

**UNIVERSIDAD NACIONAL “JORGE BASADRE GROHMANN”**

**FACULTAD DE CIENCIAS**

**Escuela Académico Profesional de Física Aplicada**

**Especialidad de Energías Renovables**

**Diseño, Construcción y Evaluación de un Micro  
Aerogenerador usando Materiales Reciclables**

**TESIS**

Presentada por

**Bach. RIGOBERTO BERNABÉ COAQUERA**

**Para optar el Título Profesional de**

**LICENCIADO EN FÍSICA APLICADA**

**TACNA – PERÚ**

**2013**

**UNIVERSIDAD NACIONAL "JORGE BASADRE GROHMANN"**

**FACULTAD DE CIENCIAS**

TESIS N° 190

TÍTULO PROFESIONAL DE LICENCIADO  
EN FÍSICA APLICADA

El secretario Académico Administrativo de la Facultad de Ciencias, certifica que mediante la resolución de Facultad N° 7316-2012-FACI/UNJBG el consejo de facultad designo como jurado calificador para la sustentación de la tesis "DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y EVALUACIÓN DE UN MICRO AEROGENERADOR USANDO MATERIALES RECICLABLES"

El mismo que estuvo conformado por:

PRESIDENTE : MSc. CESAR EFRAÍN RIVASPLATA CABANILLAS  
SECRETARIO : LIC. CARLOS ALBERTO ZAVALETA CABALLERO  
VOCAL : MSc. RAFAEL NERY LIÑAN ABANTO

Quienes calificaron el trabajo de tesis sustentado en acto público el día 14 de marzo del 2013 a las 10:15 horas, por el Bachiller RIGOBERTO BERNABÉ COAQUERA de la Escuela Académico Profesional de Física Aplicada, para optar el Título Profesional de Licenciado en Física Aplicada.

El jurado calificador en forma secreta e individual, se pronunció sobre el calificativo del trabajo expuesto, procediendo a emitir el siguiente resultado:

Aprobado por unanimidad con el calificativo de BUENO con nota de QUINCE (15).

Para ratificar lo detallado firman:



MSc. César Efraín Rivasplata Cabanillas  
Presidente:



LIC. Carlos Alberto Zavaleta Caballero  
Secretario



MSc. Rafael Nery Liñan Abanto  
Vocal

Al ser que me permite estar aquí  
y aprender, que paso a paso se  
construye una vida.

A mis queridos padres Tomás y  
Elena que depositaron su  
confianza en mí para terminar lo  
que había comenzado.

## **AGRADECIMIENTOS**

- Al Prof. Carlos Polo Bravo, por su guía y apoyo, sin las cuales no hubiera sido posible el desarrollo de este trabajo.
- A mis profesores por sus enseñanzas.
- A mis compañeras de trabajo en el Centro de Energías Renovables, con quienes al intercambiar conocimientos pude también compartir vivencias.
- A mis amigas y amigos que con su consejo y apoyo incesante me animaron a cumplir una meta más en mi vida.

## CONTENIDO

	Página
DEDICATORIA .....	II
AGRADECIMIENTOS .....	III
CONTENIDO .....	IV
INDICE DE FIGURAS .....	VII
INDICE DE TABLAS .....	VIII
NOMENCLATURA .....	XI
RESUMEN .....	XII
INTRODUCCIÓN .....	XIV
CAPÍTULO 1. PLANTEAMIENTO DEL ESTUDIO .....	1
1.1. Planteamiento del problema .....	1
1.1.1. Energía .....	1
1.1.2. La energía eólica en Perú .....	3
1.1.3. Situación actual .....	3
1.1.4. Materiales reciclables .....	5
1.1.5. El PVC .....	7
1.2. Formulación del problema .....	8
1.3. Justificación de la Investigación .....	9
1.3.1. Social .....	9
1.3.2. Económico ambiental .....	10
1.3.3. Educativo .....	11
1.4. Objetivos .....	11
1.4.1. Objetivo General .....	11
1.4.2. Objetivos Específicos .....	12
1.5. Hipótesis .....	12

1.6. Variables de Estudio.....	13
1.6.1. Variables dependientes .....	13
1.6.2. Variables independientes: .....	13
CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO .....	14
2.1. Antecedentes .....	14
2.2. Energía Eólica .....	17
2.4. Aerogenerador .....	22
2.5. Partes de un aerogenerador de eje horizontal .....	23
2.5.1. Rotor.....	23
2.5.2. Góndola.....	28
2.5.3. Generador .....	28
2.5.4. Multiplicador .....	30
2.5.5. Sistema de control.....	30
2.5.6. Sistema de orientación .....	31
2.5.7. Torre.....	32
2.5.8. Otros componentes de un Sistema de Energía Eólica .....	34
2.6. Energía del viento.....	40
2.7. Potencia generada .....	43
2.8. Curva de potencia de un aerogenerador .....	43
2.9. Coeficiente de potencia .....	46
CAPÍTULO 3. MATERIALES Y MÉTODOS.....	48
3.1. Etapa de Diseño y Construcción .....	48
3.1.1. Generador .....	50
3.1.2. Aspas .....	53
3.1.3. Góndola.....	55
3.1.4. Veleta o Cola .....	55
3.1.5. Torre.....	56
3.1.6. Componentes electrónicos.....	57
3.2. Etapa de Evaluación.....	59
3.3. Instrumentos y Equipos.....	59

3.4. Técnicas y método de recolección de datos.....	60
3.4.1. Evaluación en Laboratorio.....	60
3.4.2. Evaluación bajo condiciones reales.....	66
CAPÍTULO 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	71
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	94
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS .....	97
ANEXOS .....	101

## ÍNDICE DE FIGURAS

	Pagina
Figura 1. Aerogeneradores contruidos de manera artesanal .....	17
Figura 2. Máquinas eólicas de eje horizontal .....	20
Figura 3. Eólicas de eje vertical Savonius, Darrieux y Giromill .....	22
Figura 4. Componentes de un aerogenerador de eje horizontal .....	23
Figura 5. Perfiles NACA.....	27
Figura 6. Esquemas de Instalaciones eólicas: conectada a la Red y de uso doméstico .....	39
Figura 7. Potencia disponible según el diámetro del rotor para una velocidad media de 2 m/s .....	42
Figura 8. Gráficas de potencia y eficiencia de aerogeneradores .....	45
Figura 9. Coeficiente de potencia de un aerogenerador.....	46
Figura 10. Primer prototipo de aerogenerador construido .....	49
Figura 11. Motor elegido para el micro aerogenerador.....	51
Figura 12. Motor en un soporte de fierro.....	51
Figura 13. Materiales de PVC utilizados.....	52
Figura 14. Taladrado de agujeros en el buje .....	53
Figura 15. Proceso de corte de las aspas de tubo PVC .....	54
Figura 16. Góndola y rodaje acoplado a la base de la góndola. ....	55
Figura 17. Proceso de armado de la veleta.....	56
Figura 18. Torre construida con tubo de fierro de 4" de diámetro. ....	57
Figura 19. Esquema y foto de las partes principales del Micro Aerogenerador.....	58
Figura 20. Primeras evaluaciones en los exteriores del CERT. ....	61

Figura 21.	Evaluación dentro de las instalaciones del CERT.....	61
Figura 22.	Evaluación en laboratorio usando un túnel cilíndrico .....	62
Figura 23.	Tapado del ingreso de aire al ventilador .....	63
Figura 24.	Disposición del equipo para la evaluación.....	65
Figura 25.	Primeras pruebas realizadas en el techo del CERT.....	66
Figura 26.	Instalación del microaerogenerador para la evaluación en condiciones normales.....	67
Figura 27.	Lugares donde se evaluó el microaerogenerador .....	68
Figura 28.	Disposición del equipo para realizar la evaluación en Campo.....	69
Figura 29.	Retiro del microaerogenerador y descarga de la información del datalogger.....	70
Figura 30.	Curva Corriente vs Voltaje obtenida del Microaerogenerador .....	73
Figura 31.	Potencia Vs, Velocidad de viento para aspas construidas en base a tubo PVC de 2" .....	75
Figura 32.	Potencia Vs, Velocidad de viento para aspas construidas en base a tubo PVC de 4" .....	77
Figura 33.	Velocidad de arranque para configuraciones de 3 aspas y 40 cm de diámetro.....	78
Figura 34.	Corriente y voltaje obtenidos de la configuración: 3 aspas, 40 cm rotor .....	80
Figura 35.	Potencia eléctrica para la configuración: 3 aspas, 40 cm rotor, aspas construidas en base a tubo pvc de 4" para diferentes velocidades de viento .....	80
Figura 36.	Potencia mecánica disponible para diferentes velocidades de viento para un área barrida por un rotor de 40 cm de diámetro.....	81

Figura 37.	Coeficiente de Potencia del microaerogenerador .....	82
Figura 38.	Velocidad de viento obtenido en la etapa de evaluación en campo (octubre del 2012) .....	83
Figura 39.	Velocidad de viento en un tiempo de 5 días obtenido en la etapa de evaluación en campo.....	84
Figura 40.	Velocidad de viento durante un día normal (21 de octubre) en la etapa de evaluación de campo.....	85
Figura 41.	Voltaje obtenido en la etapa de evaluación en campo.....	86
Figura 42.	Voltaje en un tiempo de 5 días obtenido en la etapa de evaluación en campo (16 al 21 de octubre del 2012) .....	86
Figura 43.	Voltaje durante un día normal (21 de octubre) en la etapa de evaluación de campo .....	87
Figura 44.	Potencia generada por el microaerogenerador .....	88
Figura 45.	Promedio de temperatura y velocidad de viento obtenidos durante el mes de octubre de 2012.....	90
Figura 46.	Promedio de temperatura y voltaje obtenidos durante el mes de octubre de 2012 .....	91
Figura 47.	Promedio diario de energía generada y disponible .....	93

## ÍNDICE DE TABLAS

	Página
Tabla 1. Voltajes y corrientes obtenidas del Micro Aerogenerador sin considerar la configuración de las aspas .....	72
Tabla 2. Datos de Potencia obtenida para diferentes Velocidades de viento del Micro aerogenerador con aspas construidas en base a Tubo PVC de 2" .....	74
Tabla 3. Datos de Potencia obtenida para diferentes Velocidades de viento del Micro aerogenerador con aspas construidas en base a Tubo PVC de 4" .....	76
Tabla 4. Velocidad de arranque para configuraciones de 3 aspas y 40 cm de diámetro .....	78
Tabla 5. Datos de la evaluación detallada de la configuración 3 aspas, 40 cm rotor, aspas construidas en bases a tubo pvc de 4" para diferentes velocidades de viento.....	75
Tabla 6. Promedios diarios de temperatura, velocidad de viento y voltaje obtenidos en la evaluación en campo del micro aerogenerador (Mes octubre de 2012).....	89
Tabla 7. Promedios diarios de Energía generada y disponible, obtenidos de la evaluación en campo del micro aerogenerador (octubre de 2012).....	92

## NOMENCLATURA USADA

A	:	Área de captación [m <sup>2</sup> ]
Amp	:	Amperios
$\delta$	:	Densidad del aire [kg/m <sup>3</sup> ]
D	:	Diámetro del rotor
Ec	:	Energía cinética [joule/s]
I	:	Intensidad de corriente eléctrica
CIPM	:	Centro Internacional de Pesas y Medidas
m	:	Flujo de aire [kg/s]
MW	:	Mega Watts, unidad de Potencia
m/s	:	Metros por segundo unidad de Velocidad del viento
P <sub>m</sub>	:	Energía teórica máxima por unidad de tiempo y de área
P <sub>a</sub>	:	Potencia obtenible por unidad de área de rotor
P <sub>t</sub>	:	Potencia total para el área descrita por las palas
P	:	Potencia obtenible de una máquina eólica
PVC	:	Poli Cloruro de Vinilo del inglés (poly vinyl chloride)
$\pi$	:	Constante Pi = 3.1416
R	:	Radio del rotor
v	:	Velocidad del viento [m/s]
V	:	Diferencia de potencial eléctrico (voltaje)
V <sub>conex</sub>	:	Velocidad a la que inicia el arranque un aerogenerador
V <sub>nom</sub>	:	Velocidad nominal
Wh	:	Watts hora, unidad de energía
WWEA	:	World Wind Energy Association

## RESÚMEN

Este trabajo tiene por objetivo obtener energía eléctrica con un microaerogenerador diseñado y construido con materiales reciclables, evaluando la eficiencia del mismo bajo condiciones controladas en laboratorio y bajo las condiciones de viento de Tacna.

El microaerogenerador fue diseñado para ser probado en diferentes configuraciones en cuanto a las características del rotor, en este caso, el diámetro, el número de aspas y el perfil de las aspas. El material predominante es el PVC. En sus diferentes formas, Tés, Reducciones y tubos de 4" y 2". Así como, placas en desuso de Acrílico, rodajes y tornillos, además de elementos de electrónica básicos. El generador usado es un motor de corriente continua de un Equipo Betamax.

Los datos que se obtuvieron demuestran que la configuración óptima, para este micro aerogenerador en especial, es de tres aspas, con un diámetro de 40 cm y obtenidas a partir de tubos PVC de 4".

Se ha logrado generar la electricidad necesaria para la carga de una batería de celular, una lámpara led de emergencia o un equipo mp3, con una eficiencia promedio de 3,45% bajo condiciones de viento de Tacna.

Los resultados obtenidos nos indican que sí es posible diseñar y construir un microaerogenerador utilizando materiales reciclables para la generación de energía eléctrica a pequeña escala y para un día con velocidad promedio de 1,69 m/s, la energía generada en promedio es de 1,21 watts hora; la velocidad de arranque es de 1,48 m/s.

## INTRODUCCIÓN

La energía eólica es aquella obtenida del viento generado por efecto de las corrientes de aire, y que es transformada en otras formas útiles para las actividades humanas. Este tipo de energía es un recurso renovable, autóctono, abundante, limpio y disminuye las emisiones de gases de efecto invernadero al reemplazar los combustibles fósiles de las termoeléctricas por energía “verde”.

En el año 2010, la capacidad instalada de energía eólica en todo el mundo llegó a los 196,63 GigaWatts, luego de 159,05 GW en 2009, 120,9 GW en 2008, y 93,93 GW en 2007.

Latino América (1,2 %) y África (0,4 %) continúan jugando un papel poco relevante dentro de las nuevas instalaciones.

La WWEA cree posible llegar a una capacidad instalada a nivel mundial de 600 Giga Watts para el año 2015 y más de 1'500 Giga Watts para el 2020.

Alberto Ríos Villacorta, experto en energías renovables de la Universidad Europea de Madrid, estima que Brasil es el país más avanzado en energías renovables en Latinoamérica.

A nivel nacional se destaca la construcción de tres instalaciones eólicas en el interior del país anunciadas para el año 2012. Alberto Ríos expresa que el Perú se beneficiará notablemente, pues reducirá la dependencia eléctrica del gas, que podrá ser empleado en fines industriales.

Se prevé que a finales de 2012 se construirán tres instalaciones eólicas en las localidades de Talara (Piura), Cupisnique (Cajamarca) y en Marcona (Ica).

La compañía española Montealto ha comenzado la ejecución de dos parques eólicos en Perú, concretamente en Cupinisque y Talara, en colaboración con Energía Eólica SA, la adjudicataria de la subasta convocada por el gobierno peruano.

Según la información facilitada por Montealto, los dos parques eólicos sumarán 110 megavatios de potencia (80 MW en Cupinisque y 30 MW en Talara), aportada por un total de 62 aerogeneradores, que generarán una

energía equivalente a 420 gigavatios hora al año, suficientes para abastecer a más de 240 000 hogares. Los parques ahorrarán la emisión de 240 876 toneladas de dióxido de carbono a la atmósfera.

El presente trabajo de investigación trata de la producción de electricidad usando un microaerogenerador; el cual ha sido diseñado, construido y evaluado; aunque el recurso eólico en la ciudad de Tacna es escaso, con una velocidad del viento en promedio anual de 2,5 m/s; con este trabajo de investigación se quiere demostrar que es posible generar energía eléctrica para bajas velocidades de viento propio del lugar; y sobre todo que se tiene el conocimiento para construir aerogeneradores de baja potencia.

Para ello se evaluará un microaerogenerador construido en base a materiales reciclables el cual ha sido probado en 18 configuraciones de rotor, es decir, teniendo en cuenta el número de aspas, el diámetro de las aspas y el diámetro del tubo con el cual se hizo las aspas, de los que se escogerá el óptimo, es decir, el más eficiente para utilizarse en la generación y uso de energía eléctrica. Además, se evaluó en una zona cercana sometiendo este a las condiciones de viento normales de Tacna.

A continuación se describe brevemente el desarrollo del presente trabajo de investigación. En el primer capítulo se menciona aspectos básicos sobre la energía eólica, desde su origen hasta la actualidad así como el uso y aprovechamiento de los materiales reciclables. La justificación de la investigación, los objetivos que se plantean, la hipótesis y las variables de estudio.

En el segundo capítulo se desarrolla un marco teórico con respecto a la energía eólica: su aprovechamiento usando aerogeneradores, se describe los tipos, y las partes que lo componen; además de la base teórico matemática que nos sirve para determinar la energía aprovechable del viento, las curvas de potencia así como el coeficiente de potencia de un aerogenerador.

En el capítulo tercero se detallan los materiales y métodos usados en las etapas de construcción y evaluación; se complementa esta información con fotos y esquemas del proceso de construcción del micro aerogenerador, además de los inconvenientes que se dieron durante esta etapa.

El capítulo cuatro contiene los resultados obtenidos en la etapa de evaluación, tanto en laboratorio como en la evaluación bajo condiciones normales; aquí se presenta los datos en forma de Cuadros y Gráficos, para ser analizados y discutidos.

En el capítulo cinco se señalan brevemente las conclusiones y recomendaciones del presente trabajo de investigación.

Se ha realizado la investigación según los pasos previstos, por un lado se ha construido un micro aerogenerador sencillo y compacto, capaz de generar energía eléctrica.

Se ha evaluado el microaerogenerador estableciéndose las curvas de potencia para 18 configuraciones de rotor, además del coeficiente de potencia de la configuración óptima, para luego ser evaluado bajo condiciones normales durante el mes de octubre de 2012.

# **CAPÍTULO I**

## **PLANTEAMIENTO DEL ESTUDIO**

### **1.1. Planteamiento del problema**

#### **1.1.1. Energía**

Durante miles de años, el hombre ha basado su desarrollo en la utilización de fuentes de energía locales, basándose en el fuego y en la fuerza animal (incluida la propia). A partir aproximadamente del año 3000 a.c. se empieza a utilizar una fuente de energía diferente, que permite el movimiento de pequeñas embarcaciones en el Nilo sin la necesidad de efectuar un arrastre desde las orillas del río: el viento.

Esta situación se mantiene estable hasta hace unos trescientos años, cuando surge la primera revolución industrial, basada esencialmente en el carbón. Así, durante los tres últimos siglos, la industrialización de todos los países del mundo se ha basado esencialmente en la combustión de carbones e hidrocarburos. Las mayores exigencias de

calidad de vida de los países más avanzados, ha acarreado una fuerte dependencia y consumo de estas fuentes de energía.

El consumo específico energético (por persona) fue incrementándose exponencialmente en estos trescientos años, a la vez que lo hacía la población mundial. La consecuencia ya la conocemos: las fuentes tradicionales de energía, que necesitaron millones de años para formarse (proveniente en su mayor parte de la descomposición de materia orgánica) se están agotando.

Debido a esto, también se aumentó la construcción de centrales basadas en energía convencional: hidroeléctrica, petróleo, carbón, gas natural, nuclear, etc., y a la par se ha desarrollado también centrales basadas en energías renovables: eólica, solar, biomasa, biogás, geotérmica mareomotriz, etc. Siendo estas últimas las menos contaminantes.

La energía eólica supone actualmente una fuente de energía, competitiva con otras fuentes de energías renovables e incluso con las tradicionales no renovables. Según datos del Consejo Eólico Mundial (Global Wind Energy Council. GWEC), la nueva potencia

eólica instalada en 2009 llegó a los 37,5 GW, con lo que la cifra acumulada llega a los 157,9 GW. A pesar de la crisis global la eólica creció en el año 2009 un 31%. La tercera parte de la nueva potencia se instaló en China.

### **1.1.2. La energía eólica en Perú**

El desarrollo de la energía eólica en Perú, para generación eléctrica se puede considerar como incipiente. Hay algunos proyectos ya en operación, sin embargo, el conocimiento de la tecnología y sus oportunidades, es limitado, así como la capacidad institucional para acelerar el desarrollo de proyectos eólicos. TECH4CDM (2012)

### **1.1.3. Situación actual**

Aunque la capacidad instalada hasta el momento en el país andino alcanza a penas el megavatio, el país dispone de un potencial eólico superior a los 22 GW. Y según el Atlas Eólico del Perú los departamentos de Ica y Piura, situados en la costa, son las regiones que cuentan con el mayor potencial aprovechable, con 9144 MW y 7554 MW respectivamente, existiendo registros de viento de 5 a 7 m/s en promedio anual.

La demanda de energía eléctrica del país está registrando altas tasas de crecimiento.

Por otro lado, la generación de energía eléctrica es fundamentalmente hidroeléctrica, por lo que depende del régimen de lluvias y además también existe una importante participación del gas natural. La red que abastece de gas natural al país no es suficiente para satisfacer la alta demanda existente, aunque el gobierno está trabajando ya en la ampliación del gasoducto.

Teniendo en cuenta la situación actual, el país necesita diversificar la matriz energética para asegurar el abastecimiento energético y la energía eólica, debido a su alto potencial en el país, se configura como una excelente oportunidad. Además, existen estudios que indican que el régimen de generación hidroeléctrica y el régimen de vientos se complementan a lo largo del año; existe una alta producción hidroeléctrica de diciembre a mayo y un régimen estable de recurso eólico favorable de mayo a noviembre:

En nuestra localidad, si bien es cierto no se cuenta con el recurso eólico en grandes cantidades (promedio en Tacna de 2,5 m/s), es

posible dar a conocer con este sistema las formas de aprovechar este recurso a pequeña escala, para recarga de sistemas que consuman poca energía eléctrica, por ejemplo, celulares, linternas y luminarias led de bajo consumo.

#### **1.1.4. Materiales reciclables**

El mundo se encuentra en una sociedad de la información, en donde se ha vuelto indispensable el uso de aparatos eléctricos y electrónicos, pero esto ha generado en todo el mundo una gran problemática de carácter ambiental, social y cultural con el manejo de los aparatos y componentes que son desechados de los distintos aparatos y equipos que usan las personas en esta sociedad. FUNDACIÓN PENSAR VERDE (2012)

Según Informes de la ONU, en el mundo se acumulan en un año más de 45 millones de toneladas de desechos electrónicos, los cuales causan enormes perjuicios al medio ambiente debido a su nivel tóxico. FUNDACIÓN PENSAR VERDE (2012)

El reciclaje electrónico debe separar, clasificar y valorizar los elementos electrónicos que han cumplido su ciclo útil. Fundación Pensar Verde (2012)

En el ámbito local los equipos electrónicos son almacenados, desmantelados y usados como repuestos para reparar otros equipos; o simplemente son desechados.

Entre estos elementos rescatables y reciclables están los motores de corriente continua, estos se encuentran en autos (ventiladores, extractores de aire, etc.), computadoras, equipos de sonido, etc. Una particularidad de estos motores es que pueden ser usados como generadores eléctricos, La eficiencia de conversión es mucho menor que un generador diseñado para tal fin. Aun así es un elemento que puede ser aprovechado para generar electricidad dándole movimiento de rotación al eje del motor. En cuanto a los motores de corriente alterna, se encuentran en equipos electrodomésticos y en equipos industriales, pueden aprovecharse cambiando el rotor por unos imanes de tal manera que al girar el eje, produzcan corriente en los devanados del campo.

### **1.1.5. El PVC**

El PVC Poli Cloruro de Vinilo del inglés (poly vinyl chloride) se caracteriza por ser dúctil y tenaz; presenta estabilidad dimensional y resistencia ambiental. Además, es reciclable por varios métodos.

Es un material altamente resistente, los productos de PVC pueden durar hasta más de sesenta años como se comprueba en aplicaciones tales como tuberías para conducción de agua potable y sanitarios; de acuerdo al estado de las instalaciones se espera una prolongada duración del PVC así como ocurre con los marcos de puertas y ventanas.

El PVC está siendo usado en muchas aplicaciones, debido a su bajo peso, resistencia a la corrosión y humedad, bajo costo y otras características que lo hacen de fácil adaptabilidad para diversas aplicaciones en nuestra sociedad.

Una de las aplicaciones del PVC es en tuberías, destinadas a instalaciones de agua, desagüe y luz, incluidos los accesorios, en sus diversas formas, diámetros, longitudes, grosores y marcas comerciales. El uso de este material en nuestra localidad, debido al

actual auge de la construcción hace que sea fácil de conseguir a bajos precios, en ferreterías o como sobrantes de las construcciones; aprovechando de esta manera las tuberías de PVC descartadas.

## **1.2. Formulación del problema**

Considerando que en nuestro país un gran porcentaje de la población vive en zonas alejadas a fuentes de energía eléctrica convencional. Y siendo necesario el uso de aparatos electrónicos para necesidades básicas como alumbrado y comunicaciones, además estos equipos electrónicos, especialmente los de última generación consumen muy poca energía, es decir, son más eficientes; se plantea la pregunta:

¿Es posible diseñar, construir y evaluar un micro aerogenerador usando materiales reciclables para la generación de energía eléctrica?

### **1.3. Justificación de la Investigación**

#### **1.3.1. Social**

La disponibilidad de energía es esencial para cualquier actividad humana, existiendo una correlación entre el desarrollo social y el consumo de energía. Para lograr un alto nivel de desarrollo de una sociedad se requiere necesariamente disponer de mucha energía, cuyo consumo sólo parcialmente puede ser reducido por un uso más eficiente. La energía requerida es proporcionada todavía mayoritariamente en todo el mundo por fuentes fósiles de energía, que son agotables y contaminantes. Frente a esto hay desde algún tiempo una convicción de que estas fuentes tienen que ser reemplazadas por fuentes renovables de energía.

Con esta investigación se busca promover la conciencia ambiental dando a conocer una forma de aprovechar un recurso renovable como es la energía eólica, usando un micro aerogenerador.

### **1.3.2. Económico ambiental**

La Región Tacna está en zona de desierto y la contaminación que es producida por la quema de combustibles fósiles, aumenta el cambio climático, el efecto invernadero y otros efectos adversos. El segundo problema es que somos consumidores dependientes de los países que poseen grandes reservas de petróleo. (PACCO, 2008). Con esta investigación se busca generar una conciencia ambiental en las personas, y dar a conocer que hay alternativas para la generación de electricidad sin usar combustibles fósiles.

Los materiales que se usarán en la construcción de este micro aerogenerador son materiales reciclables que pueden ser encontrados en equipos antiguos y nuevos que han cumplido su vida útil. Y es posible remplazarlos por materiales similares, siendo una característica común su bajo costo, debido a que pueden encontrarse en los mercados de aparatos usados.

Debido al uso de materiales usados en este experimento se incentiva una cultura ambiental orientada al reciclaje de aparatos electrónicos (motores), para usarlos en equipos que generen energía limpia.

Con este micro aerogenerador se busca aprovechar este bajo potencial para abastecer de energía a sistemas de poco consumo eléctrico como ser: celulares, lámparas led, mp3, mp4, etc. De esta manera se tiene un ahorro energético, usando energía limpia y gratuita como es la energía eólica.

### **1.3.3. Educativo**

El sector educativo también sería una parte beneficiaria de este proyecto, debido a que por sus características es fácil de replicar por alumnos de secundaria o de educación superior; dando a conocer este tipo de tecnología; incentivando además su creatividad para modificar y/o mejorar el micro aerogenerador propuesto en esta investigación.

## **1.4. Objetivos**

### **1.4.1. Objetivo General**

Diseñar, construir y evaluar un Micro Aerogenerador usando materiales reciclables para generar energía eléctrica.

#### **1.4.2. Objetivos específicos**

- Diseñar un Micro Aerogenerador utilizando materiales reciclables.
- Construir un Micro Aerogenerador utilizando materiales reciclables y disponibles en el mercado local.
- Evaluar el coeficiente de potencia del Micro Aerogenerador en laboratorio variando el número, diámetro y perfil de las aspas del rotor.
- Obtener las curvas de potencia y la energía generada del Micro Aerogenerador bajo condiciones de viento en laboratorio y de la ciudad de Tacna.

#### **1.5. Hipótesis**

Es posible diseñar, construir y evaluar un Micro Aerogenerador utilizando materiales reciclables, para la generación de energía eléctrica.

## **1.6. Variables de estudio**

### **1.6.1. Variables dependientes**

- Coeficiente de potencia del micro aerogenerador
- Energía generada por el micro aerogenerador

### **1.6.2. Variables independientes:**

- Velocidad del viento.
- Diámetro del Rotor
- Número de aspas
- Ángulo de ataque de las aspas

## **CAPÍTULO II**

### **MARCO TEÓRICO**

#### **2.1. Antecedentes**

Los molinos de viento existían ya en la más remota antigüedad. Persia, Irak, Egipto y China disponían de máquinas eólicas muchos siglos antes de J.C.; eran utilizados en la molienda del grano. Se trataba de primitivas máquinas eólicas de rotor vertical con varias palas de madera o caña, cuyo movimiento de rotación era comunicado directamente por el eje a las muelas del molino. En China hay referencias de la existencia de molinos de rotor vertical y palas a base de telas colocadas sobre un armazón de madera, que eran utilizados para el bombeo de agua, máquinas conocidas como panémonas, precursoras de los molinos persas.

Los molinos de viento fueron utilizados en Europa en la Edad Media, comenzando a extenderse por Grecia, Italia y Francia. La expansión por el Mediterráneo y toda Europa. Según algunos autores, se debe a los cruzados la introducción de la tecnología eólica en Occidente, si

bien otros opinan que Europa desarrolla su propia tecnología, claramente distinta de la oriental, ya que en Europa se imponen fundamentalmente los molinos de eje horizontal, mientras que los molinos orientales eran de eje vertical.

Sea cual fuese la forma de aparición de estas máquinas en diversos países europeos, lo cierto es que se encuentran abundantes ejemplos de la importancia que los molinos de viento llegaron a tener en diversas aplicaciones; como ejemplo relevante se puede citar los literarios molinos castellanos utilizados para la molienda y los no menos conocidos molinos holandeses usados desde 1430 para la desecación de los polders, todos ellos de eje horizontal. En el siglo XVI Holanda perfecciona el diseño de los molinos y los utiliza para el drenaje; entre los años 1609 y 1612, Beemster Polder fue drenado con la ayuda de estas máquinas; sin embargo, no sólo utilizaron los molinos para drenar el agua, sino también para extraer aceites de semillas, moler grano, etc; precisamente el nombre de molinos proviene de este tipo de aplicaciones. Una idea de la importancia que en el pasado adquirió la energía eólica nos la da el hecho de que en el siglo XVIII, los holandeses tenían instalados y en funcionamiento 20 000 molinos, que les proporcionaban una media de 20 kW cada

uno, energía nada despreciable para las necesidades de aquella época.

Las turbinas modernas fueron desarrolladas a comienzos de 1980, si bien, los diseños continúan en desarrollo. La industria de la energía eólica en tiempos modernos comenzó en 1979 con la producción en serie de turbinas de viento por los fabricantes Kuriant, Vestas, Nordtank, y Bonus. Aquellas turbinas eran pequeñas para los estándares actuales, con capacidades de 20 a 30 kW cada una. Desde entonces, la talla de las turbinas ha crecido enormemente, y la producción se ha expandido a muchos países.

Se ha encontrado publicado en Internet varios Trabajos realizados sobre aerogeneradores artesanales, unos utilizando imanes y bobinas para en generador y otros más sencillos utilizando como en nuestro caso motores de corriente continua como generador; siendo los primeros más eficientes debido a que el generador está diseñado para ese fin a diferencia de los que utilizan un motor que no está diseñado para ser usado como generador de corriente, y tiene pérdidas en los carbones que hacen contacto con los conductores metálicos de cobre. En la Figura 1 se presenta algunos

aerogeneradores artesanales contruidos con materiales reciclables como ser madera, PVC, motores de corriente continua, etc.



Figura 1. Aerogeneradores contruidos de manera artesanal.  
Fuente: <http://www.uv.es>,

## 2.2. Energía eólica

El viento es una masa de aire en movimiento; esta masa de aire posee energía mecánica cinética que es proporcional a su velocidad y puede ser aprovechada en muchas aplicaciones y es lo que denominamos energía eólica.

En principio, la energía eólica podría aplicarse a cualquier uso final puesto que la energía del viento es transformada y entregada a través del eje de la turbina en forma de energía mecánica de rotación, la cual eventualmente podría utilizarse de muchas formas de acuerdo a la necesidad que se presente.

Los principales usos de este recurso energético han sido: bombeo de agua, molienda de granos y generación de electricidad. Se puede decir que las dos primeras aplicaciones tienen muchos años en la historia de la humanidad, mientras que la generación de electricidad es un tema de mucha importancia actual.

### **2.3. Clasificación de las Máquinas eólicas**

Son numerosos los dispositivos que permiten el aprovechamiento de la energía eólica, pudiéndose hacer una clasificación de los mismos según la posición de su eje de giro respecto a la dirección del viento.

#### **2.3.1. Máquinas eólicas de eje horizontal**

En las máquinas eólicas de eje horizontal, para obtener en las palas una velocidad angular regular y uniforme  $w$ , para una determinada velocidad

del viento  $v$  se requiere que tanto la dirección del viento, como su velocidad, se mantengan constantes con respecto a las palas.

Las aeroturbinas de eje horizontal se suelen clasificar según su velocidad de giro o según el número de palas que lleva el rotor aspectos que están íntimamente relacionados, en rápidas y lentas; las primeras tienen un número de palas no superior a 4 y las segundas pueden tener hasta 24. Los principales tipos de máquinas eólicas de eje horizontal, son:

- a) Máquinas que generan un movimiento alternativo, que se utilizan para el bombeo de agua.
- b) Máquinas multipala.
- c) Hélices con palas pivotantes (ángulo de ataque variable).

La hélice puede presentar dos tipos de posiciones frente al viento, como son:

- a) Barlovento upwind, en la que el viento viene de frente hacia las palas, teniendo el sistema de orientación detrás, aguas abajo.

b) Sotavento downwind, en la que el viento incide sobre las palas de forma que éste pasa primero por el mecanismo de orientación y después actúa sobre la hélice.



Figura 2. Máquinas eólicas de eje horizontal.

Fuente: <http://ctmaestella.blogspot.com>

En la Figura 2 se aprecia máquinas eólicas de eje horizontal en diversas formas y número de aspas. La primera usada en molienda de granos, la segunda es un modelo americano destinado al bombeo de agua

subterránea; las otras tres son usadas en generación de electricidad, resaltando la diferencia en el número de aspas.

### **2.3.2. Máquinas eólicas de eje vertical**

En las máquinas eólicas de eje vertical, manteniendo las mismas condiciones regulares en la velocidad del viento y en la velocidad angular de las palas, resulta que éstas pueden estar sometidas a un viento aparente de dirección y velocidad continuamente variables.

La característica principal de los molinos de eje vertical es que no requieren de sistemas de orientación. Ventaja nada despreciable pues evita complejos mecanismos de direccionamiento y elimina los esfuerzos a que se ven sometidas las palas ante los cambios de orientación del rotor. Por su disposición permite colocar los sistemas de conversión prácticamente a nivel de suelo, evitando pesadas cargas en las torres, como ocurre en los de eje horizontal.

Existen dos diseños básicos de rotores de eje vertical: Savonius y Darrieus. El rotor Savonius trabaja esencialmente por arrastre, tiene un alto par de arranque pero su eficiencia es pobre. Por su sencillez y bajo

costo es fácil de construir con técnicas artesanales. Se los emplea en aplicaciones que requieren potencias pequeñas como es el caso de los extractores de aire en grandes edificios industriales o depósitos y en bombeo de agua.



Figura 3. Eólicas de eje vertical Savonius, Darrieux y Giromill.

Fuente: <http://ctmaestella.blogspot.com>

## 2.4. Aerogenerador

Un aerogenerador es una máquina que transforma la energía cinética del viento en energía eléctrica. La fuerza del viento mueve las aspas del aerogenerador, la energía cinética del viento se convierte en energía mecánica rotacional y este movimiento se transmite mediante una serie de engranajes a un generador que produce la energía eléctrica.

## 2.5. Partes de un aerogenerador de eje horizontal

Técnicamente las turbinas de bajo potencial eólico tienen una estructura similar a las grandes, solo que su diseño es más simple. Como en general, el aerogenerador más empleado es el de eje horizontal, a continuación se hace una descripción de los componentes principales que constituyen ese tipo de aerogenerador.

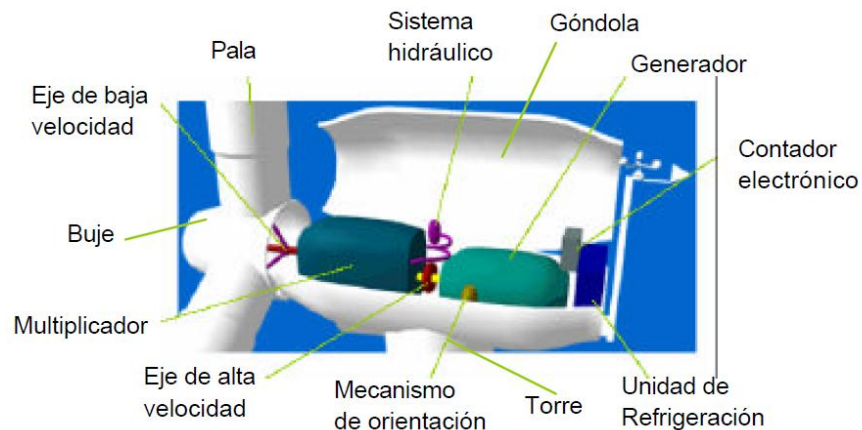


Figura 4. Componentes de un aerogenerador de eje horizontal.

Fuente: Energía Eólica, IDEA.

### 2.5.1. Rotor

La función del rotor es transformar la energía cinética del viento en energía mecánica. Cuanto mayor sea el área barrida por el rotor, mayor será la producción de energía. Por ejemplo un aerogenerador de 10 kW

de potencia tiene un diámetro, aproximadamente, de siete metros, mientras que una turbina eólica de 750 kW posee un diámetro de 24 metros.

En la mayoría de los casos el rotor se encuentra situado a barlovento, con el objeto de reducir las cargas cíclicas sobre las aspas.

El viento incide primero sobre el plano del rotor y posteriormente sobre la torre de sustentación, con lo cual se minimiza la influencia de su sombra sobre el rotor. En este tipo se requiere un sistema de orientación que mantenga siempre el plano de giro del rotor perpendicular a la dirección del viento.

El rotor está formado por dos partes bien diferenciadas.

#### **a) Las palas**

El número de palas en una turbina eólica es muy variable, una, dos, tres o multipalas. A la hora de diseñar un aerogenerador hay que considerar que el rotor girará a mayor velocidad cuanto menor sea el número de palas que posee y que para la

generación de electricidad es aconsejable que el rotor gire al mayor número de revoluciones posibles.

Los materiales tradicionales, madera, aluminio, etc., que se utilizaban, inicialmente, para la fabricación de las palas se han visto desplazados por la utilización de plásticos y resinas. La mayoría de las pequeñas turbinas eólicas usan materiales compuestos, tal como fibra de vidrio y actualmente existe una tendencia clara al uso de epoxy (generalmente resina de poliéster) reforzado de fibra de vidrio o de carbono, solo algún fabricante usa madera. El aluminio, actualmente, no se utiliza ya que es un metal propenso a la fatiga.

#### **b) El buje**

Es el elemento al que se encuentran unidas las palas y a través del cual la potencia eólica captada por el rotor se transmite a la caja multiplicadora o variador de velocidad.

En el rotor están situadas las palas, cuyo número es variable según los casos; cada pala tiene un perfil que tiene forma aerodinámica; estos

perfiles tienen un extremo romo, que es el borde de ataque mientras que el otro extremo, de forma afilada, es el borde de salida.

Los perfiles tienen distintos nombres según su geometría. Se denominan biconvexos si el intradós y el extradós son convexos y plano-convexos si tienen el extradós convexo y el intradós plano y de doble curvatura si el intradós y el extradós son cóncavos. En general, los tipos de perfiles utilizados en las máquinas eólicas rápidas son de la serie NACA (National Advisory Committee of Aeronautics), y vienen determinados por un conjunto de cifras que definen su geometría.

En la nomenclatura de perfiles naca-4 cifras; la primera cifra tiene un significado geométrico, e indica la máxima flecha de la línea media de la cuerda en %, proporcionando la máxima curvatura, la segunda cifra tiene un significado geométrico, e indica su posición, es decir, la distancia desde el borde de ataque hasta la posición de la máxima flecha de la línea media o máxima curvatura; las dos últimas cifras indican el espesor relativo máximo del perfil en porcentaje respecto a la cuerda.

El perfil se obtiene mediante dos parábolas tangentes en el punto de máxima línea media.

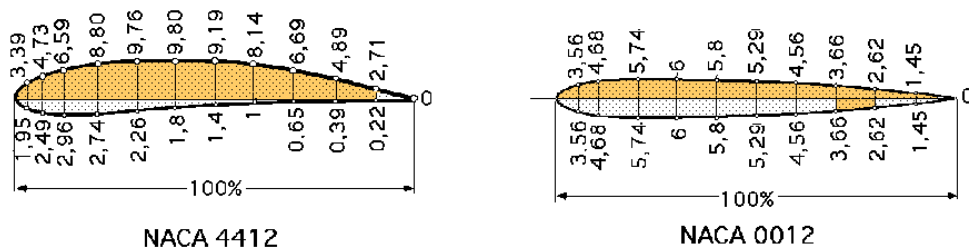


Figura 5. Perfiles NACA

Fuente: Energía Eólica, Fernández Pedro

En la nomenclatura de perfiles naca-5 cifras. La primera cifra indica el valor del coeficiente de sustentación ideal de la curvatura del perfil, multiplicado por 20 y dividido por 3. Las dos cifras siguientes indican el doble de la posición de la flecha máxima de la línea media (curvatura) en porcentaje de la cuerda; las dos últimas cifras indican el espesor relativo máximo del perfil respecto a la cuerda en porcentaje, igual al del perfil NACA de 4 cifras.

El perfil se obtiene mediante una parábola cúbica conectada a una línea recta que llega hasta el borde de salida. La serie 230XX muy utilizada en rotores de aeroturbinas se corresponde con perfiles simétricos biconvexos, indicando la relación XX el espesor máximo.

### **2.5.2. Góndola**

La góndola es el compartimiento en cuyo interior se encuentra el generador eléctrico, la caja multiplicadora y los sistemas de control, regulación, orientación y frenado. Generalmente está formado por una estructura metálica, construida con placa y perfiles de acero, que se sitúa en el extremo superior de la torre.

### **2.5.3. Generador**

La función del generador es transformar la energía mecánica procedente del rotor en energía eléctrica. Existen diferentes tipos de generadores:

#### **a) Generador de Corriente Continua (Dínamos)**

Las dínamos, generadores de corriente continua, son máquinas eléctricas sencillas que tienen la ventaja de no necesitar sistemas especiales para cargar baterías y generan corriente aún para bajas velocidades de giro.

En general, el generador más utilizado en las pequeñas turbinas eólicas es el alternador de imanes permanentes que parece ser el modelo ideal para las micro y miniturbinas eólicas.

#### b) Generador de Corriente Alterna

**Los generadores síncronos** o alternadores que existen son de velocidad variable, es decir, suministran corrientes de frecuencia variables. Por lo tanto, para conectarlos directamente a la red de corriente alterna es preciso utilizar un convertidor de frecuencia como elemento intermedio entre el generador y la red. Esta desventaja se compensa con una mayor eficiencia de la turbina y una mejor compatibilidad con la red.

Principalmente, este tipo de generadores se usan en máquinas que alimentan instalaciones autónomas, como en aplicaciones para iluminación, calefacción, etc., y la mayoría utilizan alternadores de imán permanente ya que se trata de la configuración más sencilla y robusta.

**El generador asíncrono** o de inducción se caracteriza porque usa corriente de la red eléctrica para crear su campo magnético. En principio, este tipo de generador no es capaz de operar sin la red. Sin

embargo, sistemas electrónicos pueden engañar a los generadores de inducción por medio de condensadores para cargar el campo, permitiendo así a estos generadores ser utilizados en sistemas de potencias aislados.

#### **2.5.4. Multiplicador**

El acoplamiento entre el rotor eólico y el generador, en la mayoría de los casos, se realiza a través de una caja multiplicadora y su función es multiplicar la velocidad de giro que llega del rotor para adaptarla a las necesidades del generador. Su empleo es necesario a medida que crece el diámetro del rotor, pues se deben limitar las r.p.m del rotor para evitar que las puntas de las palas trabajen a velocidades que comprometen la resistencia de los materiales empleados o induzcan vibraciones perjudiciales. Pero en el caso de las turbinas con una potencia inferior a 10 kW, generalmente, no se usa el multiplicador ya que el rotor está conectado directamente al generador.

#### **2.5.5. Sistema de control**

Toda turbina eólica necesita un sistema de control que permita por un lado detener la máquina y limitar su velocidad por razones de seguridad

y por el otro optimizar el funcionamiento. Además, en el caso de generación eléctrica a frecuencia constante es necesario mantener la velocidad de giro del rotor dentro de ciertos límites para obtener un alto rendimiento. El sistema de control es diferente en función del tamaño del aerogenerador.

#### **2.5.6. Sistema de orientación**

A fin de optimizar el aprovechamiento energético del viento, el plano de rotación del rotor debe mantenerse perpendicular a la dirección del viento. En el caso de que el rotor esté situado a sotavento, como ya se comentó anteriormente, no es necesario un sistema de orientación ya que mediante una conicidad adecuada de las palas el sistema es auto orientable. En cambio en los rotores situados a barlovento, delante de la torre, si se debe incorporar algún sistema de orientación. Entre estos sistemas cabe distinguir los siguientes:

a) Eólicas auxiliares: En particular molinos de cola, usados sólo en algunas eólicas pequeñas. Es un sistema poco fiable.

b) Veletas de cola: Se usan en pequeñas turbinas, formando parte del conjunto timón-veleta. La orientación del rotor se realiza de forma

mecánica, al incidir el viento sobre el timón-veleta y ejerciendo sobre éste un par de fuerzas que hace que el rotor se coloque perpendicularmente a la dirección del viento.

c) Rotor a barlovento con orientación asistida: Es el sistema más utilizado en grandes aerogeneradores. Incorpora un sensor con un ordenador y, en función de la dirección y la velocidad del viento, envía las correspondientes órdenes de control a un servomotor para la orientación del plano de giro del rotor.

### **2.5.7. Torre**

Las máquinas eólicas deben estar situadas sobre una estructura de soporte capaz de aguantar el empuje del viento. Existen varios tipos de torres como los que se describen a continuación:

a) Torres tubulares de acero. En el caso de los grandes aerogeneradores generalmente se utilizan torres tubulares de acero fabricadas en secciones de 20-30 metros con bridas en cada uno de los extremos, y son unidas con pernos "in situ". Las torres son tronco-cónicas, es decir, con un diámetro creciente hacia la base, con el fin de aumentar su resistencia y al mismo tiempo ahorrar material.

b) Torres de celosía. Son fabricadas utilizando perfiles de acero soldados. La ventaja básica de las torres de celosía es su costo, puesto que para su fabricación se requiere sólo la mitad de material que en una torre tubular. La principal desventaja de este tipo de torres es su apariencia visual. En cualquier caso, por razones estéticas, las torres de celosía han desaparecido prácticamente en los grandes aerogeneradores modernos. Son muy comunes en la India, aunque se encuentran en otros países como Alemania y EE.UU.

c) Torres de mástil tensado. Muchos de los aerogeneradores pequeños están contruidos con delgadas torres de mástil sostenidas por cables tensores. La ventaja es el ahorro de peso y, por lo tanto, de costo. Las desventajas son el difícil acceso a las zonas alrededor de la torre, lo que las hace menos apropiadas para zonas agrícolas. Las torres tubulares son las que ofrecen una vista más agradable, pero son las más costosas y, a menos que estén articuladas para arriarlas, son también las que ofrecen más dificultades a la hora de efectuar el mantenimiento de la turbina. Las torres con tensores son las menos costosas.

d) Torres híbridas. Algunas torres están hechas con diferentes combinaciones de las ya mencionadas.

### **2.5.8. Otros componentes de un Sistema de Energía Eólica**

Además del aerogenerador para poner en marcha un pequeño sistema de energía eólica es necesario un equipo adicional que está constituido por los siguientes componentes:

#### a) Sistemas de almacenamiento

En sistemas que no se encuentran conectados a red generalmente se dispone de algún sistema de almacenamiento con el objeto de disponer de la energía en periodos de viento flojo o de calma.

- **Baterías:** Actualmente, es el sistema más utilizado para almacenar la electricidad generada por la turbina. Permite construir sistemas de muy pequeño tamaño. No es adecuado para tamaños grandes por su elevado coste y dificultades de mantenimiento.
- **Acumulación térmica:** la energía extraída del viento se usa para calentar agua, directamente por medio de un freno hidráulico o por calentamiento de resistencias eléctricas tras la conversión a electricidad. El agua se almacena y el aprovechamiento energético posterior sería solo adecuado si se requiere en forma calorífica.

- **Bombeo de agua:** Durante períodos con exceso de producción de energía se puede usar la energía eléctrica para bombear agua hasta un depósito elevado. Durante períodos de viento insuficiente la carga podría alimentarse con una minicentral hidráulica cuyo generador síncrono se conectaría en paralelo con el aerogenerador a través de un sistema de protección y control adecuado. Este método proporciona una eficiencia de energía eléctrica recuperada entre el 50 % y el 80 %. Es la solución que se encontró para poder electrificar eólicamente la isla de El Hierro.

- **Generación de hidrógeno y pila de combustible:** El exceso de electricidad producida se utiliza para descomponer el agua en hidrogeno y oxígeno. El hidrógeno se almacenaría y posteriormente se podría utilizar directamente como combustible o bien para generar electricidad de corriente continua mediante una pila de combustible. El rendimiento de recuperación varía entre el 50 % y el 70 %.

- **Volante de inercia:** La energía se almacena en un volante capaz de girar a elevado régimen en un recinto al vacío, que impida la resistencia aerodinámica. Es un sistema conveniente para fluctuaciones fuertes en la energía eólica ya que es capaz de absorber potencias instantáneas

elevadas. Se obtiene rendimientos de recuperación muy altos, del orden del 80 %.

- Desalación del agua: En lugares donde coincida la demanda de agua potable con la disponibilidad de energía eólica y su impacto ecológico sea aceptable, es posible recurrir a emplear la energía sobrante en desalinizar agua, la cual es fácilmente almacenable y proporciona una utilidad completa.

#### b. Inversores

Los inversores se utilizan para convertir la corriente continua (CC) generada por los aerogeneradores eólicos, paneles solares fotovoltaicos, acumuladores o baterías, etc., en corriente alterna (CA) y de esta manera poder ser inyectada en la red eléctrica o usada en instalaciones eléctricas aisladas. Se pueden diferenciar diferentes tipos de inversores:

- Inversores de onda sinusoidal. Se utiliza en los sistemas que no están conectados a la red. Emplean la corriente continua de un sistema de almacenamiento con baterías y producen una corriente alterna de onda

sinusoidal similar a la de la red, aunque no idéntica.

- Inversores síncronos. Usan conmutadores RCS (Rectificador Controlado de Silicio) con controles analógicos para señalar cuando deben enviar pequeñas señales eléctricas a la red, debidas a que necesitan la presencia de la red eléctrica para su funcionamiento. En EE.UU., la Bergey Windpower y la Wind Turbine Industries fabrican turbinas con este tipo de inversor.

- Inversores autoconmutados. Éstos pueden producir electricidad compatible con la red usando su propio circuito interno, con controles IGBT (compuerta integrada con transistores bipolares) y digitales, mejorando notablemente la fiabilidad y la calidad de la potencia con respecto a los modelos sincronizados mediante la propia red. Estos inversores usan exactamente la misma tecnología que los inversores de orden sinusoidal vistos anteriormente.

En los nuevos sistemas, cuando la demanda eléctrica excede al suministro y las baterías están cerca de la descarga total, el inversor automáticamente toma potencia de la red hasta que éstas resultan recargadas, pero, cuando hay un exceso de generación con respecto a

la demanda y las baterías están totalmente cargadas, el inversor puede también suministrar el exceso de potencia a la red. Incluso, si el sistema de potencia de la red falla, por ejemplo durante una tormenta, el inversor y las baterías dan un suministro de potencia ininterrumpido. El inversor automáticamente cambia a un sistema aislado con baterías convencional.

c. Rectificadores y cargadores de baterías

Los rectificadores son opuestos a los inversores, convierten la energía de corriente alterna en corriente continua. Además, si el generador no dispone de una salida de la carga de la batería, un cargador de batería es obligatorio. Algunos inversores pueden actuar como cargadores de baterías.

En la Figura 6 se muestra el esquema de una central eólica conectada a la red eléctrica convencional; y de un sistema eólico para uso doméstico sin conexión a la red.

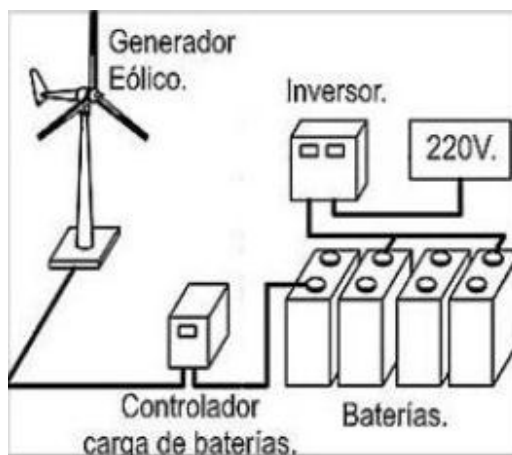
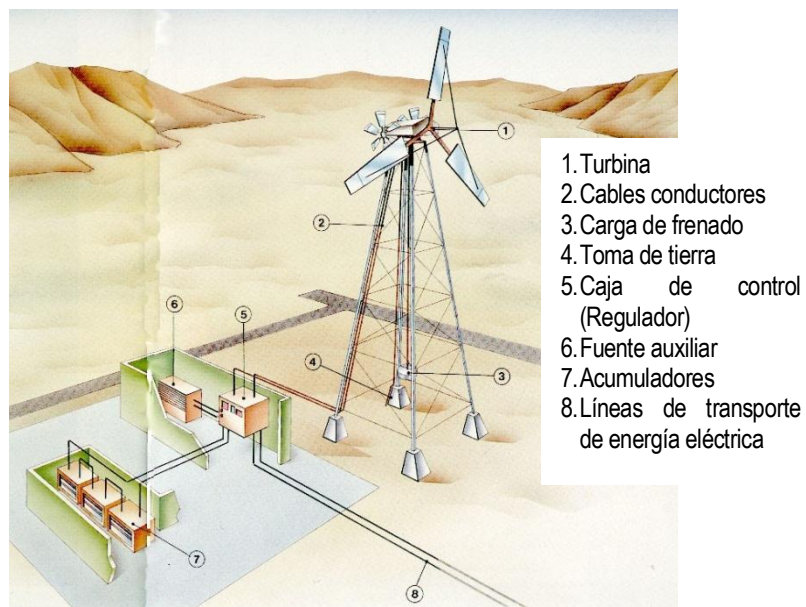


Figura 6. Esquemas de Instalaciones eólicas: conectada a la Red y de uso doméstico,

Fuente: <http://thales.cica.es>

## 2.6. Energía del viento

La energía máxima teórica que puede ser extraída de una masa de aire en movimiento está dada por la expresión:

$$E_c = \frac{1}{2} m V^2 \quad (1)$$

Donde  $E_c$  = energía cinética [joule/s]

$m$  = flujo de aire [kg/s]

$V$  = velocidad del viento [m/s]

Si suponemos un área de captación  $A$  (o área barrida por las palas) perpendicular a la dirección del viento, el flujo de aire circulante que la atraviesa será:

$$m = \delta A V \quad (2)$$

Siendo  $\delta$  = densidad del aire [kg/m<sup>3</sup>]

$A$  = área de captación [m<sup>2</sup>]

La energía teórica máxima por unidad de tiempo y de área ( $A=1$ ) que

podremos extraer de una masa de aire en movimiento, será entonces:

$$P_m = \frac{1}{2} \rho V^3 \quad (3)$$

A esta energía se la denomina potencia meteorológica y se la expresa en  $W/m^2$ .

Como la velocidad del viento, luego de atravesar la superficie de captación, no es nula, la potencia dada por la expresión anterior no será totalmente aprovechable. Betz demostró que la máxima energía recuperable, con un aerogenerador ideal, es igual a  $16/27$  ( $\approx 60\%$ ) de la energía total. Tomando en cuenta que ningún rotor es ideal, para caracterizarlo es necesario conocer su eficiencia o rendimiento  $h$ . La potencia obtenible por unidad de área de rotor, medida en  $W/m^2$ , puede expresarse entonces como:

$$P_a = \frac{1}{2} h \rho V^3 \quad (4)$$

Y la potencia total para el área descrita por las palas al girar,  $A = \rho R^2 = \rho D^2/4$ , en  $W/m^2$ , queda como:

$$P_t = \frac{1}{2} h \delta (\pi D^2/4) V^3 \quad (5)$$

Siendo: D y R = diámetro y radio del rotor expresado en metros

La densidad media del aire es 1,25 kg/m<sup>3</sup>, valor que multiplicado por  $\pi/4$  da aproximadamente 1. Por lo tanto, podemos expresar la potencia obtenible de una máquina eólica, tomando el diámetro en metros y la velocidad en metros por segundo, como:

$$P \approx \frac{1}{2} \eta V^3 \quad (6)$$

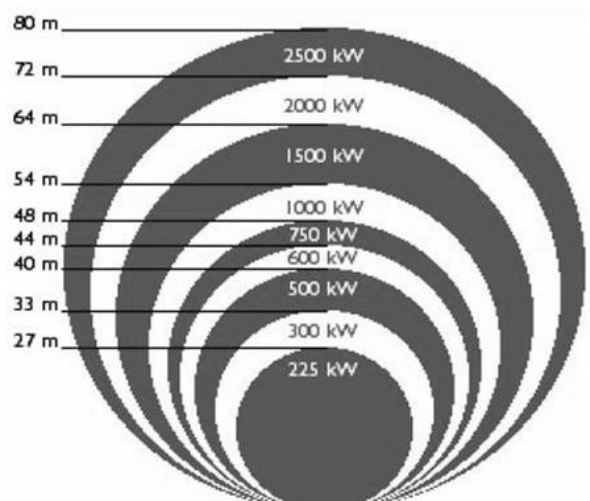


Figura 7. Potencia disponible según el diámetro del rotor para una velocidad media de 2 m/s,

Fuente: <http://jmirez.wordpress.com>

## **2.7. Potencia generada**

La potencia suministrada por un aerogenerador depende de la superficie barrida por la hélice y, por tanto, de la longitud de las palas y es independiente del número de palas. La energía que origina el viento es Energía cinética, es decir, está causada por la altura del aire en movimiento.

La ley de Betz dice que sólo puede convertirse menos de  $16/27$  (el 59%) de la energía cinética en energía mecánica usando un aerogenerador.

La Potencia Eléctrica está dada por la corriente y el voltaje obtenidos del aerogenerador, que son medidos a diferentes velocidades,

Con los datos de Potencia Disponible y la Potencia Generada por el Aerogenerador se obtiene la eficiencia de conversión eólica eléctrica,

## **2.8. Curva de potencia de un aerogenerador**

La curva de potencia de un aerogenerador es un gráfico que indica cuál será la potencia eléctrica disponible en el aerogenerador a diferentes

velocidades del viento. Para calcular la curva de potencia es muy importante tener en cuenta varios factores (densidad del aire, velocidad de viento, potencia del aerogenerador).

Si la velocidad del viento no está variando demasiado rápidamente, pueden usarse las medidas de la velocidad del viento realizadas con el anemómetro y leer la potencia eléctrica disponible directamente del aerogenerador, y dibujar los dos tipos de valores conjuntamente en un gráfico.

La curva de potencia define la potencia eléctrica disponible como función de la velocidad del viento. Mediante las curvas de potencia se puede conocer cuando una aero turbina suministra energía. Cuando el viento supera la velocidad mínima  $v_{conex}$  la máquina comienza a suministrar potencia aumentando ésta a medida que aumenta la velocidad del viento, hasta que éste alcanza una velocidad  $v_{nom}$  que se corresponde con la potencia nominal del generador; para velocidades superiores los sistemas de control mantienen constante la potencia, evitando una sobrecarga en la turbina y en el generador. Las curvas que relacionan la velocidad del viento, con el número de horas de funcionamiento del aerogenerador,  $t = f(v)$ , indican el número de horas al

año en que la velocidad del viento supera un cierto nivel. A partir de estas curvas se puede obtener la curva de potencia disponible del viento, y la curva de potencia eléctrica suministrada por el aerogenerador. El área encerrada por esta última, proporciona la energía eléctrica generada en un año, siendo frecuente expresar estas potencias y energías, por unidad de superficie barrida por el rotor.

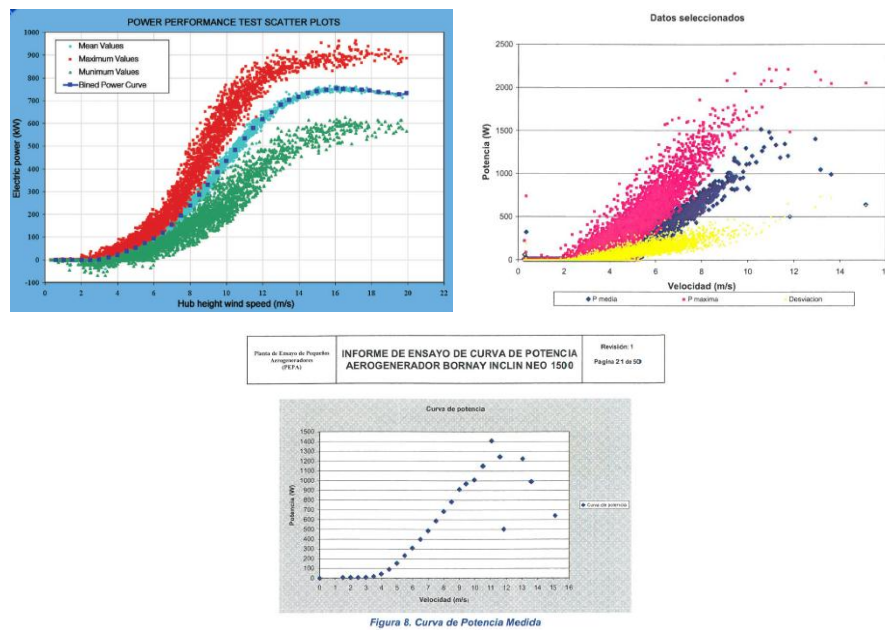


Figura 8. Curva de Potencia Medida

Figura 8. Gráficas de potencia y eficiencia de aerogeneradores

Fuente: <http://www.barlovento-recursos.com>

En la Figura 8 se observa algunas formas en que se presenta la información de eficiencia y potencia de un Aerogenerador, en las dos primeras figuras se observa que los datos son presentados como una

nube de puntos, con datos reales e instantáneos, en la tercera se aprecia una curva uniforme que representa la curva que caracteriza a un aerogenerador comercial.

## 2.9. Coeficiente de potencia

El coeficiente de potencia indica con qué eficiencia el aerogenerador convierte la energía del viento en electricidad.

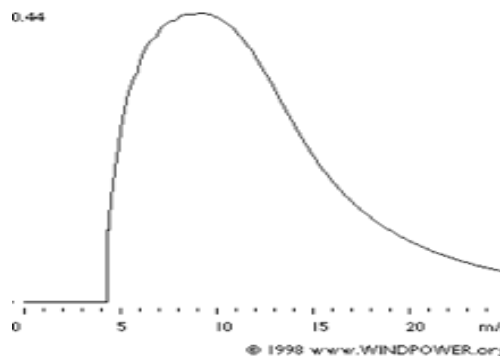


Figura 9. Coeficiente de potencia de un aerogenerador.

Fuente: <http://www.motiva.fi>

Simplemente dividiendo la potencia eléctrica disponible por la potencia eólica de entrada, para medir cómo de técnicamente eficiente es un aerogenerador. En otras palabras, tomamos la curva de potencia y la dividimos por el área del rotor para obtener la potencia disponible por metro cuadrado de área del rotor. Posteriormente, para cada velocidad

del viento, dividimos el resultado por la cantidad de potencia en el viento por metro cuadrado.

La figura 9 muestra la curva del coeficiente de potencia para un aerogenerador danés típico. Aunque la eficiencia media de estos aerogeneradores suele estar por encima del 20 por ciento, la eficiencia varía mucho con la velocidad del viento (pequeñas oscilaciones en la curva suelen ser debidas a errores de medición).

Como puede observar, la eficiencia mecánica del aerogenerador más alta (en este caso del 44%) se da a velocidades alrededor de 9 m/s. Este valor ha sido elegido deliberadamente por los ingenieros que diseñaron la turbina. A bajas velocidades del viento la eficiencia no es tan alta, ya que no hay mucha energía que recoger. A altas velocidades del viento, la turbina debe disipar cualquier exceso de energía por encima de aquella para la que ha sido diseñado el generador. Así pues, la eficiencia interesa sobretodo en la zona de velocidades de viento donde se encuentra la mayor parte de la energía.

## **CAPÍTULO III**

### **MATERIALES Y MÉTODOS**

En este capítulo se detalla aspectos constructivos del micro aerogenerador, así como su evaluación tanto en laboratorio como bajo condiciones reales; se acompaña a la descripción, figuras en que se muestra el trabajo realizado.

#### **3.1. Etapa de diseño y construcción**

Debido a que no hay un estándar para la construcción de aerogeneradores usando materiales reciclables, el Micro Aerogenerador debe cumplir ciertos requisitos básicos: Se tendrá en cuenta lo siguiente:

- ▶ Uso de materiales reciclables y/o de bajo costo.
- ▶ Uso de materiales disponibles o fácilmente asequibles.
- ▶ De preferencia Aerodinámico según lo permitan los materiales.
- ▶ Parte electrónica en un único módulo.
- ▶ Uso de herramientas disponibles y/o de fácil adquisición.

- ▶ Facilidad en su construcción para realizar réplicas en caso de ser usado como modelo para fines educativos.
- ▶ Facilidad en el armado o ensamblaje.
- ▶ Prototipo final compacto.

En una primera fase se hizo prueba de varios prototipos, descartándose los que tenían por inconveniente el uso de bases metálicas o que requerían equipo complejo para su construcción (soldadura eléctrica). Los motores usados deberán adaptarse fácilmente a las estructuras de soporte. En la Figura 10 se presenta un primer prototipo, que se descartó por que el eje del motor necesitaba más velocidad de viento para el arranque.



Figura 10. Primer prototipo de aerogenerador construido.  
Fuente: Elaboración propia.

El modelo final de micro aerogenerador que se utilizará, tiene las siguientes características:

- Motor de equipo Betamax Sony.
- Aspas de PVC.
- Base para las aspas de CD's unidos con pegamento epoxi.
- Góndola en base a Te de 4" a 2", Reducción de 4" a 2" y Tapa de 4" todos los PVC.
- Rodaje de 2" para la parte de giro de la góndola
- Veleta en base a un acrílico parte de una tapa de Televisor en desuso.

Los elementos que componen el Micro Aerogenerador y los materiales de los que están hechos son:

### **3.1.1. Generador**

Se usó un motor de corriente continua de un video reproductor Betamax Sony. Dimensiones 12 cm de diámetro y 12 cm de altura.

Se descartaron varios motores de impresoras, motores de ventiladores de autos, por ser pequeños o por que el eje giraba con dificultad.

Debido a la sensibilidad en el giro del eje de este motor, no se utilizará un sistema multiplicador de revoluciones.

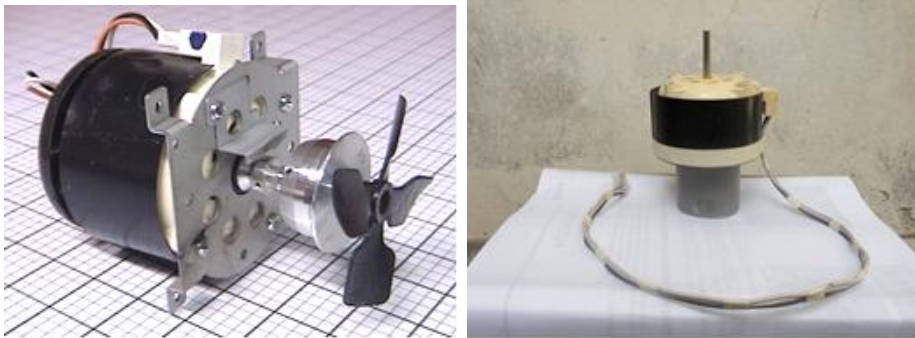


Figura 11. Motor elegido para el micro aerogenerador.

Fuente: Elaboración Propia.

En la figura 11 se muestra el motor utilizado como generador, para utilizarlo se sacaron las aspas del ventilador y la estructura metálica.



Figura 12. Motor en un soporte de hierro.

Fuente: Elaboración Propia.

En la Figura 12 se observa el primer soporte usado; el inconveniente es que debía soldarse para fijarlo al eje de giro y la veleta, por lo que fue descartado.

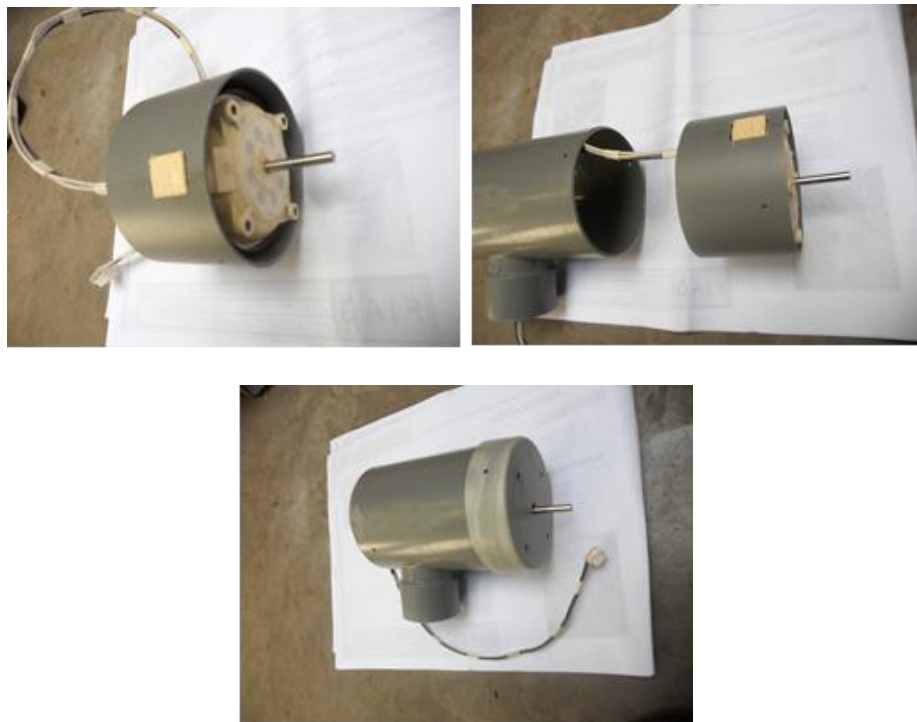


Figura 13. Materiales de PVC utilizados.

Fuente: Elaboración Propia.

Finalmente, se determinó que los componentes deberían ser de PVC (figura 13) por la facilidad en conseguirlos, así como por la facilidad en el ensamblaje de las partes.

Se adaptó al eje un disco hecho de 3 Discos compactos unidos con pegamento epoxy de secado rápido (figura 14); y con agujeros para

acoplar en este las aspas para un ensamble seguro de las aspas y para unirlo al generador.



Figura 14. Taladrado de agujeros en el buje.

Fuente: Elaboración Propia.

### **3.1.2. Aspas**

Para la construcción de las aspas se usó secciones de tubo de 2" y 4", primeramente se cortaron en tres partes y de cada una se obtuvieron 2 aspas (Figura 15). Los diámetros totales del rotor incluyendo las aspas son 40 cm, 50 cm y 60 cm.

Se hizo agujeros para ensamblarlas al Buje y se pintó con pintura esmalte.



Figura 15. Proceso de corte de las aspas de tubo PVC  
Fuente: Elaboración Propia

El ángulo de ataque en las aspas construidas es:

Usando tubo PVC de 2":

Diámetro de rotor:	40 cm	ángulo de ataque:	40°
Diámetro de rotor:	50 cm	ángulo de ataque:	40°
Diámetro de rotor:	60 cm	ángulo de ataque:	40°

Usando tubo PVC de 4":

Diámetro de rotor:	40 cm	ángulo de ataque:	25°
Diámetro de rotor:	50 cm	ángulo de ataque:	35°
Diámetro de rotor:	60 cm	ángulo de ataque:	35°

### 3.1.3. Góndola

Se confinó el motor en una T de PVC 4" a 2", colocando en la base de 2" un rodaje, facilitando el giro del aerogenerador.

En el extremo en que sobresale el eje del motor se colocó una tapa de 4" con agujeros para que sobresalga el eje, y para colocar los tornillos que lo fijarán a la estructura.

En el otro extremo de la Te, se colocó una reducción de 4" a 2".



Figura 16. Góndola y rodaje acoplado a la base de la góndola.

Fuente: Elaboración Propia.

### 3.1.4. Veleta o Cola

Por ser un micro aerogenerador, se usará una veleta para su orientación según la dirección del viento, también de fácil acople al sistema.

La veleta se construyó cortando y aplastando el extremo de un tubo PVC de 2" previamente calentado en una cocina a gas; para luego encajar la veleta en sí, y asegurarla con tornillos, esta debe quedar bien alineada (Figura 17).



Figura 17. Proceso de armado de la veleta.

Fuente: Elaboración Propia.

### 3.1.5. Torre

Para la evaluación en Campo se utilizó como torre un tubo de fierro de 6m de largo y 4" de diámetro, unido a un tubo de 4" hasta completar los

10 m de altura que es un estándar para la evaluación de pequeños aerogeneradores. Estos serán anclados a 4 puntos con 4 tensores de alambre galvanizado para darle estabilidad.



Figura 18. Torre construida con Tubo de fierro de 4" de diámetro. Ubicada en el lugar de evaluación.

Fuente: Elaboración Propia.

### **3.1.6. Componentes electrónicos.**

La corriente obtenida del micro aerogenerador fue rectificada con un puente de diodos para medir el potencial eléctrico y además para poder ser usada directamente en sistemas pequeños de corriente continua. Se utilizó en esta parte del sistema cables, diodos, conectores, cinta aislante, soldadura de estaño y cautín para soldar los componentes.

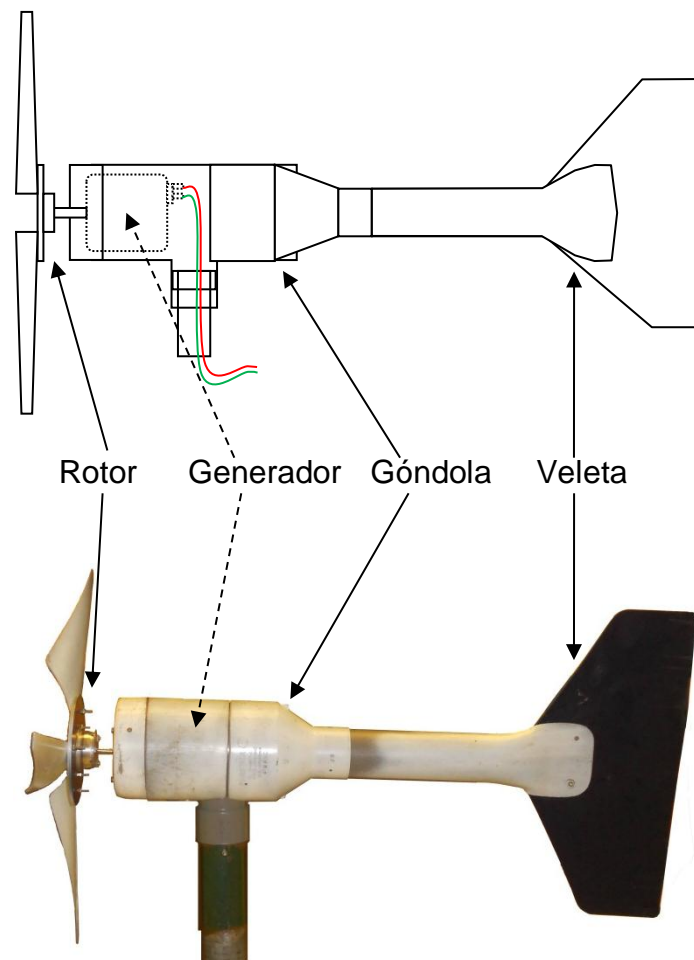


Figura 19. Esquema y Foto de las partes principales del Micro Aerogenerador.

Fuente Elaboración Propia.

### **3.2. Etapa de evaluación**

La primera evaluación se efectuó en las instalaciones del Centro de Energías Renovables Tacna – CERT ubicado en la Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann de Tacna. A  $18^{\circ} 1' 28,34''$  Latitud Sur;  $70^{\circ} 15' 5,76''$  Longitud Oeste.

La evaluación del micro aerogenerador bajo condiciones de viento normal en Tacna se realizó a 8 km al norte del CERT, exactamente a  $17^{\circ}56' 58,44''$  Latitud Sur;  $70^{\circ}15' 32,19''$  Longitud Oeste.

Para realizar esta investigación se usó el micro aerogenerador construido con materiales reciclables; que se sometió a prueba con diferente configuración de las aspas y a diferentes velocidades de viento (usando un ventilador de 220 Vac).

### **3.3. Instrumentos y equipos**

Para la evaluación se necesitaron los siguientes instrumentos y equipos:

- Multímetro Automotivemeter CE EM129.
- Datalogger Squirrel 1200 Series.
- Estación meteorológica automática (datos usados: Temperatura, humedad relativa, velocidad viento).
- Estructura cilíndrica de 80 cm de diámetro x 180 cm de largo, que simulará una sección de túnel para, obtener un flujo de viento más uniforme.
- Computadora Pentium 4, habilitada con programas Informáticos: WeatherLink55, BoxCar Pro, MS Office 2010, Corel Draw Graphics Suite X3, Stad Graphics, SQTRANS (para descargar datos del datalogger).
- Libreta de apuntes, lápices lapiceros.
- Además, se utilizarán datos de la Estación Meteorológica del CERT.

### **3.4. Técnicas y método de recolección de datos**

#### **3.4.1. Evaluación en laboratorio**

Primeramente se utilizó una manta de Lona con forma de cono truncado para simular un túnel de viento y evaluar el micro aerogenerador en el exterior de los ambientes del CERT. (figura 20).



Figura 20. Primeras evaluaciones en los exteriores del CERT.  
Fuente Elaboración Propia.

Debido a las fluctuaciones de velocidad de viento obtenidas se optó por realizar la evaluación dentro de las instalaciones.



Figura 21. Evaluación dentro de las instalaciones del CERT.  
Fuente Elaboración Propia.

Aun así, no se consiguió que el aire fluyera de manera lineal, por lo que se tuvo que construir una sección cilíndrica uniforme, para esto se utilizó una placa de MDF enrollada y unida con una platina de hierro y reforzada con tornillos. (figura 22).



Figura 22. Evaluación en laboratorio usando un túnel cilíndrico.  
Fuente Elaboración Propia.

De esta manera se realizó la evaluación del microaerogenerador con sus 18 configuraciones, variando el ingreso de aire para obtener diferentes velocidades de viento, midiendo luego esta con el anemómetro de la estación meteorológica del CERT.

Para el proceso de evaluación, el Microaerogenerador se acondicionó frente a un ventilador que simuló al viento, se colocó el ventilador a

diferentes distancias y tapando la entrada de aire por secciones para obtener diferentes velocidades. (Figura 23).

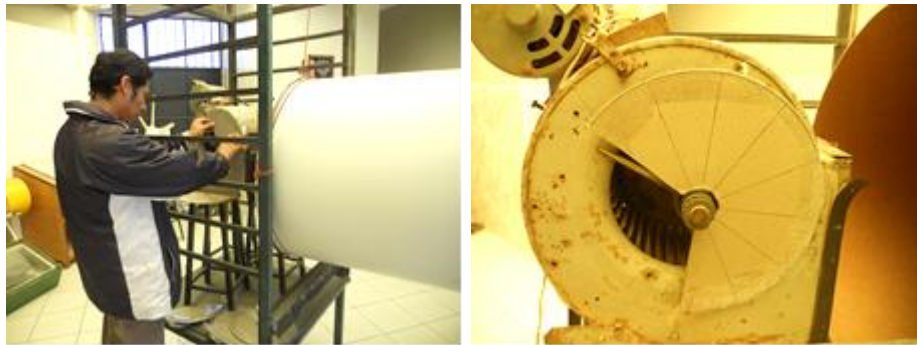


Figura 23. Tapado del ingreso de aire al ventilador.

Fuente Elaboración Propia.

Con la Estación Meteorológica (la parte que contiene al anemómetro) se registró la velocidad del viento, a las mismas condiciones en las que se evaluó el Microaerogenerador, además de la temperatura ambiente para obtener la densidad del aire.

El voltaje y la corriente se midieron con multímetros y el datalogger usando un circuito eléctrico apropiado.

Los datos obtenidos se almacenaron en la memoria de la computadora para luego ser analizados.

Las configuraciones del Microaerogenerador fueron:

- Número de Aspas: 2, 3 y 6.
- Geometría de las aspas obtenidas de tubo PVC de 4" y 2"

Usando tubo PVC de 2":

Diámetro de rotor:	40 cm	ángulo de ataque	40°
	50 cm		40°
	60 cm		40°

Usando tubo PVC de 4":

Diámetro de rotor:	40 cm	ángulo de ataque	25°
	50 cm		35°
	60 cm		35°

Dando un total de 18 configuraciones, las cuales se someterán a prueba durante la primera fase de la evaluación.

Además, se tendrá en cuenta la velocidad de arranque de los sistemas más eficientes, variando la velocidad de viento del túnel gradualmente hasta que el microaerogenerador inicie el arranque midiendo luego con el anemómetro esta velocidad. En la Figura 24 se presenta un esquema de la evaluación en laboratorio.

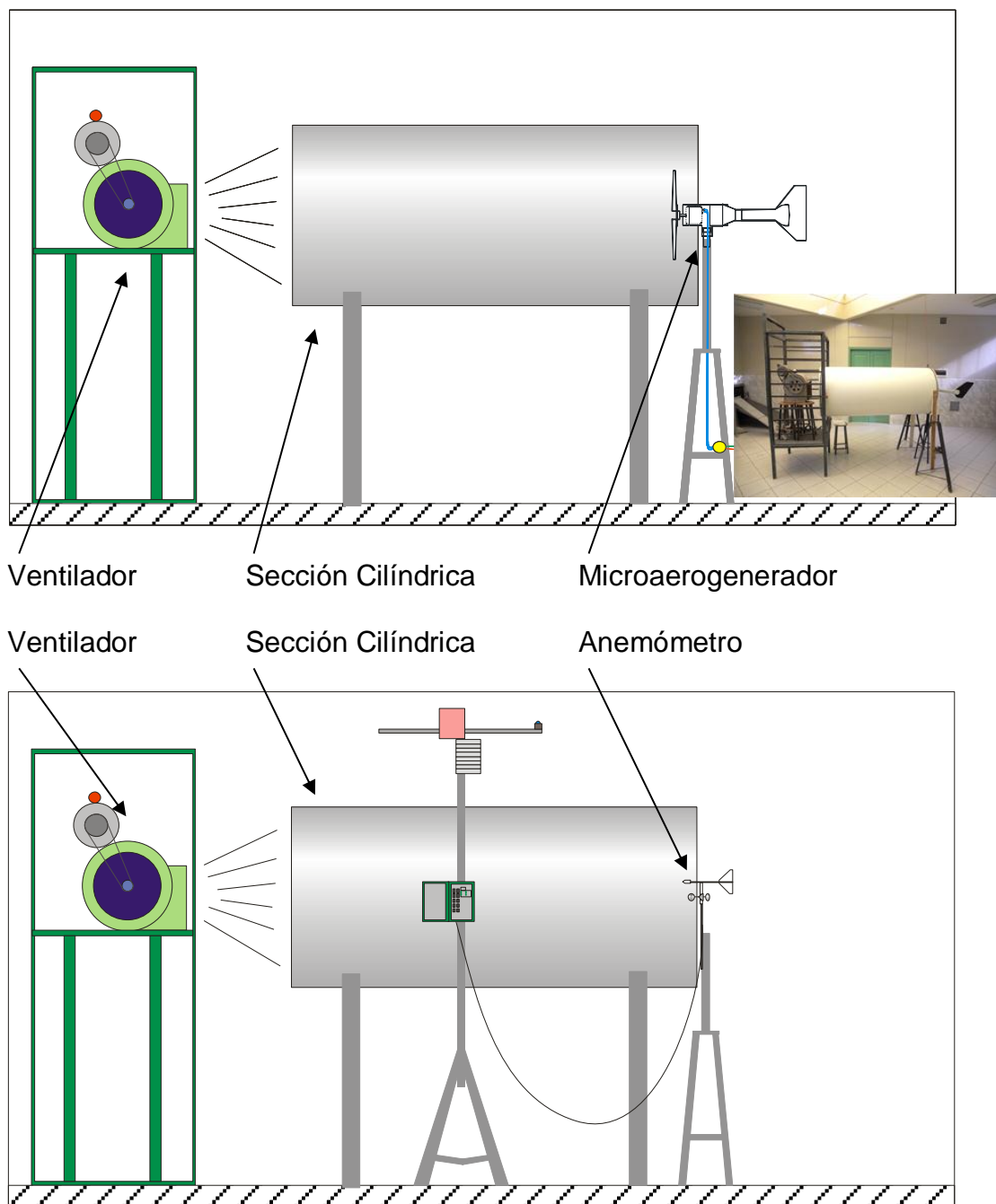


Figura 24. Disposición del equipo para la evaluación.

Fuente: Elaboración Propia.

### 3.4.2. Evaluación bajo condiciones reales

Para realizar la prueba al aire libre se utilizó la configuración en que se tuvo la mayor eficiencia en laboratorio, como ser el número, el diámetro y el perfil de las aspas.



Figura 25. Primeras pruebas realizadas en el techo del CERT.

Fuente Elaboración Propia.

En la Figura 25 se muestra el microaerogenerador instalado en el techo del Centro de Energías Renovables, estas son pruebas previas

a la instalación definitiva en un lugar más adecuado, como se ve en la Figura 26.



Figura 26. Instalación del microaerogenerador para la evaluación en condiciones normales.

Fuente Elaboración Propia.

Finalmente, se instaló el microaerogenerador a 8 km al norte del CERT, exactamente a  $17^{\circ}56' 58,44''$  Latitud Sur;  $70^{\circ}15' 32,19''$  Longitud Oeste.

En la Figura 27 se muestra una foto aérea de los lugares de evaluación del microaerogenerador; el CERT ubicado dentro de la Universidad Jorge Basadre Grohmann, la evaluación en campo se hizo en una granja cercana que reunía las condiciones para la evaluación de un sistema eólico.



Figura 27. Lugares donde se evaluó el microaerogenerador 8 km al norte del CERT.

Fuente: Google earth (Programa de vistas satelitales).

Se presenta en la Figura 28, un esquema de la disposición del equipo para la evaluación bajo condiciones normales

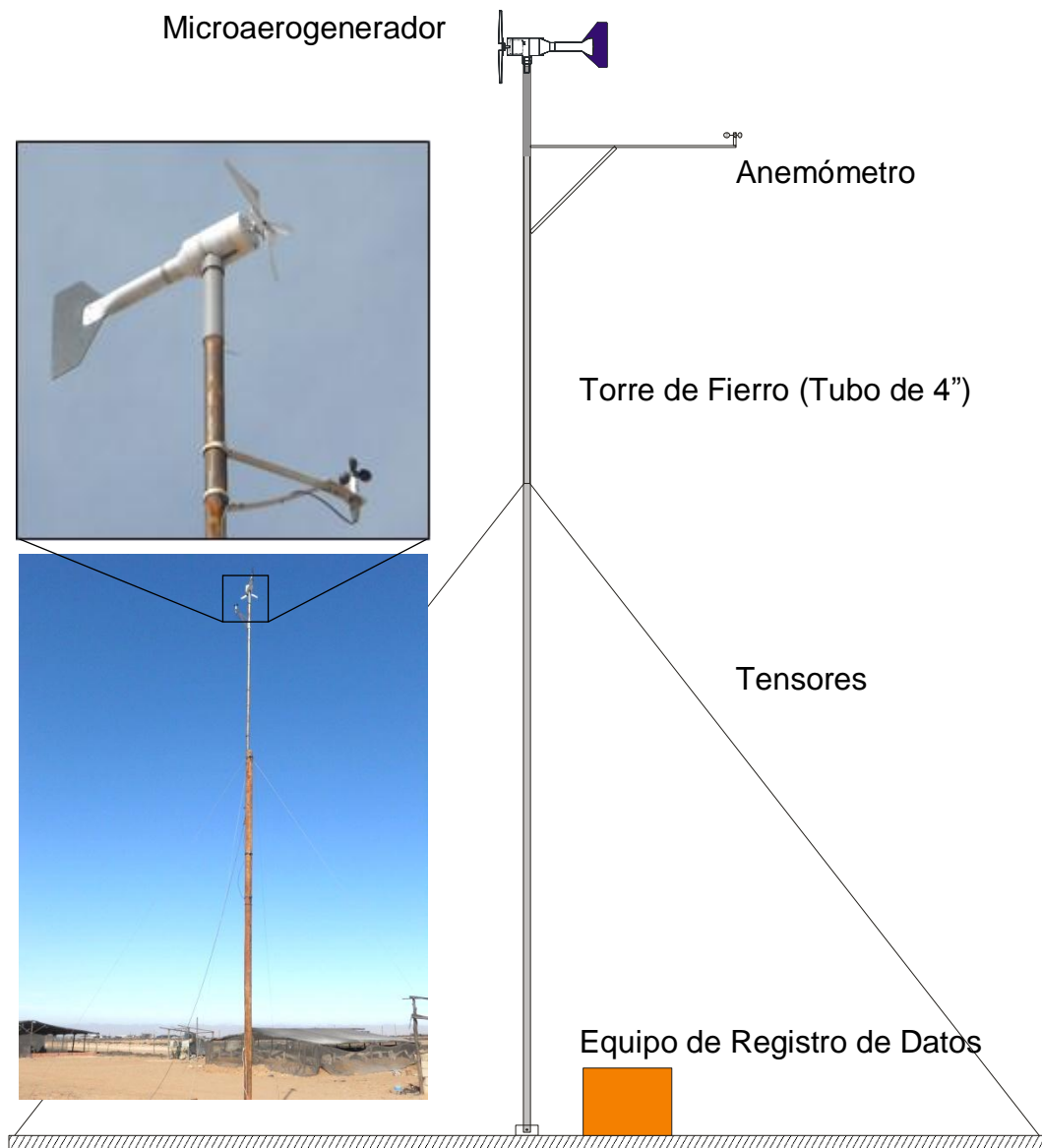


Figura 28. Disposición del equipo para realizar la evaluación en Campo.

Fuente: Elaboración propia.

Luego de realizar la toma de datos durante todo el mes de octubre de 2012 se retiró el microaerogenerador y el equipo de adquisición de datos automático (datalogger squirrel); para descargar la información utilizando el programa SQTRANS a una computadora. (Figura 29). Estos datos fueron procesados y se elaboraron Tablas y Figuras que son presentados en el capítulo 4.



Figura 29. Retiro del microaerogenerador y descarga de la información del datalogger.

Fuente Elaboración Propia.

## **CAPÍTULO IV**

### **RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

Al inicio del presente trabajo de investigación se propuso un conjunto de objetivos dirigidos a demostrar que es posible obtener energía de un microaerogenerador construido con materiales reciclables. A continuación se presentan los resultados obtenidos, en dos etapas de evaluación del Microaerogenerador.

En la primera se definirá cual es la configuración, es decir, con cuáles y qué número de aspas es más eficiente el microaerogenerado, luego se evaluará y determinará las características de esta configuración, como ser la potencia eléctrica, potencia mecánica y el coeficiente de potencia.

En la segunda etapa se evaluará el microaerogenerador en condiciones normales de la localidad, para determinar la energía que se puede obtener.

#### 4.1. Primera etapa

Los datos obtenidos en esta primera fase de evaluación se muestran a continuación, presentados en tablas y gráficos.

Tabla 1.

Datos de Voltaje y corriente obtenidos del Microaerogenerador para determinar la curva I-V

V (volt)	I (mA)	V (volt)	I (mA)	V (volt)	I (mA)	V (volt)	I (mA)	V (volt)	I (mA)	V (volt)	I (mA)
3,1	6,8	5,4	10,7	6,6	12,0	7,2	12,3	8,8	13,3	9,5	13,8
3,1	7,1	5,4	10,7	6,5	11,9	7,2	12,3	8,2	13,0	8,6	13,2
2,9	6,8	4,7	10,0	5,4	10,7	5,8	11,2	6,5	11,8	6,9	12,1
3,0	6,4	6,1	11,4	8,1	13,2	10,6	14,4	10,2	14,1	12,5	14,8
3,1	6,9	6,2	11,5	8,0	13,0	9,6	13,9	9,9	13,9	11,3	14,5
3,0	6,8	5,5	10,9	6,6	12,0	7,6	12,7	8,0	13,0	8,6	13,3
0,0	0,0	8,7	13,4	12,5	14,8	14,2	15,4	15,2	15,5	17,1	15,9
2,4	5,5	8,6	13,4	10,9	14,4	13,0	15,1	13,5	15,3	15,6	15,6
3,2	7,1	7,2	12,3	8,8	13,5	10,2	14,1	10,3	14,2	11,6	14,6
2,6	5,8	4,9	9,9	6,3	11,6	7,0	12,3	7,6	12,6	7,8	12,8
2,5	5,6	5,0	10,2	6,0	11,3	6,7	11,9	7,0	12,1	8,0	12,9
2,6	6,2	4,8	10,0	5,5	10,8	6,0	11,3	6,5	11,6	7,1	12,2
2,7	6,4	7,1	12,3	8,3	13,2	9,8	14,0	11,6	14,4	12,3	14,7
3,1	7,2	6,6	11,4	8,3	13,2	10,0	13,9	10,2	14,2	12,1	14,5
3,3	7,6	5,9	11,3	7,2	12,3	8,4	13,1	8,8	13,4	9,4	13,5
0,0	0,0	7,6	12,4	10,1	14,1	11,7	14,7	13,4	15,1	15,6	15,5
2,3	5,7	7,0	12,5	9,6	13,8	11,5	14,5	13,4	14,9	14,3	15,2
3,1	6,3	6,9	12,5	8,5	13,3	9,9	13,9	10,6	14,2	11,5	14,4

Fuente: Elaboración propia (2012).

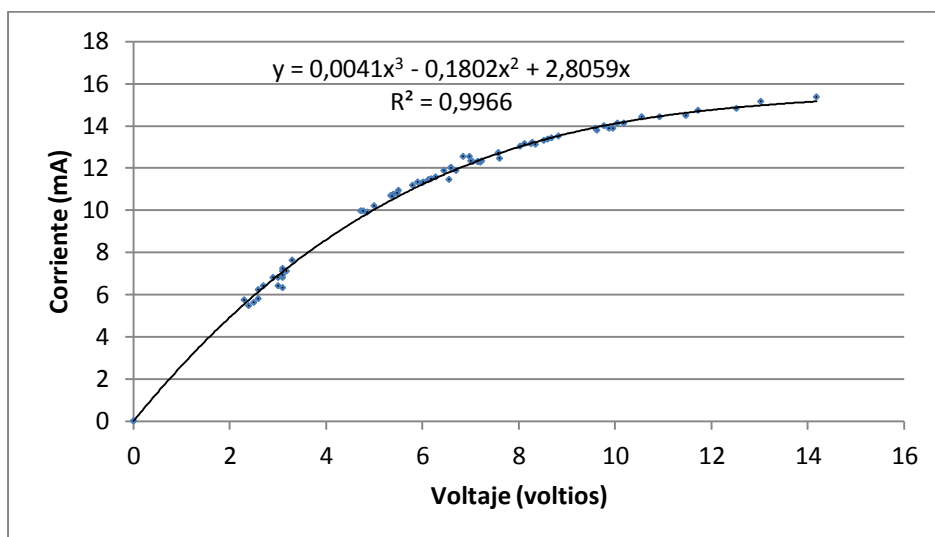


Figura 30. Corriente en función del Voltaje obtenida del Microaerogenerador.

Fuente: Elaboración propia (2012).

Como se observa en la figura 30, la corriente y el voltaje se incrementan según una curva polinomial de tercer orden con la tendencia a mantener la corriente a medida que se incrementa el voltaje. Esta ecuación nos permitirá saber la corriente a un determinado voltaje. El valor  $r$  cuadrado igual a 0,9966 es muy significativo y nos indica que la curva ajustada expresa el comportamiento de estas variables de manera casi exacta.

Tabla 2. Datos de potencia obtenida para diferentes velocidades de viento del Microaerogenerador con aspas construidas a base de Tubo PVC de 2”.

$\Phi$ rotor →	60 cm			50 cm			40 cm		
N° Aspas →	2	3	6	2	3	6	2	3	6
V Viento (m/s)	Potencia Eléctrica (Watts)								
1,71	0,013	0,012	0,012	0,028	0,027	0,021	0,021	0,024	0,022
2,83	0,026	0,028	0,027	0,057	0,052	0,039	0,072	0,063	0,054
3,71	0,048	0,051	0,048	0,087	0,075	0,067	0,094	0,087	0,086
5,01	0,072	0,068	0,059	0,108	0,109	0,089	0,142	0,133	0,113
5,95	0,105	0,104	0,088	0,189	0,177	0,136	0,255	0,213	0,166
6,86	0,099	0,103	0,086	0,181	0,175	0,126	0,243	0,217	0,165
7,67	0,096	0,084	0,075	0,167	0,145	0,118	0,202	0,200	0,150
7,73	0,086	0,080	0,068	0,137	0,138	0,109	0,172	0,166	0,137

Fuente: Elaboración propia (2012).

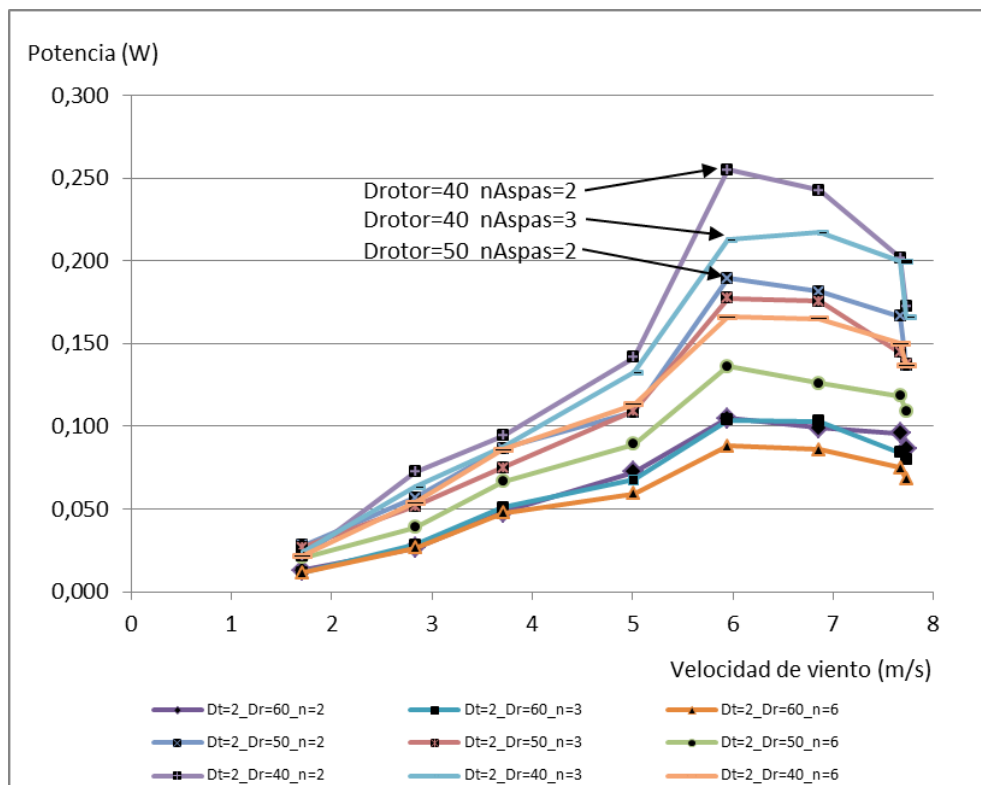


Figura 31. Potencia en función de la velocidad de viento para aspas construidas a base de tubo PVC de 2”.

Dt indica el diámetro del tubo en pulgadas del cual fue obtenido el aspa  
Fuente: Elaboración propia (2012).

Como se observa en la figura 31, la mayor potencia se alcanza en una configuración de diámetro de rotor de 40 cm y 2 aspas seguido de la configuración 40 cm de diámetro y 3 aspas. Un dato adicional que se verá más adelante es la velocidad de arranque, debido a que en estas configuraciones se requirió de un impulso para iniciar el giro del Microaerogenerador. La menor potencia en este grupo de

configuraciones es la de un diámetro de rotor de 60 cm y con 6 aspas, debido a que a mayor velocidad las aspas actúan como un freno impidiendo incrementar la eficiencia, además el peso es mayor que en los demás sistemas.

Tabla 3. Datos de potencia obtenida para diferentes velocidades de viento del Microaerogenerador con aspas construidas a base de Tubo PVC de 4"

$\Phi$ rotor →	60 cm			50 cm			40 cm		
N° Aspas →	2	3	6	2	3	6	2	3	6
V Viento (m/s)	Potencia Eléctrica (Watts)								
1,71	0,014	0,015	0,013	0,020	0,022	0,019	0,030	0,033	0,023
2,83	0,027	0,033	0,031	0,069	0,064	0,044	0,088	0,080	0,056
3,71	0,058	0,057	0,047	0,070	0,071	0,060	0,116	0,115	0,088
5,01	0,079	0,077	0,057	0,107	0,104	0,079	0,185	0,158	0,119
5,95	0,110	0,112	0,086	0,184	0,170	0,119	0,264	0,234	0,165
6,86	0,131	0,114	0,083	0,184	0,164	0,114	0,271	0,243	0,168
7,67	0,116	0,106	0,076	0,144	0,137	0,104	0,235	0,206	0,146
7,73	0,088	0,088	0,065	0,152	0,133	0,096	0,218	0,197	0,143

Fuente: Elaboración propia (2012).

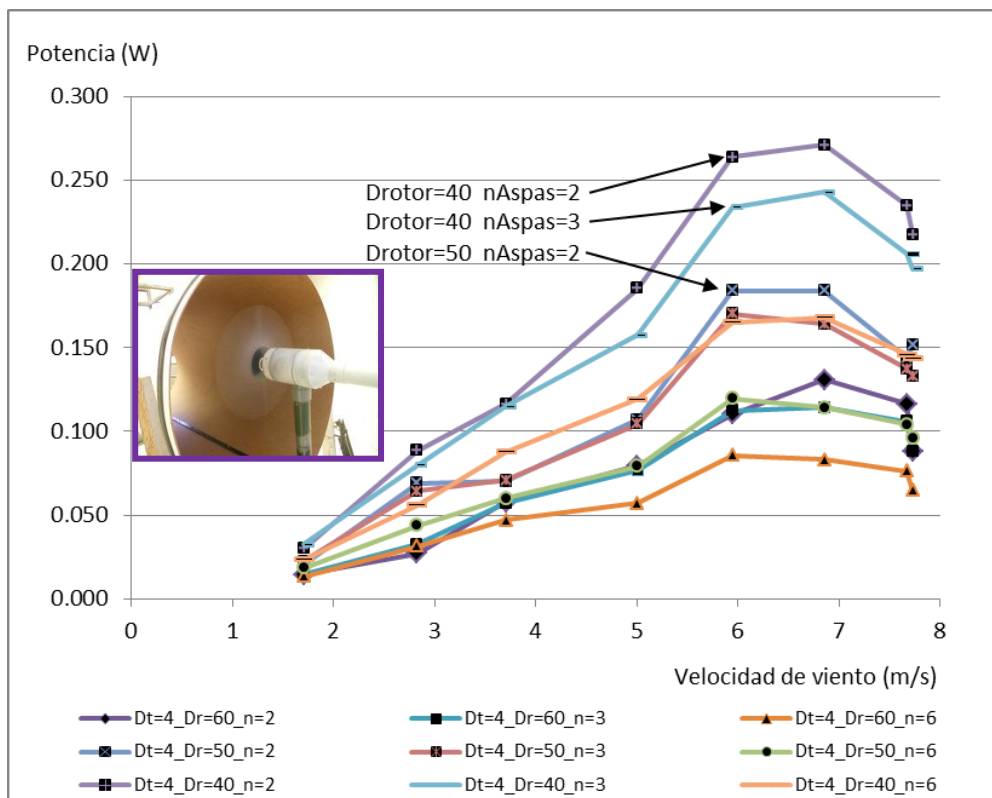


Figura 32. Potencia en funcion de la velocidad de viento para aspas construidas a base de tubo PVC de 4".

Fuente: Elaboración propia (2012).

Según la figura 32, la mayor potencia se alcanza en una configuración de diámetro de rotor de 40 cm y 3 aspas seguido de la configuración 40cm de diámetro y 3 aspas.. La menor potencia en este grupo de configuraciones es la de un diámetro de rotor de 60 cm y con 6 aspas. Como se observa, haciendo una comparación con la figura 31, el comportamiento es muy similar entre ambos, pero la potencia alcanzada es un poco mayor en las aspas construidas a base de tubo PVC de 4 pulgadas y ángulo de ataque de 25".

Tabla 4. Velocidad de arranque para configuraciones de 3 aspas y 40 cm de diámetro.

A base de tubo PVC de 2"	A base de tubo PVC de 4"
V arranque = 1,73 m/s	V arranque = 1,48 m/s

Fuente: Elaboración propia (2012)

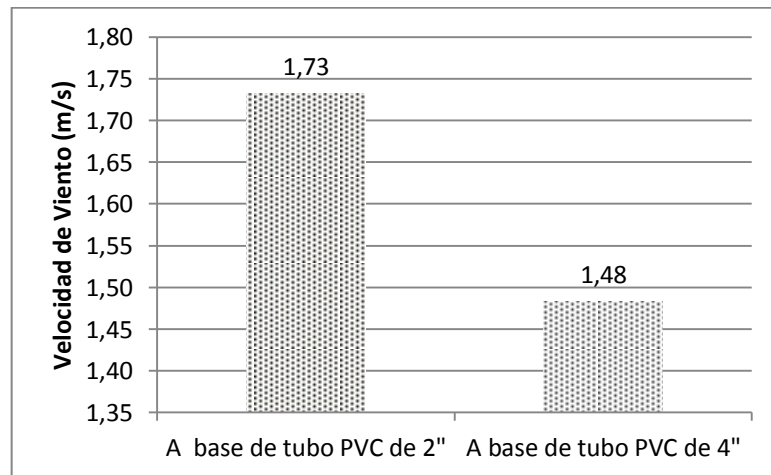


Figura 33. Velocidad de arranque para configuraciones de 3 aspas y 40 cm de diámetro.

Fuente: Elaboración propia (2012).

Como se aprecia en la figura 33 la configuración de 40 cm de diámetro, tres aspas y construida a base de tubo de 4" con ángulo de ataque de 25° requiere una menor velocidad de viento para el arranque y con esto determinamos que es la configuración que se utilizará para la evaluación en campo.

Tabla 5. Datos de la evaluación detallada de la configuración 3 aspas, 40 cm rotor, aspas construidas a base de tubo pvc de 4" para diferentes velocidades de viento.

V viento (m/s)	Potencia mecánica (w)	Voltaje (voltios)	Corriente (mA)	Potencia eléctrica (w)	Coefficiente de Potencia
1,48	0,21	2,9	6,3	0,018	8,71
1,52	0,23	3,0	6,5	0,020	8,58
1,67	0,30	3,2	7,2	0,023	7,64
1,71	0,32	3,7	8,0	0,030	9,18
2,16	0,66	5,1	9,8	0,050	7,63
2,54	1,06	6,2	11,4	0,071	6,69
2,83	1,47	6,7	11,9	0,080	5,45
3,71	3,31	9,2	13,4	0,123	3,72
5,01	8,14	13,2	14,6	0,193	2,37
5,75	12,30	15,0	15,6	0,234	1,90
5,95	13,63	15,2	15,4	0,234	1,71
6,86	20,89	15,6	15,6	0,243	1,16
7,67	29,20	14,3	15,2	0,217	0,74
7,73	29,89	13,7	15,1	0,207	0,69
8,10	34,39	13,4	15,2	0,204	0,59

Fuente: Elaboración propia.

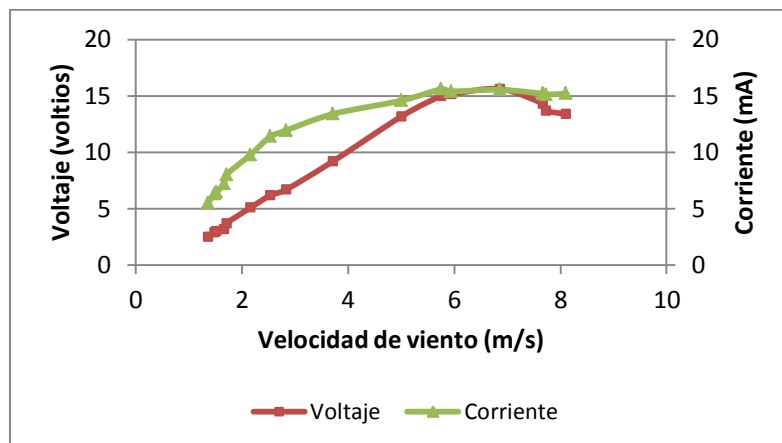


Figura 34. Corriente y voltaje obtenidos de la configuración: 3 aspas, 40 cm rotor.

Aspas construidas a base de tubo PVC de 4", 25° de ángulo de ataque, para diferentes velocidades de viento.

Fuente: Elaboración propia.

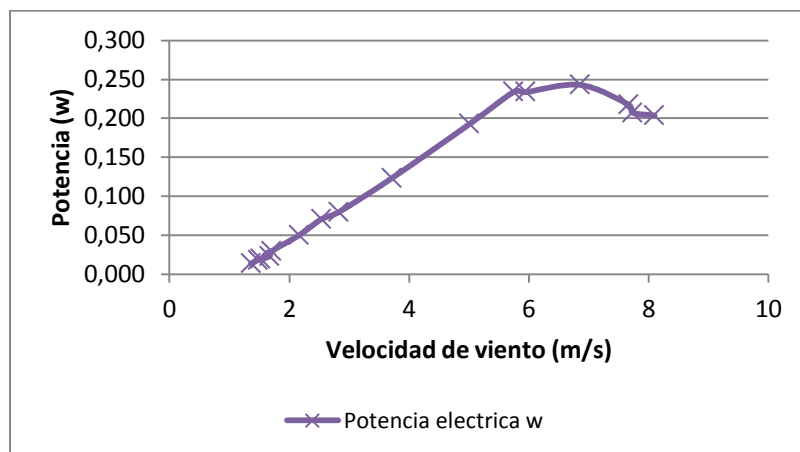


Figura 35. Potencia eléctrica para la configuración: 3 aspas, 40 cm rotor, aspas construidas a base de tubo pvc de 4" para diferentes velocidades de viento.

Fuente: Elaboración propia (2012).

Como se observa en la figuras 35, la potencia eléctrica aumenta hasta un pico en alrededor de 6,86 m/s, siendo este valor el límite al que puede llegar a desempeñarse el aerogenerador con esta configuración.

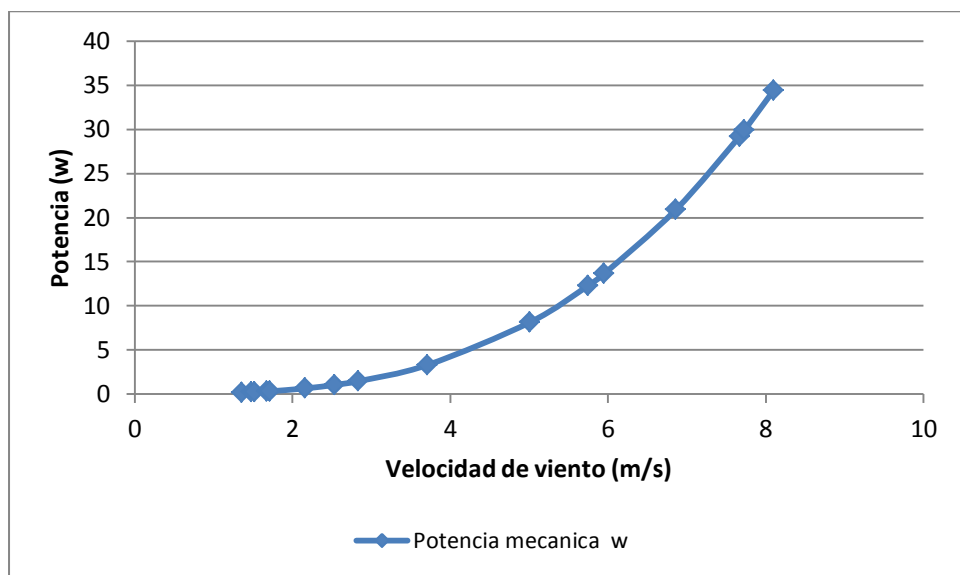


Figura 36. Potencia mecánica disponible para diferentes velocidades de viento para un área barrida por un rotor de 40 cm de diámetro. Fuente: Elaboración propia (2012).

En la figura 36 se muestra la potencia disponible para el área barrida por un rotor de 40 cm de diámetro, se puede apreciar la tendencia a incrementarse, debido a un componente de la potencia que es la velocidad elevada al cubo.

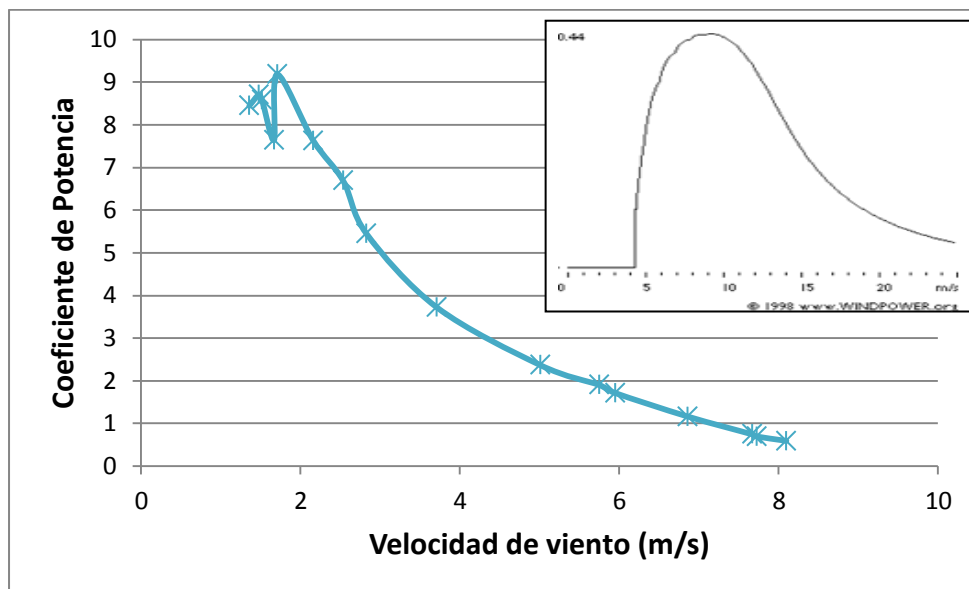


Figura 37. Coeficiente de Potencia del microaerogenerador para una configuración de 3 aspas, 40 cm rotor, construidas a base de tubo pvc de 4" para diferentes velocidades de viento.

Fuente: Elaboración propia (2012).

En la figura 37 se muestra el Coeficiente de Potencia del Micro aerogenerador, como se puede apreciar tiene un ligero incremento hasta los 1,71 m/s y de ahí, la tendencia es a disminuir, esto demuestra que aunque es posible usar este motor de corriente continua como generador eléctrico, el comportamiento difiere de un generador diseñado para tal fin. Este es uno de las inconvenientes que se ha encontrado en esta evaluación. Haciendo una comparación con la figura 9 en que se tiene el coeficiente de potencia de un aerogenerador danés, se aprecia una similitud pero a diferentes velocidades.

## 4.2. Segunda etapa

La evaluación en esta segunda etapa se llevó a cabo en un lugar cercano a la localidad, allí se instaló el micro aerogenerador a una altura de 10 m desde el suelo, además, se instaló un anemómetro y un sensor de temperatura; la información se registró en un Datalogger, cada 10 minutos, los datos fueron pasados luego a una computadora para procesarlos y presentarlos en Tablas y Gráficos.

Los datos obtenidos en esta segunda fase de evaluación son:

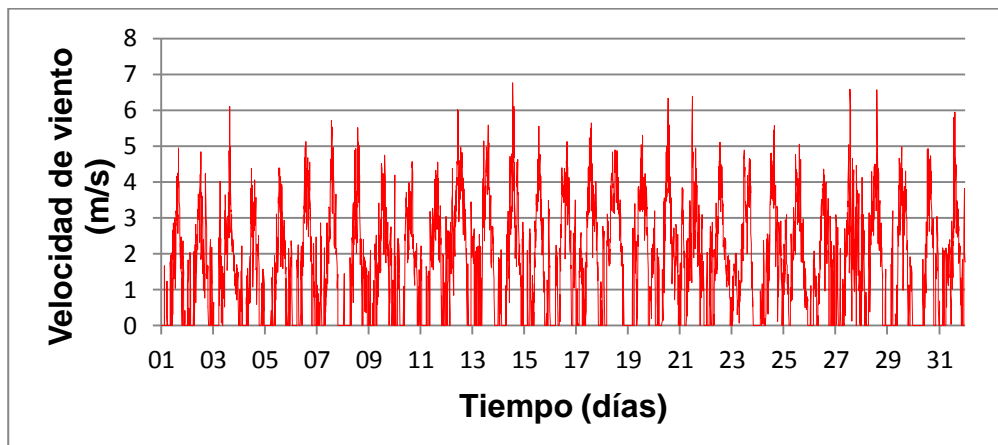


Figura 38. Velocidad de viento obtenido en la etapa de evaluación en campo (octubre del 2012).

Fuente: Elaboración propia (2012).

Como se observa en la figura 38, la velocidad de viento en Tacna tiene picos de entre 4,3 m/s y 6,77 m/s, durante la etapa de evaluación bajo condiciones normales.

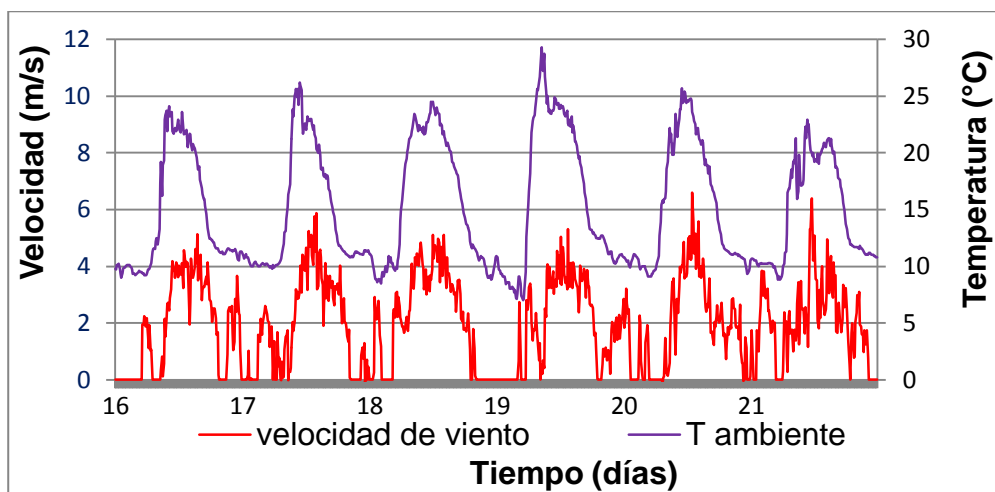


Figura 39. Velocidad de viento en un tiempo de 5 días obtenido en la etapa de evaluación en campo.

Fuente: Elaboración propia (2012).

En la figura 39 se observa con más detalle el comportamiento del microaerogenerador, existe una tendencia a incrementarse la velocidad de viento a mediodía y se nota una dependencia de esta velocidad con respecto a la temperatura ambiente, especialmente en las mañanas.

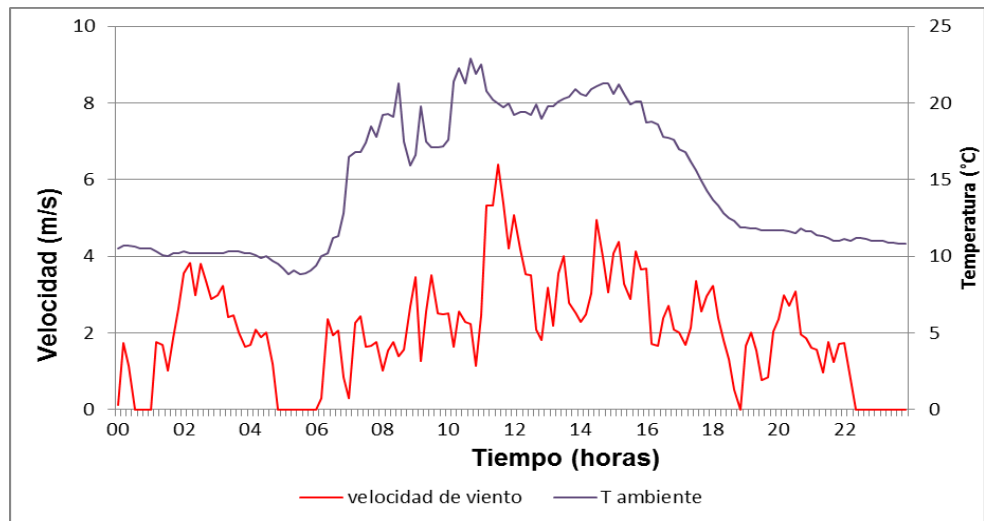


Figura 40. Velocidad de viento durante un día normal (21 de octubre) en la etapa de evaluación de campo.

Fuente: Elaboración propia (2012).

Como se observa en la figura 40, a pesar de que la velocidad de viento es variable, tiene picos al medio día aproximadamente siendo en la mañana el momento en que se tiene un mayor recurso eólico disponible. Además, se nota claramente la influencia de la Temperatura Ambiente en la velocidad del viento.

Entre 1:00 h y 5:00 h hay un porcentaje de recurso eólico que puede aprovecharse, sin embargo, hay días en los que ese porcentaje disminuye o incluso es cero.

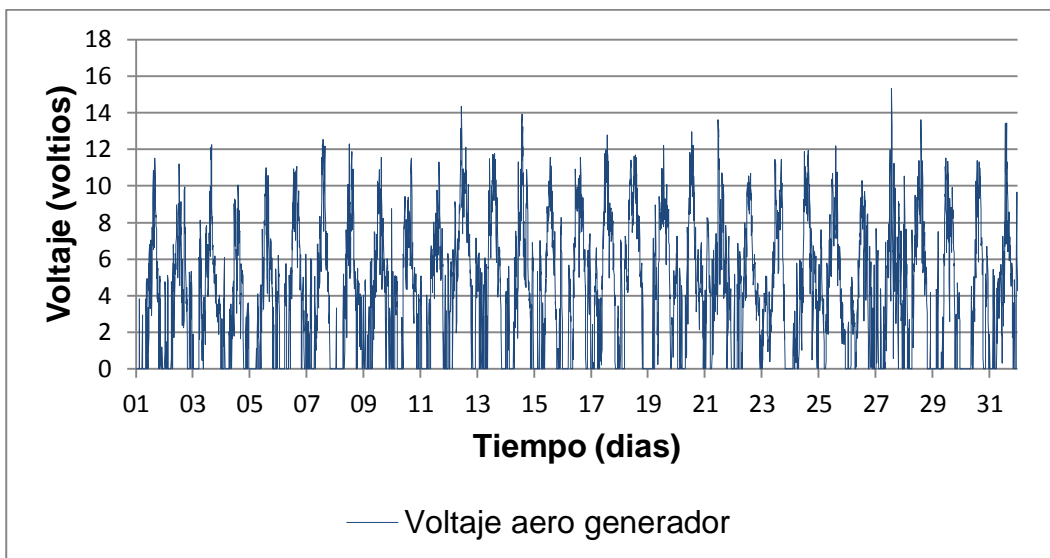


Figura 41. Voltaje obtenido en la etapa de evaluación en campo (Mes de octubre de 2012).

Fuente: Elaboración propia (2012).

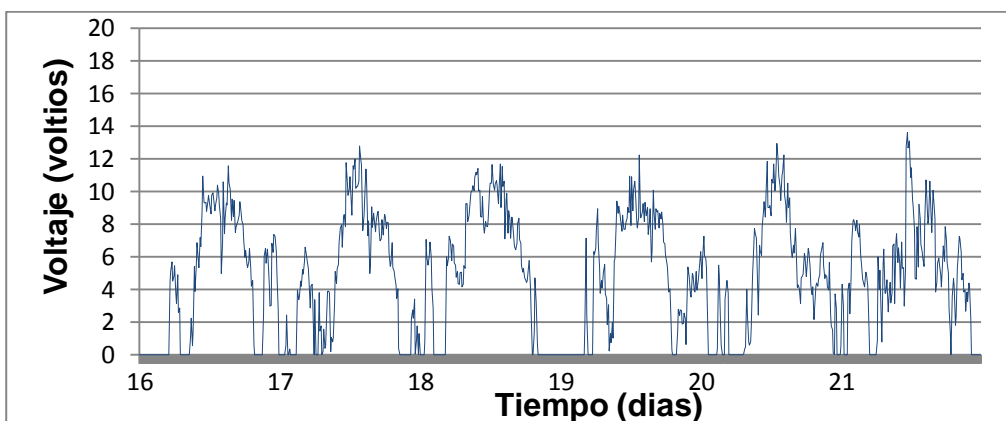


Figura 42. Voltaje en un tiempo de 5 días obtenido en la etapa de evaluación en campo (16 al 21 de octubre de 2012).

Fuente: Elaboración propia (2012).

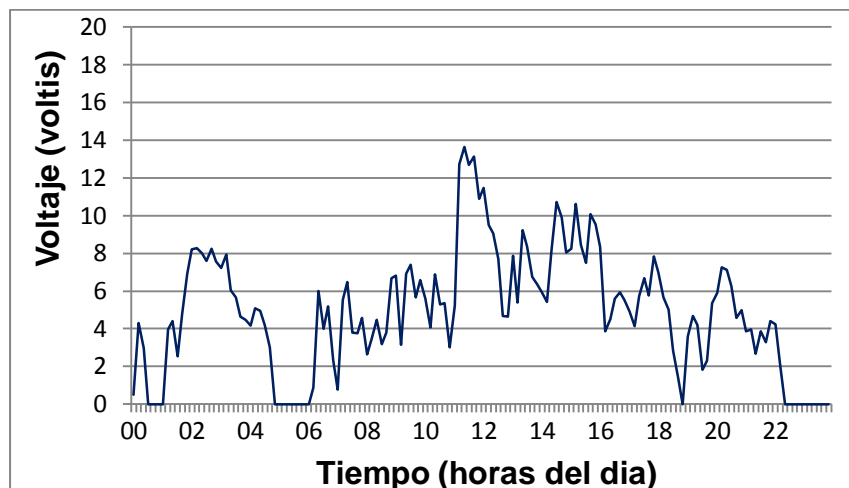


Figura 43. Voltaje durante un día normal (21 de octubre) en la etapa de evaluación en campo.

Fuente: Elaboración propia (2012).

Siendo el voltaje generado dependiente de la velocidad de viento se aprecia una similitud de las figuras 41, 42 y 43 con los figuras 38, 39 y 40 de velocidad de viento. Se puede determinar que los picos de generación se dan alrededor del mediodía, durante las primeras horas del día, también hay un recurso energético apreciable, este fenómeno se da por las corrientes de aire frío que se desplazan del continente hacia la costa, es decir, en dirección opuesta a la que se da durante el día; también apreciamos en la Figura 42 que hay días en que durante las primeras horas no se da ese fenómeno (día 19).

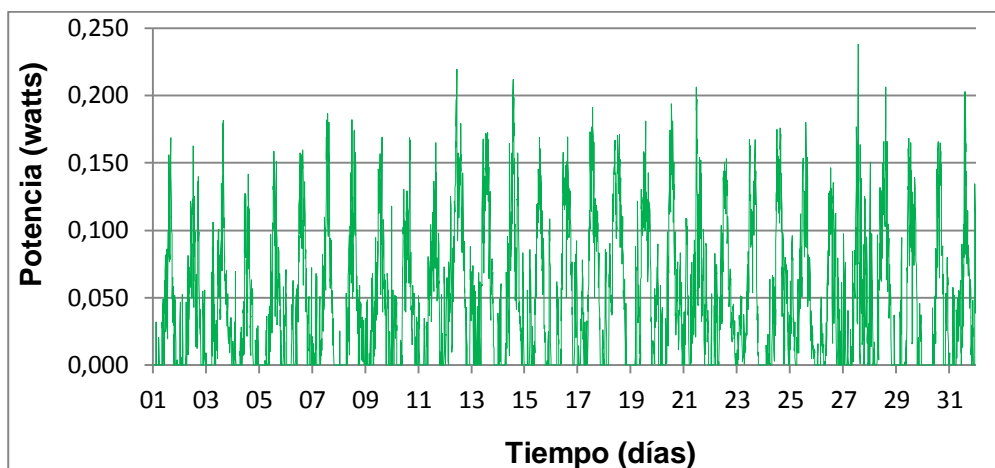


Figura 44. Potencia generada por el microaerogenerador (Octubre del 2012).

Fuente: Elaboración propia (2012).

La dependencia de la potencia con respecto a la velocidad de viento hace que los gráficos de velocidad de viento, voltaje y potencia, sean proporcionales, como vemos en la Figura 44, la potencia eléctrica generada tiene picos de 0,140 a 0,240 mW, estos se alcanzan generalmente a mediodía. Los datos de potencia nos determinan cómo es el comportamiento del aerogenerador, por eso su importancia, y como se aprecia en esta figura, la potencia es baja. Más adelante se verá cómo influye esta en los cálculos de la energía que es posible obtener con este microaerogenerador bajo condiciones de viento de Tacna.

Tabla 6. Promedios diarios de temperatura, velocidad de viento y voltaje obtenidos en la evaluación en campo del micro aerogenerador (Mes octubre de 2012).

Fecha	T ambiente (°C)	V viento (m/s)	Voltaje aero generador (voltios)
01-oct	12,72	1,11	2,72
02-oct	13,36	1,54	3,76
03-oct	13,15	1,57	3,80
04-oct	13,12	1,13	2,78
05-oct	13,49	1,29	3,12
06-oct	13,78	1,65	3,99
07-oct	14,14	1,52	3,69
08-oct	13,89	1,49	3,60
09-oct	14,02	1,61	3,96
10-oct	13,50	1,60	3,91
11-oct	13,41	1,51	3,64
12-oct	15,63	2,46	5,94
13-oct	14,96	1,86	4,50
14-oct	14,70	1,93	4,64
15-oct	14,37	1,56	3,78
16-oct	14,36	1,80	4,37
17-oct	14,55	1,87	4,58
18-oct	15,66	2,11	5,14
19-oct	16,18	1,90	4,60
20-oct	15,13	1,89	4,56
21-oct	14,61	2,03	4,92
22-oct	14,38	1,80	4,36
23-oct	14,78	1,73	4,23
24-oct	14,80	1,79	4,35
25-oct	15,08	1,95	4,80
26-oct	16,05	1,49	3,58
27-oct	17,87	1,72	4,16
28-oct	19,73	1,93	4,68
29-oct	15,31	1,53	3,71
30-oct	13,85	1,29	3,13
31-oct	14,21	1,62	3,99
Promedio	14,67	1,69	4,10

Fuente: Elaboración propia (2012).

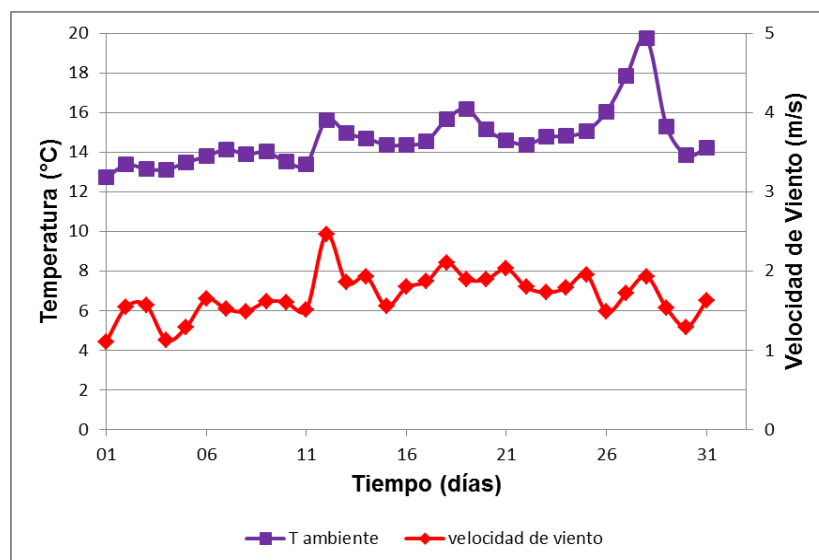


Figura 45. Promedio de temperatura y velocidad de viento obtenidos durante el mes de octubre de 2012.

Fuente: Elaboración propia (2012).

En la figura 45 se aprecia la variación de la velocidad de viento promedio diario que oscila entre 1,11 m/s y 2,46 m/s. En la tabla 6 se aprecia que el promedio del mes de octubre de 2012 es de 1,69 m/s, por debajo del promedio anual de la ciudad de Tacna (2,5 m/s). Este es un dato muy importante debido a que la generación de electricidad utilizando esta fuente de energía renovable no tiene buenas expectativas para sistemas grandes. Además, se muestra la curva de temperatura promedio, se observa que hay una dependencia de la velocidad de viento con la temperatura ambiente. Especialmente, en los 25 primeros días.

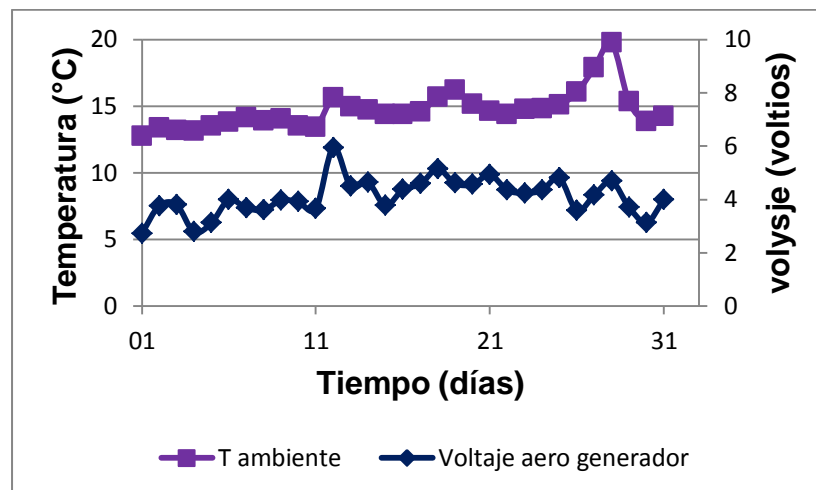


Figura 46. Promedio de temperatura y voltaje obtenidos durante el mes de octubre de 2012.

Fuente: Elaboración propia (2012).

Los promedios de voltaje obtenidos en el aerogenerador oscilan entre 2,72 v y 6,94 v, son bajos en comparación a los picos obtenidos en la toma de datos instantánea que oscilan entre 10 v y 15 v, (Figura 41). El microaerogenerador debe aprovechar la baja potencia eólica con que cuenta nuestra localidad.

Tabla 7. Promedios diarios de energía generada y disponible, obtenidos de la evaluación del micro aerogenerador (octubre de 2012).

Día mes	Energía generada wh	Energía disponible wh	Eficiencia %
01	0,733	17,413	4,21
02	0,997	24,079	4,14
03	0,983	25,340	3,88
04	0,693	14,412	4,81
05	0,832	20,567	4,04
06	1,124	32,709	3,44
07	1,047	34,452	3,04
08	1,008	30,505	3,30
09	1,087	26,656	4,08
10	1,070	26,751	4,00
11	0,997	24,027	4,15
12	1,790	60,546	2,96
13	1,329	41,909	3,17
14	1,324	45,483	2,91
15	1,075	31,204	3,45
16	1,297	38,173	3,40
17	1,335	42,670	3,13
18	1,567	50,136	3,13
19	1,333	38,881	3,43
20	1,304	43,215	3,02
21	1,366	38,666	3,53
22	1,188	31,577	3,76
23	1,160	33,307	3,48
24	1,230	37,549	3,27
25	1,302	33,303	3,91
26	0,954	24,391	3,91
27	1,155	36,273	3,18
28	1,373	42,936	3,20
29	1,071	31,606	3,39
30	0,902	28,092	3,21
31	1,078	29,203	3,69
Promedio general	1,152	33,420	3,45

Fuente: Elaboración propia.

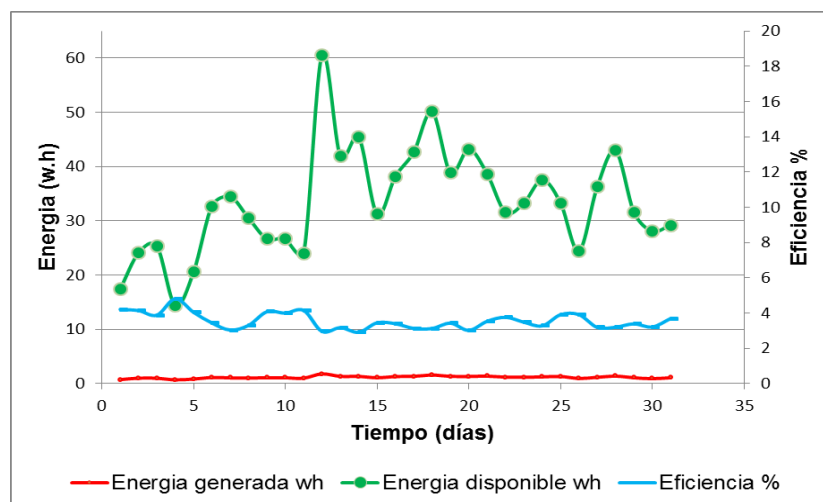


Figura 47. Promedio diario de energía generada y disponible obtenido de la evaluación del microaerogenerador (octubre de 2012)  
Fuente: Elaboración propia (2012).

En la figura 44 se observa el resumen de la evaluación en campo, muestra cómo es el comportamiento del aerogenerador en las condiciones normales de Tacna. Tenemos por un lado, la energía disponible para el aerogenerador que está dada por el área que barre el rotor de 40 cm de diámetro y la velocidad de viento incidente. Por otro lado, tenemos la energía obtenida por el microaerogenerador determinada por las características del motor usado como generador, como se aprecia la diferencia es muy grande, y por tanto, la curva de eficiencia del sistema oscila entre 2,91% y 4,91%, con un promedio de 3,45% según la Tabla 7.

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 5.1. Conclusiones

- Se ha diseñado, construido y evaluado el microaerogenerador usando materiales reciclables y se ha encontrado que la configuración más eficiente de rotor bajo condiciones de velocidad de viento en laboratorio y en campo corresponde a un diámetro de rotor de 40 cm, tres aspas y ángulo de ataque de 25°.
- La velocidad de arranque del microaerogenerador es de 1,48 m/s, este dato es importante porque indica la velocidad mínima requerida para que empiece a funcionar el sistema.
- La energía aprovechable por este aerogenerador depende de la velocidad de arranque, el diámetro del rotor, y por consiguiente, la longitud de las aspas y de la velocidad incidente del viento.
- En la evaluación en campo se ha determinado que la velocidad promedio de viento en Tacna, durante el mes de octubre del 2012, es de 1,69 m/s, y la temperatura ambiente promedio es de 14,67 °C,

bajo estas condiciones se ha generado un promedio diario de 1,152 wh.

- La eficiencia promedio del aerogenerador es de 3,45%, baja pero apreciable si se tiene en cuenta que el microaerogenerador fue construido con materiales reciclables.

## 5.2. Recomendaciones

- Considerando que el motor utilizado es reciclable, para mejorar la eficiencia del sistema se recomienda diseñar un motor apropiado para la aerogeneración eléctrica.
- La configuración de 3 aspas es la mejor, debido a su mayor estabilidad, se recomienda el uso de este número para posteriores experimentos. Variando solamente el diámetro de rotor y/o geometría de las aspas.
- Para posteriores experimentos en esta área se recomienda considerar en el diseño la velocidad de arranque del aerogenerador, por tener Tacna un promedio de velocidad de viento muy bajo.
- Por ser los motores de corriente continua fáciles de aprovechar como generadores eólicos, se recomienda su uso para experimentos demostrativos en centros de enseñanza.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- GATE VEWEG. And Sohn (1985). *Wind Energy eschhorn*.
- GOL. AW. (1964) *Instrumentos Meteorológicos*. Vol. 3. 2da edición.  
Servicio de Meteorología y Comunicaciones. Venezuela
- GONZALES A. MARTÍN F., ARAS F., TZON J.M., ESTEBAN M., RAMIRO J., OTROS (1984). *Curso: Principios de conversión de la Energía Eólica*. Instituto de estudios de la Energía. ER-CEMAT. España.
- LYSEN E. H. (1982). *Introduction to Wind Energy*, SWD Steering Commite  
Wind Energy Development Countries. The Netherlands
- MATAIX CLAUDIO (1991). *Mecánica de Fluidos*. México. Editorial Harla  
2da Edición.
- MATTIO HÉCTOR FERNANDO, TILCA FERNANDO (2009).  
*Recomendaciones para Mediciones de Velocidad y Dirección de Viento con Fines de Generación Eléctrica, y Medición de Potencia Eléctrica Generada por Aerogeneradores*. Argentina, Ministerio de Planificación Federal Inversión pública y Servicios

NELSON V. (1994) *Wind Energy And Wind Turbines*. Alternative Energy Institute. USA. West Texas.

ROBERSON J. A. CROWE CT. (1991) *Mecánica de Fluidos*. México. Editorial Mc Graw Hill. Segunda Edición.

PACCO K. (2008). *Los Vientos de Tacna*. Tacna: Editorial PERUGRÁFICA S.A.C.

SAMSONOV VASSILI (2006) *Aerodinámica y control de Turbinas Eólicas*. Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP) Lima Perú. Ltho y Arte SAC.

### **Bibliografía Electrónica**

AGENCIA ANDALUZA DE LA ENERGÍA (2012), Consejería de innovación Ciencia y Empresa. *Energía Eólica Guía Técnica*. Recuperado de:  
[http://soporte.agenciaandaluzadelaenergia.es/sites/default/files/guia\\_tecnica\\_energia\\_minieolica.pdf](http://soporte.agenciaandaluzadelaenergia.es/sites/default/files/guia_tecnica_energia_minieolica.pdf)

BORJA, MARCO (10 de noviembre de 2012). *Seminario de Energía Eólica*, agosto 2011. Recuperado de:  
[http://201.174.39.75:8011/D1/1\\_MARCO\\_BORJA.pdf](http://201.174.39.75:8011/D1/1_MARCO_BORJA.pdf)

CARDONA, FEDERICO (19 de mayo de 2012). Puntos de Vista. *La enseñanza de la Física en los colegios*. Recuperado de:

[http://www.lostiempos.com/diario/opiniones/columnistas/20100731/la-ensenanza-de-la-fisica-en-los-colegios\\_82914\\_157559.html](http://www.lostiempos.com/diario/opiniones/columnistas/20100731/la-ensenanza-de-la-fisica-en-los-colegios_82914_157559.html).

FERNÁNDEZ, PEDRO (10 de marzo de 2012). *Energía Eólica*. Recuperado de:

<http://libros.redsauce.net/EnergiasAlternativas/eolica/PDFs/01Eolo.pdf>.

FUNDACIÓN PENSAR VERDE (7 de marzo de 2012), *Reciclaje electrónico*. Recuperado de:

[http://www.pensarverde.org/index.php?option=com\\_content&view=article&id=5&Itemid=2](http://www.pensarverde.org/index.php?option=com_content&view=article&id=5&Itemid=2)

GONZÁLEZ, FRANCISCO (5 de marzo de 2012). Reporte de Investigación 2007-01 *Perfil Aerodinámico empleados en Turbinas de Viento*: Introducción para No Cultos. Recuperado de:

<http://www.fglongatt.org.ve/Reportes/RPT2007-01.pdf>

MAÑANES, JUAN (7 de marzo de 2012). *I Encuentro entre actores de la Energía Eólica en Uruguay. Análisis de la Tecnología de fabricación de Aerogeneradores*. Recuperado de:

<http://www.energiaeolica.gub.uy/uploads/documentos/Parte1-%20Tecnologia.pdf>

NOVACTIVA (15 de marzo de 2012). Centro Europeo de Empresas e Innovación de Navarra.. *Energías Renovables* Recuperado de:  
[http://www.navactiva.com/es/descargas/pdf/amedioa/historia\\_renovables.pdf](http://www.navactiva.com/es/descargas/pdf/amedioa/historia_renovables.pdf).

TECH4CDM (10 de marzo de 2012). *La Energía Eólica en Perú*. Recuperado de:  
[http://www.tech4cdm.com/uploads/documentos/documentos\\_La\\_Energia\\_Eolica\\_en\\_Peru\\_13aed1f1.pdf](http://www.tech4cdm.com/uploads/documentos/documentos_La_Energia_Eolica_en_Peru_13aed1f1.pdf)

WORLD WIND ENERGY ASSOCIATION (10 de noviembre de 2012). *Reporte anual de la Energía Eólica en el mundo*. Recuperado de:  
[http://www.wwindea.org/home/images/stories/pdfs/worldwindenergyreport2010\\_e.pdf](http://www.wwindea.org/home/images/stories/pdfs/worldwindenergyreport2010_e.pdf)

## **ANEXOS**

## Anexo A. Cálculo de la densidad del aire

Fórmula para el cálculo de la densidad del aire (CIPM-1981/91)	
$\rho = \frac{p \cdot M_a}{Z \cdot R \cdot T} \cdot \left[ 1 - x_v \cdot \left( 1 - \frac{M_v}{M_a} \right) \right]$ <p> <math>\rho</math> densidad del aire en kg / m<sup>3</sup>  <math>p</math> presión atmosférica en Pa                 </p>	<p> <math>M_a</math> masa molar del aire seco 0,0289635 kg / mol                      (para aire con una fracción molar de CO<sub>2</sub>  <math>x_{CO_2}=0,0004</math>)                 </p> <p> <math>Z</math> factor de compresibilidad adimensional                 </p> <p> <math>R</math> constante molar de los gases 8,31451 J/(mol K)                 </p> <p> <math>T</math> temperatura termodinámica en K, <math>T = t + 273,15</math>                      (t °C)                 </p> <p> <math>x_v</math> fracción molar de vapor de agua, adimensional                 </p> <p> <math>M_v</math> masa molar del vapor de agua, 0,0180154 kg/mol                 </p>
Cálculo de $x_v$	
$x_v = \frac{h}{100} \cdot (\alpha + \beta \cdot p + \gamma \cdot t^2) \cdot \frac{e^{\left( \frac{A \cdot T^2 + B \cdot T + C + \frac{D}{T}}{T} \right)}}{p}$ <p> <math>t</math> temperatura ambiente  <math>h</math> humedad relativa en %                 </p>	<p> <math>\alpha</math> 1,0062  <math>\beta</math> <math>3,14 \cdot 10^{-8}</math>  <math>\gamma</math> <math>5,6 \cdot 10^{-7}</math>  <math>A</math> <math>1,24 \cdot 10^{-5}</math>  <math>B</math> <math>-1,91 \cdot 10^{-2}</math>  <math>C</math> 33,93711047  <math>D</math> <math>-6,34 \cdot 10^{-3}</math> </p>
Cálculo de Z	
$Z = 1 - \frac{p}{T \cdot \left[ a_0 + a_1 \cdot t + a_2 \cdot t^2 + (b_0 + b_1 \cdot t) \cdot x_v + (c_0 + c_1 \cdot t) \cdot x_v^2 \right]} + \frac{p^2}{T^2 \cdot (d + E \cdot x_v^2)}$	
<p> <math>a_0 = 1,58123 \cdot 10^{-6}</math>  <math>a_1 = -2,9331 \cdot 10^{-8}</math>  <math>a_2 = 1,1043 \cdot 10^{-10}</math>  <math>b_0 = 5,7070 \cdot 10^{-6}</math>  <math>b_1 = -2,05 \cdot 10^{-8}</math> </p>	<p> <math>c_0 = 1,9898 \cdot 10^{-4}</math>  <math>c_1 = -2,3760 \cdot 10^{-6}</math>  <math>d = 1,83 \cdot 10^{-11}</math>  <math>E = 7,65 \cdot 10^{-9}</math> </p>

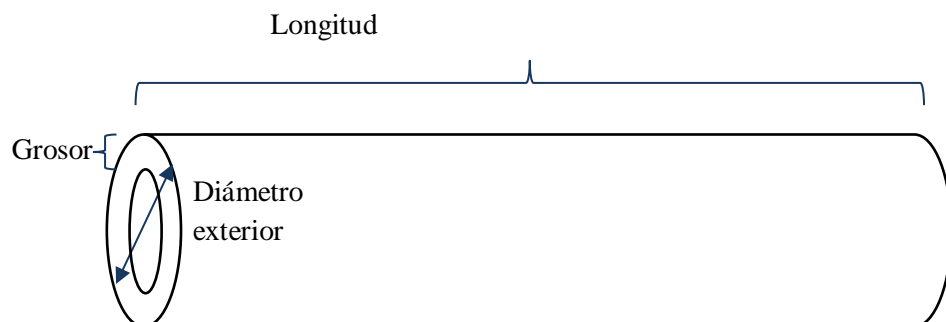
Fuente: CIPM

## Anexo B: Cómo caracterizar aspas construidas en base a secciones de tubo

Buscando información sobre aerogeneradores, no se encontró como caracterizar aspas construidas en base a tubos. Por tal motivo, en este anexo se ha desarrollado una **serie de 4 números** para construir aspas usando tubos de PVC.

Considerando el grafico donde se muestra una sección tubular, necesitaremos conocer algunas características:

- Longitud (L)
- Diámetro externo
- Grosor



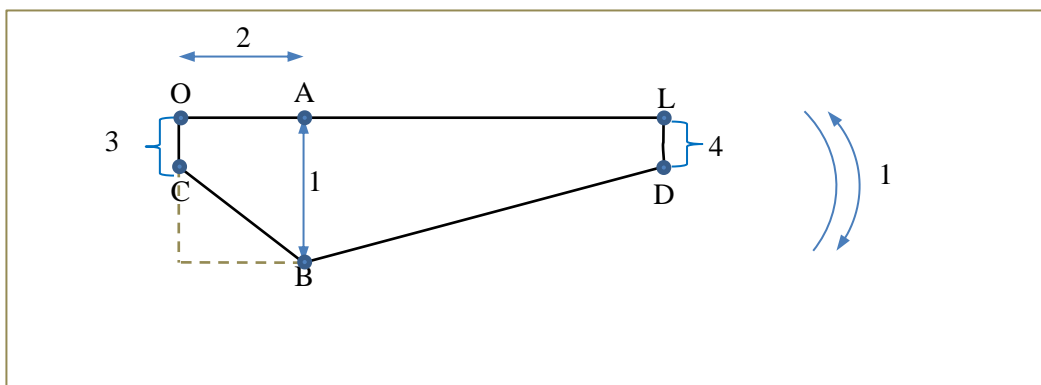
Tomando la longitud (L) como el 100%, determinaremos las características del aspa, cada número de la configuración establecida corresponde a L/X,

Primer dígito (1).- Representa el ancho externo del Aspa, del punto A al punto B, considerando la curvatura del aspa (el dígito se multiplica por L/20)

Segundo dígito (2).- Distancia entre el Punto O al punto A (El dígito se multiplica por L/20)

Tercer dígito (3).- Distancia de la base (punto O) al punto C. (El dígito se multiplica por L/40)

Cuarto dígito (4).- Distancia del extremo (punto L) al punto D. (El dígito se multiplica por L/40).



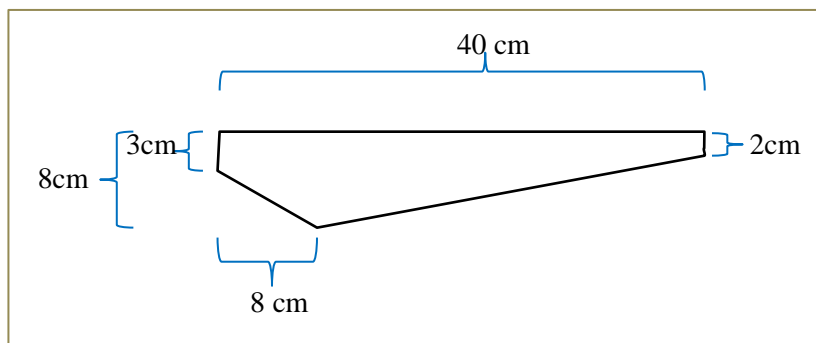
Por ejemplo, si quisiera construirse un aspa de  $L=40\text{cm}$ , y con un número que identifique las dimensiones del aspa 1, 2, 3 y 4 se tendrán muchas posibilidades; específicamente para el número 4432, las dimensiones correspondientes son:

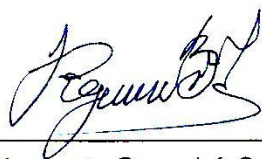
1.-  $40/20 \times \underline{4} = \underline{8\text{cm}}$

2.-  $40/20 \times \underline{4} = \underline{8\text{cm}}$

3.-  $40/40 \times \underline{3} = \underline{3\text{cm}}$

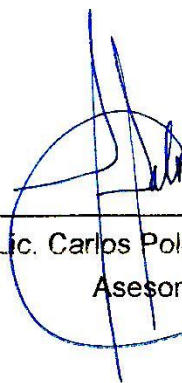
4.-  $40/40 \times \underline{2} = \underline{2\text{cm}}$





---

Bach. Rigoberto Bernabé Coaquera  
Autor



---

Lic. Carlos Polo Bravo  
Asesor