

**UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA**  
**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA**  
**VALPARAÍSO-CHILE**



**“Diseño, construcción y prueba de funcionamiento de un sistema de ensayos de turbinas eólicas de baja potencia”**

**GABRIEL IGNACIO CLAVERÍA GONZÁLEZ**

**TRABAJO DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE:**

**INGENIERO CIVIL MECÁNICO**

**PROFESOR GUÍA: DR. ING. ALEX FLORES M.**

**PROFESOR COREFERENTE: MG. ING. JAIME ESPINOZA S.**

**Noviembre - 2016**

## RESUMEN

En el siguiente trabajo consiste en diseñar, construir e implementar un sistema de ensayos para turbinas eólicas de pequeña potencia, realizando una prueba de funcionamiento con una turbina experimental. El sistema trabaja con un ventilador de 5 kW, al que se le puede variar su velocidad de rotación mediante un variador de frecuencia, lo que permite regular la velocidad de rotación del ventilador a elección, el cual canaliza el flujo de aire a través de un ducto hacia el centro del aerogenerador, que está sujeto a un soporte.

El diseño realizado se basó en las distintas configuraciones para alcanzar la alternativa óptima de trabajo, intentando alcanzar una velocidad de salida del ducto de al menos 25 m/s, para lograr un amplio rango para la evaluación de aerogeneradores. Esto se logró con justificaciones de cálculo que indican teóricamente la velocidad de salida del ducto. En cambio, para el diseño del soporte del aerogenerador fue necesario un análisis de esfuerzo para sobredimensionar la estructura, de manera de que sea capaz de soportar distintos tipos de aerogeneradores de pequeña potencia.

Posterior al diseño, se realizaron mediciones para estudiar el comportamiento del aerogenerador en sus distintos parámetros característicos, obteniendo curvas características que indicaron la similitud con el fabricante, y adicionalmente establecer el punto de mayor rendimiento al conseguir el desempeño en función de su coeficiente de potencia en sus diferentes variables. Entre las conclusiones, se concluyó que el aerogenerador utilizado solo genera energía de manera eficiente con la totalidad de sus aspas.

Las mediciones de evaluación fueron realizadas por instrumentación manejada por humanos y no por sensores. Esto repercute en la exactitud de la experiencia. Sin embargo, en el trabajo se recomienda y definen los equipos y sensores, junto con la configuración del PLC puesto a disposición, para que en un futuro se pueda automatizar el sistema con el fin de tener un sistema de adquisición de datos de mayor eficiencia mediante el control del aerogenerador según se desee, con el fin de estudiar la aerodinámica del viento alrededor del aerogenerador y otras tecnologías eólicas.

## **ABSTRACT**

In the following work consist to design, build and implement a testing system for small power wind turbines, performing a test run with an experimental turbine. The system works with a fan of 5 kW that can change their rotational speed by a frequency converter, which allows adjusting the rotational speed of the fan as desired, and direct the airflow through a pipeline to the center of the wind turbine, that is attached to a support.

The design was performed based on different configurations to achieve an optimal alternative work trying to reach a speed at the outlet of the duct at least 25 m/s, so can obtain a wide range for wind turbines evaluation. This was achieved with calculation theoretically justified, that indicate the output speed in the duct. Instead, for the design of the wind turbine support was necessary to perform a stress analysis to overstate the structure so that is able to hold different types of small wind turbines.

Post design, measurements were performed to study the behavior of the wind turbine at different characteristic parameters, getting characteristic curves that indicated the similarity with the manufacturer, and additionally establish the most efficient point, to achieve the performance based on the power coefficient at their different variables. Among the findings, it was concluded that the wind turbine only generates energy in efficient way using all of their blades.

Evaluation measurements were performed with instrumentation used by humans and not sensors. This could affects the accuracy of the experience. However, in this paper recommends and define the equipment and sensors, by using the PLC Setup made available, so in a future can automate the system by having a data acquisition system more efficient that control the wind turbine as desired, in order to study the aerodynamics around of the wind turbine and other wind technologies.

# ÍNDICE GENERAL

<b>1</b>	<b>Introducción y objetivos.....</b>	<b>1</b>
1.1	Introducción .....	1
1.2	Objetivos Generales .....	2
1.3	Objetivos específicos .....	2
<b>2</b>	<b>Características de los sistemas de ensayos de turbinas eólicas (SETE).....</b>	<b>3</b>
2.1	Introducción .....	3
2.2	Historia.....	3
2.3	Recurso Eólico .....	5
2.3.1	Potencial mundial.....	10
2.3.2	Potencial en Chile .....	12
2.3.3	Panorama Actual.....	15
2.4	Clasificación de las turbinas y Sistemas eólicos .....	16
2.5	Bancos de pruebas de aerogeneradores.....	19
2.5.1	Bancos de pruebas a gran escala .....	19
2.5.2	Bancos de pruebas a baja escala.....	20
2.6	Fundamentos de potencia de un aerogenerador .....	22
2.7	Componentes de los SETE.....	26
2.7.1	El aerogenerador y sus partes.....	26
2.7.2	La Batería.....	29
2.7.3	El Regulador de carga .....	29
2.7.4	El Inversor.....	30
2.8	Norma .....	31

<b>3</b>	<b>Diseño del SETE.....</b>	<b>33</b>
3.1	Alternativas del diseño.....	33
3.2	Descripción del sistema General Seleccionado.....	35
3.3	Fundamentos del diseño.....	37
3.3.1	Justificación de la velocidad de salida del ducto .....	37
3.3.2	Justificación de la deformación y esfuerzo equivalente de la estructura .....	43
3.4	Elementos generales del Sistema .....	48
3.4.1	Estructura .....	48
3.4.2	Ventilador .....	49
3.4.3	Aerogenerador.....	49
3.4.4	Ducto.....	51
3.4.5	Motor eléctrico.....	51
3.4.6	Variador de frecuencia .....	51
3.5	Componentes electrónicos del sistema .....	51
3.5.1	El Inversor.....	51
3.5.2	El Regulador de carga .....	52
3.5.3	La batería .....	52
3.5.4	Sensores del sistema (en proceso de compra) .....	52
3.6	Sistema de Mando, control y adquisición de datos .....	54
3.6.1	Circuito de control .....	55
<b>4</b>	<b>Planificación y Prueba de Funcionamiento .....</b>	<b>56</b>
4.1	Programación de los ensayos .....	56
4.1.1	Primer ensayo: Medición de la potencia aprovechada por el aerogenerador ..	56
4.1.2	Segundo ensayo: Medición de la potencia disponible para el aerogenerador .	57
4.1.3	Tercer ensayo: Determinación del coeficiente de Potencia. ....	58

4.1.4	Cuarto ensayo: Prueba de funcionamiento utilizando distintita configuración.	59
4.2	Procedimiento de las mediciones de los ensayos .....	61
4.3	Realización de las mediciones .....	63
4.3.1	Instrumentación de medición .....	64
4.3.2	Datos obtenidos.....	65
4.4	Análisis de las mediciones y Resultados.....	67
4.4.1	Análisis del comportamiento de velocidad sobre el aerogenerador .....	67
4.4.2	Análisis de la Potencia disponible.....	70
4.4.3	Análisis de la curva de potencia.....	70
4.4.4	Análisis del Coeficiente de Potencia.....	73
4.4.5	Análisis de los elementos del sistema .....	76
<b>5</b>	<b>Conclusiones y Propuestas de mejoras a futuro .....</b>	<b>78</b>
<b>6</b>	<b>Referencias .....</b>	<b>80</b>
<b>7</b>	<b>Anexos .....</b>	<b>82</b>
	Anexo A: Manual Aerogenerador.....	82
	Anexo B: Manual Instructivo batería.....	85
	Anexo C: Sensor de proximidad utilizado para medir las RPM del aerogenerador.....	89
	Anexo D: Controlador de carga solar, manual del usuario .....	96
	Anexo E: PLC Schneider Electric.....	100
	Anexo F: Plano buje sujetador .....	111

# ÍNDICE DE FIGURAS

1. Molino de Charles F. Brush	4
2. Circulación atmosférica	6
3. Rosa de los vientos	7
4. Variaciones de la velocidad del viento según la ley exponencial de Hellmann	9
5. Ejemplo Distribución de frecuencias por el modelo estadístico de Weibull en Curiñanco, Chile.	10
6. Capacidad instalada total Mundial del 2011 a 2015, Fuente: WWEA-2015	15
7. Participación Mundial de las potencias en energía eólica de baja potencia, Fuente: WWEA-2015	16
8. Ejemplo Savonius	17
9. Ejemplo Darrieus	17
10. Ejemplo Ventus	17
11. Ejemplo Darrieus H o Giromill	17
12. Laboratorio de Ensayo de Aerogeneradores, prueba de palas (LEA)	19
13. Laboratorio FraunHofer IWES, Alemania	20
14. Banco de prueba de aerogenerador de baja potencia, DIKOIN	21
15. Esquema banco de prueba universidad politécnica de Cartagena	22
16. Modelo de aerogenerador representado por disco, donde el tubo simula el control de volumen, 1, 2, 3 y 4, indica el sector del tubo, sector 2,3 indica antes y después del rotor (disco) respectivamente.	23
17. Esquema de un aerogenerador horizontal y sus partes básicas.	26
18. Batería en base a plomo	29
19. Regulador de carga eólico	29
20. Inversor onda Modificada	30
21. Esquema de alternativa 1 de diseño	33
22. Esquema de alternativa 2 de diseño	34
23. Esquema de alternativa 3 de diseño	34
24. Esquema del diseño seleccionado	35
25. Esquema del diseño y sus partes	36
26. Foto del estructura real con el aerogenerador	36
27. Foto de la estructura real en el laboratorio	37

28. Dibujo explicativo de la realización del cálculo	38
29. Diagrama de moody	42
30. Gráfico del coeficiente de empuje en función de su velocidad específica	44
31. Esquema de las fuerzas sobre la estructura	45
32. Resultado de la deflexión total en Ansys Static Estructural	46
33. Resultado amplificado 1600 veces	46
34. Resultado de Ansys Static Estructural del esfuerzo equivalente de Von Mises	47
35. Zoom del resultado sobre la estructura	47
36. Plano del aerogenerador	50
37. Curva de potencia del aerogenerador	50
38. Esquema de la pieza para sujetar el aerogenerador al mástil	50
39. Diagrama de circuito básico del sistema	55
40. Diagrama explicativo de la velocidad en las puntas del aerogenerador.	60
41. Ejemplo de gráfico que se quiere obtener.	61
42. Muestreo de velocidades	63
43. Banco de carga utilizado	63
44. Anemómetro Utilizado	64
45. Tacómetro Utilizado	64
46. Multímetro Utilizado	64
47. banco de carga para las primeras mediciones	65
48. Diagrama de posiciones	68
49. Gráfico del comportamiento del viento que incide en el aerogenerador en distintas frecuencias	68
50. Gráfico de velocidades vs frecuencia según posiciones	69
51. Curva de Potencia disponible	70
52. Curva de potencia obtenida empíricamente	71
53. comportamiento de la Potencia en función de la velocidad de rotación	72
54. Curva de Potencia del aerogenerador	73
55. Gráfico coeficiente de potencia en función de la velocidad específica	74
56. comparación de turbinas eólicas respecto al coeficiente de potencia en función de su velocidad específica	74
57. Gráfico del coeficiente de potencia en función de las RPM	75
58. Gráfico del comportamiento de la velocidad de salida del ducto	76
59. Comportamiento del ventilador en función de la frecuencia	77

## ÍNDICE DE TABLAS

1. Escala de Beaufort	7
2. Clasificación estándar de clase de los vientos	8
3. Valores del exponente de Hellmann en función de la rugosidad	9
4. Traducida de la asociación Mundial de energía eólica, Fuente: WWEA-2016	11
5. Adaptada de la Comisión Nacional de Energía, Fuente: CNE	13
6. Adaptada del Estudio de evaluación de energía renovables del Ministerio de Energía en cooperación Alemana, Fuente: (MINENERGÍA/GIZ)	14
7. Parámetros del funcionamiento del ventilador a máximas RPM, Fuente: Informe Ventiladores, UTFSM.	49
8. Velocidades obtenidas según diagrama de Figura 42	66
9. Datos obtenidos en prueba de funcionamiento de 6 aspas.	66
10. Tabla de datos del comportamiento del sistema general	76

# 1 Introducción y objetivos

## 1.1 Introducción

Durante muchos años el mundo se ha abastecido energéticamente gracias a fuentes convencionales, como lo es la combustión de los hidrocarburos. Sin embargo, debido a los numerosos problemas asociados a estos suministros, hoy en día el mundo se está revolucionando, incrementado la capacidad energética por parte de las Energías renovables No convencionales (ERNC), ya que son prácticamente inagotables, limpia y demuestran un impacto ambiental mínimo, según sea la fuente. Dentro de este grupo de energías, se puede encontrar la solar, geotérmica, la biomasa, la pequeña hidroeléctrica (menor a 20 MW), la mareomotriz, la undimotriz y finalmente la eólica. Esta última ha mostrado un fuerte incremento a nivel mundial en la última década. Actualmente, según Global Wind Energy Council (GWEC), China lidera la capacidad instalada de energía eólica con 30.752 (MW), y en la totalidad del planeta se encuentra instalados 63.467 (MW).

En Chile, durante el gobierno del mandatario Sebastián Piñera, se propuso el proyecto de ley 20/20, el cual consiste en cumplir la meta de generar un 20% de energía de la matriz total producto de las ERNC para el año 2020, debido a esto, las ERNC han mostrado un fuerte incremento, sobre todo la energía solar y eólica en los últimos años. La comisión nacional de energía (CNE), estipula que hoy en día (noviembre 2016), en Chile existe 1020,56 (MW) de capacidad instalada, lo que equivale a un 4,89% del total de la matriz energética.

Producto de estos antecedentes, se ha impulsado el desarrollo de investigación mediante la implementación de un sistema de ensayos de turbinas eólica en el laboratorio de termofluidos de la universidad, para la evaluación de aerogeneradores y realización de estudios sobre la estela posterior al ingreso del aerogenerador, debido que en el presente surge la problemática de la eficiencia de la estela al entrar en contacto con un aerogenerador previo, como pasa en los parques eólicos. Incluso podría desarrollarse nuevos estudios respecto al tema, como a su vez sirve para demostrar de forma empírica la generación de energía eléctrica para el aprendizaje de los alumnos e interesados.

## **1.2 Objetivos Generales**

El presente trabajo tiene como objetivo general diseñar, construir y probar el funcionamiento de un sistema de ensayos de turbinas eólicas (SETE) con fines docentes y académicos para un futuro laboratorio, que permita realizar experimentos para estudiar la aerodinámica del viento alrededor de aerogeneradores y otras tecnologías eólicas. Como también el estudio en ámbito de investigación sobre la estela del viento u otros aspectos que se requiera.

Esto creará la base de un sistemas de ensayo, que con el futuro se desea complementar y mejorar para un rango más amplio de distintos aerogeneradores, como mejorar el proceso de automatización, siendo útiles incluso para probar turbinas eólicas para las distintas empresas de la región.

## **1.3 Objetivos específicos**

- Investigar el estado del arte y el marco teórico de los SETE.
- Identificar las posibles alternativas de diseño para los SETE, según los requerimientos mínimos de los ensayos que se busca satisfacer (en particular el rango de velocidad de 0-25 m/s).
- Diseñar y construir un SETE que cumpla las condiciones de experimentación requeridas y que optimice el espacio físico disponible.
- Realizar las pruebas de funcionamiento del SETE, empleando una turbina eólica experimental.
- Documentar los resultados obtenidos en las pruebas de funcionamiento del SETE y sugerir mejoras para su optimización.

## **2 Características de los sistemas de ensayos de turbinas eólicas (SETE)**

---

### **2.1 Introducción**

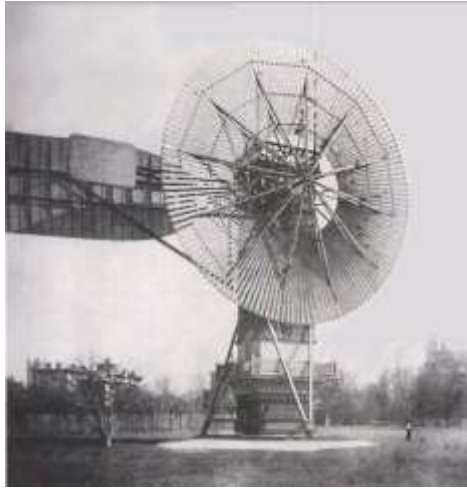
En este capítulo se entrega información general de la energía eólica, del recurso eólico, de donde proviene y su evolución respecto a los aerogeneradores. Se menciona la clasificación de los distintos sistemas eólicos y sus principales componentes, enfatizando en los sistemas de ensayos de turbinas eólicas. Por otro lado, se entrega información de la situación actual con respecto al potencial que existe en el mundo y en Chile, propiciando información de los proyectos en general en Chile y obteniendo una evaluación del potencial eólico basado en un estudio. Se mencionan las normas internacionales que rigen a los aerogeneradores y se demuestra los fundamentos de potencia con respecto al límite de Betz.

### **2.2 Historia**

La energía eólica se produce gracias a la energía cinética obtenida del viento, y esta es aprovechada para distintos usos que durante la historia han ido cambiando y evolucionando. El término “eólico” proviene del latín Aeolicus, que hace referencia a Eolo, dios del viento en la mitología griega.

Los primeros vestigios de la utilización de la energía del viento se remontan al 300 A.C, donde se aprovecha el viento con los barcos a vela, en el Nilo. También durante el siglo XVII A.C en Babilonia usaban un sistema de riego basado en molinos de viento para el bombeo del agua. Con el tiempo, los molinos de viento también se utilizaron para moler granos, y los primeros eran hechos de eje vertical. A su vez existió otro dispositivo, conocido como aerobomba, que usaba la energía eólica para elevar la presión del agua, pero no fue hasta 1887 en Estados Unidos, donde el filántropo Charles Francis Brush, inventó lo que se cree la primera turbina eólica de funcionamiento automático para generación de electricidad. La turbina tenía un

diámetro de rotor de 17 metros, contenía 144 palas fabricadas de madera de cedro y generaba 12 kW.



*Figura 1: Molino de Charles F. Brush*

Sin embargo en Europa, el precursor fue el danés Paul La Cour, quien creó las primeras máquinas eólicas que generaban electricidad, utilizando esta para electrólisis y así obtener hidrógeno para las lámparas de su escuela.

En el siglo XVIII se empezaron a publicar los primeros libros teóricos sobre molinos de viento, trataba de estudios en profundidad con respecto al comportamiento aerodinámico de los rotores, sobre los sistemas de regulación automática o de orientación. Alguno de estos clásicos de la literatura eólica son: “Theatrum Machinarum Hydraulicorum” de Leopold Jacobs, Architectura Mechanica de Moole-Boek, pero no obstante, la obra más importante de aquel siglo fue la del inglés Smeaton con “On the construction and effect of the windmills sails” y “An experimental enquiry concerning the natural power of the wind and water”. Él demostró que los rotores con mayor cantidad de palas no proporcionan mayor potencia que otros que tuvieran tres o cuatro palas en similares características.

Durante los finales del siglo XIX y principios del siglo XX, los estudios de aerodinámica se desarrollaron de manera notable de autores como: Prandt y Betz en Alemania y Constantin y Eiffel en Francia, y los rusos Joukowski, Drzewieky, Sabinin, todos ellos determinaron los criterios de diseño aplicable a los perfiles aerodinámicos para la fabricación de alas y hélices de los aviones. Luego, en los años 20 se comienza aplicar este concepto en rotores eólicos.

Prandt y Betz demostraron analíticamente el máximo rendimiento de los rotores que no podía sobre pasar el 59,3%, conocido mejor como el límite de betz.

En la mitad del siglo XX surge una gran variación a los aerogeneradores, el holandés Johannes Jull, modifica los aerogeneradores para producir electricidad en corriente alterna y además diseña un aerogenerador que cambian según la dirección del viento para el mejor aprovechamiento del viento. A pesar de los grandes avances tecnológicos desarrollados en la época, el interés por producir energía eólica decae con los bajos costos del petróleo y la competencia que este trae para la generación de electricidad. No obstante, producto de la crisis del petróleo y más adelante la crisis energética a nivel mundial y el compromiso por generar electricidad a partir de fuentes naturales y limpia, hace retomar los intereses en la energía eólica con avances tecnológicos considerables.

### **2.3 Recurso Eólico**

El viento es el principal causante de mover los alabes de los aerogeneradores para producir energía, siendo este un recurso inagotable y limpio. El viento se produce gracias a la radiación del sol que llega de manera dispar a la tierra, debido a que existe gran variedad de obstáculos como rocas, agua, montañas, etc., luego eleva la temperatura del aire, ejerciendo diferencias de presión atmosféricas sobre las masas de aire que se encuentran en la tierra, que por resultado, las masas de aire caliente desplazan a las masas de aire frío, generando así el viento. Es decir, las principales causa de la formación del viento o circulación del aire atmosférico es producto del calentamiento de la superficie terrestre, que origina los anticiclones que son los de alta presión y los ciclones que son los de baja presión.

También se puede generar el viento según las latitudes, existiendo una gran diferencia de temperaturas entre el trópico del ecuador y los polos, provocando gran movimiento de las masas de aires. Otro factor, es según la zona, como por ejemplo la zona costera que producto

de los ciclones marinos incide en la generación del viento, así como también, algún relieve montañoso con valle. Por último la rotación del planeta que produce un efecto de coriolis, también afecta en la circulación del aire atmosférico en la tierra.

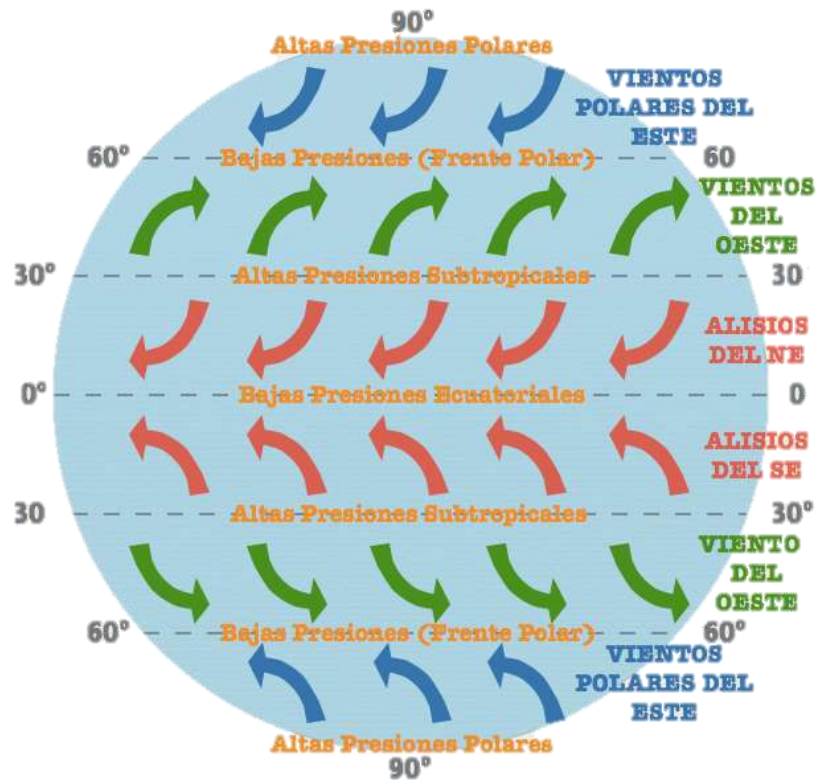


Figura 2: Circulación atmosférica

Otro aspecto importante del recurso eólico, es conocer su comportamiento direccional y su velocidad, para esto se utiliza la rosa de los vientos, hecha con las distribuciones de velocidades de los vientos y la frecuencia de variación de las direcciones del viento, estas se basan en información meteorológica histórica. Respecto al parámetro de la velocidad del viento, este se mide en un instrumento denominado anemómetro que en el sistema internacional es en m/s.

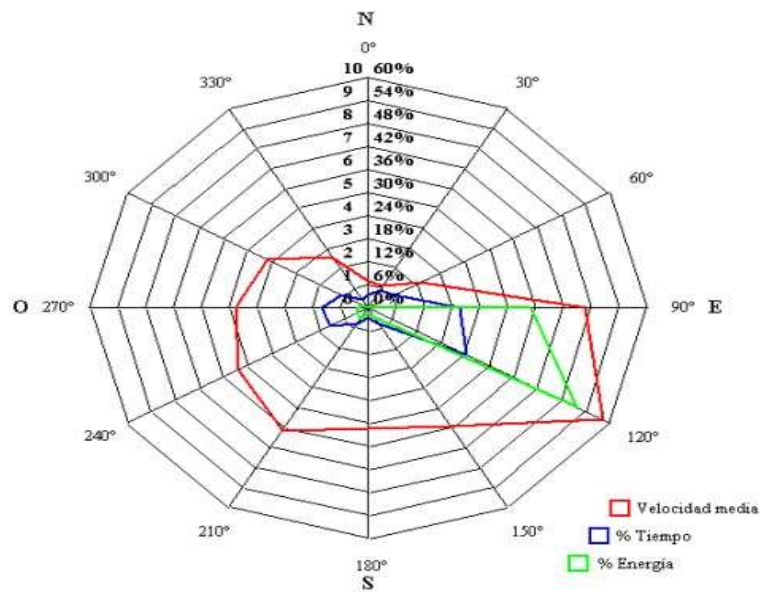


Figura 3: Rosa de los vientos

N° beaufort	Velocidad viento [Km/hr]	DENOMINACIÓN	EFFECTOS EN TIERRA
0	0 a 1	Calma	Calma, el humo asciende verticalmente
1	2 a 5	Ventolina	El humo indica la dirección del viento
2	6 a 11	Flojito (brisa muy débil)	Se mueven las hojas de los árboles, empiezan a moverse los molinos
3	12 a 19	Flojo	Se agitan las hojas, ondulan las banderas
4	20 a 28	Bonancible (brisa moderada)	Se levanta polvo y papeles, se agitan las copas de los árboles
5	29 a 38	Fresquito (brisa fresca)	Pequeños movimientos en los árboles, superficie de los lagos ondulada
6	39 a 49	Fresco (brisa fuerte)	Se mueven las ramas de los árboles, dificultad para mantener el paraguas abierto
7	50 a 61	Frescachón (Viento fuerte)	Se mueven los árboles grandes, dificultad para andar contra el viento
8	62 a 74	Temporal (viento duro)	Se quiebran las copas de los árboles, circulación de las personas dificultosa
9	75 a 88	Temporal Fuerte (muy duro)	Daños en árboles, imposible andar contra el viento
10	89 a 102	Temporal duro (temporal)	Árboles arrancados, daños en la estructura de las construcciones
11	103 a 117	Temporal muy duro (borrasca)	Estragos abundantes en construcciones, tejados y árboles
12	>118	Temporal Huracanado (huracán)	Estragos abundantes en construcciones, tejados y árboles y lluvias.

Tabla 1: Escala de Beaufort

Pero para clasificar el viento se utiliza la escala de beaufort, que según el grado que sea, se le adjudica cierto rango de velocidad y característica.

Por otra parte, también existen las tablas de clasificación estándar del viento, que relaciona la potencia del viento respecto de su velocidad, considerando una densidad del aire seco a presión atmosférica de 1,225 kg/m<sup>3</sup>. Este tipo de tablas se usa para una evaluación preliminar.

Clase	Velocidad del viento a 30 metros de altura [m/s]	Potencia del viento [W/m <sup>2</sup> ]	Velocidad del viento a 50 metros de altura [m/s]	Potencia del viento [W/m <sup>2</sup> ]
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	640-1600	8,8-11,9	800-2000

Tabla 2: Clasificación estándar de clase de los vientos

Luego de conocer los parámetros del viento, como lo es su velocidad y dirección, se debe realizar un estudio del viento, estableciendo los factores que puede afectar a sus parámetros, ya sea la topografía, construcciones en los alrededores, corrosión, tipo de zona, latitud, vegetación, entre otras, una vez relacionado estos factores, podemos hacer una estimación del recurso eólico calculando su velocidad, la cual varía con la altura y sigue la forma de la ley exponencial de Hellmann dada como:

$$V_h = V_{10} * \left(\frac{h}{10}\right)^\alpha \quad (2.0)$$

Donde:

- $V_h$  = Velocidad del viento a la altura h.
- $V_{10}$  = velocidad del viento a 10 metros de altura

- $\alpha$  = Exponencial de Hellmann

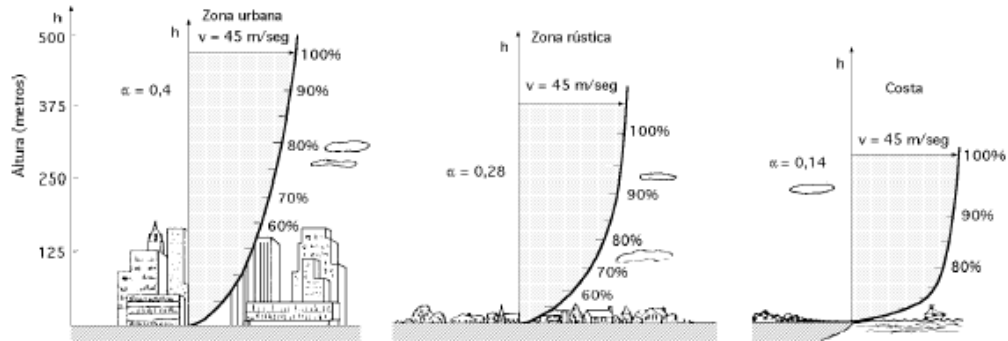


Figura 4: Variaciones de la velocidad del viento según la ley exponencial de Hellmann

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

Tabla 3: Valores del exponente de Hellmann en función de la rugosidad

En la ley exponencial de Hellmann se indica como varía la velocidad del viento a una altura  $h$  y la variación de velocidad o gradiente es afectada netamente por la rugosidad del terreno. A medida que el viento es más alto, mayor es su intensidad y fuerza, como se ve reflejado en la figura anterior. Es necesario obtener la velocidad media anual del viento, ya que la velocidad del viento es variable, esto provoca determinar una distribución probabilística del viento en lugar que se requiera.

Para determinar un potencial eólico para una turbina en alguna zona, está relacionado con establecer los parámetros de la distribución de Weibull, siendo los histogramas de velocidad del viento, los que reflejan la distribución de frecuencia del viento. La ecuación permite calcular la probabilidad de que exista una velocidad superior o menor a una velocidad determinada (referencia), con esto se puede llegar a saber si algún sitio o zona, habrá un

potencial para generar de manera estable, ya que el aerogenerador necesitaba tener un velocidad mínima para que comience a girar y así generar energía.

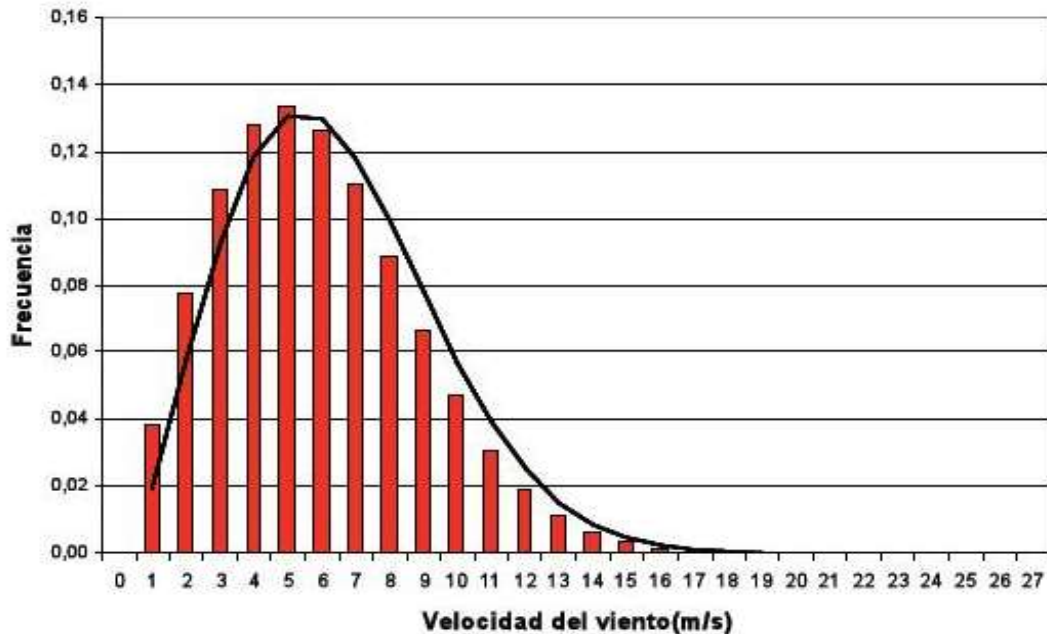


Figura 5: Ejemplo Distribución de frecuencias por el modelo estadístico de Weibull en Curiñanco, Chile.

### 2.3.1 Potencial mundial

Un estudio realizado en la Universidad de Harvard en Cambridge, publicado en la revista “Proceedings of the National Academy of Sciences” (PNAS), revela un análisis sobre el potencial de los vientos en el mundo, obtenido en base a datos históricos meteorológicos, sobre una red de turbinas instaladas en tierra (on shore) de 2,5 MW y sin considerar terrenos como urbanismo, hielos, bosques y operando como mínimo al 20% de su capacidad, podría alcanzar a satisfacer más de 40 veces el consumo actual de energía en el mundo, más de 5 veces el uso global de todo tipo de energía.

Aproximadamente el 1% de la energía solar absorbida por la tierra es convertida en energía cinética en la atmosfera, si se supone que toda esta energía se encuentra en la superficie terrestre

como una fuente de potencial energético, esta energía de aproximadamente  $3.4 \times 10^{14}$  W alcanzaría a cubrir un suministro de 22 veces el consumo comercial mundial de energía.

A medidas que pasan los años, el mundo ha visto el aumento considerable de generación de energía eléctrica mediante la energía eólica. Actualmente, existen cerca de 430 GW de capacidad instalada a principios de 2016, según la Asociación Mundial de Energía Eólica (WWEA), siendo China la mayor potencia mundial con un crecimiento de un 29% en el último año. En cambio, en Latinoamérica la mayor potencia es Brasil, quien en el último año registró un crecimiento del 46%.

Posición 2015	País o Región	Capacidad Total 2015 [MW]	Capacidad agregada 2015 [MW]	Crecimiento [%]	Capacidad Total 2014 [MW]
1	China	148.000	32.970	29,0	114.763
2	Estados Unidos	74.347	8.598	13,1	65.754
3	Alemania	45.192	4.919	11,7	40.468
4	India	24.759	2.294	10,2	22.465
5	España	22.987	0	0,0	22.987
6	Reino Unido	13.614	1.174	9,4	12.440
7	Canadá	11.205	1.511	15,6	9.694
8	Francia	10.293	997	10,7	9.296
9	Italia	8.958	295	3,4	8.663
10	Brasil	8.715	2.754	46,2	5.962
11	Suecia	6.025	615	11,1	5.425
12	Polonia	5.100	1.266	33,0	3.834
13	Portugal	5.079	126	2,5	4.953
14	Dinamarca	5.064	217	3,7	4.883
15	Turquía	4.718	955	25,4	3.763
	Resto del mundo	40.800	5.000	14,0	35.799
<b>Total</b>		<b>434.856</b>	<b>63.691</b>	<b>17,2</b>	<b>371.149</b>

Tabla 4: Traducida de la asociación Mundial de energía eólica, Fuente: WWEA-2016

En el mundo existen gran variedad de parques eólicos, distinguiendo los parque eólicos “on shore”, que son los ubicados en la tierra, de los “off shore”, que se ubican en el mar. Estos últimos son más eficientes debido a que la rugosidad del suelo es menor y

tampoco existen obstáculos como en tierra, hace algunos años esta tecnología no era tan común debido a los precios de instalación, pero esto ha ido cambiando. Un ejemplo de estos parques eólicos, es el “London Array” ubicado a más de 20 km de las costas de Kent, provincia Inglesa, con más de 630 MW de capacidad instalada y como el sexto parque eólico más grande en el mundo. Este parque se inauguró en 2013, cuenta con 175 turbinas Siemens de 3,6 MW a 87 metros sobre el nivel de mar y con una rotación de 120 metros.

Por otro parte, el parque eólico más grande del mundo (on shore), hoy en día se encuentra en china, llamado Parque eólico Gansu y aun no terminado en su totalidad, pero proporcionando 7.965 MW. Este parque consta con 100 parque eólicos al noreste de china en el desierto, estará terminado en su totalidad para el 2020 generando 20.000 mega vatios trabajando con 2.700 turbinas, lo que equivale al doble de generación que américa latina en la actualidad.

Otro parque eólico, es el centro de energía eólica alta (AWEC), también conocido como parque eólico Mojave, ubicado en Tehachapi, California, estados unidos y tiene una capacidad instalada de 1.547 MW.

### 2.3.2 Potencial en Chile

En Chile existe la ley de fomento 20/25, que estipula de tener un 20% de participación de las ERNC para el 2025, entre esas, se encuentra la energía eólica, gracias a esta ley, la energía eólica ha ido en aumento considerablemente en la última década. El último reporte de febrero de 2016 (CNE), arroja que en el SIC existen 816 MW de potencia neta de energía eólica, que equivale 5,2% del sistema. En cambio en el SING, existen 88,9 MW de potencia neta, lo que equivale al 2,2% del sistema. Ambos sistemas, son los de mayor importancia en Chile. En la siguiente tabla se puede apreciar el aporte de energía eólica en la matriz energética según los distintos sistemas eléctricos.

<b>Sistema Eléctrico Nacional</b>	<b>Potencia Neta [MW]</b>	<b>Participación Eólica [MW]</b>	<b>Participación Eólica [%]</b>
SING	4.008,3	88,9	2,2
SIC	15.597,3	816,0	5,2
Isla de Pascua	4,3	0,0	0,0
Sistema Mediano Los lagos	6,2	0,0	0,0
Sistema Mediano Aysén	52,36	2,0	3,8
Sistema Mediano Magallanes	101,7	0,0	0,0
<b>Total</b>	<b>19.770,2</b>	<b>906,9</b>	<b>4,59</b>

*Tabla 5: Adaptada de la Comisión Nacional de Energía, Fuente: CNE*

Según un estudio hecho en conjunto por MINENERGIA y GIZ, que basa una simulación con WRF (Weather Research and Forecasting Model), utilizado desde la regiones de Arica Parinacota hasta la isla grande de Chiloé, donde estima el potencial eólico de los parque eólicos que estén operativos, en construcción o que hayan alcanzado la tramitación ambiental antes del 31 de diciembre de 2012, incluidos los que están en licitación por el Ministerio de Bienes Nacionales, a pesar de no ser un sistema exacto, si entrega gran veracidad del potencial estimado en Chile de todos los proyectos eólicos a la fecha.

Cabe señalar que la principal fuente de información de cada proyecto es entregada por Servicio de Evaluación de Impacto Ambiental (SEA). Para cada estimación del potencial eólico se aplicó un factor de planta, asumiendo pérdidas de producción media de los parques de 15%.

En la tabla de proyectos a continuación se puede apreciar un avance en la cantidad de proyectos y el aumento de capacidad a instalar. No obstante, no necesariamente todos los proyectos mostrados lleguen a realizarse debido a que algunos son de baja eficiencia, pero si muestra una estimación importante de conocer el potencial eólico en Chile.

Nombre	Región	Sistema	Estado al 31/12/12	Capacidad [MW]	Nombre	Región	Sistema	Estado al 31/12/12	Capacidad [MW]
Punta colarada	IV	SIC	Operativo	36	Altos de Huaipén	VIII	SIC	Aprobado	20
Monte redondo	IV	SIC	Operativo	48	Raki	VIII	SIC	Aprobado	18
Totoral	IV	SIC	Operativo	46	Lebu Sur	VIII	SIC	Aprobado	108
Canela	IV	SIC	Operativo	18,15	Lebu Sur II	VIII	SIC	Aprobado	158
Canela II	IV	SIC	Operativo	60	Cuel	VIII	SIC	Aprobado	34,5
Lebu	VIII	SIC	Operativo	10,2	Collipulli	IX	SIC	Aprobado	48
Talinay (oriente I)	IV	SIC	Construcción	90	Renaico	IX	SIC	Aprobado	101,2
Ucuquer	VI	SIC	Construcción	16,2	San Pedro	X	SIC	Aprobado	36
Loa	II	SING	Aprobado	528	Llanquihue	X	SIC	Aprobado	73,6
Calama (CODELCO)	II	SING	Aprobado	250	Ancud	X	SIC	Aprobado	81
Minera Gaby	II	SING	Aprobado	40	Cateao	X	SIC	Aprobado	100
Quillagua	II	SING	Aprobado	100	Calama B	II	SING	En calificación	75
Valle de los vientos	II	SING	Aprobado	99	Andes Wind Park 1	II	SING	En calificación	50
Calama	II	SING	Aprobado	128,8	Andes Wind Park 2	II	SING	En calificación	9,35
Taltal	II	SING	Aprobado	99	Calama A	II	SING	En calificación	72
Cabo Leones	III	SIC	Aprobado	170	San Juan de Chañaral	III	SIC	En calificación	248
Señora Rosario	III	SIC	Aprobado	84	Sarco	III	SIC	En calificación	285
Cabo Leones II	IV	SIC	Aprobado	204	Punta Palmeras	IV	SIC	En calificación	66
Talinay (oriente II)	IV	SIC	Aprobado	47	Talinay II Etapa 1	IV	SIC	En calificación	108
Talinay (A)	IV	SIC	Aprobado	94	Talinay II Etapa 2	IV	SIC	En calificación	99
Talinay (B)	IV	SIC	Aprobado	98	Talinay II Etapa 3	IV	SIC	En calificación	105
Talinay (B Interior)	IV	SIC	Aprobado	128	Talinay II Etapa 4	IV	SIC	En calificación	87
Talinay (central)	IV	SIC	Aprobado	42	Talinay II Etapa 5	IV	SIC	En calificación	102
Hacienda quirote	IV	SIC	Aprobado	26	Küref	VIII	SIC	En calificación	43,2
Monte redondo (resto)	IV	SIC	Aprobado	26	Tolpán	VIII	SIC	En calificación	306
La cachina	IV	SIC	Aprobado	62	Pillín	X	SIC	En calificación	51
La cebada	IV	SIC	Aprobado	48,3	Pichihue	X	SIC	En calificación	108,1
El pacífico	IV	SIC	Aprobado	82,8	Ampliación San Pedro	VIII	SIC	En calificación	144
La gorgonia	IV	SIC	Aprobado	76	Lebu Sur III	X	SIC	No calificado	280
El Arrayán	IV	SIC	Aprobado	115	Pacífico	II	SING	No calificado	40
Las Dichas	V	SIC	Aprobado	16	Tchamma	II	SING	Licitación MBN	90
Laguna Verde	V	SIC	Aprobado	21	Ckani	II	SING	Licitación MBN	150
Llay- Llay	V	SIC	Aprobado	56	Cerro Tigre	II	SING	Licitación MBN	138
Punta Sierra	IV	SIC	Aprobado	108	Sierra Gorda Este	II	SING	Licitación MBN	100,8
Arauco	VIII	SIC	Aprobado	100	Sierra Gorda Oeste	II	SING	Licitación MBN	150
Chome	VIII	SIC	Aprobado	12	<b>TOTAL</b>				<b>6.871</b>

Tabla 6: Adaptada del Estudio de evaluación de energía renovables del Ministerio de Energía en cooperación Alemana, Fuente: (MINENERGÍA/GIZ)

### 2.3.3 Panorama Actual

En la actualidad mundial se ha visto un crecimiento continuo de la capacidad instalada de energía eólica. Hoy en día el mundo posee una capacidad instalada de 428 GW.

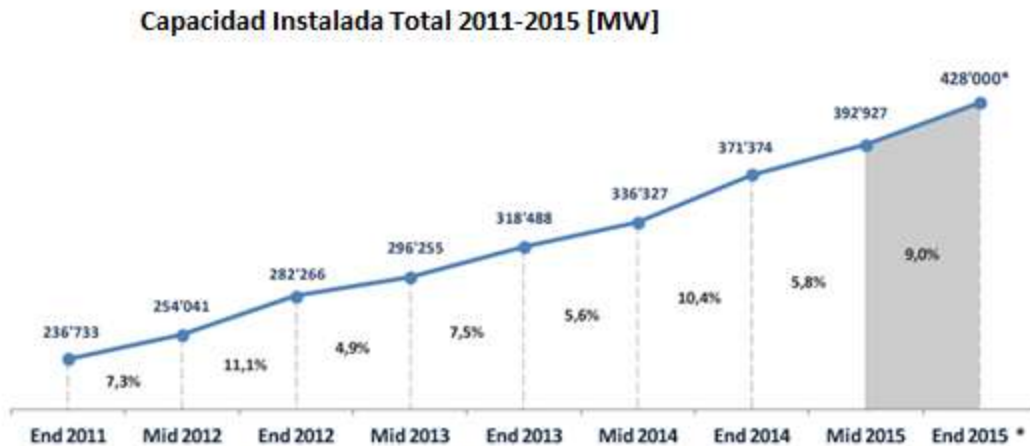


Figura 6: Capacidad instalada total Mundial del 2011 a 2015, Fuente: WWEA-2015

Respecto al mercado mundial de turbinas eólicas de baja potencia, China es el líder en termino de unidades instaladas, con 64.000 unidades instalada el 2014, 9.000 más en 2013, alcanzando un total de 684.000 unidades instaladas para fin de 2014, representando el 72% del mercado en términos de unidades instaladas. En Estados Unidos el número de unidades instaladas durante el 2014 alcanza las 1.600 unidades, 2.700 unidades fueron instaladas en 2013, alcanzando un total para fin de 2014 de 159.300 unidades instaladas, siendo el segundo mercado más grande.

En el Reino Unido hubo incremento 2.237 unidades instaladas de turbinas eólicas de baja potencia, un considerable aumento si se compara con las 500 unidades que obtuvieron de incremento durante el 2013. Un dato interesante, es que en el Reino Unido por cada turbina instalada, se exporta también uno al extranjero. 2.614 unidades fueron exportadas a continente como Europa, Asia y particularmente a Estados Unidos.



*Figura 7: Participación Mundial de las potencias en energía eólica de baja potencia, Fuente: WWEA-2015*

## 2.4 Clasificación de las turbinas y Sistemas eólicos

Las turbinas eólicas se pueden clasificar según su potencia o la orientación del eje del rotor. Tenemos dos tipos de turbinas eólicas de distintos eje:

1. **Turbinas Eólicas de Eje Horizontal (HAWT):** Las turbinas eólicas de eje horizontal, son las más comunes hoy en día y a lo largo de la historia. Antiguamente, como se nombró anteriormente, era conocidas como molinos de vientos, y a través del tiempo han ido evolucionando a lo que se conoce hoy como aerogeneradores. Estos comenzaron a crearse en Dinamarca, alrededor de 1980. Hasta ahora los aerogeneradores puede tener un rotor de hasta 126 metros, están equipadas con alta tecnología, haciendo que la turbina pueda girar según la orientación del viento, e incluso poseen sistemas de emergencia si el viento es mayor a lo requerido, haciendo que la turbina disipe fuerza del viento o apagando la turbina para no producir exceso de carga.

2. **Turbinas Eólicas de Eje Vertical (VAWT):** Las turbinas eólicas de eje vertical, generalmente son menos eficiente que las horizontales. Sin embargo, el costo de instalación es más barato, además no necesita un sistema de orientación del viento. Las turbinas eólicas de eje vertical, utilizan la torsión del viento para convertir en energía mecánica. Hoy en día existen varios tipos según la forma que tengan: Savonius, Darrieus, Darrieus H o Giromill y Ventus.



Figura 8: Ejemplo Savonius



Figura 9: Ejemplo Darrieus



Figura 11: Ejemplo Darrieus H o Giromill



Figura 10: Ejemplo Ventus

Las turbinas también se pueden dividir según la potencia que generen:

**Microturbinas o Microaerogeneradores:** Son pequeñas turbinas cuyo potencial nominal es menor a 3 kW que normalmente tienen un uso aislado. Utilizados para cargar de baterías, en complemento a otros sistemas, para redes de telecomunicaciones, sistemas de emergencia, alarmas, o sistemas científicos.

**Aerogeneradores de baja potencia:** Son aerogeneradores cuya potencia nominal oscila desde unos vatios hasta alcanzar los 100 kW. En la Norma IEC.61400-2 ED. Define los aerogeneradores de pequeña potencia, como aquellos que tengan una área barrida bajo los dos metros. En cambio la Asociación americana de energía eólica, los clasifica como aerogeneradores que no sobrepasan los 100 kW, y subdividiéndolos en aerogeneradores residencial (1 a 10 kW) y aerogeneradores de uso comercial (de 10 a 100 kW). Por lo general, estos aerogeneradores son de uso residencial, para intentar disminuir la dependencia eléctrica o bajar el costo de esta.

**Aerogeneradores de media potencia:** Las turbinas eólicas de media potencia son aquellas cuyo potencial nominal oscila entre 100 a 1000 kW. Utilizadas para alimentar eléctricamente a la red o pueblos mediante parques eólicos.

**Aerogeneradores de Alta potencia:** Aquellos cuya potencia nominal oscila entre 1 a 10 MW. Utilizados normalmente en parques eólicos de amplio terreno, o mar adentro (off-shore).

**Aerogeneradores de muy alta potencia:** Estas turbinas aún se encuentran en investigación, requieren nuevos diseños y materiales no convencionales.

## 2.5 Bancos de pruebas de aerogeneradores

### 2.5.1 Bancos de pruebas a gran escala

En España existe un Centro Nacional de Energías Renovables (CENER), que cuenta con el laboratorio más tecnológico del mundo para probar aerogeneradores, el Laboratorio de ensayos de aerogeneradores (LEA). Este laboratorio ensaya desde componente de aerogeneradores hasta los aerogeneradores completos. El LEA ocupa una superficie de 30000 metros cuadrados en Sangüesa, España.

En este laboratorio se puede hacer ensayos de palas de los aerogeneradores que podría alcanzar los 100 metros de longitud nominal, estos ensayos se rigen por normas internacionales.



*Figura 12: Laboratorio de Ensayo de Aerogeneradores, prueba de palas (LEA)*

En el laboratorio de donde tienen un tren de potencia, los aerogeneradores son expuestos a una alta aceleración de prueba de vida, donde la prueba se ejecuta las 24 horas del día, todos los días, por un periodo de nueve meses, simulando la expectativa de 25 años de vida del aerogenerador.

Otro caso de banco de prueba a gran escala es el caso del banco de prueba en Bremerhaven, Alemania, por el instituto Fraunhofer, IWES (Instituto de energía eólica y tecnologías de sistemas de energía).

En este laboratorio también cuenta con una gran infraestructura para probar los aerogeneradores más grandes del mundo, y que le realicen distintas pruebas. Se realiza ensayos de hasta 90 metros y pruebas como: cargas estáticas, Pruebas cíclicas biaxial y uniaxial.



*Figura 13: Laboratorio FraunHofer IWES, Alemania*

En el caso de los parques eólicos en el mar (off shore), las cargas acumuladas en una prueba difieren considerablemente con las pruebas en un laboratorio, debido a que el material se encuentra en condiciones extremas como: variación de temperatura, incremento de rayos ultra violeta, exponerse al agua salada, lo que induce corrosión. En alemania, Fraunhofer IWES tiene 4 locaciones wihelmshaven, Sylt, Helgoland, y en la boca del río Weser. Los materiales y componentes son probados en condiciones de mar para adquirir más conocimiento en distintos sensores.

### 2.5.2 Bancos de pruebas a baja escala

Los bancos de pruebas de baja escala, son para analizar temas de investigación, y demostración de la generación de energía eléctrica mediante un aerogenerador. Por lo general, se utilizan aerogeneradores de baja potencia, túnel de viento, ventiladores y componentes eléctricos.

En España la empresa DIKOIN, fabrica un banco de ensayos para aerogeneradores de baja potencia con un diámetro máximo de 600 mm para aerogeneradores. Ocupa un sistema de software que entrega las curvas características de la velocidad del viento, entre otras características.



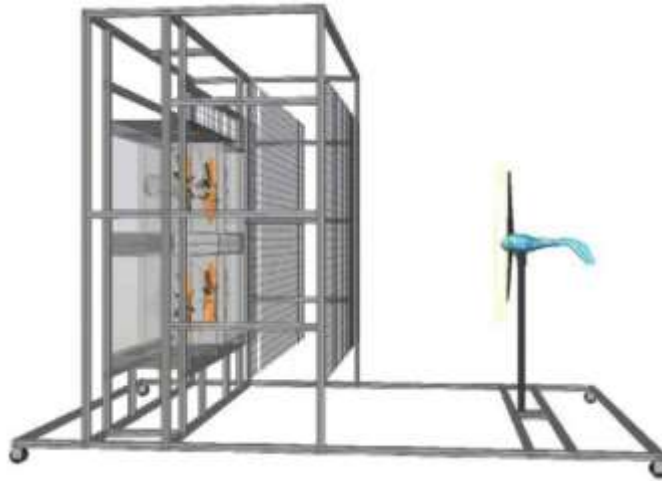
*Figura 14: Banco de prueba de aerogenerador de baja potencia, DIKOIN*

De este banco se puede obtener las siguientes prácticas o ensayos:

- Medición de la potencia aprovechada por el aerogenerador.
- Determinación de las curvas características de la potencia recuperada por la máquina eólica en función de la velocidad del viento.
- Determinación del coeficiente de potencia del aerogenerador.
- Determinación del coeficiente de potencia en función de la velocidad específica.
- Obtención del coeficiente de potencia en función del ángulo de asiento del perfil.
- Intercambio de palas para el análisis en función del perfil aerodinámico.

Otro caso de banco de prueba para aerogeneradores de baja potencia, que en este trabajo se quiere tratar, es el caso de un banco de prueba que se desarrolló en la universidad politécnica de Cartagena.

Este banco funciona con cuatro ventiladores helicoidales, en dos filas y dos columnas, controlando cada fila de manera independiente según un sistema de frecuencia, mediante variadores de frecuencia.



*Figura 15: Esquema banco de prueba universidad politécnica de Cartagena*

Estos bancos de ensayo, ya sea de tipo abierto o cerrado como en el caso anterior, se debe homogenizar el flujo, es decir, un flujo más estable, que en su posibilidad, carezca de turbulencias o remolino. Para esta tipo de solución se utilizan primordialmente rejillas, de panal o de aire.

Otro punto a considerar en los bancos de pruebas, es el sistema de adquisición de datos y monitorio, de todos los parámetros relevantes que muestran el comportamiento del aerogenerador.

## **2.6 Fundamentos de potencia de un aerogenerador**

Para entender a cabalidad de cómo se origina la potencia en un aerogenerador, es necesario basarse en la teoría de momento unidimensional y el límite de Betz. Suponemos un tubo por donde pasa una corriente (viento), donde se encuentran un disco que representa al aerogenerador. Este análisis no es para un tipo de turbina en particular, y asume los siguientes conceptos:

- Homogéneo, incompresible, flujo estacionario.
- Sin resistencia por fricción.
- Infinito números de aspas

- Flujo uniforme sobre el disco o área de rotación.
- Las presiones estáticas en los puntos 1 y 4, equivalen a la presión ambiente normal.
- una estela no rotativa.

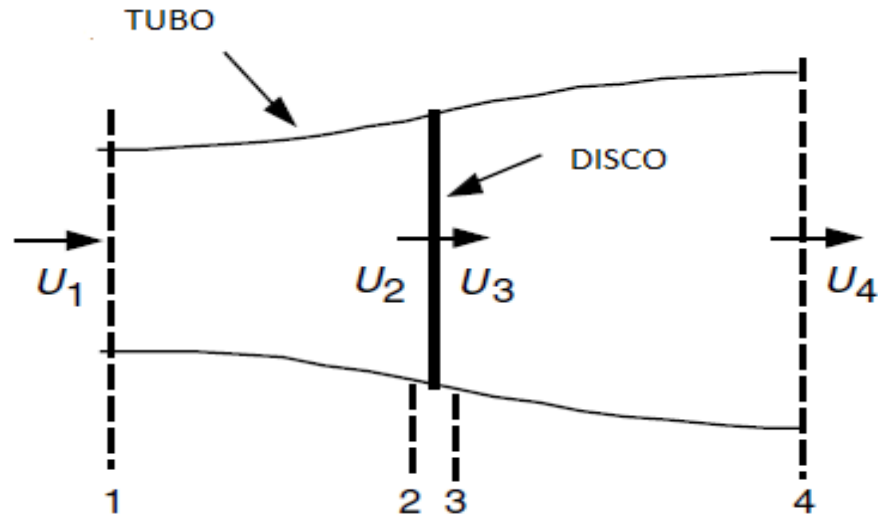


Figura 16: Modelo de aerogenerador representado por disco, donde el tubo simula el control de volumen, 1, 2, 3 y 4, indica el sector del tubo, sector 2,3 indica antes y después del rotor (disco) respectivamente.

Aplicando la ley de conservación de momento lineal en el volumen encerrado de todo el sistema, podemos encontrar la fuerza neta contenida en el control de volumen. Esta fuerza es igual y contraria al empuje del viento sobre el disco (aerogenerador).

Considerando los conceptos anteriores, un fluido que no varía en el tiempo, el empuje es igual y contrario a la tasa de cambio de momento lineal de la corriente de aire:

$$E = U_1 (\rho AU)_1 - U_4 (\rho AU)_4 \quad (2.1)$$

Donde E es el empuje, U es la velocidad,  $\rho$  es la densidad del aire y A corresponde al área de sección transversal. Los sub-índices corresponden a los puntos indicados en la figura.

Para un flujo estacionario,  $(\rho AU)_1 = (\rho AU)_4 = \dot{m}$ , donde  $\dot{m}$  es el flujo másico, entonces:

$$E = \dot{m} (U_1 - U_4) \quad (2.2)$$

El empuje es positivo, por lo tanto la velocidad después del disco ( $U_4$ ) es menor que la velocidad libre antes de ingresar al disco ( $U_1$ ). No se efectúa ningún trabajo en las secciones 1 y 4, por tanto, se puede aplicar la ecuación de Bernoulli para cada caso:

$$P_1 + \frac{1}{2}\rho U_1^2 = P_2 + \frac{1}{2}\rho U_2^2 \quad (2.3)$$

Y por el otro extremo:

$$P_3 + \frac{1}{2}\rho U_3^2 = P_4 + \frac{1}{2}\rho U_4^2 \quad (2.4)$$

Se asume que la presión  $P_3$  y la  $P_4$  son iguales y la velocidades en 2 y 3 se mantienen ( $U_2=U_3$ ). El empuje también se puede expresar como la sumatoria de fuerzas de cada lado del disco como:

$$E = A_2 (P_2 - P_3) \quad (2.5)$$

Si se resuelve ( $P_2 - P_3$ ), usando las ecuaciones (2.3) y (2.4) y sustituyéndolas en la ecuación 2.5, se obtiene:

$$E = \frac{1}{2}\rho A_2 (U_1^2 - U_4^2) \quad (2.6)$$

Juntando las ecuaciones del Empuje (2.2) y (2.6) y sabiendo que el flujo másico es igual también a  $\rho A_2 U_2$ , se obtiene:

$$U_2 = (U_1 + U_4)/2 \quad (2.7)$$

Por conclusión, la velocidad del viento es la media de la velocidad de los extremos del disco, en la sección 1 y 4. Si uno define un factor de inducción axial ( $a$ ) o también denominado factor de perturbación, como una fracción decreciente en la velocidad del viento que se experimenta en el disco relativo al valor de la velocidad no perturbada del viento (sector libre), entonces:

$$a = (U_1 - U_2)/U_1 \quad (2.8)$$

$$U_2 = U_1 (1 - a) \quad (2.9)$$

$$U_4 = U_1 (1 - 2a) \quad (2.10)$$

La cantidad ( $U_1 a$ ) se refiere a la velocidad inducida en el rotor del aerogenerador (disco), que en este caso la velocidad en el rotor, es una combinación de la velocidad inducida del viento y la velocidad libre que lleva la corriente. Si el factor  $a$  fuese 0,5, entonces la teoría no se podría aplicar, porque la velocidad sería 0 antes de llegar al disco. La potencia de salida es igual a la cantidad de empuje en el disco:

$$P = 0,5\rho A_2(U_1^2 - U_4^2)U_2 = 0,5\rho A_2 U_2(U_1 + U_4)(U_1 - U_4) \quad (2.11)$$

Sustituyendo  $U_2$  y  $U_4$ , de las ecuaciones (2.9) y (2.10), se obtiene:

$$P = 0,5\rho A U^3 4a(1 - a)^2 \quad (2.12)$$

Donde el área del volumen de control en el disco ( $A_2$ ), es reemplazado por  $A$  y la velocidad libre del viento ( $U_1$ ) es reemplazado por  $U$ . El comportamiento de un aerogenerador normalmente se caracteriza por un coeficiente de potencia ( $C_p$ ):

$$C_p = \frac{P}{0,5 \rho A U^3} = \frac{\text{Potencia de Rotor}}{\text{Potencia del viento}} \quad (2.13)$$

El coeficiente de potencia adimensional, representa la potencia del viento extraída por el rotor de la turbina. De la ecuación (2.12), se obtiene:

$$C_p = 4a(1 - a)^2 \quad (2.14)$$

Si se deriva la ecuación (2.14) con respecto al factor  $a$ , se obtiene el máximo rendimiento del coeficiente de potencia conocido como el **Límite de Betz**:

$$C_{p,max} = \frac{16}{27} = 0,593 \quad (2.15)$$

## 2.7 Componentes de los SETE

Los Sistemas de Ensayos de Turbinas Eólicas (SETE), son esencialmente banco de pruebas para poder hacer análisis a los aerogeneradores, obteniendo sus curvas de operación óptima y su rendimiento. Usualmente se utilizan aerogeneradores de eje horizontal, a los cuales se les entrega un viento artificial, comúnmente efectuado por ventiladores, de modo la orientación del viento es irrelevante.

### 2.7.1 El aerogenerador y sus partes

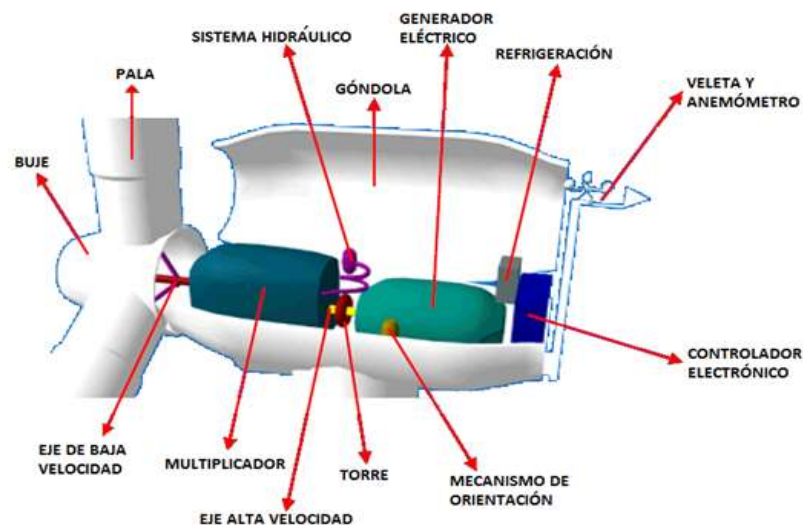


Figura 17: Esquema de un aerogenerador horizontal y sus partes básicas.

- **Buje:** Es la pieza de unión entre las palas y el eje principal, por tanto, es el trasmisor de la energía cinética del viento a la góndola, el buje es parte del rotor del aerogenerador.
- **Palas:** Son las aspas o paletas responsable de captar la potencia del viento y luego transmitir la potencia al buje. Están hechas de material resistente para durar alrededor de 25 años (vida media aerogenerador). En el caso que sea para parque eólicos en el mar, también son resistentes a la salinidad. Además de ser aerodinámicas, algunas tiene un sistema de seguridad donde gira la punta para poder poner mayor resistencia al viento y activa el freno de disco, terminando con el giro.
- **Eje de Baja Velocidad:** Es el eje que conecta el buje del rotor con el multiplicador y consta de unos conductos del sistema hidráulico que permite el funcionamiento de los frenos aerodinámicos.
- **Multiplicador:** Esta entre el eje de baja velocidad (izquierda) y el eje de alta velocidad (derecha), lo que permite que gire 50 veces más rápido.
- **Eje de Alta velocidad:** Gira alrededor de 1500 rpm y permite el funcionamiento del generador eléctrico. Está equipado con un freno de disco de emergencia, que se utiliza en caso que fallen los frenos aerodinámicos o cuando se hacer mantención al aerogenerador.
- **Góndola:** Es la cubierta de los componente que contiene el aerogenerador, como la multiplicadora y el generador eléctrico. Se puede acceder a ella desde la torre.
- **Generador eléctrico:** Existen tres tipos de generadores, asíncrono (jaula de ardilla), asíncrono con rotor bobinado y síncrono (múltipolo). El asíncrono se caracteriza por ser más sencillo de fabricar, tener menor versatilidad, necesito una sincronización suave y no regular el factor de potencia sino que necesita etapas con condensadores. En cambio, el asíncrono con rotor bobinado permite inyectar y extraer energía del

rotor, es generador de velocidad variable (900 a 1500 rpm), al permitir la extracción de energía del rotor, se consigue generar hasta un 10% de la energía producida.

Por otra parte, está el generador sincrónico, que tiene un control optimizado, no necesita multiplicador, tiene bajo deslizamiento y reducción de tensión.

- **Sistema hidráulico:** Utilizado para restaurar los frenos aerodinámicos del aerogenerador.
- **El Sistema de Refrigeración:** Su función es evacuar el calor generador de las distintas partes eléctricas junto con todas las partes vitales sometidas a rozamientos. Contiene un ventilador eléctrico encargado de refrigerar el generador eléctrico, además contiene una unidad de refrigeración de aceite para el aceite que utiliza la multiplicadora.
- **El Controlador Electrónico:** Posee un ordenador electrónico que monitorea todas las alas aéreas del aerogenerador, en caso de emergencia para el sistema y emite una llamada telefónica al operador mediante un modem (aerogeneradores de gran envergadura).
- **Mecanismo de Orientación:** Se activa mediante el controlador electrónico, y orienta al aerogenerador según la veleta quien se mueve con la orientación del viento.
- **El Anemómetro y la Veleta:** El anemómetro mide la velocidad del viento y está conectada al controlador electrónico, el cual hace andar al aerogenerador cuando la medición del viento logra la mínima velocidad de movimiento para el aerogenerador, alrededor de 3 a 5 m/s según sea la turbina eólica y parara el sistema si excede la velocidad de máxima de producción (25 m/s, los de gran envergadura). La veleta es utilizada para registrar los datos para el sistema de orientación.
- **La torre:** Es el soporte que contiene a la góndola y sus respectivos componentes con e buje las palas, normalmente hecho de acero u hormigón y huecos para grandes turbinas.

### 2.7.2 La Batería

Cualquier sistema autónomo que genere electricidad requiere algún aparato donde almacenar o acumular la carga. En el caso de los SETE, normalmente se usa mediante baterías a base de plomo, que son para sistemas más pequeños. Estas baterías también son imponente al tener un bajo costo, pero son peligrosas al tratar con ácido sulfúrico y plomo.

Las baterías en base ácido-plomo se caracterizan por: capacidad en Amperios/horas, eficiencia de carga, profundidad de descarga y auto descargar.



*Figura 18: Batería en base a plomo*

### 2.7.3 El Regulador de carga

Es un componente que se utiliza para regular la carga y dar aviso en caso de que la batería está próxima a la descarga o incluso a la sobrecarga. Es decir, regula y controla el proceso de carga y descarga de las baterías.



*Figura 19: Regulador de carga eólico*

#### 2.7.4 El Inversor

Es el dispositivo electrónico que convierte el voltaje que recibe como corriente continua y lo pasa a corriente alterna con distinto voltaje. Se recomienda obtener un inversor que cumpla con una capacidad de un 50% extra a lo que se requiera, debido a que existen topes donde de repente se utiliza mayormente. Existen dos tipos de inversores:

- Onda Sinusoidal Modificada: Este tipo de inversor es utilizado más comúnmente debido a que funciona en general para todos los aparatos electrónicos y tiene un bajo costo. Sin embargo, crea una onda modificada que no es de gran calidad y no se parece a la onda de corriente alterna.
- Onda Sinusoidal Pura: Este tipo de inversor es utiliza para aparatos más sensibles debido a que es más caro, aunque produce una onda sinusoidal de gran calidad. Ejemplo de la utilización de este inversor serían aparatos electrónicos de un hospital.



*Figura 20: Inversor onda Modificada*

## 2.8 Norma

Las Normas internacionales que rigen a los aerogeneradores son las entregadas por la Comisión Internacional Electrotécnica (IEC). El objetivo de esta organización es promover cooperación internacional de todas las preguntas que pudiesen surgir en el ámbito de estandarización eléctrica y electrónica. La organización toma en cuenta otros comités de distintas naciones para llegar al acuerdo de las normas.

El propósito principal es establecer la estandarización de los requerimientos para el diseño de los distintos componentes de las turbinas eólicas en distintas áreas, como también, todo lo relacionado con los parques eólicos u operación de los aerogeneradores.

La comisión Internacional Electrotécnica establece las siguientes normas:

- 61400-1 Design requirements
- 61400-2 Design requirements for small wind turbines
- 61400-3 Design requirements for offshore wind turbines
- 61400-4 Design requirements for wind turbine gearboxes
- 61400-5 Wind turbine rotor blades
- 61400-11 Acoustic noise measurement techniques
- 61400-12 Wind turbine power performance testing
- 61400-12-1 Power performance measurements of electricity producing wind turbines
- 61400-13 Measurement of mechanical loads
- 61400-14 Declaration of apparent sound power level and tonality values
- 61400-21 Measurement and assessment of power quality characteristics of grid connected wind turbines
- 61400-23 Full scale structural testing of rotor blades
- 61400-24 Lightning protection
- 61400-25-1 Communications for monitoring and control of wind power plants – Overall and description of principles and models

- 61400-25-2 Communications for monitoring and control of wind power plants – Information models
- 61400-25-3 Communications for monitoring and control of wind power plants – Information Exchange models
- 61400-25-4 Communications for monitoring and control of wind power plants – Mapping to XML based communications profile
- 61400-25-5 Communications for monitoring and control of wind power plants – Conformance testing
- 61400-26 Time based availability for wind turbines
- 61400-27 Electrical simulation models for wind power generations

Según lo que se requiera, es la norma que se ocupará. Sin embargo, no existe una norma perteneciente para los bancos de pruebas para aerogeneradores de baja potencia. No obstante, las normas que son más relevantes para un banco de prueba son:

- 61400-12 Wind turbine power performance testing (prueba de rendimiento en aerogeneradores).
- 61400-12-1 Power performance measurements of electricity producing wind turbines (Mediciones de rendimiento de la potencia produciendo electricidad por aerogeneradores).

## 3 Diseño del SETE

---

### 3.1 Alternativas del diseño

En primera instancia se desea implementar un banco de ensayos para distintas turbinas eólicas de distinto tamaño pero en la clasificación de pequeña potencia, utilizando dos motores eléctricos de 5 kW de potencia cada uno y dos ventiladores industriales que trabajan hasta 860 rpm, todo esto regulado por un variador de frecuencia. Estos elementos se encuentran actualmente sin uso en el laboratorio de termo fluidos y servirían para generar un viento artificial alrededor de los 50 m/s, lo que llevaría a tener mayores mediciones en una gama más amplia.

Teniendo en cuenta estas facilidades se desea obtener un flujo de alta velocidad, uniforme y con una configuración adecuada que canalice el flujo al centro del aerogenerador. Este aerogenerador debe ser cubierto por una protección y puesto sobre un soporte móvil para mayor versatilidad para el uso del sistema dentro del laboratorio, a su vez, debe tener dimensiones proporcionales para probar distintos aerogenerador de diferentes tamaños. Según esto, se tiene las siguientes configuraciones de diseño:

Alternativa 1

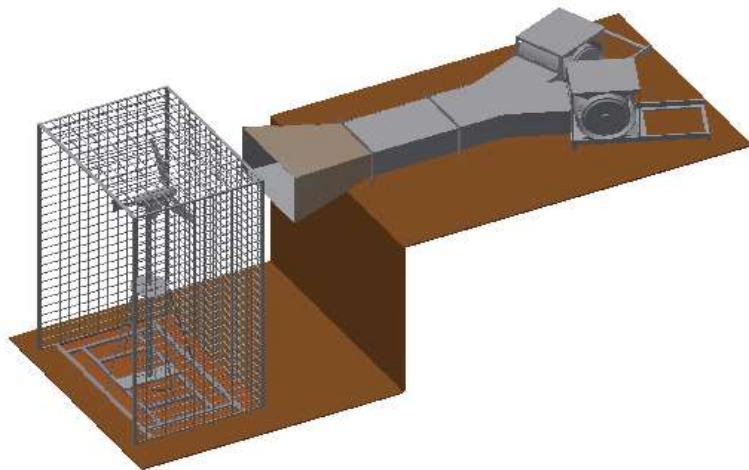


Figura 21: Esquema de alternativa 1 de diseño

Alternativa 2

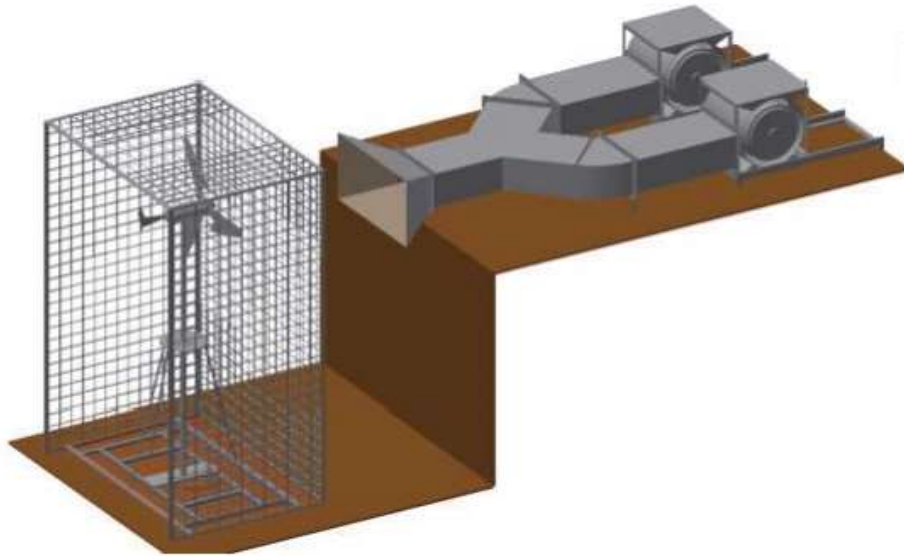


Figura 22: Esquema de alternativa 2 de diseño

Alternativa 3

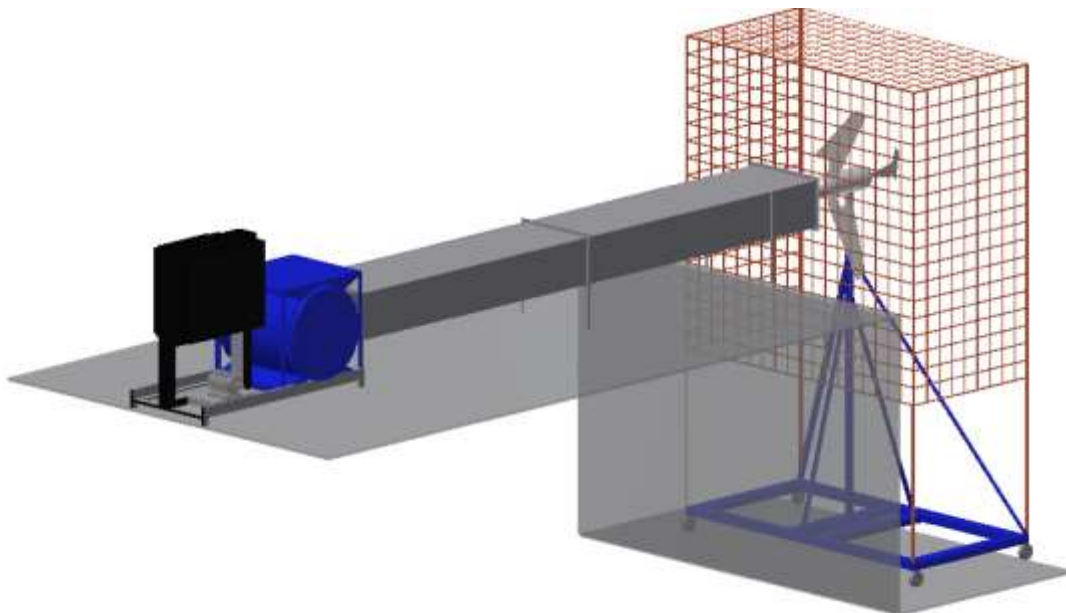


Figura 23: Esquema de alternativa 3 de diseño

Debido al capital utilizado para la compra del aerogenerador, materiales, estructura, pintura, entre otros, sumado al problema debido que el variador de frecuencia no logra soportar el funcionamiento de los dos motores, se optó por la alternativa 3, un diseño más sencillo pero eficaz, que con el tiempo se irá perfeccionando.

Tampoco se pudo obtener el difusor de manera de canalizar mayormente el flujo, pero si es una opción definitiva para el futuro.

### 3.2 Descripción del sistema General Seleccionado

El sistema seleccionado representa un banco de ensayos para turbinas eólicas para distintos tamaños, pero de pequeña potencia, empezando por una estructura de soporte móvil, que es capaz de soportar el peso del aerogenerador sin problemas y el momento flector que genera el viento artificial entregado por el ventilador, que en este caso, como máximo alcanzará los 25 m/s.

El banco de pruebas constará de un ventilador industrial radial con alabe curvo hacia adelante con transmisión por correas y poleas. El banco cuenta con un motor trifásico de 7,5 Hp que será regulado por un variador de frecuencia, que permite variar las rpm del motor desde 0 hasta 1428, creando un viento que será canalizado por un ducto que lo llevará cercano al centro del aerogenerador.

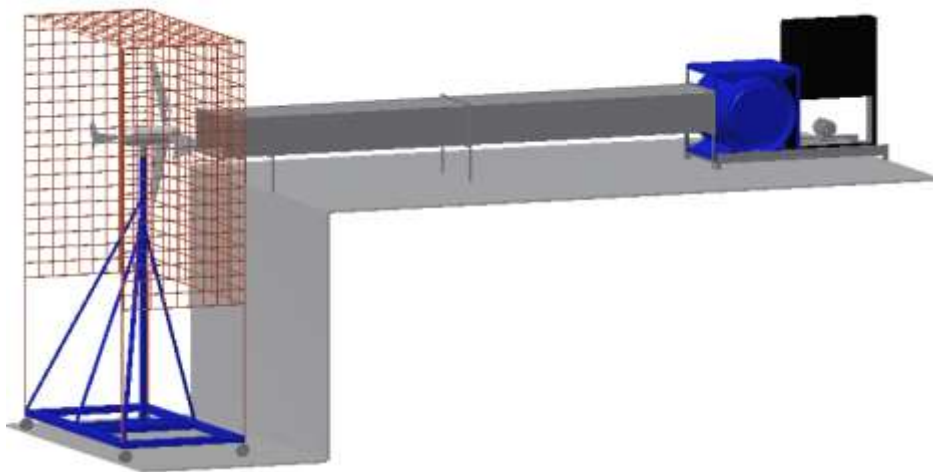
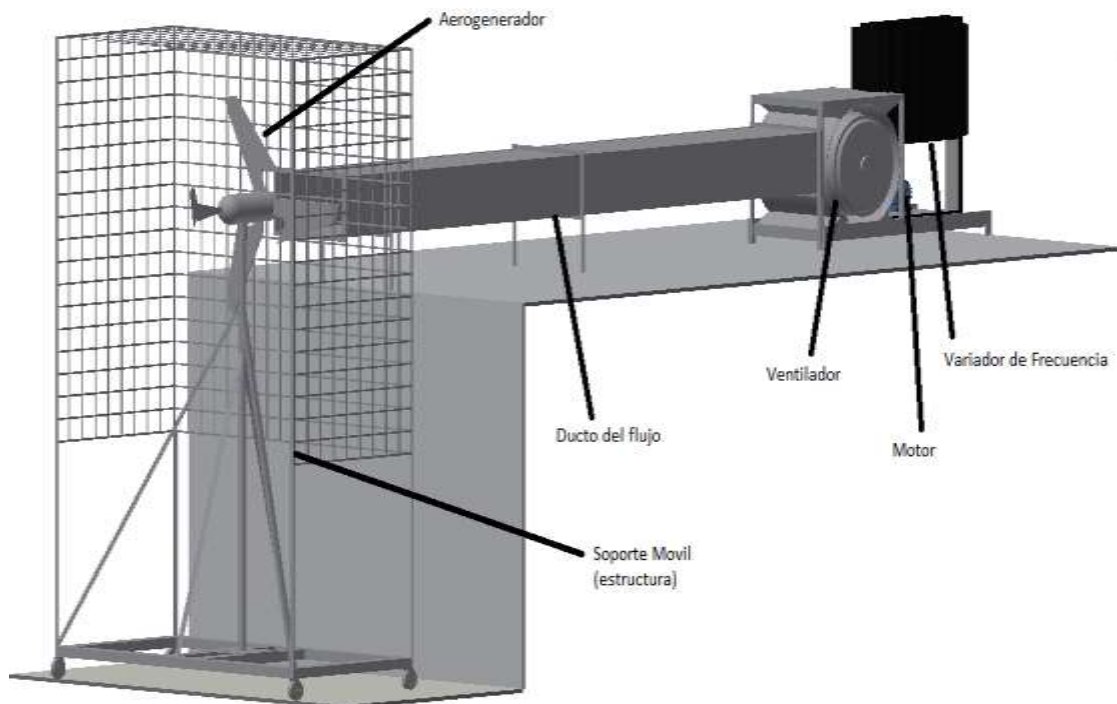


Figura 24: Esquema del diseño seleccionado



*Figura 25: Esquema del diseño y sus partes*

La turbina eólica estará sobre el soporte y encerrado por mallas metálicas en la parte delantera, laterales y arriba, con el fin de proteger ante cualquier accidente y también con el objetivo de homogenizar un poco el flujo que entrega el ducto. Por otra parte, el soporte constará con vigas colocadas en las partes delantera y trasera y dos vigas puestas diagonalmente sujetando por atrás del aerogenerador con el fin de estabilizar y soportar el mástil en el cual se colocara el aerogenerador.



*Figura 26: Foto del estructura real con el aerogenerador*



*Figura 27: Foto de la estructura real en el laboratorio*

### **3.3 Fundamentos del diseño**

#### **3.3.1 Justificación de la velocidad de salida del ducto**

Se necesita saber si efectivamente el ducto será capaz de entregar al menos 25 m/s a su salida. Para esto, se hace un cálculo teórico considerando la fórmula de Bernoulli. Sin embargo, es necesario que después de la justificación del cálculo, se realicen pruebas que fundamenten o se aproximen a la veracidad del desarrollo.

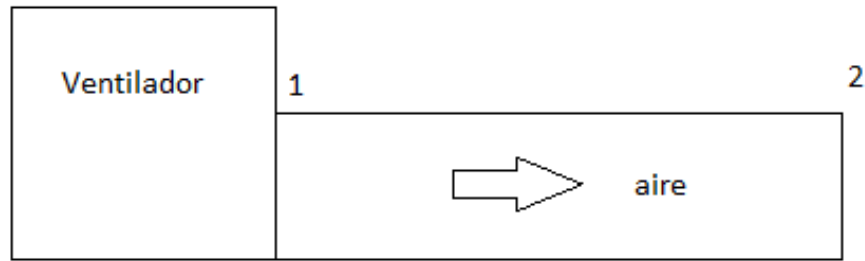


Figura 28: Dibujo explicativo de la realización del cálculo

**En 1:**

- Presión estática del ventilador = 39 [mmH<sub>2</sub>O] = 382,45 [Pa]
- Caudal de Salida del Ventilador = 10.889 [m<sup>3</sup>/hr] = 3,025 [m<sup>3</sup>/s]
- Área del ducto = 0,1635 [m<sup>2</sup>]
- Velocidad de entrada en el ducto = 18,5 [m/s]
- Densidad del aire constante = 1,225 [Kg/m<sup>3</sup>]

**En 2:**

- Presión atmosférica: 101.300 [Pa]
- $V_2 = ?$
- $h_f = ?$

Ecuación de Bernoulli:

$$\frac{P_1}{\gamma} + \frac{\alpha_a * V_1^2}{2 * g} + Z_1 = \frac{P_2}{\gamma} + \frac{\alpha_b * V_2^2}{2 * g} + Z_2 + h_f$$

Donde:

- $P_1$ : Presión total en 1, respectivamente según índice [Pa]
- $\gamma$ : Densidad del aire por aceleración de gravedad [Kg/m<sup>2</sup>\*s<sup>2</sup>]
- $g$ : Aceleración de gravedad [m/s<sup>2</sup>]

- $V_1$ : Velocidad en 1, respectivamente según índice [m/s]
- $Z_1$ : Altura en 1, respectivamente según índice [m]
- $h_f$ : Pérdidas [m]
- $\alpha_1$ : Factor de corrección, respectivamente según índice

Factor de Corrección de energía cinética:

Para este caso, se puede considerar el fluido (aire), como flujo incompresible, debido a que su densidad permanece constante. Este factor aparece por la conservación de la energía en el sistema producto de sus características. Como el ventilador entrega flujo turbulento en el comienzo y a lo largo de los 4000 mm del ducto, el aire comienza a estabilizarse, finalizando casi como un flujo laminar, por lo tanto los factores para cada tramo son:

$\alpha_1$ : Flujo en régimen turbulento = 1

$\alpha_2$ : Flujo en régimen laminar = 2

Presión dinámica:

$$P_d = \frac{1}{2} * \rho * V^2$$

Donde:

- $P_d$ : Presión dinámica [Pa]
- $\rho$ : densidad del aire [Kg/m<sup>3</sup>]
- $V$ : velocidad del aire [m/s]

Pérdidas:

$$h_f = f * \frac{L}{D} * \frac{V^2}{2 * g}$$

Donde:

- $h_f$ : Pérdidas [m]
- $f$ : Coeficiente de fricción [-]
- $L$ : Largo del ducto [m]
- $D$ : diámetro equivalente [m]
- $V$ : Velocidad del fluido [m/s]
- $g$ : Aceleración de gravedad [m/s]

Fórmula de Huebscher (diámetro equivalente):

$$d_e = 1,3 * \left[ \frac{(a * b)^{0,625}}{(a + b)^{0,25}} \right]$$

Donde:

- $d_e$  : diámetro equivalente [m]
- $a$ : ancho del ducto
- $b$ : alto del ducto

$$d_e = 1,3 * \left[ \frac{(a * b)^{0,625}}{(a + b)^{0,25}} \right] = 439 [mm]$$

Para el cálculo del coeficiente de fricción, se utiliza el diagrama de moody, la cual debemos obtener el número de Reynolds:

$$Re = \frac{\rho * V * D}{\mu}$$

Donde:

- Re: Número de Reynolds [-]
- $\rho$ : densidad del fluido [ $\text{Kg/m}^3$ ]
- V: Velocidad del fluido [m/s]
- D: diámetro del ducto ( $d_c$ ) [m]
- $\mu$ : Viscosidad dinámica del fluido [ $\text{Kg/m*s}$ ] =  $1,8 \times 10^{-5}$

Por tanto:

$$Re = \frac{1,225 * 18,5 * 0,439}{1,8 \times 10^{-5}} = 552.713,2 \approx 5,5 \times 10^5$$

También se necesita la siguiente relación para ingresar a la tabla de moody:

$$Relative\ Roughness = \frac{\varepsilon}{D}$$

Con  $\varepsilon$  indica la aspereza según material, la cual es caracterizada por hierro galvanizado (galvanized iron), es decir:

$$\varepsilon = 0,15 \text{ [mm]}$$

$$Relative\ Roughness = \frac{0,15}{439} = 0,000342 \approx 3,4 \times 10^{-4}$$

Por tanto:

$f = 0,016$ , lo cual obtenemos

$$h_f = 0,016 * \frac{4}{0,439} * \frac{18,5^2}{2 * 9,81} = 2,54308[m]$$

Para el uso de la ecuación de Bernoulli se desprecia las alturas y el trabajo realizado por el fluido, debido a que la altura es igual en ambos sectores y el trabajo es mínima al ser flujo laminar estacionario.

$$\frac{382,45 + 209,63}{12,02} + \frac{18,5^2}{2 * 9,81} = \frac{2 * V_2^2}{2 * 9,81} + 2,54308$$

$$V_2 = 25,088[m/s]$$

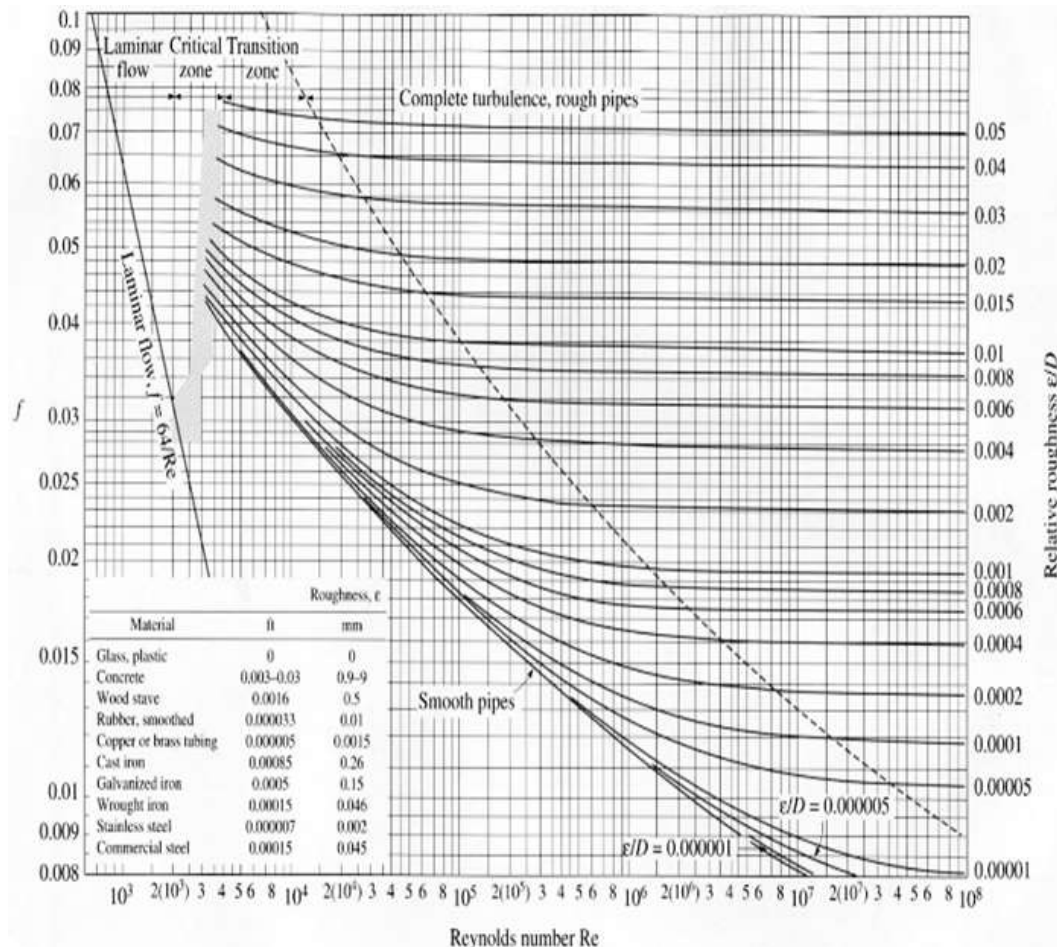


Figura 29: Diagrama de moody

### 3.3.2 Justificación de la deformación y esfuerzo equivalente de la estructura

El diseño de la estructura debe ser lo suficientemente firme para soportar el peso del aerogenerador de aproximadamente 10,5 kg más el peso de la pieza que se instala como buje adaptador. También debe soportar la fuerza de empuje del viento que actúa sobre el aerogenerador, esta fuerza se puede calcular de manera de aproximación con la siguiente expresión:

$$Fr = \frac{1}{2} \times \rho \times \pi \times v^2 \times R^2 \times C_t(\lambda)$$

Donde:

- Fr: Fuerza del viento ejercida sobre el rotor [N]
- $\rho$ : Densidad del aire en condiciones estándar (1,225) [Kg/m<sup>3</sup>]
- v: velocidad del viento
- R: radio de rotor [m]
- $C_t$ : Coeficiente de empuje en función de la velocidad específica ( $\lambda$ )

La velocidad específica “ $\lambda$ ”, es la velocidad tangencial en las aspas sobre la velocidad del viento que incide perpendicular al giro de las aspas y se puede calcular de la siguiente forma:

$$\lambda = \frac{\omega \times R}{v}$$

Donde:

- $\lambda$ : Velocidad específica
- $\omega$ : Velocidad angular del rotor [rad/s]
- R: radio del rotor [m]
- v: Velocidad del viento [m/s]

Para efectos del cálculo de la velocidad específica, se desconoce su velocidad de específica. Sin embargo, se puede considerar el aerogenerador multipalas de pequeña potencia, por lo cual su velocidad específica se encuentra en el orden de 1, por lo tanto se puede ingresar al siguiente gráfico para determinar su coeficiente de potencia:

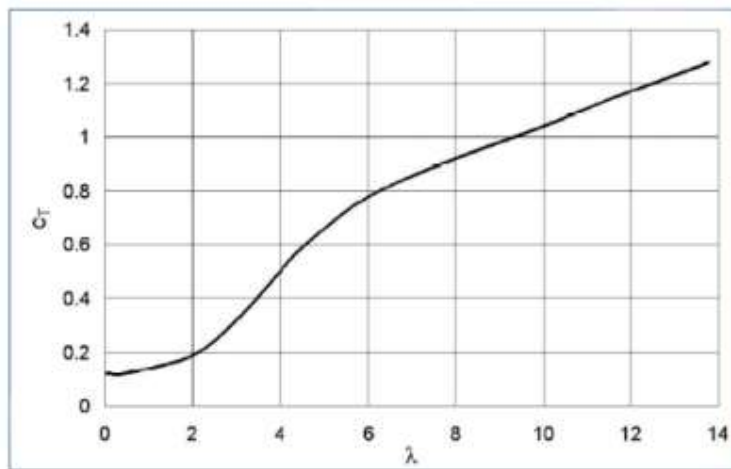


Figura 30: Gráfico del coeficiente de empuje en función de su velocidad específica

Como se aprecia en el gráfico a menor velocidad específica, menor será el coeficiente de empuje, pero a menor coeficiente de empuje, menor será la fuerza del viento sobre el rotor eólico. De este modo, se adjudicará un coeficiente de empuje de 1, debido a que el aerogenerador trabajará con distintas configuraciones de palas, incluso 1 pala, por tanto, aplicando factor de seguridad para obtener la máxima fuerza que pudiese actuar sobre el aerogenerador y teniendo en cuenta el diseño con 1 pala, el orden de la velocidad específica estaría alrededor del orden de 9.

Velocidad específica según algunos tipos de turbinas eólicas:

- Turbinas americana de bombeo 16 palas ( $\lambda \approx 1$ )
- Molino “holandés” de 4 palas ( $\lambda \approx 2$ )
- Eólica moderna rápida de 3 palas ( $\lambda = 3$  y  $5$ )
- Eólica moderna rápida de 2 palas ( $\lambda =$  entre 7 y 9 o más)

Entonces para la obtención de la fuerza máxima que actuaría sobre el aerogenerador, se considera con la velocidad máxima de diseño de 25 m/s y el radio del rotor obtenido por catálogo del aerogenerador (anexo), se obtiene:

$$Fr = \frac{1}{2} \times 1,225 \times \pi \times 25^2 \times 0,41^2 \times 1 = 202,2 \text{ [N]}$$

Teniendo esta fuerza y considerando el peso del aerogenerador incluyendo la pieza de adaptación tenemos:

$$F_{\text{peso}} = 11 \times 9,8 = 107,8 \approx 108 \text{ [N]}$$

Teniendo las fuerzas y el esquema del diseño de la estructura realizada en Inventor podemos modelar en el programa “Ansys Static Estructural”. En el siguiente diagrama se muestra la estructura modelada con sus fuerzas respectivas.

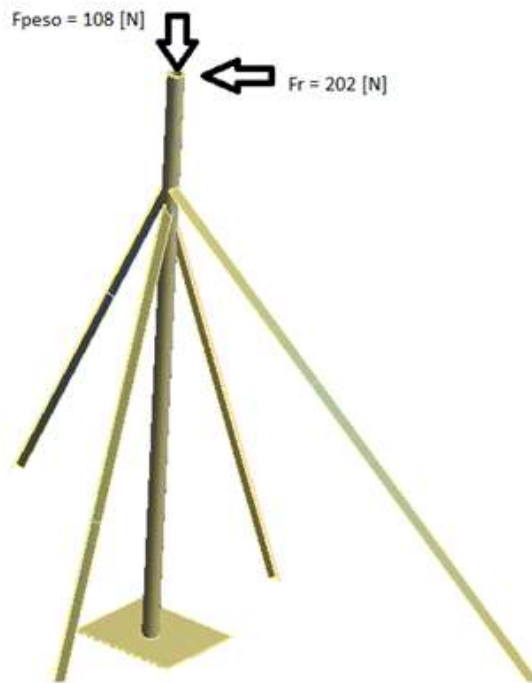


Figura 31: Esquema de las fuerzas sobre la estructura

Las fuerzas indican el peso del aerogenerador y la fuerza del viento sobre la estructura. Para determinar la posible deformación y el esfuerzo equivalente de Von mises, se tiene el siguiente diagrama modelado:

1. Análisis de la deformación total de la estructura según las fuerzas:

**A: Static Structural**  
Total Deformation  
Type: Total Deformation  
Unit: mm  
Time: 1  
30-08-2016 16:09

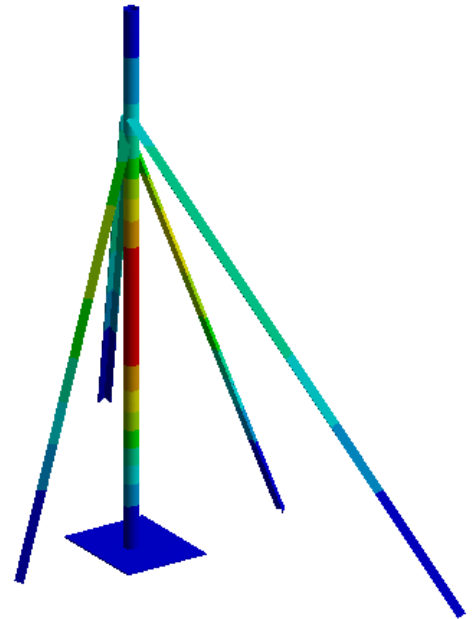
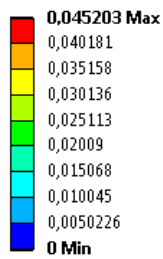


Figura 32: Resultado de la deflexión total en Ansys Static Estructural

Como se aprecia en la figura, la deformación máxima, ocurre en la parte central del tubo con una deformación máxima de 0,045203 [mm], es decir despreciable para resistir los 25 m/s que actuarán sobre el tubo. Incluso si se amplifica este resultado por 1600 veces, se puede apreciar el sentido de la orientación de la deformación.

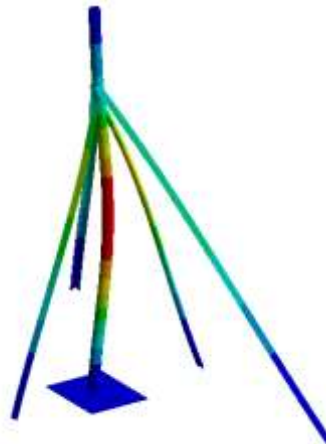


Figura 33: Resultado amplificado 1600 veces

## 2. Análisis del esfuerzo equivalente de Von Mises:

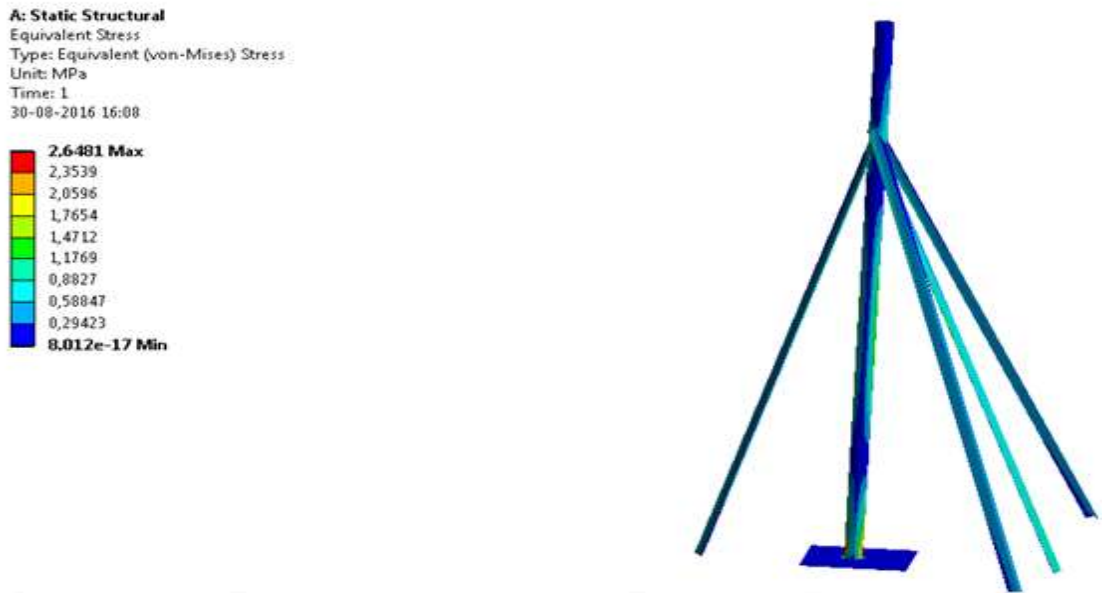


Figura 34: Resultado de Ansys Static Estructural del esfuerzo equivalente de Von Mises

Como se aprecia en la figura el esfuerzo equivalente es despreciable, pero si se aplica un zoom en la parte inferior, se percibe que es mayoritariamente donde afecta mayormente el esfuerzo según la escala de colores.

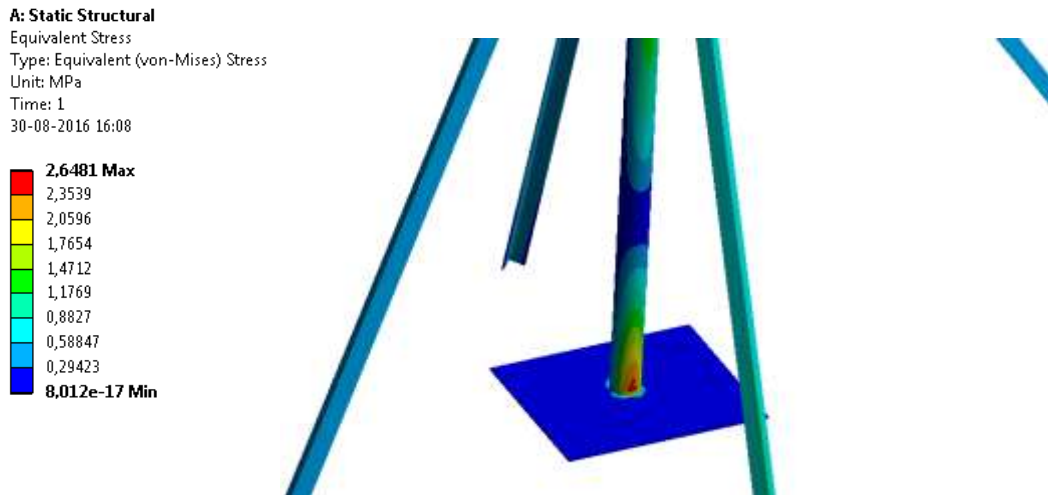


Figura 35: Zoom del resultado sobre la estructura

## 3.4 Elementos generales del Sistema

### 3.4.1 Estructura

La estructura consiste en una base de perfiles C, obtenidos del laboratorio de termo fluidos de la universidad Federico Santa María, de la cual se apoya un tubo de 44 mm de diámetro interno y 51 mm de diámetro externo, en este tubo se coloca una pieza (detalle en plano) de SAE 1045, como adaptador para sujeción del aerogenerador. Por otro lado, la estructura está cubierta por mallas metálicas por todas sus partes a excepción de la trasera, con fin de protección frente algún accidente y para homogenizar el flujo por la parte frontal, estas mallas metálicas son soldadas a los perfiles estructurales angular de 30x30x3, de material acero al carbono laminado.

El mástil del aerogenerador está centrado y sujetado por vigas de acero de aproximadamente 4,3 kg en la parte delantera y trasera, en cambio, por la parte lateral, se ubican diagonalmente desde la parte trasera dos perfiles angulares de misma medidas de la estructura con un peso aproximadamente 2,7 kg. Estas vigas o perfiles son colocados con el fin de asegurar el mástil frente a la fuerza que entrega el viento artificial.

La estructura de la reja es de 3 metros de alto por 2 metros de largo y 1 metro de ancho, que está sobre 4 ruedas con soporte que son de 10 cm de diámetro. Esta estructura se hizo con el fin de a futuro probar aerogenerador con mayor diámetro de rotación que cupiera en aquel espacio.

### 3.4.2 Ventilador

Es un ventilador radial con alabe curvo hacia adelante que puede trabajar hasta las 860 rpm.

860 RPM Ventilador					
Caudal [m <sup>3</sup> /h]	Presión Estática [mmH <sub>2</sub> O]	Presión Estática [Pa]	Potencia Activa [W]	Potencia Generada Por El Ventilador [W]	Eficiencia [%]
1472	65	641	1847	262	14
1766	63	621	1853	305	16
2825	59	574	1892	451	24
3532	56	551	1887	540	29
5003	53	519	1999	722	36
6769	52	510	2136	958	45
8829	48	466	2394	1144	48
10889	39	378	2879	1144	40
13244	22	214	3651	786	22
15598	9	86	4347	374	9

Tabla 7: Parámetros del funcionamiento del ventilador a máximas RPM, Fuente: Informe Ventiladores, UTFSM.

### 3.4.3 Aerogenerador

El aerogenerador utilizado para la evaluación del recurso eólico es un Boreas 120W, de corriente continua y 12 volts DC. Posee 6 aspas y una potencia peak de 120 W y nominal de 90 W, y recomendado para zonas de viento moderado/alto y con un ligero peso aproximadamente de 10 kilogramos. El material de las aspas es fibra de vidrio reforzado, en cambio el cuerpo es una aleación de aluminio. La velocidad de arranque es de 1,5 m/s y resiste una velocidad máxima de 45 m/s. El diámetro de rotación es 0,82 metros y posee una vida útil de 10 años.

Por otro lado, para la implementación del aerogenerador se creó una pieza adicional para ensamblar en el tubo, llamada buje sujetador, el cual tiene como función ajustar el aerogenerador al tubo y mantenerlo firme. Esta pieza esta hecho de una aleación de SAE 1045 y sus detalles se puede ver en el plano en la sección anexos.

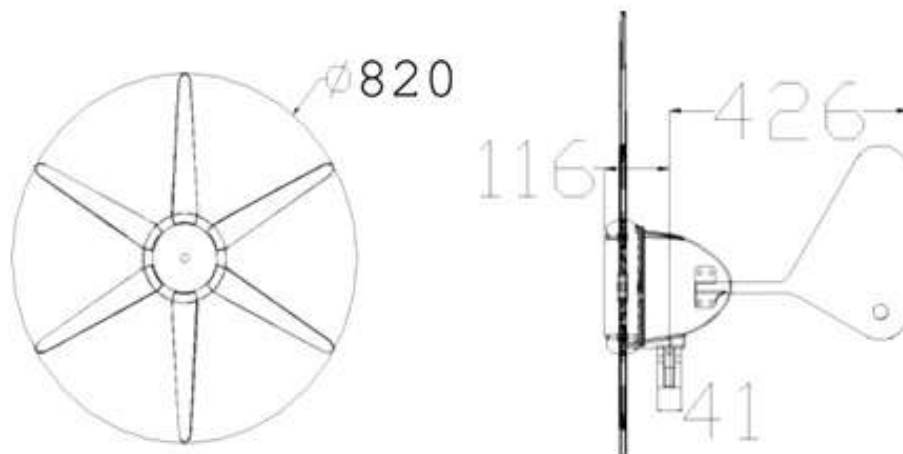


Figura 36: Plano del aerogenerador



Figura 37: Curva de potencia del aerogenerador



Figura 38: Esquema de la pieza para sujetar el aerogenerador al mástil

#### 3.4.4 Ducto

El ducto tiene dimensiones de 300 x 550 mm de sección transversal y 4000 mm de largo aproximadamente, este largo garantiza la estabilización y uniformidad del flujo. El material es acero galvanizado.

#### 3.4.5 Motor eléctrico

El motor eléctrico es de marca ASEA fabricado en Suecia, con un peso 40 kg, de Clases B, 3 fases AC, frecuencia de 50 Hz, de 380 volts conexión triangulo, de 11,7 A, y una potencia de 5 kW con velocidad máxima de 1425 rpm y un factor  $\cos \phi$  0,84.

#### 3.4.6 Variador de frecuencia

Es un SPEEDSTART II, modelo “S30V3A3N”, de corriente trifásica 380 volts, y máximo amperaje de salida 44 [A], con una potencia de 30 [hp]. Este permite variar la velocidad de giro del motor, de manera que se puede regular las rpm del ventilador a elección, desde 0 a 1428 rpm y como máximo a una frecuencia de 50 [Hz]. La conexión eléctrica al motor es tipo triangulo.

### **3.5 Componentes electrónicos del sistema**

#### 3.5.1 El Inversor

El inversor es de marca KÖNIG-SONNE, hecho en Alemania, de 800 watt DC to AC, convirtiendo 12 V a energía alterna de 220 V.

### 3.5.2 El Regulador de carga

EL regulador de carga modelo PJSC20I utilizado es un controlador de carga solar con un sistema de carga PWM (Pulse Width modulation) de alta eficiencia en la manera de cargar. Tiene un rango de carga de 20 A y trabaja con voltaje 12/24 V automático. Detalles del controlador se puede ver en la sección anexos.

### 3.5.3 La batería

El tipo de batería utilizada para el sistema de ensayo es VRLA con celdas de gel, es decir, una batería de ácido plomo regulada por válvula, que no requiere mantenimiento, es de 12 V. Esta batería tiene la ventaja de que no necesita gran ventilación. Otros detalles de la batería se encuentran en la sección anexos.

### 3.5.4 Sensores del sistema (en proceso de compra)

#### 1. Sensor de voltaje:

- Nombre: Uxcell Max 25V Voltage Detector Range 3 Terminal Sensor
- Rango de entrada a PLC: 0-5[V]
- Rango de medición proceso: 0-12 [V]
- Rango de entrada instrumento: 0-25[V]
- Alimentación: 5[V]
- Conexión de salida: Analógica
- Cantidad: 3
- Se requieren 3 acondicionadores de señal de 0-2.5V a 0-10V

#### 2. Sensor de corriente:

- Nombre: ACS712 Current Sensor Module Detector 20 Amps, Amazon
- Rango de entrada a PLC: 0-30 [mV]
- Rango de medición del proceso: 0-15 [A]

- Rango de entrada del instrumento: 0-20[A]
- Alimentación: 5[V]
- Conexión de salida: Analógica
- Cantidad: 3

3. Sensor de Velocidad:

- Nombre: Sensor de viento PCE-KWG1
- Salida Digital modulada en frecuencia
- Salida pulsos en rango de frecuencia: 0-100 [Hz]
- Rango del instrumento: 0,9-40 [m/s]
- Rango del proceso: 0-25 [m/s] = 0-90[km/h]
- Cantidad: 2

4. Sensor de velocidad de rotación:

- Nombre: Sensor Autonics Photo Sensor Model BR100-DDT-P (Rhona)
- Rango tiempo de respuesta: 3 [ms] (app 350[Hz])
- Rango del proceso: 0-1000[rpm]
- Alimentación: 12-24 [V]
- Conexión de salida: Digital
- Cantidad: 1

5. Sensor de temperatura:

- Nombre: Sensor sonda de temperatura DS18B20
- Tipo de salida: Serial protocolo one – wire
- Frecuencia de respuesta: < 10 [Hz]
- Rango del instrumento: -55 a 125 [° C]
- Rango del proceso: 0- 30 [° C]
- Alimentación: 3-5 [V]
- Conexión de salida: Digital
- Cantidad: 1
- Requiere adaptador de TTL a RS232/RS485

6. Sensor de presión: Necesario para la medición de la presión del aire en condiciones estándar, para luego obtener la densidad a la cual se está trabajando. Aún sin definir.

### **3.6 Sistema de Mando, control y adquisición de datos**

El sistema de mando, control y adquisición de datos se basa en un controlador lógico programable (PLC) de marca Schneider Electric, modelo TM221CE24T, junto con el software “SoMachine basic”. Este programa trabaja tomando la lectura de todos los tipos de sensores: presión, temperatura, velocidad de giro del aerogenerador, velocidad del viento, corriente, voltaje y frecuencia del variador y los controla a petición gracias al software. El PLC cuenta con 14 entradas digitales, incluyendo 4 entradas rápidas, también tiene dos entradas análogas y una conexión Ethernet, para regular todo desde un computador.

Sin embargo, debido a la cantidad de sensores con salidas analógicas y a la entrada analógica que posee el variador de frecuencia, es que se obtuvo un módulo adicional TM3AM6 de Schneider Electric, que contiene 4 entradas y 2 salidas analógicas. Con esto se podrá controlar el variador de frecuencia desde un pc incluso lejos de la zona de operación, bastando solo que se conecte a la IP mediante la conexión de Ethernet del PLC.

El sistema contempla 3 sensores de corrientes y 3 de voltajes, a su vez un sensor de presión y otro de temperatura para medir las condiciones estándar del laboratorio, para así obtener la densidad del aire en la zona.

Por otra parte, para la medición de velocidad del aire, se ubicará dos sensores de anemómetro de copa, para medir la velocidad a la salida del ducto, uno antes de que tenga contacto con el aerogenerador y el otro se ubicará después del aerogenerador para lograr determinar la velocidad del aire una vez que ya pasó por el aerogenerador.

### 3.6.1 Circuito de control

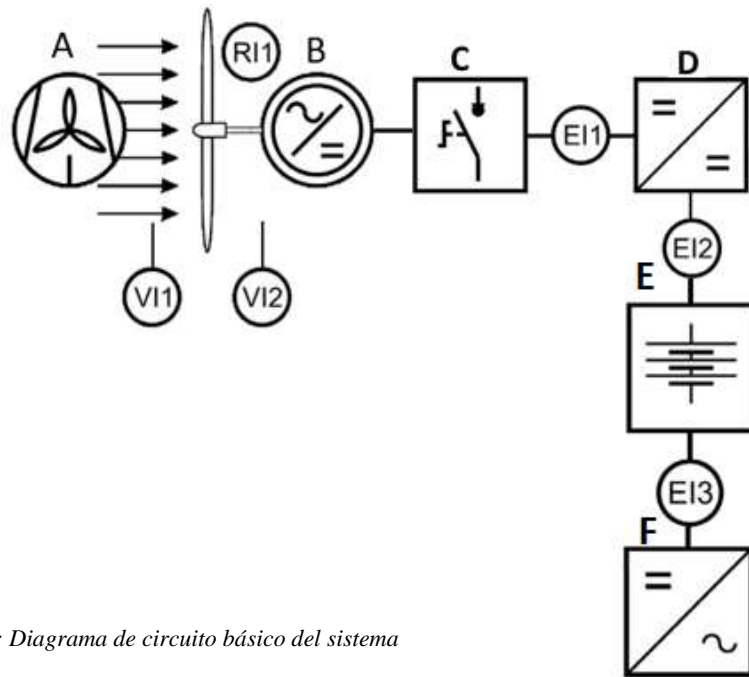


Figura 39: Diagrama de circuito básico del sistema

Componentes del circuito:

- A. Ventilador
- B. Aerogenerador
- C. Interruptor de Parada
- D. Controlador de Carga
- E. Batería o Acumulador
- F. Inversor

Puntos de medición:

1. E|1, E|2, E|3: Corriente y voltaje, en los puntos del esquema.
2. V|1 y V|2: Velocidad del viento antes y después del aerogenerador.
3. R|1: Velocidad de Rotación del aerogenerador.
4. T|1 y P|1: Sensores de Presión y temperatura de las condiciones ambientes (no colocados en el diagrama).

## 4 Planificación y Prueba de Funcionamiento

---

### 4.1 Programación de los ensayos

El Sistema de ensayos de turbinas eólicas (SETE), puede realizar variedades de ensayos con distintos propósitos, pero principalmente los siguientes ensayos o prácticas son los de mayor consideración:

1. Medición de la Potencia aprovechada por el aerogenerador.
2. Medición de la Potencia disponible para el aerogenerador.
3. Determinación del coeficiente de potencia del aerogenerador.
4. Estudio del funcionamiento del aerogenerador utilizando distintas configuración de palas (1 pala, 2 palas, 3 palas, etc.)

#### 4.1.1 Primer ensayo: Medición de la potencia aprovechada por el aerogenerador

Este ensayo consiste en obtener la potencia que el aerogenerador aprovecha de la potencia disponible entregada por el viento, es decir, la potencia que el aerogenerador logra convertir en energía eléctrica. Esta potencia se ve influenciada por el coeficiente de potencia del aerogenerador, que refleja el rendimiento de un aerogenerador (bajo límite de betz) y las pérdidas de rendimiento del sistema que a su vez son la multiplicación de distintos componentes del sistema (engranaje, alternador, etc).

La potencia que el aerogenerador aprovecha o también conocida como la potencia de salida del aerogenerador, se puede calcular determinando la tensión medida en voltios y su corriente medida en amperaje.

$$P_e = V \times I$$

Donde:

- Pe: Potencia exit (potencia de salida) [W]
- V: Tensión [v]
- I: Corriente [A]

Estos datos son tomados por los sensores de corriente y voltaje, a distintas velocidades del viento que entrega el ventilador, y está regulado por el variador de frecuencia. Una vez tabulados los datos, se logra obtener la curva de potencia de un aerogenerador, la que se puede comparar con la del fabricante.

#### 4.1.2 Segundo ensayo: Medición de la potencia disponible para el aerogenerador

Este ensayo consiste en la medición de la potencia disponible que el aerogenerador podría capturar, sin embargo, como se sabe que por el límite de Betz, esta energía jamás se podría capturar e incluso estaría por debajo del 59,3%, y la eficiencia del aerogenerador (energía que podría capturar) dependería del coeficiente de potencia.

La medición de la potencia disponible se puede obtener gracias a las mediciones estándar de las condiciones del aire, registrando su presión y temperatura gracias a los sensores correspondientes. Con esto obtenemos la densidad del aire a variadas velocidades y mediante la siguiente fórmula se puede calcular la potencia que se encuentra disponible:

$$Pd = \frac{1}{2} \times \rho \times A \times v^3$$

Donde:

- Pd: potencia disponible en el aerogenerador [W]
- $\rho$ : Densidad del aire [Kg/m<sup>3</sup>]

- A: Área de barrido o rotación del aerogenerador [m<sup>2</sup>]
- v: Velocidad del aire [m/s]

Para el cálculo de la densidad del aire en el laboratorio de termofluidos se obtiene mediante la siguiente fórmula:

$$\rho = \frac{P_0}{RT} * e^{(g*z/RT)}$$

Donde:

- P<sub>0</sub>: Presión calculará mediante el sensor (Pa)
- R: Constante ideal de los gases = 286,9 (J/kg\*K)
- Z: Altura sobre el nivel del mar (se puede despreciar) (m)
- T: Temperatura calculará mediante sensor (K)
- g : Aceleración de gravedad = 9.8 (m/s<sup>2</sup>)

#### 4.1.3 Tercer ensayo: Determinación del coeficiente de Potencia.

El ensayo que determina el coeficiente de potencia son los dos ensayos anteriores a diferentes velocidades, de esta manera, obtendremos varios datos que podría generar la curva haciendo referencia al coeficiente de potencia con la siguiente formula:

$$Cp = \frac{Pe}{Pd}$$

Donde:

- Cp: Coeficiente de potencia [-]
- Pe: Potencia de salida [W]

- Pd: Potencia disponible por el aerogenerador [W]

Para este ensayo es necesario recoger datos, de temperatura, presión, tensión y corriente para distintas velocidades. Es decir, tomar en cuentas los dos ensayos anteriores en distintos puntos de medición donde la frecuencia y velocidad es la misma.

#### 4.1.4 Cuarto ensayo: Prueba de funcionamiento utilizando distintita configuración.

En este ensayo se realizan las mediciones anteriores, variando la configuración de palas con respecto a la cantidad colocadas en el aerogenerador. Primeramente haciendo ensayos y obteniendo las distintas variables que se midieron en los ensayos anteriores y calculando su velocidad específica para cada caso, es decir, el ensayo se realizaran mediciones obteniendo el coeficiente de potencia con distintas cantidad de palas, con 6 palas, luego 4 palas, 3 palas y finamente 2 palas, de esa manera se calculará su velocidad específica, la cual ayudará a clasificar el funcionamiento del aerogenerador. La velocidad específica permite catalogar los rotores eólicos entre rápidos y lentos con respecto al espaciado de palas, a mayor velocidad específica nominal del rotor mayor será el espacio entre palas. La velocidad específica se puede calcular con la siguiente fórmula:

$$\lambda_0 = \frac{U_0}{v}$$

Donde:

- $\lambda_0$ : Velocidad específica de un rotor eólico [-]
- $U_0$ : Velocidad en las puntas de las palas [m/s]
- $v$ : Velocidad del aire delante del rotor [m/s]

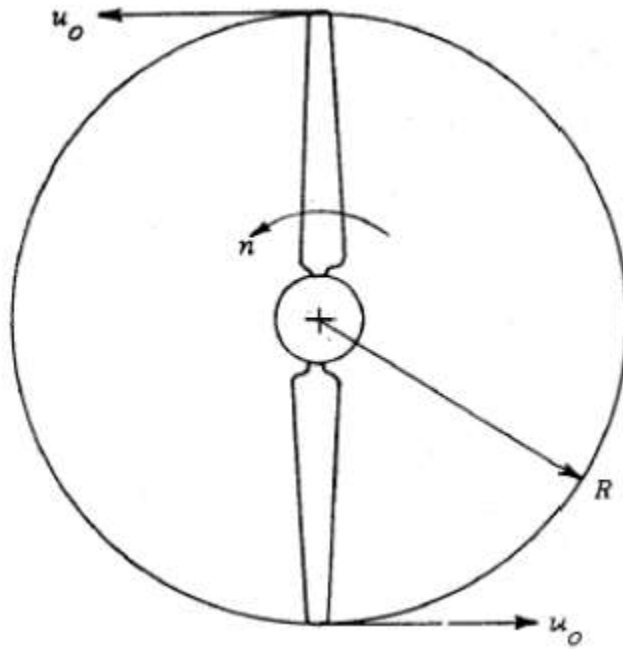


Figura 40: Diagrama explicativo de la velocidad en las puntas del aerogenerador.

También se puede calcular de la siguiente manera:

$$\lambda_0 = \frac{\pi * D * n}{60v}$$

Donde:

- $\lambda_0$ : Velocidad específica de un rotor eólico [-]
- D: diámetro del rotor eólico (rotación incluidas las palas) [m]
- n: Velocidad de giro [rpm]
- v: Velocidad del viento [m/s]

El objetivo de realizar este ensayo es encontrar el resultado óptimo del coeficiente de potencia con respecto a la configuración de palas con respecto a la velocidad específica, como en el siguiente gráfico:

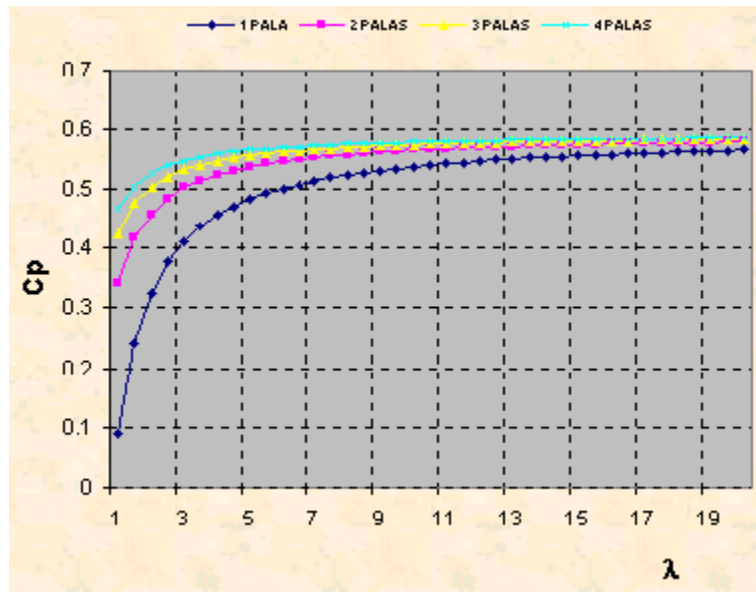


Figura 41: Ejemplo de gráfico que se quiere obtener.

## 4.2 Procedimiento de las mediciones de los ensayos

En un comienzo se quiso tomar las mediciones mediante distintos sensores, y que estos arrojaran los datos al software del PLC, de manera de controlar todo mediante un computador y tener el sistema automatizado, accediendo incluso a regular la velocidad de giro del aerogenerador o la velocidad de salida del ducto de manera de controlar la velocidad y lograr una curva de potencia de mayor exactitud. Pero por problemas de tiempo y no contar con los sensores propuestos en el tiempo de desarrollo del proyecto, se tomó la decisión de hacer las pruebas de funcionamiento de forma manual y con instrumentación de calidad y portátil.

Por otra parte, los sensores seleccionados definidos en este trabajo de título, son los que se instalarán a futuro para cumplir la idea de automatización junto con el circuito propuesto en el capítulo anterior.

Para llevar a cabalidad los cuatro ensayos propuesto y obtener las distintas variables para analizar los resultados y curvas posteriores, se ha establecido hacer cuatro pruebas de funcionamiento que determinen las variables de:

1. Velocidad del viento próxima al contacto con el aerogenerador, según distintos puntos.
2. Tensión entregada por el aerogenerador.
3. Intensidad de corriente entregada por el aerogenerador.
4. Velocidad de giro del aerogenerador.

Teniendo estas cuatro variables a medir, para la primera prueba de funcionamiento donde el aerogenerador experimental tenga sus 6 palas colocadas, se repetirá el procedimiento de medición pero con el aerogenerador con 4 palas colocadas, luego 3 palas y finalmente 2 palas.

El rango de medición comienza variando la frecuencia manualmente desde 5 Hz hasta 45 Hz, lo cual entrega un rango de velocidad amplio para generar los resultados esperados. En este rango se tomarán 12 puntos de mediciones.

Se tomará una muestra de velocidades en distintas posiciones frente al aerogenerador, para ver el comportamiento del viento, y la velocidad que recibe el generador eólico, reconociendo que la distancia de la salida del ducto al centro del aerogenerador es de 50 cm, por tanto las muestras son las siguientes:

- V1: Velocidad en el centro del aerogenerador (a 50 cm de la salida del ducto).
- V2: velocidad bajo el centro aproximadamente a 26 cm desde el centro (a media aspa).
- V3: Velocidad arriba del centro aproximadamente a 26 cm desde el centro.
- V4: Velocidad a la derecha del centro aproximadamente a 26 cm desde el centro
- V5: Velocidad a la izquierda del centro aproximadamente a 26 cm desde el centro.

En la siguiente figura se aclara mediante un dibujo:

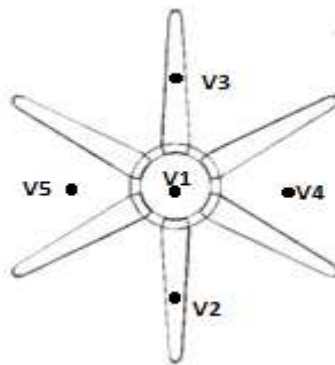


Figura 42: Muestreo de velocidades

### 4.3 Realización de las mediciones

Para la realización de las pruebas de funcionamiento, se conectó el aerogenerador al regulador de carga, luego a la batería y finalmente al inversor seleccionados anteriormente, luego a este se le conectó un banco de carga con distintas líneas de ampolletas de distintos consumo para generar una carga y medir la intensidad de corriente.



Figura 43: Banco de carga utilizado

#### 4.3.1 Instrumentación de medición

##### 1. Anemómetro de hilo caliente digital VelociCal Plus TSI:

Rango: 0 – 50 m/s

Exactitud: 0,015 m/s

Resolución 0,01 m/s



Figura 44: Anemómetro Utilizado

##### 2. Tacómetro digital TACH20 AMPROBE

Rango: +- 0,02% de lectura, +- 1 dígito.

Exactitud: 1.....99999 min

Distancia de sensor: máx. 600 mm

Modo de lectura: Mecánico u Óptico.



Figura 45: Tacómetro Utilizado

##### 3. Multímetro ISO-TECH ICM 36II

Lectura: CC, CA, VC, VA, Continuidad y Resistencia

Rango Voltaje: 400 mv – 600 v

Resolución Voltaje VC: 100  $\mu$ v

Exactitud Voltaje VC: +- 0,07%, 2 dígitos

Rango Amperaje: [0 – 40] A, [40 – 400] A, [400 – 600] A

Resolución CC: [0,1] A – [0,1] A – [1] A

Exactitud CC: +- 1,5% +10 dígitos



Figura 46: Multímetro Utilizado

#### 4.3.2 Datos obtenidos

Para las primeras mediciones con el aerogenerador con su totalidad de las aspas, los datos tomados fueron exitosos, es decir, un comportamiento coherente con respecto a los entregados por el fabricante. Sin embargo, para las primeras mediciones al estar conectado con la batería y el regulador de carga, el voltaje que se medía era constante alrededor de 12 v. Esto indicaba coeficientes de potencia sobre estimado, ya que el voltaje no era el real. Debido a este motivo es que se utilizó otro banco de carga que se pudo conectar directo al aerogenerador para la toma de las primeras pruebas y así lograr la variación del voltaje en las primeras mediciones donde potencia es baja, en consecuencia de que su voltaje y corriente también lo son.



*Figura 47: banco de carga para las primeras mediciones*

En la figura anterior se muestra el banco de carga pequeño utilizado para la medición de la variación del voltaje cuando la potencia es baja, una vez que el voltaje se estabiliza y logra alrededor de 12 voltios parejo, se cambió al otro banco de carga mencionado anteriormente producto de que contiene mayor carga, volviendo al sistema regular de aerogenerador – regulador de carga – batería – inversor – banco de carga.

Finalmente se logró la totalidad de los datos, teniendo todas las variables propuestas para obtener los resultados deseados con 6 aspas.

Datos de la muestra de velocidades según la Figura 42:

Frecuencia (Hz)	V1(m/s)	V2(m/s)	V3(m/s)	V4(m/s)	V5(m/s)
5	0,5	0,9	0,8	2.1	2.4
10	1,4	2,4	2,2	4.4	4.9
13	1,8	2,7	4,3	5,5	6,5
16	3	4	5.4	6.5	7,3
19	4,1	6	6,4	8,3	9,5
22	5,5	6,7	7,4	8,9	10
25	6	9,4	9,5	11	12,4
28	7	11,2	9,8	11,2	13,4
30	8,2	13,8	12	13	15,5
35	10	14	11,4	16	17
40	12	16,5	14,5	18,3	20,2
45	14	18	17	22	24

Tabla 8: Velocidades obtenidas según diagrama de Figura 42

En la tabla anterior se marca en rojo la frecuencia 13, debido a que es donde el aerogenerador comienza a girar. Como se aprecia, las velocidades obtenidas varían en demasía según sea la posición de medición.

A continuación en la siguiente tabla se muestra los datos faltantes

f (Hz)	n (rpm)	I (A)	V (v)	Pe (W)	Pd (W)	Cp	$\lambda$
5	0	0	0	0,0	0,0	0%	0,0
10	0	0	0	0,0	0,9	0%	0,0
13	261	0,5	1	0,5	1,9	27%	6,2
16	356	0,8	4,8	3,8	8,7	44%	5,1
19	432	1	10,3	10,3	22,3	46%	4,5
22	500	2,1	10,6	22,3	53,8	41%	3,9
25	516	2,8	10,1	28,3	77,1	37%	3,6
28	548	3,1	12,1	37,5	110,9	34%	3,4
30	582	3,9	12,7	49,5	153,4	32%	3,2
35	727	5,2	12,17	63,3	323,3	20%	3,1
40	852	6,8	11,6	78,9	558,7	14%	3,0
45	930	9,8	12,4	121,5	887,1	14%	2,9

Tabla 9: Datos obtenidos en prueba de funcionamiento de 6 aspas.

Para el cálculo de la densidad y así obtener la potencia disponible se consideró la densidad para condiciones estándar de  $1,225 \text{ (kg/m}^3\text{)}$ , ya que los sensores de temperatura y presión aún no fueron comprados en el plazo del proyecto, aun así esto se asemeja bastante al valor real. En rojo se muestra los datos obtenidos cuando el aerogenerador comienza a girar.

A pesar que la prueba de funcionamiento con 6 aspas se pudo producir con éxito, lamentablemente para las pruebas de funcionamiento con 4 aspas y 3 aspas el aerogenerador entregaba un intensidad de corriente realmente baja, menor a 1 amperio, incluso con velocidades altas y revoluciones por minuto también altas. A medida que menos aspas se utilizaban en el aerogenerador aún menor era su corriente, no generando potencia a pesar de existir cargas bajas o altas, incluso llevando el aerogenerador a velocidades de viento a frecuencias de 35 a 40 Hz (casi el límite del variador de frecuencia). Esto llevó a una conclusión inmediata, de que el aerogenerador no está hecho para generar electricidad con menos de 6 aspas, a pesar que sus paletas son desmontables.

Por consiguiente los resultados esperados de comparación de coeficiente de potencia con respecto a su velocidad específica solo se puede lograr con aerogenerador distintos y no con la misma turbina eólica, variando sus cantidad de aspas.

## **4.4 Análisis de las mediciones y Resultados**

### **4.4.1 Análisis del comportamiento de velocidad sobre el aerogenerador**

Para analizar el comportamiento del viento que incide sobre el aerogenerador es necesario ver gráficamente cómo se comporta la velocidad cercana al aerogenerador en distintas posiciones, ya que el viento al salir del ducto se dispersa en distinto sentido y choca con el centro del aerogenerador donde la velocidad es considerablemente más baja.

Para analizar adecuadamente y ver las diferencias considerables, se establece la velocidad según posiciones, siendo las posiciones A, B, C, D, E, las 5 posiciones tomadas en la muestra de velocidades.

Donde:

- Posición A: Esta se ubica en el eje horizontal, paralelo al suelo, a 26 cm desde el centro del aerogenerador mirado desde el frente, en el lado izquierdo, corresponde a V5.
- Posición B: Esta se ubica en el eje vertical, perpendicular al suelo, a 26 cm arriba desde el centro del aerogenerador, mirado desde el frente, corresponde a V3.
- Posición C: Esta se ubica en el centro del aerogenerador, corresponde a V1.
- Posición D: Esta se ubica en el eje vertical, perpendicular al suelo, a 26 cm abajo desde el centro del aerogenerador, mirado desde el frente, corresponde a V2.
- Posición E: Esta se ubica en el eje horizontal, paralelo al suelo, a 26 cm a la derecha desde el centro del aerogenerador, mirado desde el frente, corresponde a V4.

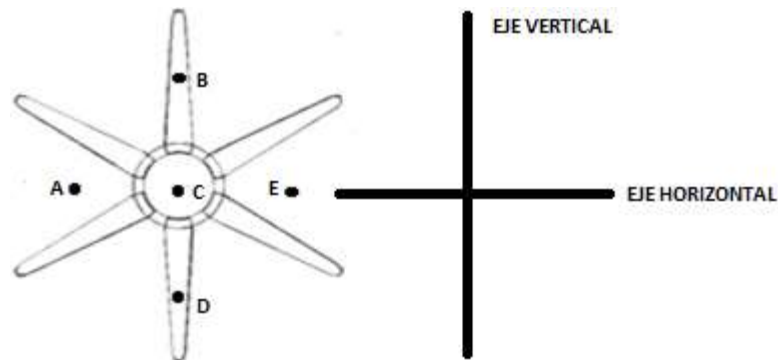


Figura 48: Diagrama de posiciones

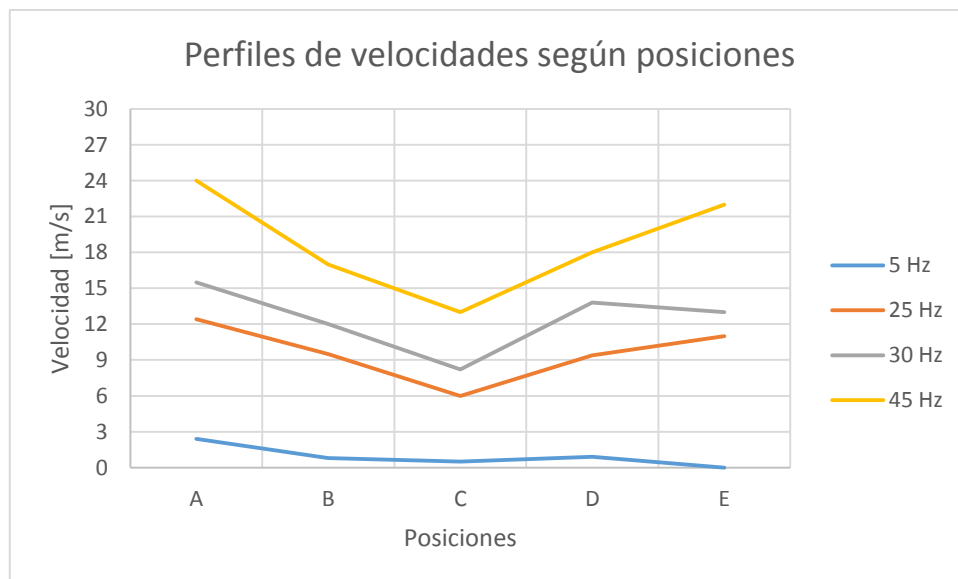


Figura 49: Gráfico del comportamiento del viento que incide en el aerogenerador en distintas frecuencias

Al analizar el gráfico anterior se puede apreciar que a medida que la frecuencia es mayor y así a su vez la velocidad incidente en las distintas posiciones, como también a mayores velocidades del viento, mayor es el giro del aerogenerador, sin embargo, las velocidades según las distintas posiciones son dispares a medida que las velocidades son mayores. Esto implica que se debe realizar una mejor canalización del viento, de manera de emparejar las velocidades en las distintas posiciones.

Por otro lado, es necesario considerar que las mediciones realizadas fueron tomadas por instrumentos que son manejados por humanos, y que se tuvo que mantener las posiciones a lo largo de las mediciones aproximadamente en el mismo sector, existiendo un claro error humano. Por consiguiente, es necesario y más exacto realizar aquellas mediciones con sensores que estén fijos para que los resultados sean consecuentes con las posiciones seleccionadas.

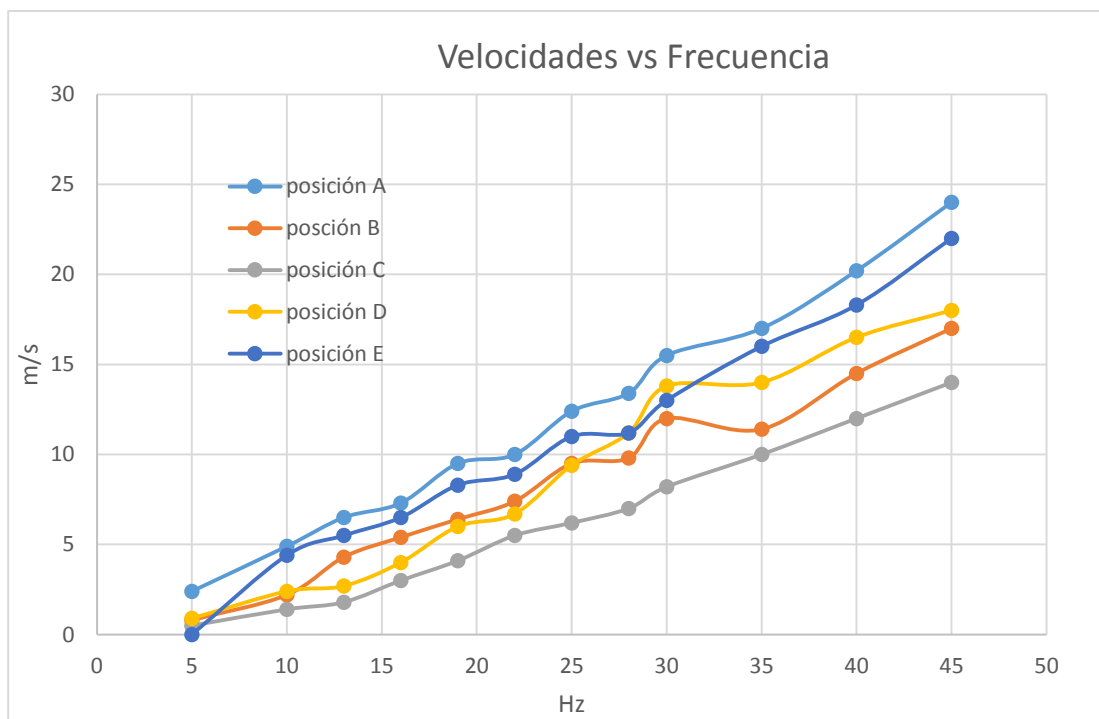


Figura 50: Gráfico de velocidades vs frecuencia según posiciones.

Claramente el gráfico que la posición central, es la que recibe menor velocidad, y siendo el sector derecho mirado desde el frente del aerogenerador el que presenta las mayores velocidades. El gráfico representa una regresión lineal.

#### 4.4.2 Análisis de la Potencia disponible

Como se dijo anteriormente, para la realización de la curva de potencia disponible se consideró la densidad del aire estándar, es decir,  $1,255 \text{ (kg/m}^3\text{)}$ , y tomando en cuenta la velocidad que incide en el centro del generador eólico (posición C) se obtuvo:

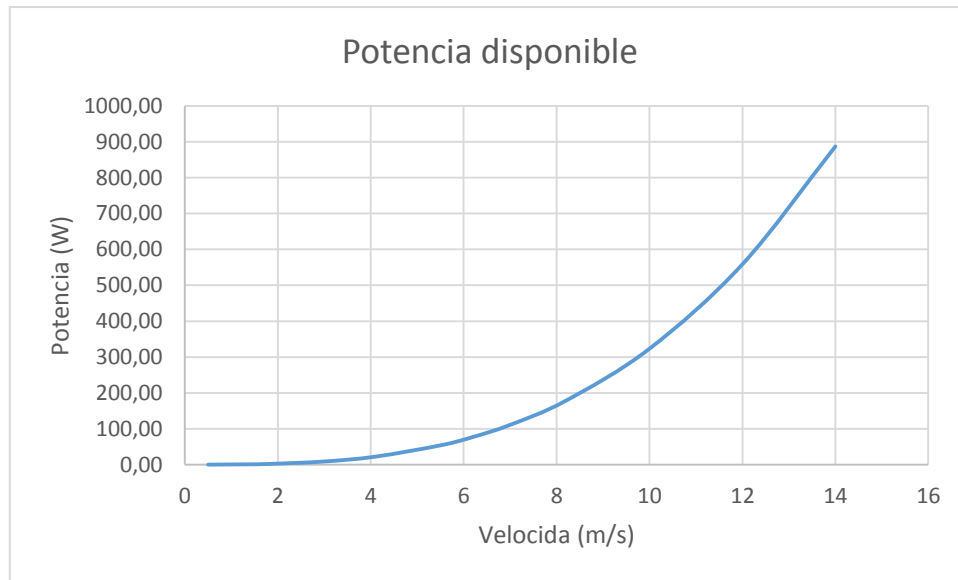
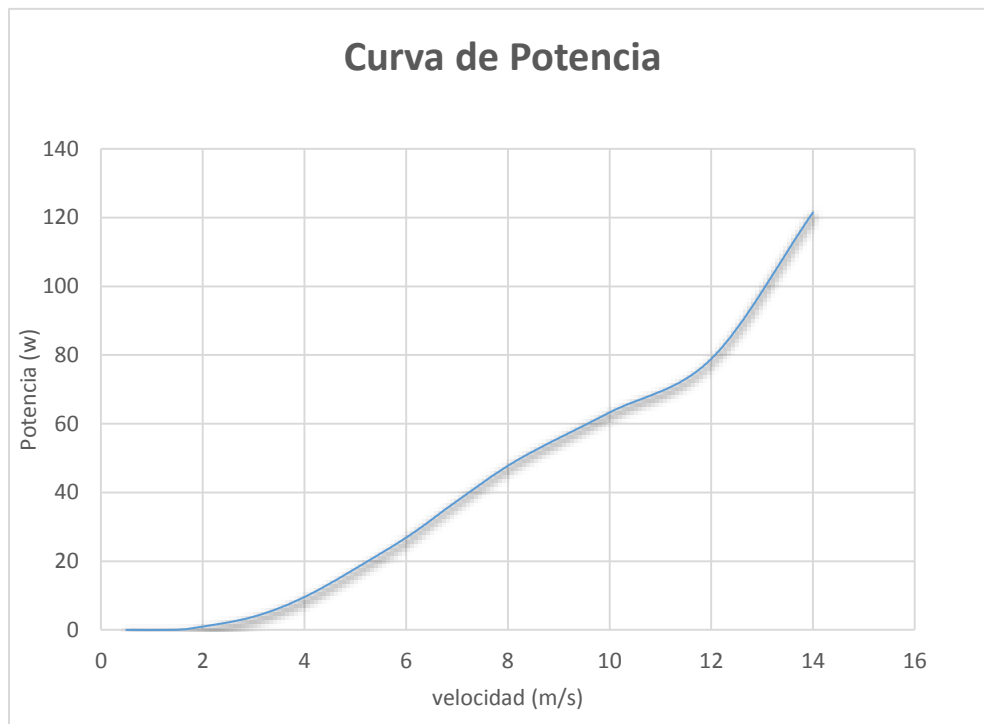


Figura 51: Curva de Potencia disponible

Esta curva muestra la potencia disponible que entrega el viento en el área del aerogenerador, es decir, sería la curva de potencia del aerogenerador si se captara el 100% de la potencia. Lo cual por el límite de Betz se sabe que es imposible, y que incluso la curva de potencia está por debajo del límite. Esta curva representa comportamiento cúbico.

#### 4.4.3 Análisis de la curva de potencia

Con las mediciones tomadas se puede realizar la curva de potencia del aerogenerador, la que se realiza con el viento que incide en el centro del aerogenerador. No obstante se puede hacer una comparación de la curva de potencia con las demás velocidades tomadas en las distintas posiciones aunque no es recomendable, ya que la curva de potencia por el fabricante es medida en el centro, con la cual se quiere comparar.



*Figura 52: Curva de potencia obtenida empíricamente*

Es necesario destacar que la velocidad medida se muestra muy inestable, variando de forma significativa en el mismo punto de medición, en este caso en el centro del aerogenerador, con el cual se generó la curva. Estas mediciones de velocidad, son velocidades media en aquella posición (posición C). Sin embargo, refleja una curva semejante a la entregada por el fabricante.

En esta curva se aprecia que en los 14 m/s ya alcanza los 120 W, que es por catálogo la mayor potencia que puede entregar el generador eólico, pero se llevó el aerogenerador a sus límites alcanzando hasta los 140 W. Esto es producto de que la curva hecha por el fabricante es generalmente de carácter conservador, aun así, se aprecia en la curva de potencia por el fabricante la máxima potencia.

El fabricante recomienda una velocidad óptima de 12 m/s, generando 90 W nominal. Esta conclusión se verifica con la curva del coeficiente de potencia, donde qué velocidad entrega el mayor porcentaje de captación.

Si se revisa la curva entregada por catálogo, se aprecia que alcanza los 120 W con 15 m/s, y los 100 W con 13 m/s. En el caso empírico los 100 W se logran obtener con 12 m/s, no muy distinto a lo observado.

Debido a la muestra de velocidades tomadas podemos generar distintas curvas de potencias según posiciones, ya que considerablemente se alcanzó velocidades incidentes en las distintas posiciones de mayor magnitud, es necesario aclarar que esto no es recomendable ya que la potencia es la misma para todos los casos pero difieren en la velocidad, siendo estas velocidades en los distintos puntos de medición datos no fidedignos porque no existe un punto en común claro para evaluar el comportamiento de la curva.

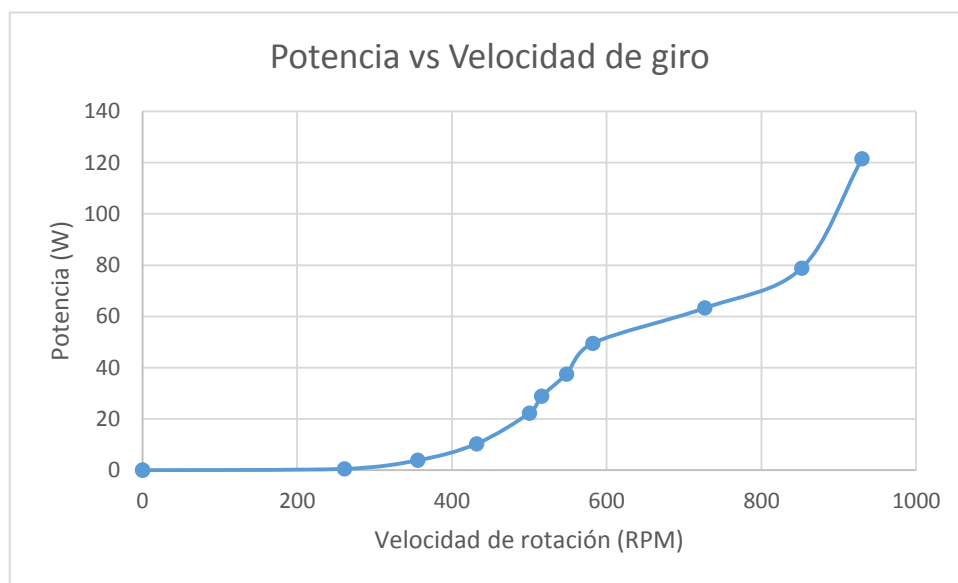


Figura 53: comportamiento de la Potencia en función de la velocidad de rotación

En la figura se aprecia que el aerogenerador una vez que rompe la inercia, comienza a girar con una velocidad de rotación baja pero superior a las 200 rpm.

Una vez que el aerogenerador alcanza las 600 rpm, su generación de electricidad muestra un aspecto lineal y no cuadrático o exponencial como se aprecia en revoluciones más bajas.

#### 4.4.4 Análisis del Coeficiente de Potencia

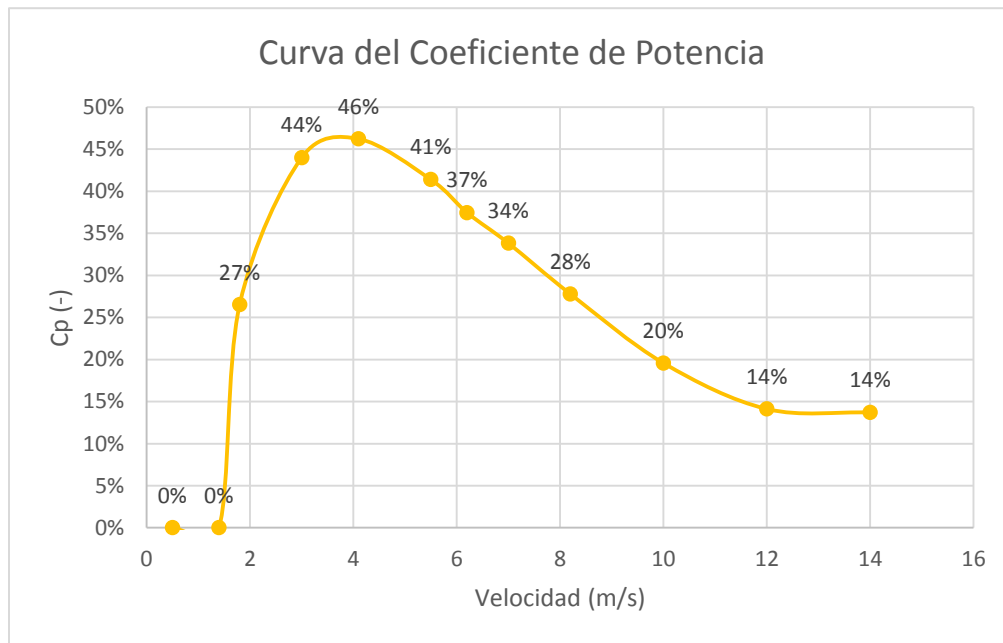


Figura 54: Curva de Potencia del aerogenerador

El fabricante no entregó la curva del coeficiente de potencia, por tanto era fundamental obtener esta curva mediante las mediciones. Se aprecia que la mayor captación del viento del aerogenerador ocurre alrededor de los 4 m/s, donde alcanza un coeficiente de 46%, lo cual es un alto porcentaje y muestra la mayor eficiencia del generador eólico.

Por otra parte a velocidades de 10 m/s o mayores a esta, la eficiencia se pierde considerablemente, no recomendando utilizar el aerogenerador a esas velocidades. Si se recomienda obtener una nueva curva de potencia, mediante el sistema automatizado y así verificar la velocidad óptima, donde se logre obtener el mayor porcentaje de eficiencia de una manera más exacta.

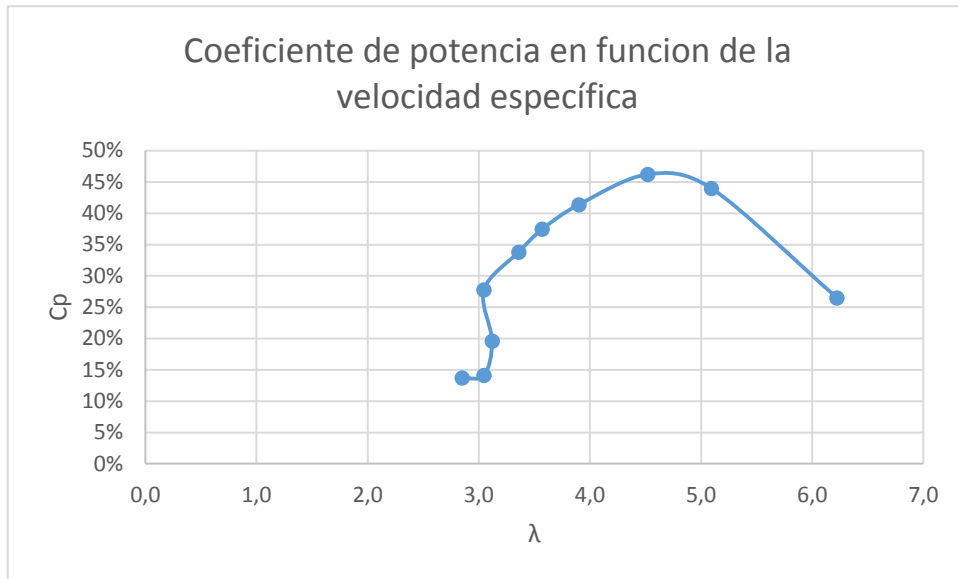


Figura 55: Gráfico coeficiente de potencia en función de la velocidad específica.

Como se aprecia en el gráfico anterior, hay datos que están dispersos, pero sin menor duda, sigue el comportamiento adecuado, si se compara la curva del coeficiente de potencia en función de la velocidad específica, con otros tipos de rotores ya se vertical horizontal, la curva refleja un rendimiento bastante coherente.

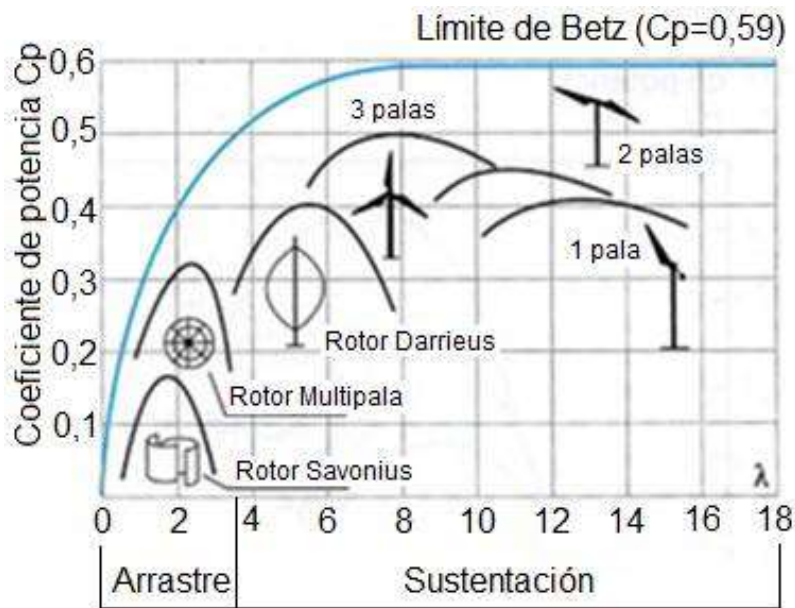


Figura 56: comparación de turbinas eólicas respecto al coeficiente de potencia en función de su velocidad específica

Para analizar en su totalidad el coeficiente de potencia, se muestra en el siguiente gráfico el comportamiento en función de las rpm:

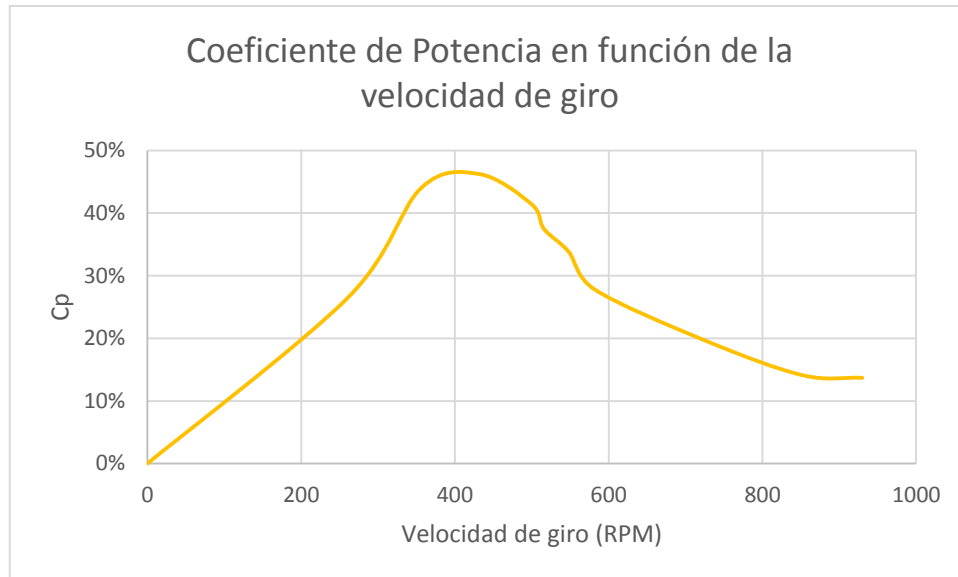


Figura 57: Gráfico del coeficiente de potencia en función de las RPM.

Como se aprecia en el gráfico, la mayor captación de potencia del viento, es decir, donde la eficiencia de la máquina es mayor, entregando un 46%, se alcanza en el orden de las 400 RPM, dato importante a considerar, debido a que si una quiere cerciorarse de la eficiencia, basta con medir la velocidad de rotación, que en el caso que arroje una velocidad muy alta, indica que la eficiencia es baja.

Al obtener el punto óptimo de velocidad de giro, se logra saber su máxima eficiencia, ya que permite al aerogenerador girar de manera constante mediante un proceso de automatización, de manera de evitar vibraciones del equipo o sistema, previniendo someter al aerogenerador a cargas indeseadas, claramente es un aspecto que en la actualidad es utilizado proporcionando información al sistema de control del equipo, y llevar a la turbina eólica a sus límites de trabajo.

#### 4.4.5 Análisis de los elementos del sistema

Es necesario analizar el funcionamiento del variador, ventilador y la velocidad de salida del ducto, para ver los efectos que pueden causar al aerogenerador que se quiera ensayar. Para esto se obtuvo distintas velocidades de salida apenas finaliza el ducto, como también se obtuvo la velocidad de rotación del eje del ventilador a variando la frecuencia mediante el variador.

Velocidad de Salida [m/s]	Velocidad Rotación Ventilador [RPM]	Variador [Hz]
2,7	91,2	5
6,3	189,1	10
9,25	274,1	15
12,2	357,9	20
15	431,9	25
19	533,1	30
22,7	616,4	35
24,5	699,7	40
28,4	754,9	45
33	821,2	48

Tabla 10: Tabla de datos del comportamiento del sistema general

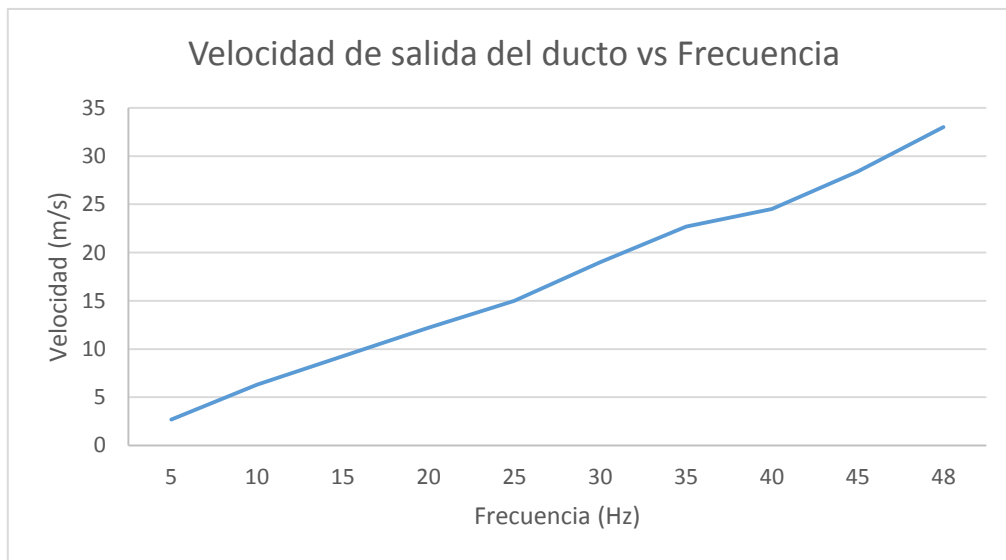


Figura 58: Gráfico del comportamiento de la velocidad de salida del ducto.

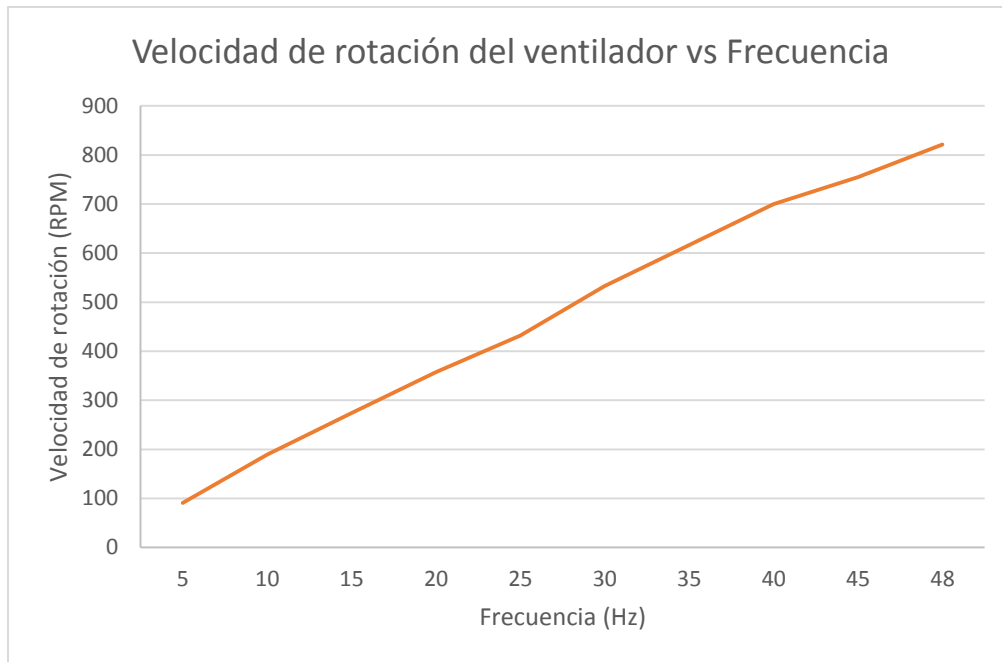


Figura 59: Comportamiento del ventilador en función de la frecuencia.

En la figura 58 se aprecia el variador a máxima frecuencia que logra entregar hasta 33 m/s en la finalización del ducto, lo cual el rango es bastante amplio para realizar las mediciones de diferentes ensayos. Comparando con los datos de la velocidad incidente sobre el centro del aerogenerador, existe una gran pérdida de velocidad, lo que limita el rango de medición para la turbina eólica. El gráfico muestra una tendencia lineal.

En la figura 59 se aprecia las altas revoluciones que alcanza el giro del ventilador, sin embargo a pesar de que se llevó a frecuencias extrema, presenta un buen estado, un balanceo adecuado y bajas vibraciones. También se observa que la velocidad de rotación tiene una tendencia lineal en función de la frecuencia.

## 5 Conclusiones y Propuestas de mejoras a futuro

Se ha construido el Sistema de ensayos para turbinas eólicas de pequeña potencia con un soporte móvil con frenos y gran estabilidad, teniendo en cuenta la sobredimensión de la estructura que sujeta el aerogenerador de tal manera que sirva para distintos tamaños de turbinas eólicas pequeñas.

Es necesario destacar que el principal elemento de control, es decir, el variador de frecuencia sea utilizado como máximo a 45 Hz, solo para casos excepcionales de medición, producto de las altas vibraciones que se producen en la estructura a casusa de la potencia del viento a esa frecuencia. Es recomendable utilizar como forma de demostración, frecuencias que no superen los 30 Hz, debido que el comienzo de las vibraciones se presentan a 35 Hz. En la actualidad se ha instalado una conexión trifásica cercana al variador pero a una línea eléctrica deficiente para utilizar el variador desde los 35 a 45 Hz, ya que el variador se apaga en un tiempo prolongado, entre mayor sea la frecuencia establecida menor será el tiempo prolongado del variador para su uso arrojando un error de bajo voltaje.

Existen 50 cm entre la salida del viento del ducto y el contacto de este con el centro del aerogenerador generando una pérdida de velocidad considerable, por tanto, se propone la compra de un difusor que tenga contacto con la malla metálica del soporte, lo que afecta en la disminución de la velocidad de salida del ducto, y así conseguir un mayor rango de medición con velocidades mayores pero menores frecuencia. También gracias al difusor se evita el uso del variador a altas frecuencias y ayuda en la uniformidad del flujo.

El ducto presenta una estrangulación mediante una placa metálica que se puede girar a distintos ángulos, incluso se puede colocar a 90 grados evitando el paso del viento. Para tener un flujo uniforme y estable es recomendable, disminuir los obstáculos, lo cual se recomienda extraerla a futuro.

Por otra parte, respecto a las mediciones realizadas, se logró obtener la curva de potencia similar a la del fabricante y el comportamiento del coeficiente de potencia a diferente tipos de

velocidades, como lo son: la velocidad de rotación del aerogenerador, velocidad incidente, y velocidad específica. Esto permitió encontrar el punto óptimo de operación del aerogenerador y saber su máxima eficiencia alcanzando un valor de 46%, siendo un valor un poco alto para tratarse de un aerogenerador de pequeña potencia.

También con los ensayos se logró determinar con éxito el comportamiento del aerogenerador en sus distintas variables, se observó que el aerogenerador comienza el giro a los 13 Hz y que la velocidad de arranque es de 1,8 m/s, diferente a los 1,5 que presentaba el fabricante.

Los ensayos arrojaron datos coherentes en sus distintos parámetros característicos del aerogenerador. Sin embargo, mientras se efectuó las mediciones cabe mencionar que fueron tomadas por personas, existiendo errores humanos que afectan en los datos obtenidos, y a su vez, existen ciertos datos dispersos que indican la inexistencia de una gran exactitud sobre la prueba de funcionamiento y los resultados logrados. Por lo tanto, para la mejora del sistema a futuro, se propone la instalación de los sensores definidos y seleccionados en este trabajo, la utilización y configuración del PLC mediante el software indicado, logrando una mayor exactitud para la creación de las distintas curvas relevantes del comportamiento de un aerogenerador, mediante un sistema de control y adquisición de datos que incluso permitiría establecer la velocidad de giro del aerogenerador a las revoluciones deseadas.

## 6 Referencias

[1] SERRANO Collazo, Juan Carlos. Desarrollo de un banco de ensayo para la evaluación de las prestaciones de aerogeneradores de pequeña potencia. Tesis (Master en energías renovables). Cartagena, España. UPTC, Departamento de Industrias, 2011.

[2] WIND ENERGY EXPLAINED, theory, design and application, J.F. MANWELL, J.G. MCGOWAN, A.L. ROGERS, Departamento de mecánica e Ingeniería industrial. 2ª ed. Washiton, USA, Series Wiley. 2010. 677 p.

[3] SANTANA O., Christian, “Estrategia de Expansión de las Energías Renovables en los Sistemas Eléctricos Interconectados”, implementado por el Ministerio de Energía y Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH. [en línea] <<http://www.4echile.cl/energias-renovables-en-chile-el-potencial-eolico-solar-e-hidroelectrico-de-arica-a-chiloe--2>> [Consulta: 19, Abril, 2016]

[4] Ministerio de energía, Gobierno de Chile, “ANTECEDENTES SOBRE LA MATRIZ ENERGÉTICA EN CHILE Y SUS DESAFÍOS PARA EL FUTURO” [en línea] <[http://www.cchen.cl/mediateca/PDF/antecedentes\\_matriz\\_energetica.pdf](http://www.cchen.cl/mediateca/PDF/antecedentes_matriz_energetica.pdf)> [consulta: 9, mayo, 2016]

[5] PITTELOUD, JEAN-DANIEL & GSÄNGER, STEFAN, WORLD WIND ENERGY ASSOCIATION “2016, Small wind world report”, [en línea], <<http://www.wwindea.org/small-wind-world-market-back-on-track-again/>> [consulta: 23, mayo, 2016]

[6] INTERNATIONAL ELECTROTECHINICAL COMISSION, WIND TURBINES: PART 2- Small Wind turbine, edición 3 (IEC-61400-2:2013-12). Suiza.

[7] INTERNATIONAL ELECTROTECHINICAL COMISSION, WIND TURBINES: PART 12-1: Power performance measurements of electricity producing wind turbines, (IEC-61400-12-1:2005). Suiza.

[9] IDOM, DYNALAB: “Instituto Fraunhofer IWES” [en línea] <<http://www.idom.com/proyecto/dynalab/>> [consulta: 30 mayo 2016]

[10] CENER, “Laboratorio de Ensayo de Aerogeneradores (LEA)”, [en línea] <<http://www.cener.com/es/areas-de-investigacion/energia-eolica/areas-de-actuacion-en-energia-eolica/laboratorio-de-ensayo-de-aerogeneradores-lea/>> [consulta: 30 mayo 2016]

[11] DIKOID, “EN.041 Laboratorio de ensayos de aerogeneradores” [en línea] <[http://dikoid.com/banco\\_ensayo\\_aerogeneradores/](http://dikoid.com/banco_ensayo_aerogeneradores/)> [consulta: 30 mayo 2016]

[12] Empresa GUNT, “ET 220 manual english” [en línea], <[http://www.gunt.de/download2e/ET%20220%20manual\\_english.pdf](http://www.gunt.de/download2e/ET%20220%20manual_english.pdf)> [consulta: 2 junio, 2016]

[13] INTRODUCCIÓN A LA TEORÍA DE LAS TURBINAS EÓLICAS, Manuel Franquesa I Voneschen, Castldefels, España, La VERITAT.

[14] Global Wind energy council (GWEC), “capacidad instalada de energía eólica en el mundo” [en línea], <<http://www.gwec.net/wp-content/uploads/2012/06/Top-10-new-installed-capacity-Jan-Dec-2015.jpg>> [consulta: 2 noviembre, 2016]

[15] Comisión nacional de energía (CNE) “Capacidad de generación eólica” [en línea], <<http://energiaabierta.cl/visualizaciones/capacidad-instalada/>> [consulta: 2 de noviembre 2016]

## 7 Anexos

### Anexo A: Manual Aerogenerador



#### Manual de Generador Eólico 120w BOREAS



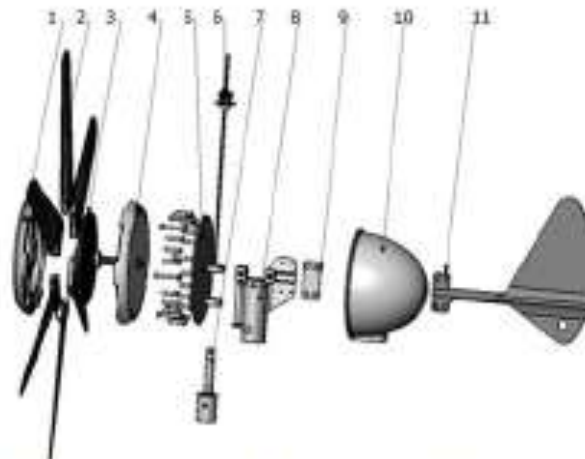
#### Precaución:

1. Gracias por comprar el M-series aerogeneradores usted. Por favor, consulte el manual antes de la instalación.
2. La Instalación debe ser realizada por los técnicos experimentados. Por favor, consulte el manual.
3. No abra el generador o el controlador sin instrucciones mientras se hace el mantenimiento.
4. Por favor, instale en lugares donde haya viento permanente.
5. Equipo Pequeño pensado en abastecer iluminación y Equipos de bajo consumo. No pensado para abastecer Energía Eléctrica a Grupos Familiares.

## 1. Parametro técnicos

Modelo	BOREAS 120W
Marca	BOREAS
Nominal de salida (W)	100
Max. de salida (W)	120
Tensión nominal (DCV)	12
Velocidad de arranque del viento (M/S)	1.5
Velocidad del viento Máxima (M/S)	45
Tipo de generador	PMG
Diámetro del rotor (M)	0.82
Cantidad de Aspas	6
Material de las Aspas	fibra de vidrio reforzado
Material	aleación de aluminio
Controlador	Regulere 12v dc
Tipo de Protección Motor	Sellado y resistente al agua
Modo de protección.	cortocircuito
Vida útil (años)	10
Embalaje forma	cartón
Tamaño del paquete (mm)	470*410*330
Peso bruto (kgs)	10.5

## 2. Partes y Piezas

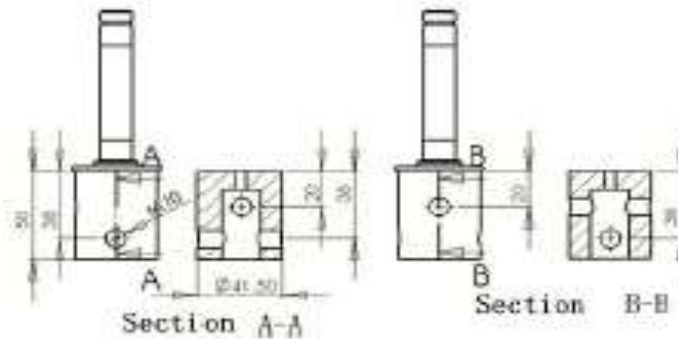


No.	Descripción	No.	Descripción
1	Frente Nartz de Cubierta	7	Gyro
2	Aspas	8	Gyro Base
3	Estator	9	Placa
4	Contra portada Tapa	10	Tapa Posterior
5	Fianche	11	Cola
6	Pasador		

### 3. Instalación

1. Conecte los cables con el terminal del generador. Por favor, preste atención a la polaridad de positivo y negativo. Trabaja en sistemas de 12v dc.

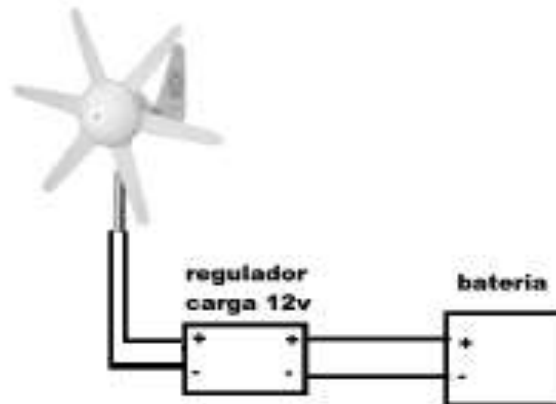
2. Eólico no incluye poste asegúrese de instalar en lugares con viento se recomienda poste:



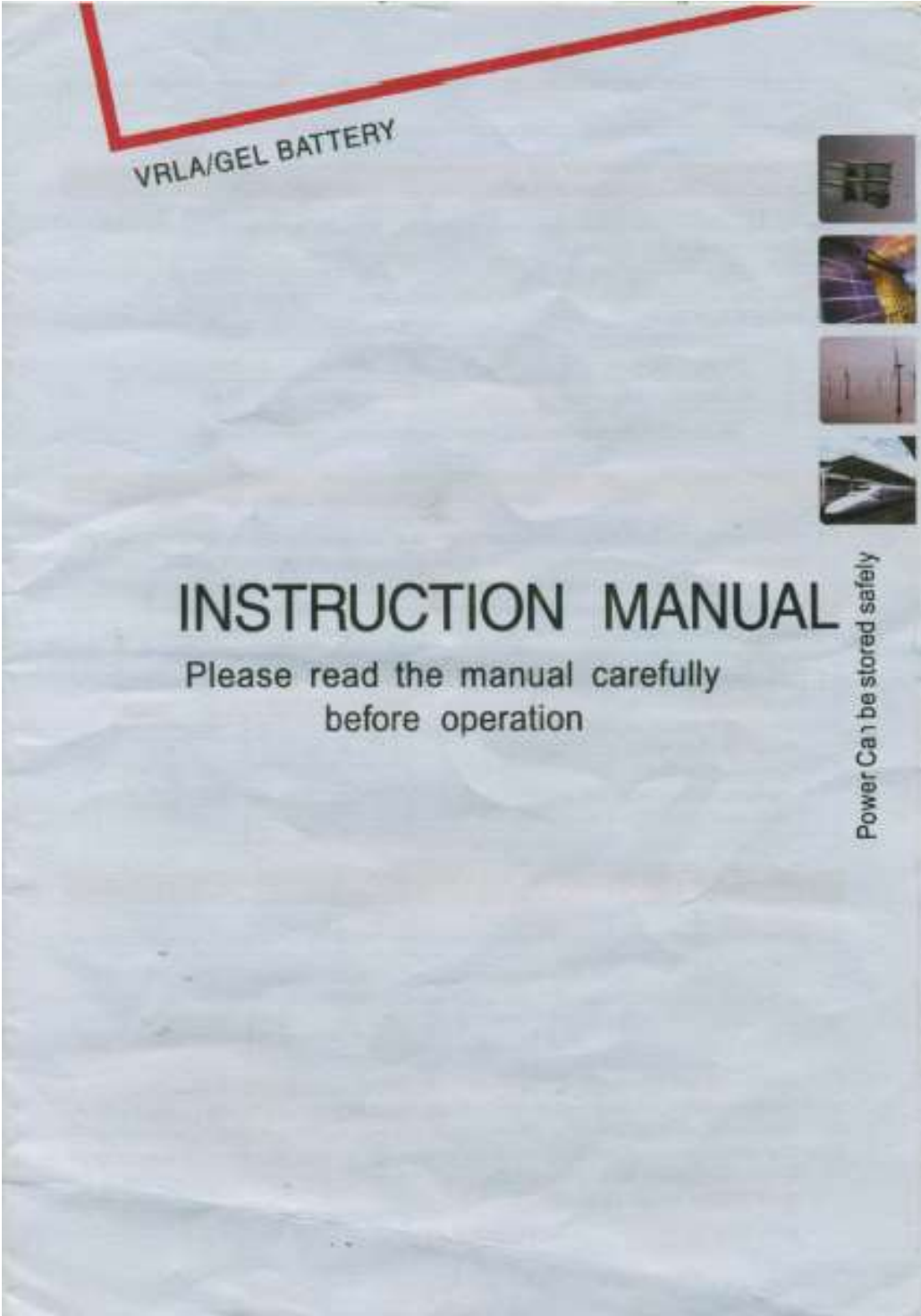
3. Algunos modelos incluyen Controlador Integrado (Consulte con su Proveedor) ya que es opcional por cada país.

En caso de no contar se adjunta Diagrama 12v dc.

Se recomienda Trabajar por equipo máximo 1 Batería de 100ah 12v ciclo profundo



**Anexo B: Manual Instructivo batería**



## VRLA/GEL BATTERY

### The Inspection before battery installation

A routine inspecting of battery packages should be done first, check the quantities of the battery and related accessories is accurate or not.

- 1.1 Every battery carton will have one "Instruction Manual", a set of screw (12V 18Ah and above models);
- 1.2 Check the battery if to have splits, bulging, leakage or other un-normal phenomenon;
- 1.3 Battery Voltage Testing:

Nominal Voltage	2V	6V	12V
Measured Voltage	>2.1V	>6.3V	>12.4V

Note: Measured Voltage should be greater than the values in the table above.

### Transporting and storage

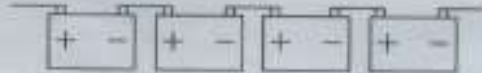
- 2.1 When handling the batteries, should be erect, take care, refuses inverting, tumbling or throwing.
- 2.2 The battery is full capacity before leaving factory, during the transporting, should protect the terminals, not allowed to loose safety valves, refusing short circuit.
- 2.3 The battery should be stored under ambient temperature of 0°C~40°C before installation, the storage period is shown in table 1-1. Expiration or the battery voltage is lower than that is shown in table 1-3, should be recharging at once.
- 2.4 The battery should be stored in dry, dean and well ventilated piece.
- 2.5 Do not store or use in the following situation:
  - Outdoors or directly raining & sunshine place;
  - Fog or icy pool place;
  - Corrosive gas place;
  - Heavy moisture or more dust place;
  - Vibration or shock occurs place.

Table 1-1. Storage Period under different temperatures

Temperature(°C)	Period(months)
0 - 15	9
16 - 25	6
26 - 35	3
36 - 40	1

### Battery Connection

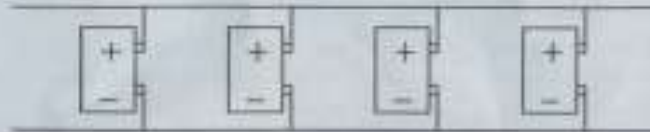
- 3.1 Series connection: the batteries (or battery groups) which have the same actual capacity is allowed to be used by series connection.



- 3.1.1 the batteries which have different capacities is not allowed to be used by series connection;
- 3.1.2 the new battery is not allowed to be used with old battery by series connection;
- 3.1.3 the batteries which are offered by different suppliers are not allowed to be used by series connection;
- 3.1.4 The batteries which are the same model and different remain capacities are not allowed to be used by series connection; they can be used by series connection after recharging to full capacity for these different remain capacities batteries.

## VRLA/GEL BATTERY

- 3.1.5 The newly installed battery groups must be floating recharged for 72 hours before using, they can be used or tested after the internal power balanced. This method is very important for battery groups' working life and voltage consistency.
- 3.2 Parallel connection: the batteries (battery groups) which are the same voltage and capacity can be used by parallel connection. (We advise that the maximum of parallel group number is less than 4.)



## Charging & Discharging Methods

### 4.1 Classification of charging ways

- Float charging and uniform charging (supplement charging).  
Float charging means that when the battery is in full state, the charger will not stop charging, and continue to supply a constant floating voltage and a small floating current for the battery.
- Uniform charging means that charging the battery quickly according to the charging current and charging time which have been already designed.

### 4.2 Charging parameter (Table 1-2)

Parameter	Battery Series	Charging Ways	
		Float Charging	Uniform Charging
Charging Voltage (25°C)	2V Series	2.25-2.27V/PC	2.30-2.35V/PC
	6V/12V Series	6.75-6.9 VPC 13.5-13.8VPC	7.05-7.2 VPC 14.1-14.4VPC
Charging Current	2V Series	Max. Current: 0.25CA Suggested Current: 0.10CA	Max. Current: 0.25CA Suggested Current: 0.10CA
	6V/12V Series		
Temperature compensation coefficient	2V Series	3 mV/°C	3 mV/°C
	6V/12V Series	9 mV/°C 18 mV/°C	9 mV/°C 18 mV/°C

(Note: in the table of "Charging Current", the "C" means battery nominal capacity; The temperature compensation coefficient takes 25°C as the base, when temperature is increased by 1°C, designed charging voltage is that nominal voltage subtracts one coefficient; Conversely, when temperature is reduced by 1°C, designed charging voltage will be that nominal voltage adds on one coefficient.)

### 4.3 Suitable situation for uniform charging.

- The batteries will be uniformly charged before using, when current is less than 10mA/Ah, it is automatically transferred to floating, floating time is not less than 24hours.
- When the voltage of individual battery is lower in battery group, should be uniformly charged.
- When charging current is more than 50mA/Ah after accidental discharging or regular testing of capacities, should be uniformly charging.

## VRLA/GEL BATTERY

### 4.4 The lowest final voltage of battery at different discharging current.

When the battery is discharging, the lowest final voltages must be controlled according to the shown in table 1-3, otherwise it will cause great damage to battery's life.

Table 1-3.

Discharging Current	Final Voltage (V)		
	2V Series	6V Series	12V Series
<0.1C	1.80	5.25	10.50
0.1C-0.3C	1.75	5.25	10.50
0.3C-0.5C	1.70	5.10	10.20
0.5C-1C	1.65	4.95	9.90
>1C	1.6	4.80	9.60

## Warning

- 5.1 Please don't overhaul, decompose or remount by yourself, otherwise the acid or lead metal in the battery will cause harm to people or the environment.
- 5.2 Prohibit making short-circuit of positive and negative of batteries or battery groups, otherwise it will cause electric shocking, fire and other accidents.
- 5.3 When connecting or leading battery groups, please choose the wires with appropriate line diameter, otherwise it will cause fire and damage.
- 5.4 Please firmly connect terminal sockets or bolts, if loose, it will cause the connecting voltage of batteries drops largely or sparking.
- 5.5 When connecting in the construction, it must be cut off the main power supply, otherwise it will appear risk of electric shocking.
- 5.6 Do not connect to other powers except designed voltage, otherwise it will cause fire and other damage.
- 5.7 Do not use batteries as AC power supply directly, otherwise it will cause fire or other damage.

## After-Sales Service

If need technical support or sales service, please contact us.


## Anexo C: Sensor de proximidad utilizado para medir las RPM del aerogenerador

**Autonics**

PHOTOELECTRIC SENSOR  
**BR SERIES**

**M A N U A L**

CE



Thank you very much for selecting Autonics products.  
**For your safety, please read the following before using.**

■ **Caution for your safety**

※Please keep these instructions and review them before using this unit.

※Please observe the cautions that follow;

⚠ **Warning** Serious injury may result if instructions are not followed.

⚠ **Caution** Product may be damaged, or injury may result if instructions are not followed.

※The following is an explanation of the symbols used in the operation manual.

⚠ caution: Injury or danger may occur under special conditions.

⚠ **Warning**

1. **In case of using this unit with machinery(Ex: nuclear power control, medical equipment, ship, vehicle, train, airplane, combustion apparatus, safety device, crime/disaster prevention equipment, etc) which may cause damages to human life or property, it is required to install fail-safe device.**  
It may cause a fire, human injury or damage to property.

⚠ **Caution**

1. **This unit shall not be used outdoors.**  
It might shorten the life cycle of the product or give an electric shock.  
Use this product inside only. Do not use the product outdoors or location subject to temperatures or humidity outside.(Ex: rain, dirty, frost, sunlight, condensation, etc.)

2. **Do not use this unit where there is flammable or explosive gas.**  
It may cause a fire or explosion.

3. **Please observe the rated voltage and do not supply AC power.**  
It may cause damage to this unit.

4. **Please check the polarity of power and wrong wiring.**  
It may result in damage to this unit.

5. **Do not use this unit in place where there is vibration or impact.**  
It may result in product damage.

6. **In cleaning the unit, do not use water or an oil-based detergent.**  
It may cause an electric shock or fire that will result in damage to the product.

## ■ Specifications

Sensing type	Diffuse reflective				Narrow beam reflective		Retroreflective		Through-beam		
Model	BRP100 -DDT	BR100 -DDT	BRP400 -DDT	BR400 -DDT	BRP200 -DDTN	BR200 -DDTN	BRP3M -MDT	BR3M -MDT	BR4M-TDTD	BR4M-TDTL	
	BRP100 -DDT-P	BR100 -DDT-P	BRP400 -DDT-P	BR400 -DDT-P	BRP200 -DDTN-P	BR200 -DDTN-P	BRP3M -MDT-P	BR3M -MDT-P	BR4M-TDTD-P	BR4M-TDTL-P	
Sensing distance	100mm <sup>※1</sup>		400mm <sup>※2</sup>		200mm <sup>※2</sup>		0.1 to 3m <sup>※3</sup>		4m, 20m		
Sensing target	Translucent, Opaque materials						Opaque materials of min. ø60mm		Opaque materials of min. ø15mm		
Hysteresis	Max. 20% at rated setting distance						—				
Response time	Max. 1ms										
Power supply	12-24VDC ±10%(Ripple P-P, Max. 10%)										
Current consumption	Max. 45mA										
Light source	Infrared LED(940nm)		Infrared LED(850nm)				Red LED(660nm)		Infrared LED(850nm)		
Sensitivity adjustment	Adjustable(VR)								Fixed		
Operation mode	Selectable Light ON or Dark ON by control cable(White)								Dark ON	Light ON	
Control output	NPN or PNP open collector output <ul style="list-style-type: none"> <li>• Load voltage: Max. 30VDC</li> <li>• Load current: Max. 200mA</li> <li>• Residual voltage - NPN: Max. 1V, PNP: Max. 2.5V</li> </ul>										
Protection circuit	Reverse polarity protection circuit, Output short-circuit protection circuit										
Indicator	Operation indicator: Red LED, Power indicator: Red LED(only for emitter of through-beam type)										
Insulation resistance	Min. 20MΩ (at 500VDC megger)										
Noise resistance	±240V the square wave noise(pulse width: 1μs) by the noise simulator										
Dielectric strength	1000VAC 50/60Hz for 1 minute										
Vibration	1.5mm amplitude at frequency of 10 to 55Hz(for 1 min.) in each of X, Y, Z directions for 2 hours										
Shock	500m/s <sup>2</sup> (50G) in X, Y, Z directions for 3 times										
Environment	Ambient illumination	Sunlight: Max. 11,000lx, Incandescent lamp: Max. 3,000lx(Receiver illumination)									
	Ambient temperature	-10 to 60°C, Storage: -25 to 75°C									
	Ambient humidity	35 to 85%RH, Storage: 35 to 85%RH									
Protection	IP66(IEC standard)										
Material	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Case ≡ BRP: PA(Black)</li> <li>BR: Brass, Ni-plate</li> <li>•Sensing part ≡ PC</li> </ul>						<ul style="list-style-type: none"> <li>•Case ≡ BRP3M: PA (Black) / BR3M: Brass, Ni-plate</li> <li>•Sensing part ≡ Acrylic</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>•Case ≡ Brass, Ni-plate</li> <li>•Sensing part ≡ BR4M: Glass, BR20M: PC</li> </ul>		
Cable	ø5mm, 4-wire, Length: 2m(Emitter of through-beam type: ø5mm, 2-wire, Length: 2m / Receiver: ø5mm, 3-wire, Length: 2m) (AWG22, Core diameter: 0.08mm, Number of cores: 60, Insulator diameter: ø1.25mm)										
Accessory	Separate	VR adjustment driver						VR adjustment driver, Reflector(MS-2)		—	
	Common	BR: Fixing Nuts, Washer / BRP: Fixing Nuts									
Approval	CE										
Unit weight	Approx. 100g	Approx. 120g	Approx. 100g	Approx. 120g	Approx. 100g	Approx. 120g	Approx. 100g	Approx. 120g	Approx. 300g		

※ The temperature or humidity mentioned in Environment indicates a non freezing or condensation environment.

※1: Non-glossy white paper 50×50mm ※2: Non-glossy white paper 100×100mm.

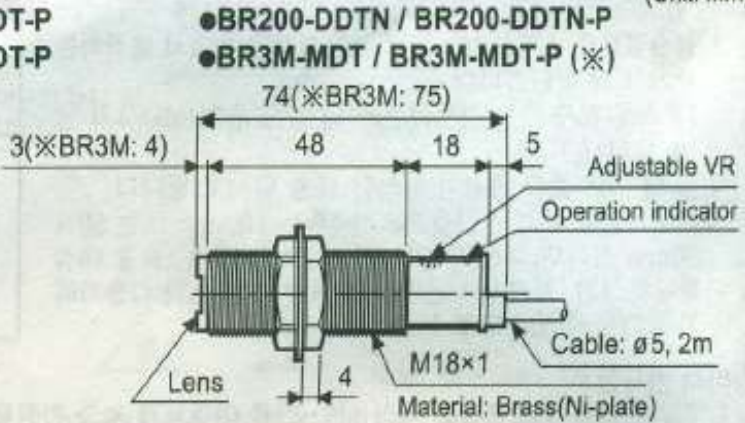
※3: Sensing distance and sensing target for Retroreflective type is rated based on reflector(MS-2). Sensing distance indicates possible reflector setting range. Sensing under 0.1m is also available.



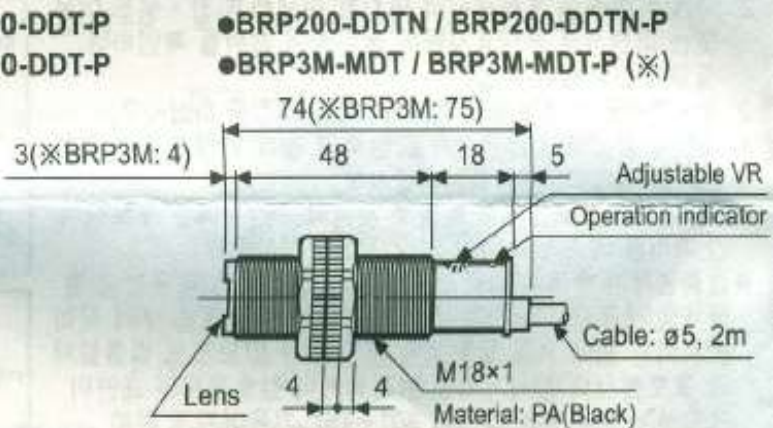
## ■ Dimensions

(Unit: mm)

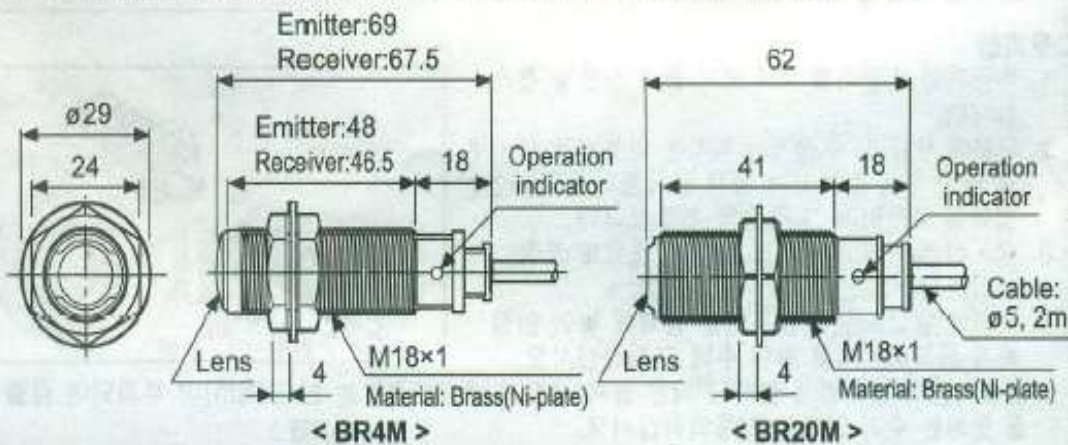
- BR100-DDT / BR100-DDT-P
- BR400-DDT / BR400-DDT-P



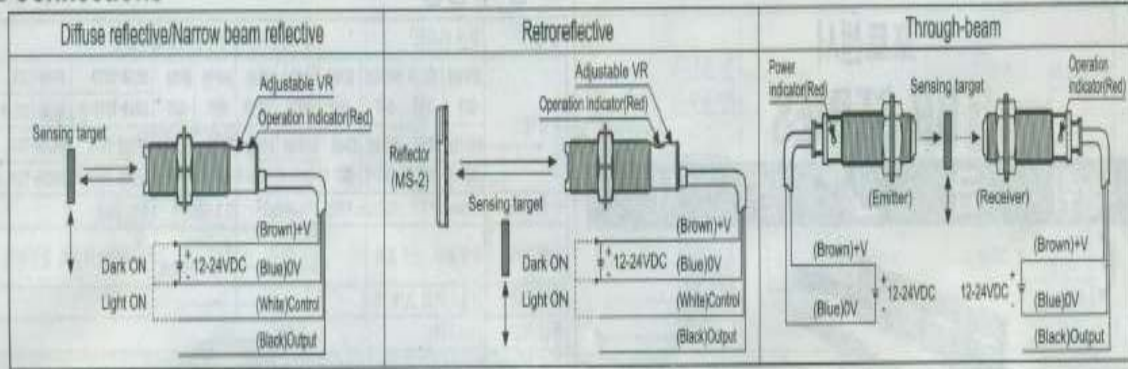
- BRP100-DDT / BRP100-DDT-P
- BRP400-DDT / BRP400-DDT-P



- BR4M-TDTD / BR4M-TDTD-P / BR4M-TDTL / BR4M-TDTL-P
- BR20M-TDTD / BR20M-TDTD-P / BR20M-TDTL / BR20M-TDTL-P

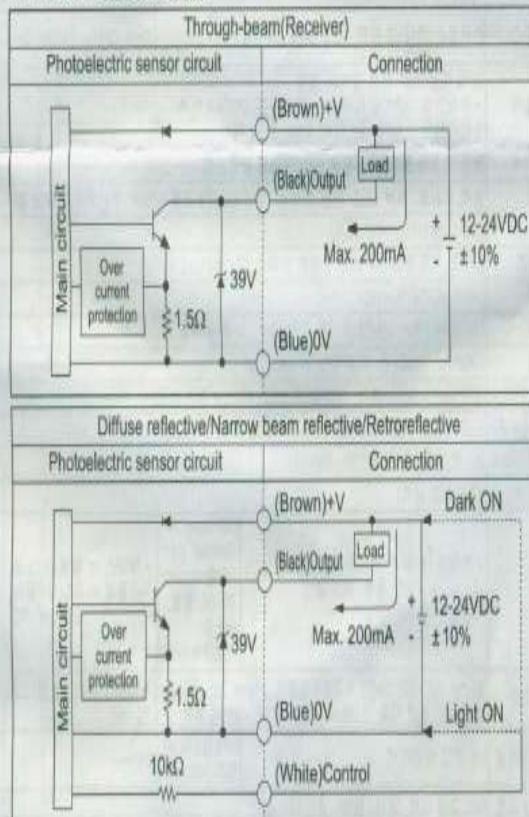


## ■ Connections

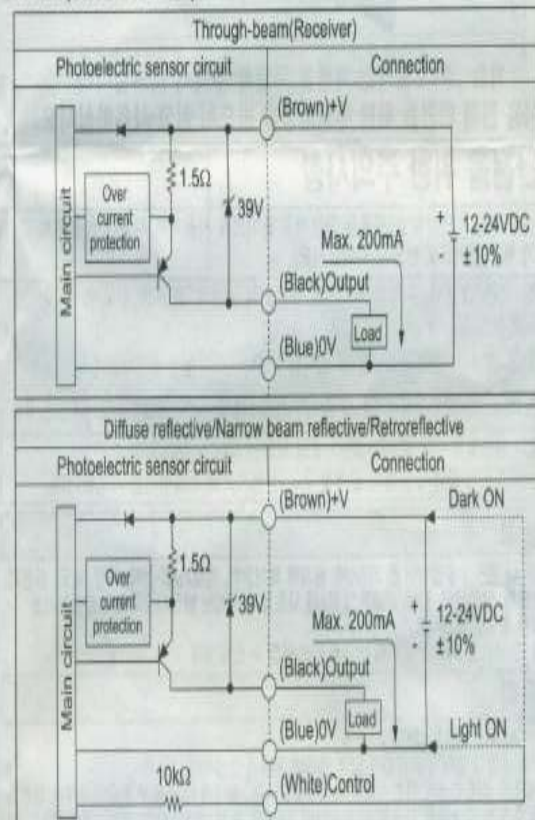


## ■ Control output circuit diagram

●NPN open collector output



●PNP open collector output



※Before using this unit, select Light ON/Dark ON with control cable.(Light ON: Connect control cable with 0V/Dark ON: Connect control cable with +V)

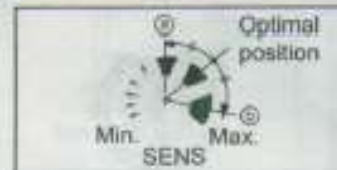
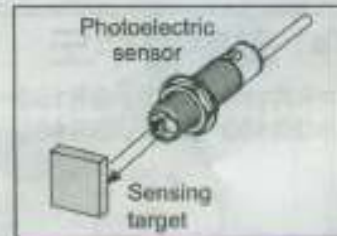
※Control cable is only for Diffuse reflective/Narrow beam reflective/Retroreflective type.

## ■ Installation and sensitivity adjustment

Please supply the power to the sensor, after setting the emitter and the receiver in face to face, and then adjust an optical axis and the sensitivity as follow;

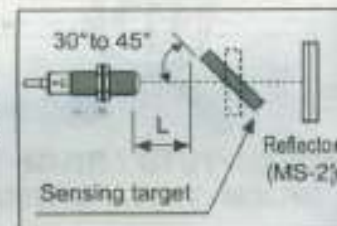
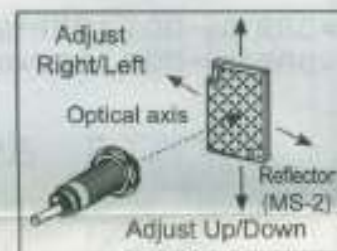
### • Diffuse reflective/Narrow beam reflective

1. Even though the sensor is still available at the max. sensitivity position, it is recommended to adjust sensor sensitivity with considering existence of reflective material in background.
  2. Set the target at a position to be detected by the beam, then turn the adjuster until point ㊸ which the indicator turns on from Min. position of the adjuster.
  3. Take the target out of the photoelectric sensor, then turn the adjuster until point ㊹ which the indicator turns ON. [If the indicator does not turn on, max. position is point ㊹.]
  4. Set the adjuster at the center of two switching point ㊸, ㊹.
- ✕The sensing distance indicated in the specification chart is for non-glossy white paper 100×100mm or 50×50mm. It is subject to change depending on the size of sensing target, surface status and gloss, etc.



### • Retroreflective

1. Set the sensor and reflector (MS-2) in opposite each other and supply the power.
  2. Check stable indicator operation range with moving both sensor and reflector up/down and right/left and adjust the position in the middle.
  3. After finishing position adjustment, check whether the sensor is operated normally with placing a sensing target on optical axis.
- ✕In case of using multiple sensors in parallel, keep each sensor's distance min. 30cm.
- ✕In case sensing target has higher reflectivity than non-glassy white paper, the sensor may cause malfunction due to direct reflected light from the target. Keep certain distance between a sensor and sensing target, or install the sensor with making sensing target's surface inclining 30° to 45° to photo sensor's optical axis.
- ✕Sensitivity adjustment: Please see the diffuse reflective/narrow beam reflective type.



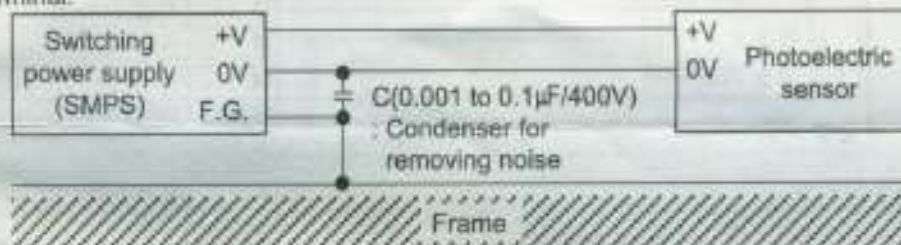
### • Through-beam

1. Set the receiver and emitter in opposite each other and supply the power.
  2. Check stable indicator operation range with moving both receiver and emitter up/down and right/left and adjust the position in the middle.
  3. After finishing position adjustment, check whether the sensor is operated normally with placing a sensing target on optical axis.
- ✕If the sensing target is translucent body or smaller than φ15, it might not detect the target cause light passed.



## Caution for using

1. Intercept a strong source of light as like sunlight, spotlight within inclination angle range of photoelectric sensor.
2. The photoelectric sensor may cause malfunction under the fluorescent lamp light, so be sure to use cut-off light with panel.
3. When more than 2 sets of Through-beam type sensor are used closely, it might cause interference each other. Be sure to put enough space between them in order to avoid malfunction.
4. When more than 2 sets of diffuse reflective/narrow beam reflective type are installed adjacently, it can occur malfunction by light beam from the other target. So it must be installed at an enough interval.
5. If photoelectric sensor is installed at flat part, it might cause malfunction by reflection light from flat part. Be sure to put space between photoelectric sensor and ground.
6. When wiring the photoelectric sensor with high voltage line, power line in the same conduit, it may cause malfunction or mechanical trouble. Therefore please wire separately or use different conduit.
7. Avoid installing the unit as following place. Corrosive gas, oil or dust, strong flux, noise, sunlight, strong alkali, acid.
8. In case of connecting DC relay as inductive load to output, please remove surges by using diode or varistor.
9. The photoelectric sensor cable shall be used as short as possible, because it may cause malfunction by noise through the cable.
10. When it is stained by dirt at lens, please clean the lens with dry cloth, but do not use an organic materials such as alkali, acid, chromic acid.
11. When using switching power supply as the source of supplying power, F.G. terminal shall be grounded and condenser for removing noise shall be installed between 0V and F.G. terminal.



### 12. Installation environment

①It shall be used indoor ②Altitude max. 2,000m ③Pollution degree 2 ④Installation category II

※It may cause malfunction if above instructions are not followed.

## Major products

- Photoelectric sensors
- Fiber optic sensors
- Door sensors
- Door side sensors
- Area sensors
- Proximity sensors
- Pressure sensors
- Rotary encoders
- Connector/sockets
- Switching mode power supplies
- Control switches/Lamps/Buzzers
- I/O Terminal Blocks & Cables
- Stepper motors/drivers/motion controllers
- Graphic/Logic panels
- Field network devices
- Laser marking system(Fiber, CO<sub>2</sub>, Nd:YAG)
- Laser welding/soldering system
- Temperature controllers
- Temperature/Humidity transducers
- SSR/Power controllers
- Counters
- Timers
- Panel meters
- Tachometer/Pulse/Rate/meters
- Display units
- Sensor controllers

**Autonics Corporation**  
<http://www.autonics.com>

Satisfiable Partner For Factory Automation

- HEAD QUARTERS:  
18, Bansong-ro 513beon-gil, Heeundae-gu, Busan, Korea
- OVERSEAS SALES:  
#402-404, Bucheon Techno Park, 855, Pyeongcheon-ro,  
Wonmi-gu, Bucheon, Gyeonggi-do, Korea  
TEL : 82-32-610-2730 / FAX : 82-32-329-0728
- E-mail: [sales@autonics.com](mailto:sales@autonics.com)

EP-KE-08-0050L

## Anexo D: Controlador de carga solar, manual del usuario

### SOLAR POWER CONTROLLER(PJSC)

#### USER MANUAL

##### Characteristics:

**Control circuit:** use MCU and professional software as the control center to fulfill intelligent system control.

**Charging mode:** use PWM high efficiency charging way. Boost, recovery and float charging auto work for battery long-life. Use temperature compensation.

**High accuracy over discharging control by the discharging rate:** Over-discharging control voltage modified by the battery discharging rate curve.

**Self protection:** protection to overload, outside and inside short circuit, reverse connection, thunder and lightning, PV panel reverse current, over charging and discharging etc. during the short circuit and overload protection, no any component will be damaged and need change, include fuse.

**LED indication on system condition:** LED indicating the system of charging, overcharge, power full, power low, over-discharge, over load, cut short circuit, load on/off, etc.

**Industry level production standard:** wide temperature running area  $-35^{\circ}\text{C}$  to  $+50^{\circ}\text{C}$

**No adjustable hardware part:** use flash memory to save all work control point instead of adjustable resistance, to protect the control work point from being off as the adjustable resistance value is easily changed by temperature and vibration, in order to make sure the control accuracy and reliability.

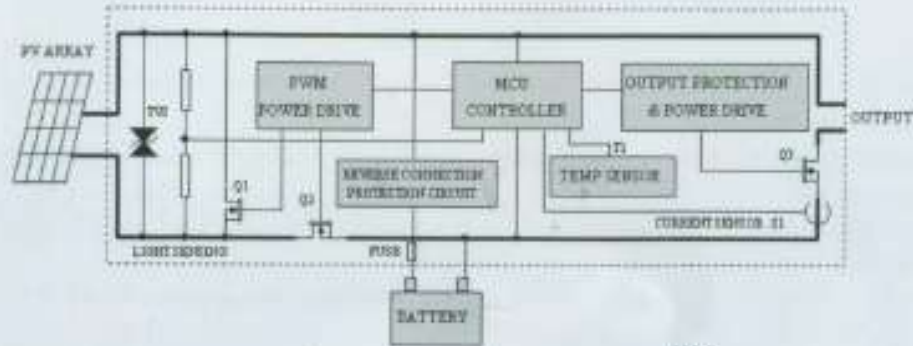
**Operation:** easy to operate, robust in design.

**Two output modes:** direct current output mode and 1HZ output mode. The 1HZ output mode is very suitable for traffic caution light.

##### Controller Panel Indications



## System main circuit diagram



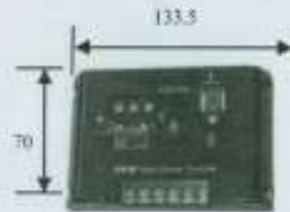
## Installation:

a. fix the controller in a certain place .

size of the installing hole :

Size: 140 × 90.5(mm)

Length between installing holes:133.5×70(mm)



b. Prepare wire. Choose the plastic Copper wire. Current density no more than  $4A/mm^2$ . Cut the suitable length of wire and make it as short as possible. Peel-off 5mm the plastic at the end of wire.

c. Connect the wire to the battery port on the controller to the battery. Pay attention to the +, - pole of the connection. If the pole is reverse, it does not work. It has the function of self protection, and there is no any part will be damaged during this step, but should correct this mistake.

d. Connect the wire to the PV port on the controller to PV panel. If the connection is correct and the PV panel gets the sunlight, charging indicator will be light.

e. Connect the load to the load port on the controller. Attention the +, - pole should be correct.

**!! Attention: during the installation, if the voltage of the system is 24V, you can not use the hands to touch any conductor in the system circuit in order to protect from electric shock.**

## Using:

**Charge & overpressure indication:** If the system is properly connected ,when sunlight shines on the PV panel ,the charge LED lights in green, indicating the system is working in a good order. PWM mode is applied in charging. During the charging, if over discharge has happened, firstly the voltage for charging battery will be up to boost voltage and keep 10 mins, then returns to direct voltage and keep 10 mins to activate battery, lastly to float voltage and keep this state for the best state of battery. These process is benefit to battery full charging and its life -span.

**Battery state:** when the battery voltage is in normal condition, the state LED lights in green; state LED flashes slowly in green when battery finishes its charge; When the voltage of the battery is

lower, it will get in yellow color. When the voltage goes down continuously to over discharge, the System state LED will get in red color, and turns off the output at the same time, until the battery voltage recovers to over discharge return voltage, the system will work again automatically.

**Load indication:** the load LED lights when the load works. If the load current is 1.25 times higher for 60 seconds or 1.5 times higher for 5 seconds than rated current of the controller, the trouble LED flash slowly in red to show overload happened, and the controller will shut down output. When load short circuit happens, the trouble LED will flash quickly, then the controller will shut down its output. When it happens, please check if the load is properly connected. Disconnect the load at fault and press the button, it will resume its work in 30 seconds or in another day.

### Work mode setting:

**Way of setting:** press the on & off button for 5 seconds long until the number on the LED screen begins to flash. Press the button to choose a proper number. When the number no longer flashes, the setting is completed. Press the button to check the value.

**Light ON+ Light OFF control mode:** The load will start working when it gets dark until it gets bright or to the end of a setting time. There will be a 10 mins delay before turning on the load in order to make sure if it really gets dark.

**Light ON + set time delay OFF mode:** the start process same with above. Load will be closed after the setting time. Setting time can be seen in time setting table.

**Common controller mode:** The controller will work as a common controller, no light and time control, no ON and OFF delay time, only has the else function. If no sunlight on PV panel, it will turn on load at once; If sunlight on PV panel, it will turn off load at once.

**Test mode:** It used for the Light control system installed test. Only cancel the ON and OFF delay.

**Two Output modes:** when the number displayed on the LED is anyone from 1 to 9, and 0. to 5, it is direct-current output mode. if the number without a decimal point that is 0 to 9, the decimal point on LED does not shine

### Time setting:

Work mode	LED	Work mode	LED	Work mode	LED
Light ON+ Light OFF	0	Light ON + 6 Hours delay OFF	6	Light ON + 12 Hours delay OFF	2
Light ON + 1 Hour delay OFF	1	Light ON + 7 Hours delay OFF	7	Light ON + 13 Hours delay OFF	3
Light ON + 2 Hours delay OFF	2	Light ON + 8 Hours delay OFF	8	Light ON + 14 Hours delay OFF	4
Light ON + 3 Hours delay OFF	3	Light ON + 9 Hours delay OFF	9	Light ON + 15 Hours delay OFF	5
Light ON + 4 Hours delay OFF	4	Light ON + 10 Hours delay OFF	0	Normal control	6
Light ON + 5 Hours delay OFF	5	Light ON + 11 Hours delay OFF	1	Test (No delay)	7

### Problems & Troubleshooting:

Problems	Troubleshooting
The charge LED indicator doesn't light in green when sunlight gets the PV panel.	Check if the cable of solar panel connects properly.
The charge LED indicator flash quickly.	System over voltage or open circuit of the battery. check if the battery connects to the system cable properly or the charging circuit damaged.
The load LED indicator light but there is no power output.	Check if the load connects to the system properly.
The load LED indicator flash quickly and there is no power output.	Check output circuit. If the load short or over load occurs, remove the load and push the button and the controller will resume its work after 30 minutes.
The load LED indicator light slowly and there is no power output.	Overload occurs, remove some loads and push the button again and the controller will resume its work after 30 minutes.
System state LED indicator flash in red color and there is no power output.	Over discharge of the battery. The controller will resume its work after finishing charge of the battery.

### Specifications:

Type	PJSC5I	PJSC10I	PJSC15I	PJSC20I
Rated charge current	5A	10A	15A	20A
Rated load current	5A	10A	15A	20A
Work voltage	12V; 12/24V Auto			
Over load, short circuit protection	1.25 rated load current 60sec, 1.5 rated load current 5sec, over load protection action. ≥3 Rated load current short circuit protection action.			
No load current	≤8mA			
Charging circuit voltage drop	≤0.26V			
Load circuit voltage drop	≤0.15V			
Over voltage protection	17V; ±2/24V			
Work temperature	Industry stage: -35℃ to +55℃;			
Boost charge voltage	14.6V; ±2/24V; (keep 10min)			
Direct charge voltage	14.4V; ±2/24V; (keep 10min)			
Float charge voltage	13.6V; ±2/24V;			
charge return voltage	13.2v; ×2/24V;			
Temperature compensation	-5mV/℃/cell (Boost charge, Direct charge, Float charge, charge return voltage);			
Lower voltage indicate	12.0V; ±2/24V;			
Over discharge voltage	11.1V (no load) - real-time modified voltage by the discharge rate; ±2/24V;			
Over discharge return voltage	12.6V; ±2/24V			
Control mode	PWM charge mode; modified discharge voltage by the discharge rate			

## Anexo E: PLC Schneider Electric

### Ficha de producto Características

### TM221CE24T Controlador M221 24 E/S transistor PNP Ethernet



#### Principal

Estatus comercial	Comercializado
Gama de producto	Modicon M221
Tipo de producto o componente	Autómata programable
[Us] tensión de alimentación nominal	24 V CC
De pie conducto	14 entrada discreta de acuerdo con IEC 61131-2 tipo 1 incluyendo 4 entrada rápida
Número de entrada analógica	2 en el rango de entrada: 0...10 V
Tipo de salida digital	Transistor
Número de salidas discretas	10 transistor incluyendo 2 salida rápida
Tensión de salida	24 V CC
Montado en la pared del conducto	0.5 A

#### Complementario

Número de E/S digitales	24
Numero de E/S del módulo de expansión	<= 7 para salida del relé <= 7 para salida transistor
Límites tensión alimentación	20.4...28.8 V
Corriente de entrada	<= 35 A
Consumo de energía en W	<= 4.8 W en 24 V sin módulo de expansión E/S <= 14 W en 24 V módulo de expansión con número máximo de E/S
Corriente de salida fuente de alimentación	0.2 A en 24 V para bus de expansión 0.52 A en 5 V para bus de expansión
Entrada lógica	Receptor o suministro (positivo/negativo)
Tensión de entrada digital	24 V
Tipo de voltaje entrada discreto	CC
Resolución de entrada analógica	10 bits
Valor LSB	10 mV
Tiempo conversión	1 ms por canal + 1 controlador del ciclo de tiempo para entrada analógica
Sobrecarga permitida em entradas	+/- 13 V CC para entrada analógica permanente +/- 30 V CC para entrada analógica con 5 min máximo
Estado de tensión 1 garantizado	>= 15 V para entrada
Posición de conexión libre	>= 4.2 mA para entrada digital >= 2.6 mA para entrada rápida
Estado de tensión 0 garantizado	<= 5 V para entrada
Transmisión de datos codificada	<= 0.6 mA para entrada rápida <= 1.3 mA para entrada digital
Corriente de entrada discreta	5 mA para entrada rápida 7 mA para entrada digital
Tapa de conexiones trasero	4.9 kOhm para entrada rápida 100 kOhm para entrada analógica 3.4 kOhm para entrada digital

Tiempo respuesta	300 $\mu$ s encender, apagar operación para salida; otros terminales terminal 50 $\mu$ s encender, apagar operación para salida; Q2...Q3 terminal 5 $\mu$ s encender, apagar operación para salida; Q0...Q1 terminal 100 $\mu$ s turn-off operación para entrada; otros terminales terminal 5 $\mu$ s turn-off operación para entrada rápida; I0, I1, I6, I7 terminal 35 $\mu$ s turn-on operación para entrada; otros terminales terminal 5 $\mu$ s turn-on operación para entrada rápida; I0, I1, I6, I7 terminal 35 $\mu$ s turn-off operación para entrada; I2...I5 terminal
Tiempo filtro configurable	12 ms para entrada 3 ms para entrada 0 ms para entrada
Lógica de salida discreta	Lógica positiva (fuente)
Elevación	5 A
Frecuencia de salida	0.1 kHz para salida en Q4...Q9 terminal 5 kHz para salida en Q2...Q3 terminal 100 kHz para salida rápida (modo PWM/PLS) en Q0...Q1 terminal
Error de precisión absoluta	+/- 1 % de la escala total para entrada analógica
1 contacto de puerta	0.1 mA para salida transistor
Caída de tensión	<= 1 V
Durabilidad mecánica	>= 20000000 ciclos para salida transistor
Carga de tungsteno	<= 12 W para salida y salida rápida
Tipo de protección	Protección de sobrecarga y cortocircuito en 1 A
Hora de rearme	1 s rearme automático
Capacidad de memoria	256 kB para variables internas RAM 256 kB para aplicación de usuarios y datos RAM con 10000 instrucciones
Orejetas terminales de anillo	256 kB memoria flash integrada para copia de seguridad de la aplicación y de los datos
Mantenido Ti24	2 GB Tarjeta SD opcional
Tipo de batería	BR2032 litio no-recargable, vida batería: 4 yr
Tiempo de backup	1 año en 25 °C por interrupción de fuente de alimentación
Tiempo de ejecución para 1 Kinstrucción	0.3 ms para evento y tarea periódica
Soporte angular	0.2 $\mu$ s Booleano
Soporte adaptable	60 $\mu$ s tiempo de respuesta
Tamaño máximo de las áreas de objeto	512 %M bits de memoria 8000 %MW palabras de memoria 512 %KW palabras constantes 255 %TM temporizadores 255 %C contadores
Reloj en tiempo real	Donde
Deriv. reloj	<= 30 s/mes en 25 °C
Lazo de regulación	Regulador PID ajustable hasta 14 lazos simultáneos
Funciones de posicionamiento	Posición PTO 1 eje(s) sentido horario/antihorario modo (100 kHz) Posición PTO 2 eje(s) impulso/dirección modo (100 kHz)
Función disponible	PWM PLS Generador de frecuencia
Número de entrada de contaje	4 entrada rápida (modo HSC) (contando frecuencia: 100 kHz), contando capacidad: 32 bits
Función de contaje	A/B Impulso/Dirección Monofásico
Pares de nueces	Ethernet con conector RJ45 Enlace serie sin aislar "serie 1" con conector RJ45 e interfaz RS232/RS485 Porta USB con conector USB 2.0 mini B
Suministro	Serie fuente de alimentación de enlace serie en 5 V 200 mA
Velocidad de transmisión	480 Mbit/s - protocolo comunicación: USB 1,2-115,2 kbit/s (115,2 kbit/s por defecto) para long bus de 3 m - protocolo comunicación: RS232 1,2-115,2 kbit/s (115,2 kbit/s por defecto) para long bus de 15 m - protocolo comunicación: RS485
Protocolo de puerto de comunicaciones	: Ethernet protocolo Enlace serie sin aislar : Modbus protocolo maestro/esclavo - RTU/ASCII o Red SoMachine Porta USB : USB protocolo - SoMachine-Red
Puerto Ethernet	10BASE-T/100BASE-TX 1 puerto con 100 m cable cobre

Servicio de comunicación	<p>Cliente DHCP  Ethernet/Adaptador IP  Servidor Modbus TCP  Cliente Modbus TCP  Dispositivo esclavo Modbus TCP</p>
Señalizaciones en local	<p>Link de reed Ethernet amarillo para Link (Link estado)  Actividad de red Ethernet verde para ACT  1 LED verde para SL  1 LED por canal verde para estado de E/S  1 LED rojo para BAT  1 LED verde para tarjeta SD de acceso (SD)  1 LED rojo para error de módulo (ERR)  1 LED verde para RUN  1 LED verde para PWR</p>
Consecutivo, seguido, continuo, adosado	<p>USB 2.0 mini B conector para un terminal de programación  Conector, 4 terminales para entradas analógicas  Bornero, 3 terminales para conexión de la fuente de alimentación de 24 V CC  Desmontable bornero de tornillo para salidas  Bornero de tornillo extraíble para entradas</p>
Longitud de cable	<p>&lt;= 1 m cable sin apantallar para entrada analógica  &lt;= 30 m cable sin apantallar para entrada digital  &lt;= 3 m cable apantallado para salida rápida  &lt;= 30 m cable sin apantallar para salida  &lt;= 10 m cable apantallado para entrada rápida</p>
Aislamiento	<p>Sin aislamiento entre las entradas analógicas  Sin aislamiento entre la entrada analógica y la lógica interna  500 V CA entre la salida y la lógica interna  Sin aislamiento entre las entradas  500 V CA entre la entrada rápida y la lógica interna  500 V CA entre la entrada y la lógica interna</p>
Marca	CE
Soporte de montaje	<p>Placa o panel con juego de fijación  Tipo de tapón TH35-7.5 perfil de acuerdo con IEC 60715  Tipo de tapón TH35-15 perfil de acuerdo con IEC 60715</p>
Altura	70 mm
Profundidad	70 mm
Anchura	110 mm
Peso del producto	0,395 kg

## Entorno

Normas	<p>EN/IEC 60664-1  EN/IEC 61131-2  EN/IEC 61010-2-201</p>
Certificaciones	<p>CSA  CULus  LR  IACS E10  RCM  EAC  DNV-GL</p>
Característica medioambiental	Ubicación peligrosa y ordinaria
Resistencia a descargas electrostáticas	<p>4 kV en contacto de acuerdo con EN/IEC 61000-4-2  8 kV en aire de acuerdo con EN/IEC 61000-4-2</p>
Resistencia a campos electromagnéticos	<p>1 V/m ( 2...2.7 GHz) de acuerdo con EN/IEC 61000-4-3  3 V/m ( 1.4 GHz...2 GHz) de acuerdo con EN/IEC 61000-4-3  10 V/m ( 80 MHz...1 GHz) de acuerdo con EN/IEC 61000-4-3</p>
Resistencia a campos magnéticos	30 A/m en 50...60 Hz de acuerdo con EN/IEC 61000-4-8
Resistencia a transitorios rápidos	<p>1 kV para enlace serie de acuerdo con EN/IEC 61000-4-4  1 kV para línea Ethernet de acuerdo con EN/IEC 61000-4-4  1 kV para E/S de acuerdo con EN/IEC 61000-4-4  2 kV para salida relé de acuerdo con EN/IEC 61000-4-4  2 kV para líneas de alimentación de acuerdo con EN/IEC 61000-4-4</p>

Resistencia a sobretensiones	0.5 kV para líneas de potencia (DC) en modo común de acuerdo con EN/IEC 61000-4-5 1 kV para salida relé en modo diferencial de acuerdo con EN/IEC 61000-4-5 1 kV para líneas de potencia (AC) en modo diferencial de acuerdo con EN/IEC 61000-4-5 0.5 kV para líneas de potencia (DC) en modo diferencial de acuerdo con EN/IEC 61000-4-5 1 kV para cable apantallado en modo común de acuerdo con EN/IEC 61000-4-5 1 kV para E/S en modo común de acuerdo con EN/IEC 61000-4-5 2 kV para salida relé en modo común de acuerdo con EN/IEC 61000-4-5 2 kV para líneas de potencia (AC) en modo común de acuerdo con EN/IEC 61000-4-5
Resistance to conducted disturbances, induced by radio frequency fields	10 Vrms (frecuencia de punto (2, 3, 4, 6.2, 8.2, 12.6, 16.5, 18.8, 22, 25 MHz)) de acuerdo con especificación Marina (LR, ABS, DNV, GL) 3 Vrms (0.1...80 MHz) de acuerdo con especificación Marina (LR, ABS, DNV, GL) 10 Vrms (0,15...80 MHz) de acuerdo con EN/IEC 61000-4-6
Soporte de sujeción de cables	Emisiones radiadas de acuerdo con EN/IEC 55011 Clase A 10 m, 200 MHz...1 GHz : 47 dBµV/m QP Emisiones radiadas de acuerdo con EN/IEC 55011 Clase A 10 m, 30...230 MHz : 40 dBµV/m QP Emisiones conducidas de acuerdo con EN/IEC 55011 líneas de alimentación, 1.5...30 MHz : 63 dBµV/m QP Emisiones conducidas de acuerdo con EN/IEC 55011 líneas de alimentación, 150 kHz...1.5 MHz : 79...63 dBµV/m QP Emisiones conducidas de acuerdo con EN/IEC 55011 líneas de alimentación, 10...150 kHz : 120...69 dBµV/m QP Emisiones conducidas de acuerdo con EN/IEC 55011 líneas de potencia (AC), 0.5...300 MHz : 73 dBµV/m QP/60 dBµV/m AV Emisiones conducidas de acuerdo con EN/IEC 55011 líneas de potencia (AC), 0.15...0.5 MHz : 79 dBµV/m QP/66 dBµV/m AV
Inmunidad a microcortes	10 ms
Temperatura ambiente de funcionamiento	-10...35 °C para instalación vertical -10...55 °C para instalación horizontal
Temperatura ambiente de almacenamiento	-25...70 °C
Humedad relativa	10...95 % sin condensación en almacenamiento 10...95 % sin condensación en operación
Grado de protección IP	IP20 con cub. protec. colocada
Grado de contaminación	<= 2
Altitud máxima de funcionamiento	0...2000 m
Altitud de almacenamiento	0...3000 m
Resistencia a las vibraciones	1 gn (frecuencia de vibración: 8.4...150 Hz) sobre montaje de panel 1 gn (frecuencia de vibración: 8.4...150 Hz) sobre carril simétrico 3.5 mm (frecuencia de vibración: 5...8.4 Hz) sobre montaje de panel 3.5 mm (frecuencia de vibración: 5...8.4 Hz) sobre carril simétrico
Resistencia a los choques	147 m/s² (test duración de la onda:11 ms)

### Sostenibilidad de la oferta

Estado de oferta sostenible	Producto Green Premium
RoHS (código de fecha: AASS)	Conforme - desde 1415 - <a href="#">Declaración de conformidad de Schneider Electric</a>
REACH	La referencia contiene SVHC sobre el umbral - <a href="#">go to CaP for more details</a>
Perfil ambiental del producto	Disponible <a href="#">Descargar Perfil Medioambiental</a>
Instrucciones para el fin del ciclo de vida del producto	DISPONIBLE <a href="#">Descargar Manual De Gestión Residuos</a>

### Información Logística

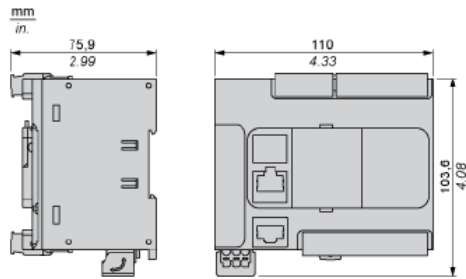
País de Origen	China
----------------	-------

Ficha de producto  
Dimensions Drawings

TM221CE24T

---

Dimensions

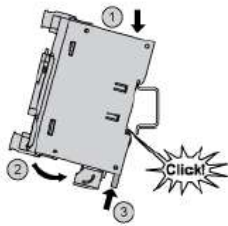


Ficha de producto  
Mounting and Clearance

TM221CE24T

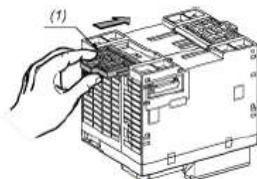
---

Mounting on a Rail



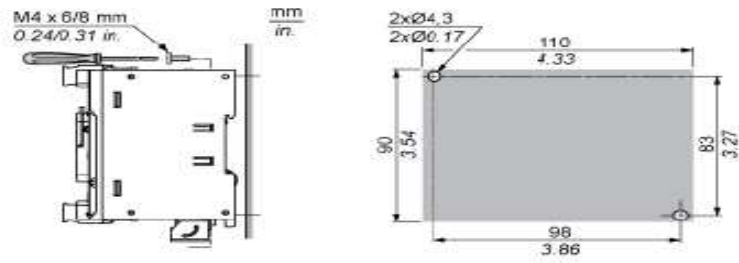
---

Direct Mounting on a Panel Surface



(1) Install a mounting strip

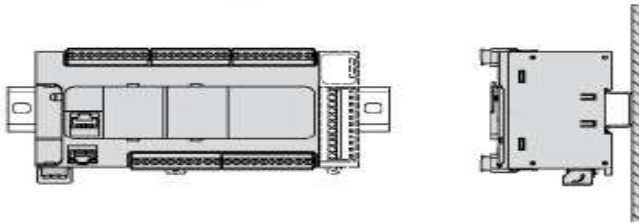
## Mounting Hole Layout



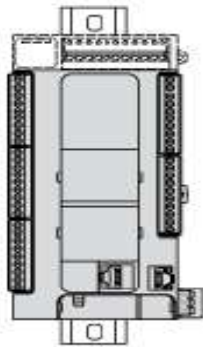
## Mounting

---

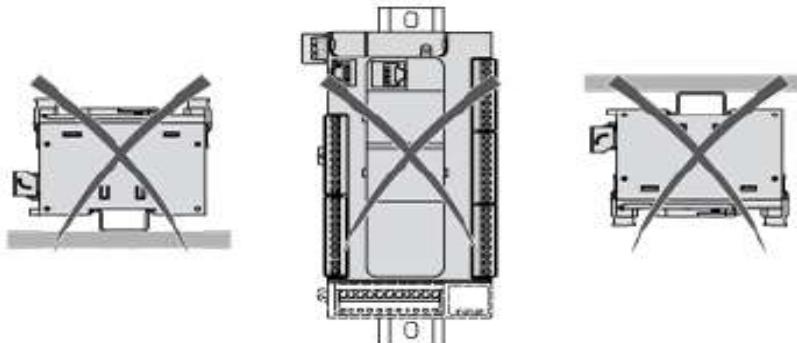
### Correct Mounting Position



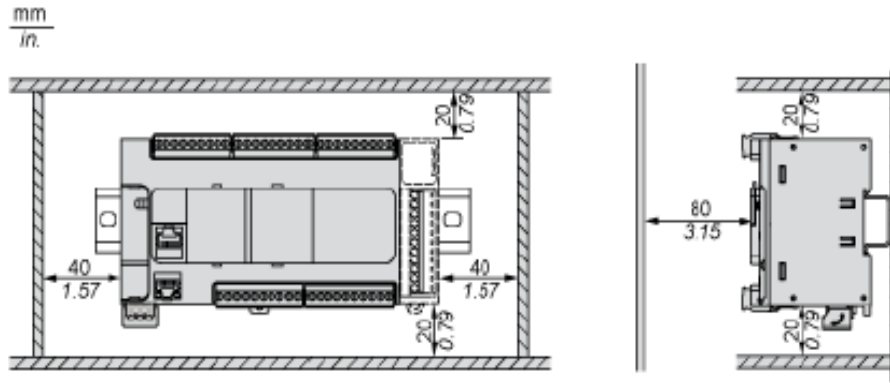
### Acceptable Mounting Position



### Incorrect Mounting Position



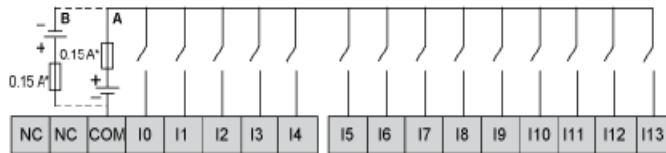
## Clearance



## Ficha de producto Connections and Schema

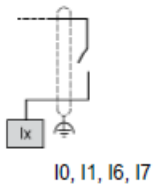
## TM221CE24T

### Digital Inputs

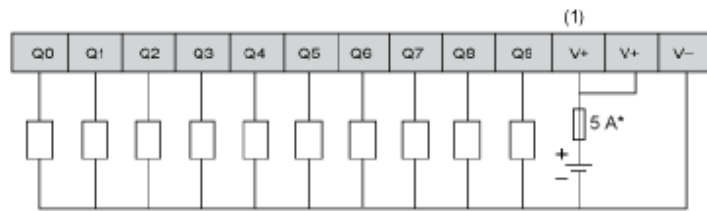


- (\*) Type T fuse
- (A) Sink wiring (positive logic).
- (B) Source wiring (negative logic).

### Connection of the Fast Inputs



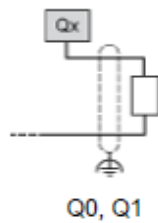
## Transistor Outputs



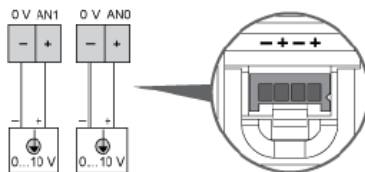
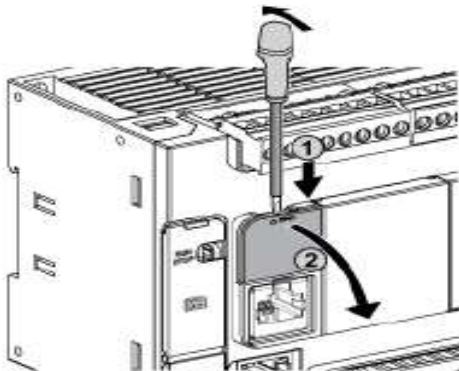
(\*) Type T fuse

(1) The V+ terminals are connected internally.

## Connection of the Fast Outputs



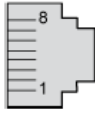
## Analog Inputs



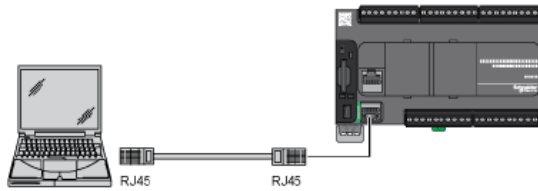
The (-) poles are connected internally.

Pin	Wire Color
0 V	Black
AN1	Red
0 V	Black
AN0	Red

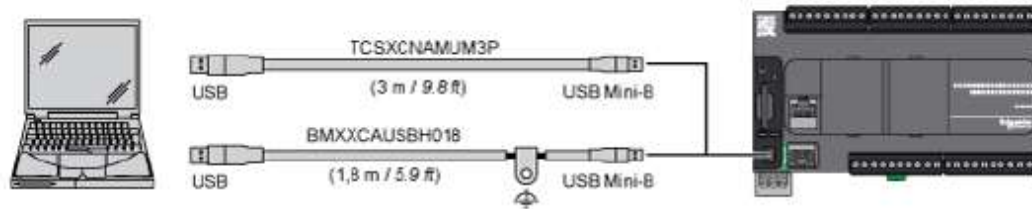
## Ethernet Connection



Pin N°	Signal
1	TD+
2	TD-
3	RD+
4	-
5	-
6	RD-
7	-
8	-



## USB Mini-B Connection



## SL1 Connection

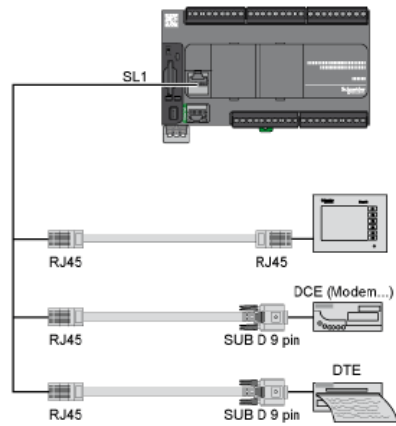


SL1

N °	RS 232	RS 485
1	RxD	N.C.
2	TxD	N.C.
3	RTS	N.C.
4	N.C.	D1
5	N.C.	D0
6	CTS	N.C.
7	N.C.*	5 Vdc
8	Common	Common

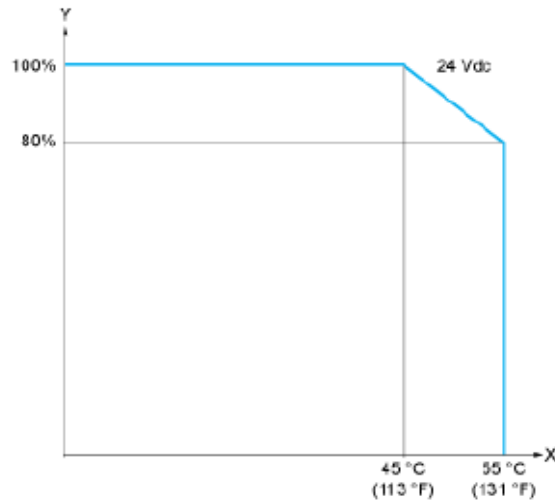
N.C.: not connected

\* : 5 Vdc delivered by the controller. Do not connect.



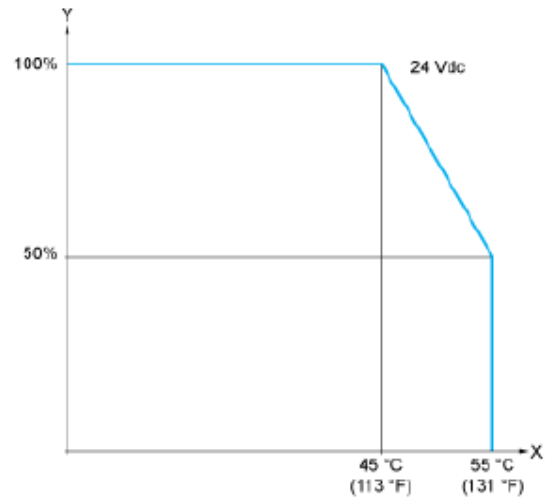
Derating Curves

Embedded Digital Inputs (No Cartridge)



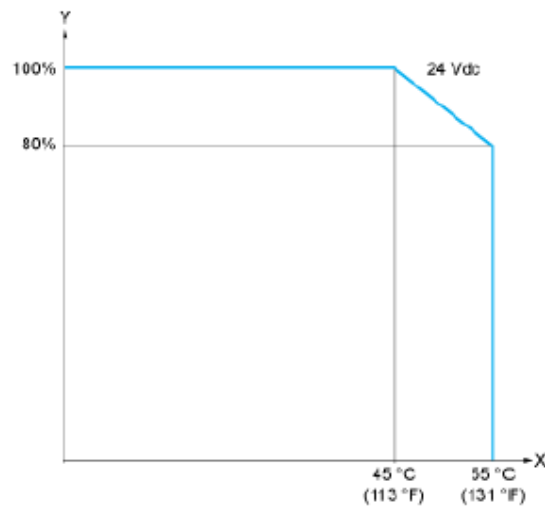
X: Ambient temperature  
Y: Input simultaneous ON ratio

Embedded Digital Inputs (with Cartridge)



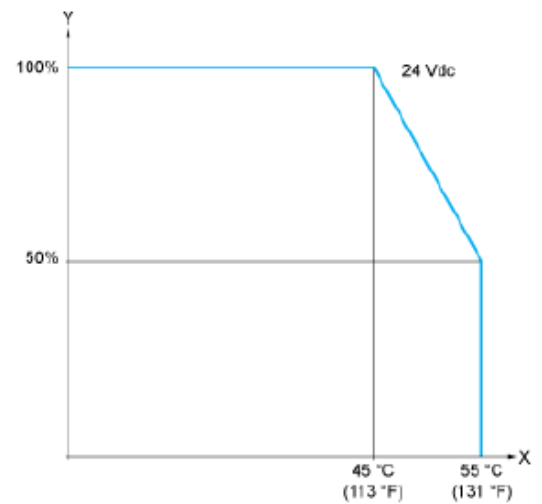
X: Ambient temperature  
Y: Input simultaneous ON ratio

Embedded Digital Outputs (No Cartridge)



X: Ambient temperature  
Y: Output simultaneous ON ratio

Embedded Digital Outputs (with Cartridge)



X: Ambient temperature  
Y: Output simultaneous ON ratio

## Anexo F: Plano buje sujetador

