares llanos (mar, costa) | $\alpha = 0,14$ |
| Terrenos poco accidentados | $\alpha = 0,13 \div 0,16$ |
| Zonas rústicas | $\alpha = 0,2$ |
| Terrenos accidentados o bosques | $\alpha = 0,2 \div 0,26$ |
| Terrenos muy accidentados y ciudades | $\alpha = 0,25 \div 0,4$ |

Tabla 3. Valores del exponente de Hellmann en función de la rugosidad del terreno

En las capas próximas al suelo, la velocidad del viento disminuye, produciéndose un efecto de cizallamiento del viento. Según la ley exponencial de Hellmann la variación o gradiente de velocidad con respecto a la altura depende esencialmente de la rugosidad del terreno.

Para el cálculo de la variación de la velocidad con la altura hay que distinguir dos opciones. Si lo que se pretende es determinar es la velocidad del viento medio o estacionario, se analizará la velocidad media obtenida durante 10 minutos de medición y ésta se calcula mediante:

$$v' = v \frac{\ln\left(\frac{z'}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{z}{z_0}\right)}$$

Donde:

v' : Velocidad a la altura z' , (m/s)

v : velocidad a la altura z , (m/s)

z_0 : rugosidad del terreno, m

Pero si lo que se pretende determinar es la velocidad media del viento a largo plazo (velocidad media anual), se utilizara para el cálculo una ley potencial para determinar la variación de la velocidad con la altura según la siguiente expresión:

$$\frac{v'}{v} = \left(\frac{z'}{z}\right)^\alpha$$

Donde α es un coeficiente que depende de la longitud de la rugosidad (z_0) del terreno. Para $z_0 \leq 0,1$ m, el valor se α se determina por:

$$\alpha = 0,24 + 0,04 \cdot \ln z_0 + 0,003 (\ln z_0)^2$$

En la práctica α acostumbra a estar entre el rango de 0,1 a 0,3.

Sin embargo, el comportamiento de la velocidad del viento no es estable en el tiempo, lo que permite determinar una distribución de probabilidades de la velocidad del viento en una localización determinada. Como ejemplo, en la figura 13 se muestra las variaciones de la velocidad del viento para una altura de 30 m, observándose una velocidad media de 8 m/s.

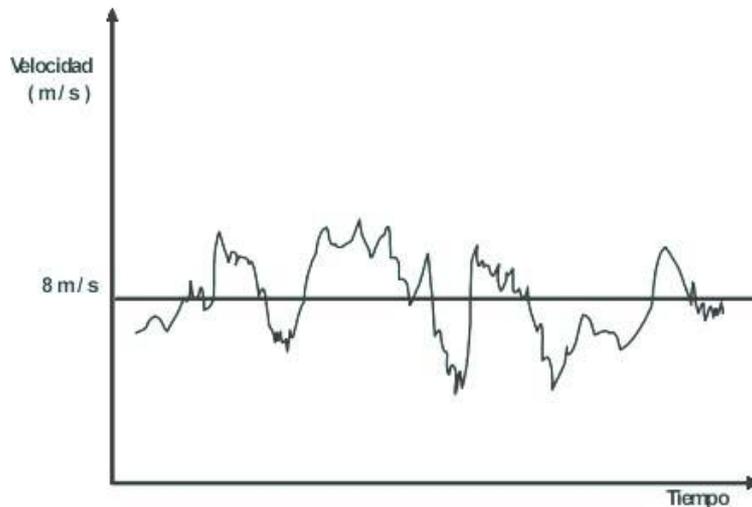


Fig. 13 Velocidad media a una altura de 30 m.

La siguiente expresión nos relaciona la potencia útil con la altura, en función de la velocidad media anual.

$$\frac{v'}{v} = \left(\frac{z'}{z}\right)^\alpha \longrightarrow P_{u'} = P_u \left(\frac{v'}{v}\right)^3 \longrightarrow P_{u'} = P_u \left(\frac{z'}{z}\right)^{3\alpha}$$

Donde:

$P_{u'}$: Potencia útil a la altura z^i

P_u : Potencia útil a la altura z

Además con la información de la velocidad media del viento anual, se puede determinar la densidad de potencia eólica media (DPE) a la altura del buje del aerogenerador a través de la expresión:

$$DPE = \frac{1}{2n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{2} \rho v_i^3$$

Donde:

DPE: Densidad de Potencia eólica. (W/m²)

v_i : es la velocidad media (m/s).

ρ : Densidad del aire (kg/m³).

N: Total de datos de velocidad disponibles.

La densidad de potencia eólica cuantifica la cantidad de vatios de potencia que están disponibles para cada metro cuadrado dentro del área barrida del aerogenerador, y está directamente influenciada por la densidad del aire (ρ). Dado que la energía cinética de un cuerpo en movimiento es proporcional a su masa, la energía cinética del viento depende de su densidad, o sea de su masa por unidad de volumen. Por eso, para una mayor densidad del aire mayor cantidad de energía recibirá el aerogenerador.

Para una valoración preliminar, existe tablas de clasificación estándar de clases de viento (Wind Class) utilizada mucho por los anglosajones que relaciona la potencia del viento en función de la velocidad del viento. Para una densidad del aire seco a presión atmosférica de 1,225 kg/m³.

| Clase | Velocidad del viento m/s a 30 m de altura | Potencia del viento W/m ² | Velocidad del viento m/s a 50 m de altura | Potencia del viento W/m ² |
|-------|---|--------------------------------------|---|--------------------------------------|
| 1 | 0 – 5,1 | 0 – 160 | 0 – 5,6 | 0 – 200 |
| 2 | 5,1 – 5,9 | 160 – 240 | 5,6 – 6,4 | 200 – 300 |
| 3 | 5,9 – 6,5 | 240 – 320 | 6,4 – 7,0 | 300 – 400 |
| 4 | 6,5 – 7,0 | 320 – 400 | 7,0 – 7,5 | 400 – 500 |
| 5 | 7,0 – 7,4 | 400 – 480 | 7,5 – 8,0 | 500 – 600 |
| 6 | 7,4 – 8,2 | 480 – 640 | 8,0 – 8,8 | 600 – 800 |
| 7 | 8,2 – 11,0 | 460 – 1600 | 8,8 – 11,9 | 800 – 2000 |

Tabla 4. Clasificación estándar de clases de viento

2.3.2 Representación estadística del viento

Dado que la velocidad del viento es variable, un estudio del viento en un emplazamiento determinado nos indica la cantidad de energía que una turbina eólica podría generar en ese emplazamiento.

Para evaluar los datos obtenidos del viento en un lugar determinado se recurre a la representación de la velocidad del viento como una variable aleatoria con una cierta función de distribución. Las curvas que relacionan la velocidad del viento, con el número de horas de funcionamiento del aerogenerador, $v = f(t)$, indican el número de horas al año en que la velocidad del viento supera un cierto nivel. Siendo los histogramas de velocidad del viento, la herramienta que caracterizan la distribución de frecuencia del viento.

La distribución estadística de las velocidades del viento varía de un lugar a otro, dependiendo de las condiciones climáticas locales, del paisaje y de su superficie. La función de distribución de Weibull refleja fielmente la distribución real de las velocidades del viento.

$$P_{(v)} = \frac{k}{c} \left(\frac{V}{c}\right)^{k-1} \cdot \exp\left[-\left(\frac{V}{c}\right)^k\right]$$

Donde

C: parámetro de escala

k: parámetro de forma

El factor de distribución de forma k , define la relación existente entre la energía obtenida en un año P_{anual} , y la energía que se obtendría en ese año, si la velocidad del viento se mantuviera constante e igual a la velocidad media v_{media} .

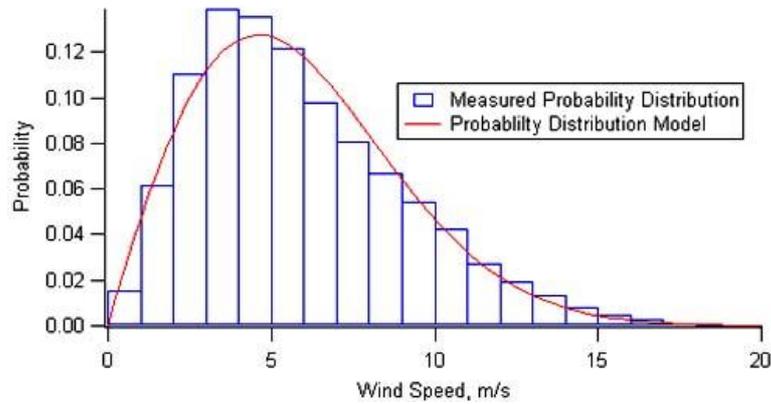


Fig. 14 Distribución de frecuencia de la velocidad del viento

La distribución de Weibull puede variar tanto en la forma como en su valor medio en función del emplazamiento analizado para la ubicación de los aerogeneradores.

2.4 Parámetros que caracterizan el comportamiento de un aerogenerador

Como es de suponer, el rotor eólico no puede convertir toda esa energía cinética del viento en energía de rotación. Así pues, hay un factor de aprovechamiento máximo de la energía eólica del viento, que está definido por la Ley de Betz.

El desarrollo de la Ley de Betz muestra que:

$$P_{\text{útil_max}} = \frac{\rho A v_1^3}{4} \left(1 + \frac{1}{3}\right) \left(1 - \frac{1}{9}\right)$$

$$P_{\text{útil_max}} = \frac{8\rho A v_1^3}{27}$$

$$P_{\text{útil_max}} = 0,37 A v_1^3$$

Donde:

$P_{\text{útil_max}}$: Potencia máxima útil suministrada por el rotor

A: Área de barrido del aerogenerador (m^2)

v_1 : velocidad nominal del viento (m/s)

Como la potencia del viento aguas arriba de la hélice, viene dada por la expresión:

$$P_{\text{disp_viento}} = \frac{\rho A v_1^3}{2} = 0,625 A v_1^3$$

El rendimiento máximo aerodinámico es:

$$\eta_{\text{maximal}} = \frac{P_{\text{útil_max}}}{P_{\text{disp_viento}}} = \frac{16}{27} = 0,595 = 59,5\%$$

Ésta demuestra que en el caso de un aerogenerador ideal, sólo se podrá convertir un 16/27 (el 59%) de la energía cinética en energía mecánica. La fracción de energía capturada por un aerogenerador viene dada por el factor C_p , llamado coeficiente de potencia.

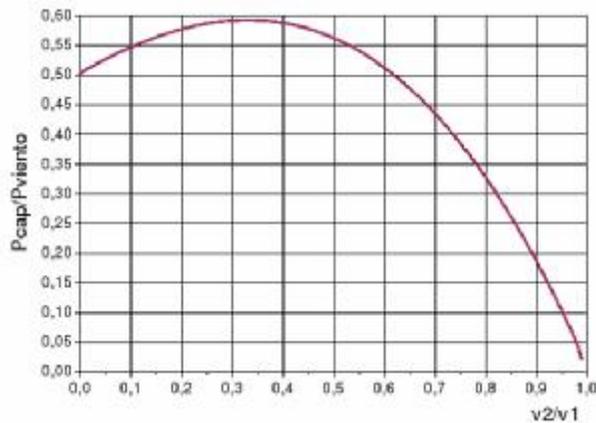


Fig. 15: Curva de eficiencia de Betz

En la figura 16 se puede apreciar el aprovechamiento real por parte de la turbina, en color rojo, de la energía cinética generada por el aire en la generación de energía en los aerogeneradores.

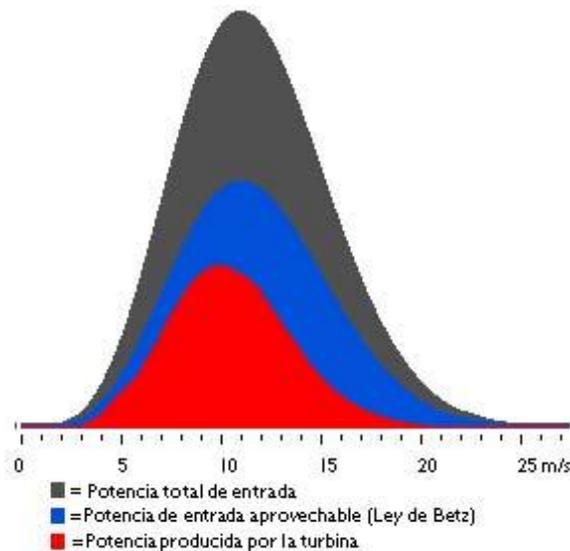


Fig. 16 Aprovechamiento energético del viento.

Se define al coeficiente de potencia C_p o rendimiento maximal aerodinámico, como un indicador de eficiencia de conversión, y nos indica con qué eficiencia el aerogenerador convierte la energía del viento en electricidad.

Se termina mediante la relación existente entre la potencia extraída y la potencia disponible en el viento, siendo el máximo teórico, como vimos anteriormente el límite de Betz: 0,595.

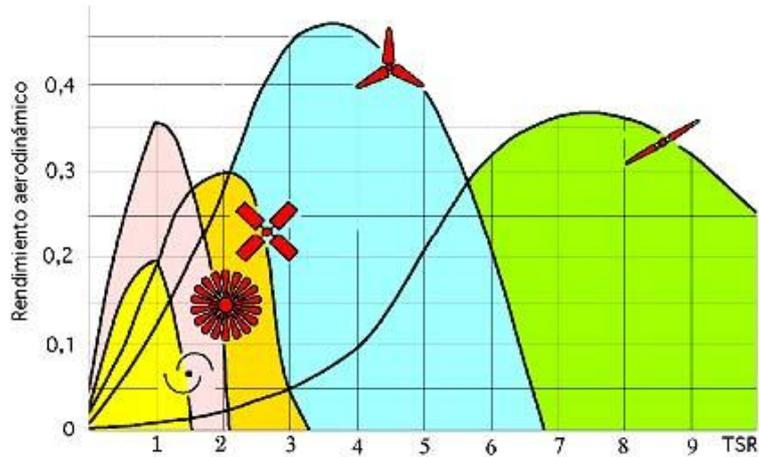


Fig. 17 Curva de rendimiento de diferentes tipos de aerogeneradores

$$P_{\text{útil_max}} = C_p(\lambda, \beta) \cdot P_{\text{disp_viento}}$$

$$C_p(\lambda, \beta) = \frac{P_{\text{útil_max}}}{P_{\text{disp_viento}}} = \eta_{\text{maximal}}$$

Donde:

$P_{\text{útil_max}}$: Potencia máxima útil suministrada por el rotor

$P_{\text{disp_viento}}$: Potencias disponible en el viento

η_{maximal} : Rendimiento máximo aerodinámico

C_p : coeficiente de potencia

El coeficiente de potencia es un parámetro de diseño de cada máquina y depende en gran parte del diseño de turbina y del diseño aerodinámico de las palas.

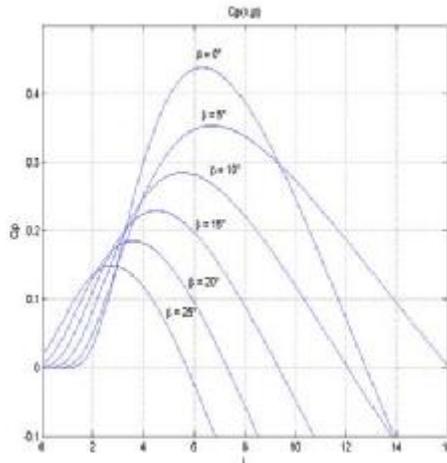


Fig. 18 Coeficiente de potencia (C_p) de turbina eólica en función de la velocidad específica (λ) y ángulo de paso (β).

Siendo velocidad específica de la turbina, λ el indicador que relaciona los parámetros de diseño del aerogenerador. Se define como la relación entre la velocidad lineal en la punta del aspa y la velocidad del viento:

$$\lambda = \frac{w r_i}{v_n}$$

Donde:

λ : Velocidad específica de la turbina

w : Velocidad angular de la turbina (rad/s)

r_i : Radio de la palas del aerogenerador (m)

v_n : Velocidad del viento (m/s)

La curva del coeficiente de potencia indica el desempeño de la turbina eólica para la extracción de la máxima potencia, como se muestra en la figura 19. Para cada valor de la velocidad específica de la turbina (λ) existe un valor máximo del coeficiente de potencia C_p . Cuando la velocidad del viento cambia, λ varía, por lo que para mantener el coeficiente de potencia en su valor óptimo es necesario variar el ángulo de paso β , para lo que actúa el control de potencia.

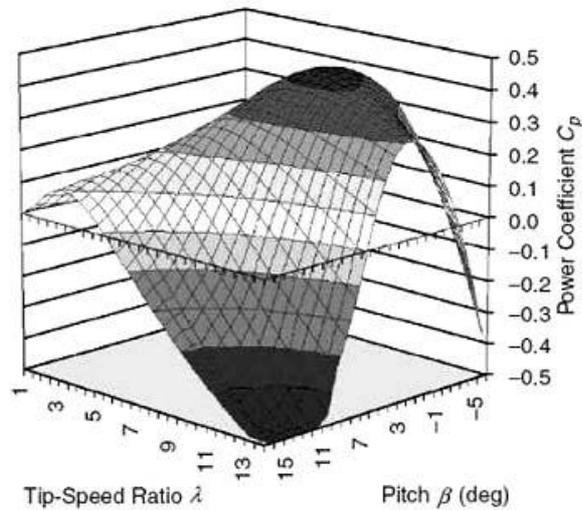


Fig. 19 Superficie de control del coeficiente de potencia.

Sin embargo, es bastante complicado predecir el rendimiento de los aerogeneradores a través del coeficiente de potencia, C_p dado que este varía considerablemente al variar la velocidad del viento durante el proceso de generación de la turbinas.

Para vencer este problema, el rendimiento de la turbina es típicamente medido experimentalmente por el fabricante y plasmado en forma de curva de energía. Que indica la relación existente entre la velocidad de viento a la altura del buje y la potencia eléctrica de salida de la turbina.

Usando las curvas de energía, es posible predecir el rendimiento de generación de energía de una turbina eólica 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 para diferentes velocidades del viento.

En la curva de potencia de las máquinas eólicas se pueden apreciar tres velocidades del viento características:

- La velocidad de conexión V_{conex} , es la velocidad del viento por encima de la cual el aerogenerador arranca y comienza a generar energía. Por debajo de esta velocidad toda la energía extraída del viento se gastaría en pérdidas y no habría generación de energía.
- La velocidad nominal V_{nom} , es la velocidad del viento para la cual la máquina eólica alcanza su potencia nominal. Por encima de esta velocidad la potencia extraída del viento se mantiene constante.
- La velocidad de desconexión V_{dec} , es la velocidad del viento por encima de la cual la máquina eólica deja de generar energía, porque se embala, los sistema de seguridad comienzan a actuar frenando el aerogenerador y desconectándolo de la red.

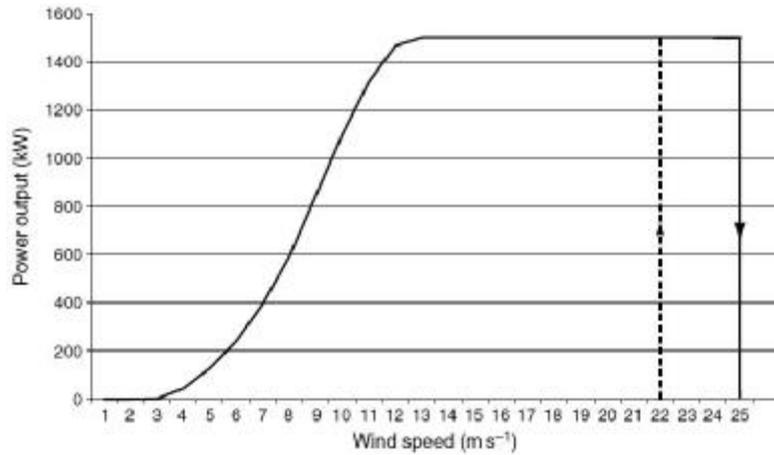


Fig. 20 Curva de potencia de un aerogenerador

En la curva de potencia, como se muestra en la figura 21, para todo el rango de velocidades de viento comprendidas entre la velocidad de arranque y de corte, se puede determinar la potencia extraída, la cual presenta tres regiones diferenciadas de acuerdo al par desarrollado por la turbina y su velocidad de rotación:

1. Región de velocidades bajas (1): Denominada usualmente como región de maximización de extracción de potencia (MPPT), el objetivo del sistema de control en esta región es extraer tanta energía del viento como sea posible.
2. Región de velocidades intermedias (2): la potencia generada por la turbina se incrementa como consecuencia del aumento de la velocidad del viento. La maximización de extracción de potencia solamente es viable si la velocidad del viento es moderada sin que el generador supere su velocidad nominal de giro.
3. Región de velocidades altas (3): la potencia generada por la turbina se estabiliza, aunque la velocidad del viento se incremente. En esta zona el par de la turbina debe ser regulado en su valor nominal mediante el control de ángulo de paso, permitiendo operar la turbina bajo potencia nominal hasta la velocidad de corte de la misma.

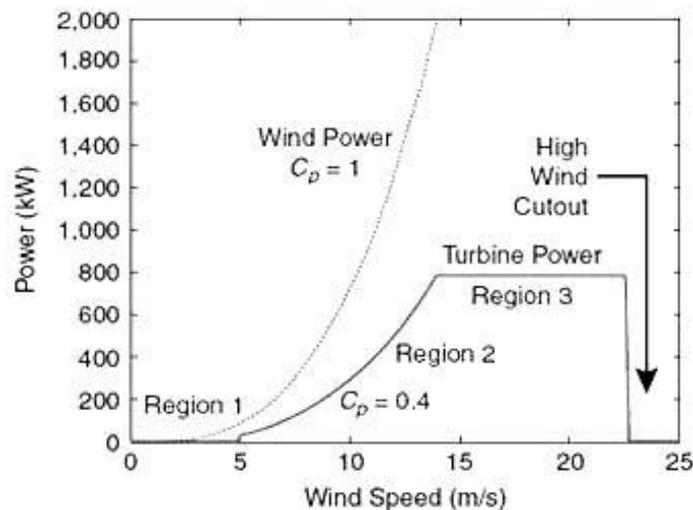


Fig. 21 Curva de potencia de un aerogenerador de 800 kW de potencia nominal

Para determinar la producción de energía eléctrica de una instalación eólica de pequeña potencia, con frecuencia se emplea el denominado «método de la curva de potencia», que se basa en la utilización de la curva característica del aerogenerador y una distribución de probabilidades de la velocidad del viento.

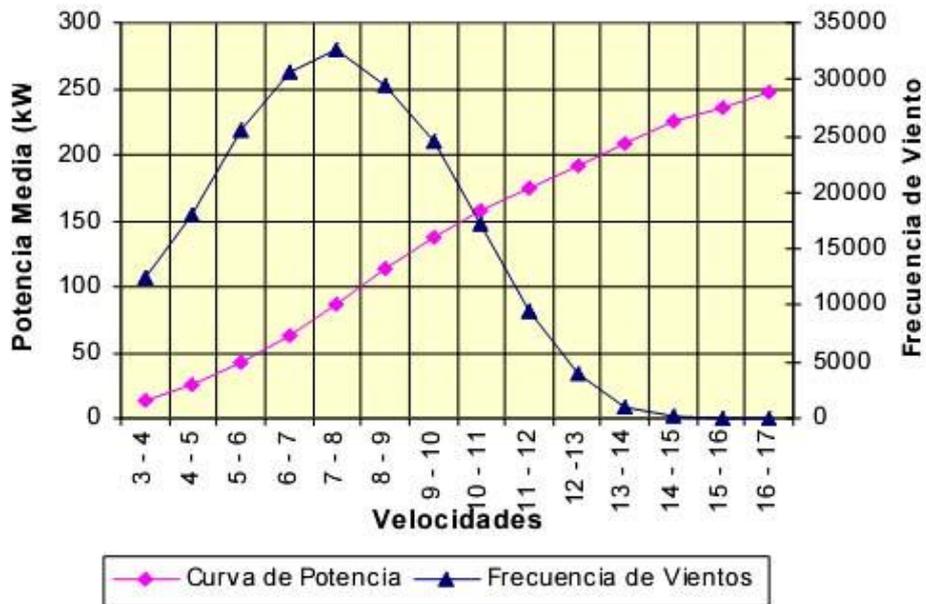


Fig. 22 Distribución de la velocidad del viento y energía.

Un hecho importante a destacar y que se deriva del análisis de la curva de potencia es que la mayor cantidad de la energía se produce a velocidad del viento elevado causada principalmente por turbulencias o ráfagas del viento. Sin embargo, éstas no son significativas en su aporte a la densidad de potencia. Además hay peligro de ruptura del aerogenerador, por lo que éste se detiene a esas velocidades. Es necesario señalar que en el proceso de transformación de la energía dentro del aerogenerador se producen una gran cantidad de pérdidas que limitan el rendimiento global del aerogenerador a un 44% en el mejor de los casos.

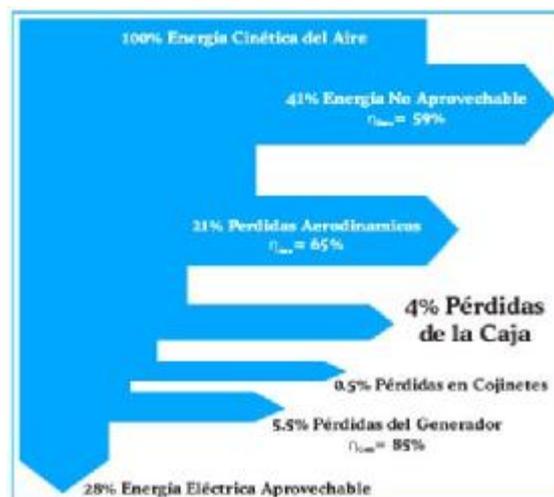


Fig. 23 Pérdidas de energía en los aerogeneradores

En la práctica el rendimiento del aerogenerador será aún menor, por lo que se puede aceptar como valor bastante razonable que la potencia eléctrica que puede generar una turbina eólica sea:

$$P_e = C_{p(\lambda,\beta)} \cdot C_e \cdot \frac{1}{2} \rho A v_1^3$$

Donde:

Pe: Potencia eléctrica

Cp Coeficiente de potencia

Ce: Eficiencia de la máquina eléctrica.

2.5 Sistemas eólicos de pequeña potencia

Los aerogeneradores se clasifican de acuerdo a su potencia nominal en:

Microturbinas: son aquellas cuya potencia nominal es menor a 3 kW y se utilizan para pequeños consumos de energía como: sistemas aislados de telecomunicaciones, caravanas, carga de baterías para embarcaciones, etc. Generalmente producen electricidad para cargar baterías de almacenamiento. Presenta normalmente un generador eléctrico de imán permanente sin que haya caja multiplicadora de velocidad entre el eje del rotor del aerogenerador y el generador eléctrico.

En general son de eólicas rápidas de eje horizontal de tres palas que trabajan a velocidades de rotación elevadas y generalmente variables. La electricidad producida en forma de corriente alterna de frecuencia variable es rectificadora y almacenada en las baterías para posteriormente ser convertida de nuevo a corriente alterna a frecuencia constante (50 o 60 Hz) mediante un inversor de estado sólido, y elevada su tensión a 230 V.

A este tipo grupo de aerogeneradores también pertenecen los aerogeneradores de eje horizontal de eólica lenta.

Aerogeneradores de pequeña potencia: La potencia de estas máquinas oscila desde apenas unos kilovatios hasta el centenar. Aunque actualmente no existe en España ninguna legislación que considere como tecnología eólica de baja potencia a aquellos aerogeneradores cuya potencia nominal esté por debajo de 100 Kw.

Solamente existe una normativa, que no es de obligado cumplimiento, del Comité Eléctrico Internacional (CEI) (Norma IEC-61400-2 ED. 2), la cual define un aerogenerador de pequeña potencia como aquel cuya área barrida por su rotor sea menor a 2 m.

Sin embargo, en otros países está claramente legislado, por ejemplo, la Asociación Americana de Energía Eólica (AWEA) clasifica los aerogeneradores de pequeña potencia a aquellos cuya potencia nominal sea menor de 100 kW, dividiéndolos en dos grupos: sistemas residenciales de 1 kW a 10 kW y sistemas comerciales de 21 kW a 100 kW. Por otra parte, la Asociación Alemana de Energía Eólica (BWE) clasifica los sistemas eólicos residenciales hasta 30 kW de potencia nominal.

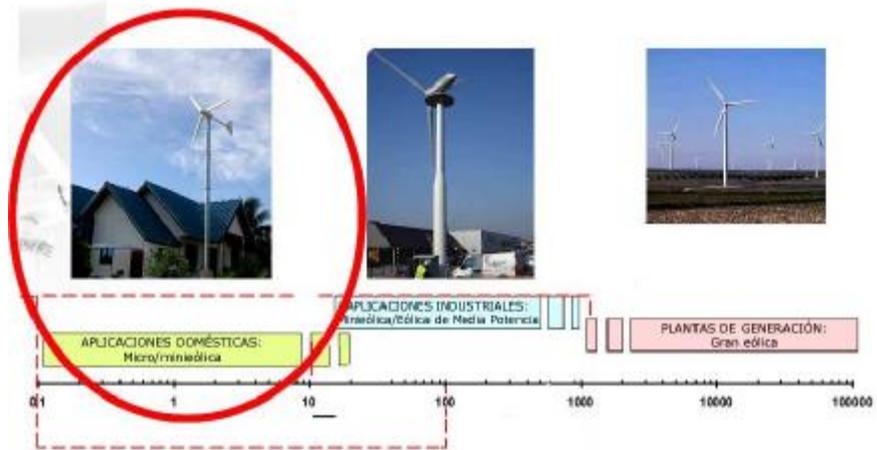


Fig. 24 Minieólica en aplicaciones residenciales

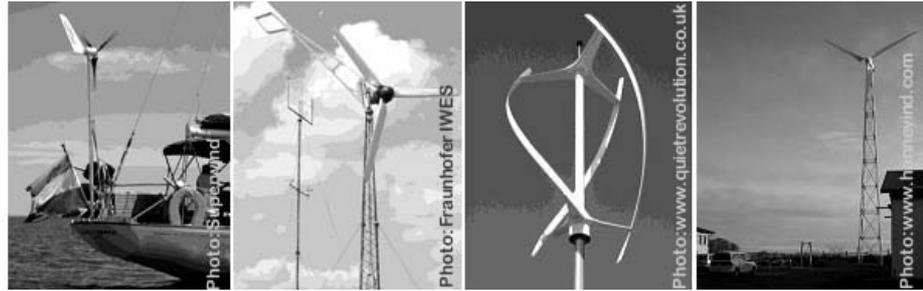
El Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía IDEA, en uno de sus documentos, clasifica los aerogeneradores en función de su potencia:

- Aerogeneradores de muy baja potencia que a su vez se clasifican en dos grupos: Microaerogeneradores, aquellos que presentan una potencia nominal menor que 1 Kw y miniaerogeneradores, aquellos cuya potencia nominal oscila entre 1 y 10 kW.
- Aerogeneradores de baja potencia: aquellos cuya potencia nominal oscila entre 10 y 100 kW

| Denominación | kW | Utilización |
|-----------------------|--------------|---|
| Muy baja ¹ | < 1 | Embarcaciones, sistemas de comunicación, refugios de montaña, iluminación, etc. |
| | 1-10 | Granjas, viviendas aisladas (sistemas EO-FV), bombeo, etc. |
| Baja | 10-100 | Comunidades de vecinos, PYME's (sistemas mixtos EO-Diesel), drenaje, tratamientos de aguas, etc. |
| Media | 100-1 000 | Parques eólicos (terreno complejo) |
| Alta | 1 000-10 000 | Parques eólicos (terreno llano, mar adentro) |
| Muy alta | > 10 000 | En fase de investigación y desarrollo, requieren nuevos diseños y materiales no convencionales. No antes del año 2010 |

¹.- Esta clase se divide según la potencia en microaerogeneradores (< 1 kW) y miniaerogeneradores (1-10 kW).

Tabla 5. Clasificación en función de su potencia. Fuente: Artículo Energía Eólica IDEA



| Modelo | Superwind 350 | Fortis Montana | Quietrevolution | Hannewind |
|----------------------|--|--------------------------------------|-------------------------------------|---------------------------------------|
| Diámetro del rotor | 1,2 m | 5 m | 3,1 m x 5 m | 13 m |
| Eje del rotor | Horizontal | Horizontal | Vertical | Horizontal |
| Área de barrido | 1,1 m ² | 19,6 m ² | 15,5 m ² | 133 m ² |
| Potencia nominal | 0,35 kW | 5 kW | 0,35 kW | 30 kW |
| Aplicaciones comunes | Cargadores de batería, cargadores de móviles, comunicación | Instalación aislada, conectada a red | Sistemas Doméstico, conectado a red | Sistemas Comerciales, conectado a red |

Tabla 6. Característica de diferentes modelos de aerogeneradores de pequeña potencia

Como se muestra en la tabla 6, existen múltiples ejemplos de configuración de aerogeneradores de pequeña potencia, así como rangos de potencia disponibles. Siendo los parámetros más comunes para su clasificación el diámetro de rotor, el área de barrido y la potencia eléctrica generada.

Con los aerogeneradores de pequeña potencia producimos electricidad a pequeña escala, de forma sostenible, evitando los inconvenientes de la energía eólica convencional. Los pequeños aerogeneradores presentan un efecto visual nulo en el entorno, no necesitan infraestructuras y tienen un fácil y económico mantenimiento. Gracias a los constantes avances tecnológicos, los pequeños aerogeneradores son cada vez más eficientes, más seguros y menos ruidosos. Hasta hace poco estos mini aerogeneradores solo se podían utilizar en zonas aisladas debido principalmente al ruido y a las vibraciones que producían. En la actualidad cada vez se están integrando más en los espacios urbanos dado la alta eficiencia que demuestran y el gran potencial de la generación, sobre todo a velocidades moderadas del viento.

2.5.1 Elementos de una instalación eólica de pequeña potencia

Las instalaciones eólicas aisladas son instalaciones no conectadas a la red general de distribución eléctrica. Su tamaño y potencia las hacen adecuadas para aplicaciones como:

- El consumo eléctrico en viviendas y edificios, especialmente en zonas rurales.
- El alumbrado público.
- El consumo en instalaciones agropecuarias alejadas de la red eléctrica.

- La electrificación en zonas del tercer mundo en las que la red eléctrica se encuentra aún con bajo nivel de penetración.
- El bombeo y tratamiento de agua.
- La señalización en calles y carreteras, cámaras de video vigilancia, etc.
- Embarcaciones de recreo.

El sistema se suele dimensionar con una potencia instalada y capacidad de acumulación suficiente para garantizar un suministro fiable, como mínimo para tres días de autonomía, para lo cual cuenta con un sistema de acumulación de energía mediante baterías de acumulación.

2.5.2 Elementos de las instalaciones eólicas aisladas

Las principales características de las instalaciones aisladas vienen dadas por su pequeño tamaño y por la necesidad de acumular la energía producida, garantizando tanto como sea posible la disponibilidad de energía para su consumo. Los principales elementos de la instalación, tal y como se observa en la figura 25 son:

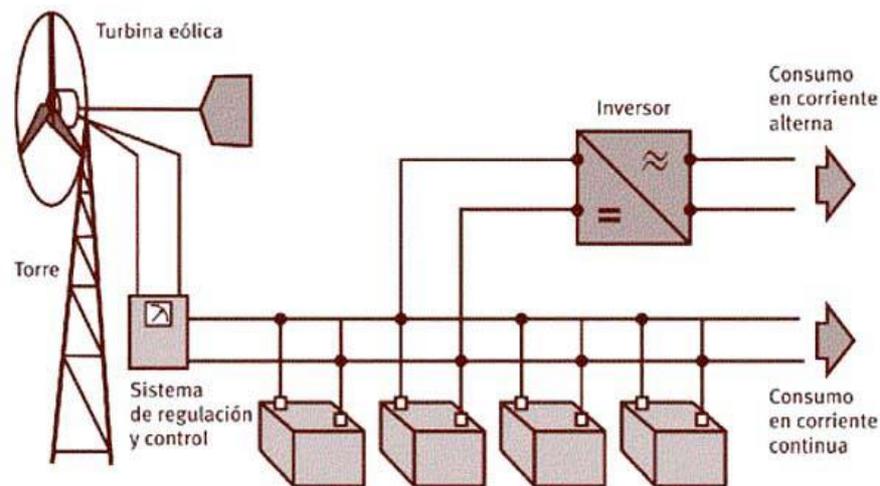


Fig. 25 Instalación eólica de pequeña potencia para cargar baterías

- La turbina eólica o aerogenerador que se encuentran en la parte superior de la torre.
- La torre soportante.
- El cableado.
- Rectificador de corriente alterna en corriente directa. Esto es necesario en caso de que el generador eléctrico suministre corriente alterna y el rectificador no esté incorporado en la turbina eólica.
- El cuadro de control o sistema de control que constituye un punto de conexión central entre la turbina, las baterías y las cargas.

- Un interruptor con un fusible eléctrico de seguridad que desconecta la turbina y el control de la carga de baterías. Éste puede estar incorporado en el sistema de control.
- El banco de baterías que debe proporcionar la energía suficiente para satisfacer la demanda durante un número de días de calma.
- El inversor que convierte la corriente directa en alterna.

2.6 Descripción general del sistema

2.6.1 La turbina eólica o aerogenerador

Es el elemento encargado de captar la energía cinética del aire y trasformarla en energía eléctrica mediante el generador que se encuentra en el cuerpo de aerogenerador. El aerogenerador puede ser de eje vertical o de eje horizontal.

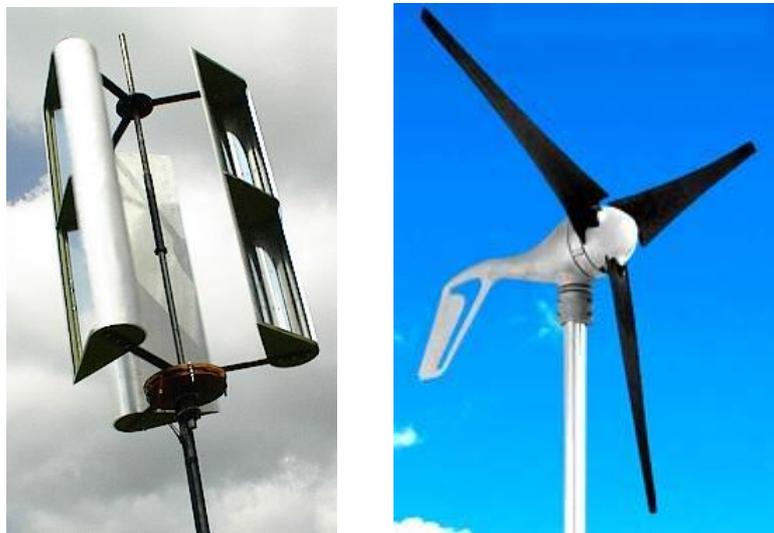


Fig. 26 Diferentes tipos de aerogeneradores de pequeña potencia

Los aerogeneradores de eje vertical VAWT (vertical axis wind turbine) son aquellos en los que el eje de rotación del equipo se encuentra perpendicular al suelo. Tienen la ventaja de adaptarse a cualquier dirección de viento y por ello se les llama panemonos (todos los vientos). No precisan dispositivos de orientación; trabajan por la diferencia de coeficiente de arrastre entre las dos mitades de la sección expuesta al viento. Dentro de esta gama de aerogeneradores podemos encontrar los modelo Savonius, Darrieus, Darrieus tipo H o Giromill. En general, a excepción del rotor Darrieus, los aerogeneradores de eje vertical operan con vientos de baja velocidad donde difícilmente superan las 200 rpm.

Aerogeneradores de eje horizontal también llamados HAWTs, (horizontal axis wind turbines), son aquellos en los que el eje de rotación del equipo se encuentra paralelo al piso. Ésta es la tecnología que se ha impuesto, por su eficiencia y confiabilidad y la capacidad de adaptarse a diferentes potencias. A diferencia de los de eje vertical, hacen un mayor aprovechamiento de la potencia del viento, pero necesitan un mecanismo de orientación para hacer frente a los cambios bruscos en la dirección del viento.

Dado que la potencia eléctrica que genera los aerogeneradores varía con la intensidad y la velocidad del aire, las instalaciones aisladas no conectadas a red deben contar con un sistema de baterías acumuladoras de energía.

2.6.2 Las baterías o acumuladores.

Todo sistema de energía autónomo requiere de baterías para almacenar la energía producida por la turbina eólica, siendo su función la de almacenar la energía producida por el aerogenerador así como suministrar la energía acumulada a la carga (consumidor) si éste trabaja con corriente directa.

Los tipos de baterías más comunes son los de plomo ácido (similares a las baterías de coche) las cuales están compuestas por placas de plomo sumergidas en una solución de ácido sulfúrico con agua. Caracterizándose por presentar una alta tolerancia a la carga continua y a las bajas pérdidas por descarga. Son además relativamente baratas.

Se caracterizan por su

- Capacidad en amperios-horas, Ah
- Eficiencia de carga
- Auto descarga
- Profundidad de descarga



Fig. 27 Batería monobloque

Se suele elegir la capacidad nominal de la batería, de tal forma, que proporciones entre tres y ocho veces la energía consumida por la carga durante un día o ciclo de utilización

2.6.3 El regulador de carga

Reguladores de carga: Son elementos electrónicos que controlan el proceso de carga de los acumuladores desde el generador eólico. También pueden controlar la descarga si existen consumidores eléctricos en corriente continua. Su función básica es la de controlar que no se sobrecarguen las baterías ni se descarguen profundamente, avisando de ello mediante una alarma ya sea de forma acústica o visual.



Fig. 28 Regulador de carga

2.6.4 El Inversor

En las instalaciones eólicas aisladas la electricidad que proporciona la batería es en corriente continua, la cual no siempre coincide con la carga de los consumidores. Así pues es necesario conectar un inversor de corriente que transforma la energía continua de los acumuladores en energía alterna de 230v a 50 Hz.

Principales tipos de inversores:

- Inversores de onda senoidal pura: este tipo de inversor se utiliza principalmente para alimentar equipos electrónicos sensibles, ya que dispone de una salida de onda senoidal pura.
- Inversores de onda senoidal modificada: en este tipo de inversor la calidad de la onda senoidal no es tan elevada, la onda dibuja una forma escalonada, a medio camino entre la onda cuadrada y la senoidal, por lo que presenta elevados contenidos de armónicos, lo que puede generar ruidos en equipos de radios, porteros electrónicos, equipos de música, etc.

Las principales características vienen determinadas por la tensión de entrada del inversor, que se debe adaptar a la del sistema, y por la potencia máxima que puede proporcionar la forma de onda en la salida (sinusoidal pura o modificada), etc. La eficiencia de un inversor no es constante y depende del régimen de carga al que esté sometido. Para regímenes de carga próximos a la potencia nominal, la eficiencia es mayor que para regímenes de carga bajos.



Fig. 29 Inversor de onda senoidal pura.

Como resumen de este capítulo podemos destacar, en primer lugar, los factores que influyen sobre la estimación del recurso eólico, su influencia y características generales. Así como los parámetros que influyen en el comportamiento de los aerogeneradores entre los que tenemos el coeficiente de potencia C_p , la velocidad del aire, la velocidad específica de la turbina y la densidad del aire y que quedan plasmados todos ellos a través de la curva de potencia del aerogenerador.

Además se hace una pequeña valoración de las normas y criterios de clasificación de las instalaciones de pequeña potencia y de su utilización práctica. Describiendo por último los elementos componentes de la instalación y su función en la misma.

DISEÑO DEL BANCO DE ENSAYOS

3.1 Introducción

La necesidad de evaluar el recurso eólico en aerogeneradores de pequeña potencia sin necesidad de disponer de una cantidad de datos de vientos acumulados durante meses que cuantifique las variaciones estacionales del mismo, así como el inconveniente relacionado con la instrumentación y seguimiento de los mismos, ha condicionado la necesidad de construir un banco de ensayo capaz de realizar la medición de su funcionamiento sobre una base regular de tiempo. Este método permite relacionar la característica del equipo, dentro de los rangos de operación prescritos por el fabricante, con el régimen de vientos generado por los ventiladores del banco de ensayo. Permitiendo además relacionar el comportamiento del perfil del viento con los resultados obtenidos en los ensayos.

Para la realización de esta tarea se ha realizado un banco de ensayo de tipo abierto dotado de un conjunto elementos y accesorios necesarios para llevar a cabo, simultáneamente, las mediciones y las simulaciones de las condiciones reales del viento.

Dado que la velocidad de incidencia del viento sobre las palas del aerogenerador es uno de los parámetros que caracteriza el potencial eólico del mismo, nuestra instalación constará de un sistema de generación del aire soportada sobre una estructura metálica previamente diseñada para soportar los esfuerzos y las tensiones generadas por el empuje y el peso de los ventiladores. Así mismo la instalación constará de un sistema de control de la velocidad de los ventiladores que nos permitirá simular diferentes condiciones de velocidad de salida del aire, permitiendo describir comportamientos diferentes sobre el aerogenerador.

El banco de ensayo ofrece muchas ventajas, no solo la capacidad de controlar el flujo del aire que actúa sobre los aerogeneradores, sino la posibilidad de realizar medición de su funcionamiento sobre una base regular de tiempo controlado por un sistema de adquisición de datos y conformada por sondas y transductores que permiten monitorizar en tiempo real los parámetros a controlar, permitiendo reducir el tiempo destinados a la realización de las prueba.

Para una mejor comprensión de nuestra instalación describiremos, en una primera etapa, el sistema de impulsión del aire, su configuración y distribución, así como el sistema de control utilizado para regular el trabajo de los ventiladores haciendo hincapié en el sistema de soporte estructural de la instalación. Y, en una segunda etapa, al sistema de adquisición de datos y las características del aerogenerador utilizado en nuestra evaluación.

3.2 La estructura

Dentro de los objetivos iniciales del proyecto estaba crear una instalación ligera, fácil de montar y que fuera del tipo modular. Con la capacidad de transportarse dentro del laboratorio en función de nuestras necesidades.

Para ello se realizó el diseño de una estructura soporte que fuera capaz de soportar el peso de los ventiladores, sus vibraciones y desviaciones estructurales de las vigas y soportes bajo cargas estáticas y dinámicas, así como las vibraciones generadas por el aerogenerador sujeto a evaluación.

Para su diseño se contó con la colaboración de los suministradores de la estructura que mediante el análisis por elemento finito sugirieron las mejores variantes para nuestro banco de ensayo. El estudio comprendía una estructura capaz de soportar hasta 9 ventiladores helicoidales distribuidos en tres filas, con un peso aproximado de 60 Kg cada uno.

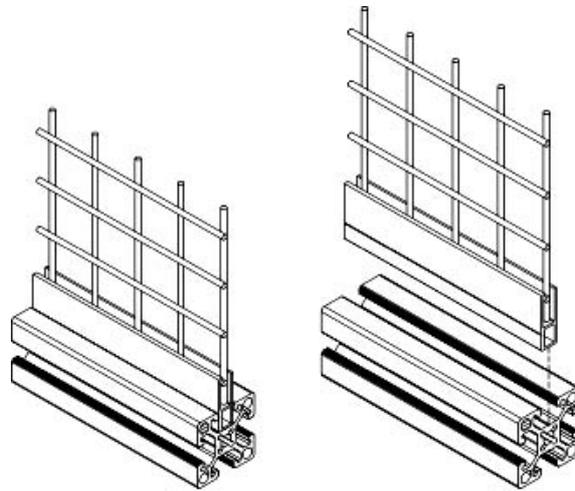


Fig. 30 Perfiles y rejillas de aluminio

Quedando definida una estructura elaborada por perfiles de aluminio ligeros de 45x45 mm y paneles de rejillas de aluminio. El banco de ensayo tiene una dimensiones de 2,70 m de alto y 4 m de largo y es capaz de soportar los esfuerzos externos generado por el régimen de trabajo de la instalación.

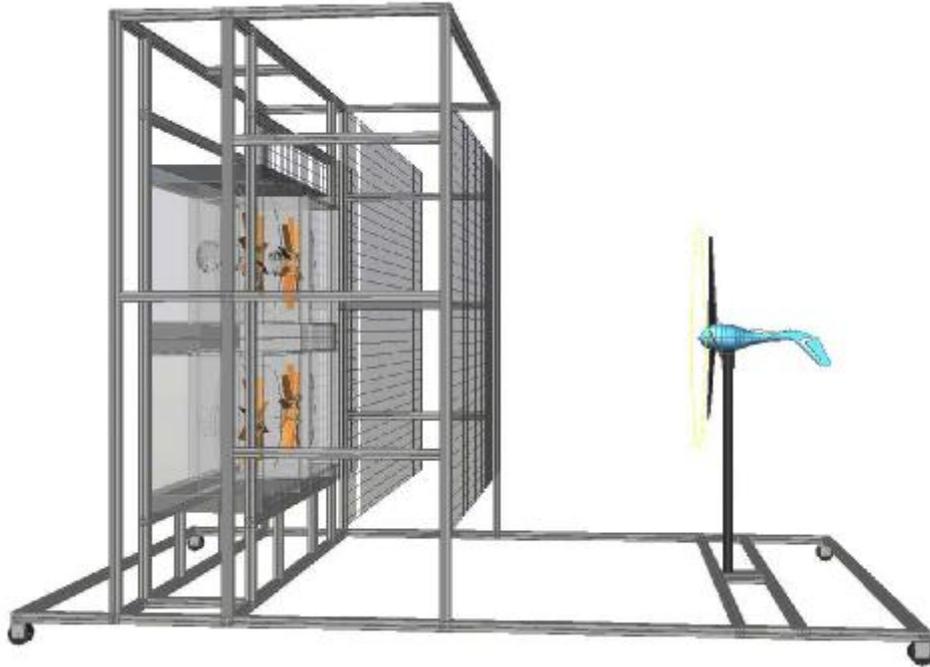


Fig. 31 Vista general de la estructura soporte del banco de ensayo

3.3 Los ventiladores

La elección de los ventiladores era de singular importancia para el proyecto ya que era la encargada de generar la corriente de aire que simulaba el efecto de la velocidad del aire sobre el aerogenerador. Se exigía un ventilador helicoidal, compacto y que generara una elevada velocidad de salida del aire.

La elección de ventiladores helicoidales se debe a su capacidad de mover grandes cantidades de aire con muy baja presión, y al hecho de que la transferencia de energía se produce mayoritariamente en forma de presión dinámica.

La primera propuesta consistía en un único ventilador central. Ésta solución evitaría distorsión en la vena de aire generada por el ventilador, por lo que distribución de aire sería más homogénea. Sin embargo, esta solución era la más cara por lo que fue descartada.

Siempre buscando estabilidad en el flujo de aire se propuso colocar nueve ventiladores a tres niveles de altura, con los cuales se equilibraba en gran medida las variaciones en el flujo de aire. De hecho la estructura fue diseñada considerando esta opción, pero de nuevo el factor económico influyó sobre nuestra decisión. Lo que nos decidimos por la tercera propuesta que era una etapa intermedia entre las dos primera.

Esta solución consiste en colocar cuatro ventiladores helicoidales, modelo CJHCH-56-4T-2 de Sodeca, en dos niveles, controlando cada fila de ventiladores de forma independiente mediante un sistema de control de frecuencia.



Fig. 32 Ventilador helicoidal modelo CJHCH-56-4T-2

Los ventiladores integran aislamiento interior acústico, tapas de registro desmontables y estructura en acero galvanizado. Disponen de 10 hélices de poliamida reforzada con fibra de vidrio.

| | |
|-------------------------|-------------------------|
| Modelo | CJHCH-56-45-2 |
| Caudal máximo | 15300 m ³ /h |
| Potencia | 1,5 kW |
| Intensidad máxima | 6,41 A a 230 V |
| Velocidad de giro | 1450 rpm |
| Nivel de presión sonora | 75 bB(A) |
| Dimensione | Ancho: 1000 mm |
| | Alto: 850 mm |
| | Profundidad: 650 mm |

Tabla 7 Características técnicas del ventilador CJHCH-56-4T-2

La curva de potencia de este tipo de ventilador muestra que sus prestaciones se encuentran fuertemente influenciadas por la resistencia al flujo del aire, por lo que un pequeño incremento de la presión provoca una reducción importante del caudal y la velocidad del aire.

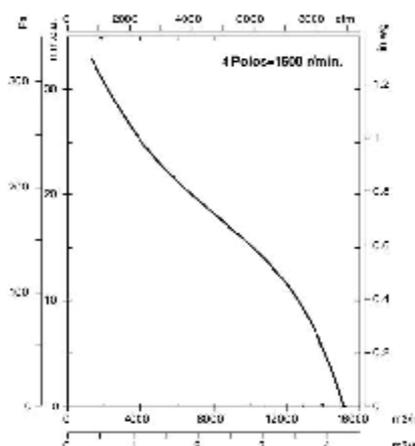


Fig. 33 Curva de potencia del ventilador CJHCH-56-4T-2



Fig. 34 Distribución de los ventiladores en la instalación, parte posterior de la instalación

3.4 Sistema de control de velocidad de los ventiladores

Para controlar la velocidad de rotación de los ventiladores y en consecuencia el caudal y la velocidad de salida del aire se utilizaron variadores de frecuencia.

Los variadores de frecuencia son un sistema utilizado para el control de la velocidad rotacional de los motores de corriente alterna de los ventiladores, por medio del control de la frecuencia de alimentación al motor.

Los variadores de frecuencia operan bajo el principio que postula que la velocidad sincrónica de un motor de corriente alterna está determinada por la frecuencia de la corriente alterna suministrada y el número de polos en el estator, de acuerdo con la relación:

$$rpm = \frac{120 \cdot f}{p}$$

Donde:

rpm: Revoluciones por minuto

f: frecuencia de suministro de corriente alterna (Hercios)

p: Numero de polos

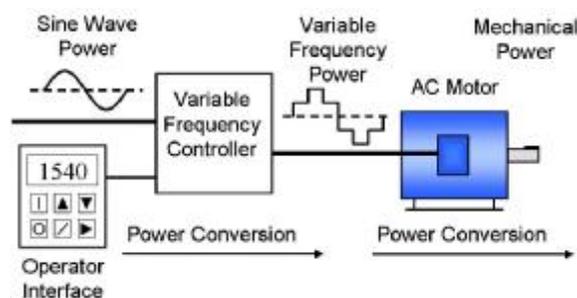


Fig. 35 Diagrama del variador de frecuencia.

En el diagrama de funcionamiento de la figura 35 se puede apreciar que el variador de frecuencia regula la frecuencia del voltaje aplicado al motor, al modular el ancho del pulso, logrando con ello modificar su velocidad de rotación.

La instalación consta de dos variadores de frecuencia marca Omron modelo MX2, que controlan independientemente el trabajo de cada fila de ventiladores, lográndose así una mayor flexibilidad en el control de los mismos, permitiendo ensayar de manera simplificada perfiles de viento reales. Así como la posibilidad de simular, cuando convenga, viento racheado y turbulento al trabajar con diferentes velocidades de rotación en cada fila de ventiladores, lo que permite poder simular el comportamiento de casi todas las posibilidades reales de trabajo.



Fig. 36 Distribución de los variadores de frecuencia MX2 en la instalación

Un elemento importante que define la utilización de los variadores de frecuencia MX2 en la instalación son sus extensas posibilidades de regulación con la que se desea controlar a los ventiladores de acuerdo a las siguientes curvas:

- Curva de frecuencia constante: en este modo el par máximo que puede desarrollar el motor será constante en el rango de frecuencia seleccionada.
- Curva de frecuencia lineal ascendente o descendente: en este modo la frecuencia de trabajo del motor se incrementa de forma lineal hasta alcanzar el par máximo o detenerse.
- Curva de frecuencia de aceleración y desaceleración: Permite definir los tiempos de aceleración y desaceleración que se utilizarán en el trabajo de control del motor, permitiendo controlar la rampa de aceleración o desaceleración hasta llegar a la frecuencia programada.

3.5 Elemento homogenizadores de la vena fluida

Los bancos de ensayos para pruebas aerodinámicas, ya sean de tipo abierto o cerrado que utilizan ventiladores helicoidales, se observa una gran turbulencia en el flujo de aire generador por esfuerzo cortante del viento. La solución adoptada en los mismos es la colocación de dispositivos que disminuyan ese efecto al reducir los remolinos y las variaciones laterales de velocidad del flujo del aire proveniente de los ventiladores.

Los sistemas más utilizados son:

3.5.1 Rejillas de panal

Elementos en forma de panel mallado cuya función es la de dotar al flujo de la dirección deseada, reduciéndose la componente perpendicular de la velocidad del aire a la dirección del flujo principal.

El fluido circula a través de los diferentes elementos de la malla adoptando una disposición de filamentos paralelos a su paso suavizando los posibles remolinos que este pueda tener.

Las rejillas de panal son usualmente construidas con tubos hexagonales empaquetados uno contra otro hasta hacer una pantalla, cuya forma se parece al de un panal de abejas, tal como se muestra la figura 37. Comúnmente el diámetro de los tubos es de aproximadamente 0,5 cm y la profundidad debe ser entre 6 a 8 veces su diámetro.



Fig. 37 Rejillas de panal

3.5.2 Pantallas o rejillas de aire

Son pantallas normalmente hechas de mallas metálicas, las cuales tiene como función principal la de uniformizar el perfil de velocidades del fluido de aire al reducir las heterogeneidades en la velocidad del fluido a costa, sin embargo, de una considerable pérdida de presión.

La solución adoptada en nuestro banco de ensayo para atenuar el efecto de la turbulencia generada por los ventiladores fue la de instalar pantallas metálicas de aluminio con secciones de paso de 3 x 3 cm.

Éstas fueron situadas tanto en la parte posterior los ventiladores, cuya función era la de proteger a los ventiladores de la entrada de objetos extraños actuando como medida de

seguridad así como elemento perfilador del aire, garantizando de esta forma un fluido completamente axial a la entrada de los ventiladores. Como a la salida de los ventiladores.

En total se decidió adoptar la solución de tres pantallas metálicas. La primera fija situada a la salida de los ventiladores cuya función principal es de seguridad y protección y las otras dos desplazables en el eje horizontal lo que permitirá uniformizar el flujo de aire que incide sobre el aerogenerador.

En la imagen 38 se puede apreciar la ubicación de los diferentes paneles metálicos, así como el sistema de fijación utilizado en el mismo. Mostrándose la posibilidad de cambiar la separación de los mismos a partir de ajustar las escuadras que la soportan. Este elemento flexibiliza el sistema adoptado para unificar el flujo de aire a la salida de los ventiladores.



Fig. 38 Distribución de las pantallas metálicas de reducción de turbulencia

La posibilidad de variar la distancia entre los paneles metálicos permite, en primer lugar, uniformizar el flujo de aire, además de jugar con el efecto que las pantallas producen de la disminución de la presión del aire. Lo que genera en los ventiladores helicoidales importantes disminuciones en el caudal y en la velocidad del aire.

3.6 El aerogenerador

Para la realización de la evaluación del recurso eólico se seleccionó el aerogenerador Air X 400 de Southwest Windpower, al ser una turbina autorregulada de 400 W de potencia que lleva incorporado el regulador de carga de batería, lo que hace que la instalación sea sencilla y fácil de montar.

Dispone de palas de fibra de carbono reforzadas. Su ligereza lo hacen el complemento perfecto para múltiples aplicaciones: viviendas aisladas, telecomunicaciones, educación, etc.

El cuerpo de aluminio de alta calidad, con forma aerodinámico, garantiza una alta durabilidad y resistencia ante las inclemencias del tiempo. Presenta, además, un sistema de protección de seguridad electrónica que controla el voltaje y las revoluciones del rotor así como un freno electrónico que se activa al alcanzar la batería su carga máxima.

Cuando el voltaje de la batería alcanza el punto de regulación, la turbina entra en modo regulación y las revoluciones de las palas bajan notablemente. En ese momento la turbina se desconecta automáticamente dejando de generar corriente. La carga normal se reanuda cuando el nivel de la batería baja ligeramente al nivel de carga completa.

El aerogenerador Air X 400 integra un alternador magnético permanente de tres fases formado por 12 imanes de boro y neodimio, lo que proporciona una alta eficiencia de generación.

| ESPECIFICACIONES TÉCNICAS | |
|---------------------------|-------------------------|
| Modelo | Air X 400 |
| Diámetro del rotor | 1,15 m |
| Potencia nominal | 400 W |
| Velocidad de arranque | 3,58 m/s |
| Voltaje | 12 o 24 VDC |
| Velocidad nominal | 12,5 m/s |
| Peso | 5,85 kg |
| Palas | Compuesto fibra-carbono |
| Kilowatt horas por mes | 38 kwh/mes a 5,4 m/s |

Tabla 8 Características técnicas del aerogenerador Air X 400



Fig. 39 Aerogenerador Air X 400

3.7 El sistema de adquisición de datos

Se tratará de un sistema de adquisición de datos implementado para la adquisición y monitoreo, en tiempo real, de los parámetros que caracterizan el comportamiento de los aerogeneradores. El sistema de adquisición de datos se encarga de traducir la magnitud física medida en una magnitudes eléctricas a través de la tarjeta multiplexora 34921A. Este método de evaluación es el más fiable para realizar el análisis del recurso eólico ya que facilita la recolección de datos en un tiempo reduciendo con el mínimo de errores.

En lo que respecta a los parámetros a medir en nuestra instalación, se ha implementado la adquisición de datos, en primer lugar para realizar mediciones de tipo meteorológicos como la temperatura, presión barométrica del aire, requisito fundamental para poder determinar la densidad del aire. Ya que es éste uno de los parámetros que influyen el potencia energético del aire.

Así como el registro de las mediciones asociadas a la velocidad del aire en función de la variación de la velocidad de rotación de los ventiladores y de parámetros que caracterizan el comportamiento del aerogenerador como velocidad de giro, intensidad y tensión generada.

La función principal del sistema de adquisición de datos es transmitir la información obtenida a través de sus canales de entrada, de diferentes señales las cuales son previamente captadas mediante el uso de diferentes sensores. Siendo capaz de monitorizar varios canales al unísono y de almacenar los registros realizados.

En resumen, el sistema de adquisición de datos Data Logger 34980A utilizado en nuestra instalación es una herramienta valiosa para el análisis de los datos recogidos y almacenados en los ensayos, ya que nos permite importar y procesar los datos obtenidos y almacenados a hojas de cálculo y con ellos poder evaluar con facilidad los parámetros que caracterizan a los aerogeneradores.

3.8 Presupuesto de la instalación

Para la implementación del banco de ensayo se ha estado trabajando desde el principio en dos direcciones, la primera relacionada con la búsqueda y selección de los diferentes componentes de la instalación, su nivel de conjugación y viabilidad técnica y económica con el objetivo de configurar un sistema válido técnica y económicamente factible a nuestros objetivos. Y en segundo lugar, el montaje de los diferentes elementos que componen la instalación, su ajuste y puesta en marcha.

El coste de los distintos elementos que componen la instalación se detalla a continuación.

| Elemento | Marca y modelo | Unidad | Coste (Euros) |
|------------------------------|--|--------|---------------|
| Estructura de la instalación | Estructura metálica Alunid 3000, Honeycomb | 1 | 1500 |
| Ventiladores | Sedical, CJHCH-56-47-2 | 4 | 3048 |
| Variar de frecuencia | Omron, MX2 | 2 | 561 |
| Aerogenerador | Sounthwest windpower, Air X 400 | 1 | 713 |

| | | | |
|--|--|---|------|
| Sistema de adquisición de datos y tarjeta multiplexora | Agilent technologies, Data looger 34980A Tarjeta multiplexora 34921A | 1 | 3622 |
| Ordenador | Pentium 4 | 1 | 400 |
| Armario eléctrico | Himel CRSX, IP 66 de acero inoxidable | 2 | 240 |
| Suministros varios | Cables, fichas de empalmen, manguera de tubo flexible | 1 | 60 |
| Batería | Enersol 250, 12v – 256 Ah | 1 | 300 |
| Inversor | Victron energy, phoenix invertir 12/1200 | 1 | 922 |

Tabla 9 Tabla del presupuesto de los elementos estructurales

| Elemento | Instrumento | Unidad | Coste (Euros) |
|--|--|--------|---------------|
| Sensor de flujo | Anemómetro de hilo caliente Elektronik EE576 | 4 | 742 |
| Sonda de temperatura | Pt 100 | 4 | 394 |
| Convertidor de temperatura | TxRail 4 – 20 mA | 4 | 100 |
| Barómetro | HD 9408T BARO, Delta OHM | 1 | 417 |
| Sensor magnético de efecto hall | 1GT101DC, Honeywell | 1 | 35 |
| Convertidor universal de frecuencia | TACO Flex, DPF sensors | 1 | 110 |
| Transductor para medida de voltaje | MCR-VDC-Ui-B-DC, Phoenix Contact | 1 | 75 |
| Transductor para medida de intensidad, efecto hall | DHR-C420, Lem | 1 | 140 |
| Fuente de alimentación 220v/ 24 VDC | DRA18-24 A, 24 VCD | 9 | 371 |

Tabla 10 Tabla del presupuesto de la instrumentación de la instalación

Capítulo 4

DISEÑO DEL SISTEMA DE MEDIDAS

4.1 Introducción

Dentro de este apartado, dedicado al diseño del sistema de medidas, se expone en primer lugar una descripción de las variables a medir y la instrumentación necesaria al efecto, así como una descripción del principio de funcionamiento sobre la cual se basa la instrumentación seleccionada.

Dado que pretendemos determinar el potencial eólico, la curva de potencia y el coeficiente de potencia del aerogenerador bajo ensayo, se ha seleccionado un conjunto de sondas y transductores que en conjugación con el sistema de adquisición de datos se encargue de traducir la magnitud física a medir en una magnitud eléctrica y permitir obtener los resultados previstos.

Los parámetros que queremos medir estarán en función del resultado final a obtener y aparecen representado en la tabla 11.

| Parámetro | Formula | Variables a medir |
|--------------------------------------|--|--|
| Potencial eólico (W/m ²) | $\frac{P}{A} = \frac{1}{2} * \rho * v^3$ | T: temperatura °C Presión barométrica mbar V: Velocidad del aire m/s ρ : densidad del aire kg/m ³ - calcular |
| Potencia eléctrica (W) | $P = I * V$ | I: Intensidad A V: Tensión V V: Velocidad del aire m/s |
| Coeficiente de potencia (Cp) | $Cp = \frac{P_e}{P_{disp}}$ | T: temperatura °C Presión barométrica mbar V: Velocidad del aire m/s ρ : densidad del aire kg/m ³ - calcular I: Intensidad A V: Tensión V W: velocidad angular de la turbina (rad/s) |

Tabla 11 Parámetros a medir en los ensayos

4.2 Medición de la velocidad del aire.

El viento es una magnitud vectorial caracterizada por dos parámetros, la dirección y la velocidad. El viento en superficie raramente es constante durante un periodo determinado. En general varía rápidamente y estas variaciones son irregulares tanto en velocidad como en dirección. A esta característica del viento se le denomina turbulencia.

La velocidad del aire, es una magnitud que nos permite valorar la rapidez y dirección de los vientos y se mide con el anemómetro, que suele registrar dicha dirección y rapidez a lo largo del tiempo.

4.2.1 Anemómetro de rotación

Está dotado de cazoletas (Robinson) o hélices unidas a un eje central. El viento al soplar empuja las semiesferas y éstas hacen girar el eje. En los anemómetros magnéticos, dicho giro activa un diminuto generador eléctrico que facilita una medida precisa.

En los equipos modernos la velocidad de rotación de las cazoletas se mide mediante transductores eléctricos. El principio de medición se basa en la convención de la rotación del mismo en una señal eléctrica. Un sensor inductivo de proximidad cuenta las revoluciones del molinete y emite una señal de pulso que se convierte, en el instrumento de medición, en valores de velocidad del aire.

Para la medición de caudales turbulentos se recomienda molinetes de diámetros grandes, ya que el área del molinete ayuda a tener lecturas promedios del flujo turbulento.

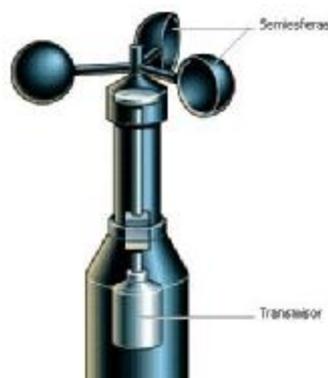


Fig. 40 Anemómetro de cazoleta

4.2.2. Anemómetro de compresión

La velocidad del viento se mide por la presión del aire sobre un tubo de Pitot. Se utiliza para realizar las mediciones de la velocidad del aire en el interior de conductos, con velocidades de circulación del aire bajas debido a la interferencia generada por las ondas de impacto.

Se basa en el tubo de Pitot y está formado por dos pequeños tubos, uno de ellos con orificio frontal (que mide la presión dinámica) y el otro sólo con un orificio lateral (que mide la presión estática). La diferencia entre las presiones medidas permite determinar la velocidad del viento.

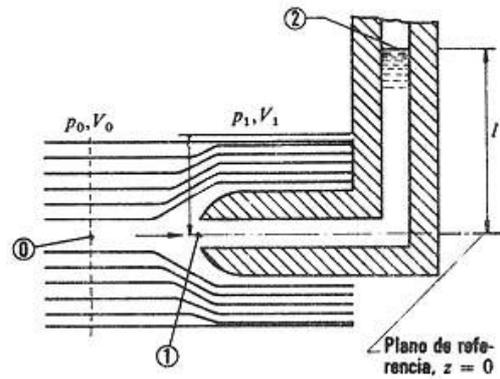


Fig. 41 Tubo de Pitot en el interior del flujo de aire

El tubo de Pitot debe estar orientado perpendicular al sentido del flujo de aire, dando una altura máxima cuando esté perfectamente alineado.



Fig. 42 Anemómetro basado en el tubo de Pitot

4.2.3 Anemómetro de hilo caliente, térmico.

Para velocidades del aire fluctuantes con cambios bruscos o repentinos de dirección, como el caso de las turbulencias se debe utilizar anemómetros de hilo caliente. Los anemómetros de hilo electrocalentado consisten en un fino alambre que se calienta por medios eléctricos dentro de la corriente de aire al cual se le va a medir la velocidad. A medida que la velocidad del aire aumenta, dicho alambre se enfría, de modo que la resistencia eléctrica aumenta, con lo que se puede determinar por medio de la lectura de la resistencia eléctrica la velocidad de flujo del mismo. De esta manera, la corriente que va a atravesar el hilo de platino será perfectamente proporcional a la velocidad con la que se produzca el viento.

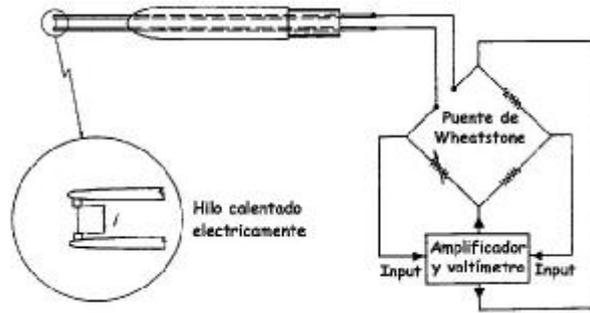


Fig. 43 Anemómetro de hilo caliente y circuito con el puente de Wheatstone para la realimentación

Los sensores de un anemómetro de hilo caliente son hilos con un diámetro de 0.5 – 5 mm, con lo que se consigue mantener uniforme la distribución de la velocidad instantánea en la región ocupada por el sensor, al mismo tiempo que se minimizan las distorsiones ocasionadas por las sondas en el flujo de aire.

Para las realizaciones de las mediciones de la velocidad del aire en el banco de ensayo se utilizaron anemómetros de hilo caliente modelo EE575 de E+E Elektronik dado su alta precisión y máxima sensibilidad, así como por su facilidad y rapidez de montaje.



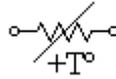
Fig. 44 Anemómetro de hilo caliente EE575

La electrónica integrada en el tubo de la sonda proporcionará una señal analógica lineal de 0 - 10 V para el rango de velocidad 0 a 20 m/s.

4.3 Medición de la temperatura.

4.3.1 Detectores de temperatura resistivos

Los detectores de temperatura resistivos (RTD) son sensores de temperatura basados en la variación de la resistencia de un conductor con la temperatura.



El principio de medición se basa en el hecho de que al calentarse un metal sobre el cual circula una corriente eléctrica habrá una mayor agitación térmica, dispersándose más los electrones y reduciéndose su velocidad media, aumentando la resistencia. A mayor temperatura, mayor agitación, y mayor resistencia.

La variación de la resistencia puede ser expresada de manera polinómica como sigue a continuación. Por lo general, la variación es bastante lineal en márgenes amplios de temperatura.

$$R = R_0 \cdot (1 + a_1 \cdot \Delta T + a_2 \cdot \Delta T^2 + \dots + a_n \cdot \Delta T^n)$$

Donde:

R_0 : Resistencia a la temperatura de referencia (Ω)

T : Incremento de temperatura respecto a la de referencia ($^{\circ}\text{C}$)

α : Coeficiente de temperatura de la resistencia ($\Omega \times ^{\circ}\text{C}$)

Las principales ventajas de estos sensores es su sensibilidad y alta exactitud que es unas diez veces mayor a la registrada por los termopares.

Un ejemplo característico de detectores de temperatura resistivos (RTD) son las sonda de temperatura tipo Pt 100.

4.3.2 Sonda de temperatura Pt 100.

El sensor PT-100 también conocido como sonda de temperatura de coeficiente positivo, es un sensor de temperatura que basa su funcionamiento en la variación de su resistencia a cambios de temperatura en el medio. Su estructura está formada por un arrollamiento muy fino de platino bobinado entre capas de material aislante y protegido por un revestimiento cerámico.



Fig. 45 Sonda Pt 100

El material que forma el conductor de platino, posee un coeficiente de temperatura de resistencia α de $0.384 \Omega^{\circ}\text{C}$, el cual determina la variación de la resistencia del conductor por cada grado que cambia su temperatura.

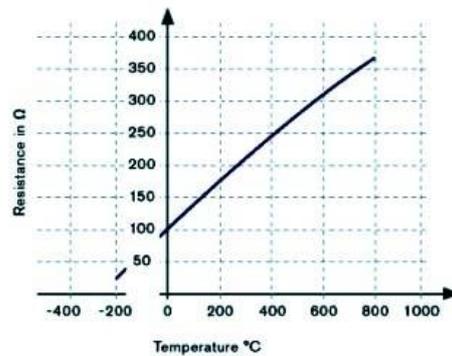


Fig. 46 Curva característica de resistencia de un sensor Pt 100

Para un sensor Pt 100, un cambio de temperatura de 1°C provocará un cambio en la resistencia de 0.384 ohmios, por lo que incluso un pequeño error en la medición de la resistencia puede causar un gran error en la medición de la temperatura. Para trabajos de precisión se utilizan sensores de tres y cuatro hilos.

Modo de conexión de 3 hilos: Es el más común y resuelve muy bien los problemas generados con el trazado de los cables, pero debe cumplir un único requisito y es que los tres cables tengan la misma resistencia eléctrica, pues el sistema de medición se basa en un puente de Wheatstone

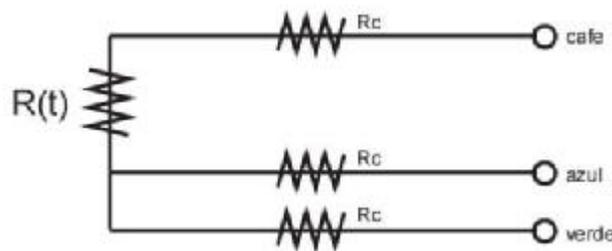


Fig. 47 Modo de conexión de 3 hilos

Las sondas Pt 100 permiten realizar mediciones de temperatura en puntos determinados y transmitir la información, ya sea en forma de señal resistencia (Ω) o de intensidad ($4 - 20 \text{ mA}$) a un receptor electrónico, ya sea un convertidor, registrador o regulador electrónico.

4.3.3 Convertidor de temperatura TxRail 4-20 mA

Los convertidores de temperatura transforman las medidas de temperatura en una señal de proceso utilizando sondas Pt 100. La salida analógica es directamente proporcional al valor de la temperatura medida por la sonda Pt 100.

Los convertidores TxRail 4-20 mA son convertidores de señal con salida 4-20 mA para montaje en carril DIN de 35 mm, esta particularidad los hacen adecuados para colocarlos con las demás sondas y transductores de nuestro banco de ensayo en el cuadro de control, junto con las fuentes de alimentación de corriente directa.



Fig. 48 Convertidor de temperatura TxRail 4-20 mA

Características técnicas:

Entrada programable para termopares tipo J,K,T y Pt 100 de 2 y 3 hilos

Rango de salida de 4-20 mA

Alimentación: 12 a 35 Vcc

Efecto por temperatura: 0,003% del SPAN/°C

Temperatura de operación: -40 a 85 °C

Dimensiones: 72 x 78 x 19 mm

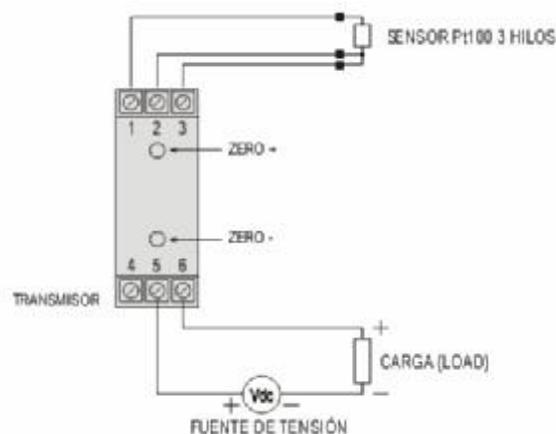


Fig. 49 Conexión eléctrica del convertidor de temperatura TxRail 4-20 mA

4.4 Medición de la presión atmosférica.

La presión atmosférica es la presión ejercida por el aire atmosférico en cualquier punto de la atmósfera. Normalmente se refiere a la presión atmosférica terrestre.

La presión atmosférica en un lugar determinado experimenta variaciones asociadas con los cambios meteorológicos.

La presión atmosférica normalizada, 1 atmósfera, se define como la presión atmosférica media al nivel del mar y que equivale a 101 325 Pa.

La presión atmosférica decrece a razón de 1 mmHg por cada 10 m de elevación en los niveles próximos al del mar. Así mismo la densidad del aire disminuye conforme aumenta la altura.

El instrumento destinado para medir la presión atmosférica es el barómetro, existiendo de muchos tipos:

- Barómetro de Fortín
- Barómetro de mercurio
- Barómetro aneroide
- Barómetro electrónico

Los barómetro electrónicos, son los más precisos y estables en cuanto a su medición, y los más utilizados en el campo de la investigación científica, sobre todo por su posibilidad de salida analógica. Con niveles de resolución de hasta 0,1 mbar

En nuestra instalación, para la realización de la presión atmosférica, utilizamos un barómetro electrónico marca: Delta OHM modelo: HD 9408T BARO

Es un barómetro electrónico con salida analógica que utiliza un sensor piezoresistivo lo que garantiza una alta estabilidad y la exactitud de la medición, así como una baja histéresis.

Característica:

- Marca: DELTA OHM
- Modelo: HD 9408T BARO
- Rango de medición: 800 a 1100 mbar
- Precisión: $\pm 0,4$ mbar a 20 ° C
- Presión de sobrecarga: 2 bar - 30 psi
- Tiempo de respuesta: <200 ms
- Temperatura de funcionamiento: -30 a +60 ° C
- Fuente de alimentación: 8-35 Vcc
- Consumo: 4 mA
- Salida analógica: 0 a 10 Vcc



Fig. 50 Barómetro electrónico HD 9408T BARO

La salida del sensor está condicionada a que la corriente de salida analógica de 0 a 10 V sea linealmente proporcional a la presión barométrica, permitiendo el monitoreo continuo a partir de un sistema de adquisición de datos o para sistema de adquisición remota.

4.5 Medición de la velocidad de giro del aerogenerador.

4.5.1. El tacómetro

Un tacómetro (del griego, *τάχος tachos* = velocidad y *μέτρον metron* = medida) es un dispositivo que mide la velocidad de giro de un eje, normalmente se mide en revoluciones por minuto (RPM).

Los tacómetros digitales realizan la medición a distancia ofreciendo una lectura rápida y precisa de las RPM sin necesidad de contacto con el eje del motor bajo ensayo. En algunos casos, como los tacómetros digitales de mano, la medición se realiza bien de forma óptica como por contacto mediante diferentes adaptadores.

En la medición óptica se enfoca un rayo de luz al objeto a medir que rebota en una banda reflectante que se adhiere a la pieza giratoria indicándose así la frecuencia de rotación. La medición mecánica de las revoluciones se realiza con un adaptador de punta que se sitúa sobre el eje de la pieza en movimiento.



Fig. 51 Tacómetro digital de mano

Para instalaciones de laboratorio, como el caso de nuestro banco de ensayo, se utilizan los denominados convertidores universales de frecuencia de captación de impulso sobre carril DIN, ya que permiten todo tipo de captadores de pulso con una gran capacidad de excitación y un amplio rango de frecuencia.

Este convertidor universal de frecuencia convierte la frecuencia en una señal proporcional de salida en forma de corriente de 4-20 mA. Su configuración es sencilla, ya que dispone de una serie de microswitches para ajustar el rango de frecuencia, la selección del tipo de captador, el voltaje de excitación del captador, etc.



Fig. 52 Convertidores universales de frecuencia TACO flex

Dentro del tipo de captadores admisibles por el dispositivo, seleccionamos para nuestra aplicación un sensor magnético de estado sólido que utiliza un circuito diferencial de efecto Hall para detectar con precisión el movimiento de objetos metálicos, marca Honeywell, modelo 1GT101DC .



Fig. 53 Sensor magnético de efecto Hall 1GT101DC

El sensor consiste en una bobina con núcleo de ferrita, un circuito energizado de dos alambres dentro de la cubierta del sensor, un oscilador y un circuito de salida.

Al aproximarse un objeto metálico, se inducen corrientes de histéresis en el objeto. El circuito sensor reconoce entonces un cambio específico de amplitud y genera una señal que conmuta la salida a la posición "ON" y "OFF" y emite a su vez una salida analógica de 4 – 20 mA directamente proporcional a la frecuencia de los pulsos magnéticos . Este dispositivo detecta las variaciones de frecuencia que se producen sobre el eje del aerogenerador como consecuencia de la rotación de las palas del aerogenerador.

4.6 Medición de voltaje, corriente directa

La corriente directa (CD) o corriente continua (CC) es aquella cuyas cargas eléctricas o electrones fluyen siempre en el mismo sentido en un circuito eléctrico cerrado, moviéndose del polo negativo hacia el polo positivo de una fuente de fuerza electromotriz (FEM), tal como ocurre en las baterías.

Los aerogeneradores de pequeña potencia producen a la salida del generador de imanes permanentes tensión en corriente alterna de frecuencia variable. Ésta es rectificada a corriente continua por el rectificador de carga monofásico, que en algunas ocasiones se encuentra en el interior de propio aerogenerador.

4.6.1 Transductor de medición de voltaje para voltaje de corriente directa

Los transductores de medición de voltaje entregan un nivel de voltaje equivalente a la señal física que se mide. Si la entrada es de tensión DC, la señal es adaptada y filtrada antes de su conversión en una señal pulsante. La cual es transferida, mediante optoaisladores, nuevamente filtrada y adaptada a la entrada del amplificador. Finalmente es entregada al amplificador que transforma la tensión de entrada en corriente de salida la cual es una función lineal de la cantidad de tensión de entrada.



Fig. 54 Transductor de medición de voltaje para voltaje de corriente directa

En nuestra instalación la tensión generada por el aerogenerador la medimos a través del transductor de medición de voltaje para voltaje de corriente directa MCR-VDC-UI-B-DC, proporcionada por Phoenix que toma la tensión a la salida del aerogenerador. Este traductor presenta varias ventajas como ser soportada sobre carril DIN, configuración y ajuste sencillo. Así como permitir medir señales en el rango de 0 a 20 VDC y convertirla en una señal analógica normalizada de 0 a 10 v.

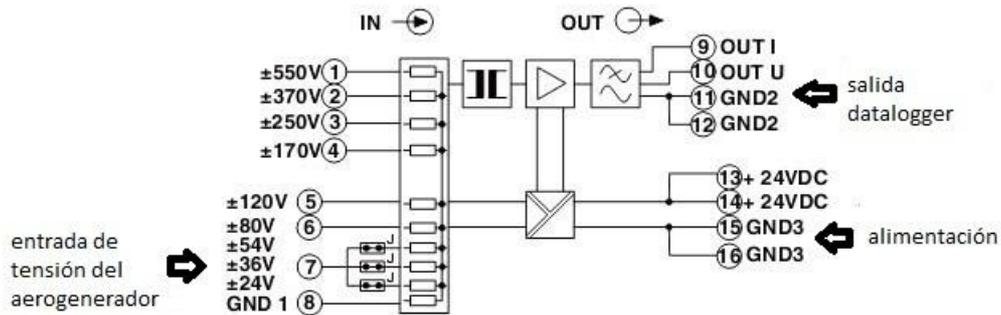


Fig. 55 Esquema de conexión de transductor MCR-VDC-UI-B-DC

4.7 Medición de Intensidad, corriente directa

La corriente o intensidad eléctrica es el flujo de carga por unidad de tiempo que recorre un material. Esta se debe al movimiento de los electrones en el interior del material y depende fundamentalmente de la tensión (V) que se aplique y de la resistencia (R) en ohm que ofrezca al paso de esa corriente la carga o consumidor conectado al circuito.

Si la intensidad es constante en el tiempo, se dice que la corriente es continua; en caso contrario, se llama variable.

En el caso de los aerogeneradores el voltaje de salida es en corriente alterna y variable en el tiempo, dado que depende directamente de la velocidad del aire, manteniéndose constante la resistencia eléctrica del conducto que une el aerogenerador con la batería o acumuladores.

4.7.1 Transductor toroidal de efecto Hall.

Diferentes métodos de medida de la corriente eléctrica se han desarrollado a lo largo del tiempo basados en principios puramente eléctricos, magnéticos ópticos o haciendo uso del comportamiento que presentan algunos materiales frente a la presencia de un campo magnético.

En nuestra instalación la corriente directa generada por el aerogenerador la medimos a través de un transductor de corriente alterna-corriente directa con salida de corriente modelo DHR-C420, que utilizar el efecto hall como principio para realizar la medición.

El transformador consta de un núcleo magnético toroidal, cortado para albergar a la sonda Hall, de modo que el núcleo magnético se utiliza para encaminar el campo magnético originado por la corriente a medir que circula por el conductor que atraviesa al núcleo.

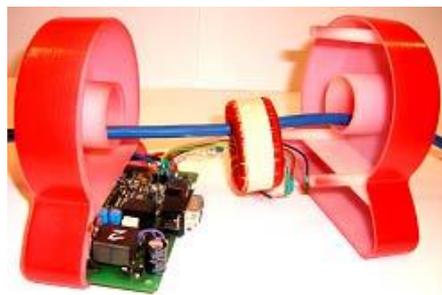


Fig. 56 Núcleo magnético toroidal

La principal ventaja de este sistema es que es capaz de medir corriente continua sin necesidad de cortar o interrumpir el cable de conexión, ya que éste pasa a través del núcleo toroidal realizándose una medición estable y precisa.



Fig. 57 Transductor toroidal de efecto Hall DHR-C420

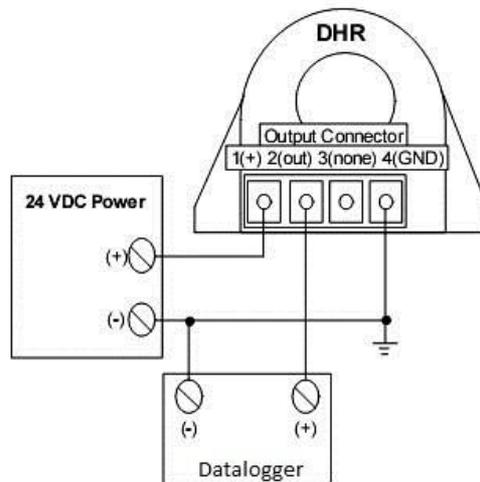


Fig. 58 Esquema de conexión al sistema de adquisición de datos

4.8 Sistema de adquisición de datos.

El hombre en su afán de investigar y conocer los diferentes procesos que se desarrollaban a su alrededor comenzó a elaborar procedimientos para transformar una magnitud física, obtenida de la naturaleza, en una magnitud eléctrica con la finalidad de analizarla, evaluarla e interactuar en su control.

Si embargo en una investigación científica o en un proceso industrial el volumen de datos y parámetros a muestrear es elevado, siendo necesario el desarrollo de sistema de adquisición de datos que realicen tareas de muestreos continuos, almacenamiento de los datos y secuenciación gráfica de los mismos, permitiendo además el procesamiento y control remoto de los mismos.

Para llevar a cabo un control eficaz sobre un determinado proceso, se hace necesario captar una serie de datos para, posteriormente, analizarlos, tratarlos, almacenarlos y evaluar su evolución. Generalmente, los datos o variables que se han de captar tienen un carácter analógico, mientras que su tratamiento, almacenamiento y análisis son mucho más eficaces cuando se hace digitalmente. Esto implica una serie de módulos electrónicos que permitan llevar a cabo una transformación de los datos desde el campo analógico al campo digital.

Al conjunto de los diferentes módulos electrónicos que permiten llevar a cabo dicha transformación se le denomina Sistema de Adquisición de Datos (SAD).

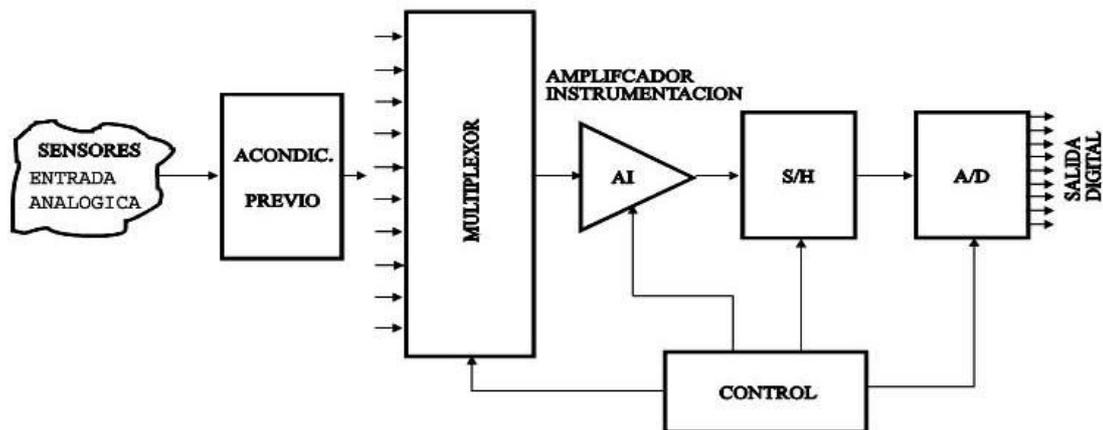


Fig. 59 Diagrama de bloque de un sistema de adquisición de datos.

4.8.1 Elementos que componen un sistema de adquisición de datos.

Las sondas o sensores: Son elemento de medición directa que convierte la variable física que se desea registrar en una magnitud eléctrica (voltaje, corriente, resistencia, frecuencia, etc). Esta señal eléctrica suele ser de muy bajo nivel, por lo que generalmente se requiere un acondicionamiento previo, consiguiendo así niveles de tensión/corriente adecuados para el resto de los módulos del sistema de adquisición de datos. Entre las magnitudes físicas más importantes a registrar en nuestro banco de ensayo tenemos: temperatura, presión barométrica, velocidad del aire, tensión y la intensidad de corriente.

Para lo cual utilizaremos, principalmente, dos tipos de sensores:

Sensor de corriente: Convierte la magnitud física a medir en un nivel de corriente directa equivalente. Este tipo de sensor tiene como ventaja que el nivel de corriente obtenido puede ser transportado a grandes distancias sin que se produzcan pérdidas significativas. La gran mayoría de los sensores de corriente están normalizados para transmitir un rango de corriente eléctrica entre los 4 - 20 A, por ser éste un rango óptimo de transportación.

Sensor de voltaje: Este tipo de sensor entrega un nivel de voltaje equivalente a la señal física que se mide, normalmente tienen incorporado circuitos acondicionadores, tales como amplificadores operacionales, comparadores, etc. Este tipo de sensor tiene como ventaja el de poder ajustarse el rango de voltaje que entrega al rango que nuestro conversor necesita a través de resistores variables. Su principal desventaja es que la señal no puede ser transmitida más allá de unos pocos metros sin que se produzcan importantes niveles de pérdidas en la misma.

Sensor Resistivo: Éste es un tipo de sensor que convierte la variación de una señal física en una variación de resistencia, entre los más comunes tenemos las termorresistencias. El inconveniente de este tipo de sensor es que se debe utilizar un puente de Wheastone en algunas de sus variantes para convertir la variación de resistencia en una variación de voltaje.

Acondicionamiento de la señal

Es el encargado del acondicionamiento previo de la señal que es suministrada al convertidor analógico digital, su objetivo es hacer que el valor mínimo de la variable a medir por las sondas o transductores se imponga a la entrada del convertidor analógico digital como el valor mínimo del voltaje que él acepta. La etapa acondicionadora está formada básicamente por amplificadores operacionales, comparadores de nivel y amplificadores de instrumentación.

Multiplexor

Los multiplexores ya sean analógicos o digitales son dispositivos que nos permiten multiplexar varias entradas en una única salida. Ellos nos permiten registrar varias señales diferentes utilizando un único convertidor analógico digital y con ello disminuir de forma considerada el coste del sistema de adquisición de datos.

Generalmente los multiplexores se pueden dividir por el tipo de salida en simples y diferenciales o por el número de entradas en de 2, 4, 8 ó 16 entradas.

Amplificador de instrumentación

Su función es la de amplificar la señal de entrada del sistema de adquisición de datos para que su margen dinámico se aproxime lo máximo posible al margen dinámico del convertidor digital consiguiéndose de esta forma una máxima resolución.

En los del sistema de adquisición de datos con varios canales de entrada, cada canal tendrá un rango de entrada distinto, con lo que será necesario que el amplificador sea de ganancia programable.

Circuito de muestreo y retención (Sample and Hold)

Este circuito es el encargado de tomar la muestra del canal seleccionado (sample) y mantenerla (hold) durante el tiempo que dura la conversión. Este circuito será necesario siempre que la señal de entrada sufra variaciones apreciables durante el tiempo que dura la conversión. Si el convertidor analógico digital posee su propio circuito de muestreo y retención, no será necesario añadirlo a su entrada.

Conversor analógico digital (A/D)

Se encarga de realizar la conversión analógico/digital propiamente dicha, proporcionando un código digital de salida que representa el valor de la muestra adquirida en cada momento. Es uno de los módulos fundamentales en cualquier sistema de adquisición de datos y sus características pueden condicionar al resto de los módulos/circuitos del sistema.

4.8.2 Sistema de adquisición de datos: Data logger 34980A

El sistema de adquisición de datos Data logger 34980A es una unidad compacta de alto rendimiento, de Agilent Technologies, versátil y de fácil manipulación.

Sus prestaciones le hacen adecuado en aplicaciones donde se necesiten recoger una alta densidad de datos de forma continua con elevada frecuencia de muestreo como aplicaciones de verificación del diseño, adquisición de datos en procesos industriales y en laboratorios de investigaciones técnicas.

El Data logger 34980A es un sistema de adquisición de datos de ocho ranuras con capacidad para 40 canales multiplexor de 2 hilos con una tasa de análisis de 100 canales/segundo permitiendo un amplio espectro de adquisición de datos. Basado en una de las series de microcontroladores. Es fácil de usar y reprogramar. Dispone además de salida USB, Ethernet y GPIB como interfaces estándar con el PC, así como conexiones Ethernet e interfaz gráfica web para acceder y controlar la unidad de forma remota.

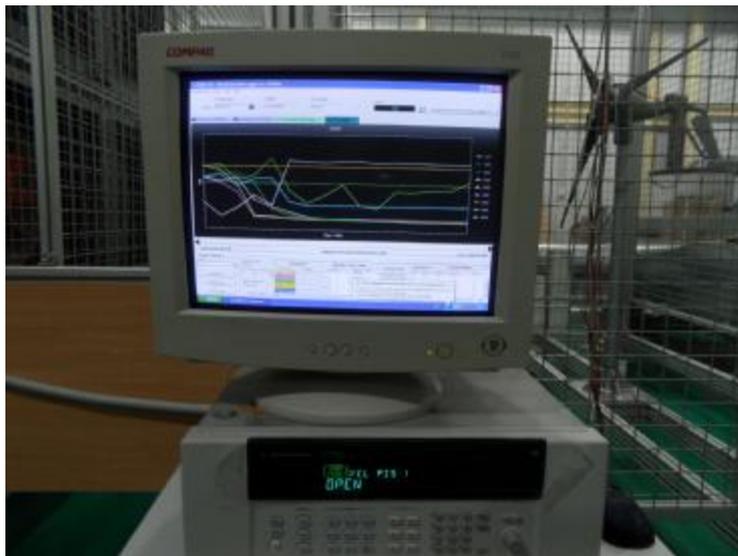


Fig. 60 Sistema de adquisición de datos data logger 34980A

Dispone de un panel frontal con un grupo de teclas para el control y configuración de forma manual del sistema de adquisición de datos, así como una pantalla digital de 6 dígitos que permite visualizar la lectura en tiempo real.

Los canales de entrada son configurados y programados por el usuario, permitiendo definir los intervalos de muestreo y la duración de los mismos, así como el almacenamiento de la información y su forma de exportación.

4.8.3 Tarjeta multiplexora 34921A

La tarjeta multiplexora 34921A de Agilent Technologies nos permiten registrar varias entradas en una única salida. Dispone de 40 canales subdividido en dos bancos de 20 enclavamientos cada uno. En el primer banco se encuentran los canales de 1 al 20 y en el segundo los canales del 21 al 40. Estos se utilizan para registrar entradas de tensión. Además esta tarjeta dispone de cuatro relés adicionales, canales 41 a 44 para la toma de señales en corriente alterna.

La tarjeta multiplexora 34921A dispone de un conector de entrada - salida de 50 pines y un sensor de temperatura incorporado en la placa, que proporciona un sistema de seguridad al sistema de adquisición de datos ante posible subidas de temperatura en los canales bajo muestreo.

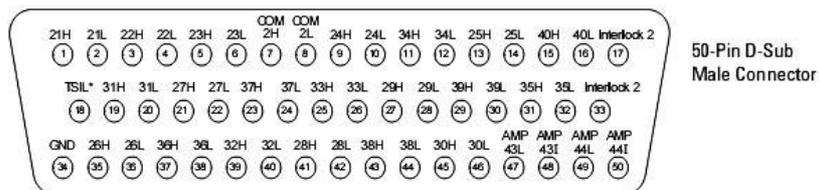


Fig. 61 Conector de entrada de 50 pines

Para la caracterización de las prestaciones de los aerogeneradores de pequeña potencia en nuestro banco de ensayo necesitamos parametrizar la velocidad del aire, la temperatura, la presión atmosférica, la velocidad de giro del aerogenerador, así como la tensión y la intensidad que este generaba.

Cada una de estas variables a medir, en función del tipo de sonda utilizada, generaban a la salida del mismo una señal de tensión o intensidad.

Señales de salida a la salida de las sondas o convertidores:

| Parámetro a medir | Instrumento | Señal de salida analógica | Canal tarjeta multiplexora 34921A |
|-------------------------------------|--|---------------------------|-----------------------------------|
| Velocidad del aire | Anemómetro de hilo caliente EE755 | 0 a 10 v | 1, 2, 3, 4 |
| Tensión, corriente directa | Transductor de medición de voltaje para voltaje de corriente directa MCR-VDC-UI-B-DC | 0 a 10 v | 36 |
| Intensidad, corriente directa | Transductor toroidal de efecto Hall DHR-C420 | 4 a 20 mA | 41 |
| Velocidad de giro del aerogenerador | Convertidores universales de frecuencia TACO flex y Sensor magnético de efecto Hall 1GT101DC | 4 a 20 mA | 42 |
| Temperatura | Trasmisor de temperatura TxRail y Sonda de temperatura Pt 100 | 4 a 20 mA | 43 |
| Presión barométrica | Barómetro Hd 9408 T | 4 a 20 mA | 44 |

Tabla 12 Configuración de los canales de salida de la tarjeta multiplexora 34921A



Fig. 62 Tarjeta multiplexora 34921A

Esta distribución permite utilizar cuatro canales de tensión para los sensores de velocidad, así como otro más para la medición de la tensión en corriente directa a la salida del aerogenerador, quedando disponible en la tarjeta multiplexora 34 canales de tensión para posibles ampliaciones con otras sondas de velocidad.

Los cuatro relés adicionales, canales 41 a 44 para toma de corriente alterna, fueron utilizados, uno para realizar las mediciones de intensidad de corriente generada por el aerogenerador, que conjuntamente con la tensión medida anteriormente me permite determinar la potencia del mismo. Y los tres se implementaron para recibir las señales emitidas por las sondas de temperatura, presión barométrica y velocidad de giro del aerogenerador, ésta a través del tacómetro.

Del estudio de estos parámetros logramos estudiar las prestaciones del aerogenerador y caracterizar su comportamiento a través de las siguientes relaciones:

Relación entre la velocidad del aire y el coeficiente de potencia C_p

Relación entre la potencia generada y la velocidad específica, λ

Relación entre la potencia generada y el coeficiente de potencia C_p

Relación entre la intensidad generada y la velocidad de giro del aerogenerador, rpm

Relación de la potencia generada y la velocidad del aire, m/s.

Así como el comportamiento del perfil vertical del viento generado por los ventiladores de nuestro banco de ensayo.

4.8.4 Software para la adquisición de datos.

El sistema de adquisición de datos Data Logger 34980A puede ser controlado de forma manual como señalamos anteriormente a través del panel de control frontal, sin embargo, para facilitar el proceso de monitoreo y configuración de los diferentes canales de la tarjeta multiplexora 34921A, la instalación nos proporciona un software de control para la toma de

datos, creación de base de datos y representación grafica en tiempo real de todos los canales bajo monitoreos etc.

El software Agilent BenchLink Data Logger Pro es una herramienta que nos proporciona de manera sencilla el control de los instrumentos, la recogida y análisis los datos. El software es una aplicación de Windows que utiliza un entorno familiar de hojas de cálculo para definir los datos de medición que debemos recoger. Simplemente hay que identificar las medidas que deseamos adquirir, definir los límites y las acciones a realizar, y luego iniciar el proceso. Sus datos son mostrados en tiempo real. El programa permite configura múltiples canales de muestreo, según la configuración que previamente nosotros hemos realizado en la tarjeta multiplexora 34921A, así como el tiempo de muestreos de cada canal.

El software Agilent BenchLink Data Logger Pro es un avanzado sistema de registro de datos sin necesidad de programación que dispone de múltiples opciones para analizar y mostrar los datos como por ejemplo histograma con análisis estadísticos, gráficos de barra y de dispersión, resultados individuales por canales de monitoreo o en conjunto, etc.

Además es fácil de configurar, permite exportar las bases de datos almacenadas en el sistema, así como realizar monitoreos remotos del sistema bajo control. La comunicación entre el sistema de adquisición de datos Data Logger 34980A y la tarjeta multiplexora 34921A se realiza a través del puerto USB o por cable de red RJ45 con el ordenador.

4.8.4.1 Configuración del software de adquisición de datos Agilent BenchLink Data Logger

Una vez que se tiene configurada la tarjeta multiplexora 34921A y conectada al sistema de adquisición de datos, encendido el ordenador y alimentada las diferentes sondas, se procese al la configuración de cada canal. La ventana principal que nos aparece, presenta el siguiente aspecto.



Fig. 63 Ventana principal del software de registro de datos Agilent BenchLink Data Logger Pro

Lo primero de todo es configurar el sistema de adquisición de datos a nuestras necesidades en función de los canales previamente definidos en la tarjeta multiplexora, la cual recogerá todo lo que se programe en los diversos canales. Para ello, se hace clic en configuración, que se encuentra en la barra de menú, se selecciona nueva configuración y aparece esta pantalla, donde debemos dar un nombre a nuestra serie de medición, por ejemplo perfil A.

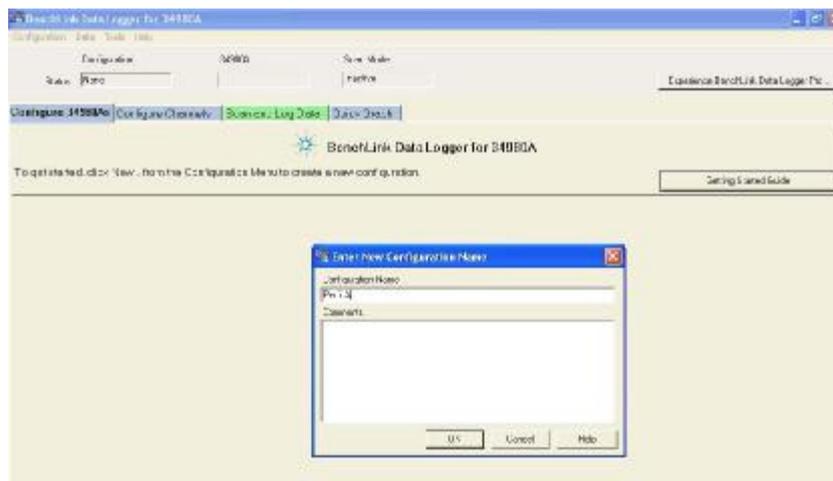


Fig. 64 Crear una configuración de adquisición de datos

Una vez creada nuestra configuración, hay que definir los canales a utilizar en función de tipo de salida que tengan nuestros sensores o traductores, ya sea, salida en tensión o en corriente. Para eso dentro de la pestaña *Configure Instrumento*, se seleccionamos *Connected Instrumento*, con lo cual el software identifica nuestra tarjeta multiplexora dentro del sistema de adquisición de datos, a través de la comunicación realizada vía USB tal y como aparece en las siguientes pantallas.

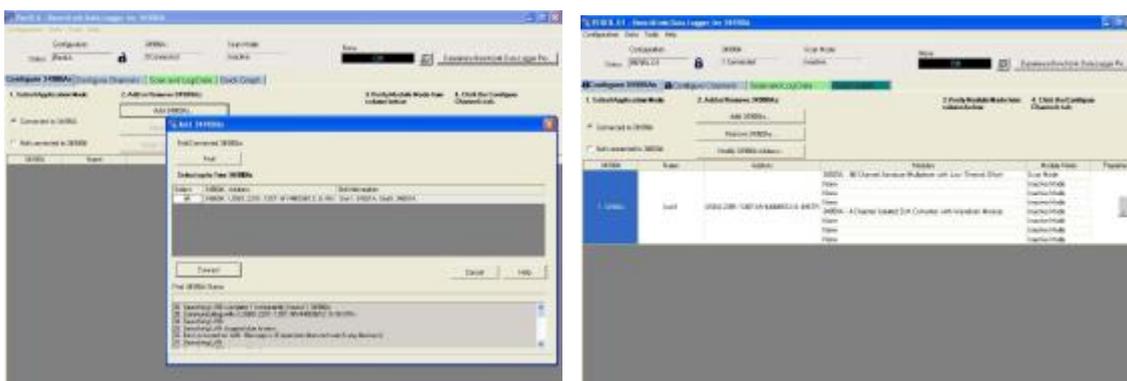


Fig. 65 Identificación de la tarjeta multiplexora 34921A

Una vez reconocidas la tarjeta multiplexora es necesario comenzar a configurar cada uno de los canales en el software de registro de datos. Es necesario asignarle un nombre a cada canal en función de la instrumentación conectada al mismo, así como la medida de salida del canal (DC voltaje, AC voltaje, frecuencia, DC current), el nivel de alarma máximo y mínimo y el rango de medida. Para ellos seleccionamos la segunda pestaña del menú en la opción *Configure Channels* donde nos aparecerá la siguiente pantalla.

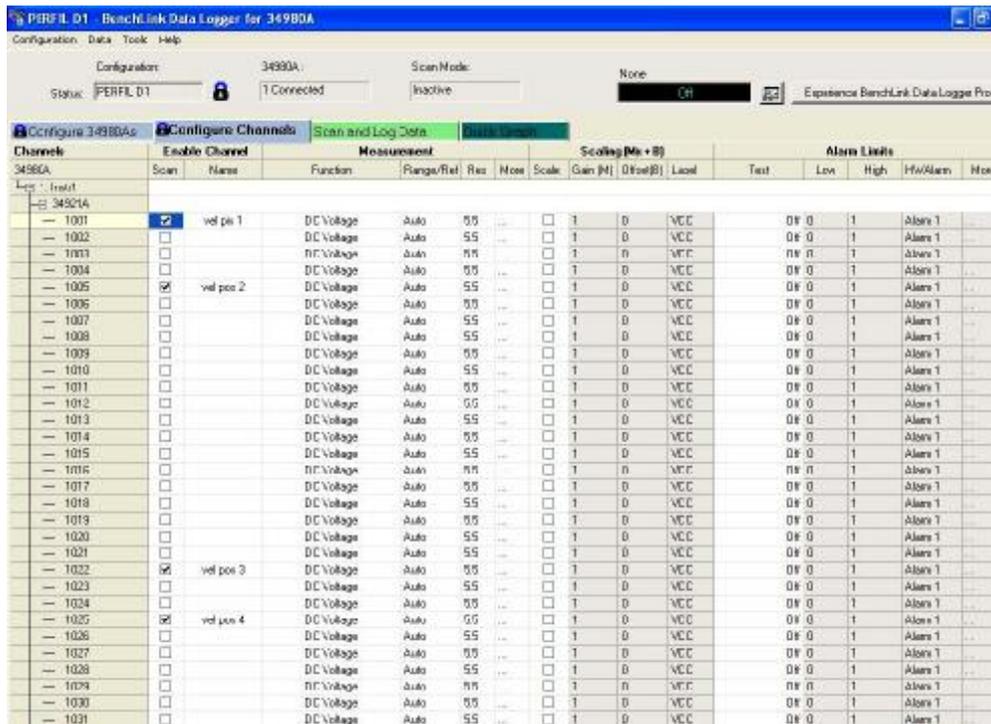


Fig. 66 Pantalla de configuración de los canales a muestrear

Una vez configurados los canales a monitorizar, se hace necesario definir el intervalo de muestreo así como el tiempo total del mismo que puede ser de 30 seg a 60 horas. Para realizar esta configuración seleccionamos la pestaña *Scan and Log Data*, la cual nos permitirá elegir los canales a muestrear, el orden de salida por pantalla, el intervalo de muestreo así como el número de datos que se quieren recoger.

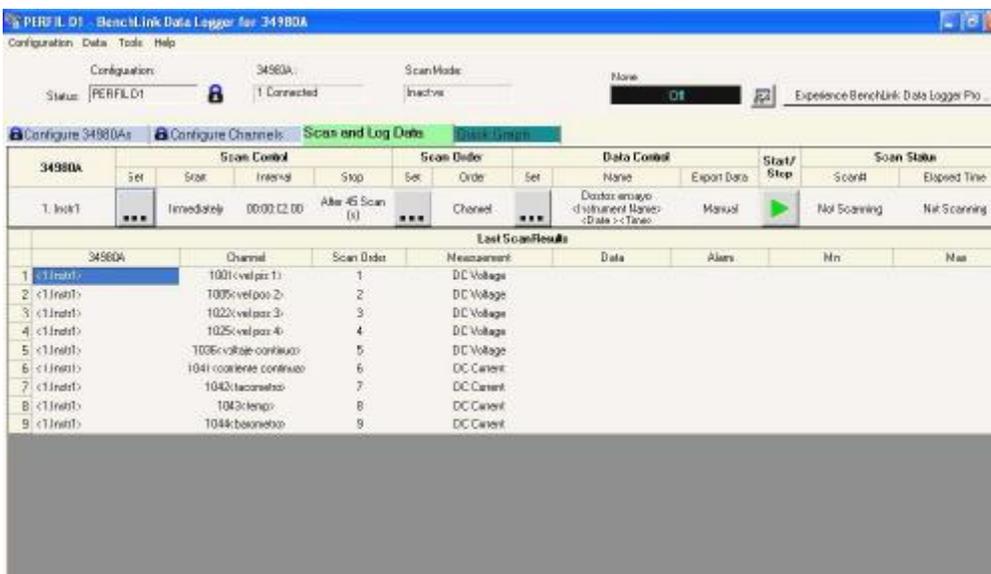


Fig. 67 Definición de secuencia e intervalo de muestreo

Por último, pinchamos la pestaña *Star* y comienza el sistema de adquisición de datos Data logger 34980A a adquirir datos del sistema bajo control, en nuestro caso del banco de ensayo. En función del parámetro ajustado en *Data Control* el muestreo se detendrá automáticamente

al arribar al número de muestras programadas, existiendo también la posibilidad de realizar la parada manual mediante el botón de Stop.

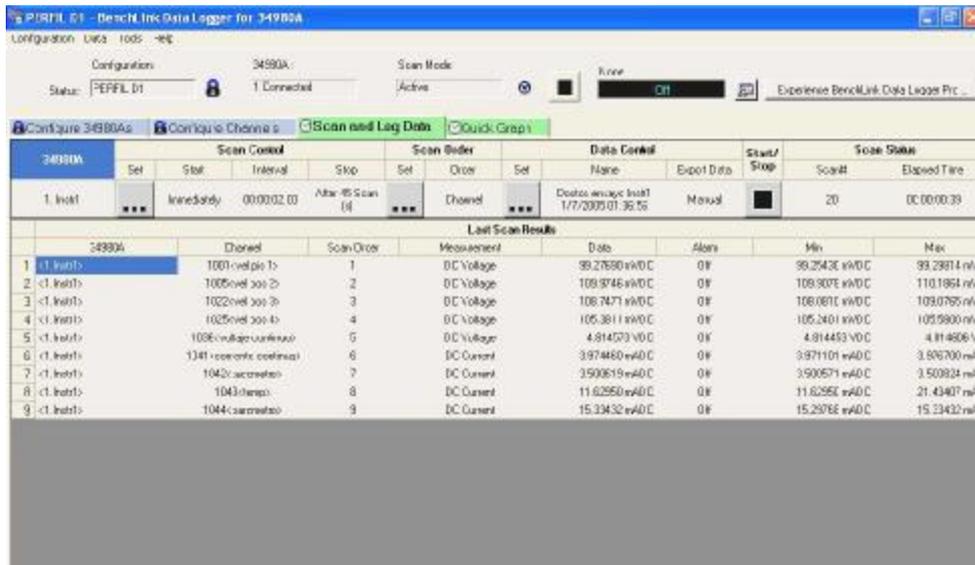


Fig. 68 Etapa de monitoreo continuo

Una vez finalizado el monitoreo de los canales seleccionados, aparece la pantalla *Scan and Log Data Summary* que nos permite exportar los datos obtenidos en el proceso de adquisición de datos a una hoja de cálculo.

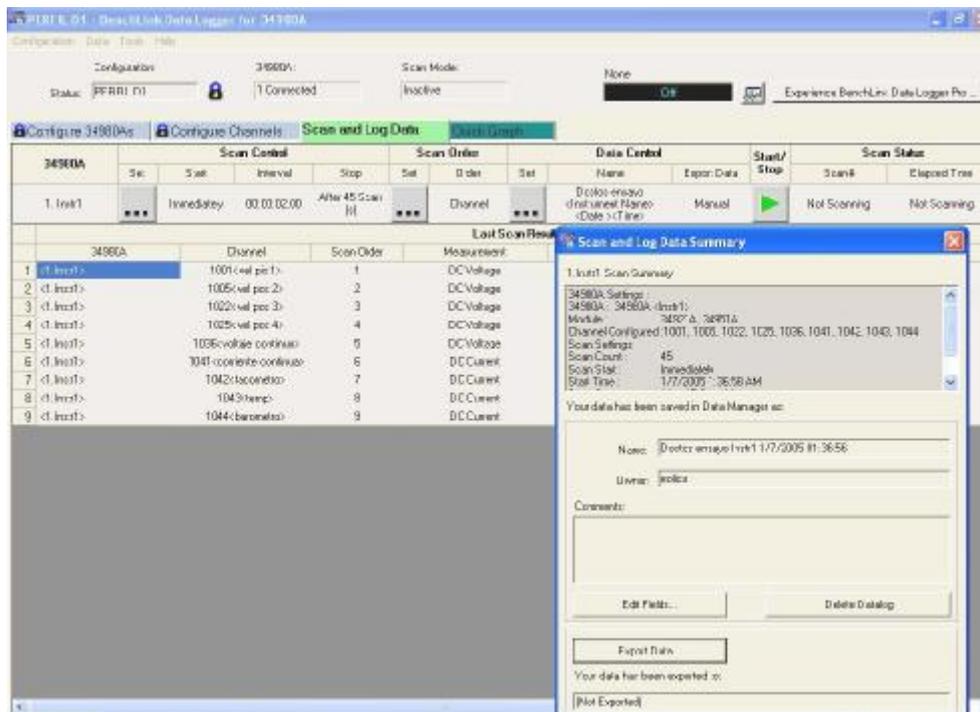


Fig. 69 Exportación de datos

Otra opción disponible, además de exportar los datos a una base de datos, es la de visualizarlos los resultados mediante la opción *Quick Graph*, con lo cual podemos valorar el comportamiento del parámetro medido a lo largo del tiempo de muestreo, representando los mismos en diferentes colores y escalas, para su mejor comprensión.

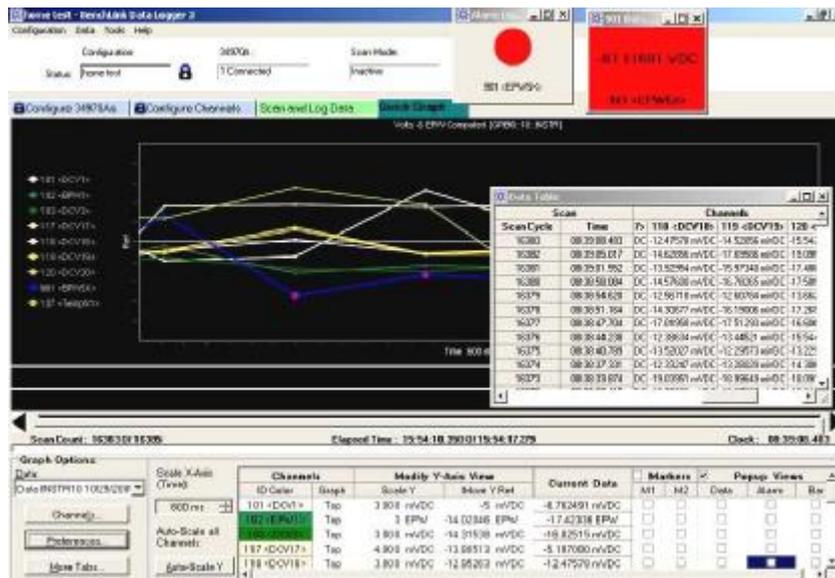


Fig. 70 Representación grafica de los canales muestreados

4.8.4.2 Exportación de base de datos.

El fichero exportado en forma de hoja Excel en formato digital nos permitirá estudiar el comportamiento de los parámetros analizados en cada canal, sin embargo, la magnitud de los resultados aparecen indicada en función de la tensión o intensidad de salida, según las características de las sondas utilizadas. Por lo que es necesario realizar el ajuste mediante ecuaciones lineales de los valores eléctricos obtenidos a los parámetros físicos analizados.

| Channel | Param | Function | Range | Resolution | AcqSetting | Hardware | Unit | Test | Low |
|---------|--------------|------------|-------|------------|------------|----------|------|------|-----|
| 1001 | vdc0606000 | DC Voltage | Auto | 5.0 | DC Voltage | Alarm1 | mVDC | off | 0 |
| 1002 | vdc0606000 | DC Voltage | Auto | 5.0 | DC Voltage | Alarm1 | mVDC | off | 0 |
| 1003 | vdc0606000 | DC Voltage | Auto | 5.0 | DC Voltage | Alarm1 | mVDC | off | 0 |
| 1004 | vdc0606000 | DC Voltage | Auto | 5.0 | DC Voltage | Alarm1 | mVDC | off | 0 |
| 1005 | voltage06000 | DC Voltage | Auto | 5.0 | DC Voltage | Alarm1 | mVDC | off | 0 |
| 1041 | current06000 | DC Current | Auto | 5.0 | DC Current | Alarm1 | ADC | off | 0 |
| 1042 | current06000 | DC Current | Auto | 5.0 | DC Current | Alarm1 | ADC | off | 0 |
| 1043 | temperature | DC Current | Auto | 5.0 | DC Current | Alarm1 | ADC | off | 0 |
| 1044 | temperature | DC Current | Auto | 5.0 | DC Current | Alarm1 | ADC | off | 0 |

| Scan | 1001-vdc0606000 | 1002-vdc0606000 | 1003-vdc0606000 | 1004-vdc0606000 | 1005-voltage06000 | 1041-current06000 | 1042-current06000 | 1043-temperature | 1044-temperature |
|------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-------------------|-------------------|-------------------|------------------|------------------|
| 1 | 0.097835104 | 2.3106390 | 1.1926697 | 1.8384119 | 4.8823508 | 0.8040825 | 0.8229021 | 0.02143581 | 1.0273788 |
| 2 | 0.097835311 | 1.9495430 | 1.4353791 | 1.5400077 | 4.8886411 | 0.8040890 | 0.8229026 | 0.02143580 | 1.0273783 |
| 4 | 0.097836158 | 1.8878809 | 1.2888821 | 1.1844864 | 4.8883974 | 0.8040834 | 0.8229025 | 0.02143584 | 1.0273784 |
| 5 | 0.097835984 | 1.3377792 | 1.5923225 | 1.5825528 | 4.8846899 | 0.8040834 | 0.8229029 | 0.02143580 | 1.0273721 |
| 5 | 0.098025021 | 1.4668771 | 1.4662357 | 1.5525222 | 4.8847771 | 0.804084 | 0.8229023 | 0.02143580 | 1.0273618 |
| 6 | 0.098125064 | 1.8508792 | 1.2582370 | 1.4647387 | 4.8863004 | 0.8040834 | 0.8229021 | 0.02143580 | 1.0273962 |
| 7 | 0.098125481 | 1.5304832 | 1.1434531 | 1.5453123 | 4.8883311 | 0.8040832 | 0.8229041 | 0.02143580 | 1.0273923 |
| 8 | 0.098123007 | 1.8554477 | 1.2889335 | 1.6171325 | 4.8825708 | 0.8040842 | 0.8229078 | 0.02143581 | 1.0273985 |
| 9 | 0.098554028 | 1.7028337 | 1.2784934 | 1.6132925 | 4.8865046 | 0.8040840 | 0.8229026 | 0.02143580 | 1.0273943 |
| 10 | 0.098550155 | 1.8023433 | 1.4263930 | 1.7239521 | 4.8849034 | 0.8040831 | 0.8229024 | 0.02143584 | 1.0273924 |
| 11 | 0.098430068 | 1.7038629 | 1.2683535 | 1.6830779 | 4.8871111 | 0.8040872 | 0.8229026 | 0.02143580 | 1.0273924 |
| 12 | 0.098495008 | 1.3677121 | 1.4621244 | 1.6231025 | 4.8828074 | 0.8040831 | 0.8229021 | 0.02143580 | 1.0273748 |
| 13 | 0.098485001 | 1.7228349 | 1.4441117 | 1.5876585 | 4.8822362 | 0.8040867 | 0.8229020 | 0.02143580 | 1.0273915 |
| 14 | 0.097952078 | 1.3143834 | 1.42278 | 1.4211622 | 4.8862284 | 0.8040834 | 0.8229481 | 0.02143580 | 1.0273543 |
| 15 | 0.098131072 | 1.3668432 | 1.1629975 | 1.4890001 | 4.8832529 | 0.8040830 | 0.8229077 | 0.02143580 | 1.0273823 |

Fig. 71 Fichero exportado en formato Excel

Como resumen de este capítulo podemos destacar el minucioso trabajo de selección y conjugación de los diferentes sensores y transductores utilizados para poder traducir la magnitud física a medir en una magnitud eléctrica. A través del sistema de adquisición de datos Data Logger 34980A y la tarjeta multiplexora 34921A, lo que nos ha permitido determinar las variables necesarias para obtener la curva de potencia del aerogenerador, el potencial eólico así como el coeficiente de potencia C_p del aerogenerador.

PLANIFICACIÓN DE LOS ENSAYOS

5.1 Introducción

En este apartado se procede a exponer la metodología seguida en los ensayos para determinar el potencial eólico de los aerogeneradores. Para ello se expondrán las tablas y medidas utilizadas durante el desarrollo de las evaluaciones.

El objetivo es proponer una metodología sencilla, fiable y que permita determinar los indicadores fundamentales utilizados para valorar las prestaciones de los aerogeneradores de pequeña potencia.

En primer lugar, calcular el potencial eólico que se caracteriza por la relación existente en el área de barrido, la densidad del aire y velocidad del flujo del aire.

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

A continuación se halla la potencia generada por el aerogenerador, caracterizado por la relación existente entre la tensión y la intensidad, en función de la velocidad del aire asumiendo, en nuestro caso, una batería de 12 V.

$$P = V * I$$

Y por último, determinar, la curva de potencia producida por el aerogenerador en función de la velocidad del aire.

En la última tabla se describe el proceso seguido para determinar el coeficiente de potencia C_p , que no es más que la fracción de energía capturada por el aerogenerador caracterizado por la relación existente entre la potencia de salida P_e y la potencia teórica disponible P_{disp} .

$$C_p = \frac{P_e}{P_{disp}}$$

5.2 Tipos de ensayos y tablas de medidas

Para la determinación del potencial eólico, consideramos un área de barrido de $1,16 \text{ m}^2$, se utilizó la tabla 13. En la cual se recogen los datos meteorológicos del aire como son la temperatura y la presión barométrica, para posteriormente determinar la densidad del aire. Así como la velocidad del aire en los diferentes puntos de muestreos para los diferentes perfiles analizados.

| Mediciones | Temperatura ° C | Presión barométrica mbar | Densidad kg/m ³ | Posición 1 | Posición 2 | Posición 3 | Velocidad media m/s | Potencia del viento W | Potencia del viento W/m ² |
|--------------|-----------------|--------------------------|----------------------------|------------|------------|------------|---------------------|-----------------------|--------------------------------------|
| Nivel 2 | | | | | | | | | |
| Nivel1 | | | | | | | | | |
| Nivel 0 | | | | | | | | | |
| Nivel -1 | | | | | | | | | |
| Nivel -2 | | | | | | | | | |
| Media | | | | | | | | | |

Tabla 13 Recogida de datos para determinar el potencial eólico

Para la determinación de la curva de potencia se utilizó la tabla 14, en la cual aparecen representadas no solo los datos meteorológicos del aire, sino también, la tensión y la intensidad generada para diferentes velocidades de rotación de los ventiladores en los diferentes perfiles y posiciones definidas en la metodología de ensayo.

| Mediciones frecuencia 20 Hz | Temperatura ° C | Presión barométrica | Densidad kg/m ³ | Velocidad m/s | | | | Tension (V) | Intensidad (A) | Potencia (W) |
|-----------------------------|-----------------|---------------------|----------------------------|---------------|------------|------------|-------|-------------|----------------|--------------|
| | | | | Posición 1 | Posición 2 | Posición 3 | media | | | |
| Nivel 2 | | | | | | | | | | |
| Nivel1 | | | | | | | | | | |
| Nivel 0 | | | | | | | | | | |
| Nivel -1 | | | | | | | | | | |
| Nivel -2 | | | | | | | | | | |
| Media | | | | | | | | | | |

Tabla 14 Recogida de datos para determinar la curva de potencia

La tabla de recogida de datos 15, permite determinar de forma fácil y directa los valores del coeficiente de potencia C_p a través de los diferentes indicadores que lo caracterizan, viabilizando en gran medida el proceso de análisis de los resultados.

| Plano Analizado: | | | | Frecuencia de rotación de los ventiladores: | | | | | |
|------------------|-------------|----------------|--------------|---|----------|----------------------------|----------------------------|----------------------|------------------------------|
| Perfiles | Tension (V) | Intensidad (A) | Potencia (W) | Temperatura °C | Temp ° K | Presion barométrica (mbar) | Densidad kg/m ³ | Velocida media (m/s) | Coeficiente de potencia (Cp) |
| nivel 2 | | | | | | | | | |
| nivel 1 | | | | | | | | | |
| nivel 0 | | | | | | | | | |
| nivel -1 | | | | | | | | | |
| nivel -2 | | | | | | | | | |
| nivel -3 | | | | | | | | | |

Tabla 15 Recogida de datos para determinar el coeficiente de potencia C_p

5.3 Metodología de la medición

5.3.1 Elección de los puntos de toma de muestras

Se seleccionó un diseño de experimento de medida repetitiva (diseño intrasujeto), en el cual todas las mediciones se realizaron sobre los mismos puntos de muestreo, con lo que se disminuye el efecto de sesgado de la información, ya que los puntos de muestreo para los diferentes perfiles evaluados se encuentran siempre en el mismo plano geométrico.

Para la toma de muestras en el banco de ensayo se colocaron los sensores sobre hilos flexibles de acero inoxidable previamente tensados y ajustados por bridas de sujeción rígidas, que permitían definir para cualquier condición de prueba la misma posición espacial en la toma de los datos. Para mejorar la flexibilidad del sistema, en los extremos el hilo flexible de acero, se colocaron grapas tensoras que no solo permitían tensar el cable de forma manual sino también realizar con facilidad el desplazamiento de las sondas a los diferentes niveles definidos en el diseño de experimento.



Fig. 72 Cable flexible de acero y accesorios de montaje

5.3.2. Velocidad del aire

Las mediciones de la velocidad del aire se realizaron para siete frecuencias de rotación de los ventiladores, 50, 45, 40, 35, 30, 25 y 20 Hz, las cuales fueron ajustadas mediante el variador de frecuencia, lo que permitía simular el efecto de velocidad del aire sobre el trabajo del aerogenerador.

Para la toma de muestras se definieron, sobre el plano vertical, cinco niveles de altura identificadas por:

Nivel 0 o central constituido por las muestras situadas a la altura del eje del aerogenerador.

Nivel 1 o intermedio superior, constituida por muestras situadas a 0,30 m por encima del eje del aerogenerador.

Nivel 2 o superior, constituida por muestras situadas a 0,60 m por encima del eje del aerogenerador.

Nivel -1 o intermedio inferior, constituida por muestras situadas a 0,30 m por debajo del eje del aerogenerador.

Nivel -2 o inferior, constituida por muestras situadas a 0,60 m por debajo del eje del aerogenerador.

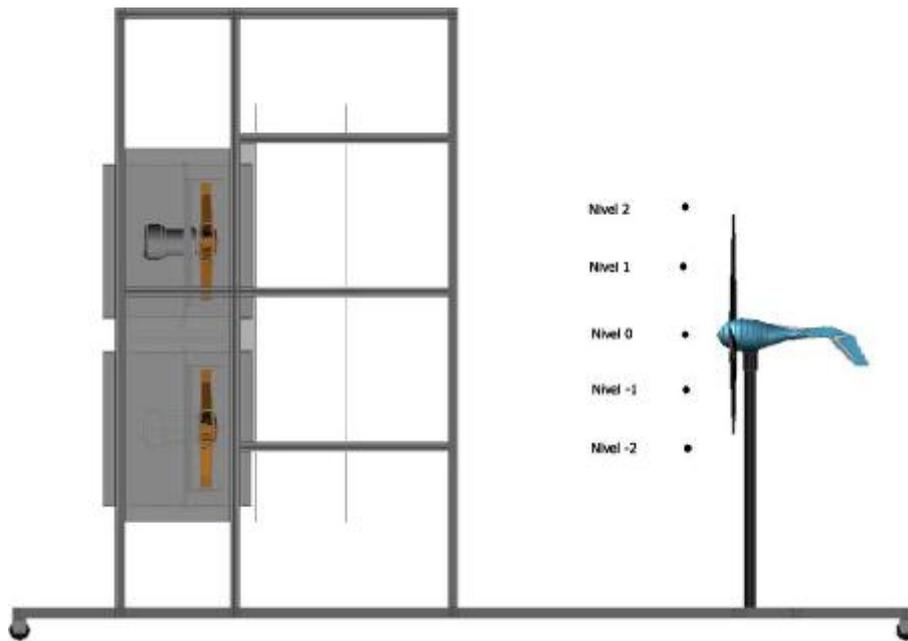


Fig. 73 Vista frontal, niveles de muestreo.

Así mismo se definieron cuatro perfiles de mediciones en el plano horizontal, a partir de la última rejilla de aluminio que sirve de elemento uniformador del flujo de aire, y que está situada a 1 m de distancia de la salida de los ventiladores.

La separación entre los perfiles de medición es de 0,30 m entre sí, de tal forma que el cuarto y último perfil de medición se encuentre situado a tan solo 0,20 m eje del aerogenerador. Siendo éste último perfil (Perfil A), el que nos permitirá evaluar las prestaciones del aerogenerador.

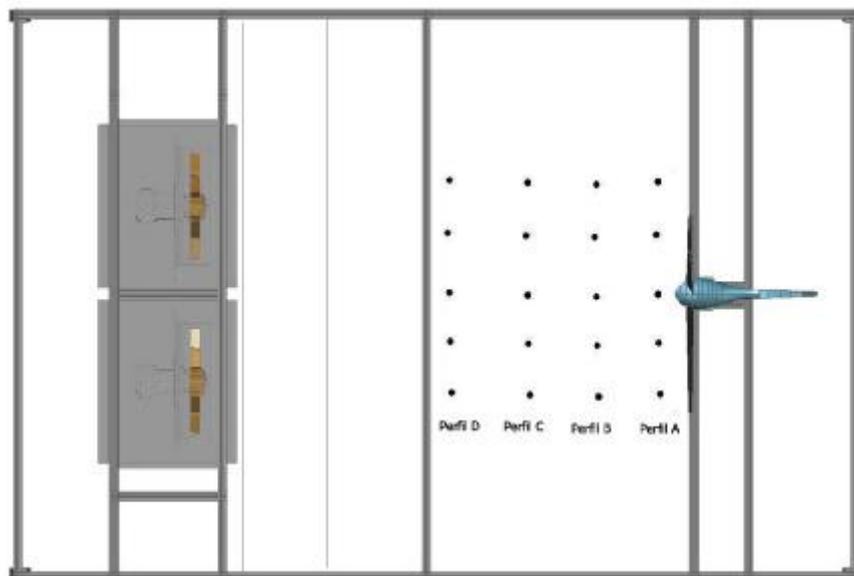


Fig. 74 Vista superior, perfiles de muestreo de velocidad.

Todas las mediciones se realizaron para un mismo nivel con todas las velocidades de aire, lo que permitía eliminar el efecto de la variabilidad de los puntos de muestreos.

Anemómetro de hilo caliente



Alimentación DC



Sistema de adquisición de datos Data logger

Fig. 75 Configuración de la instrumentación para la medición de la velocidad del aire.

5.3.3 Temperatura y la presión barométrica

Las sondas de temperatura Pt100, estaban situadas junto con las sondas de velocidad del aire, por lo que la medición temperatura del flujo del aire estaba garantizada para todos los niveles analizados.



Fig. 76 Colocación de las sondas de temperatura y velocidad.

Para la realización de la medición de la presión barométrica necesaria para conocer la densidad del aire, se colocó el barómetro electrónico HD 9408T BARO en el último panel frontal perpendicular al flujo del aire generado por los ventiladores a un altura de 1,2 m del nivel del suelo.



Fig. 77 Ubicación del barómetro electrónicos HD 9408T BARO

La configuración seleccionada permitía la realización continua de mediciones de presión barométrica y temperatura para todas las condiciones ensayadas.

Barómetro HD 9408T BARO



Alimentación DC



Sistema de adquisición de
datos Data logger

Fig. 78 Configuración del sistema de adquisición de datos y el barómetro

5.3.4 Velocidad de giro del aerogenerador

Para la determinación de la velocidad de giro del aerogenerador se utilizó un sensor magnético de efecto Hall situado en el cuerpo del aerogenerador. Éste detectaba las variaciones de frecuencia que se producían en el eje del aerogenerador, como consecuencia de la rotación de sus palas, y las enviaba al convertidores universales de frecuencia TACO flex situado en el cuadro de mando de la instalación junto con las fuentes de alimentación de corriente directa.



Fig. 79 Ubicación del sensor magnético de efecto Hall 1GT101DC

La configuración existente entre el sensor magnético y el sistema de adquisición de datos es similar a la utilizada por el barómetro, lo que permitía realizar mediciones continuas de la frecuencia de rotación del aerogenerador para todas las condiciones de ensayo.

5.3.5 Intensidad de corriente generada por el aerogenerador, corriente directa

Para el cálculo de la potencia generada por el aerogenerador es necesario o bien disponer de un vatímetro capaz de realizar la medición directamente o disponer de los valores de tensión e intensidad de corriente en cada instante, para posteriormente poder calcular la potencia total generada.

En nuestra instalación la intensidad de corriente directa generada por el aerogenerador es medida de forma continua por un transductor de corriente alterna-corriente directa modelo DHR-C420, que utilizar el efecto hall como principio de medición. Se tomo como punto de muestreo el cable de conexión con polaridad positiva que une al aerogenerador con la batería.

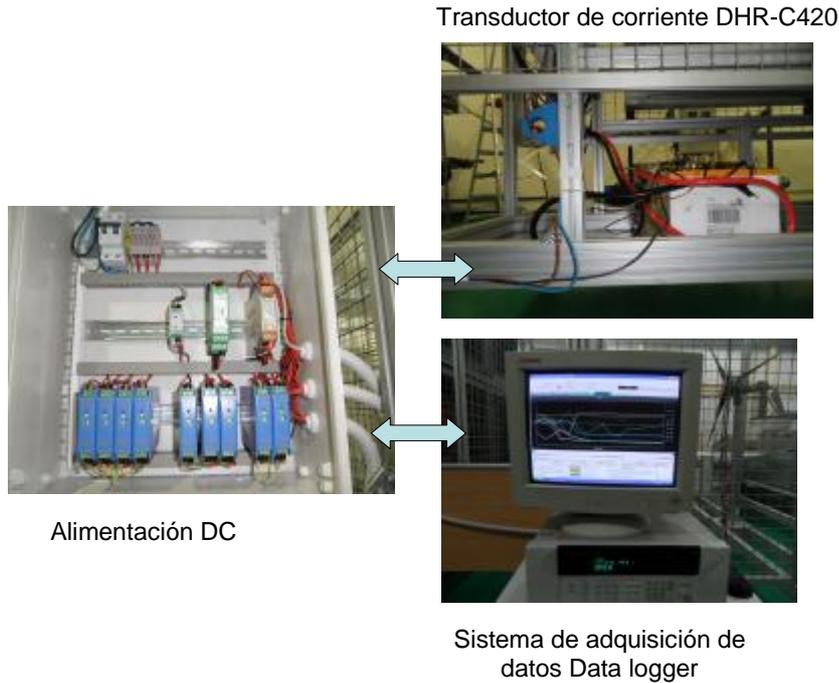


Fig. 80 Configuración del sistema para la medición de intensidad

5.3.6 Tensión de corriente generada por el aerogenerador

Para la configuración de la instrumentación necesaria para la realización de las medidas de la tensión de corriente, la tensión se tomó del cable que une al aerogenerador con la batería. Pero en este caso utilizando las dos polaridades, la negativa y la positiva.

La señal de tensión generada por el aerogenerador era dirigida al transductor de medición de voltaje MCR-VDC-UI-B-DC, que se encontraba en el panel de control junto con las fuentes de alimentación. Este entrega un nivel de voltaje equivalente a la señal física que se envía a la tarjeta multiplexora 34921A.

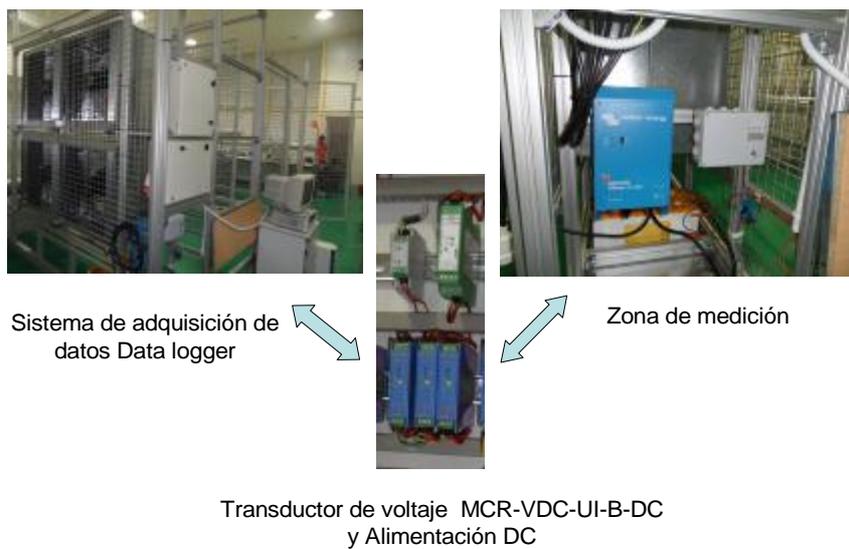


Fig. 81 Configuración del sistema para la medición de tensión

5.3.7. Organización de la información.

La información generada por el sistema de adquisición de datos Data Logger 34980A, como se señaló anteriormente, era exportada en forma de base de datos a una hoja Excel. Sin embargo, para su estudio y posterior procesamiento los datos generados en cada ensayo fueron organizados siguiendo la siguiente estructura.

Perfil de medición:
Nivel de medición:
Temperatura media:

| Frecuencia Hz | V1 m/s | V2 m/s | V3 m/s | V4 m/s | rpm del aerogenerador | Intensidad (A) | Tensión (V) | Potencia (W) |
|---------------|--------|--------|--------|--------|-----------------------|----------------|-------------|--------------|
| 50 | | | | | | | | |
| 45 | | | | | | | | |
| 40 | | | | | | | | |
| 35 | | | | | | | | |
| 30 | | | | | | | | |
| 25 | | | | | | | | |
| 20 | | | | | | | | |

Tabla 16 Hoja de recogida de datos

Donde

V1: Velocidad periférica, a 120 cm del eje del aerogenerador.

V2: Velocidad en el eje del aerogenerador.

V3: Velocidad equivalente al centro de la pala, a 30 cm de su eje.

V4: Velocidad equivalente a la punta de la pala, a 60 cm de su eje.

Siendo las secuenciacines o intervalo de mediciones definidas, para canal monitorizado, en el sistema de adquisición de datos de 60 muestras cada 2 segundos.

Capítulo 6

OBTENCIÓN Y TRATAMIENTO DE LOS RESULTADOS

6.1 Introducción

En este capítulo pretendemos estudiar el comportamiento de las prestaciones del aerogenerador Air X 400 bajo prueba, para ello analizaremos en primer lugar el potencial eólico teórico del aerogenerador y la relación existente entre sus parámetros característicos, así como el comportamiento del perfil vertical del viento frente al mismo. En una segunda parte estudiaremos los aspectos implicados en la predicción de la potencia de la máquina remarcando aquellos que han sido de utilidad en la elaboración de los resultados y su comparación con la curva teórica presentada por el fabricante, valorando su comportamiento. Por último, concluir con el análisis del coeficiente de potencia C_p y su relación con los parámetros característicos de la misma.

6.2 Potencial eólico

Este estudio tiene por objetivo determinar el potencial eólico del viento sobre el aerogenerador Air X 400. Se reunieron datos de temperatura, velocidad de viento y presión barométrica los cuales fueron obtenidos durante las sesiones de evaluación en el banco de pruebas. A partir de los resultados obtenidos se calcularon los siguientes parámetros: densidad del aire Kg/m^3 , área de barrio del aerogenerador, temperatura y la velocidad del aire siguiendo los puntos de monitoreo definidos en la metodología sobre el perfil A para concluir con la determinación del potencial eólico de la máquina.

El potencial eólico depende de $P = f(\rho, A, V_e^3)$,

Donde:

ρ : Densidad del aire, Kg/m^3

A: Área de barrio del aerogenerador, m^2

V_e^3 : Velocidad específica del aire elevada al cubo

Siendo la variable aleatoria de la función la densidad del aire

6.2.1 Tabla de datos

Para analizar los resultados, y siguiendo la metodología establecida, se establece la tabla de salida 17, donde se muestra las variables monitorizadas y los resultados obtenidos en el mismo, considerando que el área de barrido del aerogenerador es de 1,16 m² y que los ventiladores del banco de ensayo trabajaban a su frecuencia máxima de rotación (50 Hz).

| Mediciones | Temperatura °C | Presión barométrica mbar | Densidad kg/m ³ | Posición 1 | Posición 2 | Posición 3 | Velocidad media m/s | Potencia del viento W | Potencia del viento W/m ² |
|--------------|----------------|--------------------------|----------------------------|-------------|-------------|--------------|---------------------|-----------------------|--------------------------------------|
| Nivel 2 | 23,21 | 1021,2 | 1,200 | 6,5 | 4,31 | 5,05 | 5,29 | 102,82 | 88,64 |
| Nivel1 | 23,17 | 1027,3 | 1,206 | 7,99 | 5,44 | 5,71 | 6,38 | 181,72 | 156,66 |
| Nivel 0 | 23,19 | 1022,4 | 1,204 | 6,41 | 7,27 | 7,08 | 6,92 | 231,41 | 199,49 |
| Nivel -1 | 23,42 | 1027,4 | 1,207 | 7,83 | 6,39 | 7,03 | 7,08 | 248,71 | 214,41 |
| Nivel -2 | 23,21 | 1027,7 | 1,208 | 7,26 | 5,86 | 6,74 | 6,62 | 203,23 | 175,19 |
| Media | 23,24 | 1025,2 | 1,205 | 7,20 | 5,85 | 6,322 | 6,46 | 188,23 | 162,27 |

Tabla 17 Tabla de datos, potencial del viento

Los diferentes puntos de muestreo indicados corresponde a:

Posición 1: Situado a la altura del eje del aerogenerador

Posición 2: Situado a 30 cm. del eje, en el centro de la pala

Posicion3: Situado a 60 cm del eje, en la punta de la pala.

Los resultados demuestran que a velocidades del viento máxima de 6,46 m/s la cantidad de energía que el aerogenerador Air X 400, con un radio de pala de 1,61 m, es capaz de capturar es de 188,23 w equivalente a una la potencia media por unidad de área de 162 w/m².

6.2.2 Curva potencial eólico

Para analizar la curva de potencial eólica real determinaremos la curva de potencia corregida por la densidad, ya que es la densidad del aire es la variable aleatoria que influye directamente en el comportamiento del potencial eólico del viento en nuestro aerogenerador. La figura 82 muestra la curva de potencial eólico aprovechable (curva azul), para densidad de aire a presión atmosférica estándar 1,225 Kg/m³ a nivel del mar a 15 °C y el comportamiento del potencial real (curva roja), obtenido en las condiciones de ensayo.

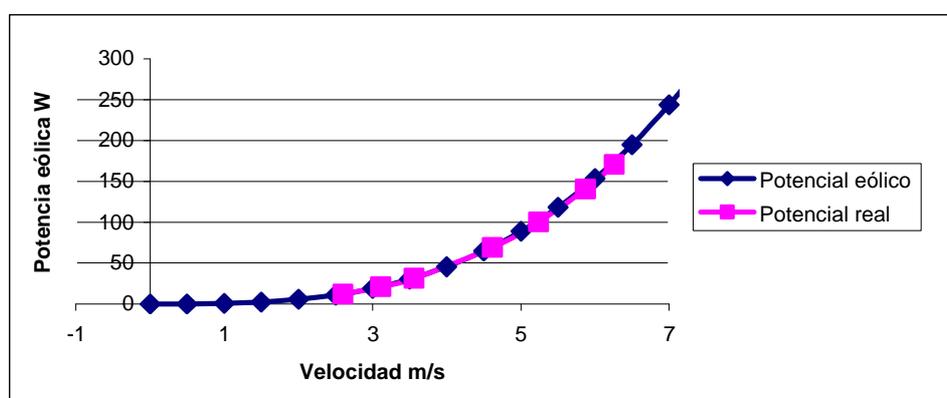


Fig. 82 Curva de potencial real del aire

Los resultados demuestran que, para las mismas velocidades del aire estudiadas, no existen diferencias significativas con respecto al potencial eólico aprovechable. Esto se debe a que el factor densidad del aire, para nuestras condiciones de trabajo, son similares a las existentes bajo presión atmosférica estándar, por lo que no representa éste un factor significativo en la variación del potencial eólico real. Lo que nos indica que la cantidad de energía transferida por el viento a nuestro aerogenerador solo dependerá de las variaciones de velocidad del aire incidente.

6.2.3 Mapa de velocidades

Cuando se estudia las prestaciones de los aerogeneradores es necesario conocer previamente la distribución de velocidades del viento en el plano vertical, para poder valorar su influencia sobre los resultados obtenidos. Para tal propósito se realizó un mapa de viento o mapa de velocidad del aire perpendicular del flujo del aire generado por los ventiladores a una distancia de 0,20 m del eje del aerogenerador.

| Frecuencia: 50 Hz | | Velocidad | | |
|-------------------|-------------|-------------|-------------|--|
| Posición | Posición 1 | Posición 2 | Posición 3 | |
| Nivel 2 | 6,5 | 4,31 | 5,05 | |
| Nivel1 | 7,99 | 5,44 | 5,71 | |
| Nivel 0 | 6,41 | 7,27 | 7,08 | |
| Nivel -1 | 7,83 | 6,39 | 7,03 | |
| Nivel -2 | 7,26 | 5,86 | 6,74 | |
| Media | 7,20 | 5,85 | 6,32 | |

Tabla 18 Comportamiento de la velocidad del aire a velocidad máxima de rotación los ventiladores

Al analizar el mapa de viento generado, cuando se trabaja con la velocidad máxima de rotación los ventiladores, se puede apreciar una elevada estabilidad entre los diferentes niveles analizados. Observándose una ligera disminución de la velocidad incidente a la altura del eje del aerogenerador con respecto a la que reciben la zona de los extremos de la pala.

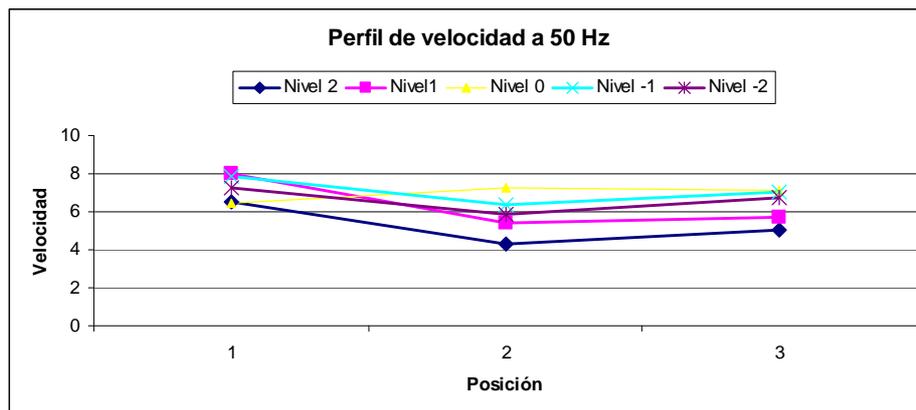


Fig. 83 Comportamiento de la velocidad del aire para diferentes puntos de muestreo

Esta tendencia se corrobora cuando estudiamos el comportamiento, sobre el plano equivalente a la altura del eje del aerogenerador, de las velocidades del aire para frecuencias de rotación de los ventiladores de 45, 40, 35, 30, 25 y 20 Hz.

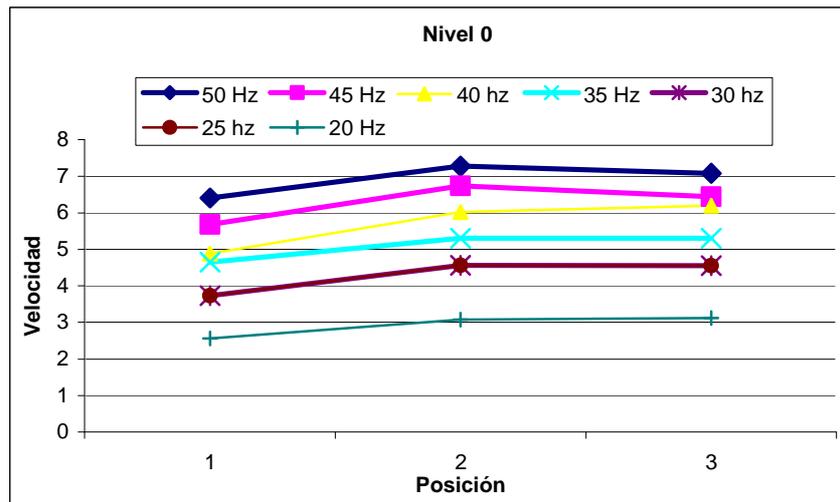


Fig. 84 Comportamiento de la velocidad del aire para diferentes frecuencias

Este resultado se debe a que la posición que ocupa en el plano horizontal el eje del aerogenerador coincide en altura con la intersección de los cuatro ventiladores, produciéndose a la salida de los mismos una zona muerta de velocidad del aire. Lo que genera que a lo largo del desplazamiento de la vena de aire se mantenga esa ligera diferencia de velocidad.



Fig. 85 Distribución de los ventiladores

Al estudiar el comportamiento de la velocidad media del aire para diferentes frecuencias de rotación de los ventiladores sobre los puntos de muestreo elegidos, tal y como se aprecia en la figura 86. Se puede concluir que el perfil horizontal del viento es estable en todos los puntos de muestreo analizados y que éste sigue una tendencia lineal a medida que disminuye la velocidad y presión del aire producida por los ventiladores. Esta conclusión avala la validez de la elección de la configuración seleccionada de cuatro ventiladores como elemento generador de aire en nuestra instalación.

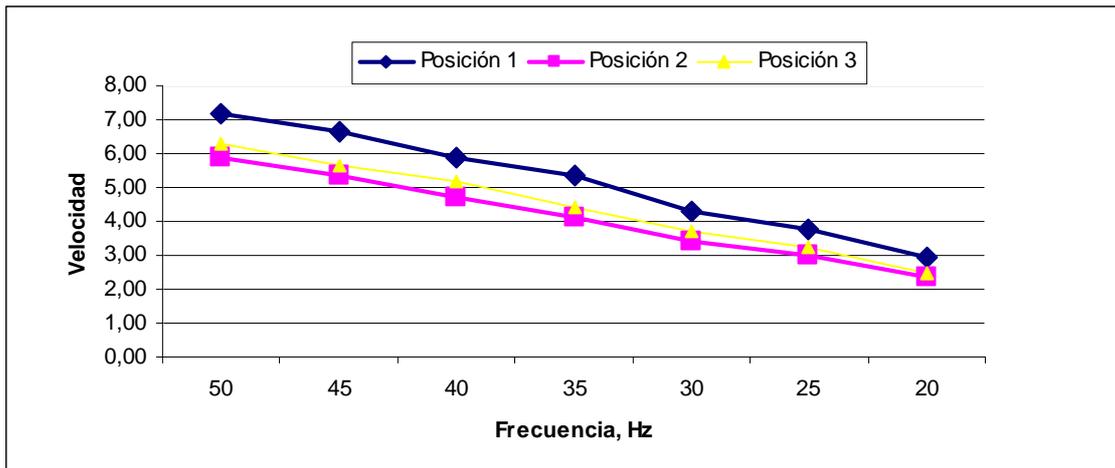


Fig. 86 Comportamiento de la velocidad para diferentes velocidades de rotación los ventiladores

Al estudiar el comportamiento de la vena de aire generada por los ventiladores en su trayectoria a través de los diferentes perfiles analizados, se observa claramente que en el Plano D al estar más próximo a la salida de los ventiladores los niveles de velocidades son elevadas sobre todo en la posición 3. Este comportamiento se debe a que esta posición de muestreo coincide aproximadamente con la el centro individual de cada ventilador. Sin embargo, en la posición 1, para los cuatro perfiles estudiados la velocidad es similar, y como explicamos anteriormente, esto es debido a que coincide en altura con la intersección de los cuatro ventiladores, produciéndose en ese punto una zona muerta de aire que se estabiliza con la distancia.

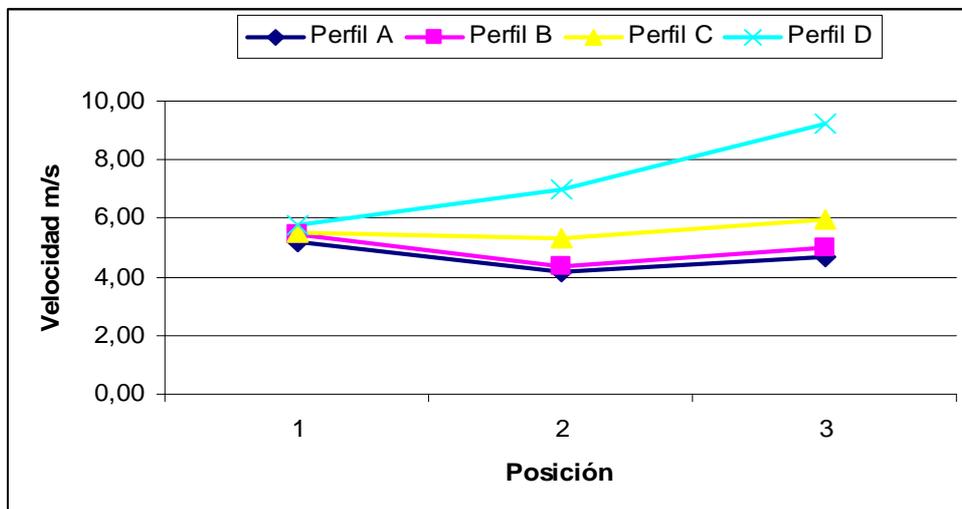


Fig. 87 Distribución de la velocidad del aire en los perfiles analizados

Un elemento importante a destacar, es que a medida que nos alejamos de la salida de los ventiladores, como se demuestra en los resultados obtenidos en los planos A, B, C, la distribución del aire es más estable en todos los puntos del plano horizontal. Esto se debe a que se ha logrado homogeneizar la vena fluida del aire al pasar a través de las tres rejillas de aire. Elemento que reafirma, para nuestro montaje, la selección correcta de las pantallas de aire, así como la configuraron en cuanto a la separación elegida.

6.3 Potencia de la máquina

En este apartado se procede a exponer los resultados obtenidos en el estudio de la potencia generada por el aerogenerador Air x 400 para diferentes condiciones de velocidades del aire.

La potencia del aerogenerador es el resultado de multiplicar la tensión por su intensidad, para diferentes de velocidades del aire al que está sometido, lo que genera diferentes velocidades de rotación del aerogenerador. Los resultados se obtienen a partir del análisis de los datos obtenidos en los ensayos, donde se determinaron los siguientes parámetros: densidad del aire Kg/m^3 , intensidad en corriente directa, tensión de salida y velocidad de rotación del aerogenerador para diferentes velocidades del viento.

En la tabla 19 se exponen los resultados de las mediciones de todos los niveles de muestreo analizado para diferentes velocidades de rotación de los ventiladores.

| Mediciones frecuencia 50 Hz | Temperatura ° C | Presión barométrica | Densidad kg/m^3 | Velocidad m/s | | | | Tensión (V) | Intensidad (A) | Potencia (W) |
|-----------------------------|-----------------|---------------------|--------------------------|---------------|-------------|--------------|-------------|--------------|----------------|--------------|
| | | | | Posición 1 | Posición 2 | Posición 3 | media | | | |
| Nivel 2 | 23,21 | 1021,2 | 1,2003 | 6,5 | 4,31 | 5,05 | 5,29 | 12,02 | 5,00 | 60,10 |
| Nivel1 | 23,17 | 1027,3 | 1,2077 | 7,99 | 5,44 | 5,71 | 6,38 | 11,95 | 5,00 | 59,75 |
| Nivel 0 | 23,19 | 1022,4 | 1,2018 | 6,41 | 7,27 | 7,08 | 6,92 | 11,96 | 4,96 | 59,32 |
| Nivel -1 | 23,42 | 1027,4 | 1,2068 | 7,83 | 6,39 | 7,03 | 7,08 | 11,64 | 4,92 | 57,27 |
| Nivel -2 | 23,21 | 1027,7 | 1,2080 | 7,26 | 5,86 | 6,74 | 6,62 | 12,07 | 5,08 | 61,32 |
| Media | 23,24 | 1025,2 | 1,205 | 7,20 | 5,85 | 6,322 | 6,46 | 11,93 | 4,99 | 59,55 |
| Mediciones frecuencia 45 Hz | Temperatura ° C | Presión barométrica | Densidad kg/m^3 | Velocidad m/s | | | | Tensión (V) | Intensidad (A) | Potencia (W) |
| Nivel 2 | 23,17 | 1021,15 | 1,2005 | 6,18 | 3,82 | 4,34 | 4,78 | | | |
| Nivel1 | 23,85 | 1021,5 | 1,1981 | 7,48 | 4,76 | 5,26 | 5,83 | 12,00 | 3,78 | 45,36 |
| Nivel 0 | 23,45 | 1021,2 | 1,1994 | 5,68 | 6,74 | 6,44 | 6,29 | 11,91 | 3,78 | 45,02 |
| Nivel -1 | 24,19 | 1021,3 | 1,1965 | 7,15 | 6,03 | 6,22 | 6,47 | 11,86 | 3,72 | 44,12 |
| Nivel -2 | 23,85 | 1021,5 | 1,1981 | 6,76 | 5,42 | 5,88 | 6,02 | 12,03 | 3,88 | 46,68 |
| Media | 23,702 | 1021,33 | 1,199 | 6,65 | 5,35 | 5,628 | 5,88 | 11,96 | 3,80 | 45,39 |
| Mediciones frecuencia 40 Hz | Temperatura ° C | Presión barométrica | Densidad kg/m^3 | Velocidad m/s | | | | Tensión (V) | Intensidad (A) | Potencia (W) |
| Nivel 2 | 23,77 | 1020,4 | 1,1971 | 5,45 | 3,46 | 4,05 | 4,32 | | | |
| Nivel1 | 23,77 | 1019,3 | 1,1959 | 6,66 | 4,08 | 4,5 | 5,08 | 11,96 | 2,52 | 30,14 |
| Nivel 0 | 23,19 | 1021,3 | 1,2005 | 4,88 | 6,02 | 6,2 | 5,70 | 11,77 | 2,52 | 29,66 |
| Nivel -1 | 24,36 | 1019,7 | 1,1940 | 6,26 | 5,05 | 5,66 | 5,66 | 11,82 | 2,54 | 30,02 |
| Nivel -2 | 24,51 | 1019,7 | 1,1934 | 6,02 | 4,79 | 5,51 | 5,44 | 12,00 | 2,64 | 31,68 |
| Media | 23,92 | 1020,08 | 1,1962 | 5,85 | 4,68 | 5,184 | 5,24 | 11,86 | 2,55 | 30,28 |
| Mediciones frecuencia 35 Hz | Temperatura ° C | Presión barométrica | Densidad kg/m^3 | Velocidad m/s | | | | Tensión (V) | Intensidad (A) | Potencia (W) |
| Nivel 2 | 23,56 | 1020,6 | 1,1982 | 5,11 | 3,13 | 3,33 | 3,86 | | | |
| Nivel1 | 23,56 | 1019,8 | 1,1973 | 5,96 | 3,38 | 3,33 | 4,22 | 11,93 | 1,50 | 17,90 |
| Nivel 0 | 23,642 | 1021,6 | 1,1991 | 4,65 | 5,3 | 5,3 | 5,08 | 11,68 | 1,48 | 17,29 |
| Nivel -1 | 23,67 | 1019,7 | 1,1967 | 5,33 | 4,45 | 4,98 | 4,92 | 11,80 | 1,50 | 17,70 |
| Nivel -2 | 24,41 | 1027,0 | 1,2022 | 5,69 | 4,25 | 5,15 | 5,03 | 11,93 | 1,56 | 18,61 |
| Media | 23,7684 | 1021,73 | 1,1987 | 5,35 | 4,10 | 4,418 | 4,62 | 11,85 | 1,51 | 17,93 |
| Mediciones frecuencia 30 Hz | Temperatura ° C | Presión barométrica | Densidad kg/m^3 | Velocidad m/s | | | | Tensión (V) | Intensidad (A) | Potencia (W) |
| Nivel 2 | 24,25 | 1020,5 | 1,1953 | 3,91 | 2,38 | 2,78 | 3,02 | | | |
| Nivel1 | 23,52 | 1019,8 | 1,1975 | 4,96 | 2,98 | 3,38 | 3,77 | 11,88 | 0,72 | 8,55 |
| Nivel 0 | 23,21 | 1021,6 | 1,2008 | 3,73 | 4,56 | 4,55 | 4,28 | 11,68 | 0,66 | 7,71 |
| Nivel -1 | 24,25 | 1020,1 | 1,1949 | 4,66 | 3,61 | 4,08 | 4,12 | 11,78 | 0,70 | 8,25 |
| Nivel -2 | 24,28 | 1019,8 | 1,1944 | 4,22 | 3,48 | 3,69 | 3,80 | 11,87 | 0,74 | 8,78 |
| Media | 23,902 | 1020,36 | 1,1966 | 4,30 | 3,40 | 3,696 | 3,80 | 11,82 | 0,71 | 8,37 |
| Mediciones frecuencia 25 Hz | Temperatura ° C | Presión barométrica | Densidad kg/m^3 | Velocidad m/s | | | | Tensión (V) | Intensidad (A) | Potencia (W) |
| Nivel 2 | 22,65 | 1020,6 | 1,2020 | 3,55 | 2,38 | 2,72 | 2,88 | | | |
| Nivel1 | 22,65 | 1020,1 | 1,2013 | 4,11 | 2,37 | 2,56 | 3,01 | 11,84 | 0,092 | 1,09 |
| Nivel 0 | 22,65 | 1021,7 | 1,2032 | 3,73 | 4,56 | 4,55 | 4,28 | 11,73 | 0,168 | 1,97 |
| Nivel -1 | 22,61 | 1020,1 | 1,2015 | 3,84 | 2,93 | 3,24 | 3,34 | 11,75 | 0,172 | 2,02 |
| Nivel -2 | 22,45 | 1019,8 | 1,2018 | 3,57 | 2,9 | 3,07 | 3,18 | 11,81 | 1,910 | 22,56 |
| Media | 22,602 | 1020,466 | 1,2020 | 3,76 | 3,03 | 3,228 | 3,34 | 11,79 | 0,49 | 5,75 |
| Mediciones frecuencia 20 Hz | Temperatura ° C | Presión barométrica | Densidad kg/m^3 | Velocidad m/s | | | | Tensión (V) | Intensidad (A) | Potencia (W) |
| Nivel 2 | 23,34 | 1021,2 | 1,1998 | 2,68 | 1,68 | 2,01 | 2,12 | | | |
| Nivel1 | 23,34 | 1022,5 | 1,2014 | 3,28 | 1,97 | 2,05 | 2,43 | 11,80 | 0,142 | 1,68 |
| Nivel 0 | 22,65 | 1022,4 | 1,2040 | 2,56 | 3,07 | 3,12 | 2,92 | 11,72 | 0,140 | 1,64 |
| Nivel -1 | 23,34 | 1020,7 | 1,1992 | 3,29 | 2,64 | 2,73 | 2,89 | 11,72 | 0,142 | 1,66 |
| Nivel -2 | 23,37 | 1020,2 | 1,1985 | 2,87 | 2,39 | 2,59 | 2,62 | 11,77 | 0,155 | 1,82 |
| Media | 23,208 | 1021,4 | 1,2006 | 2,94 | 2,35 | 2,5 | 2,60 | 11,76 | 0,35 | 4,10 |

Tabla 19 Potencia generada para diferentes velocidades de rotación de los ventiladores

En la figura 88, se muestra la curva de potencia obtenida en el banco de ensayo por el aerogenerador Air X 400 de Southwest Windpower.

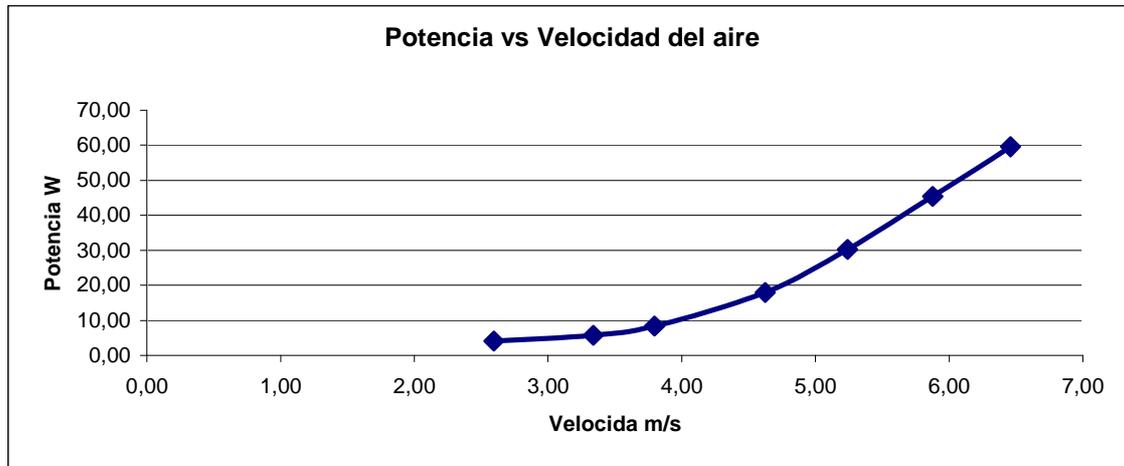


Fig. 88 Curva de potencia del aerogenerador a densidad media del aire de $1,205 \text{ kg/m}^3$

En ella se muestra que la generación de energía comienza a producirse cuando la velocidad del viento sobre el aerogenerador es de $2,6 \text{ m/s}$, produciéndose en esas condiciones una intensidad de corriente de $0,35 \text{ A}$. Sin embargo, esta velocidad es ligeramente inferior a ofrecida por el fabricante en su curva de potencia donde plantea que la velocidad de arranque o conexión es de 3 m/s .

En cuanto a la potencia máxima obtenida cuando los elementos ventiladores del banco de ensayo trabajaban a su máxima velocidad de rotación es de $59,55 \text{ W}$ que correspondiente a una velocidad media del aire incidente de $6,46 \text{ m/s}$.

Al analizar la potencia generada en función de la velocidad de rotación del aerogenerador en la figura 89, observámos que para velocidades inferiores a 510 rpm el incremento de la potencia presenta un comportamiento lineal caracterizado por una pendiente de crecimiento muy pequeña, sin embargo, a partir de ese punto se produce un incremento significativo que describe una tendencia potencial hasta alcanzar la potencia nominal, elemento que en nuestro caso no pudimos corroborar.

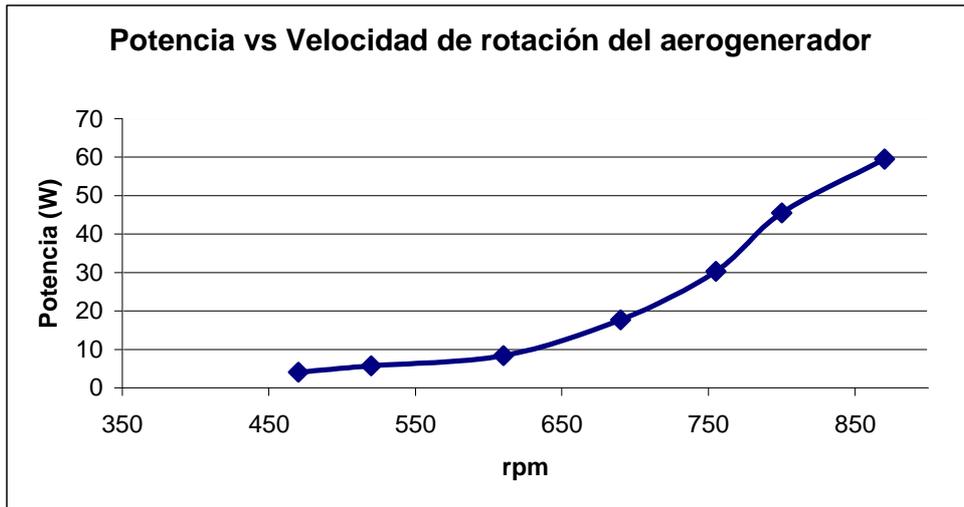


Fig. 89 Comportamiento de la potencia en función de la velocidad de rotación del aerogenerador

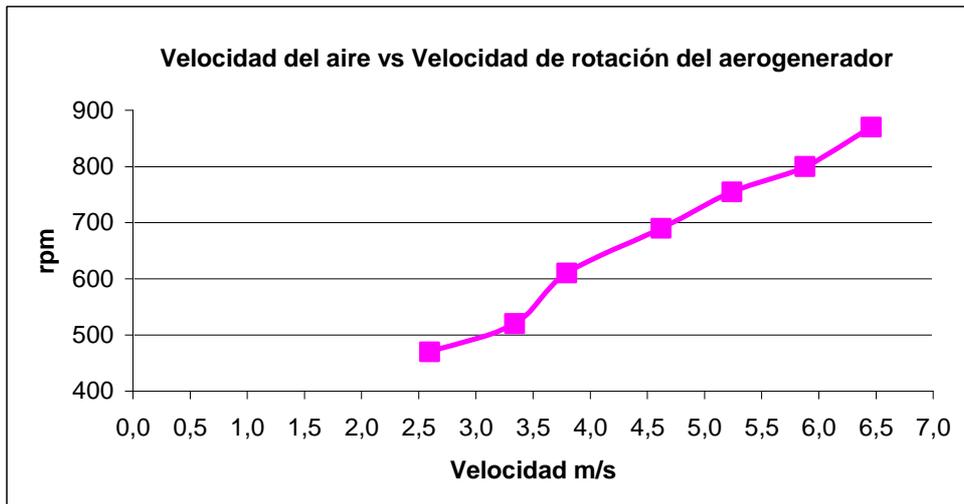


Fig. 90 Comportamiento de la velocidad de rotación del aerogenerador en función de la velocidad del aire

En la figura 90, se puede apreciar que el aerogenerador rompe la inercia y comienza a rotar cuando la velocidad del aire es estable a 2,5 m/s siguiendo una tendencia lineal en su velocidad de rotación a medida que se incrementa la velocidad de la vena de aire.

Al comparar la información suministrada por el fabricante a través de la curva de potencia del aerogenerador y la curva de potencia estimada durante los ensayos, observamos la no existencia de diferencias significativas en el rendimiento de la máquina tal y como se aprecia en la figura 91.

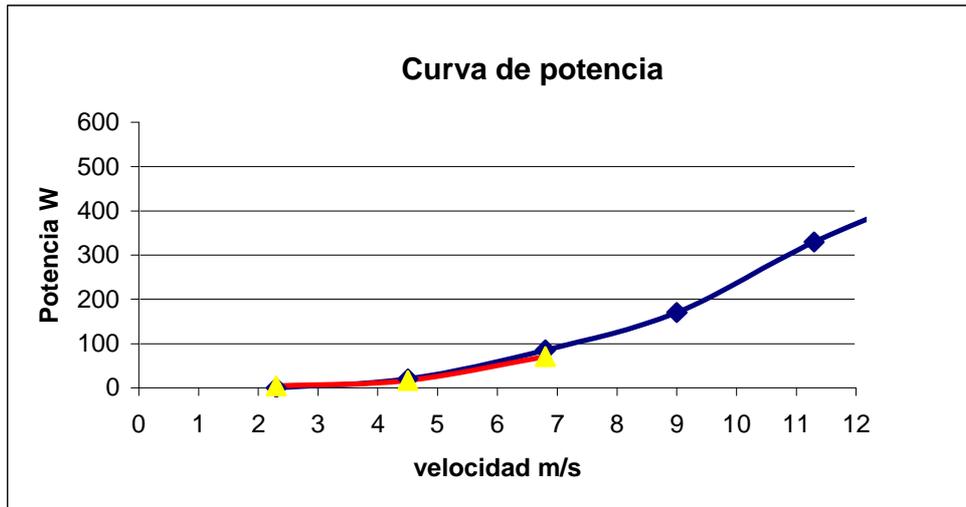


Fig. 91 Comparación entre la curva de potencia estimada y curva de potencia teórica

6.4 Coeficiente de potencia C_p

En este apartado se procede a determinar el coeficiente de potencia C_p , que es uno de los indicadores más importantes que caracterizan el comportamiento de los aerogeneradores ya que nos indica con que eficiencia el aerogenerador convierte la energía del viento en electricidad.

Los resultados obtenidos se ilustran en la figura 92, mediante la curva del coeficiente de potencia frente a la velocidad específica del viento.

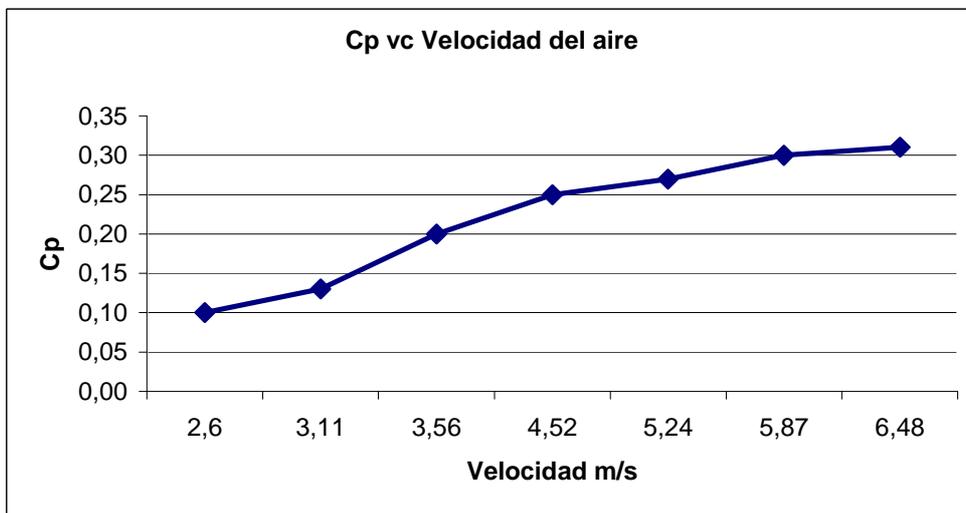


Fig.92 Coeficiente de potencia en función de la velocidad del aire. Densidad $1,205 \text{ kg/m}^3$

Estos resultados demuestran que el coeficiente de potencia C_p máximo para nuestra instalación, cuando se trabaja a velocidades máximas de rotación de los ventiladores, es de 0,316. Este resultado se debe a que el potencial eólico aprovechable de nuestro aerogenerador es de 188,23 W y que la potencia real obtenida para velocidades medias del aire de 6,46 m/s era de 59,55 W cuando se trabaja con densidades del aire del orden de $1,205 \text{ kg/m}^3$.

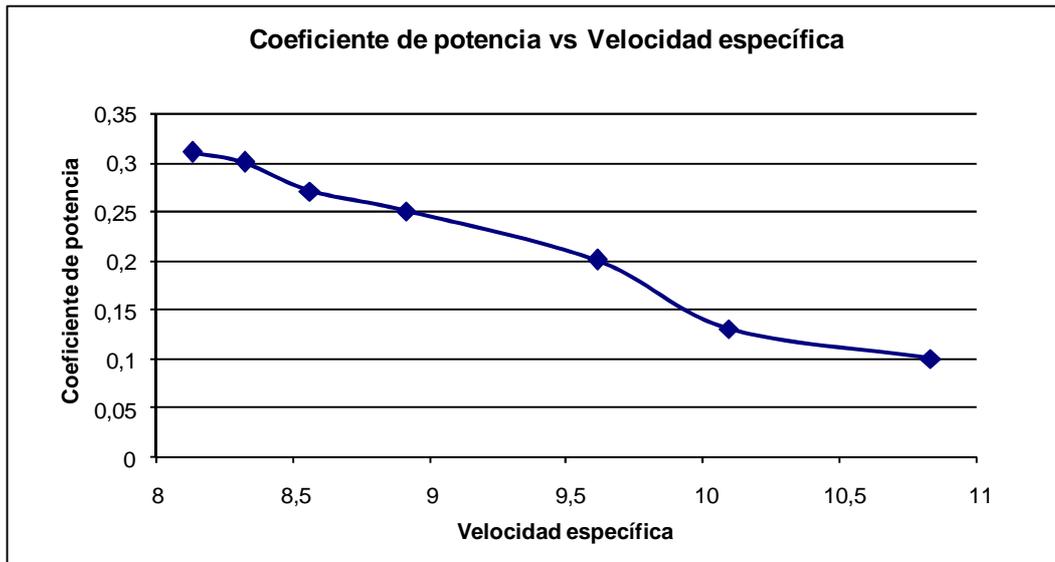


Fig.93 Coeficiente de potencia C_p en función de la velocidad específica λ

La figura 93 muestra la relación existente entre el coeficiente de potencia C_p y la velocidad específica λ , en ella se puede observar que el coeficiente de potencia máximo desarrollado por el aerogenerador, para densidades medias del aire de $1,205 \text{ kg/m}^3$, se produce cuando la velocidad específica es de 8,13. Dado que el coeficiente de potencia depende de la velocidad específica λ y del ángulo de paso β pero en los aerogeneradores de pequeña potencia el ángulo de paso es constante. Esto implica que la variable aleatoria que determina el rendimiento máximo de la turbina depende de la densidad del aire y la velocidad de incidencia del aire sobre el aerogenerador ambas incluidas dentro de la velocidad específica.

Como resultados de este capítulo podemos destacar que:

- No existen diferencias significativas entre el potencial eólico aprovechable y el potencial eólico real dado que los valores de densidad del aire para nuestras condiciones eran similares a la densidad de aire a presión atmosférica estándar a nivel del mar.
- Existe una alta estabilidad en el comportamiento de la velocidad del aire entre los cinco niveles estudiados, observándose una ligera disminución de la velocidad incidente a la altura del eje del aerogenerador con respecto a la que reciben la zona de de los extremos de la pala, debido a la arquitectura concebida para el montaje de los cuatro ventiladores, al existir un punto muerto de salida de aire en la intersección de los mismos, y que coincide en altura en el plano horizontal con zona del eje del aerogenerador.
- El comportamiento de la vena de aire generada por los ventiladores en su trayectoria a través de los diferentes perfiles analizados sigue una tendencia lineal observando una mayor estabilidad a medida que nos alejamos de los ventiladores, esto es debido al efecto homogenizador del aire establecido por las pantallas de aire montadas a tal efecto.
- La velocidad de arranque del aerogenerador se produce a una velocidad de 2,6 m/s, ligeramente inferior a descrita por el fabricante en su curva de potencia.
- La potencia máxima obtenida, bajo nuestras condiciones de ensayo, es de 59,55 W, y se produce cuando la velocidad media del aire es de 6,46 m/s.

- La curva de potencia en función de la velocidad de giro del aerogenerador, presenta dos zonas bien definidas. La primera con una tendencia lineal con muy baja pendiente para velocidades inferiores a 510 rpm y la segunda con una tendencia potencial, para velocidades de rotación mayores.
- La velocidad de rotación del aerogenerador presenta una tendencia lineal a medida que se incrementa la velocidad de aire generada los ventiladores.
- La curva de potencia estimada durante los ensayos se comporta de manera similar a la indicada por el fabricante en la curva de potencia del aerogenerador
- El coeficiente de potencia, C_p obtenido para nuestras condiciones de ensayo es de 0,316 y corresponde con la propuesta por el fabricante Southwest Windpower.

CONCLUSIONES Y PROPUESTAS DE MEJORA

Conclusiones:

- Se ha diseñado un banco de ensayo capaz de permitir realizar ensayos y pruebas a aerogeneradores de pequeña potencia.
- Se ha implementado un sistema de adquisición de datos perfectamente conjugado, a través de sondas y transductores, capaz de aportar la información suficiente para monitorizar en tiempo real las variables que caracterizan el trabajo de los aerogeneradores.
- Se ha construido un banco de ensayo a partir de estructuras de perfiles de aluminio sólido, flexible, ligero y de fácil transporte.
- La distribución de los paneles de rejillas de aluminio, utilizados como elementos homogenizadores del flujo de aire, han cumplido su cometido.
- La planificación de los ensayos han permitido la comprobación de la curva de potencia del aerogenerador estudiado, obteniéndose resultados similares a los establecidos por el fabricante.

Propuestas de mejoras de las prestaciones del banco de ensayo.

En cuanto al diseño de la estructura, ésta es lo suficiente flexible para adaptarse a los cambios que a continuación propondremos, ya que en la etapa de diseño se tomaron en consideración algunas de ellas.

- Dado que la velocidad del aire cae demasiado rápido a lo largo de la vena de aire, como quedó demostrado en el transcurso del trabajo, se propone canalizar la salida de los cuatro ventiladores mediante un difusor cónico. Éste canalizaría las venas de aire aumentando la velocidad de circulación lo que generaría que la vena de aire llegue al aerogenerador con mayor presión y velocidad.
- Colocar las pantallas homogeneizadoras de la vena de aire considerando la siguiente distribución: la primera a la salida del difusor y las otras dos a 30 cm de separación cada una.
- Situar el equipo de adquisición de datos Data Logger y el ordenador de la instalación lo más separados posible de la instalación y protegidos contra las interferencias eléctricas, ya que en ocasiones se producían interferencias en su lectura, generadas por el variador de frecuencia.
- Adquirir el programa de control del variador de frecuencia Omron para generar las rampas de incremento y disminución de frecuencia en los ventiladores y con ello simular rachas de viento y turbulencia sobre el aerogenerador.
- Colocar sondas de temperatura y de velocidad en la parte posterior del aerogenerador para valorar el efecto de las turbulencias generadas por el mismo.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] AIE, 2010. World Energy Outlook. International Energy Agency, Paris.
- [2] Antezana, J. 2004. Diseño y construcción de un prototipo de generador eólico de eje vertical. Universidad de Chile. Facultad de ciencia física y matemáticas, Departamento de ingeniería eléctrica.
- [3] Berrutti. F. 2010. Modelado y control de turbinas de aerogeneradores de velocidad variable. IEEE encuentro de especialista en energía, potencia, instrumentación. Montevideo, Uruguay.
- [4] Clark. K. 2010. Development of low speed wind tunel. Master of Applies Science. Department of Mechanical and Aerospace Engineering. Carleton University. Ontario. Canada.
- [5] CIEMAT, 2006. Situación de la energía en el Mundo, Europa y España. Disponible *on line* <http://www.energiasrenovables.ciemat.es/ESPECIALES/ENERGIA/INDEX.HTM>.
- [6] Cuesta. M., Pérez. Marta., Cabrera. J.A. 2008. Aerogeneradores de potencia inferior a 100 kW. Centro de investigaciones energéticas, medioambientales y tecnológicas. Ciemat. España
- [7] Escudero. J. M. 2008. Manual de energía eólica. Editorial Mundi-Prensa, Madrid.
- [8] Franquesa. M. 2009. Introducción a la teoría de las turbinas eólicas. Extracto del libro Kleine winddrader. Berlin 1989.
- [9] Gandemer. J. Wind túnel facility. 1992. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol 41.
- [10] Gipe.P., Aljarage. M. 2000. Aprovechamiento de la energía eólica. Editorial Progensa. España.
- [11] Goldemberg, J., Lucon, O. 2009. Energy, Environment and Development. Editorial Earthscan, second edition.
- [12] Guntur. S. 2010. Optimization Studies on the Ducted Wind Turbine. Thesis Master of Science Mechanical Engineeringin. University of New Hampshire.
- [13] Hau. E. 2006. Wind turbines. Fundamentals, technologies, application. Editorial Springer, Kraillinf, Germany
- [14] Holland. OA. 2002 New acquisition system for the AMRL low speed wind tunel. Defence science & techology organisation. Vol 12, Canada.

- [15] IDAE, 1999. Impactos Ambientales de la Producción Eléctrica: Análisis de Ciclo de Vida de ocho tecnologías de generación eléctrica.
- [16] IDAE, 2007. Energía Solar en España 2007. Estado actual y perspectivas.
- [17] IDAE, 2010. Observatorio de Energías Renovables. Disponible *on line* (Marzo 2011): http://www.idae.es/index.php/mod.documentos/mem.descarga?file=/documentos/Observatorio_de_Energias_Renovables_Ano_2010_212dc1b4_51833d26.pdf
- [18] IPCC, 2007. Cambio climático 2007: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Cuarto Informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. Equipo de redacción principal: Pachauri, R.K. y Reisinger, A. (directores de la publicación). IPCC, Ginebra, Suiza.
- [19] Kusiak, A., Kenya. L. 2010. Valoración de la velocidad del viento: Un enfoque inducido de los datos. Departamento de Ingeniería industrial y Mecánica. Universidad de Iowa, Iowa City
- [20] L. Martin. 2004. Publication number AER-EIR-13552-E. High speed wind tunnel and test systems design handbook.
- [21] Ministerio de Industria, Turismo y Comercio, 2010. Plan de Energías Renovables 2011-2020. Secretaría de Estado de Energía.
- [22] Sánchez Kaiser., A Viedma. A 2003 Energía eólica. Editorial. Horacio Escarabajal, España.
- [23] PTE-EE, 2009. Documento de visión de la eficiencia energética en España. Plataforma tecnológica española de eficiencia energética y Ministerio de Ciencia e Innovación.
- [24] Ragheb. M. 2009. Wind energy converters concepts, Mechanical Engineering , No 4.
- [25] Roos. I. 2010. Wind tunnel blockage corrections: An application to vertical-axial wind turbine. Thesis of Master of science in aerospace engineering. University of Dayton.
- [26] Selig.M., McGranaha.D. 2001. Wind tunnel aerodynamic tests of six airfoil for use on small wind turbine. National renewable energy laboratory.
- [27] Seung H., Karenn. J. 2009. Identificación de carga de viento usando datos de las pruebas de túnel aerodinámico por análisis inverso. Universidad Nacional, Kwangju. República de Corea.
- [28] Silva. J. 2005. Diseño y construcción de un túnel de viento bidimensional subsónico de circuito abierto. Tesis de master en arquitectura. Facultad de arquitectura y diseño. Universidad de Chile.
- [29] Tatman. N. 2006. Wind Tunnel design and operation. Thesis of master. School of Industrial ingenieria. University of Hong Kong.
- [30] Tong. W. 2006. Wind power generation and wind turbina design. Editoria Wei Tong Kollmorgen Corp. Estados Unidos.

- [31] Wand. F., Bai. L., Fletcher. J. 2008. The methodology for aerodynamic study on a small domestic wind turbine with scoop. *Journal of Wind Engineering* .
- [32] Wright. A., Wood. K. 2004. The starting and low wind speed behaviour of a small horizontal axial wind turbine. *Journal of Wind Engineering*.
- [33] Villarrubia. M. 2004. *Energía eólica*. Ediciones Ceac. *Energía alternativa y medio ambiente*.