

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA  
FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA  
SECCION DE POSGRADO Y SEGUNDA ESPECIALIZACION**



**“CONSTRUCCION Y MONITOREO DE  
PROTOTIPO AEROGENERADOR DE 500W  
PARA APLICACIÓN EN MICRORREDES  
DOMICILIARIAS Y SERVICIOS  
COMUNITARIOS DEL SECTOR RURAL”**

**TESIS**

**PARA OPTAR EL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS  
CON MENCIÓN EN ENERGETICA**

**JOSE EUGENIO CHIROQUE BALDERA**

**PROMOCION 2005-II**

**LIMA-PERU**

**2009**

## ÍNDICE DE FIGURAS

### Capítulo 1

- 1.1: Capacidad global instalada entre 1996 y 2007
- 1.2: Crecimiento de la potencia global estimada para el ciclo 2007-2012
- 1.3: Potencia instalada de energía eólica
- 1.4: Rotores horizontales con diferentes número de palas
- 1.5: Modelo bipala Sirocco de Eoltec
- 1.6: Modelo monopaala Windburn Powerhousebind
- 1.7: Modelo multipala Pacific 100 Marine de Ampair Natural Energy
- 1.8: Modelo IT-PE100 de ITDG, rotor de tres aspas
- 1.9: Modelo BWC XL.1 Bergey, rotor de tres aspas
- 1.10: Turbina Supa-Flo de U.S Wind Turbina, LLC, Modelo Savonius
- 1.11: Turbina modelo Darrieux fabricada por Ropatec
- 1.12: Rotor WS 0.30 A de Oy Windside Producción Ltd
- 1.13: Rotor Darrieux agrupado los perfiles en pareja
- 1.14: Opciones de configuración de máquinas eléctricas de imán permanente
- 1.15: Configuración de máquina de imán permanente de flujo radial
- 1.16: Mapa de viento a 80 m-promedio anual

### Capítulo 2

- 2.1: Vista del sistema de coordenadas en posición inicial
- 2.2: Vista de perfil en posición inicial
- 2.3: Vista de plana
- 2.4: Sistema de coordenadas iniciales
- 2.5: Vista en planta. Cola desviada
- 2.6: Orientación del sistema de coordenadas de la base 0 a la base I
- 2.7: Perfil del pivote de cola
- 2.8: Orientación del sistema de coordenadas de la base I a la base II
- 2.9: Elevación de la cola debido al pivote
- 2.10: Orientación del sistema de coordenadas de la base II a la base III
- 2.11: Descomposición de la velocidad del viento cuando comienza el bloqueo
- 2.12: Descomposición de  $L_c$  en base 0
- 2.13 Vista general del túnel de viento
- 2.14: Bloqueo del aerogenerador. Ensayo hecho en el túnel de viento
- 2.15: Circuito para determinar el punto de trabajo
- 2.16: Curva de magnetización para algunos materiales, típicos imanes permanentes
- 2.17: Fuerzas magnéticas entre dos imanes
- 2.18: Los imanes están en paralelo, con el bobinado en el centro
- 2.19: Características geométricas del imán
- 2.20: Intersección de la curva de magnetización y la curva de carga
- 2.21: Distribución de los imanes en el rotor
- 2.22: Curva de transferencia de la energía de imán
- 2.23: Curva teórica de voltajes de línea de cada fase
- 2.24: Características geométricas de las bobinas
- 2.25: Circuito eléctrico equivalente para una fase de máquina
- 2.26: Diagrama fasorial del circuito, para una fase

### Capítulo 3

3.1: Base de trabajo en Huacho (Lima)	58
3.2: Base de trabajo en el distrito de Bambamarca (Cajamarca)	58
3.3: Diámetro del rotor eólico de 3 m	62
3.4: Distribución de las 20 secciones en que se ha dividido la pala	65
3.5: Distribución de los 20 perfiles en que se ha dividido la pala para su construcción	66
3.6: Detalle geométrico de las 20 secciones de la pala	67
3.7: Muestra los perfiles listos para la preparación del molde	71
3.8: Perfiles dispuestos a lo largo de un eje para la construcción del molde	71
3.9: Posición de aerogenerador con vel. del viento mayor a los valores de diseño	77
3.10: Muestra el tornamesa en tres dimensiones	78
3.11: Muestra la vela de placa plan	78
3.12: Arreglo de los imanes y el bobinado	79
3.13: Dimensiones del imán	80
3.14: Intersección de la curva de magnetización y curva de carga	81
3.15: Curva de voltaje máx. de línea en vacío en función de la vel. del rotor en RPM	83
3.16: Distribución trifásica de las bobinas	84
3.17: Distribución geométrica de los bobinados	84
3.18: Sección transversal de la bobina	85
3.19: Circuito eléctrico equivalente para una fase	87
3.20: Diagrama fasorial del circuito, para una fase	87
3.21: Conexión y arreglo de las bobinas en el disco estator	90
3.22: Muestra un esquema en tres dimensiones del generador construido	91
3.23: Muestra un esquema en tres dimensiones del generador construido	91
3.24: Distribución de imanes, molde con las bobinas	92
3.25: Muestra de dos secciones	93
3.26: Muestra de la pala en tres dimensiones	93
3.27: Muestra los moldes de madera de los intrados y extrados	94

#### Capítulo 4

4.1: Esquema general de banco de pruebas	96
4.2: Motor eléctrico empleado en las pruebas del generador	96
4.3: Generador eléctrico de imanes permanentes	97
4.4: Torquímetro empleado en las pruebas al generador	97
4.5: Juntas para acoplar generador y motor con el torquímetro	97
4.6: Diagrama del banco de pruebas empleado	98
4.7: Diagrama donde se muestra la ubicación de los instrumentos	99
4.8: Curva de pérdidas mecánicas del generador eléctrico	101
4.9: Torque debido a las pérdidas en función de la velocidad de giro	102
4.10: Muestras las pérdidas mecánicas del generador de imanes	102
4.11: Velocidad promedio durante enero de 2008 para alturas de 7 y 15 m	106
4.12: Velocidad promedio durante enero-marzo de 2008 para una altura de 7 m	106
4.13: Velocidad promedio durante abril-junio de 2008 para una altura de 7 m	107
4.14: Velocidad promedio durante julio-septiembre de 2008 para una altura de 7 m	107
4.15: Velocidad promedio durante 8 meses, a una altura de 8 m sobre el suelo	108
4.16: Dirección del viento en la zona de influencia, comunidad de Alto Perú	109
4.17: Anemómetro instalado a 7 m sobre el suelo	109
4.18: Anemómetro instalado a 10 m sobre el suelo	109
4.19: Voltaje en función de la velocidad de giro del aerogenerador	113
4.20a: Voltaje con respecto a la velocidad de giro del rotor	114
4.20b: Velocidad de giro en función de la velocidad de viento	114
4.21: Tablero con focos de 24 VDC preparado para realizar las pruebas de campo	115
4.22: Voltaje y potencia en función de la velocidad de viento, operando con carga	118
4.23: Voltaje y potencia en función de la velocidad de giro del rotor	119
4.24: Potencia en función de la velocidad de viento	119

4.25: Potencia en función de la velocidad de viento, sobre los 3700 msnm	120
4.26 y 4.27: Esquema y tablero en campo en condiciones reales de trabajo	121
4.28, 4.29 y 4.30: Aplicaciones en la costa y la sierra	122

## ÍNDICE DE TABLAS

### Capítulo 1

1.1: Potencia instalada de energía eólica en el mundo	13
1.2: Potencia instalada por empresas en los 10 últimos años en el país	20
1.3: Potencial energético del viento en el Perú	22
1.4: Potencial eólico nacional	23

### Capítulo 2

2.1: Muestra los parámetros considerados en el diseño	27
---	----

### Capítulo 3

3.1: Valores del NACA 4412	63
3.2: Ángulo y cuerda de cada sección de la pala	64
3.3: Muestra los puntos de cada sección desde 01-20	72
3.4: Lista de materiales y costo	94

### Capítulo 4

4.1: Datos de la prueba de vacío del generador eléctrico	100
4.2: Resultados del ensayo del generador con carga	103
4.3: Comparación de datos teóricos y reales con respecto a los voltajes de salida	104
4.4: Tabla de resultados, se verifica la eficiencia del sistema	105
4.5: Muestra cuantificación y disponibilidad del recurso eólico en la comunidad	110
4.6: Muestra cuantificación y disponibilidad del recurso eólico en la comunidad	111
4.7: Resultados medidos en campo operando la máquina en vacío	112
4.8: Resultados del aerogenerador instalado en campo operando con carga	115

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco profundamente a mis profesores de la maestría y en especial al Maestro Teodoro Sánchez C., quien me mostró el camino y la importancia de la energía eólica a pequeña escala; al Doctor Salomé Gonzáles Chávez por apoyar e impulsar la construcción del Túnel de Viento en la UNI, una herramienta fundamental para la investigación en el tema, y por haber asesorado la presente Tesis. A Soluciones Prácticas-ITDG, así como a los pobladores y autoridades de las comunidades de El Alumbre y Alto Perú en Cajamarca, por la alegría con la que siempre me recibieron y confiaron en que el viento que antes les apagaba las velas hoy les da luz, mejorando su calidad de vida.

## **DEDICATORIA**

**A mis padres Felicita y Manuel por enseñarme el camino del bien y por la inmensa dedicación y esfuerzo desplegado para enviarme al colegio.**

**A mis hermanos por su apoyo y aliento en todo momento para lograr mis metas y realización profesional.**

## **RESUMEN**

La investigación y desarrollo en tecnología de aerogeneración de pequeña potencia (menor de 1 kW), es limitada en el país y en el mercado internacional, no obstante que se presenta como una solución energética y socioeconómica estratégica para zonas rurales que disponen del recurso eólico, tal como demuestran las destacables experiencias realizadas en la década de los ochenta por el Instituto de Investigación Tecnológica Industrial y de Normas Técnicas (ITINTEC), y desde 1998 por la Intermediate Technology Development Group (ITDG), organización que viene trabajando en la promoción y desarrollo de aerogeneradores para satisfacer cargas domésticas y pequeñas demandas comunitarias de zonas rurales.

La presente Tesis de Maestría es una investigación aplicada cuya metodología integra labores de gabinete, de laboratorio y de campo. Comprende el diseño, construcción y pruebas de un sistema de aerogeneración de 500 W; esto es, el cálculo, diseño y fabricación del generador de imanes permanentes, del rotor eólico y del sistema de dirección, así como la realización de ensayos y pruebas del generador eléctrico en laboratorio y la evaluación en campo del sistema aerogenerador para determinar su performance y confiabilidad.

Los logros alcanzados en la investigación de la unidad aerogeneradora prototipo de 500 W, condujeron a su reproducción y aplicación mediante la instalación y monitoreo de unidades interconectadas, microrredes, para cubrir las demandas de conjuntos de viviendas y servicios comunitarios del sector rural peruano, experiencia piloto llevada a cabo en la región Cajamarca.

La importancia de este trabajo estriba en la contribución a la mejora de la calidad de vida de las poblaciones rurales de limitadas condiciones socioeconómicas, aprovechando el recurso local limpio y renovable existente.

## **PALABRAS CLAVE**

Aerogenerador, imán permanente, sector rural, socioeconómico, energía limpia, microrred.

## **SUMMARY**

The investigation and development in technology of wind systems of small power (lower than 1 kW) is limited in the country and in the international market, however it seems as a strategic solution in energetic, social and economic fields for rural areas which have wind resource. The relevant experiences of the eighties made by the Instituto de Investigación Tecnológica Industrial y de Normas Técnicas (ITINTEC), and since 1998 by Intermediate Technology Development Group (ITDG) who is working in the promotion and development of wind systems to satisfy the domestic charges and small demands in rural areas show it.

This master's thesis is a hard-working investigation of which methodology integrate departments, laboratory and field works. It includes design, construction and proofs of a wind system of 500 W. This means the calculation, design and manufacture of the generator of permanent magnet, wind rotor and direction system, in addition of the trials and proof of electric generation in the laboratory and the evaluation in field of the wind system to determine the performance and reliability.

The achievements in the investigation of the wind system unit prototype of 500 W, lead to the reproduction and application through the installation and monitoring of interconnected units, micro grids to cover the demands of small neighborhoods and communal services in the Peruvian rural sector, pilot experience held in Cajamarca region.

The importance of this work is the contribution in improving the livelihoods of rural populations with limited social-economic conditions using the clean and renewable local resource that exists in the zone.

## **KEY WORDS**

Wind system, permanent magnet, rural sector, social-economic, clean energy, micro grid.



## **HIPÓTESIS**

El desarrollo y validación de tecnología local de unidades eólicas de baja potencia equipada con generadores de imanes permanentes es una alternativa técnica y socioeconómica estratégica para atender demandas de energía eléctrica de zonas rurales que poseen el recurso eólico.

## **OBJETIVO GENERAL**

El diseño, construcción y monitoreo de un aerogenerador prototipo de 500 W, con generadores de imanes permanentes de flujo axial, para su aplicación conformando unidades interconectadas, microrredes de viviendas y servicios comunitarios del sector rural.

## **OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Cálculo y diseño en gabinete de un sistema de aerogeneración de 500 W que comprende los siguientes componentes: generador eléctrico de imanes permanentes, rotor eólico y sistema de dirección
- Fabricación del prototipo del generador eléctrico
- Fabricación de prototipos de palas
- Fabricación de prototipos del sistema de dirección
- Montaje de banco y ensayo del generador eléctrico
- Instalación de sistemas de medición y registro de parámetros ambientales
- Instalación en campo de un prototipo completo
- Determinación de las curvas características del generador de imanes permanentes en laboratorio: curvas características de potencia y de eficiencia
- Determinación de las curvas de trabajo del sistema de aerogeneración *in situ*: curvas de potencia y eficiencia
- Aplicación y monitoreo de unidades aerogeneradores conformando microrredes, para atender conjuntos de unidades familiares y servicios comunitarios

## INTRODUCCIÓN

El aprovechamiento de las energías limpias ha experimentado un crecimiento sustantivo en los últimos años, especialmente en los países económicamente desarrollados. Las razones son bastantes conocidas: los irreparables e irreversibles daños al medio ambiente por el consumo excesivo de combustibles fósiles, el constante incremento en los precios de éstos y la fuerte dependencia energética de muchos países de Europa respecto a los países productores de petróleo. Todo ello ha favorecido a que las energías renovables sean tomadas en cuenta dentro de los planes estratégicos de mediano y largo plazo, como en el caso europeo, en el que se implementaron normativas y políticas de fomento e incentivos tales que permitieron atraer a las empresas e inversionistas, alcanzando en la actualidad excelentes resultados reflejados en la gran disponibilidad de tecnología, competitividad y economía.

En América del Sur en la última década se presentan avances muy importantes y progresivos en el desarrollo de la energía eólica. Un caso especial es el del aprovechamiento de la energía eólica para la generación eléctrica en mediana y gran potencia, donde se ha logrado el desarrollo de alta tecnología en aerogeneración. La competitividad en el costo de la energía producida ha generado rentabilidad y consecuente atractivo para los inversionistas privados.

Por otro lado, se estima en 1.6 mil millones de personas en el mundo no tienen acceso a la energía eléctrica, ubicándose en su mayoría, en los países en vías de desarrollo, como el Perú. En este ámbito, el grado de cobertura eléctrica en zonas rurales aisladas es extremadamente bajo, no obstante estas zonas disponen de recursos energéticos renovables. Para estas familias, acceder a un servicio energético básico implica grandes barreras dadas sus características: economía de subsistencia, alta dispersión poblacional, limitación cultural, postergación en atención del Estado y, complejidad de la geografía; esta última limita la extensión de la red del sistema eléctrico interconectado. En estos casos, es necesario considerar el aprovechamiento estratégico de las energías renovables a pequeña escala (hidroenergía, energía solar y la fuerza del viento), según las condiciones y disponibilidad de cada zona geográfica.

En el contexto de la demanda energética del Perú, en el año 1982 se tenía un coeficiente de electrificación nacional del 40 %, al año 2008, este coeficiente alcanzó el 82 %, sin embargo, las familias más pobres, las mismas que viven en las zonas rurales y alejadas, presentan un coeficiente del 29.7 % al año 2008, con una proyección al 2017 de llegar al 70 %. Entre los factores gravitantes que hacen que este sector social no forme parte de los intereses de inversión de la empresa privada se encuentran: el precario nivel socioeconómico, que se refleja en un bajo consumo de energía que caracteriza a estos lugares; los altos costos que representan la infraestructura para el transporte y distribución de la energía, y el mantenimiento debido a lo alejado y disperso de las zonas.

Por otro lado, el Perú goza de una inmensa riqueza energética natural, siendo las fuentes de energía renovables las que se distribuyen en una mayor cobertura regional. Precisamente, la diversificación microclimática que posee el Perú hace que estas energías: solar, eólica, biomásica y microhidráulica, alcancen niveles en que puedan ser aprovechables de forma puntual, en pequeña escala de generación, con tecnología nacional y con bajos costos de inversión.

El aprovechamiento de la energía eólica en pequeña escala se presenta como una alternativa para zonas rurales dispersas, las mismas que cuentan con recurso eólico apropiado para su transformación y generación distribuida con sistemas modulares. Sin embargo, el desarrollo de tecnologías para la aerogeneración a pequeñas potencias, de 50 W a 1000 W, no ha tenido la misma promoción y avance que los sistemas de mediana y gran potencia.

En el país se prevé la aplicación eólica a pequeña escala con aerogeneradores que van de 50 W hasta 50 kW para cubrir pequeñas demandas domésticas, sociales y pequeños usos productivos en granjas, así como conexión a la red. La institución más importante en términos de inversión para electrificación rural en el Perú es el gobierno central a través del sector de Energía del Ministerio de Energía y Minas (MINEM): en el Plan Nacional de Electrificación Rural 2008-2017 se consigna una inversión del gobierno central superior a US\$ 975 millones. En dicho plan, el MINEM ha previsto la instalación de poco más de 9 mil microaerogeneradores, variando en función de las demandas locales. Para la adquisición e instalación de estos equipos el MINEM ha previsto una inversión de más de US\$ 13.6 millones, con el fin de beneficiar a más de 45 mil habitantes. En esta década ya se cuenta con nuevas experiencias de microaerogeneración (comunidades de El Alumbre, Campo Alegre, Alto Perú, en Cajamarca) implementadas en el año 2008 por organizaciones de desarrollo y el MINEM, y que llegan a sumar 6 kW, en ellas ya se emplean los generadores de imanes permanentes, teniendo una proyección de crecimiento al año 2017 de 2 MW de potencia instalada con aerogeneradores pequeños, pudiendo ser sistemas individuales o pequeños centros de generación para la distribución en microrredes.

El crecimiento de la microeólica para la conexión a la red también se viene dando en Europa y no se descarta el desarrollo en el país con máquinas menores a 50 kW. Si bien la microeólica no tendría un efecto relevante en la matriz energética nacional, sí tendrá un impacto social en la mejora de la calidad de vida de los habitantes del sector rural, y un impacto económico en la oportunidad de generar pequeñas empresas nacionales fabricantes de equipo eólico y servicios.

Por lo tanto, se requiere investigar y desarrollar tecnologías que permitan la generación de energía en concordancia con los recursos renovables disponibles localmente; alcanzando con ello costos accesibles y respaldo técnico local. Con el paso del tiempo, la promoción y la sostenibilidad en la oferta estratégica de las energías renovables en zonas marginales, serán los elementos que permitan el paso de un proyecto que persigue soluciones socioeconómicas, hacia un proyecto con fines de rentabilidad y competitividad.

La importancia de este trabajo radica en mostrar la contribución de esta tecnología a la mejora de las condiciones de vida de las poblaciones de menores ingresos económicos, lo que incentiva a pequeñas empresas a desarrollar capacidades locales y se aprovecha un recurso local de energía con tecnología apropiada, preservando el medio ambiente.

El contenido de la tesis contempla, en una primera parte, los antecedentes tecnológicos de la microeólica a nivel internacional y avances a nivel local; en la segunda parte se presenta el marco teórico y de formulación de cada uno de los componentes del aerogenerador (generador de imanes, palas, sistema de control); en la tercera se aborda el cálculo, diseño, dimensionamiento y resultado constructivo de cada componente, así como la estructura metodología seguida en el desarrollo del

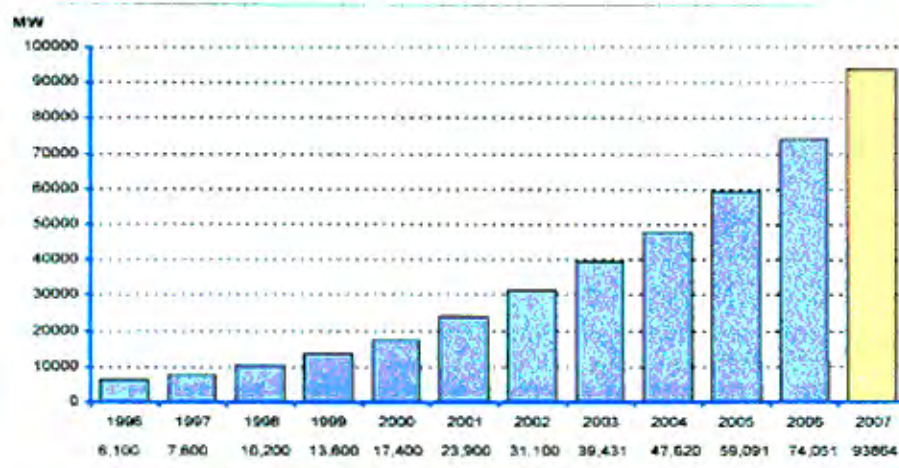
prototipo; en la cuarta se presentan los resultados de las pruebas del generador eléctrico, la evaluación de campo del sistema completo y del monitoreo, así como la aplicación conformando microrredes para electrificar viviendas y servicios comunitarios del sector rural peruano, así como la experiencia piloto llevada a cabo en la región Cajamarca.

## CAPÍTULO 1: ANTECEDENTES TECNOLÓGICOS Y APROVECHAMIENTO DEL POTENCIAL EÓLICO NACIONAL

### 1.1. AVANCES DE LA ENERGÍA EÓLICA EN EL MUNDO

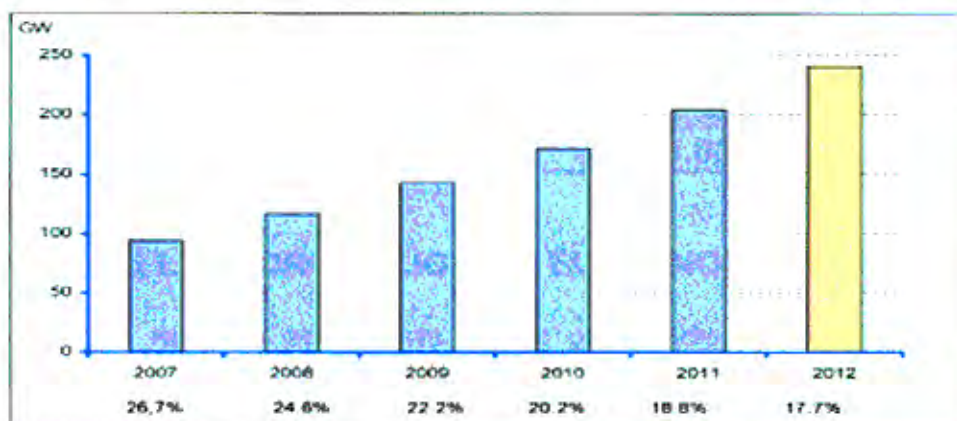
En la Unión Europea, el crecimiento de la generación eléctrica mediante la energía del viento se evidencia en el incremento de la potencia, tal como muestra la figura 1.1. De una potencia de 6.1 MW generada en 1996 se pasó a 93.864 MW en 2009. Destinándose esta producción a cubrir la demanda eléctrica de las grandes industrias y metrópolis.

Figura 1.1: Capacidad global instalada entre 1996 y 2007



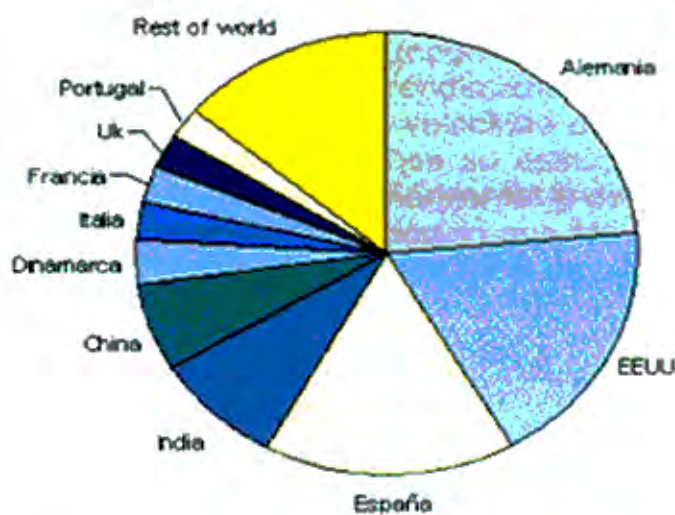
El crecimiento de la producción eólica para los próximos cinco años se estima en un ritmo promedio de 17 % anual, alcanzando los 240 MW, lo que significa un crecimiento de 2.6 veces en los próximos cinco años, como se muestra en la figura 1.2.

Figura 1.2: Crecimiento de la potencia global estimada para el ciclo 2007-2012



El aprovechamiento de la velocidad del viento se realiza con bastante éxito en los países de Europa, siendo Alemania y España los países que mayores megavatios instalados tienen. Junto a EEUU, representan el 58 % de la capacidad instalada global. La figura 1.3 y la tabla 1.1 muestran la potencia instalada y el porcentaje que ésta representa en el mundo.

**Figura 1.3: Potencia instalada de energía eólica**



**Tabla 1.1: Potencia instalada de energía eólica en el mundo [19]**

	MW		
58%	Alemania	22 247.00	23.7 %
	EEUU	16 818.00	17.9 %
	España	15 145.00	16.1 %
	India	7 845.00	8.4 %
	China	5 906.00	6.3 %
	Dinamarca	3 125.00	3.3 %
	Italia	2 726.00	2.9 %
	Francia	2 454.00	2.6 %
	Gran Bretaña	2 389.00	2.5 %
	Portugal	2 150.00	2.3 %
	Resto del mundo	13 060.00	13.9 %
<b>Total</b>	<b>93 865.00</b>		

## 1.2. AVANCES DE LA MICROEÓLICA EN EL MEDIO INTERNACIONAL

En los últimos años, nuevas empresas están ofertando en el mercado internacional pequeños aerogeneradores: máquinas que, en su mayoría, han sido diseñadas para trabajar a velocidades de viento de 12 m/s y que, sin embargo, difícilmente se encuentran en el país. De allí la importancia de desarrollar una máquina pequeña de aplicación local. Por ello, en esta parte de la tesis abordamos los antecedentes de la

eólica de pequeña potencia y no el impresionante desarrollo de la tecnología para generación de la gran potencia empleada en los parques eólicos.

### 1.2.1. TIPOS DE TURBINAS

A la fecha, para la generación de gran potencia se emplean fundamentalmente turbinas de eje horizontal de tres palas, las cuales ya han logrado un posicionamiento en el mercado internacional, éstas cuentan con mejor comportamiento de eficiencia y de estabilidad, logrando tener un rotor balanceado dinámico y aerodinámicamente. Las turbinas de eje vertical poseen varios modelos en el mercado, pero no han tenido el mismo éxito, ya que tienen un menor rendimiento para con un rotor equivalente al de eje horizontal, además de que la baja velocidad de su giro dificulta la generación de energía eléctrica, para grandes tamaños su estructura se presenta complicada. En pequeña potencia, los rotores de eje horizontal y de tres aspas son también los que han alcanzado mayor desarrollo tecnológico que los pequeños rotores eólicos de eje vertical; existen varias aplicaciones pilotos en el ámbito internacional que muestran ser una alternativa para la baja potencia.

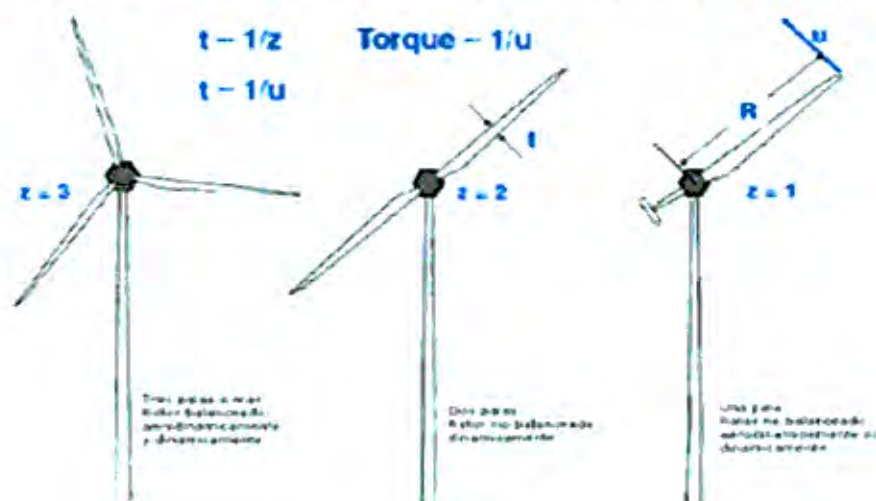
#### a. TURBINAS DE EJE HORIZONTAL

Son el tipo de rotor eólico de mayor estudio en los últimos tiempos, con el desarrollo de potentes software para el diseño han hecho posible alcanzar un rendimiento de ( $C_p$ ) entre los 0.4 y 0.45 para los aerogeneradores de gran potencia. En los sistemas de la microeólica, el estudio no ha tenido el mismo avance en interés ni desarrollo.

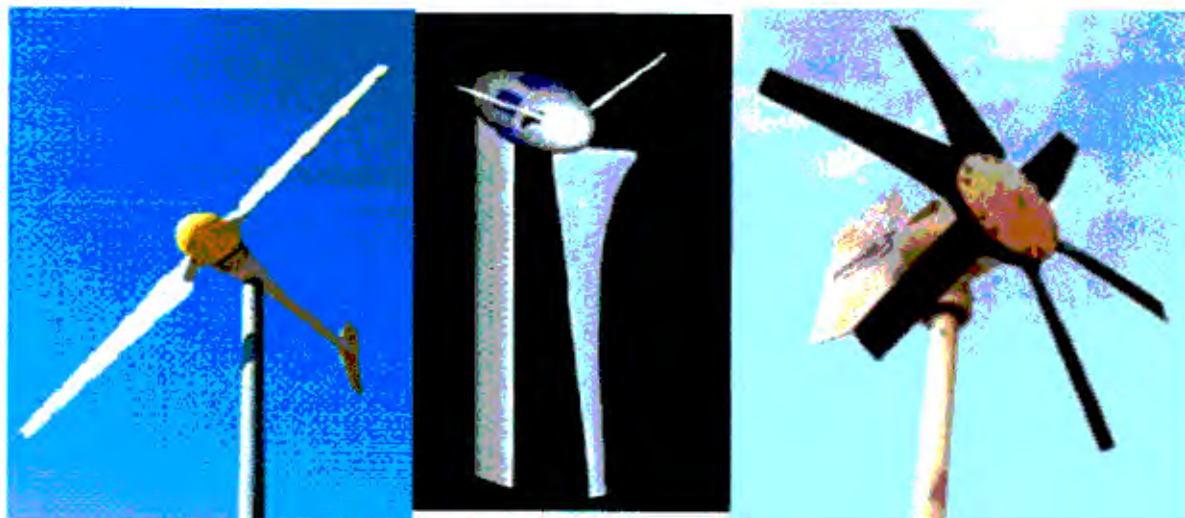
Entre los factores que limitan el avance y desarrollo de pequeñas máquinas está el bajo poder adquisitivo de los usuarios potenciales. El mercado existente es amplio, pero, al estar integrado fundamentalmente por personas de bajos recursos, el apoyo a la investigación y desarrollo de tecnologías debe ser impulsado y apoyado por el gobierno. Sin embargo, aún no hay un marco legal a su favor –como sí lo hay para la gran escala–, con programas e incentivos, primas para la generación de gran escala y la conexión a la red.

Las turbinas de eje horizontal se distinguen por el número de palas (tripala, bipala, monopala y multipala). A menor número de palas la velocidad de giro es mayor, aunque presentan inconvenientes en el balanceo del rotor.

Figura 1.4: Rotores horizontales con diferentes número de palas



**Figura 1.5: Modelo bipala Sirocco de Eoltec**  
**Figura 1.6: Modelo monopoala Windburn Powerhousebind**  
**Figura 1.7: Modelo multipala Pacific 100 Marine de Ampair Natural Energy**



**Figura 1.8: Modelo IT-PE100 de ITDG, rotor de tres aspas**  
**Figura 1.9: Modelo BWC XL.1 Bergey, rotor de tres aspas**



## **b. TURBINAS DE EJE VERTICAL**

La disposición del rotor permite captar el viento proveniente de cualquier dirección sin necesidad de contar con un dispositivo de orientación. Esto simplifica la construcción, sin embargo, estas turbinas son menos eficientes que las de eje horizontal y son máquinas lentas, poco comerciales, basadas en dos modelos: el Savonius y el Darrieus.



En el modelo Savonius, el viento incide en la parte cóncava, produciendo un torque y posee un rendimiento relativamente bajo. La figura 1.10 muestra un modelo de este tipo de máquina.

El modelo Darrieux requiere velocidades de 4 a 5 m/s, tiene altas velocidades de giro y buen rendimiento, y podría llegar a tener una mayor aplicación en generación de microeólica.

**Figura 1.10: Turbina Supa-Flo de U.S Wind Turbina, LLC, Modelo Savonius**  
**Figura 1.11: Turbina modelo Darrieux Fabricada por Ropatec**



Hay otro tipo de turbinas verticales que se han venido desarrollando en los últimos años, con perfiles torsionados usando el mismo principio de trabajo del Savonius, tal como se muestra en la figura 1.12, la empresa Ecotools a desarrollado un modelo con perfiles agrupados en pareja, otra alternativa la presentado la empresa Shield Ltd, fig N° 1.13. [20]

Todo estos equipos de eje horizontal como los de eje vertical tienen una curva características de potencia versus velocidad del viento a tener en cuenta antes de cualquier aplicación puntual.

**Figura 1.12: Rotor WS 0.30 A de Oy Windside Producción Ltd**  
**Figura 1.13: Rotor Darrieux agrupado los perfiles en pareja**



## 1.2.2 GENERADORES DE IMANES PERMANENTES

Desde el desarrollo, en 1983, de los potentes imanes de neodimio, la máquina síncrona ha tenido una creciente aplicación industrial, especialmente para trabajar a baja velocidad de accionamiento directo y variables, y con un alto torque. Ya no se requiere transmisión para lograr la velocidad de rotación deseada. La búsqueda del alto rendimiento a baja velocidad con accionamiento directo se logrará mediante el uso de las máquinas de imán permanente y de nuevos métodos, como el control directo del par u otros. Asimismo, mediante el desarrollo de nuevos y mejores materiales de inducción y de la electrónica de potencia, se abren nuevas perspectivas para el desarrollo de estas máquinas.

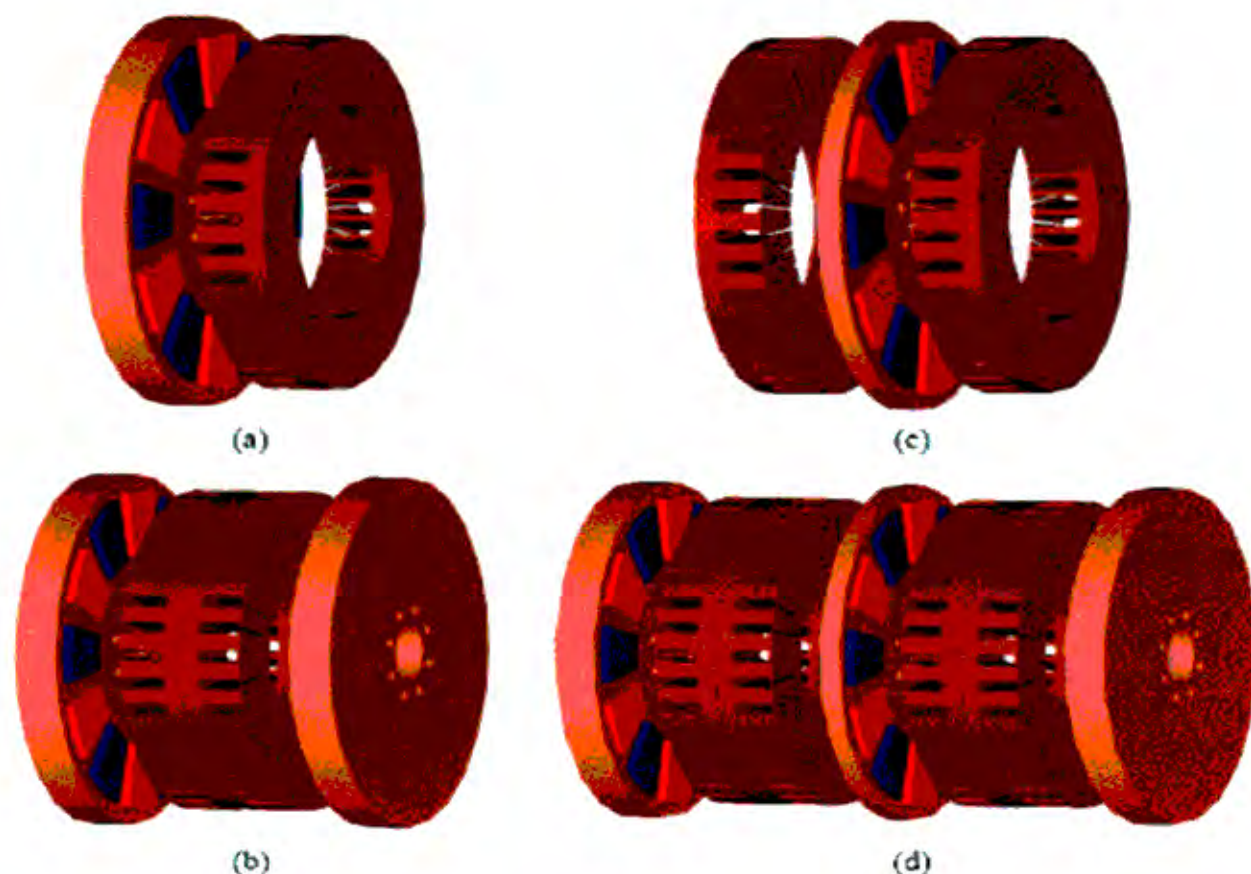
Entre las principales características de esta máquina eléctrica está el campo de excitación de dirección constante que se forma por medio de los imanes permanentes. Este tipo de generador, a diferencia de los otros generadores de electricidad, no requiere de corriente externa para ser inducido o excitado, ya que son los imanes permanentes los que realizan este efecto. Esto les da un grado de autonomía con respecto a otros generadores, y ante la falta de pérdidas en el devanado de excitación y por contacto con el corredizo, poseen un mejor rendimiento, siempre que la geometría de diseño y el circuito magnético sean óptimos y los imanes trabajen en su punto máximo de operación  $(HB)_{\text{máx.}}$ , pudiendo ser de flujo axial o flujo radial. Los de flujo radial son los que han tenido un mayor desarrollo y dominio del mercado.

Este tipo de generadores de imán permanente se distinguen de sus análogos con excitación electromagnética, por la estructura de sus sistemas magnéticos de hierro giratorio. Para describir y estudiar las características de los generadores con imanes permanentes es válida la teoría de las máquinas de excitación electromagnética.

Por otra parte, es importante que se haga la selección más adecuada de una máquina eléctrica para una aplicación en particular. Sin embargo, el empleo de la máquina de flujo radial es exclusivo, su desarrollo se ha optimizando y sigue el mismo proceso de construcción de la máquina de inducción, ya que las piezas son básicamente las mismas. En cambio, la fabricación de máquinas de flujo axial requiere diferentes tipos de equipos de producción que requieren costos de inversión que convierten el costo por unidad en alto para una producción de escala pequeña.

A continuación se presentan varias configuraciones que se pueden encontrar en relación con el estator (s), posición con respecto al rotor (s), con los que se puede seleccionar la estructura de la máquina que mejor se adecúe al requerimiento. Las configuraciones posibles pueden ser : [18]

Figura 1.14: Opciones de configuración de máquinas eléctricas de imán permanente



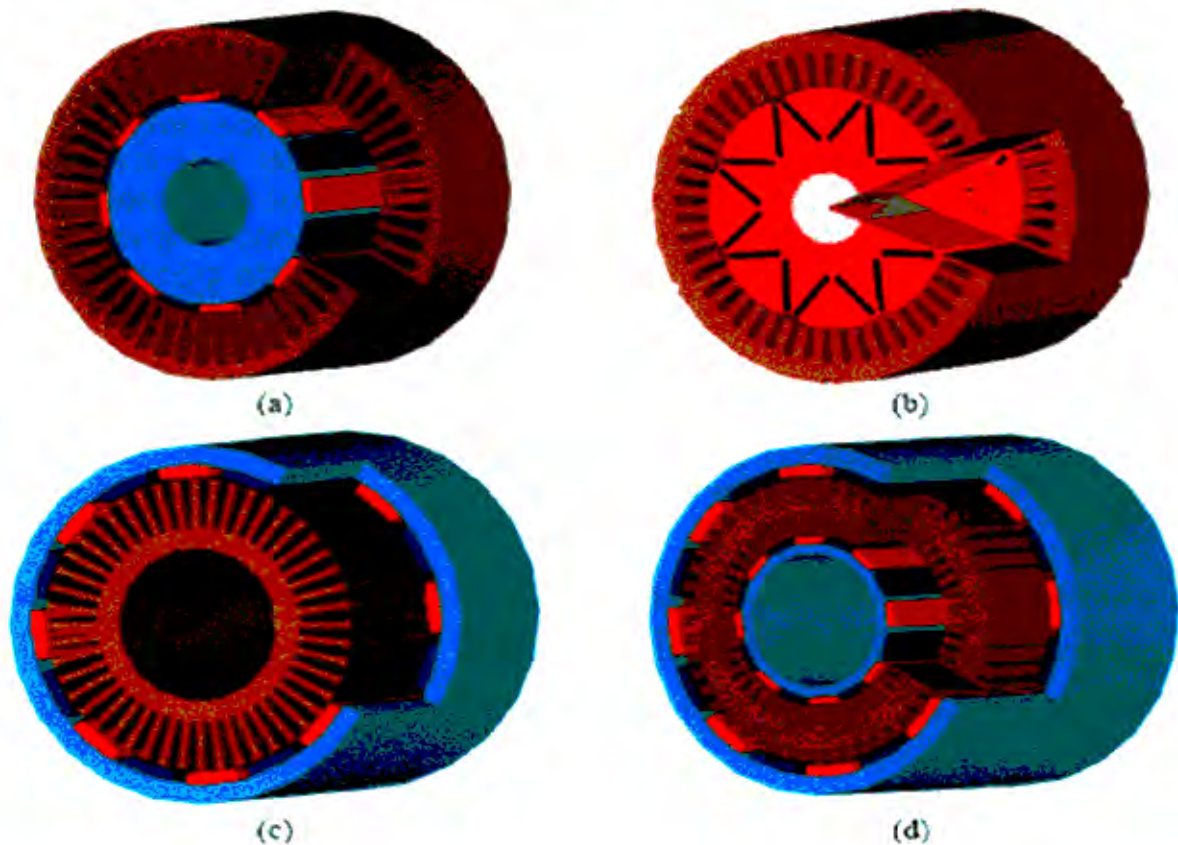
- (a) Estructura con un rotor y un estator.
- (b) Estructura en el que el estator se encuentra entre los rotores.
- (c) Estructura en la que el rotor se encuentra entre los estatores.
- (d) Estructura de etapas múltiples incluyendo varios rotores y estatores.

#### a. Máquinas de imán permanente de flujo radial

Por varias décadas, las máquinas de flujo radial se utilizaron ampliamente en aplicaciones de poca potencia pero no a gran escala de aplicación industrial. Esto ha ido cambiando en la presente década a raíz del empleo a gran escala para uso industrial impulsado por ABB en rangos que alcanzan hasta los 5 MW, en molinos de viento y en unidades de propulsión de los buques. Otras empresas como Baumuller, Yaskawa, Siemens y Rotatek también están siendo muy activos en el desarrollo de máquinas eléctricas con imanes permanentes.

Los más comúnmente fabricados son los de estator exterior e interior rotor (ver figura 1.15 (a,b)) [18], aplicación ampliamente conocida en los motores eléctricos. La estructura, con rotor exterior y estator interior es también una alternativa (ver figura 1.15 (c)), puede ser una aplicación adecuada donde el rotor puede ser integrada directamente a la máquina de aplicación.

**Figura 1.15: Configuración de máquina de imán permanente de flujo radial**



### 1.3 APROVECHAMIENTO DE LA ENERGÍA EÓLICA EN EL PERÚ

Existen algunas experiencias en el aprovechamiento de la energía eólica realizadas en varias localidades del país y que forman parte de la historia y del esfuerzo de diferentes instituciones. En la mayoría de los casos, el recurso eólico ha sido aprovechado en el accionamiento de aerobombas artesanales para el bombeo de agua en usos agrícola y doméstico. En la década del setenta se reportaron alrededor de 1 100 unidades en el departamento de Piura, y otros 1 500 equipos en el departamento de Arequipa. De igual modo, se registraron aerobombas en Moquegua, Puno y Lambayeque. El principal aporte en investigación y desarrollo tecnológico de estas aerobombas fue realizado por ITINTEC en la década del ochenta. Los modelos que actualmente se fabrican y comercializan –aunque en escaso número–, se basan en tales diseños.

Respecto a la generación de energía eléctrica aprovechando el recurso eólico, existen pocas experiencias concretas. Los primeros avances se realizaron en 1983, cuando Electro Perú S.A. instaló un sistema piloto en la caleta de Yacila (Piura), con equipos importados marca MP-5 Riva Calzoni de 3.6 kW; posteriormente, en 1986 se instalaron tres sistemas marca ISEA de 10 kW, los cuales quedaron fuera de servicio en 1991 por fallas mecánicas y ausencia de técnicos locales que operaran esta tecnología. En 1989, la empresa Canziani S.A. fabricó un modelo europeo de aerogeneradores de 1 kW, denominados Waira en el Perú, un estudio del MINEM de 1996 reportó 28 unidades instaladas, pero la mayor parte se hallaba fuera de servicio

debido a fallas producidas por falta de mantenimiento y por una selección inadecuada del emplazamiento de los equipos [21].

A fines de la década del noventa, Electro Perú S.A. elabora un estudio de factibilidad técnica y económica para la implementación de dos bosques eólicos, uno de 50 MW en Malabrigo<sup>1</sup>, que según el estudio tendría una tasa interna de retorno TIR de 32.4 %, y otro en San Nicolás<sup>2</sup> de 35 MW, que tendría un TIR de 12.3 %. El objetivo de estos sistemas de aerogeneración era reemplazar a los grupos diesel que operaban en la zona y que serían conectados a la red nacional. Así, el primer aerogenerador se instaló en Malabrigo en 1996 y, luego, otra unidad se instaló en Marcona en 1998. Estas unidades están totalmente automatizadas y son monitoreadas a distancia.

De igual modo, un estudio realizado en 2003 muestra un inventario sobre la potencia instalada en aerobombas y aerogeneradores, en el que se concluye que el avance es casi nulo. Ello es un fiel reflejo de lo poco que se ha logrado en este campo: falta de estudios sobre recurso eólico en el país, falta de normas legales y promoción a las energías renovables [22].

**Tabla 1.2. Potencia Instalada de aerogeneradores, aerobombas y empresas que participaron en los 10 últimos años en el país**

Empresa instaladora	Nº Equipos	Pot. Instal.con Aerobombas (kW)	Nº Equipos	Pot. Instal Aerog. (kW)	Año de Instalación
CENERGIA	1 500	271			?
WAIRA			1	2.5	1993
WAIRA			1	1.5	1994
WAIRA			3*	4	1995
ADINELSA			1	250	1996
FONCODES	3	0.579			1997
WAIRA	1	1			1997
A I. WESTFALIA KINDERDORF			1	0.9	1997
FONCODES	10	2			1998
FONCODES	1	0.63			1999
ADINELSA			1	450	1999
FONCODES	3	0.74			2000
WAIRA			1	0.5	2001
FONCODES	10	3.18			2001
SOLARTEC			1	10	2001
ITDG			1	0.1	2001
PUCP_ GRUPO	1	0.3			2002
WAIRA			3**	3	2002
FONCODES	1	0.26			2002
ITDG			1	0.1	2002
WAIRA			1	1.2	2003
<b>TOTAL</b>	<b>1 530</b>	<b>280</b>		<b>723.8</b>	

<sup>1</sup> Malabrigo pertenece al distrito de Rázuri, provincia de Ascope, departamento de La Libertad.

<sup>2</sup> San Nicolás pertenece al distrito de Marcona, provincia de Nazca, departamento de Ica.

Fuente: Elaboración propia, utilizando datos del *Diagnóstico de la situación actual del uso de la energía solar y eólica en el Perú*, Informe final Preparado por CENERGIA por encargo MINEM.

\* Tres aerogeneradores, dos de 1k W y uno de 2 k W.

\*\* Tres aerogeneradores de 1 k W.

## 1.4 INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO TECNOLÓGICO LOCAL

En la década del ochenta hubo esfuerzos de investigación destinados a desarrollar tecnología local para aplicaciones de aerogeneradores de pequeña escala. Estas iniciativas fueron promovidas por el ITINTEC, cuyos primeros equipos empleaban alternadores de vehículos o pruebas con motores como generadores, que trabajaban con altas velocidades de giro (1800 rpm), empleando velocidades de viento relativamente bajas. Entonces se requerían mecanismos de transmisión que disminuían el rendimiento, aumentaban el peso, incrementaban los costos, y complicaban la parte mecánica de la máquina.

Por otra parte, en la Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP), entre 2000 y 2003 se realizaron actividades de investigación referidas al diseño de un sistema para generar hasta 300 W con la operación de un alternador de vehículo, y al diseño de un generador de imanes permanentes para aplicaciones eólicas de 1 kW. Estos trabajos fueron realizados con la empresa Canziani S.A.

Destacan también los trabajos de investigación, capacitación y transferencia de tecnología realizados por la empresa DENERTEC (Diseño-Energía-Tecnología), especialmente referidos a su aerogenerador de 200 W, denominado AG-200. Actualmente, se están desarrollando equipos de 300 W y 600 W, denominados WT300 y WT600, respectivamente. Muchos de estos esfuerzos no han sido continuados por falta de apoyo.

Además, Soluciones Prácticas-ITDG viene trabajando desde 1998 en la búsqueda de la tecnología apropiada para el aprovechamiento de las energías renovables en pequeña escala. Se han realizado estudios sobre el tipo de aerogenerador que podría ser más conveniente para zonas rurales aisladas, tomándose como referencia estudios de caso en el Perú y Sri Lanka. Como resultado de estos estudios, se identificó la idoneidad técnica y económica de sistemas eólicos para aerogeneración a pequeña escala, desde los 50 W hasta 1 kW. Para el caso del Perú, se definieron las características técnicas y se hicieron una serie de recomendaciones en relación a las condiciones existentes en nuestro país, esto es: realizar diseños para bajas velocidades de viento, que son las predominantes en el Perú rural, así como desarrollar capacidades locales que permitan asegurar la sostenibilidad técnica y el abastecimiento de repuestos a largo plazo.

A partir de estos estudios, Soluciones Prácticas- ITDG se abocó al cálculo y diseño de un equipo capaz de operar a velocidades bajas y moderadas de viento, a diferencia de los equipos comerciales disponibles en el mercado, usualmente diseñados para velocidades medias y altas. El resultado fue el prototipo aerogenerador modelo IT-PE-100 de 100 W de potencia, concebido para el consumo eléctrico de viviendas rurales, así como para el cargado de baterías. Se tuvo especial énfasis en la minimización de costos, facilidad de la operación y confiabilidad del sistema.

En el año 2000, se instaló el primer prototipo de este microaerogenerador. Luego, hasta el año 2006, se probaron y monitorearon equipos IT-PE-100 en seis diferentes puntos de la costa y los Andes del Perú, realizándose constantes mejoras en el diseño y la construcción hasta lograr un equipo suficientemente confiable para operar en zonas rurales. A fines de 2008 se habían instalado 53 microaerogeneradores IT-PE-100 en dos localidades rurales ubicadas en los Andes peruanos; habiendo fabricado la mayoría de estos equipos la empresa TEPERSAC.

## 1.5 POTENCIAL ENERGÉTICO DE VIENTO EN EL PERÚ

Respecto a evaluaciones del recurso eólico en el Perú, la Organización Latinoamericana de Energía (OLADE) elaboró un primer mapa eólico en 1983, en base a información recogida por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI) y el propio ITINTEC; sin embargo, lamentablemente se contó con escasa información de base.

En el año 2000, el SENAMHI, a través de su Dirección General de Investigación y Asuntos Ambientales, elaboró el siguiente cuadro referencial con fines energéticos:

Tabla 1.3: Potencial energético del viento en el Perú

Lugar	Región	Altitud (msnm)	Velocidad media (m/s)	Energía producible (kW.h/año)
Tumbes	Tumbes	25	2.6	252
Talara	Piura	50	8.5	4 993
Piura	Piura	46	4.0	642
Chiclayo	Lambayeque	27	5.1	1 281
Trujillo	La Libertad	33	5.0	1 243
Chimbote	Ancash	11	5.5	1 157
Aeropuerto	Lima	13	3.4	507
Laguna Grande	Ica	10	6.5	2 465
Marcona	Ica	31	6.4	2 329
Pta. Ático	Arequipa	20	6.7	2 701
Pta. de Coles	Moquegua	50	5.0	1 223
Tacna	Tacna	452	2.5	363

Fuente: SENAMHI, 2000.

A fines de 2008 el MINEM, a través de la Dirección de Fondos Concursables (FONER), publicó el mapa eólico del país, trabajo encargado al consorcio conformado por Metesoim Truewind S.L. y Latin Bridge Business S.A. El estudio reportó información preliminar muy valiosa sobre determinados lugares que cuentan con cierto potencial eólico aprovechable, facilitando y orientando a los interesados a realizar estudios de cuantificación y a su aprovechamiento a través de un parque eólico. El estudio ha cuantificado el potencial existente en el país en 22 452.00 MW, siendo las regiones de la costa las que poseen mayores velocidades de viento, la tabla 1.4, muestra la estimación de MW en cada región del país [23]

Tabla 1.4: Potencial eólico nacional

Departamento	Potencial Total (MW)	Potencial Aprovechable (MW)
Amazonas	1 380	6
Ancash	8 526	138
Apurímac	0	0
Ayacucho	1 992	1 158
Cajamarca	114	0
Cajamarca	18 360	3 450
Calló	0	0
Cuzco	0	0
Huancavelica	0	0
Huánuco	54	0
Ica	18 360	9 144
Junín	48	0
La Libertad	4 596	282
Lambayeque	2 880	564
Lima	1 434	156
Loreto	0	0
Madre de Dios	0	0
Moquegua	144	0
Pasco	0	0
Piura	17 628	7 554
Puno	162	0
San Martín	504	0
Tacna	942	0
Tumbes	0	0
Ucayali	0	0
<b>TOTAL</b>	<b>77 124</b>	<b>22 452</b>

Fuente: Ministerio de Energía y Minas (MINEM)

El atlas eólico ha sido trabajado a diferentes alturas a 50, 80 y 100 metros sobre la superficie, los mapas disponibles son: mapas de viento y densidad de potencia ( $W/m^2$ ) promedio anual a 50 m, mapas de viento y densidad de potencia ( $W/m^2$ ) a 80 m, mapa de viento y densidad de potencia ( $W/m^2$ ) a 100 m. Asimismo presenta mapas del comportamiento promedio mensual del viento a 80 metros de altura, y para cada región del país se presenta el comportamiento del viento en cada estación del año, siendo en las regiones de Ica, Piura y Cajamarca donde se encuentra mayor potencial eólico. La figura 1.16, muestra el comportamiento de viento a 80 metros, promedio anual.



A estas relaciones matemáticas también se incluyen los datos tomados del perfil NACA 4412 utilizado para este diseño, asimismo las consideraciones tomadas por el diseñador, que han permitido tener el cálculo del diámetro del rotor y la cuerdas de cada sección del perfil que conforman la pala, como el ángulo de construcción.

**Tabla 2.1: Muestra los parámetros considerados en el diseño**

Considerando:		
$\lambda$	6.5	Lamnda = $U/V$
P (Watt)	500	Potencia = $1/2 (\rho \cdot V^3 \cdot A \cdot c_p \cdot \eta_g \cdot \eta_t)$
V (m/s)	8	Velocidad del viento
U (3 palas)	52	Velocidad tangencial
N (3 palas)	337	RPM de la turbina eólica
$\alpha$	5	Ángulo de ataque
$\beta$	$\varphi - \alpha$	Ángulo beta
$\eta_g$	0.68	Eficiencia del generador
$\eta_t$	1	Eficiencia de la transmisión
$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	1.2	Peso específico del aire
$c_p$ (3 palas)	0.35	Coefficiente de potencia
R (3 palas)	1.47	Radio de la turbina = $(A/\pi)^{1/2}$

## 2.2 PROCEDIMIENTO PARA EL CÁLCULO DEL MECANISMO DE REGULACIÓN DE POTENCIA Y ORIENTACIÓN

Un componente fundamental en un aerogenerador es el que permite la regulación y control de la potencia mayor a las consideradas en el diseño de la máquina. En este estudio, la forma de trabajo del mecanismo es ir sacando paulatinamente al rotor de la dirección frontal del viento, tratando de mantenerlo en una posición que posibilite el giro del rotor a la velocidad de diseño, controlando así el crecimiento de la potencia que —de otro modo— podría comprometer a los demás componentes que conforman el sistema de aerogeneración. En este caso, el mecanismo de regulación de potencia elegido por su facilidad de construcción es el de pivote de cola, sin embargo, el estudio, deducción y cálculo de las ecuaciones matemáticas que permiten determinar los parámetros de funcionamiento son bastante complejas, las mismas que deben relacionar el bloqueo del rotor y el comportamiento mecánico del conjunto rotor, mecanismo de seguridad y velocidad de viento.

Este mecanismo es gobernado por su momento de inercia (peso de la placa plana multiplicado por la distancia entre su centro de gravedad a un punto del pivote). El momento de inercia hace que el mecanismo provoque una fuerza tal que saque suavemente al rotor del viento, lo cual se consigue gracias a la inclinación de  $\beta^\circ$  del pivote, provocando que, con vientos menores a aquellos para los que fue diseñado, se mantenga en una posición frontal al viento, y para vientos fuertes, la placa plana se levante sacando el rotor del viento paulatinamente, evitando así el corte brusco y la caída de la potencia, de esta manera, el aerogenerador seguirá produciendo una cantidad cercana a la potencia nominal.

El mecanismo funciona cuando la placa plana se levanta porque la fuerza del viento supera su peso, al levantarse, el rotor sale, poco a poco, de la dirección del viento y,

cuando el viento se hace débil, el peso de la veleta supera a la fuerza del viento y hace regresar al rotor a una posición frontal al viento.

En el estudio de este componente intervienen diferentes variables que se pueden ver más abajo, con las mismas, se plantean y deducen las ecuaciones que permiten encontrar los valores de: distancia entre el eje y la posición de veleta (excentricidad) y, los valores de ángulos vertical y horizontal. La exactitud de estos valores son lo que garantiza el adecuado funcionamiento y vida útil de la máquina, es con estos resultados con que se construye el mecanismo de seguridad para cualquier microaerogenerador, pudiendo ser con generador eléctrico de flujo axial o radial.

Para el estudio de este sistema se analizan dos puntos de rotación, el punto "O" para la veleta y el punto "X" para todo el sistema rotor-veleta. Para el estudio y análisis consideramos un sistema de coordenadas para cada uno.

Las siguientes variables son las que intervienen y se relacionan entre sí, permitiendo formular las ecuaciones que gobiernan este componente.

1.  $V$  : Se define como el vector velocidad del viento
2.  $\alpha$  : Es el ángulo relativo entre la dirección del viento y el eje normal del rotor eólico o ángulo de bloqueo
3.  $\phi$  : Es el ángulo relativo entre el eje del rotor y el eje de la cola veleta
4.  $\psi$  : Es el ángulo de incidencia del viento sobre la veleta y se calcula como la suma de  $\alpha$ ,  $\phi$  y  $\delta$
5.  $\delta$  : Es el ángulo horizontal entre el eje del rotor y el eje de la cola
6.  $\beta$  : Es el ángulo vertical entre el eje del mástil y la bisagra o pivote
7.  $L_c$  : Se define como la longitud de la cola (distancia OA) (m)
8.  $L_{cg}$  : Se define como la distancia del punto "O" al centro de gravedad del conjunto cola-veleta (m)
9.  $m_c$  : Masa de la cola con la veleta (Kg)
10.  $\rho$  : Densidad del aire ( $\text{Kg}/\text{m}^3$ )
11.  $S_c$  : Superficie de la veleta ( $\text{m}^2$ )
12.  $S$  : Superficie abarcada por las palas ( $\text{m}^2$ )
13.  $g$  : La gravedad (m/s)
14.  $\overline{XB}^0$  : Vector de distancia de X a B en la base 0 (m)

15.  $XO^0$  : Vector distancia de X a O en la base 0 (m)
16.  $XC_{CG}^0$  : Vector distancia de X a Cgg en base 0 (m)
17. e : Excentricidad del eje del rotor respecto del eje del poste (m)
18.  $\bar{F}_{v,w,t,i}^{III}$  : Componente i de la fuerza del viento sobre la veleta (N)
19.  $C_{D,i}$  : Componente i del coeficiente de arrastre
20.  $V_i^{III}$  : Componente i del vector velocidad en la base III (m/s)
21.  $\bar{F}_{w,c,z}^{III}$  : Componente i del peso de la cola expresada en la base III (N)
22.  $\bar{g}^{III}$  : El vector gravedad en la base III (m/s<sup>2</sup>)
23. OA<sub>III</sub> : La distancia OA en la base III (m)
24. OCGC<sub>III</sub> : La distancia OCGC en la base III (m)
25.  $\bar{F}_{v,w,t,i}^0$  : Componente i de la fuerza del viento sobre las palas (N)
26. C<sub>i</sub> : Coeficiente de empuje del viento sobre las palas
27.  $V_i^0$  : componente i del vector velocidad en la base 0
28.  $F_{w,g,i}^0$  : Componente i de la fuerza del peso del aerogenerador expresado en base 0 (N)
29. mA : Masa del generador (con rotor eólico) (Kg)
30.  $M_{TOTAL}^{III}$  : Momento total sobre el eje del poste de viraje (Nm)
31.  $\bar{M}_{COLA}^0$  : Momento resultante de la cola en base 0 (Nm)
32.  $\bar{M}_{COLA}^{III}$  : Momento resultante de la cola en base III (Nm)
33. X : Punto donde se aplica el balance del sistema completo, en el eje del poste de viraje y a la misma altura que el punto O
34. XB : Vector distancia del punto X al B (centro del rotor eólico) (m)

35.  $X_{CGG}$  : Vector distancia del punto X al CGG (centro de gravedad del generador) (m)
36.  $XO$  : Vector distancia del punto X al punto O (m)
37.  $F_{COLA}^0$  : Fuerza resultante de la cola en base 0 (Nm)
38.  $C0-I$  : Matriz de cambio de base de la base 0 a la base I
39.  $C1-II$  : Matriz de cambio de base de la base I a la base II
40.  $CII-III$  : Matriz de cambio de base de la base II a la base III
41.  $M_f$  : Momento que le resta la fricción al sistema

### 2.2.1 Fijación del sistema de coordenadas

Siendo el eje  $Z^0$  vertical paralelo al poste y positivo hacia arriba,  $X^0$  eje horizontal y paralelo al eje del rotor con sentido del viento e  $Y^0$  el eje horizontal y perpendicular al eje del rotor, como se visualiza en las figuras 2.1, 2.2, 2.3, y se representa en la figura 2.4.

Figura 2.1: Vista del sistema de coordenadas en posición inicial  
Figura 2.2: Vista de perfil en posición inicial

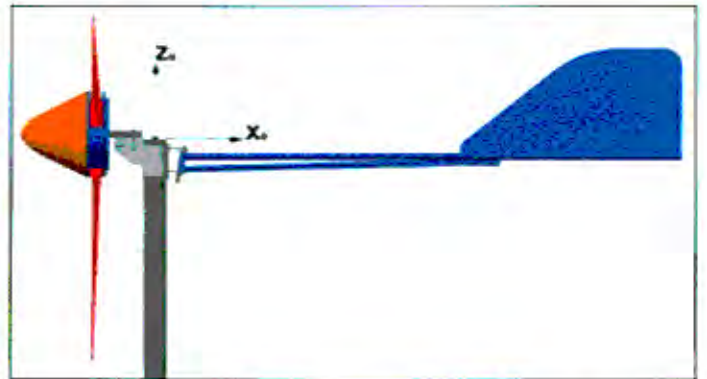
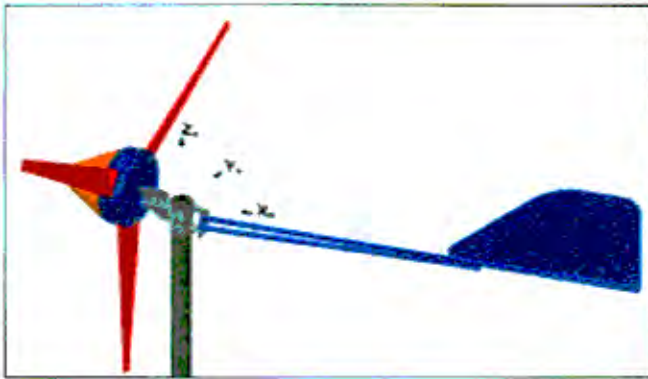
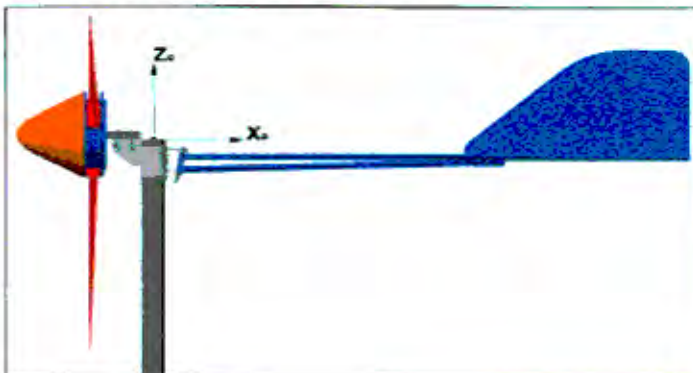


Figura 2.3: Vista de planta

Figura 2.4: Sistema de coordenadas iniciales



## 2.2.2 TRANSFORMACIÓN DEL SISTEMA DE COORDENADAS

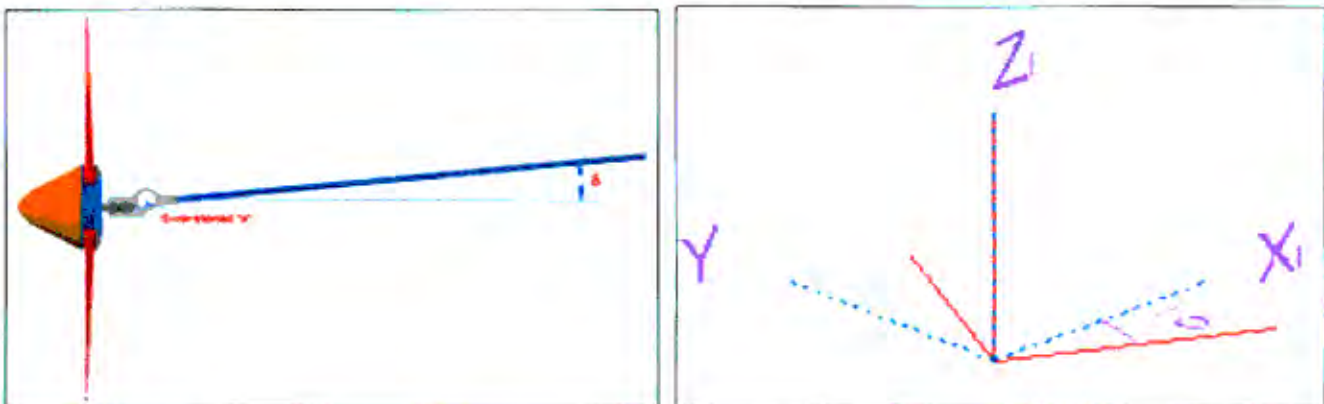
### a. Transformación de base 0 a base I

La cola tendrá una desviación de un ángulo  $\delta$  con respecto al eje del rotor (ver figura 2.5), para compensar el momento negativo que se genera en el sistema debido a la excentricidad "e" del rotor. El objetivo del sistema de cola es mantener el rotor frontal al viento hasta una determinada velocidad, pero debido a la excentricidad, el rotor tendería a bloquearse a bajas velocidades de viento. Para evitar ese bloqueo temprano, desviamos la cola en un ángulo  $\delta$ , así el viento ejercerá una fuerza normal en la veleta, lo que compensa el momento negativo y equilibra el sistema.

La base I queda representada en el sistema de coordenadas de la figura 2.6, para ello giramos sobre el eje  $Z_0$  un ángulo  $\delta$  positivo para tener el eje  $Y_1$  normal a la placa plana

Figura 2.5: Vista en planta. Cola desviada

Figura 2.6: Orientación del sistema de coordenadas de la base 0 a la base I



La matriz de transformación de coordenadas de la base 0 a la base I sería

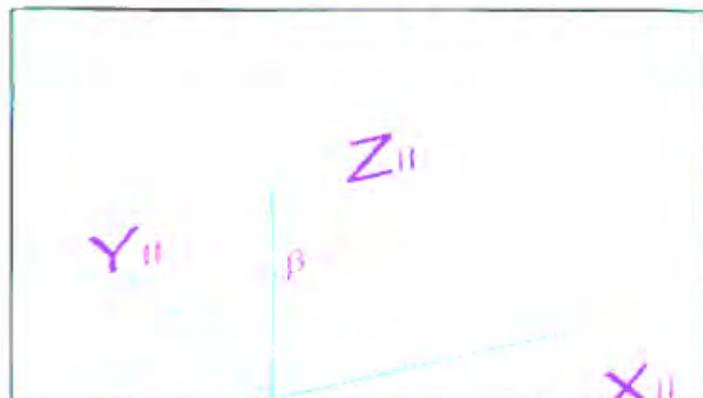
$$C_{0-I} = \begin{bmatrix} \cos \delta & \text{sen} \delta & 0 \\ -\text{sen} \delta & \cos \delta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad 2.10$$

### b. Transformación de base I a base II

En el nuevo sistema de coordenadas de base I se realiza un segundo giro sobre el nuevo  $Y_1$  de  $\beta$  grado positivo (sentido horario) para tener un nuevo eje  $Z_{II}$  paralelo al eje del pivote de cola generándose así el nuevo sistema de coordenadas y lo llamaremos base II. Esta orientación lo realizamos porque la cola va a pivotar sobre un ángulo  $\beta$  cuando el rotor comience a bloquearse.

**Figura 2.7: Perfil del pivote de cola**

**Figura 2.8: Orientación del sistema de coordenadas de la base I a la base II**



La matriz de cambio de base I a base II sería:

$$C_{I-II} = \begin{bmatrix} \cos \beta & 0 & -\text{sen} \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ \text{sen} \beta & 0 & \cos \beta \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

**c. Transformación de base II a base III**

Finalmente, al nuevo sistema de coordenadas de base II se le realiza un tercer giro sobre el nuevo  $Z_{II}$  de  $\varphi$  grados negativos, generándose así el nuevo sistema de coordenadas, base III. Este giro se ocasiona porque la cola se eleva un ángulo  $\varphi$  respecto a su posición original debido al pivote, cuando el rotor comienza a bloquearse, tal como se representa en las figuras siguientes.

**Figura 2.9: Elevación de la cola debido al pivote de coordenadas de la base II a la base III**

**Figura 2.10: Orientación del sistema de coordenadas de la base II a la base III**



La matriz de cambio de base de II a III sería:

$$C_{II-III} = \begin{bmatrix} \cos \varphi & -\text{sen} \varphi & 0 \\ \text{sen} \varphi & \cos \varphi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

#### d. Transformación de base 0 a base III

El objetivo del análisis de orientación del sistema de coordenadas es determinar una matriz que nos lleve de la base inicial 0 a la base final III, porque es en esta última donde haremos nuestro análisis de fuerzas en el sistema. Esto quiere decir que debemos calcular la velocidad normal del viento en la placa plana y el momento de inercia de la cola en base III.

Así, multiplicando los 3 matrices: 2.10, 2.11 y, 2.13 de cambio de base tenemos:

$$C_{II-III} \cdot C_{I-II} \cdot C_{0-I} = \begin{bmatrix} \cos \varphi \cos \beta \cos \delta + \text{sen} \varphi \text{sen} \delta & \cos \varphi \cos \beta \text{sen} \delta - \text{sen} \varphi \cos \delta & -\text{sen} \beta \cos \varphi \\ \text{sen} \varphi \cos \beta \cos \delta - \cos \varphi \text{sen} \delta & \cos \varphi \cos \delta + \text{sen} \varphi \cos \beta \text{sen} \delta & -\text{sen} \varphi \text{sen} \beta \\ \cos \delta \text{sen} \beta & \text{sen} \beta \text{sen} \delta & \cos \beta \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

#### e. Cálculo del vector de velocidad normal del viento en la placa plana en base III

Calculando el vector velocidad según la gráfica:

Figura 2.11: Descomposición de la velocidad del viento cuando comienza el bloqueo



Observando la gráfica se tiene que, el vector de velocidad en base 0 es:

$$\vec{V}^0 = \begin{bmatrix} v \cos \alpha \\ -v \text{sen} \alpha \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

El viento que incide sobre la placa plana tiene un valor menor al del que incide en el rotor. Por ello, para hacer el análisis de la cola, la velocidad del viento será afectada por un factor \$k\$:

$$V = k \cdot v \quad (2.15)$$

Donde  $V$  es la velocidad del viento después de haber cruzado el rotor y  $v$  es la velocidad del viento antes del rotor. Entonces, el vector velocidad de viento en la placa plana es:

$$\bar{V}^0 = \begin{bmatrix} V \cos \alpha \\ -V \sin \alpha \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

Para transformar el vector velocidad de la base 0 a la base III multiplicamos 2.13 y 2.16

$$\bar{V}^{\text{III}} = \begin{Bmatrix} V(\cos \alpha \cos \varphi \cos \beta \cos \delta + \cos \alpha \sin \varphi \sin \delta - \sin \alpha \cos \varphi \cos \beta \sin \delta + \sin \alpha \sin \varphi \cos \delta) \\ -V(-\cos \alpha \sin \varphi \cos \beta \cos \delta + \cos \alpha \cos \varphi \sin \delta + \sin \alpha \sin \varphi \cos \beta \sin \delta + \sin \alpha \cos \varphi \cos \delta) \\ V \sin \beta (\cos \alpha \cos \delta - \sin \alpha \sin \delta) \end{Bmatrix} \quad (2.17)$$

Del vector 2.16 el componente "y" es la velocidad normal del viento sobre la placa plana:

$$\bar{V}_y^{\text{III}} = -V(-\cos \alpha \sin \varphi \cos \beta \cos \delta + \cos \alpha \cos \varphi \sin \delta + \sin \alpha \sin \varphi \cos \beta \sin \delta + \sin \alpha \cos \varphi \cos \delta) \quad (2.18)$$

#### f. Análisis de fuerzas sobre el mecanismo de seguridad en la base III

Para ello se calcula vectorialmente en la base III la fuerza del viento que actúa sobre la placa plana, quedando expresada la fuerza en la siguiente expresión:

$$\bar{F}_{v,wel,3}^{\text{III}} = \frac{1}{2} \rho \cdot \bar{C}_{D,3}^{\text{III}} \cdot |\bar{V}_y^{\text{III}}| \cdot \bar{V}_y^{\text{III}} \cdot S_C \quad (2.19)$$

Conociendo la componente "y" de la velocidad del viento y la componente "y" del coeficiente de arrastre, la fuerza que actúa sobre la placa plana queda definida en el siguiente vector:

$$\bar{F}_{v,wel,3}^{\text{III}} = \begin{Bmatrix} 0 \\ \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_{D,3}^{\text{III}} \cdot S_C \cdot \bar{V}_y^{\text{III}} \cdot |\bar{V}_y^{\text{III}}| \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (2.20)$$

Conociendo que la gravedad actúa también sobre el mecanismo de seguridad, lo calculamos en base III de manera similar al cálculo de la velocidad del viento:

$$\bar{g}^{\text{III}} = \begin{bmatrix} g \cos \varphi \sin \beta \\ g \sin \varphi \sin \delta \\ -g \cos \beta \end{bmatrix} \quad (2.21)$$



Con la ecuación 13 podemos calcular la otra fuerza, que es el peso de todo el mecanismo de seguridad:

$$\overline{F}_{w,C,I}^{III} = m_c \cdot \overline{g}^{III} \quad (2.22)$$

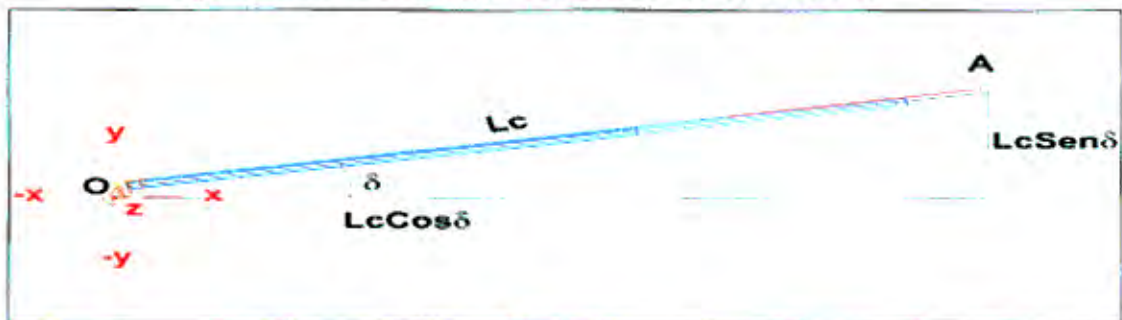
$$\overline{F}_{w,C,I}^{III} = \begin{bmatrix} m_c \cdot g \cos \varphi \sin \beta \\ m_c \cdot g \sin \varphi \sin \delta \\ -m_c \cdot g \cos \beta \end{bmatrix} \quad (2.23)$$

Conociendo las distancias de los puntos de aplicación de las fuerzas (empuje del viento a la placa plana y peso de la cola) respecto al punto de rotación (pivote), se puede evaluar el momento que genera el mecanismo de seguridad en base III:

$$\overline{M}_{COLA}^{III} = \overline{OA}^{III} \times \overline{F}_{v,wel,I}^{III} + \overline{OC}^{III} \times \overline{F}_{w,C,I}^{III} \quad (2.24)$$

Luego, para obtener el vector  $\overline{OA}^{III}$  y  $\overline{OC}^{III}$  tenemos que hacer un análisis en la base 0, es decir, que obtenemos el vector  $\overline{OA}^0$  y  $\overline{OC}^0$ . Hallando uno de ellos, por analogía hallaremos el siguiente. Calculemos  $\overline{OA}^0$  a través de la gráfica siguiente:

Figura 2.12: Descomposición de  $L_c$  en base 0



Entonces el vector  $\overline{OA}^0$  será:

$$\overline{OA}^0 = \begin{bmatrix} L_c \cdot \cos \delta \\ L_c \cdot \sin \delta \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.24)$$

Al multiplicar la ecuación 2.24 con 2.13 para llevarlo a la base III, se obtiene lo siguiente:

$$\overline{OA}^{III} = L_c \cdot \begin{bmatrix} \cos \varphi \cos \beta \\ -\sin \varphi \cos \beta \\ -\sin \beta \end{bmatrix} \quad (2.25)$$

Análogamente para  $\overline{OC}^{III}$ :

$$\overline{OC}^{III} = L_{CG} \cdot \begin{bmatrix} \cos\varphi \cos\beta \\ -\sin\varphi \cos\beta \\ -\sin\beta \end{bmatrix} \quad (2.26)$$

Las componentes "y" & "z" de los vectores  $OA^{III}$  y  $OC^{III}$  son negativos cuando se hace el análisis de cuadrantes. Entonces el momento de la cola en base III se obtiene multiplicando  $18 \times 12$  y  $19 \times 15$  en 16:

$$\overline{M}^{III}_{COLA} = \begin{bmatrix} -L_C \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_{D,y}^{III} \cdot |V_y^{III}|^2 \cdot S_C \cdot \sin\beta + L_{CG} \cdot m_C \cdot g \cdot \sin\varphi \\ L_{CG} \cdot m_C \cdot g \cdot \cos\varphi (\cos^2\beta - \sin^2\beta) \\ -\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_{D,y}^{III} \cdot |V_y^{III}|^2 \cdot S_C \cdot L_C \cdot \cos\varphi \cos\beta + 2 \cdot m_C \cdot g \cdot L_{CG} \cdot \sin\varphi \cos\beta \cos\varphi \sin\beta \end{bmatrix} \quad (2.27)$$

Para que el sistema (rotor - mecanismo de seguridad) esté en equilibrio, la tercera componente  $Z^{III}$  debe ser 0, con lo que se determina una relación entre la velocidad del viento incidente  $V$ , el ángulo de bloqueo  $\alpha$  y, el ángulo de elevación de la cola  $\varphi$ .

$$|V_y^{III}|^2 = \frac{m_C \cdot g \cdot L_{CG} \cdot \sin 2\varphi \cdot \sin 2\beta}{\rho \cdot C_{D,y}^{III} \cdot S_C \cdot L_C \cdot \cos\varphi \cos\beta} \quad (2.28)$$

Ahora, si reemplazamos la ecuación 2.18 en 2.28 obtendremos la primera ecuación en función de  $V$ ,  $\alpha$  y  $\varphi$ .

$$V^2 (-\cos\alpha \sin\varphi \cos\beta \cos\delta + \cos\alpha \cos\varphi \sin\delta + \sin\alpha \sin\varphi \cos\beta \cos\delta + \sin\alpha \cos\varphi \cos\delta)^2 - \frac{m_C \cdot g \cdot L_{CG} \cdot \sin 2\varphi \cdot \sin 2\beta}{\rho \cdot C_{D,y}^{III} \cdot S_C \cdot L_C \cdot \cos\varphi \cos\beta} = 0 \quad (2.29)$$

Si agrupamos las constantes y reemplazamos en 2.29 tenemos la primera ecuación que gobierna el mecanismo de seguridad.

$$D = \rho \cdot C_{D,y}^{III} \cdot S_C \cdot L_C \cdot \cos\beta \cdot k^2 \quad (2.30)$$

$$E = m_C \cdot g \cdot L_{CG} \cdot \sin 2\beta \quad (2.31)$$

$$\frac{D \cdot \cos\varphi \cdot v^2}{E \cdot \sin 2\varphi} = 0 \quad (1) \quad (-\cos\alpha \sin\varphi \cos\beta \cos\delta + \cos\alpha \cos\varphi \sin\delta + \sin\alpha \sin\varphi \cos\beta \cos\delta + \sin\alpha \cos\varphi \cos\delta)^2 =$$

### 2.2.3 BALANCE DE FUERZAS Y MOMENTOS SOBRE (ROTOR - MECANISMO DE SEGURIDAD) EN LA BASE 0

Aquí se tiene en cuenta la cola, el generador y las palas, analizándose en la base 0. Para ello hay que tener en cuenta la acción del momento resultante de la cola en la base 0.

Cuando se hace el estudio al sistema de manera global, aparecen dos fuerzas más, correspondientes a la ocasionada por el viento en las palas y el peso rotor eólico. En este caso, la fuerza del viento sobre las palas tiene la siguiente expresión vectorial:

$$\bar{F}_{v,rotor,i}^0 = \frac{1}{2} \rho \cdot C_l \cdot |\bar{V}_i^0| \cdot \bar{V}_i^0 \cdot S \quad (2.32)$$

La componente tangencial de la fuerza del viento sobre las palas (la fuerza torsional) lo consideraremos nula porque la fuerza torsional es pequeña comparada con la fuerza axial dado que el área sobre la que incide es pequeña (espesor del álabe por su longitud). Teniendo entonces la fuerza axial. Finalmente el vector 23 quedaría:

$$\bar{F}_{v,rotor}^0 = \left\{ \begin{array}{c} \frac{1}{2} \rho \cdot C_l \cdot |\bar{V}_s^0| \cdot \bar{V}_s^0 \cdot S \\ 0 \\ 0 \end{array} \right\} \quad (2.33)$$

La otra fuerza que actúa es el peso del aerogenerador, excepto la cola y la torre.

$$\bar{F}_{w,a,i}^0 = m_A \cdot g_i^0 \quad \text{donde} \quad \bar{F}_{w,a,i}^0 = \left\{ \begin{array}{c} 0 \\ 0 \\ -m_A \cdot g \end{array} \right\} \quad (2.34)$$

Conociendo las fuerzas del empuje del viento sobre las palas (fuerza axial), el peso del generador, el momento resultante de la cola, y la fuerza resultante de la cola, se obtiene el momento total del sistema en la base 0:

$$\bar{M}_{TOTAL}^0 = \underbrace{\bar{M}_{COLA}^0}_I + \underbrace{\bar{X}B \times \bar{F}_{v,rotor}^0}_II + \underbrace{\bar{X}C_{CG} \times \bar{F}_{w,a}^0}_III + \underbrace{\bar{X}O \times \bar{F}_{COLA}^0}_IV - \bar{M}_t \quad (2.35)$$

Hallando cada componente de la ecuación 2.25:

I) Hallando el momento de la cola en base 0,

$$\bar{M}_{COLA}^0 = C_{0-1}^T \cdot C_{1-II}^T \cdot C_{II-III}^T \cdot \bar{M}_{COLA}^{III} \quad (2.36)$$

Si:

$$C_{6-1}^T C_{1-2}^T C_{2-3}^T = \begin{bmatrix} \cos \varphi \cos \beta \cos \delta + \text{sen} \delta \text{sen} \varphi & \cos \delta \cos \beta \text{sen} \varphi - \text{sen} \delta \cos \varphi & \cos \delta \text{sen} \beta \\ \text{sen} \delta \cos \beta \cos \varphi - \cos \delta \text{sen} \varphi & \text{sen} \delta \cos \beta \text{sen} \varphi + \cos \delta \cos \varphi & \text{sen} \delta \text{sen} \beta \\ -\text{sen} \beta \cos \varphi & -\text{sen} \beta \text{sen} \varphi & \cos \beta \end{bmatrix} \quad (2.37)$$

Multiplicamos la matriz 3.37 con la matriz 2.27, donde se obtiene lo siguiente:

$$\overline{M}_{COLA}^0 = \left[ \begin{array}{l} \left( \cos \varphi \cos \beta \cos \delta + \operatorname{sen} \delta \operatorname{sen} \varphi \right) \cdot \left( -L_C \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_{D,y}^{III} \cdot |V_y^{III}|^2 \cdot S_C \cdot \operatorname{Sen} \beta + m_C \cdot g \cdot L_{CG} \cdot \operatorname{sen} \varphi \right) + \left( \cos \delta \cos \beta \operatorname{sen} \varphi - \operatorname{sen} \delta \cos \varphi \right) \cdot m_C \cdot g \cdot L_{CG} \cdot \cos \varphi (\cos^2 \beta - \operatorname{sen}^2 \beta) \\ - \left( -\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_{D,y}^{III} \cdot |V_y^{III}|^2 \cdot S_C \cdot L_C \cdot \cos \varphi \cos \beta + \frac{1}{2} \cdot m_C \cdot g \cdot L_{CG} \cdot \operatorname{sen} 2\varphi \cdot \operatorname{sen} 2\beta \right) \cdot \cos \delta \operatorname{sen} \beta \\ \left( \operatorname{sen} \delta \cos \beta \cos \varphi - \cos \delta \operatorname{sen} \varphi \right) \cdot \left( -\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_{D,y}^{III} \cdot |V_y^{III}|^2 \cdot S_C \cdot L_C \cdot \operatorname{sen} \beta + m_C \cdot g \cdot L_{CG} \cdot \operatorname{sen} \varphi \right) + \left( \operatorname{sen} \delta \cos \beta \operatorname{sen} \varphi + \cos \delta \cos \varphi \right) \cdot m_C \cdot g \cdot L_{CG} \cdot \cos \varphi (\cos^2 \beta - \operatorname{sen}^2 \beta) \\ + \left( -\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_{D,y}^{III} \cdot |V_y^{III}|^2 \cdot S_C \cdot L_C \cdot \cos \varphi \cos \beta + \frac{1}{2} \cdot m_C \cdot g \cdot L_{CG} \cdot \operatorname{sen} 2\varphi \cdot \operatorname{sen} 2\beta \right) \cdot \operatorname{sen} \delta \operatorname{sen} \beta \\ \left[ -\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_{D,y}^{III} \cdot |V_y^{III}|^2 \cdot S_C \cdot L_C \cdot \cos \varphi \cdot (\cos^2 \beta - \operatorname{sen}^2 \beta) \right] \end{array} \right] \quad (2.38)$$

II) Definimos la distancia desde el eje del poste al centro del rotor donde la fuerza del viento incidirá:

$$\overline{XB} = [-m, -e, n] \quad (2.39)$$

Si multiplicamos lo anterior con el vector 2.32 recordando que  $V_x^0 = v \cdot \cos \alpha$ ; se tendrá el siguiente componente:

$$\overline{XB} \times \overline{F}_{v,rotor}^0 = \left\{ \begin{array}{l} 0 \\ \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_x \cdot |V_x^0|^2 \cdot S \cdot n \\ \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_x \cdot |V_x^0|^2 \cdot S \cdot e \end{array} \right\} \quad (2.40)$$

III) Definimos la distancia desde el eje del poste al centro de gravedad del rotor donde actúa la fuerza del peso del generador:

$$\overline{XC_{GG}} = [-r, -e, n]$$

Y si lo multiplicamos con el vector 2.34:

$$\overline{XCGG} \times \overline{F}_{w,a}^0 = \begin{Bmatrix} m_A \cdot g \cdot e \\ -m_A \cdot g \cdot r \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (2.41)$$

IV) Definimos la distancia desde el eje del poste al eje del pivote:

$$\overline{XO} = [p, \quad t, \quad -u] \quad (2.42)$$

Calculando la fuerza resultante de la cola en base 0:

$$\overline{F}_{cola}^0 = \overline{F}_{v,vel,j}^0 + \overline{F}_{w,C,j}^0 \quad (2.43)$$

a) La fuerza normal del viento sobre la veleta es:

$$\overline{F}_{v,vel,j}^0 = \begin{Bmatrix} 0 \\ -\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_{D,y}^0 \cdot |V_y^0|^2 \cdot S_C \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (2.44)$$

Recordar la ecuación 5 para el rotor que  $V_y^0 = -v \cdot \text{sen} \alpha$ , entonces:

$$|V_y^0| \cdot V_y^0 = -|V_y^0|^2 \quad (2.45)$$

b) La fuerza del peso de la cola es:

$$\overline{F}_{w,C,j}^0 = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ -m_c \cdot g \end{Bmatrix} \quad (2.46)$$

Sumando las ecuaciones 2.44 y 2.46 tendremos que:

$$\overline{F}_{cola}^0 = \begin{Bmatrix} 0 \\ -\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_{D,y}^0 \cdot |V_y^0|^2 \cdot S_C \\ -m_c \cdot g \end{Bmatrix} \quad (2.47)$$

Finalmente multiplicamos el vector  $\overline{XO}$  con el vector 2.47:

$$\overline{XO} \times \overline{F}_{COLA}^0 = \left\{ \begin{array}{l} -m_c \cdot g \cdot s - \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_{D,y}^0 \cdot |V_y^0|^2 \cdot S_C \cdot l \\ m_c \cdot g \cdot p \\ -\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_{D,y}^0 \cdot |V_y^0|^2 \cdot S_C \cdot p \end{array} \right\} \quad (2.48)$$

Entonces sumamos los vectores 2.38, 2.40, 2.41 y 2.48 y los reemplazamos en la ecuación 2.35 para hallar una función del momento de rozamiento ( $M_f$ ). Lo que nos interesa sólo es el tercer componente de esta ecuación, debido a que se debe mantener el equilibrio en el sistema, momento en el eje  $Z^0$ :

$$-\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_{D,x}^0 \cdot |V_x^0|^2 \cdot S_C \cdot L_C \cdot \cos \varphi \cdot (\cos^2 \beta - \sin^2 \beta) + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_x \cdot |V_x^0|^2 \cdot S \cdot e - \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_{D,y}^0 \cdot |V_y^0|^2 \cdot S_C \cdot p - M_{f,z} = 0 \quad (2.49)$$

Para hallar una función  $f(M_f)$  se tiene la siguiente condición:

Para  $v = v_0$  entonces  $\alpha = 0$  y  $\varphi = 0$ , eso quiere decir que hasta una determinada velocidad de viento  $v_0$  el rotor debe de mantenerse frontal al viento con un ángulo  $\alpha$  igual a cero. De la ecuación 2.49 obtenemos lo siguiente:

$$M_{f,z} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot (e \cdot C_x \cdot v_0^2 \cdot S - C_{D,x}^0 \cdot v_0^2 \cdot L_C \cdot S_C \cdot \sin^2 \delta \cdot (\cos^2 \beta - \sin^2 \beta)) \quad (2.50)$$

Introducimos el componente z de los vectores 2.38, 2.40, 2.41, 2.48 y 2.50 en la ecuación 2.35 e igualamos a cero, entonces tendremos la segunda ecuación en función de  $v$ ,  $\alpha$  y  $\varphi$ .

$$-\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_{D,x}^0 \cdot |V_x^0|^2 \cdot S_C \cdot L_C \cdot \cos \varphi \cdot (\cos^2 \beta - \sin^2 \beta) + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_x \cdot |V_x^0|^2 \cdot S \cdot e - \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_{D,y}^0 \cdot |V_y^0|^2 \cdot S_C \cdot p - \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot (e \cdot C_x \cdot v_0^2 \cdot S - C_{D,x}^0 \cdot v_0^2 \cdot L_C \cdot S_C \cdot \sin^2 \delta \cdot (\cos^2 \beta - \sin^2 \beta)) = 0 \quad (2.51)$$

Introducimos la ecuación 2.28 en 2.51 y agrupando constantes:

$$\begin{aligned} A &= 2 \cdot L_C \cdot m_c \cdot g \cdot \sin \beta \cdot (\cos^2 \beta - \sin^2 \beta) / \rho \\ B &= e \cdot C_x \cdot S \\ C &= p \cdot C_{D,y}^0 \cdot S \\ R &= e \cdot C_x \cdot v_0^2 \cdot S - C_{D,x}^0 \cdot v_0^2 \cdot L_C \cdot S_C \cdot \sin^2 \delta \cdot (\cos^2 \beta - \sin^2 \beta) \end{aligned} \quad (2.52)$$

Introduciendo las nuevas constantes en la ecuación 2.51 tendremos la 2<sup>da</sup> ecuación que gobierna al sistema rotor-mecanismo de seguridad.

$$A \cdot \sin 2\varphi - B \cdot v^2 \cdot \cos^2 \alpha + C \cdot v^2 \cdot \sin^2 \alpha + R = 0 \quad (II)$$



De la II ecuación despejamos la velocidad:

$$v^2 = \frac{R + A \cdot \text{sen}2\varphi}{B \cdot \text{cos}^2 \alpha - C \cdot \text{sen}^2 \alpha} \quad (2.53)$$

Introducimos la ecuación 2.53 en la ecuación I:

$$v^2 = \frac{R + A \cdot \sin 2\varphi}{B \cdot \cos^2 \alpha - C \cdot \sin^2 \alpha} \dots\dots\dots I$$

$$D \cdot \cos \varphi \cdot \left( \frac{R + A \cdot \sin 2\varphi}{B \cdot \cos^2 \alpha - C \cdot \sin^2 \alpha} \right) \cdot (-\cos \alpha \sin \varphi \cos \beta \cos \delta + \cos \alpha \cos \varphi \sin \delta + \sin \alpha \sin \varphi \cos \beta \cos \delta + \sin \alpha \cos \varphi \cos \delta)^2 - E \cdot \sin 2\varphi = 0 \dots\dots\dots II$$

Como se observa son dos ecuaciones con tres variables, por lo que, para su solución se requiere hacer interacciones. Partiendo de la segunda ecuación damos un valor a  $\alpha$  donde nos arroja el ángulo de  $\varphi$ , con la primera ecuación obtenemos la velocidad de viento y podemos ir estudiando el mecanismo de seguridad.

Para validar el desarrollo del mecanismo de seguridad nos hemos apoyado con los ensayos experimentales realizados en un túnel de viento. Allí pueden verse las siguientes figuras.

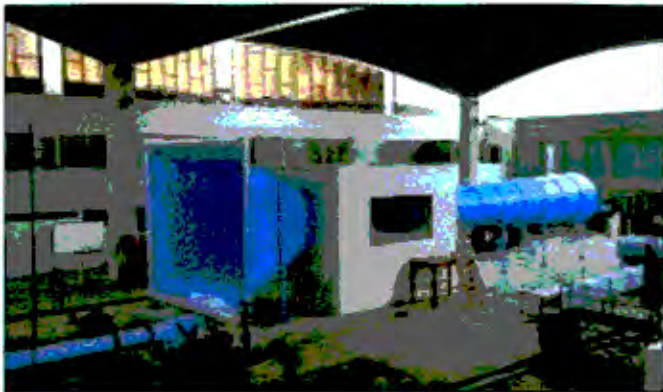


Figura 2.13 Vista general del túnel de viento Figura 2.14: Bloqueo del aerogenerador. Ensayo hecho en el túnel de viento

### 2.3 RELACIONES PARA EL CÁLCULO Y DISEÑO DEL GENERADOR DE IMANES PERMANENTES

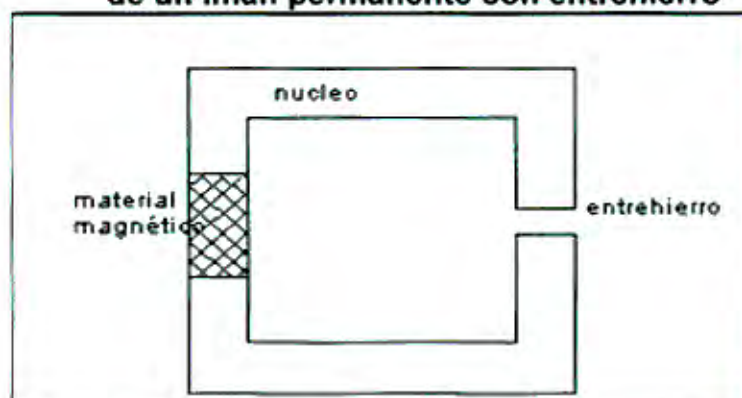
Con este tipo de generadores eléctricos se produce una corriente alterna ya sea monofásica o trifásica. Con los imanes de última generación se logra producir grandes cantidades de flujo magnético, lo que, en los últimos años, ha revolucionado los generadores de pequeña y gran potencia que se emplean con las turbinas eólicas.

Para describir las características de los generadores de imanes permanentes, es válida la teoría de las máquinas de excitación electromagnética; por tanto, para determinar su comportamiento y desarrollar el circuito magnético, se emplean las ecuaciones de Maxwell.

#### 2.3.1 Punto de trabajo del imán

El siguiente gráfico permite determinar el punto de operación o trabajo de un imán con entrehierro, para un entrehierro que abarca todo el núcleo con un imán aislado es un caso particular [7].

Figura 2.15: Circuito para determinar el punto de trabajo de un imán permanente con entrehierro



Si se tienen los siguientes valores:

- $L_m$ = Longitud del imán
- $L_g$ = Longitud del entrehierro
- $A_m$ = Área del imán
- $A_g$ = Área del entrehierro

Si se supone para el núcleo de material magnético una permeabilidad infinita, teniendo en cuenta que la fuerza magnetomotriz es igual a cero, entonces se tiene:

$$F_{mm} = 0 = \bar{H}_g l_g + \bar{H}_m l_m \quad (2.54)$$

$$\bar{H}_g = -\frac{l_m}{l_g} \bar{H}_m \quad (2.55)$$

Como el flujo es constante, entonces:

$$B_g = -\frac{A_m}{A_g} B_m \quad (2.56)$$

Reemplazando, tenemos la ecuación de la carga del circuito:

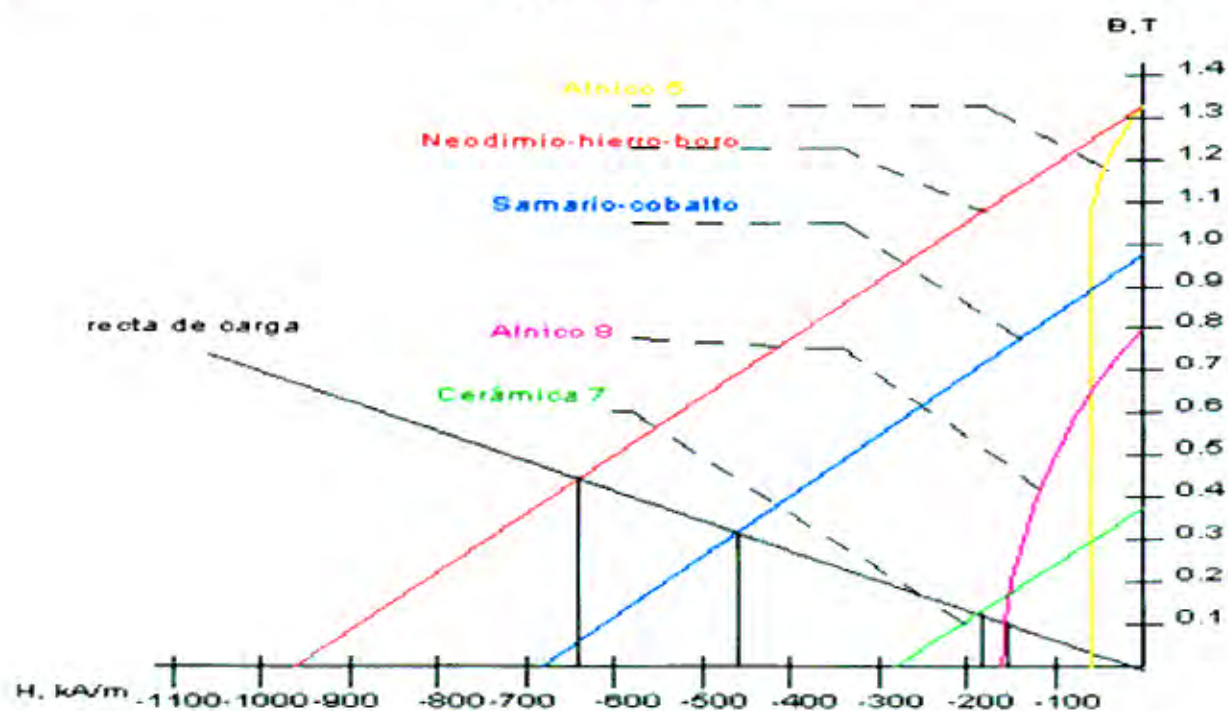
$$B_m = -\mu_0 \frac{A_g}{A_m} \frac{l_m}{l_g} \bar{H}_m \quad (2.57)$$

Siendo:

- $B_g$ : Densidad de campo magnético promedio dentro del entrehierro
- $B_m$ : Densidad de campo magnético en la superficie del imán
- $\mu$ : Permeabilidad magnética
- $H_m$ : Intensidad de campo magnético en la superficie del imán

Puede observarse una recta de carga que marca el comportamiento de cada uno de ellos al introducir un entrehierro al circuito. En una estructura con entrehierro, el comportamiento del imán depende no sólo del magnetismo remanente sino también de la coercitividad del mismo. Como se puede ver en la figura 2.16, el comportamiento de cada material es muy distinto. Se ha incluido una recta de carga que intersecta con los materiales representados en la misma, así, se puede observar la gran diferencia de comportamiento entre ellos, incluso entre los que tienen un magnetismo remanente parecido.

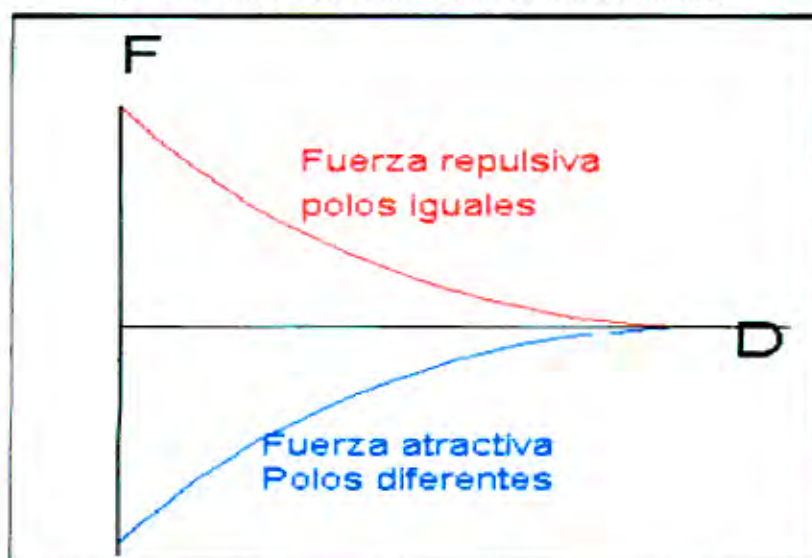
Figura 2.16: Curva de magnetización para algunos materiales que son típicos imanes permanentes



### 2.3.2 Comportamiento del imán en un circuito magnético

La figura 2.17, muestra las fuerzas entre imanes en función de la distancia entre ellos. En ella puede observarse que la fuerza entre dos imanes de la misma polaridad es repulsiva y creciente conforme disminuye la distancia. De modo análogo, si los imanes se encuentran en oposición de polos, la fuerza que experimentarán será atractiva y también creciente al reducir la distancia. En ambos casos, no se observa histéresis en la medida, y los valores máximos de fuerza se corresponden con sus situaciones de equilibrio estable, en el caso atractivo, e inestable en el caso repulsivo, esto es importante para conocer las pérdidas por efecto de histéresis [5].

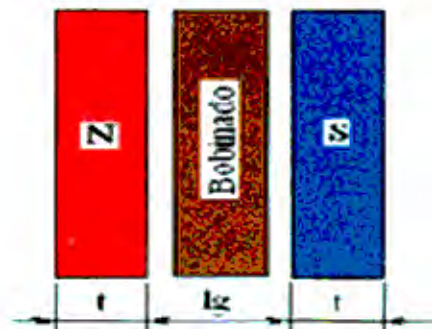
Figura 2.17: Fuerzas magnéticas entre dos imanes (No se observa histéresis en las medidas)



### 2.3.3 Campo magnético dentro del núcleo de aire (entrehierro)

En la figura 2.18, se muestra el arreglo que tienen los imanes y el bobinado. Se tiene en cuenta que el bobinado tiene núcleo de aire, de esta forma podemos determinar el campo magnético dentro del núcleo de aire (entrehierro), con una longitud  $l_g$ .

Figura 2.18: Imanes en paralelo con el bobinado al centro,  $l_g$  es la distancia entre los dos imanes



### 2.3.4 Ecuación de carga para el generador en estudio

- Bg: Densidad de campo magnético promedio dentro del entrehierro
- Ag: Área transversal promedio del entrehierro teniendo en cuenta el efecto de borde
- Bm: Densidad de campo magnético en la superficie del imán
- Am: Área transversal del imán
- $\mu$ : Permeabilidad magnética del núcleo (aire)
- Hm: Intensidad de campo magnético en la superficie del imán

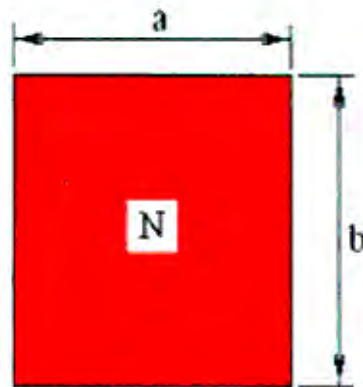
$$B_m = \mu \cdot \frac{A_g}{A_m} \cdot \frac{2t}{l_g} \cdot H_m \quad (2.58)$$

Se define una geometría de referencia, que servirá como punto de partida para los cálculos necesarios, estas dimensiones serán recalculadas posteriormente según sea el requerimiento del equipo.

$$\mu = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \quad (2.59)$$

Área transversal del entrehierro, considerando efecto de borde:

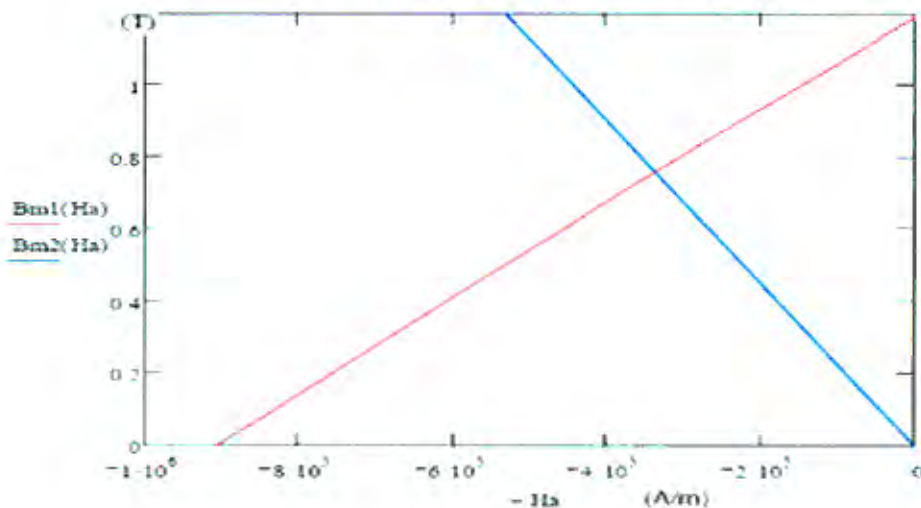
**Figura 2.19: Características geométricas del imán**



$$A_g = (a + l_g) \times (b + l_g) \quad (2.60)$$

En la figura 2.20, la curva de rojo es la curva de magnetización, rasgo característico para imanes (NdFeB N35). Para cada tipo de imán existe una curva característica diferente que es proporcionada por el fabricante. La línea azul es la curva de carga según la ecuación.

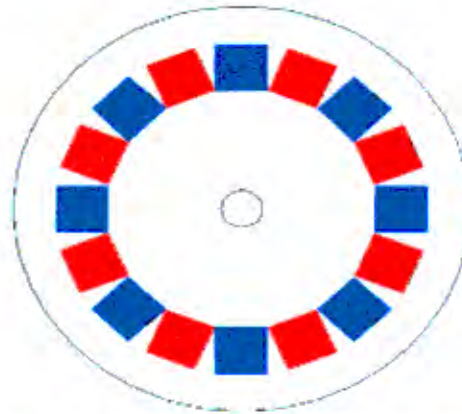
**Figura 2.20: Intersección de la curva de magnetización y la curva de carga, según arreglo de los imanes**



### 2.3.5 Esquema de arreglo de los imanes

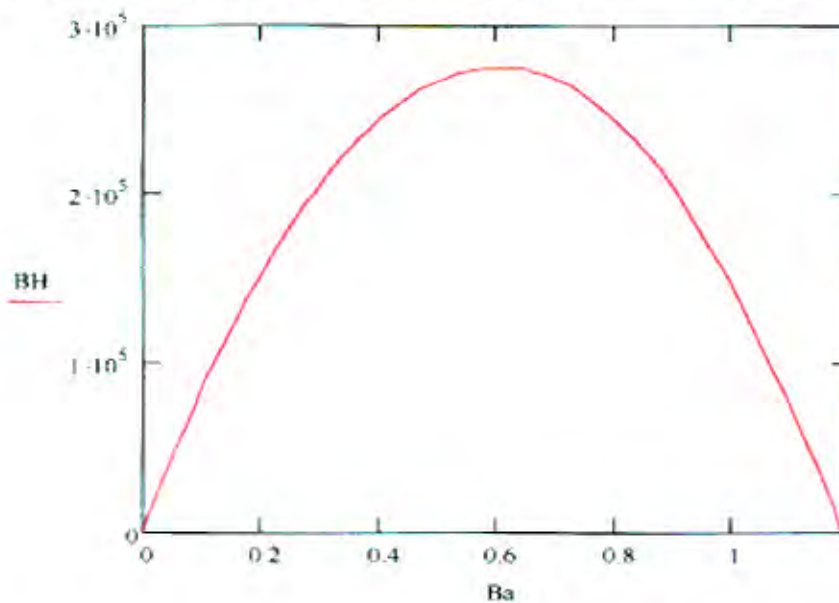
En la siguiente figura se representan los imanes. Los de color rojo son imanes cuyo norte apunta hacia la bobina, los cuadrados de color azul son imanes cuyo sur apunta hacia la bobina.

**Figura 2.21: Distribución de los imanes en el rotor**



Se debe tener en cuenta que la transferencia de energía ha de ser la máxima, para lo cual se hace uso de la curva de transferencia de energía del imán seleccionado. En este caso, el punto de operación debe estar en el punto de máxima transferencia de energía, de no ser el caso, se deben modificar las dimensiones de los imanes o el entrehierro.

**Figura 2.22: Curva de transferencia de la energía de imán**



### 2.3.6 Relaciones para el cálculo de los voltajes máximos

En primer lugar, se consideran algunos datos de diseño, que son valores físicos con los que se cuenta para este diseño.

El arreglo de los imanes se conforma así: en cada disco se cuenta con 16 imanes, uno al lado del otro formando un círculo. Las dimensiones de este arreglo dependen únicamente de las dimensiones de los imanes, definidas anteriormente.

La frecuencia del voltaje inducido, se expresa como:



$$f = \frac{P \cdot N_p}{120} \quad (2.61)$$

La velocidad angular del voltaje inducido, está dada por la siguiente expresión:

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f \quad (2.62)$$

Siendo:

Nº: Número de revoluciones

F: Frecuencia del voltaje inducido

$\omega$ : Velocidad angular del voltaje inducido

p: Número de pares de polos

El voltaje eficaz está dado por:

$$V_f = 4.44 \cdot N_c \cdot B_m \cdot A_p \cdot f \quad (2.63)$$

El voltaje máximo de fase, es:

$$V_{fm} = \sqrt{2} \cdot V_f = 24V \quad (2.64)$$

### 2.3.7 Voltaje máximo de línea en vacío

El cálculo del voltaje máximo de línea se realiza teniendo en cuenta que se trata de un sistema trifásico con conexión en estrella. El voltaje máximo de línea en vacío tiene la siguiente expresión:

$$V_{lmo} = \sqrt{3} \cdot V_{fm} \quad (2.65)$$

Asumiendo que el voltaje generado por los imanes tiene la forma sinusoidal, se puede aproximar sin mayor error, la forma que tendrían las ondas de voltaje en cada una de las fases, esto es:

Voltaje de línea en la fase A

$$V_{lineaa}(t) = V_{lmo} \cdot \sin(377 \cdot t) \quad (2.66)$$

Voltaje de línea en la fase B

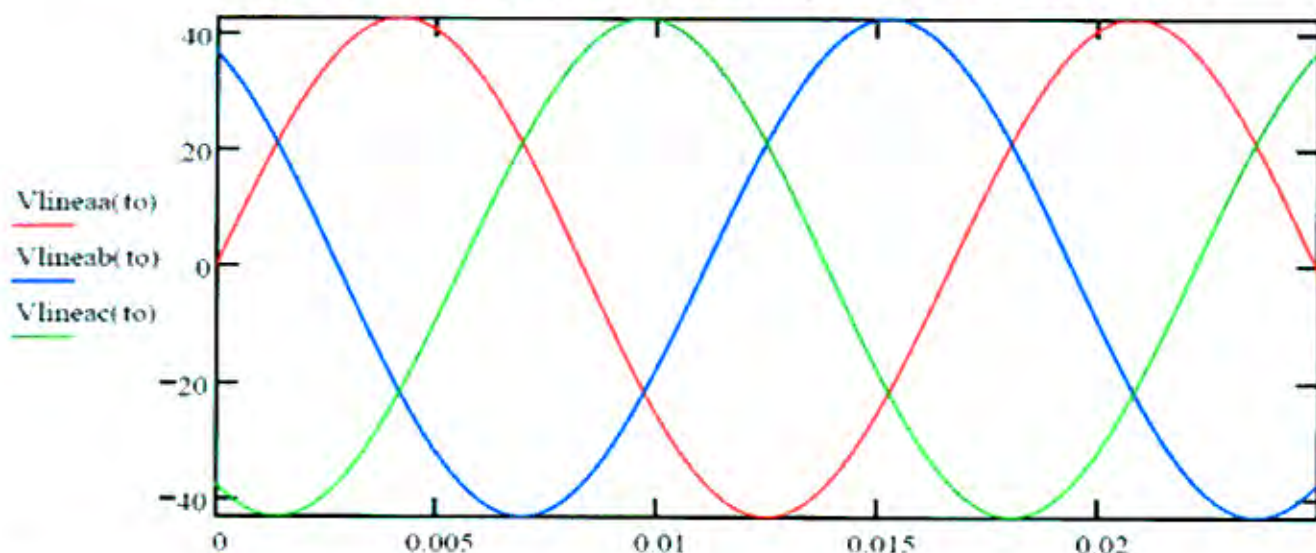
$$V_{lineab}(t) = V_{lmo} \cdot \sin\left(377t + 2 \frac{\pi}{3}\right) \quad (2.67)$$

Voltaje de línea en la fase C

$$V_{lineac}(t) = V_{lmo} \cdot \sin\left(377t + 4 \frac{\pi}{3}\right) \quad (2.68)$$

La curva teórica del voltaje de línea en vacío se muestra en la figura 2.23.

**Figura 2.23: Curva teórica de voltajes de línea de cada fase**



### 2.3.8 Cálculo de la corriente eficaz de línea<sup>10</sup>

Para este cálculo se parte de la potencia máxima de diseño preestablecida. Además, se debe conocer la caída de voltaje debida a la impedancia del conductor. Se puede inicialmente asumir que el voltaje de vacío será el voltaje de la carga, valor que debe ser verificado posteriormente:

Voltaje eficaz de línea

$$V_{ef} = \frac{24}{\sqrt{2}} \quad (2.69)$$

Corriente eficaz de línea

$$I = \frac{Pot}{\sqrt{3} \cdot V_{ef}} \quad (2.70)$$

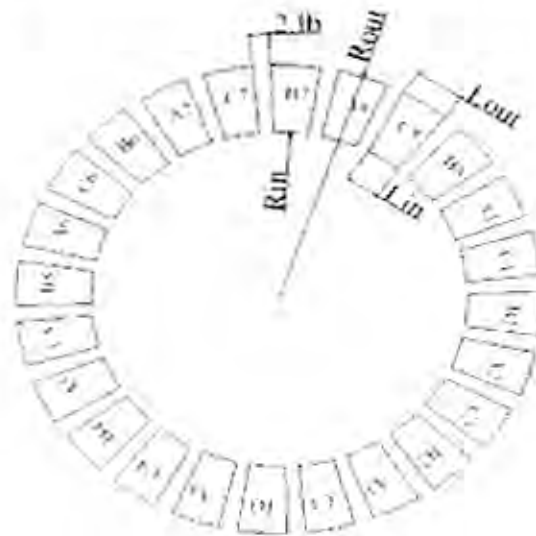
Siendo:

Pot.: Potencia asumida para el cálculo

### 2.3.9 Esquema del arreglo de las bobinas

En la figura 2.24 se muestra un esquema del bobinado. Según el diseño y el arreglo de los imanes, las características geométricas pueden variar en la búsqueda de la optimización, tanto en la producción de energía eléctrica como en la disposición del generador en el sistema eólico.

Figura 2.24: Características geométricas de las bobinas



Donde se tiene:

- 2.Lb: Separación entre los núcleos de las bobinas
- Rout: Radio exterior del bobinado, aproximadamente igual al radio exterior de los imanes
- Rin: Radio interior del bobinado, aproximadamente igual al radio interior de los imanes
- Lout: Base mayor del trapecio, que forma el núcleo del bobinado
- Lin: Base menor del trapecio, que forma el núcleo del bobinado

### 2.3.10 Cálculo del circuito eléctrico equivalente

Teniendo la siguiente nomenclatura:

- Rin: Radio interior del imán
- Rout: Radio exterior del imán
- kw1: factor de enrollamiento
- m1: número de fases
- P: número de polos
- Nº: número de espiras por fase
- I: Corriente en el estator
- g: Entrehierro
- kfd: factor de forma en dirección d
- kfq: factor de forma en dirección q
- Xad: Reactancia del eje directo
- Xaq: Reactancia de eje en cuadratura

Considerando los siguientes valores, para nuestro caso:

kw1= 1  
 m1 = 3  
 kfd = 1.2  
 kfq = 1.2

El circuito eléctrico equivalente de una fase del generador se muestra en la figura 2.25, en tanto la figura 2.26 ilustra su diagrama fasorial.

Figura 2.25: Circuito eléctrico equivalente para una fase de máquina

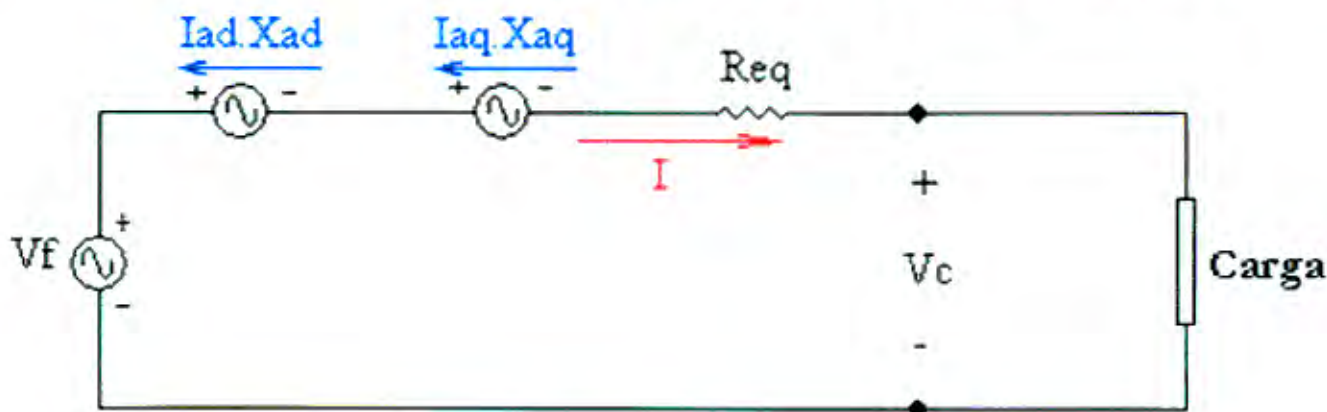
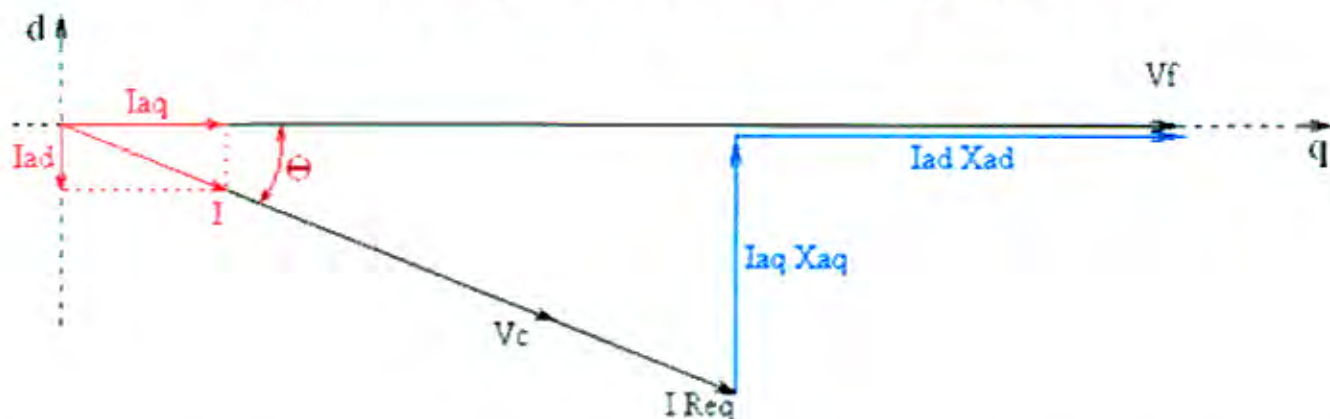


Figura 2.26: Diagrama fasorial del circuito, para una fase



La resistencia equivalente se calcula a partir de la resistencia del cable por bobina:

Resistencia del cable por bobina

$$R_{bob} = \frac{R_c}{100} . L_b l . N_b \quad (2.71)$$

Entonces:

La resistencia del cable por fase

$$R_{c q} = R_{bob} . M_b \quad (2.72)$$

Las reactancias se calculan con las siguientes expresiones:

$$g = \frac{lg - hb}{2} \quad (2.73)$$

$$lg l = 2 \left( (g + 0,5 hb) + \frac{l}{\mu rrec} \right) \quad (2.74)$$

$$X_{ad} = 2.m l . \mu . f \left( \frac{Nc.kwl}{P} \right)^2 \left( \frac{R_{out}^2 - R_{in}^2}{lg l} \right) . kfd \quad (2.75)$$

$$lg q = 2.((g + 0,5 hb) + l) \quad (2.76)$$

$$X_{aq} = 2.m l . \mu . f \left( \frac{Nc.kwl}{P} \right)^2 \left( \frac{R_{out}^2 - R_{in}^2}{lg q} \right) . kfq \quad (2.77)$$

Del diagrama fasorial, se obtienen las siguientes ecuaciones:

$$V_c = \sqrt{(V_f - I . \sin(\theta) . X_{ad})^2 + (I . \cos(\theta) . X_{aq})^2} - I . Re q \quad (2.78)$$

$$\tan(\theta) = \frac{I . \cos(\theta) . X_{aq}}{I . \sin(\theta) . X_{ad}} \quad (2.79)$$

Donde  $V_c$  es el voltaje eficaz por fase sobre la carga. Para determinar el voltaje máximo de línea se debe tener en cuenta que se trata de un sistema trifásico con conexión en estrella.

Entonces tenemos:

Voltaje máximo de línea:

$$V_{ml} = 6.V_c. V \quad (2.80)$$

Potencia de la carga:

$$S_c = 3.V_c.I \quad (2.81)$$

Potencia disipada por el conductor:

$$P_{cu} = 3.I^2 . Re q \quad (2.82)$$

Potencia necesaria en el eje (sin considerar las pérdidas mecánicas):

$$P_{eje} = S_c + P_{cu} \quad (2.83)$$

Eficiencia eléctrica:

$$\eta = \frac{Sc}{Peje} \quad (2.84)$$

Torque necesario para generar la corriente

$$\tau = \frac{Peje}{\omega_{rotor}} \quad [N.m] \quad (2.85)$$

$$\omega_{rotor} = 2.\pi.\frac{No}{60} \quad \left[ \frac{rad}{s} \right] \quad (2.86)$$

## **CAPÍTULO 3: METODOLOGÍA PARA EL PROCESO DE CÁLCULO, DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN**

El presente trabajo toma en cuenta la experiencia obtenida en el proceso de construcción de sistemas de aerogeneración de menor potencia, los avances de ingeniería y las consideraciones socioeconómicas de los lugares donde se ha de aplicar este tipo de tecnología.

El estudio se ha orientado a diseñar y desarrollar un sistema de aerogeneración de 500 W bajo el concepto de estrategia de uso para el Perú y desarrollo de la tecnología nacional de aerogeneración en pequeña escala para su aplicación a través de microrredes y servicios comunitarios del sector rural.

### **3.1 ÁMBITO DE LAS ACTIVIDADES DEL ESTUDIO**

La primera parte del proyecto se realizó en la ciudad de Lima, desarrollando allí los trabajos de gabinete y taller, los mismos que han comprendido el diseño de los componentes del prototipo de aerogenerador: turbina eólica, generador eléctrico y torre. En el taller mecánico se construyó cada uno de estos componentes, así como un banco de pruebas para la caracterización del generador de imanes permanentes.

La segunda parte se desarrolló en campo, en las ciudades de Huacho y Cajamarca, donde se ha realizado la instalación y monitoreo del funcionamiento de los prototipos construidos, así como las aplicaciones, a través de la implementación de dos microrredes y la instalación de instrumentos de medición de viento y, posteriormente, la divulgación de los resultados con un artículo técnico denominado: "Diseño y Construcción de un Aerogenerador de 500 w con Imanes Permanentes para Pequeñas Demandas Eléctricas del Sector Rural", publicado en la revista Vol.16 N° 2. Los resultados y promoción de las dos instalaciones comunitarias (posta médica y escuela) en la comunidad de El Alumbre, en el distrito de Bambamarca, han sido objeto de publicaciones en el ámbito regional y la aplicación de microrredes obtuvo la atención del Diario La República, quienes publicaron una nota al respecto de la electrificación de la comunidad de Alto Perú.

En las figuras 3.1.y 3.2, se puede apreciar la ubicación de las áreas de trabajo de campo (círculo de color rojo y rosado, Huacho y Cajamarca respectivamente), donde se han instalado y monitoreado las unidades piloto.

Figura 3.1: Base de trabajo en Huacho (Lima)



Figura 3.2: Base de trabajo en el distrito de Bambamarca (Cajamarca)



Las características generales de las comunidades rurales altoandinas son: falta de servicios básicos de calidad (agua potable, energía, telecomunicaciones), ubicación por encima de los 3700 msnm, con una temperatura variable entre 0 y 8 °C. Muchas comunidades altoandinas perciben ingresos monetarios únicamente por la venta de leche, variando éstos entre 28 y 140 dólares al mes. Los ingresos promedio en El Alumbre y Alto Perú son relativamente mayores, en promedio \$ US 155 por mes. En ambas comunidades los gastos por uso de velas, kerosene o recarga de batería superan los 12 soles por mes.

### 3.2 EQUIPO Y MATERIALES UTILIZADOS PARA LA FABRICACIÓN DE LOS COMPONENTES DEL AEROGENERADOR

El equipamiento requerido para el desarrollo de la investigación consistió en:

- Gabinete: computadoras personales, muebles, útiles de oficina
- Taller mecánico, dotado de las siguientes herramientas:
  - Máquina de soldadura
  - Máquina de oxicorte
  - Cizalla
  - Cautil
  - Compás de metal



- Punzón
- Alicates
- Martillos
- Llaves y juego de dados
- Mordazas
- Vernier
- Tijeras de metal
- Escuadras de metal

El material empleado en la construcción de los prototipos, lo constituye:

- Plancha de hierro de 6mm para fabricación de generador eléctrico y base de anclaje de la torre
- Imanes permanentes de neodimio N35
- Cable de cobre N° 14 imantado para las bobinas
- Cable TH N° 8 para el transporte de la energía, aerogenerador y batería
- Alambre galvanizado N° 8 para los tensores
- Cemento para la cimentación
- Piedra chancada para la cimentación
- Varillas de ½" para el anclaje de los tensores
- Cables templadores N° 11 para regular y tensar los templadores de la torre
- Plancha de hierro de 1/16" para la construcción de veleta
- Tubo de 2.5' para la fabricación de la tornamesa
- Fibra de vidrio para la construcción de las palas y el estator del generador
- Monómero, usado como disolvente para la resina
- Cobalto, usado para acortar el tiempo de endurecimiento de la resina
- Mek, que acelera el endurecimiento de la pieza (pala)
- Alcohol polivinílico usado como desmoldante para evitar la adhesión de la pieza en el molde
- Ángulo de ¾", para los soportes de la torre
- Ángulo de ½", para reforzamiento de la torre
- Ángulo de 1" para la base de la torre
- Pernos de N° 32 para anclaje de la base
- Pernos ¾" para la unión de los tramos de la torre
- Estaño para unir los cables de las bobinas con los cables del exterior.

El equipo e instrumentación para mediciones en laboratorio y campo, lo conforman:

- Motor de 3 HP
- Variador de frecuencia
- Anemómetro, para medir la velocidad de viento a la altura del eje del rotor eólico
- Dos voltímetros, uno para medir el voltaje de salida del generador y otro para medir el voltaje después de ser rectificado
- Dos pinzas amperimétricas, una para medir la corriente en AC y otra para medir la corriente en DC
- Analizador de redes para ver la onda de salida del generador
- Tacómetros, digital y mecánico para medir la velocidad de rotación del generador con diferentes cargas
- Pinza amperimétrica con canal de medición de frecuencia para conocer indirectamente la velocidad de giro del rotor eólico
- Tablero de focos, para variar las cargas al generador

- Dos baterías para determinar el comportamiento de carga
- Motor de 2 HP de velocidad variable, para aplicar torque al generador de imanes permanentes, equipo utilizado al inicio
- Tablero de control de velocidad, para variar la velocidad de rotación del motor y probar al generador a diferentes velocidades de trabajo
- Torquímetro Burster con sensor electrónico para medir el torque que entrega el motor al generador.

Asimismo, durante la investigación se contrataron los siguientes servicios:

- Alquiler de servicio de torno, para máquinado del eje de los prototipos
- Servicio de fundición, para fundir las moldes de las palas en aluminio
- Servicio particular para transportar los prototipos a campo.

### 3.3 ESTRUCTURA METODOLÓGICA DE TRABAJO

La estructura metodológica del diseño, construcción y pruebas del aerogenerador de 500 W, tiene el siguiente orden:

- Cálculo y diseño en gabinete
  - Diseño del rotor eólico
  - Diseño del generador eléctrico
  - Diseño del sistema de dirección y protección
- Equipamiento, instrumentación y pruebas en laboratorio
  - Acondicionamiento del banco de pruebas e instrumentación para el ensayo del generador imanes permanentes
  - Mediciones de las variables de entrada: tensión, corriente, velocidad de giro, rpm
  - Procesamiento de las variables de entrada, evaluación de variables de salida y determinación de curvas características
- Labor de campo
  - Selección del lugar de emplazamiento para la instalación de los prototipos, para evaluar su performance de generación
  - Instalación de instrumentación para medición y registro del recurso eólico en la zona de emplazamiento
  - Mediciones y registro de parámetros de entrada, tensión, corriente, velocidad de viento.
- Actividades de monitoreo, ajustes al prototipo y aplicación
  - Instalación de instrumentación para medición y registro del recurso eólico en la zona
  - Instalación de prototipos
  - Evaluación del comportamiento mecánico del sistema de generación
  - Aplicación con instalación de 7 unidades en total

### 3.4 CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES

El cronograma de actividades se muestra en la siguiente secuencia. Dados algunos imprevistos surgidos en la construcción de los moldes de aluminio, monitoreo y aplicación en campo, se extendió el periodo de trabajo (por, aproximadamente, un año y medio).

- i) Revisión de bibliografía y diseño conceptual.
- ii) Diseño mecánico de generador eléctrico, diseño rotor eólico y veleta de dirección.
- iii) Construcción de molde para el generador eléctrico y moldes para la pala.
- iv) Acondicionamiento del banco de ensayo en laboratorio para ensayo del generador eléctrico, instalación del sistema de aerogeneración en campo.
- v) Monitoreo, medición, registros de velocidad de viento y parámetros de energía.
- vi) Aplicación y caracterización final de la unidad generadora de energía.
- vii) Sistematización de los resultados y recomendaciones del producto del trabajo de investigación, actividades de difusión de las publicaciones especializadas, a la comunidad científica e instituciones que promueven las energías renovables.

ACTIVIDAD		BIMESTRES						
		1	2	3	4	5	6	7
I	Revisión de bibliografía y diseño conceptual							
II	Diseño mecánico de los componentes del aerogenerador de 500 W							
III	Construcción de molde del generador eléctrico y molde para la pala							
IV	Acondicionamiento de banco de ensayos y pruebas al generador							
V	Instalación de prototipo en campo, monitoreo y mediciones y registros de viento							
VI	Aplicación y caracterización final de la unidad generadora de energía							
VII	Sistematización de resultados, difusión de la publicaciones especializadas							

### 3.5 DETERMINACIÓN DE LAS DIMENSIONES DE LOS COMPONENTES

Como resultado del diseño de cada uno de los componentes del aerogenerador se obtuvieron:

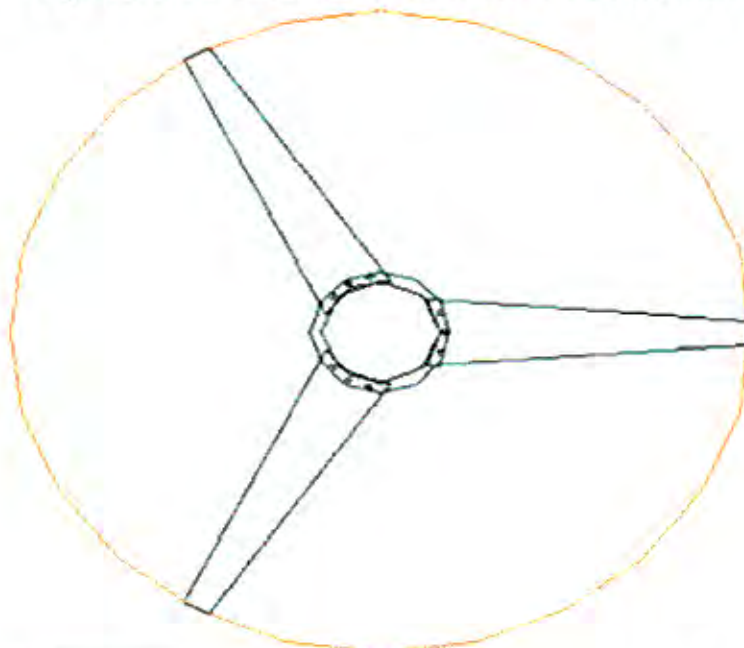
- Turbina eólica
- Generador eléctrico
- Mecanismo de regulación de potencia y de orientación

### 3.5.1 DISEÑO Y CÁLCULO DE LAS DIMENSIONES DE LA TURBINA EÓLICA

Potencia eléctrica	:	500 W
Velocidad de nominal de diseño	:	8 m/s
Perfil utilizado	:	NACA 4412
Numero de palas	:	3
$\lambda$	:	6.5
RPM	:	336
$C_p^3$	:	0.35
$C_i$	:	0.8
Eficiencia de transmisión ( $\eta_t$ )	:	1 (transmisión directa)
$\rho$	:	1,2 kg/m <sup>3</sup>
$\alpha$	:	5°
Material	:	compuesto por fibra de vidrio y resina
Acoplamiento	:	directo, generador - palas

Aplicando las relaciones matemáticas se obtiene un diámetro de rotor eólico de 3 m, cuya geometría se ilustra en la figura 3.3. Asimismo, de los cálculos se obtienen las dimensiones de la cuerda para cada perfil definido, el ángulo y los puntos que dan forma a cada sección para un radio determinado. En este caso la pala se ha dividido en 20 secciones, cuyos datos se presentan en la tabla 3.1. Para la construcción primero se desarrolló e imprimió cada sección en escala real, enseguida, cada sección se cortó y se utilizó como plantilla para tener cada sección en plancha galvanizada de 1/42", para después colocar en un eje según el radio de cada sección y dar forma a la geometría de la pala, tal como se muestra en las figuras 3.7 y 3.8. El paso siguiente es rellenar con masilla y tener un primer molde sólido de la pala que después es trabajado en madera para terminar en molde de aluminio.

Figura 3.3: Diámetro del rotor eólico de 3 m



<sup>3</sup> Coeficiente de sustentación que se obtiene de la gráfica  $C_i$  vs  $C_d$  del perfil seleccionado, el valor tomado es conservador, en los últimos avances para rotores de gran tamaño este valor es de 0.44.

### a. Secciones de pala

Hecho lo anterior, se procede al cálculo de las cuerdas de las veinte secciones. Para dar su forma geométrica se utilizan los datos del perfil seleccionado NACA 4412 presentados en la tabla 3.1.

Los resultados para cada una de las secciones de los álabes dan valores no lineales, tanto para las cuerdas del perfil como para el ángulo de posición; ello requiere elementos de fabricación complejos y costosos. Para simplificar el proceso se hace una linealización del álabe, que consiste en transformar la cuerda (C) y el ángulo ( $\beta$ ) en parámetros lineales, en función de la posición del radio.

De acuerdo a recomendaciones, se toman puntos de paso  $r = 0.5R$  y  $r = 0.9R$ , con lo que se tienen los valores definitivos de la cuerda y el ángulo para la construcción del molde. Los resultados se muestran en la tabla 3.2. Es con estos datos que se tiene la geometría de cada sección según el radio que se determine.

**Tabla 3.1: Valores del NACA 4412**

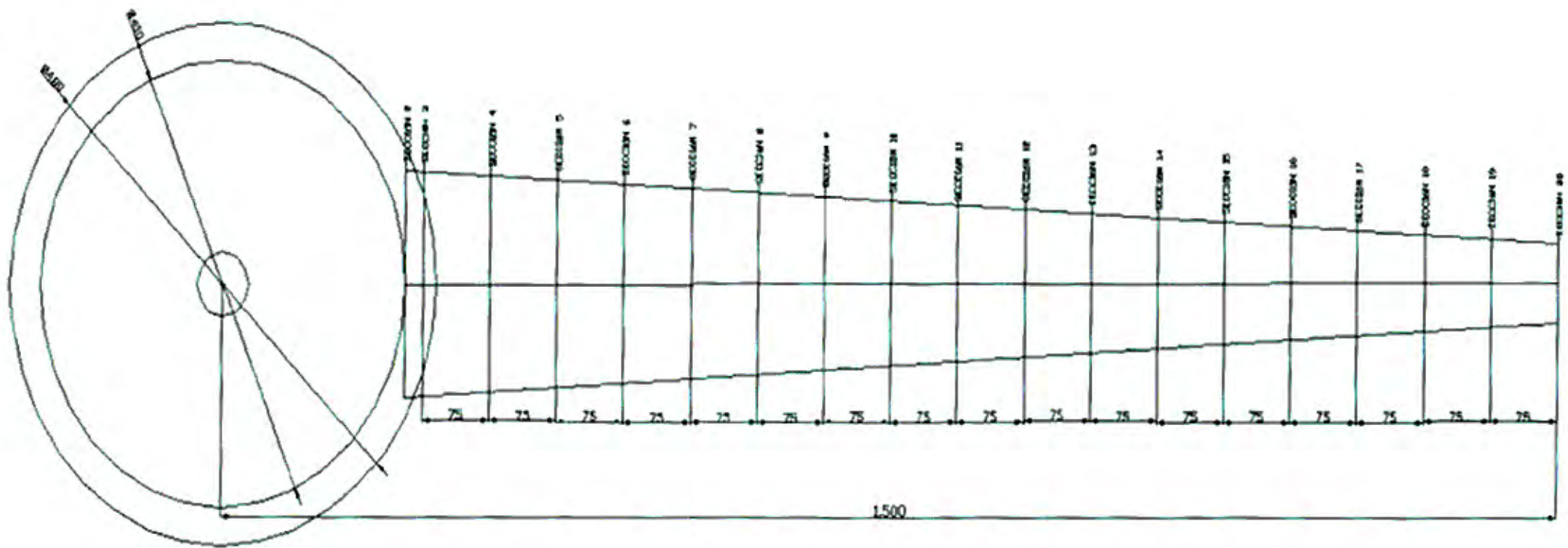
PERFIL NACA 4412			
	X	Y(+)	Y(-)
	0	0	0
1	1.25	2.44	-1.43
2	2.5	3.39	-1.95
3	5	4.73	-2.49
4	7.5	5.76	-2.74
5	10	6.59	-2.86
6	15	7.89	-2.88
7	20	8.8	-2.74
8	25	9.41	-2.5
9	30	9.76	-2.26
10	40	9.8	-1.8
11	50	9.19	-1.4
12	60	8.14	-1
13	70	6.69	-0.65
14	80	4.89	-0.39
15	90	2.71	-0.22
16	95	1.47	-0.16
17	100	0.13	-0.13
18	100		0

**Tabla 3.2: Ángulo y cuerda de cada sección de la pala**

Valores de cuerda y ángulo para cada sección			
	r	$\beta$	C
1	0.075	10.088	0.235
2	0.150	9.612	0.226
3	0.225	9.136	0.218
4	0.300	8.660	0.210
5	0.375	8.184	0.202
6	0.450	7.707	0.193
7	0.525	7.231	0.185
8	0.600	6.755	0.177
9	0.675	6.279	0.168
10	0.750	5.803	0.160
11	0.825	5.327	0.152
12	0.900	4.851	0.143
13	0.975	4.375	0.135
14	1.050	3.899	0.127
15	1.125	3.423	0.118
16	1.200	2.946	0.110
17	1.275	2.470	0.102
18	1.350	1.994	0.094
19	1.425	1.518	0.085
20	1.500	1.042	0.077

En la figura 3.4 se muestra la pala dividida en secciones para su dimensionado, en la figura 3.5 se presenta la disposición de las 20 secciones y, en la figura 3.6, se presenta la geometría, tanto de la longitud de cuerda de cada sección como de los ángulos de posición utilizados para construir el molde de la pala, las figuras 3.7 y 3.8 ilustran el proceso.

Figura 3.4: Distribución de las 20 secciones en que se ha dividido la pala



**Figura 3.5: Distribución de los 20 perfiles en que se ha dividido la pala para su construcción**

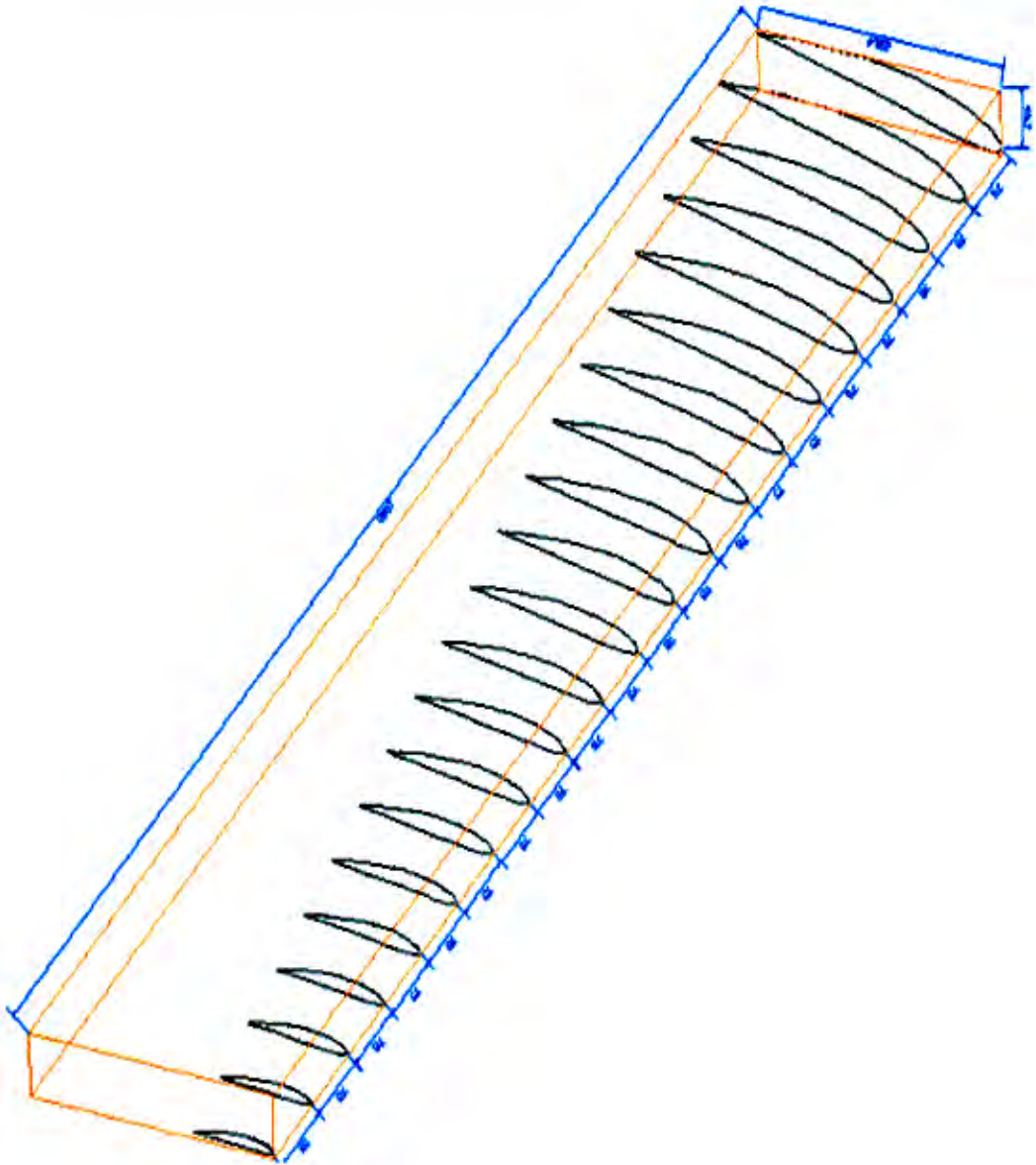
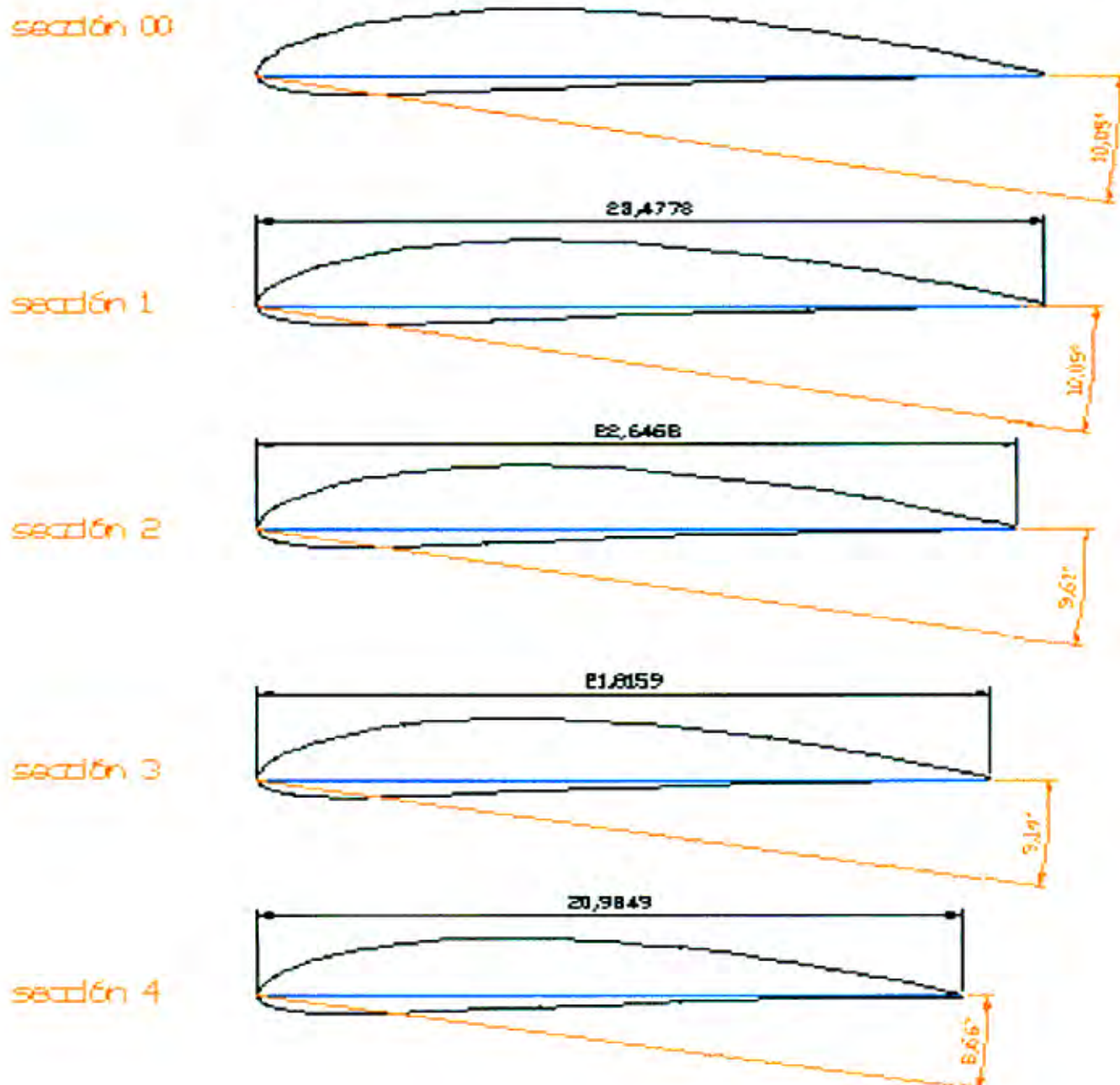
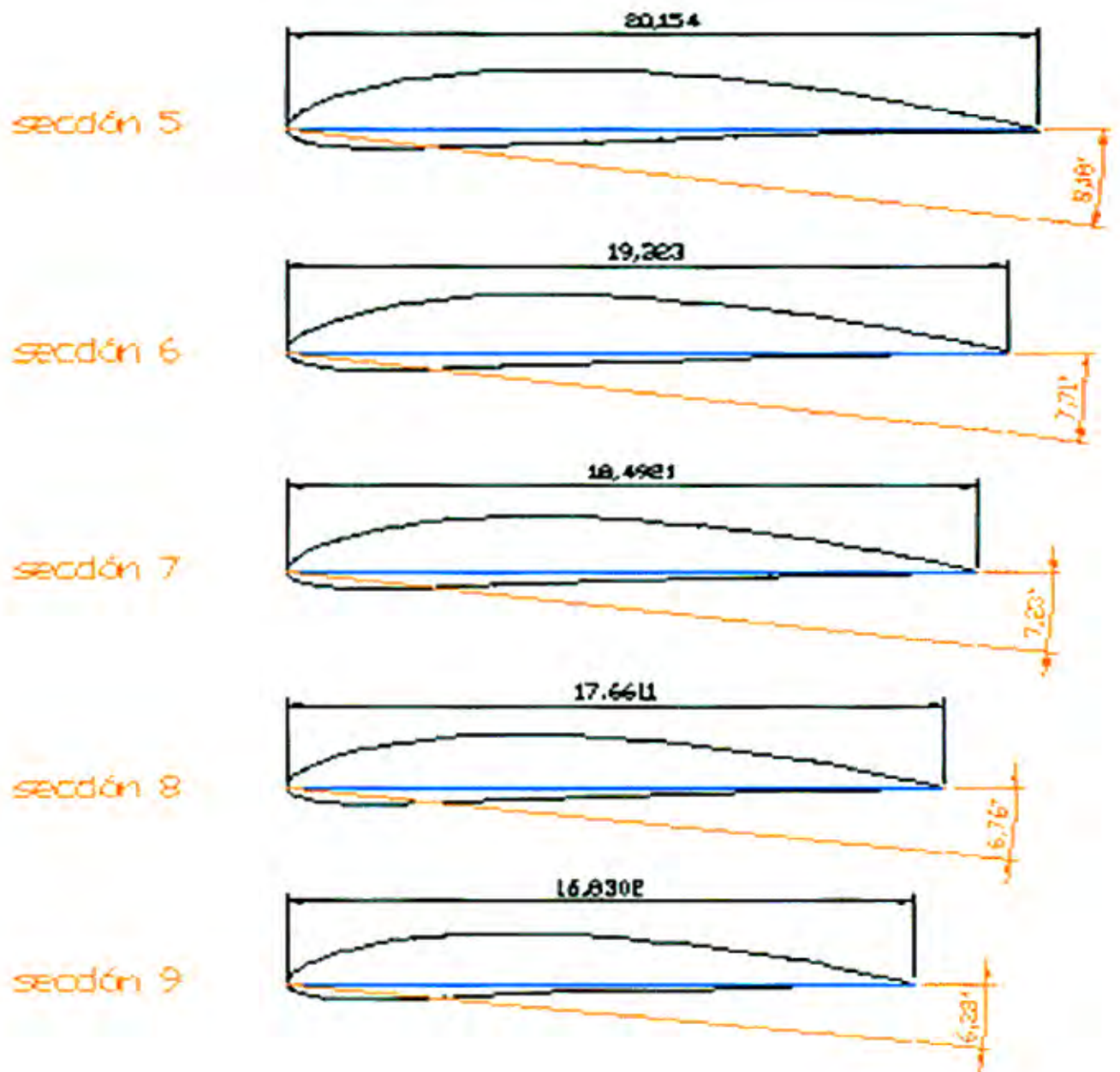
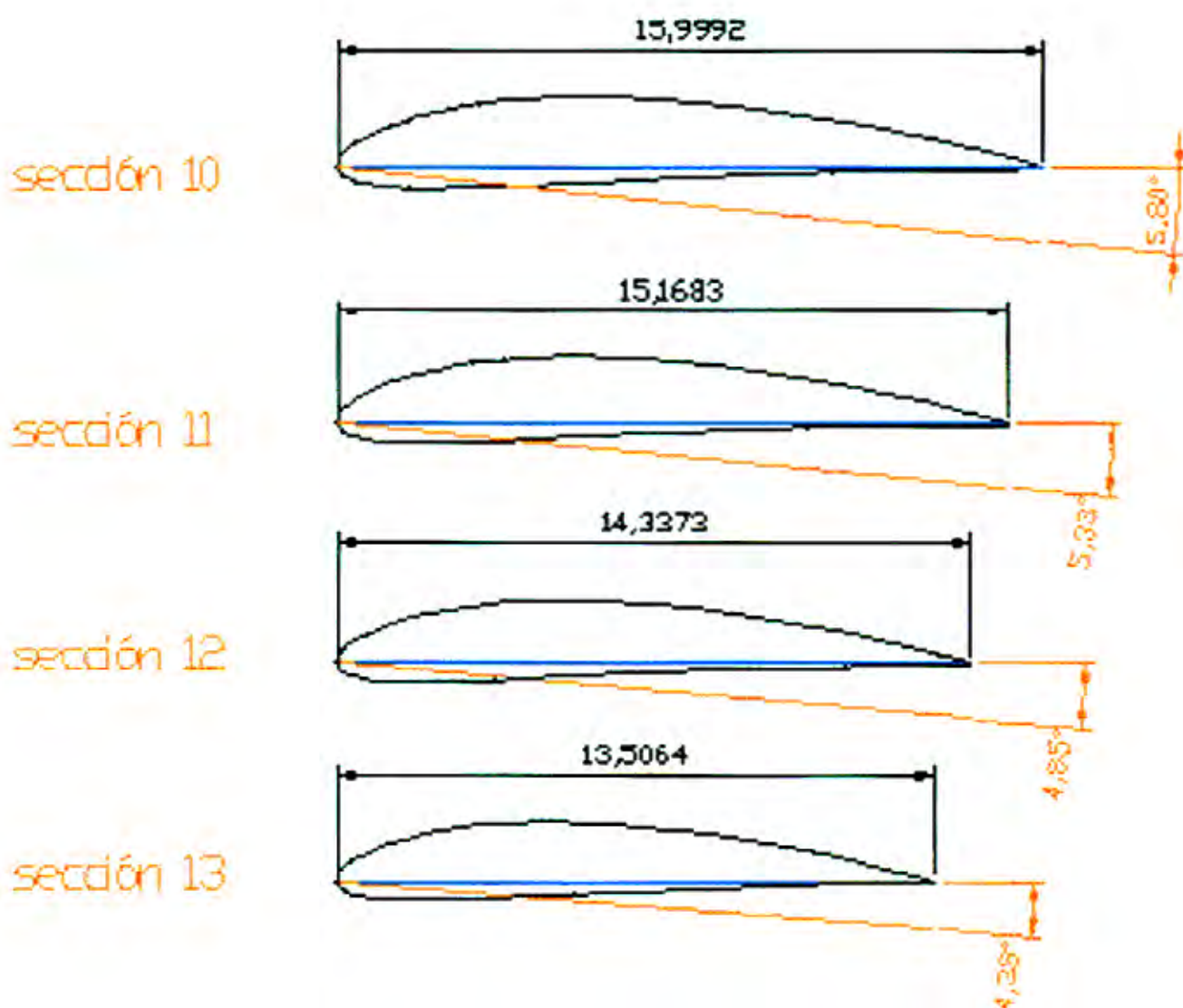


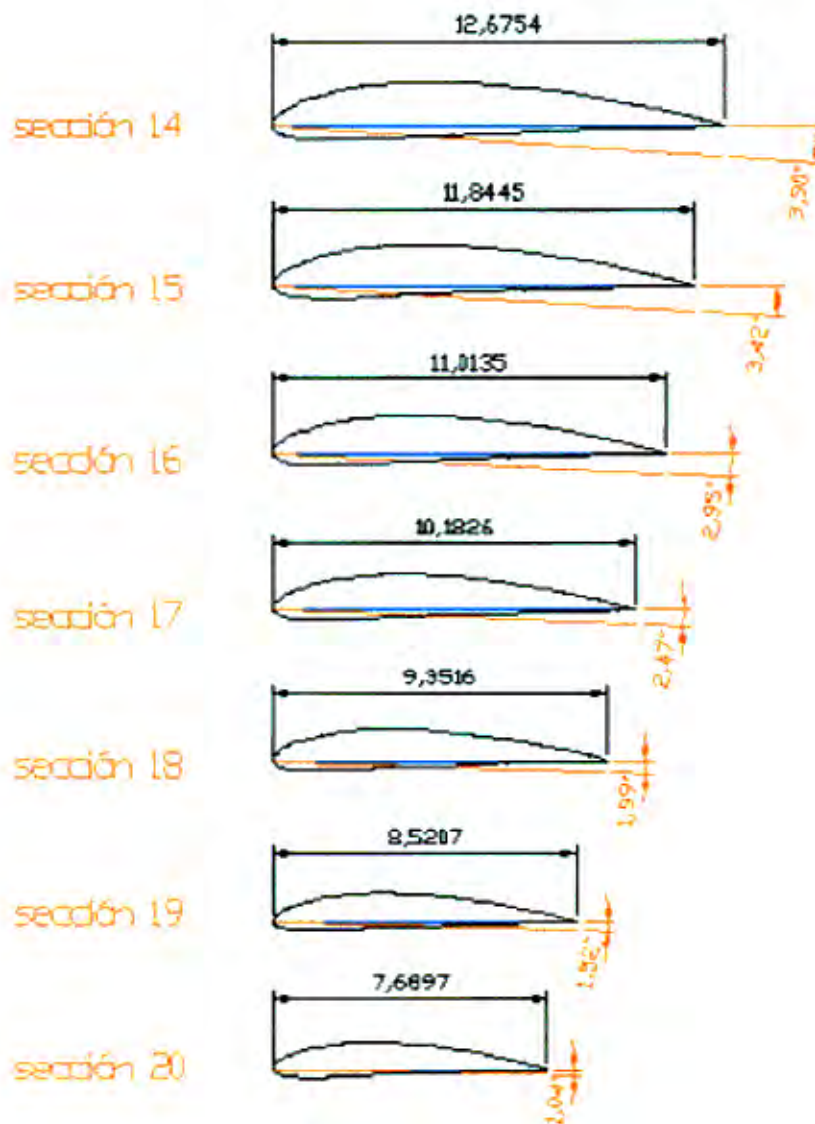


Figura 3.6: Detalle geométrico de las 20 secciones de la pala

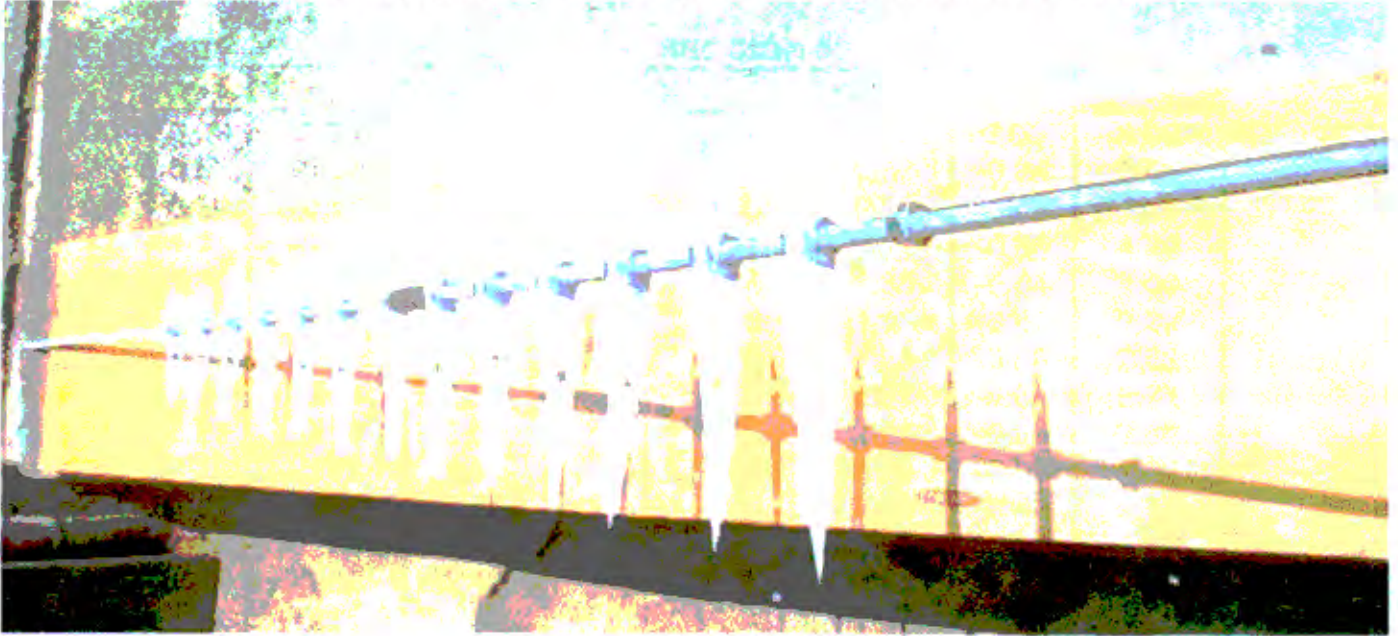








**Figura 3.7: Muestra los perfiles listos para la preparación del molde**



**Figura 3.8: Perfiles dispuestos a lo largo de un eje para la construcción del molde**



A continuación se presentan los puntos en los ejes X, Y (+) e Y (-) de las veinte secciones que dan forma a la pala, con estos datos se obtiene la geométrica de cada sección de la figura 3.6.

Tabla 3.3: Muestra los puntos de cada sección desde 01-20

SECCIÓN 01				SECCIÓN 02			
X	Y(+)	Y(-)	Espesor	X	Y(+)	Y(-)	Espesor
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.29	0.57	-0.34	0.91	0.29	0.57	-0.34	0.91
0.59	0.80	-0.46	1.25	0.59	0.80	-0.46	1.25
1.17	1.11	-0.58	1.70	1.17	1.11	-0.58	1.70
1.76	1.35	-0.64	2.00	1.76	1.35	-0.64	2.00
2.35	1.55	-0.67	2.22	2.35	1.55	-0.67	2.22
3.52	1.85	-0.68	2.53	3.52	1.85	-0.68	2.53
4.70	2.07	-0.64	2.71	4.70	2.07	-0.64	2.71
5.87	2.21	-0.59	2.80	5.87	2.21	-0.59	2.80
7.04	2.29	-0.53	2.82	7.04	2.29	-0.53	2.82
9.39	2.30	-0.42	2.72	9.39	2.30	-0.42	2.72
11.74	2.16	-0.33	2.49	11.74	2.16	-0.33	2.49
14.09	1.91	-0.23	2.15	14.09	1.91	-0.23	2.15
16.43	1.57	-0.15	1.72	16.43	1.57	-0.15	1.72
18.78	1.15	-0.09	1.24	18.78	1.15	-0.09	1.24
21.13	0.64	-0.05	0.69	21.13	0.64	-0.05	0.69
22.30	0.35	-0.04	0.38	22.30	0.35	-0.04	0.38
23.48	0.03	-0.03	0.06	23.48	0.03	-0.03	0.06
23.48	0.00	0.00	0.00	23.48	0.00	0.00	0.00

SECCION 03				SECCION 04			
0	0	0	0	0	0	0	0
0.27	0.55	-0.32	0.88	0.262	0.512	-0.300	0.81212
0.55	0.74	-0.43	1.16	0.525	0.711	-0.409	1.121
1.09	1.03	-0.54	1.58	1.049	0.993	-0.523	1.515
1.64	1.26	-0.60	1.85	1.574	1.209	-0.575	1.784
2.18	1.44	-0.62	2.06	2.098	1.383	-0.600	1.983
3.27	1.72	-0.63	2.35	3.148	1.656	-0.604	2.260
4.36	1.92	-0.60	2.52	4.197	1.847	-0.575	2.422
5.45	2.05	-0.55	2.60	5.246	1.975	-0.525	2.499
6.54	2.13	-0.49	2.62	6.295	2.048	-0.474	2.522
8.73	2.14	-0.39	2.53	8.394	2.057	-0.378	2.434
10.91	2.00	-0.31	2.31	10.492	1.929	-0.294	2.222
13.09	1.78	-0.22	1.99	12.591	1.708	-0.210	1.918
15.27	1.46	-0.14	1.60	14.689	1.404	-0.136	1.540
17.45	1.07	-0.09	1.15	16.788	1.026	-0.082	1.108
19.63	0.59	-0.05	0.64	18.886	0.569	-0.046	0.615
20.73	0.32	-0.03	0.36	19.936	0.308	-0.034	0.342
21.82	0.03	-0.03	0.06	20.985	0.027	-0.027	0.055
21.82	0.00	0.00	0.00	20.985	0.000	0.000	0.000

**SECCION 05**

0	0	0	0
0.25	0.49	-0.29	0.78
0.50	0.68	-0.39	1.08
1.01	0.95	-0.50	1.46
1.51	1.16	-0.55	1.71
2.02	1.33	-0.58	1.90
3.02	1.59	-0.58	2.17
4.03	1.77	-0.55	2.33
5.04	1.90	-0.50	2.40
6.05	1.97	-0.46	2.42
8.06	1.98	-0.36	2.34
10.08	1.85	-0.28	2.13
12.09	1.64	-0.20	1.84
14.11	1.35	-0.13	1.48
16.12	0.99	-0.08	1.06
18.14	0.55	-0.04	0.59
19.15	0.30	-0.03	0.33
20.15	0.03	-0.03	0.05
20.15	0.00	0.00	0.00

**SECCION 06**

0	0	0	0
0.24	0.47	-0.28	0.75
0.48	0.66	-0.38	1.03
0.97	0.91	-0.48	1.40
1.45	1.11	-0.53	1.64
1.93	1.27	-0.55	1.83
2.90	1.52	-0.56	2.08
3.86	1.70	-0.53	2.23
4.83	1.82	-0.48	2.30
5.80	1.89	-0.44	2.32
7.73	1.89	-0.35	2.24
9.66	1.78	-0.27	2.05
11.59	1.57	-0.19	1.77
13.53	1.29	-0.13	1.42
15.46	0.94	-0.08	1.02
17.39	0.52	-0.04	0.57
18.36	0.28	-0.03	0.31
19.32	0.03	-0.03	0.05
19.32	0.00	0.00	0.00

**SECCION 07**

0	0	0	0
0.23	0.45	-0.26	0.72
0.46	0.63	-0.36	0.99
0.92	0.87	-0.46	1.34
1.39	1.07	-0.51	1.57
1.85	1.22	-0.53	1.75
2.77	1.46	-0.53	1.99
3.70	1.63	-0.51	2.13
4.62	1.74	-0.46	2.20
5.55	1.80	-0.42	2.22
7.40	1.81	-0.33	2.15
9.25	1.70	-0.26	1.96
11.10	1.51	-0.18	1.69
12.94	1.24	-0.12	1.36
14.79	0.90	-0.07	0.98
16.64	0.50	-0.04	0.54
17.57	0.27	-0.03	0.30
18.49	0.02	-0.02	0.05
18.49	0.00	0.00	0.00

**SECCION 08**

0.00	0.00	0.00	0.00
0.22	0.43	-0.25	0.68
0.44	0.60	-0.34	0.94
0.88	0.84	-0.44	1.28
1.32	1.02	-0.48	1.50
1.77	1.16	-0.51	1.67
2.65	1.39	-0.51	1.90
3.53	1.55	-0.48	2.04
4.42	1.66	-0.44	2.10
5.30	1.72	-0.40	2.12
7.06	1.73	-0.32	2.05
8.83	1.62	-0.25	1.87
10.60	1.44	-0.18	1.61
12.36	1.18	-0.11	1.30
14.13	0.86	-0.07	0.93
15.90	0.48	-0.04	0.52
16.78	0.26	-0.03	0.29
17.66	0.02	-0.02	0.05
17.66	0.00	0.00	0.00

**SECCION 09**

0	0	0	0
0.21	0.41	-0.24	0.65
0.42	0.57	-0.33	0.90
0.84	0.80	-0.42	1.22
1.26	0.97	-0.46	1.43
1.68	1.11	-0.48	1.59
2.52	1.33	-0.48	1.81
3.37	1.48	-0.46	1.94
4.21	1.58	-0.42	2.00
5.05	1.64	-0.38	2.02
6.73	1.65	-0.30	1.95
8.42	1.55	-0.24	1.78
10.10	1.37	-0.17	1.54
11.78	1.13	-0.11	1.24
13.46	0.82	-0.07	0.89
15.15	0.46	-0.04	0.49
15.99	0.25	-0.03	0.27
16.83	0.02	-0.02	0.04
16.83	0.00	0.00	0.00

**SECCION 10**

0.00	0.00	0.00	0.00
0.20	0.39	-0.23	0.62
0.40	0.54	-0.31	0.85
0.80	0.76	-0.40	1.16
1.20	0.92	-0.44	1.36
1.60	1.05	-0.46	1.51
2.40	1.26	-0.46	1.72
3.20	1.41	-0.44	1.85
4.00	1.51	-0.40	1.91
4.80	1.56	-0.36	1.92
6.40	1.57	-0.29	1.86
8.00	1.47	-0.22	1.69
9.60	1.30	-0.16	1.46
11.20	1.07	-0.10	1.17
12.80	0.78	-0.06	0.84
14.40	0.43	-0.04	0.47
15.20	0.24	-0.03	0.26
16.00	0.02	-0.02	0.04
16.00	0.00	0.00	0.00

**SECCION 11**

0	0	0	0
0.19	0.37	-0.22	0.59
0.38	0.51	-0.30	0.81
0.76	0.72	-0.38	1.10
1.14	0.87	-0.42	1.29
1.52	1.00	-0.43	1.43
2.28	1.20	-0.44	1.63
3.03	1.33	-0.42	1.75
3.79	1.43	-0.38	1.81
4.55	1.48	-0.34	1.82
6.07	1.49	-0.27	1.76
7.58	1.39	-0.21	1.61
9.10	1.23	-0.15	1.39
10.62	1.01	-0.10	1.11
12.13	0.74	-0.06	0.80
13.65	0.41	-0.03	0.44
14.41	0.22	-0.02	0.25
15.17	0.02	-0.02	0.04
15.17	0.00	0.00	0.00

**SECCION 12**

0.00	0.00	0.00	0.00
0.18	0.35	-0.21	0.55
0.36	0.49	-0.28	0.77
0.72	0.68	-0.36	1.04
1.08	0.83	-0.39	1.22
1.43	0.94	-0.41	1.35
2.15	1.13	-0.41	1.54
2.87	1.26	-0.39	1.65
3.58	1.35	-0.36	1.71
4.30	1.40	-0.32	1.72
5.73	1.41	-0.26	1.66
7.17	1.32	-0.20	1.52
8.60	1.17	-0.14	1.31
10.04	0.96	-0.09	1.05
11.47	0.70	-0.06	0.76
12.90	0.39	-0.03	0.42
13.62	0.21	-0.02	0.23
14.34	0.02	-0.02	0.04
14.34	0.00	0.00	0.00



**SECCION 13**

0	0	0	0
0.169	0.3296	-0.19314	0.5227
0.338	0.458	-0.263	0.721
0.675	0.639	-0.336	0.975
1.013	0.778	-0.370	1.148
1.351	0.890	-0.386	1.276
2.026	1.066	-0.389	1.455
2.701	1.189	-0.370	1.559
3.377	1.271	-0.338	1.609
4.052	1.318	-0.305	1.623
5.403	1.324	-0.243	1.567
6.753	1.241	-0.189	1.430
8.104	1.099	-0.135	1.234
9.454	0.904	-0.088	0.991
10.805	0.660	-0.053	0.713
12.156	0.366	-0.030	0.396
12.831	0.199	-0.022	0.220
13.506	0.018	-0.018	0.035
13.506	0.000	0.000	0.000

**SECCION 14**

0.00	0.00	0.00	0.00
0.16	0.31	-0.18	0.49
0.32	0.43	-0.25	0.68
0.63	0.60	-0.32	0.92
0.95	0.73	-0.35	1.08
1.27	0.84	-0.36	1.20
1.90	1.00	-0.37	1.37
2.54	1.12	-0.35	1.46
3.17	1.19	-0.32	1.51
3.80	1.24	-0.29	1.52
5.07	1.24	-0.23	1.47
6.34	1.16	-0.18	1.34
7.61	1.03	-0.13	1.16
8.87	0.85	-0.08	0.93
10.14	0.62	-0.05	0.67
11.41	0.34	-0.03	0.37
12.04	0.19	-0.02	0.21
12.68	0.02	-0.02	0.03
12.68	0.00	0.00	0.00

**SECCION 15**

0	0	0	0
0.15	0.29	-0.17	0.46
0.30	0.40	-0.23	0.63
0.59	0.56	-0.29	0.86
0.89	0.68	-0.32	1.01
1.18	0.78	-0.34	1.12
1.78	0.93	-0.34	1.28
2.37	1.04	-0.32	1.37
2.96	1.11	-0.30	1.41
3.55	1.16	-0.27	1.42
4.74	1.16	-0.21	1.37
5.92	1.09	-0.17	1.25
7.11	0.96	-0.12	1.08
8.29	0.79	-0.08	0.87
9.48	0.58	-0.05	0.63
10.66	0.32	-0.03	0.35
11.25	0.17	-0.02	0.19
11.84	0.02	-0.02	0.03
11.84	0.00	0.00	0.00

**SECCION 16**

0.00	0.00	0.00	0.00
0.14	0.27	-0.16	0.43
0.28	0.37	-0.21	0.59
0.55	0.52	-0.27	0.80
0.83	0.63	-0.30	0.94
1.10	0.73	-0.31	1.04
1.65	0.87	-0.32	1.19
2.20	0.97	-0.30	1.27
2.75	1.04	-0.28	1.31
3.30	1.07	-0.25	1.32
4.41	1.08	-0.20	1.28
5.51	1.01	-0.15	1.17
6.61	0.90	-0.11	1.01
7.71	0.74	-0.07	0.81
8.81	0.54	-0.04	0.58
9.91	0.30	-0.02	0.32
10.46	0.16	-0.02	0.18
11.01	0.01	-0.01	0.03
11.01	0.00	0.00	0.00

**SECCION 17**

0.00	0.00	0.00	0.00
0.13	0.25	-0.15	0.39
0.25	0.35	-0.20	0.54
0.51	0.48	-0.25	0.74
0.76	0.59	-0.28	0.87
1.02	0.67	-0.29	0.96
1.53	0.80	-0.29	1.10
2.04	0.90	-0.28	1.18
2.55	0.96	-0.25	1.21
3.05	0.99	-0.23	1.22
4.07	1.00	-0.18	1.18
5.09	0.94	-0.14	1.08
6.11	0.83	-0.10	0.93
7.13	0.68	-0.07	0.75
8.15	0.50	-0.04	0.54
9.16	0.28	-0.02	0.30
9.67	0.15	-0.02	0.17
10.18	0.01	-0.01	0.03
10.18	0.00	0.00	0.00

**SECCION 18**

0.00	0.00	0.00	0.00
0.12	0.23	-0.13	0.36
0.23	0.32	-0.18	0.50
0.47	0.44	-0.23	0.68
0.70	0.54	-0.26	0.79
0.94	0.62	-0.27	0.88
1.40	0.74	-0.27	1.01
1.87	0.82	-0.26	1.08
2.34	0.88	-0.23	1.11
2.81	0.91	-0.21	1.12
3.74	0.92	-0.17	1.08
4.68	0.86	-0.13	0.99
5.61	0.76	-0.09	0.85
6.55	0.63	-0.06	0.69
7.48	0.46	-0.04	0.49
8.42	0.25	-0.02	0.27
8.88	0.14	-0.01	0.15
9.35	0.01	-0.01	0.02
9.35	0.00	0.00	0.00

**SECCION 19**

0	0	0	0
0.11	0.21	-0.12	0.33
0.21	0.29	-0.17	0.46
0.43	0.40	-0.21	0.62
0.64	0.49	-0.23	0.72
0.85	0.56	-0.24	0.81
1.28	0.67	-0.25	0.92
1.70	0.75	-0.23	0.98
2.13	0.80	-0.21	1.01
2.56	0.83	-0.19	1.02
3.41	0.84	-0.15	0.99
4.26	0.78	-0.12	0.90
5.11	0.69	-0.09	0.78
5.96	0.57	-0.06	0.63
6.82	0.42	-0.03	0.45
7.67	0.23	-0.02	0.25
8.09	0.13	-0.01	0.14
8.52	0.01	-0.01	0.02
8.52	0.00	0.00	0.00

**SECCION 20**

0	0	0	0
0.10	0.19	-0.11	0.30
0.19	0.26	-0.15	0.41
0.38	0.36	-0.19	0.56
0.58	0.44	-0.21	0.65
0.77	0.51	-0.22	0.73
1.15	0.61	-0.22	0.83
1.54	0.68	-0.21	0.89
1.92	0.72	-0.19	0.92
2.31	0.75	-0.17	0.92
3.08	0.75	-0.14	0.89
3.84	0.71	-0.11	0.81
4.61	0.63	-0.08	0.70
5.38	0.51	-0.05	0.56
6.15	0.38	-0.03	0.41
6.92	0.21	-0.02	0.23
7.31	0.11	-0.01	0.13
7.69	0.01	-0.01	0.02
7.69	0.00	0.00	0.00

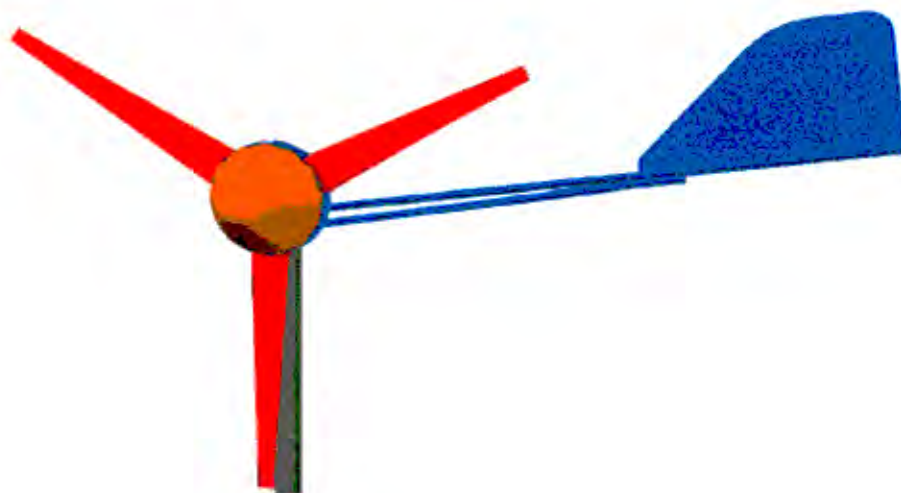
### 3.6 DISEÑO Y DIMENSIONADO DEL SISTEMA DE REGULACIÓN DE POTENCIA Y DIRECCIÓN

El sistema de orientación y protección está compuesto de una veleta móvil que orienta a la turbina, manteniéndola siempre en la dirección del viento. Este sistema actúa como regulador de potencia y protección cuando la velocidad del viento supera los 9 m/s. En la figura 3.9 se representa cómo actúa el sistema colocando al rotor en forma paralela a la veleta.

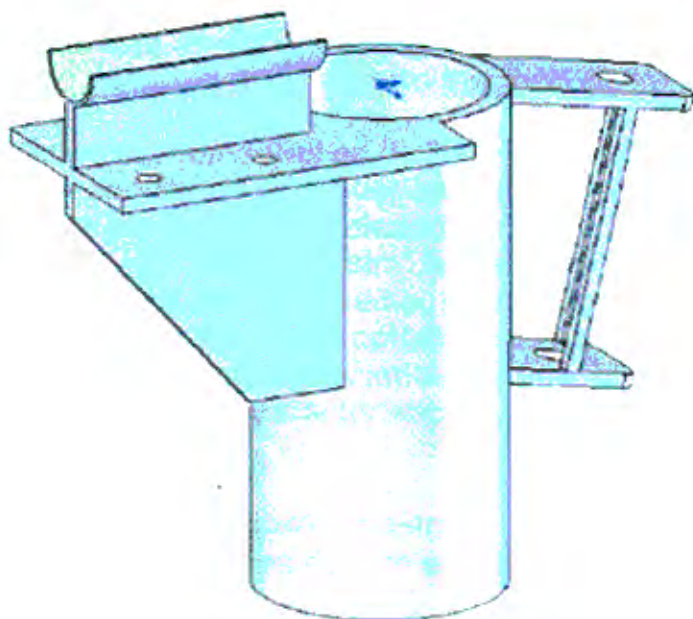
El mecanismo que se emplea como sistema de orientación y de seguridad es el de pivote de cola. Este sistema consiste en la conjugación de dos ángulos: el primero en el pivote de la cola, desfasado un ángulo  $\delta$  con respecto al eje del aerogenerador y el segundo es un ángulo de inclinación  $\beta$  con respecto a la vertical. El control de la velocidad del rotor consiste en desviar la máquina de la acción directa del viento, para ello, el eje de giro del aerogenerador debe estar en una posición excéntrica con respecto al eje de giro del rotor, considerando que el momento de inercia de la cola (peso de la cola multiplicado por la distancia de su centro de gravedad) es lo que gobernaría el mecanismo de orientación.

El momento de inercia hace que la cola provoque una fuerza tal que retire suavemente al aerogenerador de la corriente mayor del viento, pero no totalmente sino tratando de mantener una inclinación que posibilite el giro del rotor a la velocidad de diseño, controlando así el aerogenerador. Con ello se logra que la curva de potencia del aerogenerador se mantenga más o menos lineal. Esto se alcanza gracias a la inclinación del pivote con un ángulo  $\beta$ , provocando que con vientos menores a aquellos para los que fue diseñado se mantenga una posición frontal al viento, y para vientos fuertes, la cola se levante sacando al rotor del frente de viento paulatinamente, evitando así que la potencia caiga de manera abrupta. De tal forma, el aerogenerador seguirá generando energía a un nivel muy cercano a la potencia nominal.

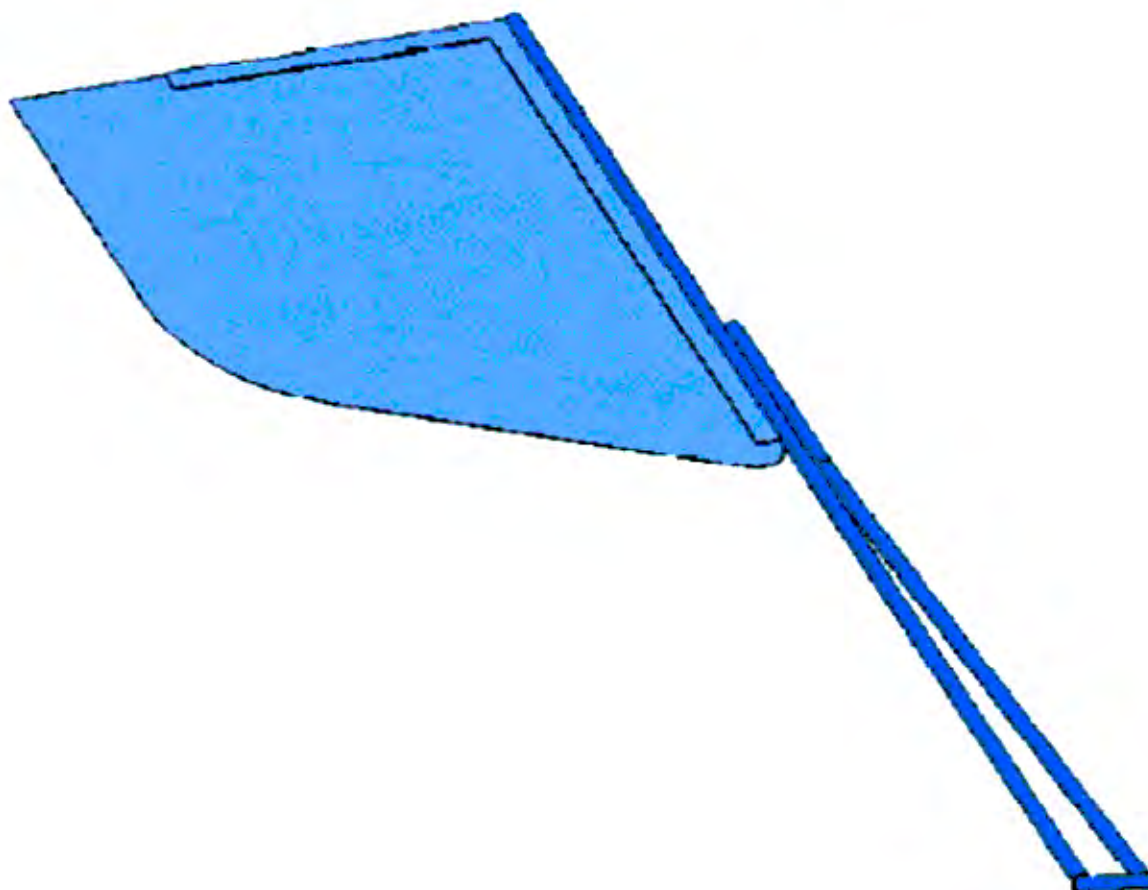
**Figura 3.9: Muestra la posición del aerogenerador cuando la velocidad del viento ha sobrepasado los valores de diseño (mayor de 9 m/s)**



**Figura 3.10: Muestra la tornamesa en tres dimensiones**



**Figura 3.11: Muestra la vela de placa plana**



### 3.7 DISEÑO Y DIMENSIONADO DEL GENERADOR ELÉCTRICO DE IMANES PERMANENTES

Tal como se observó en el capítulo 2, las consideraciones para el diseño del generador son: velocidad de giro del rotor condicionada por la velocidad del viento, cantidad par de polos, voltaje de salida y la geometría constructiva para encontrar el punto máximo de trabajo del imán en el circuito magnético.

Este generador de imanes permanentes es de flujo axial, caracterizado por su elevada densidad de par y por la capacidad de poder incluir un elevado número de polos. Con la ventaja añadida de que empleando un elevado número de polos pueden conectarse directamente al eje de la turbina sin necesidad de emplear mecanismos multiplicadores de velocidades, acople directo, generador eléctrico, rotor eólico. En la selección de la geometría del imán se ha optado por ajustar los cálculos a los bloques existentes en el mercado, evaluando la eficiencia versus los costos.

A continuación se presentan las características y valores del generador eléctrico diseñado y construido

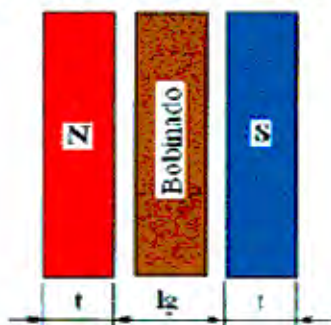
- Generador trifásico axial de conexión estrella
- Doble disco de polos, de imanes de NdFeB - N35
- Disco de bobinados único
- Número de polos: 16
- Velocidad promedio del rotor: 300 RPM
- Número de bobinas: 24
- Voltaje de salida: 24V trifásico
- Potencia nominal: 500 W
- Número de bobinas: 24
- Número de espiras por bobina: 35
- Chumacera SKF FY506M

#### 3.7.1 DESARROLLO DEL PROCESO DE CÁLCULO

- a) DETERMINANDO EL CAMPO MAGNÉTICO DENTRO DEL NÚCLEO DE AIRE (ENTREHIERRO)

En la figura se muestra el arreglo que tienen los imanes y el bobinado, se tiene en cuenta que el bobinado tiene núcleo de aire, de modo que podemos hallar el campo magnético dentro del núcleo de aire (entrehierro) con una longitud  $l_g$ .

Figura 3.12: Arreglo de los imanes y el bobinado



### b. Ecuación de carga (2.58)

Primeramente se define una geometría de referencia, que nos servirá como punto de partida para los cálculos necesarios. Estas dimensiones serán recalculadas posteriormente según sea el requerimiento del equipo.

$$\mu = 4.\pi.10^{-7}$$

$$T = 8 \text{ mm}$$

$$a = 50 \text{ mm}$$

$$b = 50 \text{ mm}$$

Área de la cara del imán:

$$A_m = a \cdot b$$

$$A_m = 2,5 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$$

Entrehierro: distancia entre los imanes

$$l_g = 15 \text{ mm}$$

Área transversal del entrehierro, considerando efecto de borde:

$$A_g = (a + l_g) \cdot (b + l_g)$$

$$A_g = 4,225 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$$

Luego se realiza la intersección de las curvas de magnetización y de carga, para hallar el punto de trabajo de los imanes.

La curva de rojo es la curva de magnetización, rasgo característico de estos imanes (NdFeB N35), se debe aclarar que para cada tipo de imán existe una curva característica diferente. La curva de azul es la curva de carga según la ecuación para las dimensiones tomadas. En este caso, el punto de operación está muy cercano al punto de máxima transferencia de energía, de no ser el caso, se deben ajustar las dimensiones de los imanes o la geometría del entrehierro.

Figura 3.13: Dimensiones del imán

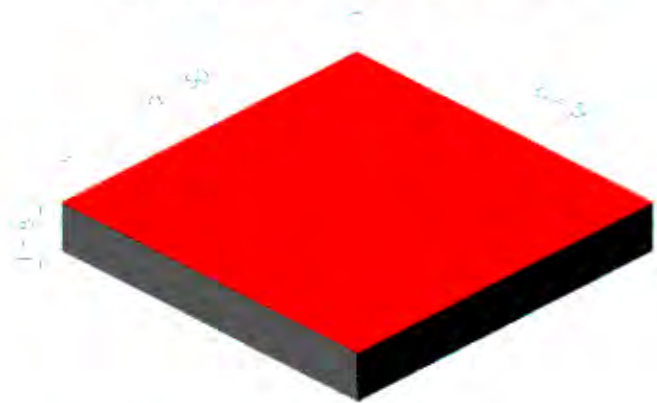
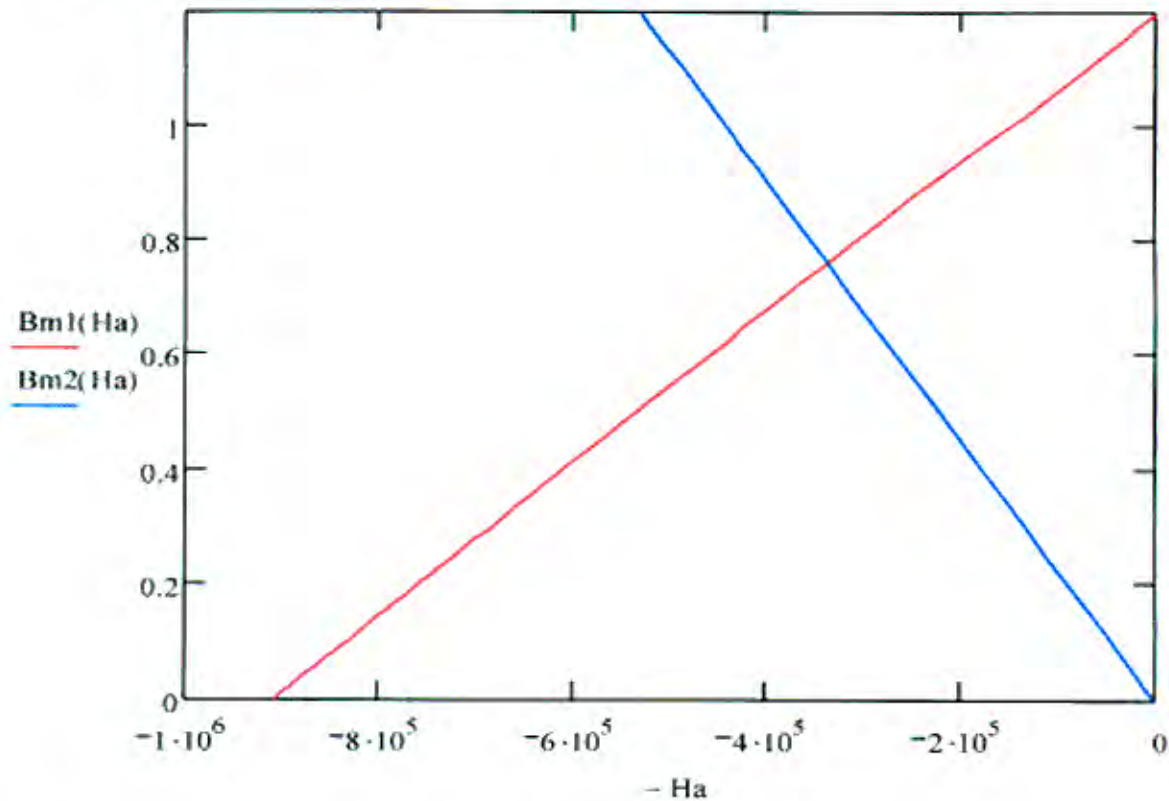


Figura 3.14: Intersección de la curva de magnetización y curva de carga



De las gráficas obtenemos los siguientes resultados:

$$B_m = 0,761 \text{ T}$$
$$H_m = 3,361 \cdot 10^5 \text{ A/m}$$

Densidad de campo dentro del núcleo de aire:

$$B_g = \frac{\Lambda_m}{\Lambda_g} \cdot B_m = 0.451 \text{ T}$$

Consideración tomada en cuenta:

- Se considera que el núcleo tiene una permeabilidad magnética similar al del aire, dado que el núcleo o el material que se encuentra entre los imanes es de resina.
- Se considera también que el campo magnético dentro del núcleo de aire es uniforme y constante en un instante, para efectos de cálculo.

### c. CÁLCULO DE LOS VOLTAJES MÁXIMOS

#### (i) Datos de diseño del generador

Primero consideramos algunos datos de diseño (valores físicos y reales), como las características del material que se cuenta para el desarrollo del generador.

El arreglo de los imanes y el generador construido se muestran en la figura 3.21, en cada disco se cuenta con 16 imanes, uno al lado del otro, alternados entre polo positivo y negativo y distribuido de modo tal que forman un círculo. Las dimensiones del arreglo dependen en este caso únicamente de las dimensiones de los imanes.

Con los imanes a emplear se realizaron pruebas de inducción a una bobina con un determinado número de espiras, estimando así la cantidad de vueltas que debería llevar cada una. Se tomaron en cuenta el número de pares de polo, el número de bobinas y de vueltas en cada una, y se definió que el generador debería tener un giro nominal de 300 RPM, dato de partida para los cálculos.

$N_o = 300 \text{ rpm}$                       Velocidad del rotor

$P = 16$                                   Número de pares de polos

$f = \frac{P \cdot N_o}{120} = 40 \text{ Hz}$               Frecuencia del voltaje inducido

$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$                       Velocidad Angular del voltaje inducido

#### (ii) Número de espiras

Para el número de espiras por fase de nuestro generador se toma un valor un tanto arbitrario, el cual se tendrá que variar posteriormente en caso no cumpla con las expectativas de nuestro proyecto.

$N_c = 160$                       Número de espiras por fase

$M_b = 8$                               Número de bobinas por fase

El número de bobinas por fase se determina debido a que contamos con 24 bobinas, y dado que se trata de un sistema trifásico, a cada fase le corresponde 8 bobinas.

$N_b = \frac{N_c}{M_b} = 20$                       Número inicial de espiras por bobina

#### d. CÁLCULO DEL VOLTAJE MÁXIMO DE FASE

Asumimos inicialmente un área del núcleo de aire, del bobinado, para realizar nuestros cálculos iniciales, este valor se cambiará teniendo en cuenta los valores del voltaje de salida de nuestro generador, así como las dimensiones que físicamente puedan tener las bobinas en el arreglo.

$A_n = 1367, 10^{-6} \text{ m}^2$                       Área del núcleo de aire

El cálculo del voltaje máximo de fase se realiza en vacío, es decir, sin colocar ninguna carga al generador, además se asume que la forma de onda es senoidal.

$K_v = 0,8572$

Este valor  $K_v$  es tomado de datos experimentales debido a que la forma de onda que produce el generador no es totalmente sinusoidal, sino que presenta una forma de



onda con alguna armónicas. Además se debe de tener en cuenta que el área  $A_n$  real no es exactamente la que se define teóricamente.

$$V_f = 4.44 \cdot K_v \cdot N_c \cdot B_g \cdot A_n \cdot f = 15.0 \text{ V} \quad \text{Voltaje eficaz de Fase}$$

$$V_{fm} = \sqrt{2} \cdot V_f = 21.215 \text{ V} \quad \text{Voltaje máximo de fase}$$

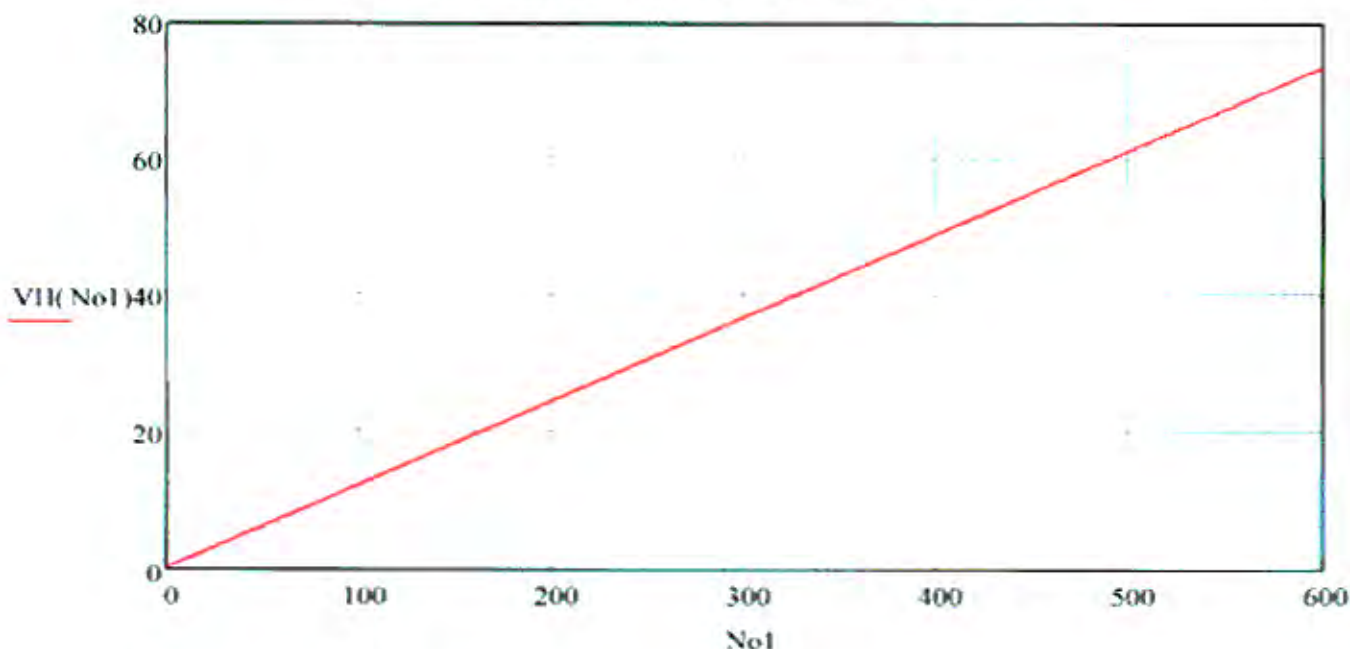
### (iii) Cálculo del voltaje máximo de línea en vacío

El cálculo del voltaje máximo de línea se realiza teniendo en cuenta de que se trata de un sistema trifásico con conexión en estrella.

$$V_{lmo} = \sqrt{3} \cdot V_{fm} = 36.745 \text{ V} \quad \text{Voltaje máximo de línea en vacío}$$

Una de las curvas características de un generador es la curva del voltaje pico de vacío en función de la velocidad de giro del rotor (RPM).

**Figura 3.15: Curva de voltaje máximo de línea en vacío en función de la velocidad del rotor en RPM**



### e. CÁLCULO DE LA CORRIENTE EFICAZ DE LÍNEA

Dado que requerimos una potencia máxima específica indicada, y todavía no conocemos la caída del voltaje debido a la impedancia del conductor, asumimos que el voltaje de salida es de 24 V, este valor debe ser verificado al final, por tanto, tendremos un valor inicial de la corriente de la carga, entonces tenemos que:

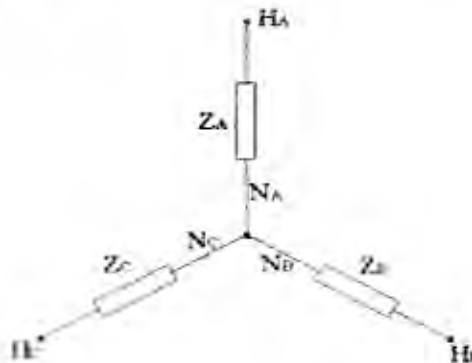
$$\text{Pot.} = 500 \quad \text{Potencia asumida para el cálculo}$$

$$V_{ef} = \frac{24}{\sqrt{3}} = 16.971 \text{ V} \quad \text{Voltaje eficaz de línea}$$

$$I = \frac{Pot}{3 \cdot V_{ef}} = 17.01A$$

Las corrientes eficaces de línea y de fase son iguales dado que se trata de un sistema trifásico con conexión en estrella.

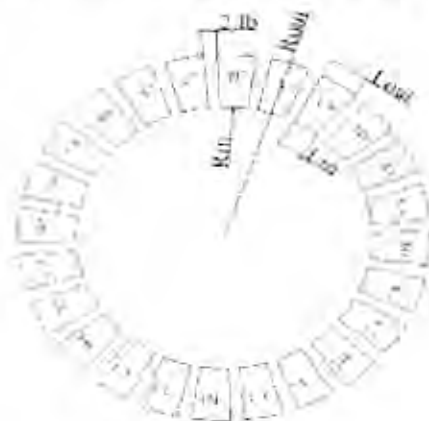
Figura 3.16: Distribución trifásica de las bobinas



#### f. DIMENSIÓN Y ARREGLO DE LAS BOBINAS

En la figura se muestra un esquema del arreglo del bobinado que se hará finalmente, en el que se muestran las dimensiones que podemos considerar correctas, de acuerdo con las condiciones físicas con las que contamos, como el espacio que debe ocupar el generador, así como los accesorios que se utilizarán. Debe dejarse un espacio adecuado para poder colocarlos.

Figura 3.17: Distribución geométrica de los bobinados



Cada uno de los trapecios alrededor de un círculo representa el perímetro interior de cada bobinado, es decir el área de los núcleos de los bobinados, donde todos los \$A\_i\$ representan los bobinados de la fase A, de igual forma los bobinados de las fases B y C.

Donde:

- 2.Lb : Es la separación entre los núcleos de las bobinas.  
 Rout : Es el radio exterior del bobinado, el cual es casi igual al radio exterior de los imanes.  
 Rin : Es el radio interior del bobinado, el cual es igual al radio interior de los Imanes.  
 Lout : Es la base mayor del trapecio, que forma el núcleo del bobinado.  
 Lin : Es la base menor del trapecio, que forma el núcleo del bobinado.  
 Rin : 0.13 m, se define de acuerdo al arreglo de los imanes.  
 Rout : 0.182, se toma así para que cubra todo el largo del imán.

#### (iv) Dimensiones de la bobina

Para el dimensionado del bobinado, primero se debe seleccionar el cable conductor que se va a utilizar. Asumimos que la temperatura del ambiente es cercano a los 30 °C y que la temperatura máxima de trabajo no sobrepasa los 75 °C, entonces tomamos un conductor calibre # 14 para nuestros cálculos iniciales, luego veremos si es el conductor que realmente nos conviene usar.

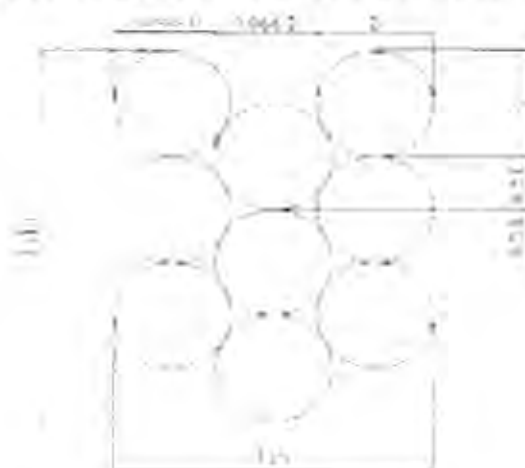
Conductor de cobre a 75° C.

Características del conductor: AWG #14.

$C_{max} = 22$	Corriente máxima en A
$R_c = 0.861$	Resistencia $\Omega/100m$
$D_c = 63 \cdot 10^{-3}$	Diámetro en m
$A_c = 0208$	Área en $cm^2$

Teniendo en cuenta la cantidad de espiras por bobina, hacemos un arreglo adecuado, para una buena distribución en el espacio con el que contamos. Si tomamos como referencia la sección de corte de uno de los extremos de una de las bobinas, tenemos:

Figura 3.18: Sección transversal de la bobina



Dado que en cada bobina tenemos 20 espiras, el arreglo más conveniente será:

$n_{ha} = 5$	Número de hilos en dirección lb
$n_{hb} = 4$	Número de hilos en dirección hb

$$l_b = D_c + 0.866 \cdot D_c \cdot (n_h a - 1) = 7.276 \times 10^{-3} \text{ m} = 7.27 \text{ mm}$$

$$h_b = D_c \cdot 1.5 + (n_h b - 1) \cdot D_c = 7.335 \times 10^{-3} \text{ m} = 7.34 \text{ mm}$$

Estas medidas son convenientes, dado que  $h_b = 7.34 \text{ mm}$  es el espesor de la bobina y debe caber dentro de la separación entre los imanes, cuyo espacio es de 15 mm.

Con estas dimensiones podemos ya calcular el área del núcleo de la bobina. Primero calculamos los perímetros interior y exterior, de las circunferencias que forman las bobinas.

$$\text{Per}_{in} = 2 \cdot \pi \cdot R_{in} = 0.817 \text{ m}$$

$$\text{Per}_{out} = 2 \cdot \pi \cdot R_{out} = 1.144 \text{ m}$$

Luego calculamos las dimensiones de los núcleos de las bobinas:

$$l_{in} = \frac{\text{Per}_{in}}{24} - 2 \cdot l_b = 0.01948 \text{ m} = 19.48 \text{ mm}$$

$$l_{out} = \frac{\text{Per}_{out}}{24} - 2 \cdot l_b = 0.03309 \text{ m} = 33.09 \text{ mm}$$

$$h_{bob} = R_{out} - R_{in} = 0.052 \text{ m} = 52 \text{ mm}$$

Finalmente podemos calcular el área de las bobinas:

$$A_{bob} = \frac{h_{bob}}{2} (l_{in} + l_{out}) = 1367.10^{-6} \text{ m}^2$$

Se debe verificar este cálculo con el área anteriormente asumida para el área del núcleo de la bobina.

#### (v) Cálculo de la longitud del cable

Longitud media de cable en una vuelta:

$$L_{bl} = (l_{in} + l_b) + (l_{out} + l_b) + 2 \cdot \sqrt{(h_{bob} + l_b)^2 + \left(\frac{l_{out} - l_{in}}{2}\right)^2} = 0.18646 \text{ m}$$

Longitud total de cable por fase:

$$L_c = N_c \cdot L_{bl} = 29.834 \text{ m}$$

Longitud total de cable:

$$L_t = 3 \cdot L_c = 89.501 \text{ m}$$

#### g. CÁLCULO DEL CIRCUITO ELÉCTRICO EQUIVALENTE:

La fuente de donde se obtuvo información para el desarrollo del circuito eléctrico equivalente es el libro *Axial Flux Permanent Magnet Brushless Machines* de Jacek F. Gieras.

Parámetros a utilizar:

$R_{in}$ : Radio interior del imán

$R_{out}$ : Radio exterior del imán  
 $k_{w1}$ : factor de enrollamiento  
 $m_1$ : número de fases  
 $P$ : número de polos  
 $N_c$ : número de espiras por fase  
 $I$ : Corriente en el estator  
 $g$ : Entrehierro  
 $k_{fd}$ : factor de forma en dirección d  
 $k_{fq}$ : factor de forma en dirección q  
 $X_{ad}$ : Reactancia del eje directo  
 $X_{aq}$ : Reactancia de eje en cuadratura

Tenemos que:

$k_{w1} = 1$  (Dado que se trata de enrollados simples asumimos que se realizan con gran precisión)

$m_1 = 3$

$k_{fd} = 1.2$  (asumimos un 20% de pérdida)

$k_{fq} = 1.2$  (asumimos un 20% de pérdida)

Figura 3.19: Circuito eléctrico equivalente para una fase

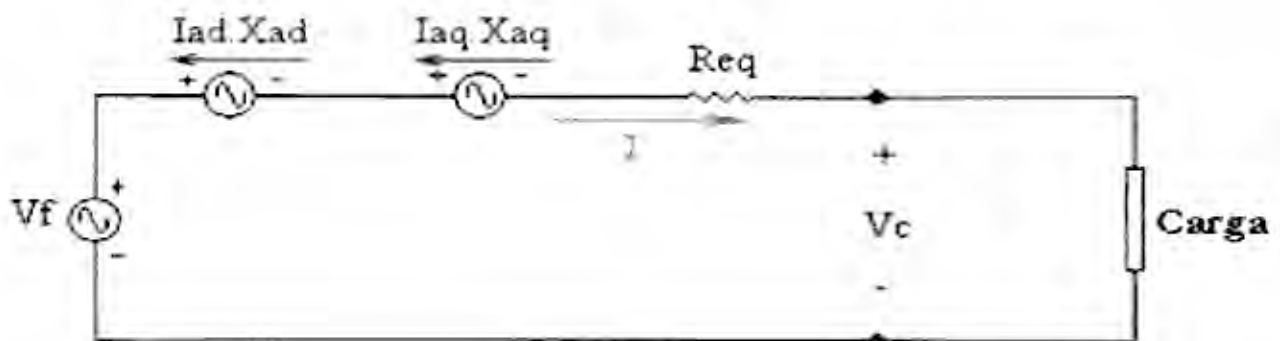
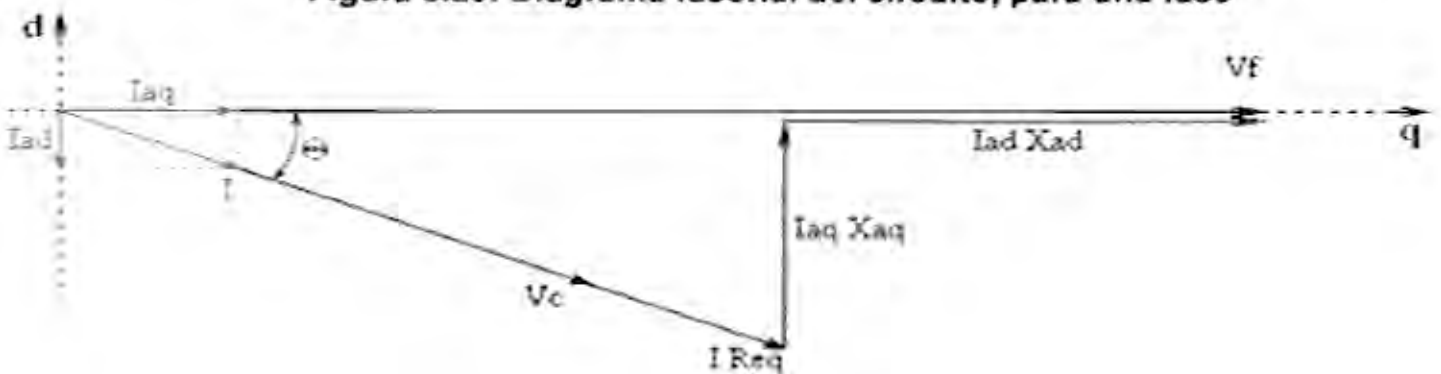


Figura 3.20: Diagrama fasorial del circuito, para una fase



Los datos de entrada se validarán y ajustarán con la prueba del generador eléctrico en un banco de ensayos.

### (vi) Cálculo de la resistencia equivalente

Resistencia del cable por bobina:

$$R_{\text{bob}} = \frac{R_c}{100} \cdot L_{bl} \cdot N_b = 0.0321 \Omega$$

Resistencia del cable por fase:

$$R_{eq} = R_{\text{bob}} \cdot M_b = 0.2569 \Omega$$

Cálculo de las reactivas:

$$g = \frac{l_g - h_b}{2}$$

$$l_{g1} = 2 \left[ (g + 0.5 \cdot h_b) + \frac{t}{\mu_{\text{rec}}} \right] = 0.024$$

$$X_{ad} = 2 \cdot m_l \cdot \mu \cdot f \left( \frac{N_c \cdot k_w l}{P} \right)^2 \left( \frac{R_{out}^2 - R_{in}^2}{l_{g1}} \right) \cdot k_{fd} = 0.025 \Omega$$

$$l_{gq} = 2 \cdot ((g + 0.5 \cdot h_b) + t) = 0.031$$

$$X_{aq} = 2 \cdot m_l \cdot \mu \cdot f \left( \frac{N_c \cdot k_w l}{P} \right)^2 \left( \frac{R_{out}^2 - R_{in}^2}{l_{gq}} \right) \cdot k_{fq} = 0.019 \Omega$$

Para tener la potencia requerida por el sistema (aproximadamente 550 W), debemos tener una corriente diferente a la calculada anteriormente, por lo tanto, se va probando la cantidad de corriente que se necesita. Con lo que llegamos a:

$$I = 13 \text{ A}$$

Del diagrama fasorial obtenemos las siguientes ecuaciones:

$$V_c = \sqrt{(V_f - I \cdot \sin(\theta) \cdot X_{ad})^2 + (I \cdot \cos(\theta) \cdot X_{aq})^2} - I \cdot R_{eq}$$

$$\tan(\theta) = \frac{I \cdot \cos(\theta) \cdot X_{aq}}{I \cdot \sin(\theta) \cdot X_{ad}}$$

Solucionando el sistema de ecuaciones, tenemos:

$$V_c = 14.158 \text{ V}$$

Donde  $V_c$  es el voltaje eficaz por fase sobre la carga. Para hallar el voltaje máximo de línea se debe tener en cuenta que se trata de un sistema trifásico con conexión en estrella. Entonces tenemos:

Voltaje máximo de línea:

$$V_{ml} = \sqrt{3} \cdot V_c \cdot V_{ml} = 34.68 \text{ V}$$

Potencia de la carga:

$$S_c = 3.V_c.I = 552.164 \text{ W}$$

Potencia disipada por el conductor:

$$P_{cu} = 3.I^2 . R_{eq} = 130.232 \text{ W}$$

Potencia necesaria en el eje (sin considerar las pérdidas mecánicas):

$$P_{eje} = S_c + P_{cu} = 682.396 \text{ W}$$

Si consideramos un 10% como pérdidas mecánicas para esta velocidad de rotación tenemos:

$$P_{eje} = 758.218 \text{ W}$$

Eficiencia eléctrica:

$$\eta = \frac{S_c}{P_{eje}} = 72.8\%$$

Las pérdidas mecánicas finalmente se deben de tomar de pruebas realizadas al generador eléctrico.

**h. TORQUE NECESARIO PARA GENERAR LA CORRIENTE ESPECIFICADA**

$$\tau = \frac{P_{eje}}{\omega_{rotor}}$$

Dado que la velocidad del rotor es:

$$N_o = 300 \text{ rpm}$$

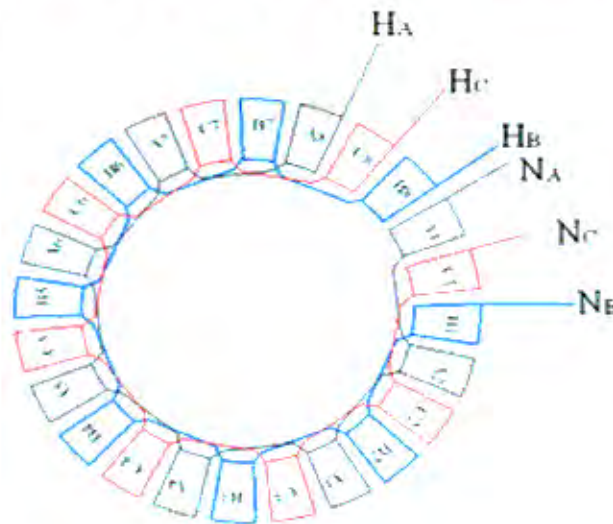
$$\omega_{rotor} = 2.\pi . \frac{N_o}{60} = 31.416 \left[ \frac{\text{rad}}{\text{s}} \right]$$

Reemplazando:

$$\tau = \frac{758.218}{31.416} = 24.135 \text{ [N - m]}$$

(vii) **Arreglo de los bobinados para un circuito trifásico**

**Figura 3.21: Conexión y arreglo de las bobinas en el disco estator**



Esta forma de circuito ha sido diseñada para la rotación de los imanes en sentido horario con respecto a la gráfica mostrada. Si se desea cambiar el sentido del giro se tienen que intercambiar dos de los polos. Lo más práctico sería intercambiar los polos B y C.

### 3.8 PROCESO DE FABRICACIÓN DEL AEROGENERADOR

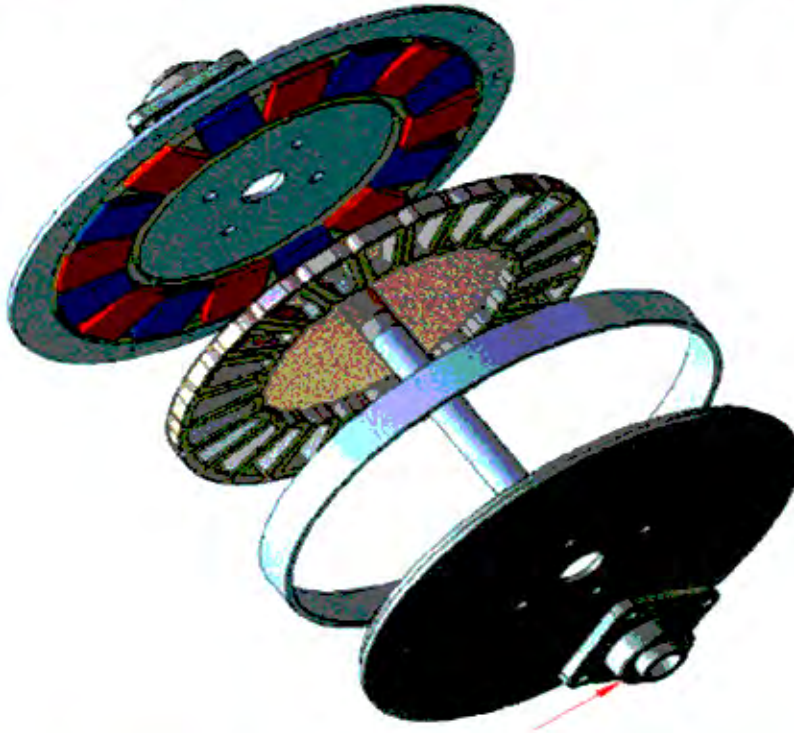
#### 3.8.1 DIMENSIONES DEL GENERADOR DE IMANES PERMANENTES

Los siguientes gráficos y fotos muestran las características geométricas de los componentes del generador eléctrico, de característica geométrica tipo disco y de rotor externo. El rotor ha sido construido en una plancha de acero de 6 mm de espesor, de 16 polos, utilizando imanes de neodimio de 60x50x8 mm, con una distribución de 16 imanes en cada disco. Para hacer una correcta distribución geométrica se ha preparado un plantilla de base.

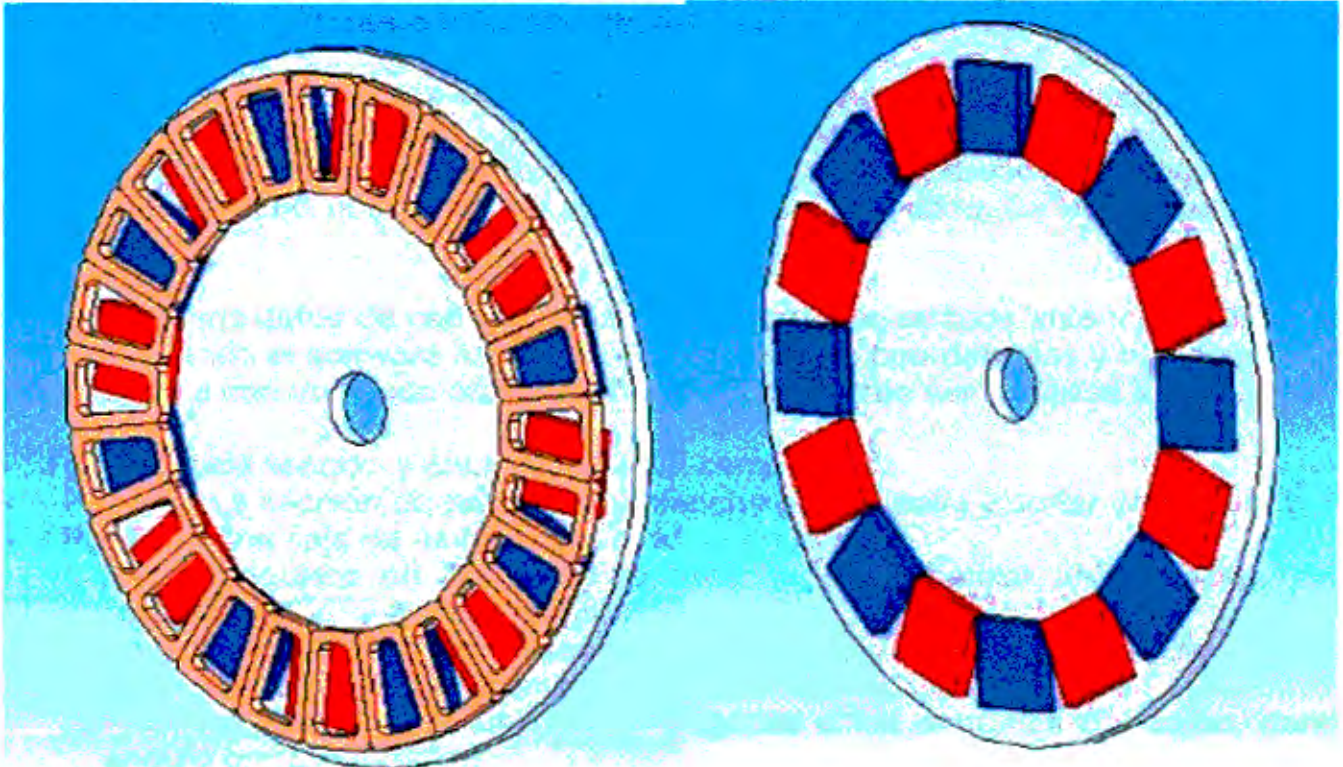
El estator está formado de 24 bobinas de 20 espiras cada una, de geometría trapezoidal. Para formar los ángulos eléctricos y para obtener una onda sinusoidal, las bobinas son cubiertas por una capa de resina que forma una masa sólida tipo disco, el eje hueco estático va fijo en el centro del estator, y es por donde salen los cables eléctricos hacia el exterior. Los planos con las dimensiones y se adjuntan en el anexo N° 1.



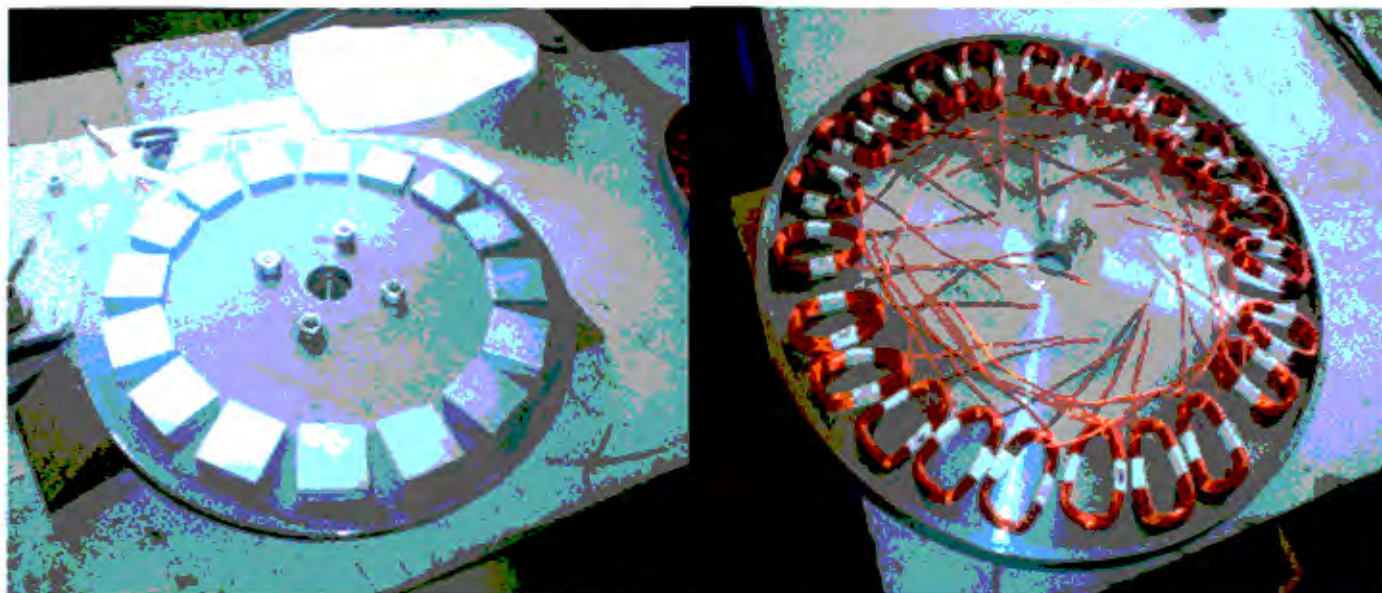
**Figura 3.22: Muestra un esquema en tres dimensiones del generador construido**



**Figura 3.23: Muestra un esquema en tres dimensiones del generador construido**



**Figura 3.24: Distribución de imanes, molde con las bobinas**



### 3.8.2 ROTOR EÓLICO

La turbina va acoplada directamente al generador con carcasa tipo disco, por lo que hay que tener en cuenta el diámetro del rotor del generador como parte del rotor total.

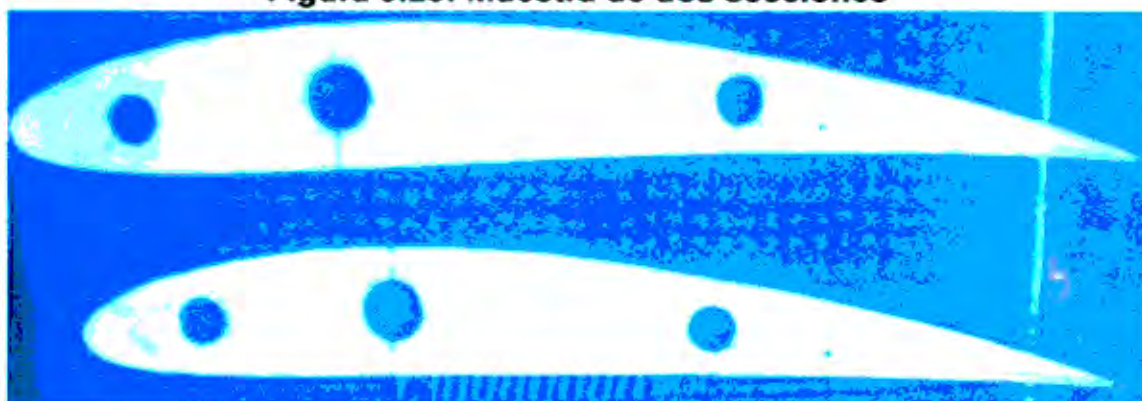
La fabricación de las palas se realizó con fibra de vidrio, y su proceso requiere de un molde, que es la parte más complicada de construir. Se debe tener en cuenta que la parte de la raíz o base del molde debe construirse por separado y después unirse para el molde final, que puede ser de aluminio o fibra de vidrio. La secuencia ha sido la siguiente:

Empleando los datos de cada sección mostrados en el acápite anterior, se dibuja cada sección usando el software AutoCAD. Trazar los ejes coordenados y ubicar los puntos, luego unirlos con una línea continua. Cada sección debe ser dibujada a escala real.

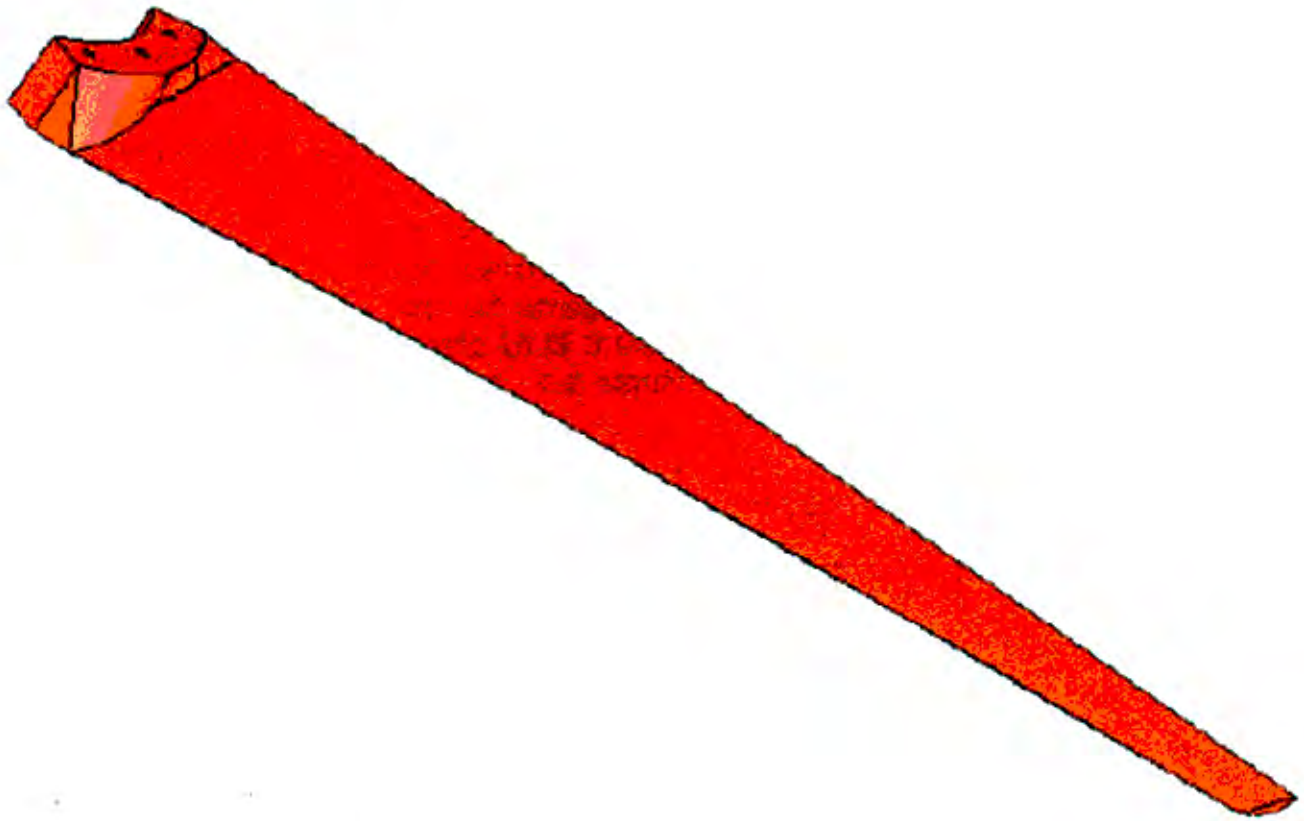
- Cortar cada sección y enumerar según corresponda.
- Pegar cada sección de papel a una plancha galvanizada y cortar (ver figura 3.25).
- Preparar una caja de madera a la medida de la pala.
- Hacer un agujero en el centro de cada sección y pasar un espárrago (varilla roscada) de  $\frac{1}{2}$ " y 1 m de longitud.
- En la varilla colocar cada sección en la posición correspondiente y fijar las secciones con tuercas a ambos lados (ver figura 3.8).
- La primera sección y la última van pegadas a los extremos del cajón, dando el ángulo correspondiente.
- Los agujeros de los costados son para colocar una varilla entre las secciones, lo cual generará la firmeza necesaria cuando se llene con masilla plástica.

- Una vez terminado de armar y fijar las secciones, se procede a rellenar con masilla plástica los espacios vacíos. Los contornos de las secciones son el límite y deben ser cubiertos con la masilla, con lo cual queda una masa sólida muy similar a la pala requerida.
- La parte de la raíz se prepara de forma similar pero separada, considerando un espesor que acople con el generador.
- Dejar secar el tiempo suficiente y después lijar hasta los bordes de los perfiles (secciones) que son de metal. Este modelo debe ser usado para un molde de aluminio o un molde en fibra de vidrio que debe conformarse en dos partes, una superior y otra inferior (ver figura 3.27).
- Si el material del molde a fabricarse es aluminio, entonces debe tenerse en cuenta la contracción de este material, por lo que el modelo deberá hacerse de mayor tamaño.

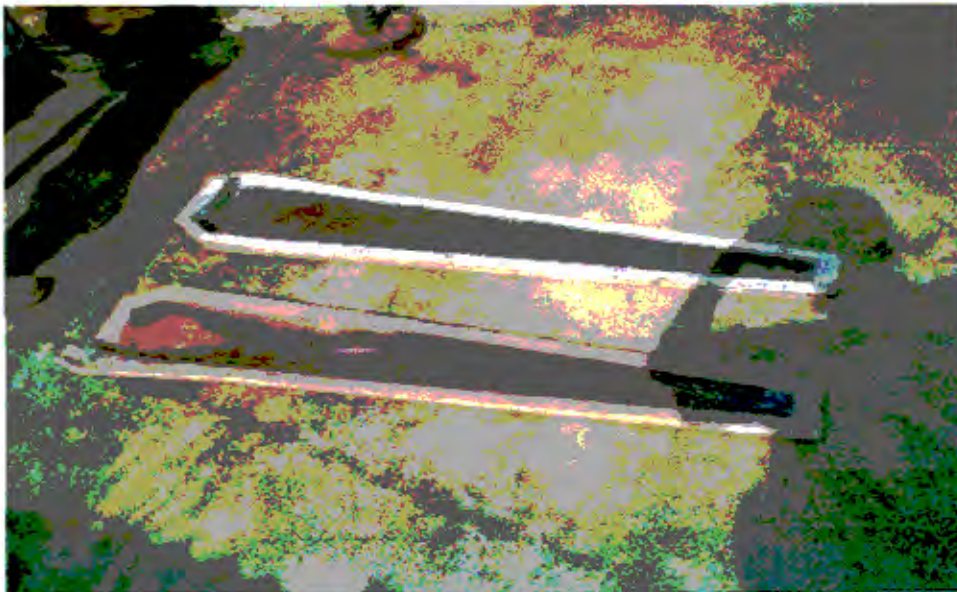
**Figura 3.25: Muestra de dos secciones**



**Figura 3.26: Muestra de la pala en tres dimensiones**



**Figura 3.27: Muestra los moldes de madera de los intrados y extrados**



### 3.9 COSTOS DEL MATERIAL PARA LA FABRICACIÓN DEL AEROGENERADOR

El costo de materiales para la construcción de un equipo es de aproximadamente US\$ 570 dólares, si la construcción fuera en mayor volumen, el costo unitario debería bajar. Si comparamos este costo con un arreglo fotovoltaico de 500 Wp, se requerirían cinco paneles de 100 Wp por un costo UUS\$ 3 000, por lo que resulta más atractivo el costo de potencia con el aerogenerador. La siguiente tabla presenta la lista de materiales requeridos y los costos.

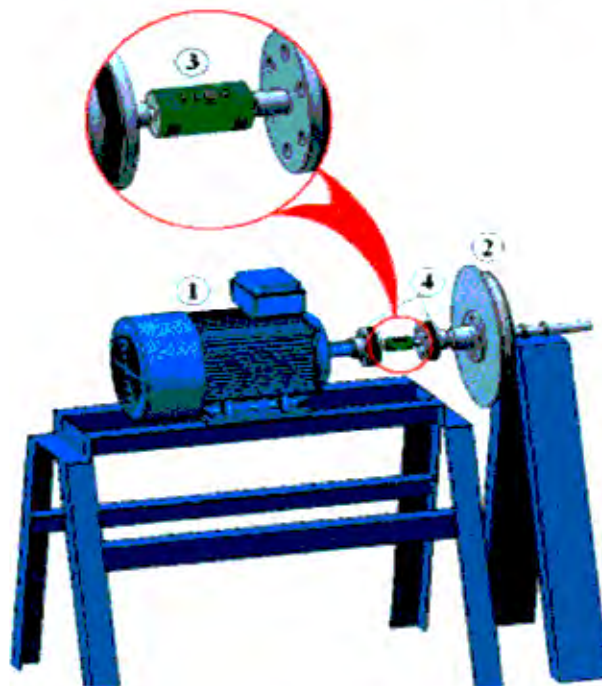
Tabla 3.4: Lista de materiales y costo

MATERIAL	CANT.	UNIDAD	C. UNIT. \$/.	SUB TOTAL \$/.
Alambre de cobre nº 18 para las bobinas	5.35	Kg	35.40	189.39
Plancha de 1/4"	0.33	plancha/equip o	380.00	126.54
Eje para el rotor	1.00	UND.	70.00	70.00
Plancha de 2 mm	1.20	Kg	2.76	3.31
Chumaceras	2.00	UND.	60.00	120.00
Pernos para alabes	9.00	UND.	1.50	13.50
Pernos para chumaceras grado 5	8.00	UND.	2.00	16.00
Fibra de vidrio 17%	1.70	Kg	17.00	28.90
Resina poliéster 83%	17.00	Kg	9.00	153.00
Tubo de 3/4"x2mm- para veleta	0.50	mt	47.00	23.50
Platina de 1 1/2"x1/8"	2.322	mt	4.20	9.75
Plancha negra 1/20" - veleta	0.33	mt	130.00	42.90
Perno hexagonal de 1/2"x6"	1	UND.	3.10	3.10
Abrazadera	1	UND.	7.00	7.00
Cinta aislante	1	UND.	2.50	2.50
Arandela de presión y plana	13	UND.	0.40	5.20
Grasa	1	UND.	3.00	3.00
Pernos para la cola-veleta	12	UND.	0.80	9.60
Pintura y tiner	1	UND.	60.00	60.00
Demoldante de fibra	1	UND.	10.00	10.00
200 mm de tubo cedula 80 de 3 1/2"x5mm	0.2	m/1m	170.00	34.00
Costo de imanes	32	UND.	13.50	432.00
Mano de obra	3	DÍAS	100.00	300.00
<b>COSTO TOTAL US\$</b>				<b>573.51</b>

## CAPÍTULO 4: ANÁLISIS DE RESULTADOS

### 4.1 COMPONENTES EMPLEADOS EN BANCO DE PRUEBAS PARA EL ENSAYO DEL GENERADOR ELÉCTRICO

Figura 4.1: Esquema general de banco de pruebas



#### Motor eléctrico trifásico

Motor de inducción con rotor Jaula de ardilla

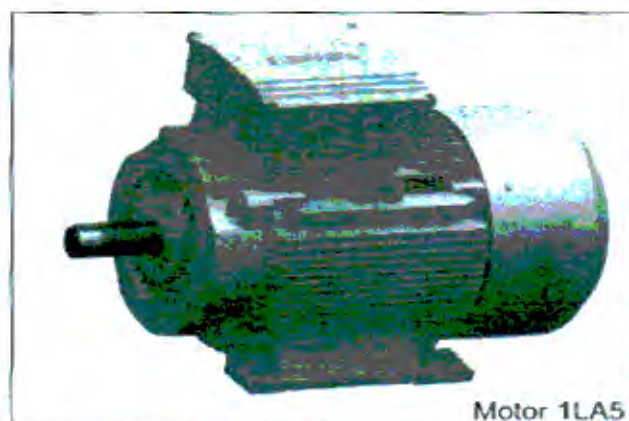
Marca SIEMANS

Voltaje nominal 220V

Corriente Nominal 9<sup>a</sup>

RPM nominal 1800 rpm

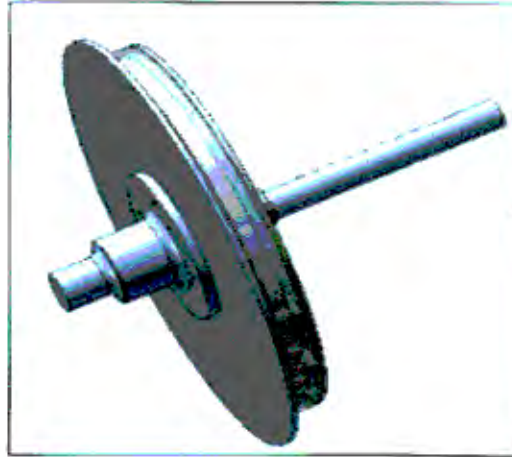
Figura 4.2: Motor eléctrico empleado en las pruebas del generador de imanes permanentes



Motor 1LA5

## Generador eléctrico a ser probado

Figura 4.3: Generador eléctrico de imanes permanentes



## Torquímetro transductor rotatorio

Figura 4.4: Torquímetro empleado en las pruebas al generador



Modelo: 8646 - 2075

Marca: Búster

Torque nominal:  $\pm 75$  Nm

Rango de temperatura:  $+0^{\circ}\text{C}$ ...  $+70^{\circ}\text{C}$

Velocidad máxima 5000 rpm

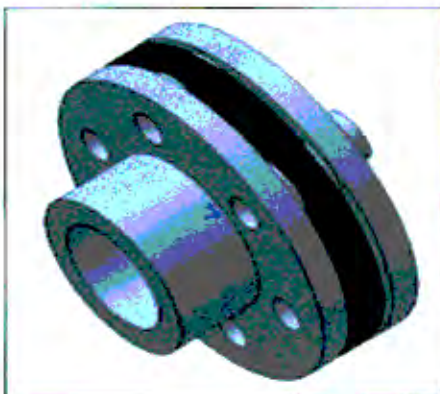
Para este caso se realizó la medida del torque con un multímetro conectado al torquímetro

### Juntas de rotación

Hechas para soportar torques altos de 75 Nm.

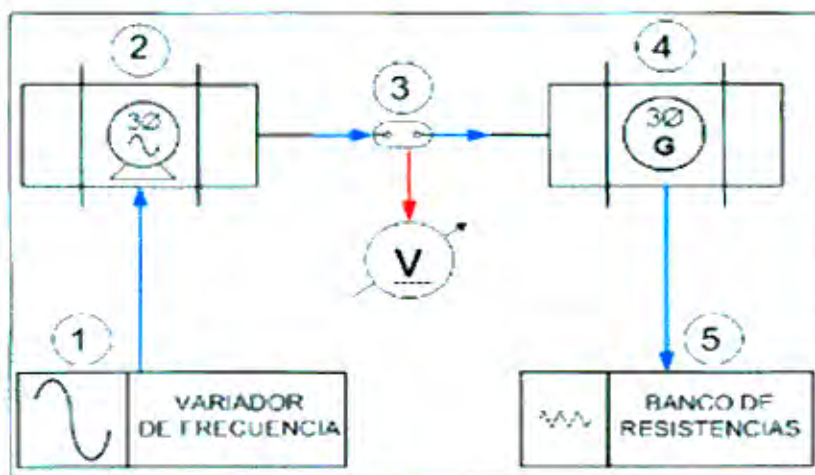
Con acople al torquímetro por un lado y acople al motor por el otro.

Figura 4.5: Juntas para acoplar generado y motor con el torquímetro



### Esquema general de conexiones

Figura 4.6: Diagrama del banco de pruebas empleado

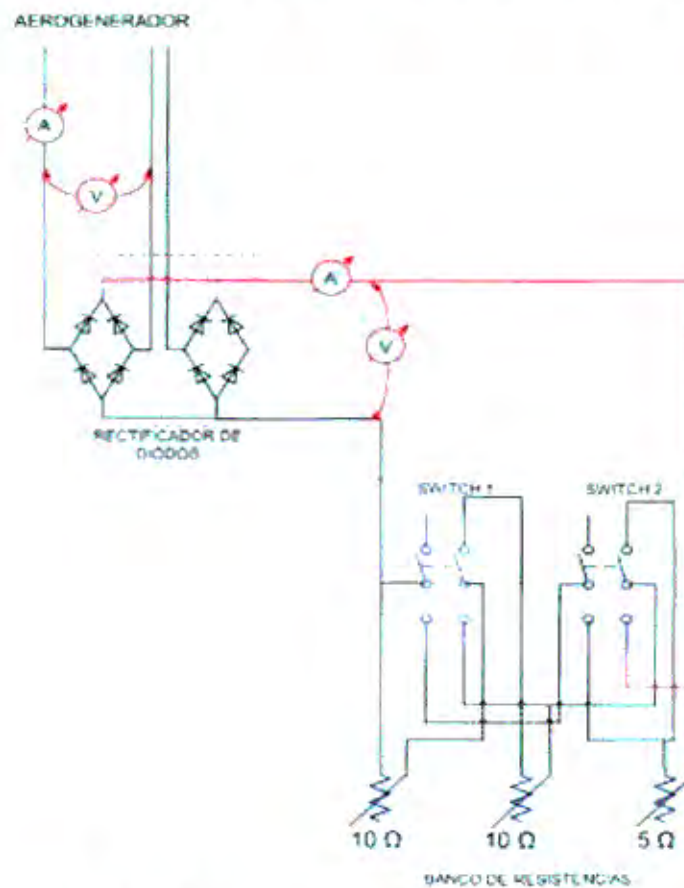


1. Variador de frecuencia  
Marca: SIEMES  
Modelo: SINAMICS G110  
Entrada monofásica de 220V  
Salida Trifásica con un máximo de 3HP
2. Motor eléctrico trifásico
3. Torquímetro transductor rotatorio, conectado a un voltímetro para su medición
4. Generador eléctrico trifásico, objeto de prueba
5. Banco de resistencias, para variar la carga sobre el generador



## Esquema del banco de resistencias

Figura 4.7: Diagrama donde se muestra la ubicación de los instrumentos



El banco de resistencias de un rectificador trifásico con dos diodos puente de 50A, y de un banco de resistencias con dos resistencias de  $10\ \Omega$  y una de  $5\ \Omega$ , los cuales pueden estar en serie o en paralelo gracias a un par de *switch*.

### 4.1.1 RESULTADOS DE LAS PRUEBAS DEL GENERADOR ELÉCTRICO

#### a. Prueba en vacío

En la prueba en vacío se obtuvieron los siguientes datos:

**Tabla 4.1: Datos de la prueba de vacío del generador eléctrico**

	RPM	Vac	Torque	Po
	(rpm)	(V)	(N.m)	(W)
1	118	11,73	2,4044	29,711
2	145	14,58	2,3492	35,672
3	146	14,59	2,4084	36,822
4	146	14,65	2,5621	39,172
5	148	14,77	2,4044	37,265
6	150	14,99	2,5227	39,626
7	214	21,54	2,3453	52,558
8	252	25,26	2,0615	54,402
9	269	27,02	2,5621	72,173
10	329	33,1	2,6173	90,172
11	329	32,93	2,6212	90,308
12	333	33,51	2,5345	88,382
13	423	42,48	2,7395	121,348
14	540	54,37	2,9562	167,172
15	65	8,2	1,7343	11,805
16	165	21,5	2,1679	37,459
17	237	31,8	2,7592	68,479
18	256	34,5	2,8774	77,139
19	277	37	2,7592	80,036
20	298	40	2,0891	65,193
21	304	41,1	2,8774	91,602
22	385	52,2	2,3650	95,350
23	390	53	2,2862	93,369
24	392	53,1	2,2467	92,230
25	475	64,7	2,0102	99,994
26	480	65,1	1,8920	95,102
27	520	70,9	1,8920	103,028
28	529	71,8	1,8920	104,811

Donde:

RPM: es la velocidad de giro del rotor.

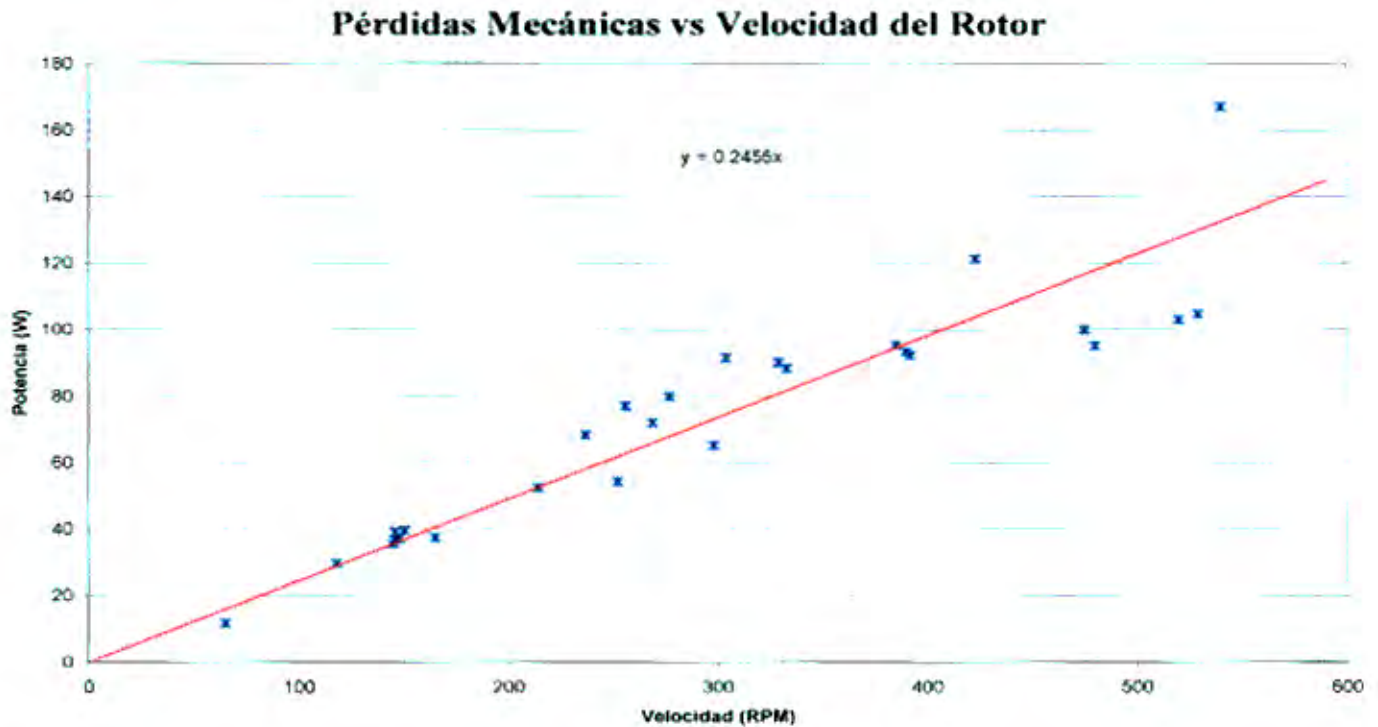
Vac: es el voltaje generado por el generador.

Torque: es el torque producido por el generador.

Po: Potencia absorbida por el generador.

$$P_o = RPM * Torque * \frac{2\pi}{60}$$

Figura 4.8: Curva de pérdidas mecánicas del generador eléctrico



En esta curva podemos observar que las pérdidas mecánicas por fricción, calentamiento y otros, son directamente proporcionales a la velocidad de rotación del generador. El resultado obtenido tiene en cuenta que el generador no varía de dimensiones durante toda la prueba, y que el generador se mantendrá invariante durante todo su tiempo de vida.

Por lo que tendremos lo siguiente:

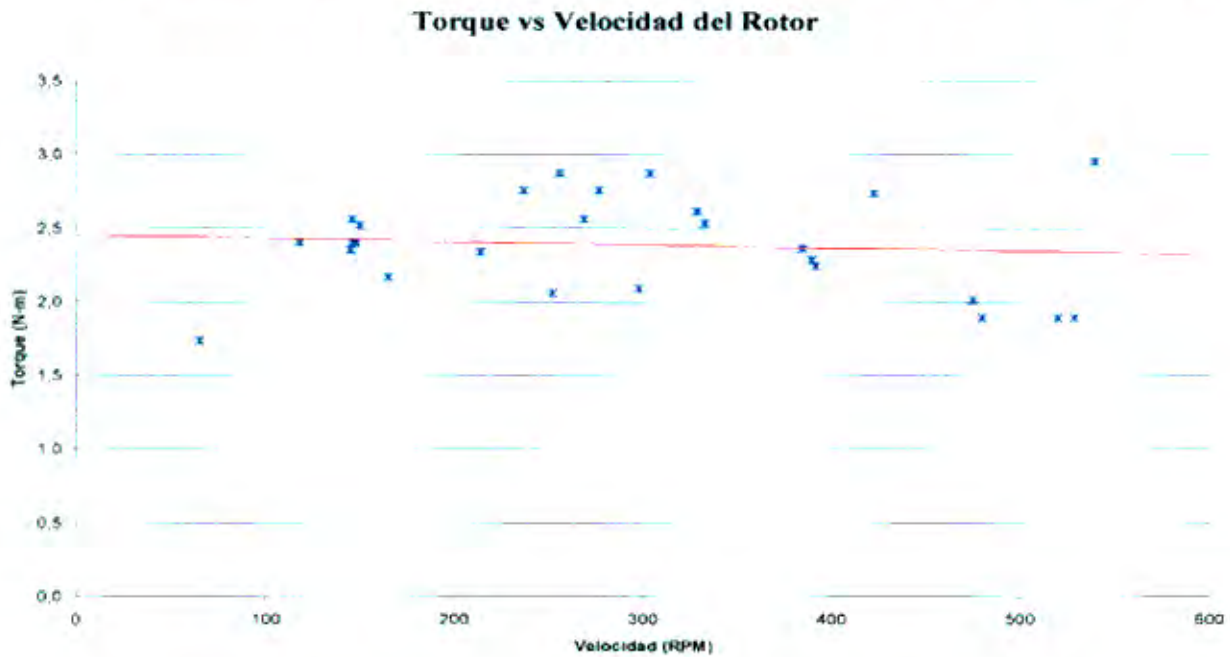
$$P_m = 0.2455 \cdot N$$

Donde:

$P_m$ : Pérdidas mecánicas (W)

$N$ : velocidad de rotación del generador (RPM)

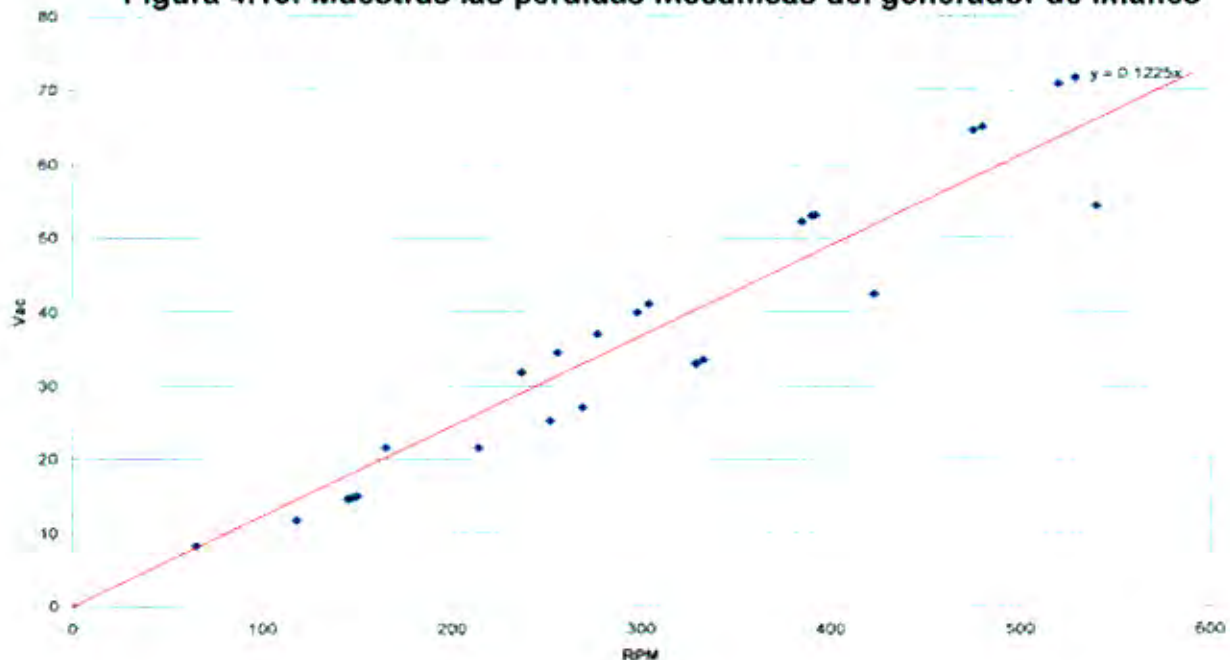
Figura 4.9: Torque debido a las pérdidas en función de la velocidad de giro



En la gráfica anterior se puede observar que el torque que absorbe el generador como pérdidas mecánicas es casi constante, si variamos las RPM del generador, cuyo valor es de 2.4 N-m aproximadamente.

La figura 4.10 nos demuestra la linealidad de las pérdidas mecánicas con respecto a la velocidad de giro del generador.

Figura 4.10: Muestras las pérdidas mecánicas del generador de imanes



**b. Prueba con carga**

En esta prueba se tomaron datos de la siguiente manera:

**Tabla 4.2: Resultados del ensayo del generador con carga**

	RPM	Iac (rms)	Vac (rms)	Torque
	(rpm)	(A)	(V)	(N.m)
1	72	0.59	6.14	5.08
2	99	1.28	9.15	5.91
3	101	1.27	9.18	5.72
4	172	2.59	16.14	7.21
5	173	2.70	16.19	7.29
6	173	2.68	16.14	7.37
7	195	5.99	17.14	12.53
8	195	5.92	17.14	12.53
9	218	9.35	18.09	18.13
10	221	9.40	18.34	18.21
11	222	9.45	18.51	18.29
12	223	9.48	18.55	18.37
13	223	9.49	18.52	18.37
14	234	9.84	19.52	18.88
15	234	9.79	19.41	18.88
16	242	7.00	21.49	14.03
17	242	10.03	20.20	19.20
18	243	7.01	21.62	14.11
19	243	10.05	20.28	19.20
20	253	10.33	21.21	19.67
21	253	10.31	21.12	19.71
22	255	9.27	22.83	14.51
23	256	9.28	22.79	14.54
24	260	7.84	24.64	8.79
25	260	10.53	21.82	20.02
26	260	10.53	21.79	19.98
27	272	7.89	25.69	8.99
28	272	8.67	24.83	15.25
29	279	7.75	24.93	15.21
30	296	8.04	26.60	15.69
31	296	8.03	26.50	15.77

De esta tabla podemos obtener la comprobación con las ecuaciones descritas en la sección anterior. Ello nos servirá para realizar la siguiente comparación del voltaje real obtenido en las pruebas y el voltaje obtenido mediante el procedimiento matemático explicado anteriormente, para los diversos casos en los cuales se realizó la prueba con carga.

Tabla 4.3: Comparación de datos teóricos y reales con respecto a los voltajes de salida

	RPM	Iac (rms)	Vac (rms)	Vac(rms)	$\Delta V$
	(rpm)	(A)	(V)	Calculado	(V)
1	72	0.59	6.14	8.268	2.13
2	99	1.28	9.15	10.933	1.78
3	101	1.27	9.18	11.87	2.69
4	172	2.59	16.14	18.653	2.51
5	173	2.70	16.19	18.673	2.48
6	173	2.68	16.14	18.692	2.55
7	195	5.99	17.14	18.307	1.17
8	195	5.92	17.14	18.372	1.23
9	218	9.35	18.09	17.997	-0.09
10	221	9.40	18.34	18.318	-0.02
11	222	9.45	18.51	18.394	-0.12
12	223	9.48	18.55	18.489	-0.06
13	223	9.49	18.52	18.479	-0.04
14	234	9.84	19.52	19.501	-0.02
15	234	9.79	19.41	19.547	0.14
16	242	7.00	21.49	23.123	1.63
17	242	10.03	20.20	20.303	0.10
18	243	7.01	21.62	23.236	1.62
19	243	10.05	20.28	20.407	0.13
20	253	10.33	21.21	21.371	0.16
21	253	10.31	21.12	21.39	0.27
22	255	9.27	22.83	22.602	-0.23
23	256	9.28	22.79	22.716	-0.07
24	260	7.84	24.64	24.545	-0.09
25	260	10.53	21.82	22.042	0.22
26	260	10.53	21.79	22.042	0.25
27	272	7.89	25.69	25.968	0.28
28	272	8.67	24.83	25.242	0.41
29	279	7.75	24.93	26.956	2.03
30	296	8.04	26.60	28.767	2.17
31	296	8.03	26.50	28.777	2.28

Se puede observar que el error cometido en el cálculo teórico con respecto a las pruebas es relativamente bajo, lo que indica que el modelo tomado para esta experiencia es aceptable.

**Tabla 4.4: Tabla de resultados, se verifica la eficiencia del sistema**

	RPM	Iac (rms)	Vac (rms)	Torque	Pentrada	Psalida	Eficiencia
	(rpm)	(A)	(V)	(N-m)	(W)	(W)	(%)
1	72	0.59	6.14	5.08	38.34	6.27	16.36
2	99	1.28	9.15	5.91	61.30	20.29	33.09
3	101	1.27	9.18	5.72	60.45	20.19	33.40
4	172	2.59	16.14	7.21	129.92	72.40	55.73
5	173	2.70	16.19	7.29	132.11	75.71	57.31
6	173	2.68	16.14	7.37	133.54	74.92	56.11
7	195	5.99	17.14	12.53	255.96	177.83	69.47
8	195	5.92	17.14	12.53	255.96	175.75	68.66
9	218	9.35	18.09	18.13	413.93	292.96	70.78
10	221	9.40	18.34	18.21	421.45	298.60	70.85
11	222	9.45	18.51	18.29	425.19	302.97	71.26
12	223	9.48	18.55	18.37	428.94	304.59	71.01
13	223	9.49	18.52	18.37	428.94	304.42	70.97
14	234	9.84	19.52	18.88	462.66	332.69	71.91
15	234	9.79	19.41	18.88	462.66	329.13	71.14
16	242	7.00	21.49	14.03	355.61	260.55	73.27
17	242	10.03	20.20	19.20	486.47	350.92	72.14
18	243	7.01	21.62	14.11	359.09	262.50	73.10
19	243	10.05	20.28	19.20	488.48	353.02	72.27
20	253	10.33	21.21	19.67	521.11	379.49	72.82
21	253	10.31	21.12	19.71	522.16	377.15	72.23
22	255	9.27	22.83	18.45	492.60	366.56	74.41
23	256	9.28	22.79	18.49	495.59	366.31	73.91
24	260	7.84	24.64	16.67	453.97	334.59	73.70
25	260	10.53	21.82	20.02	545.19	397.96	73.00
26	260	10.53	21.79	19.98	544.11	397.42	73.04
27	272	7.89	25.69	16.87	480.53	351.08	73.06
28	272	8.67	24.83	19.20	546.77	372.87	68.19
29	279	7.75	24.93	15.21	444.53	334.65	75.28
30	296	8.04	26.60	15.69	486.28	370.42	76.18
31	296	8.03	26.50	15.77	488.72	368.57	75.42

Se puede observar que las eficiencias obtenidas experimentalmente son aproximadas a las eficiencias obtenidas teóricamente, el error ocurre debido a que el voltaje generado es un tanto irregular.

## 4.2 RESULTADOS DE LAS PRUEBAS DE CAMPO

### 4.2.1 RESULTADOS DE LA EVALUACIÓN DEL POTENCIAL EÓLICO DE LAS ZONAS DE INFLUENCIA

Para el trabajo de medición y registros de la velocidad del viento, al inicio de 2008 se instaló un anemómetro de registro continuo –que mide velocidad y dirección del viento cada dos segundos y registra cada diez minutos el promedio, y que es homologado y comercializado por NRGSYTEMS–, en la comunidad de Alto Perú, ubicada sobre los 3700 msnm. El equipo de medición del parámetro de viento se instaló inicialmente a una altura de 7 m (2008), en 2009 se mejoró la estructura de un poste de madera a una torre triangular de 10 m de altura sobre el suelo. En la costa, ITDG contaba con datos de un año, específicamente cerca de Huacho (a 123.5 km de la Panamericana Norte). Para estimar y calcular la energía disponible se ha extrapolado la velocidad medida a la altura de instalaciones de las máquinas (15 m). En la figura 4.11 se muestra la comparación a ambas alturas, observando un mejor comportamiento del recurso eólico a mayor altura, asimismo, las diferentes gráficas muestran el comportamiento del viento en la sierra para diferentes meses del año 2008, observando una alta variabilidad.

Figura 4.11: Velocidad promedio durante las 24 horas del día del mes de enero de 2008 para alturas de 7 y 15 m (15 m obtenida por fórmula)

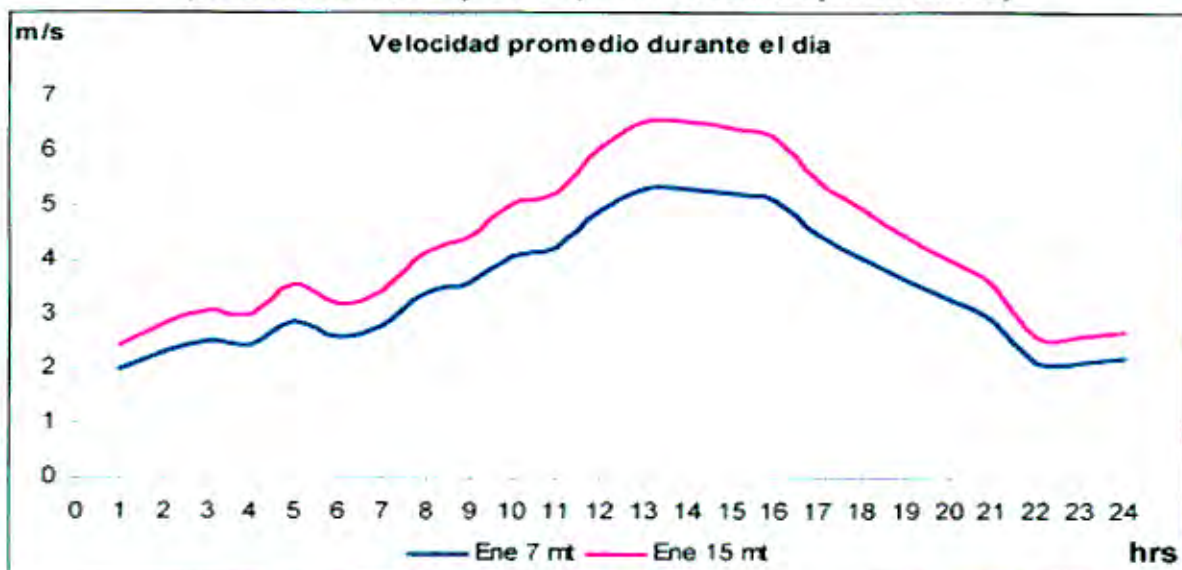




Figura 4.12: Velocidad promedio durante las 24 horas del día de los meses de enero, febrero y marzo de 2008 para una altura de 7 m

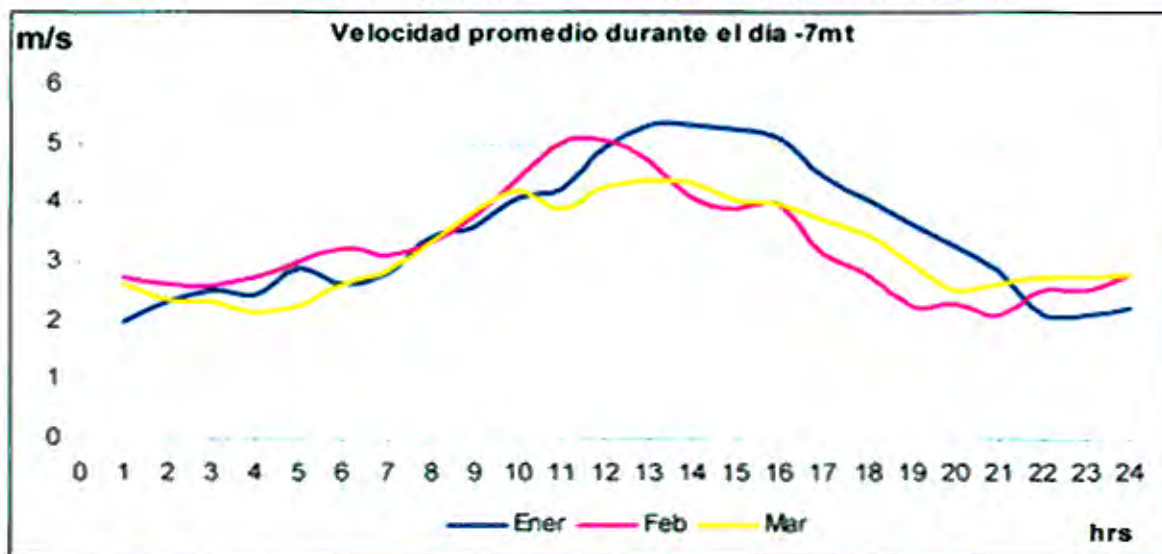
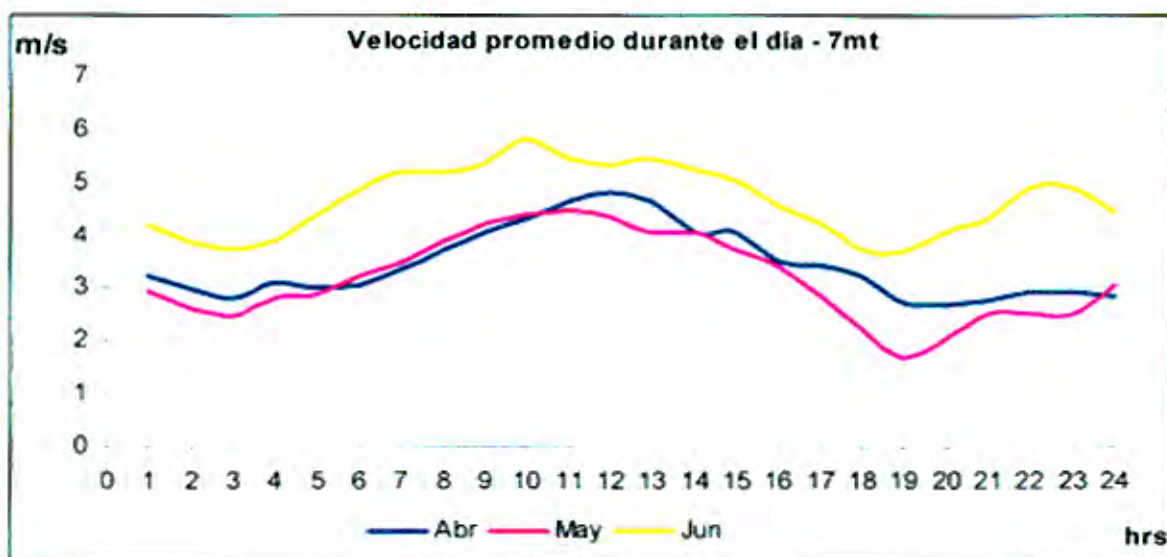
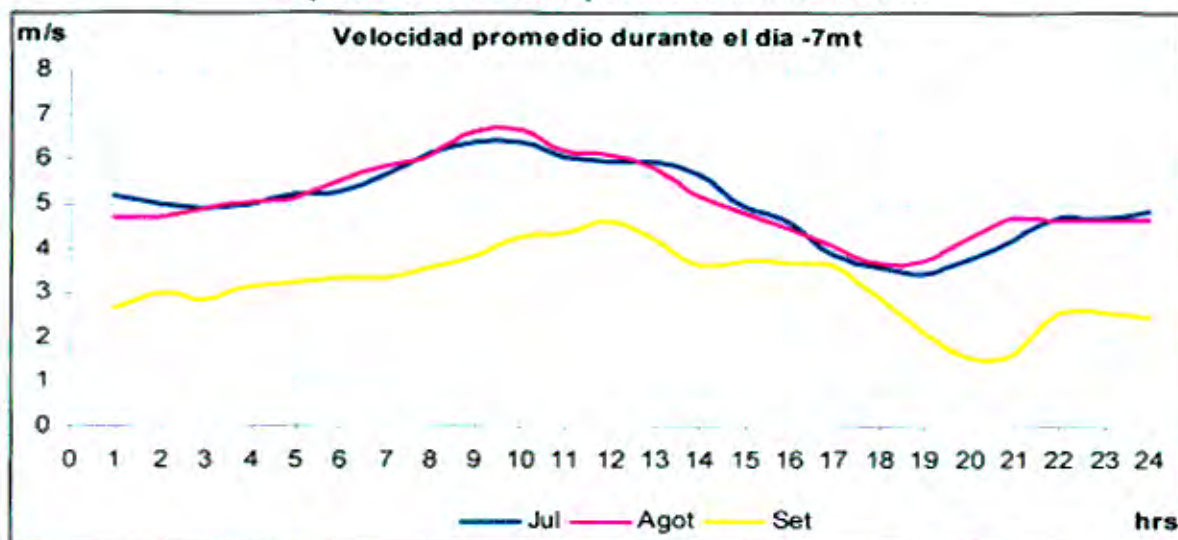


Figura 4.13: Velocidad promedio durante las 24 del día de los meses de abril, mayo y junio de 2008 para una altura de 7 m



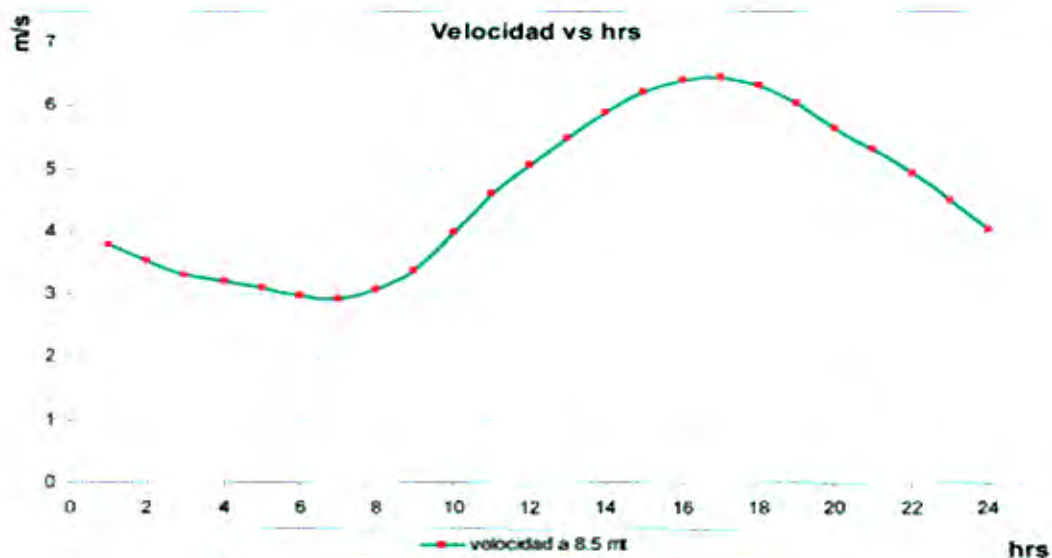
**Figura 4.14: Velocidad promedio durante las 24 del día de los meses de julio, agosto y septiembre de 2008 para una altura de 7 m**



En la figura 4.14, se puede ver que el comportamiento del viento en el mes de septiembre no es muy bueno. Unas de las razones es la falta de batería, el *datalogger* registró pocos días (10), presentándose poco viento en estos días, durante 2009 se continuó midiendo y se tendrán muchos más datos para contrastar los registrados en el 2008.

La siguiente curva muestra la característica del recurso eólico en la costa. Como puede observarse, el viento es más estable.

**Figura 4.15: Velocidad promedio durante las 24 del día durante 8 meses, a una altura de 8 m sobre el suelo (Panamericana Norte, kilómetro 123.5)**



Fuente: Soluciones Prácticas-ITDG.

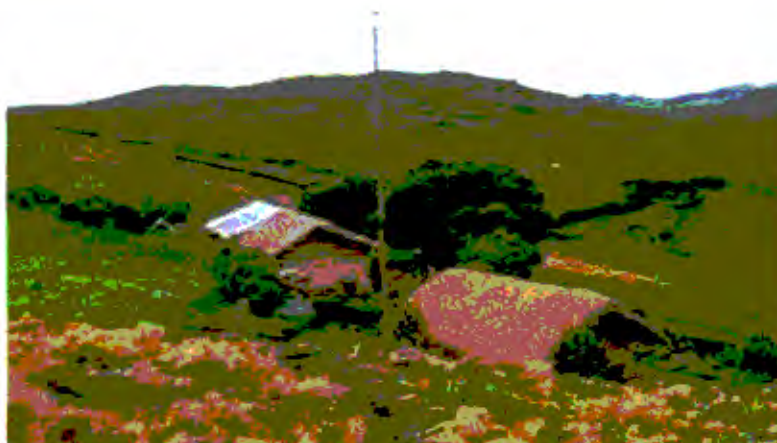
### a. Características de la dirección del viento en la sierra

La dirección del viento ha sido otro parámetro medido y registrado, en la figura 4.16 se muestra la rosa de viento con las direcciones predominantes en el área de influencia, información muy valiosa para tener en cuenta la distancia y ubicación de los aerogeneradores en terreno y así evitar turbulencias entre una máquina y otra, permitiendo optimizar el terreno cuando se instala un bosque eólico.

**Figura 4.16: Comportamiento de la dirección del viento en la zona de influencia, comunidad de Alto Perú, medido en 2008**



**Figura 4.17: Anemómetro instalado a 7 m sobre el suelo**



**Figura 4.18: Anemómetro instalado a 10 m sobre el suelo**



Con los datos de viento de cinco meses del año 2009 y diez meses del año 2008, se ha trabajado para conocer el número de horas al mes que se cuenta con cierta velocidad de viento (ver tablas 4.5 y 4.6), conociendo la potencia y la cantidad de horas a una cierta velocidad de viento; hallando potencia y tiempo obtenemos la cantidad de energía que se puede obtener con la máquina en estudio.

**Tabla 4.5: Muestra cuantificación y disponibilidad del recurso eólico en la comunidad de Alto Perú de marzo a julio de 2009**

V(m/s)	Mar-09		Abr-09		May-09		Jun-09		Jul-09	
	Hrs	Frec.	Hrs	Frec.	Hrs	Frec.	Hrs	Frec.	Hrs	Frec.
0	79	708	67	720	14	82	9	301	5	733
1	87	629	89	653	11	68	20	292	12	728
2	82	542	91	564	12	57	17	272	16	716
3	88	460	78	473	16	45	21	255	27	700
4	109	372	96	394	17	29	28	234	59	673
5	107	264	73	298	7	11	32	206	87	614
6	88	156	52	226	2	4	47	174	84	527
7	44	68	37	174	2	2	38	127	77	444
8	19	24	33	137	0	0	21	89	60	367
9	5	5	32	104	0	0	20	68	55	307
10	0	0	30	71	0	0	16	48	43	252
11	0	0	21	41	0	0	15	33	36	209
12	0	0	12	20	0	0	14	18	27	173
13	0	0	6	8	0	0	4	4	29	146
14	0	0	2	3	0	0	0	0	24	118
15	0	0	1	1	0	0	0	0	20	94
16	0	0	0	0	0	0	0	0	27	74
17	0	0	0	0	0	0	0	0	26	47

18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	14	21
19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6	7
20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1

**Tabla 4.6: Muestra cuantificación y disponibilidad del recurso eólico en la comunidad de Alto Perú de enero a octubre de 2008**

V (m/s)	Ene-08		Feb-08		Mar-08		Abr-08		May-08		Jun-08		Jul-08		Ago-08		Sep-08		Oct-08	
	Hrs	Frec.	Hrs	Frec.	Hrs	Frec.	Hrs	Frec.	Hrs	Frec.	Hrs	Frec.	Hrs	Frec.	Hrs	Frec.	Hrs	Frec.	Hrs	Frec.
0	32	324	95	896	64	744	77	720	85	744	45	720	29	744	44	744	29	720	60	455
1	35	292	100	602	85	680	91	643	87	659	49	676	30	716	42	700	38	691	53	396
2	39	258	94	502	97	595	104	552	99	572	56	626	45	685	51	658	53	654	57	343
3	42	219	90	408	108	498	95	448	125	473	76	571	74	640	77	607	72	601	65	286
4	50	177	71	318	128	390	93	353	118	348	87	494	82	566	98	590	90	529	62	221
5	40	127	66	248	113	262	94	260	82	231	91	408	105	484	121	432	98	438	53	159
6	34	87	60	182	83	149	76	166	54	148	105	317	136	379	127	311	100	341	51	106
7	25	53	46	122	43	66	36	90	41	95	66	212	103	243	97	164	75	240	22	56
8	15	28	30	76	16	23	12	55	23	54	41	126	56	140	45	87	57	165	12	33
9	9	13	23	46	4	7	6	43	12	31	32	85	32	85	24	42	31	108	10	21
10	2	4	10	23	1	3	4	37	5	20	19	54	16	53	9	18	19	77	8	11
11	1	2	8	13	2	2	6	34	5	15	9	35	12	36	4	9	21	57	2	4
12	0	0	4	5	1	1	4	28	2	9	9	25	8	24	1	4	14	37	1	1
13	0	0	1	1	0	0	4	24	5	8	9	17	7	17	2	3	13	22	0	0
14	0	0	0	0	0	0	6	20	3	3	7	8	7	10	1	1	6	9	0	0
15	0	0	0	0	0	0	8	15	0	0	1	1	3	3	1	1	2	4	0	0
16	0	0	0	0	0	0	7	7	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	0	0
17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0
18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

#### 4.2.2 RESULTADOS DE LA EVALUACIÓN DE CAMPO DEL SISTEMA DE AEROGENERACIÓN

La evaluación en campo del sistema de aerogeneración se realizó inicialmente a la altura del kilómetro 123.5 de la carretera Panamericana Norte; para tal propósito se instaló el sistema completo en una vivienda rural aislada sin energía eléctrica.

Para las pruebas se preparó un panel de focos y dos baterías, y se dotó de la instrumentación apropiada para medir los parámetros de salida: potencia, voltaje, corriente, frecuencia. La velocidad de viento fue medida a la altura del eje del rotor con un anemómetro marca NRG.

Las variables de entrada medidas, son:

- (01) Velocidad de viento m/s
- (02) Frecuencia del rotor en Hz
- (03) Voltaje RMS
- (04) Voltaje en DC

- (05) Corriente AC
- (06) Corriente DC

**a. Pruebas en vacío**

Con la finalidad de conocer la variación del voltaje y rotación con respecto a la velocidad del viento, se ha realizado la prueba de vacío. La velocidad de rotación del aerogenerador se calcula indirectamente ya que se mide la frecuencia en Hz.

**Tabla 4.7: Resultados medidos en campo operando la máquina en vacío**

	Velocidad Viento (m/s)	Frecuencia Rotor (Hz)	Velocidad Rotor (RPM)	Voltaje AC (rms) (V)	Voltaje DC (V)
1	3.1	14.6	109.50	13.50	17.05
2	3.5	17.3	129.75	11.40	21.03
3	4.2	19.6	147.00	13.00	23.07
4	3.5	22.5	168.75	14.00	25.07
5	4.2	25.5	191.25	18.90	27.17
6	4.2	27.2	204.00	19.70	27.02
7	3.8	27.3	204.75	20.80	26.42
8	3.1	23.9	179.25	20.19	23.92
9	4.2	20.3	152.25	19.67	20.23
10	2.3	17.9	134.25	18.11	18.64
11	1.2	16.9	126.75	14.40	17.63
12	2.3	22.8	171.00	13.09	16.44
13	3.8	23.2	174.00	12.40	23.44
14	3.5	25.3	189.75	17.80	23.52
15	4.2	25.6	192.00	17.82	26.29
16	3.5	28.3	212.25	19.96	27.91
17	4.6	34.3	257.25	18.09	28.94
18	5.3	35.9	269.25	21.90	35.58
19	5.4	35.7	267.75	27.00	35.45
20	4.6	28.1	210.75	26.80	34.23
21	3.8	30.8	231.00	26.40	25.17
22	4.2	31.0	232.50	19.20	31.15
23	4.2	24.6	184.50	23.30	30.90
24	5.0	29.0	217.50	23.40	27.35
25	5.0	30.8	231.00	20.80	29.92
26	4.6	30.1	225.75	22.60	31.23
27	4.2	32.4	243.00	23.50	31.01
28	5.0	29.0	217.50	23.50	32.04
29	4.2	26.0	195.00	24.10	27.63
30	4.6	31.9	239.25	21.10	25.86
31	5.0	33.7	252.75	19.57	33.59
32	5.4	35.7	267.75	25.20	35.81
33	5.0	35.4	265.50	26.90	36.76
34	5.0	31.3	234.75	27.70	34.46
35	4.6	33.3	249.75	26.04	31.59

36	5.4	32.4	243.00	23.70	33.49
37	5.0	36.5	273.75	25.30	33.42
38	5.8	39.0	292.50	24.80	38.94
39	6.1	40.8	306.00	28.90	40.70
40	5.8	38.9	291.75	30.60	40.80
41	5.8	36.3	272.25	30.67	37.40
42	5.0	29.2	219.00	28.23	36.00
43	4.2	30.3	227.25	27.02	27.30
44	5.0	33.3	249.75	21.18	31.90
45	6.1	40.1	300.75	24.27	34.29
46	6.5	43.0	322.50	25.86	40.10
47	5.8	45.0	337.50	30.50	45.70
48	6.1	43.6	327.00	34.00	44.70
49	5.8	42.3	317.25	33.90	42.30
50	6.1	44.1	330.75	32.00	42.20
51	6.5	44.4	333.00	32.50	44.60
52	6.1	44.5	333.75	33.60	44.60
53	6.5	40.2	301.50	33.40	44.20
54	5.8	37.7	282.75	33.10	44.20
55	5.4	40.2	301.50	29.00	39.00
56	6.9	44.7	335.25	30.20	39.20
57	7.3	48.0	360.00	34.80	44.90
58	6.9	49.5	371.25	36.70	47.30
59	7.7	45.2	339.00	37.00	49.30
60	6.1	46.9	351.75	37.50	50.20
61	6.5	48.2	361.50	34.05	45.50
62	6.9	40.7	305.25	35.90	46.30
63	6.1	40.4	303.00	35.50	48.30
64	6.9	47.0	352.50	31.09	41.30
65	6.1	48.3	362.25	35.40	46.70
66	7.3	48.4	363.00	35.90	47.90
67	6.9	47.1	353.25	36.65	48.80
68	6.9	40.8	306.00	37.40	49.00
69	5.8	39.5	296.25	36.00	48.30
70	6.1	40.5	303.75	30.50	40.40
71	7.7	46.9	351.75	30.80	40.30
72	6.5	47.3	354.75	33.80	44.40
73	6.5	44.9	336.75	36.17	47.90
74	6.5	45.0	337.50	36.68	48.70

Estos resultados permiten conocer el comportamiento de la máquina en vacío y la variación del voltaje, estos se muestran en los dos gráficos de las figuras siguientes.

Figura 4.19: Voltaje en función de la velocidad de giro del aerogenerador

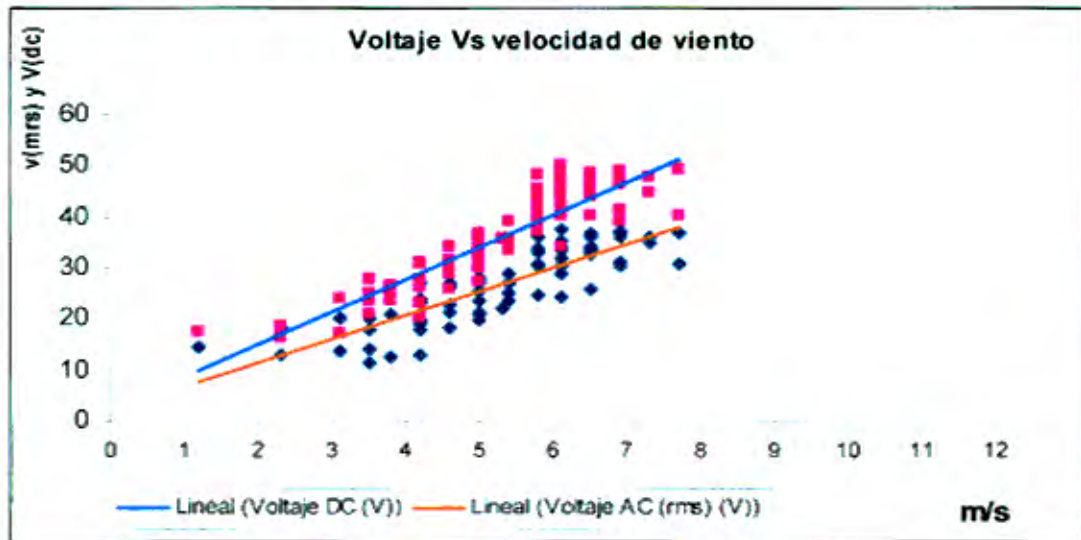


Figura 4.20a: Voltaje con respecto a la velocidad de giro del rotor

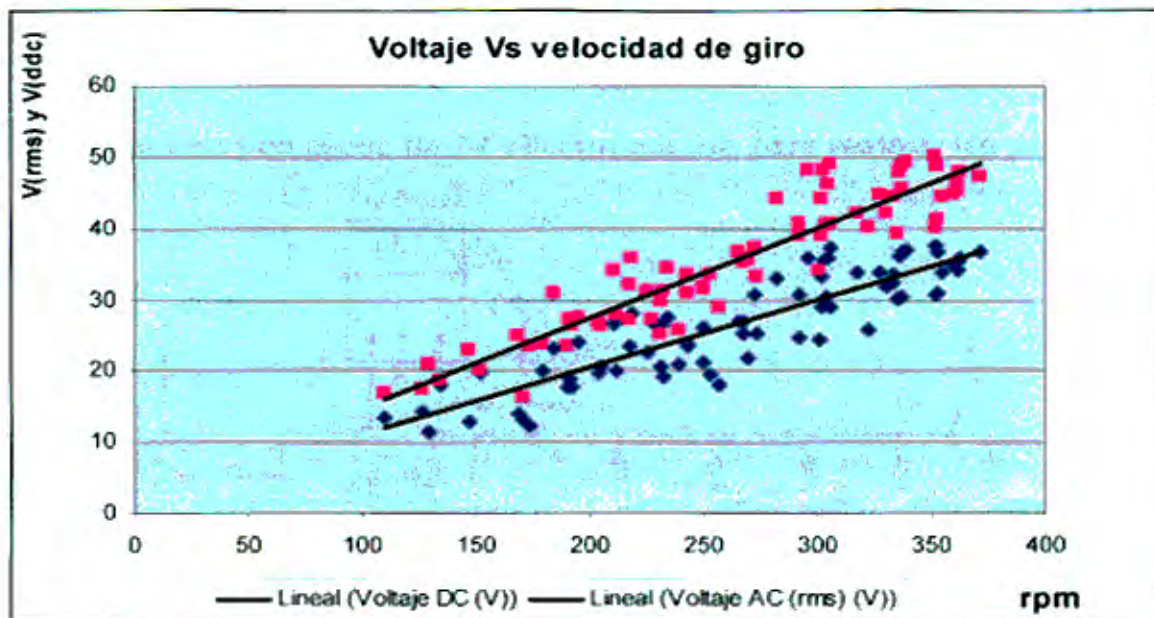
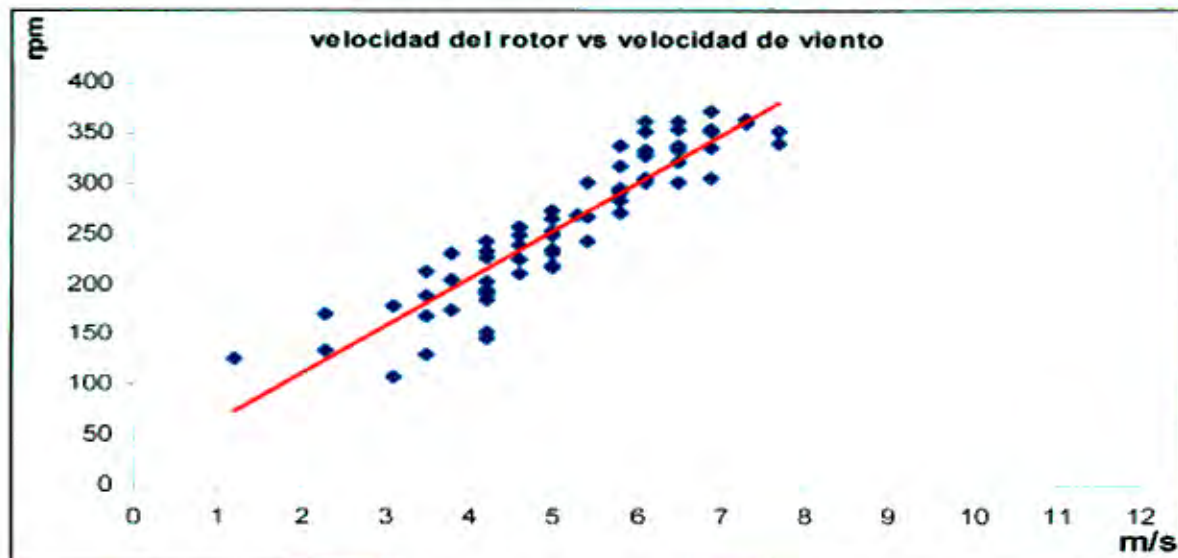


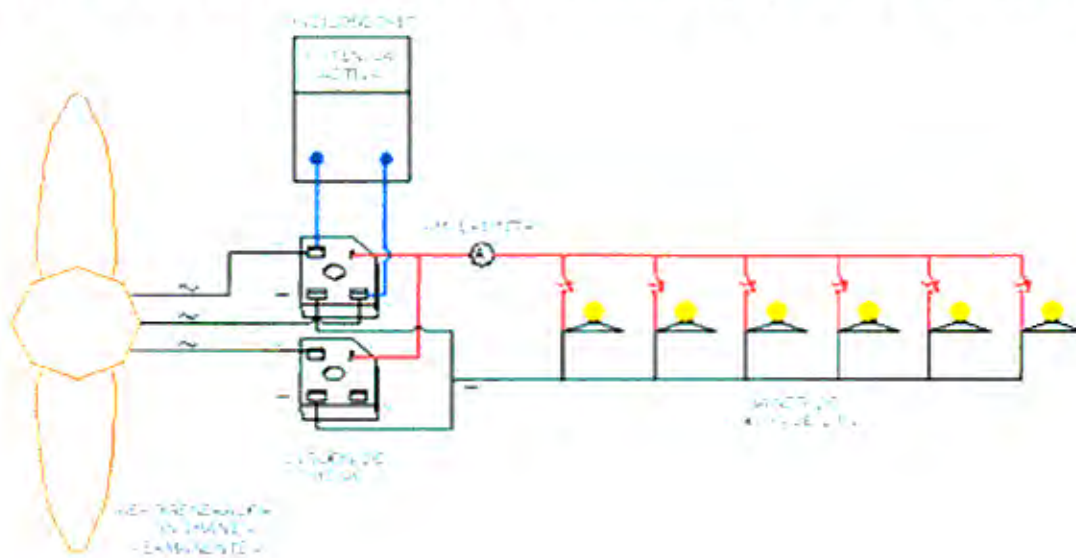


Figura 4.20b: Velocidad de giro en función de la velocidad de viento



Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 4.8 y en las figuras, 4.22, 4.23 y 4.24, donde puede observarse el comportamiento del aerogenerador en función de la velocidad de giro del rotor y la potencia obtenida según la velocidad del viento (curva característica de potencia). La figura 4.25 muestra la representación del sistema empleado para caracterizar el aerogenerador, en otro punto se tenía el anemómetro NRG registrando los datos de velocidad de viento.

Figura 4.21: Tablero con focos de 24 VDC preparado para realizar las pruebas de campo



**Tabla 4.8: Resultados del aerogenerador instalado en campo operando con carga**

	m/s	Fre Rotor Hz	Vel. Rotor RPM	Vol. AC (V)	Corr. AC (A)	Pot. Activa (W)	Pot. React. (VAR)	Pot. Aparente (VA)	(V) DC	(A)DC
1	10.7	46.5	348.75	24.12	21.29	814	50	815.53	28.0	25.30
2	9.6	49.8	373.50	23.90	20.49	806	70	809.03	26.7	22.75
3	9.6	41.4	310.50	22.54	16.43	552	27	552.66	26.4	20.33
4	8.4	41.9	314.25	21.92	13.48	471	23	471.56	25.8	15.68
5	8.8	45.5	341.25	23.66	21.35	753	46	754.40	27.2	25.92
6	9.2	41.8	313.50	22.22	15.24	565	14	565.17	26.1	18.28
7	10.3	49.0	367.50	23.38	21.34	908	56	909.73	27.1	21.78
8	9.6	44.7	335.25	23.14	19.74	731	45	732.38	26.8	23.56
9	6.9	34.1	255.75	20.67	7.13	281	3	281.02	25.0	8.16
10	10.0	47.0	352.50	23.52	21.40	792	49	793.51	27.1	25.48
11	8.8	41.6	312.00	22.68	17.39	601	30	601.75	26.5	20.83
12	7.7	31.2	234.00	20.95	8.34	214	5	214.06	25.3	9.88
13	9.2	40.7	305.25	22.47	16.17	529	13	529.16	26.3	19.15
14	10.0	44.3	332.25	23.18	19.81	709	35	709.86	27.0	29.52
15	6.5	37.0	277.50	21.45	11.13	408	5	408.03	25.2	9.40
16	7.3	40.5	303.75	22.30	15.24	467	23	467.57	26.1	18.20
17	10.0	46.5	348.75	23.24	20.01	771	47	772.43	26.7	23.98
18	6.5	41.2	309.00	22.40	15.77	557	14	557.18	26.2	18.45
19	7.3	43.4	325.50	22.93	18.52	604	30	604.74	26.6	19.25
20	10.0	46.3	347.25	23.37	20.81	711	61	713.61	27.0	25.06
21	10.3	47.6	357.00	23.45	21.34	844	52	845.60	27.1	25.10
22	8.8	45.7	342.75	22.30	15.00	496	24	496.58	26.1	17.79
23	10.3	47.0	352.50	23.35	20.62	783	48	784.47	27.0	24.04
24	9.0	44.9	336.75	22.80	17.64	668	41	669.26	26.4	21.01
25	8.8	45.4	340.50	23.21	19.63	708	35	708.86	26.8	24.04
26	7.7	38.0	285.00	21.55	11.25	399	5	399.03	25.6	12.19
27	7.7	34.7	260.25	21.37	10.10	324	0	324.00	25.5	11.69
28	8.4	41.5	311.25	22.61	16.43	547	13	547.15	26.4	19.68
29	10.3	48.8	366.00	23.95	23.33	848	52	849.59	27.3	28.04
30	9.6	44.6	334.50	22.66	17.37	674	33	674.81	26.3	19.97
31	8.4	40.6	304.50	22.11	13.78	479	24	479.60	26.0	16.26
32	8.8	44.3	332.25	22.36	15.00	606	37	607.13	26.5	17.93
33	8.4	41.5	311.25	22.60	16.27	549	27	549.66	26.4	19.43
34	9.2	46.2	346.50	23.44	20.73	786	48	787.46	21.1	24.97
35	8.8	43.7	327.75	22.80	17.63	647	32	647.79	26.6	20.63
36	9.2	43.3	324.75	22.88	17.81	618	30	618.73	26.6	22.54
37	8.8	42.9	321.75	22.60	16.37	608	30	608.74	26.4	20.95
38	8.0	38.7	290.25	21.75	11.62	447	11	447.14	25.9	14.79
39	4.6	33.1	248.25	20.94	7.13	226	6	226.08	25.4	15.15
40	10.0	47.1	353.25	23.22	19.68	774	48	775.49	27.0	24.48
41	8.8	43.6	327.00	22.68	17.21	642	40	643.24	26.4	19.51
42	10.3	49.6	372.00	23.73	22.34	886	54	887.64	27.0	25.04
43	9.6	44.3	332.25	22.84	17.74	677	33	677.80	26.5	20.13
44	10.0	48.4	363.00	23.63	22.20	806	70	809.03	27.3	26.24

45	7.3	45.6	342.00	23.19	19.36	714	35	714.86	26.8	23.72
46	10.3	54.2	406.50	24.12	24.65	967	59	968.80	27.7	29.42
47	6.1	32.7	245.25	21.27	8.11	199	7	199.12	25.6	77.94
48	9.6	43.8	328.50	22.88	17.68	640	31	640.75	26.2	20.33
49	8.0	44.9	336.75	23.19	18.95	674	42	675.31	26.8	24.05
50	9.6	46.1	345.75	23.05	18.57	707	43	708.31	26.8	22.21
51	6.1	37.7	282.75	21.99	12.69	394	5	394.03	25.8	16.43
52	8.4	46.7	350.25	23.32	19.97	765	47	766.44	26.9	23.74
53	10.3	46.2	346.50	23.21	19.41	734	45	735.38	26.7	21.80
54	10.7	47.7	357.75	23.38	20.40	804	49	805.49	27.0	24.57
55	8.4	42.6	319.50	22.33	14.05	592	29	592.71	26.2	15.70
56	6.9	35.0	262.50	21.47	9.63	279	0	279.00	25.7	12.20
57	7.7	37.0	277.50	21.66	10.83	372	5	372.03	25.1	12.00
58	10.7	47.0	352.50	23.63	21.47	799	49	800.50	27.2	25.75
59	10.7	48.4	363.00	23.92	23.17	865	53	866.62	27.4	27.77
60	11.1	51.1	383.25	24.16	24.11	963	59	964.81	27.7	29.25
61	10.0	45.8	343.50	23.05	18.63	712	35	712.86	26.7	21.63
62	8.4	40.2	301.50	21.86	11.83	470	23	470.56	26.1	12.61
63	10.7	50.7	380.25	24.56	26.01	991	85	994.64	27.8	31.08
64	6.9	35.0	262.50	22.05	13.04	346	4	346.02	26.1	15.99
65	6.5	42.0	315.00	22.15	12.99	490	24	490.59	26.1	18.20
66	10.0	45.0	337.50	22.98	17.71	676	33	676.80	26.8	21.26
67	7.7	39.1	293.25	21.88	11.67	426	10	426.12	26.1	12.50
68	7.7	41.4	310.50	22.33	14.04	525	13	525.16	26.4	16.37
69	6.9	40.7	305.25	22.61	15.44	505	25	505.62	26.5	19.03
70	8.8	46.3	347.25	22.81	16.33	629	39	630.21	26.7	19.33
71	8.8	43.7	327.75	22.94	17.12	618	30	618.73	26.7	19.65
72	10.3	50.2	376.50	23.69	20.99	935	81	938.50	27.4	26.24
73	8.8	47.3	354.75	23.27	18.96	607	37	608.13	27.1	24.51
74	9.6	45.9	344.25	23.34	19.25	712	35	712.86	27.1	22.69
75	6.9	37.1	278.25	21.52	9.23	347	4	347.02	25.7	10.70
76	6.9	36.2	271.50	21.49	9.01	333	0	333.00	25.8	10.36
77	8.0	36.0	270.00	21.78	11.36	351	0	351.00	26.0	13.99
78	5.8	35.3	264.75	21.83	11.10	340	4	340.02	26.0	13.09
79	9.2	43.4	325.50	22.78	15.91	594	29	594.71	26.6	18.80
80	8.8	40.7	305.25	22.50	14.49	505	25	505.62	26.4	17.16
81	9.2	42.7	320.25	22.87	16.48	599	29	599.70	26.7	19.40
82	6.1	38.5	288.75	22.16	12.64	429	5	429.03	26.2	15.31
83	10.0	48.1	360.75	23.61	20.26	783	68	785.95	27.3	24.51
84	7.7	36.4	273.00	21.55	9.18	324	0	324.00	25.9	9.64
85	9.2	44.3	332.25	23.12	17.56	649	32	649.79	26.9	20.81
86	8.0	39.0	292.50	22.39	13.97	469	12	469.15	26.3	16.10
87	7.7	37.3	279.75	21.76	10.25	369	5	369.03	26.0	11.62
88	8.8	42.3	317.25	22.70	15.09	577	28	577.68	26.0	11.63
89	6.9	33.5	251.25	21.52	8.89	269	0	269.00	25.9	10.39
90	6.1	37.6	282.00	22.20	10.04	364	5	364.03	26.2	15.08
91	7.7	38.3	287.25	22.12	11.80	422	10	422.12	26.1	11.36
92	8.0	40.7	305.25	22.49	13.63	473	23	473.56	26.5	15.99
93	8.4	40.2	301.50	22.61	14.31	501	12	501.14	26.6	19.74

94	7.7	38.2	286.50	21.93	10.43	367	9	367.11	26.1	12.14
95	7.3	35.2	264.00	21.49	8.19	283	0	283.00	25.8	9.17
96	6.1	34.4	258.00	21.44	8.03	269	7	269.09	25.9	9.06
97	6.5	27.9	209.25	16.32	9.70	253	0	253.00	19.3	11.17
98	6.5	24.1	180.75	15.27	9.08	211	5	211.06	17.8	10.67
99	5.8	27.7	207.75	16.80	6.89	204	5	204.06	19.8	7.70
100	6.1	29.4	220.50	17.54	10.15	293	0	293.00	20.6	11.76
101	7.3	20.8	156.00	11.94	7.46	151	9	151.27	11.6	6.23
102	6.9	21.0	157.50	13.19	5.55	130	5	130.10	14.5	7.89
103	6.5	28.1	210.75	17.51	7.17	212	5	212.06	20.1	11.23
104	6.5	32.3	242.25	17.59	10.18	354	4	354.02	21.3	11.96
105	6.9	29.7	222.75	18.12	10.39	270	3	270.02	21.1	10.97
106	6.5	26.3	197.25	15.84	9.46	242	6	242.07	18.8	9.60
107	6.5	24.8	186.00	14.48	8.81	208	5	208.06	14.5	11.63
108	6.9	30.0	225.00	17.57	10.19	300	0	300.00	20.7	12.25
109	6.9	31.8	238.50	16.63	12.78	367	9	367.11	16.3	10.30
110	6.9	31.3	234.75	19.52	11.01	334	4	334.02	22.3	11.60
111	6.5	27.8	208.50	16.28	9.71	252	0	252.00	19.5	11.27
112	6.9	30.3	227.25	18.01	10.43	306	4	306.03	20.7	11.63
113	6.9	27.1	203.25	16.76	9.88	256	0	256.00	18.7	10.88
114	6.1	25.4	190.50	14.82	9.12	222	0	222.00	15.7	10.91
115	6.9	31.7	237.75	18.28	10.54	309	4	309.03	21.4	10.06
116	6.1	24.8	186.00	14.38	8.82	217	5	217.06	19.5	12.07
117	5.8	25.7	192.75	14.52	8.88	229	6	229.08	16.5	12.30
118	7.3	32.3	242.25	19.24	10.93	347	9	347.12	22.0	12.33
119	7.3	30.9	231.75	18.57	10.59	301	7	301.08	22.7	12.24
120	5.8	26.4	198.00	16.32	6.78	186	5	186.07	19.7	7.59
121	6.1	28.0	210.00	18.16	7.29	209	5	209.06	21.7	8.18
122	5.8	26.5	198.75	16.86	6.93	188	5	188.07	20.7	7.77
123	6.1	31.9	239.25	19.81	7.85	255	0	255.00	22.7	8.28
124	6.1	31.3	234.75	17.24	10.16	302	4	302.03	20.7	11.07
125	6.1	39.8	298.50	18.37	7.44	227	0	227.00	21.3	8.20
126	4.6	22.8	171.00	13.97	5.90	141	5	141.09	15.3	6.63
127	6.5	28.6	214.50	16.25	9.67	256	0	256.00	18.5	11.15
128	5.8	25.8	193.50	15.26	9.31	231	6	231.08	15.3	10.39
129	6.1	30.0	225.00	18.73	7.50	227	0	227.00	22.1	8.37
130	5.4	27.9	209.25	15.71	6.51	171	0	171.00	18.5	7.45
131	6.1	29.8	223.50	18.63	7.52	225	0	225.00	22.1	8.34
132	5.4	23.9	179.25	15.09	6.28	156	6	156.12	17.6	7.52
133	4.6	26.3	197.25	17.44	3.99	115	4	115.07	20.9	3.97
134	5.4	30.0	225.00	17.57	7.14	204	0	204.00	20.1	7.91
135	5.4	21.7	162.75	13.58	5.71	132	5	132.09	15.8	6.63
136	5.8	27.8	208.50	17.52	7.10	206	5	206.06	19.5	7.84
137	6.5	31.9	239.25	18.77	10.73	335	4	335.02	22.2	12.34
138	6.5	28.0	210.00	16.29	9.67	263	0	263.00	18.8	11.18
139	5.8	28.6	214.50	18.02	7.26	213	0	213.00	21.7	8.10
140	5.8	26.6	199.50	16.40	6.80	184	0	184.00	19.3	7.59
141	6.9	30.2	226.50	16.28	7.65	236	0	236.00	22.6	8.39
142	6.9	29.6	222.00	19.34	7.70	230	0	230.00	23.4	8.48

143	6.1	28.1	210.75	17.64	7.16	201	5	201.06	20.8	7.98
144	6.5	30.7	230.25	19.59	7.74	237	0	237.00	23.1	8.48
145	6.1	26.5	198.75	18.32	7.33	213	0	213.00	21.6	8.14
146	5.8	29.0	217.50	17.96	7.25	220	0	220.00	21.3	8.08
147	6.1	27.7	207.75	16.96	6.89	200	5	200.06	19.2	7.70
148	6.1	29.4	220.50	18.83	7.46	227	3	227.02	22.5	8.80

Figura 4.22: Voltaje y potencia en función de la velocidad de viento, operando con carga

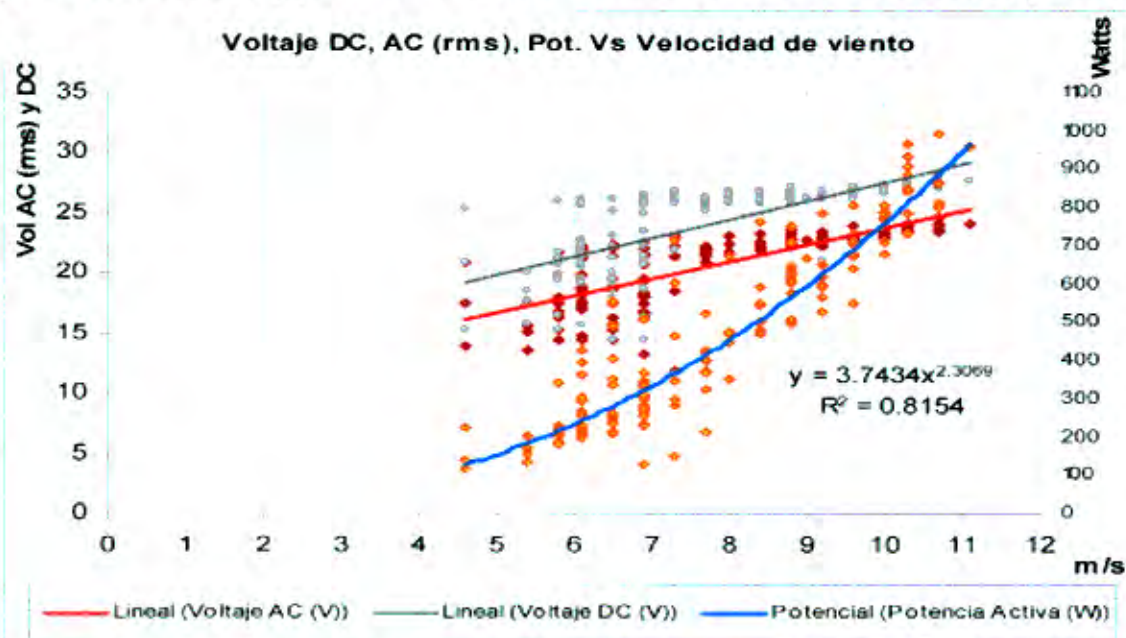
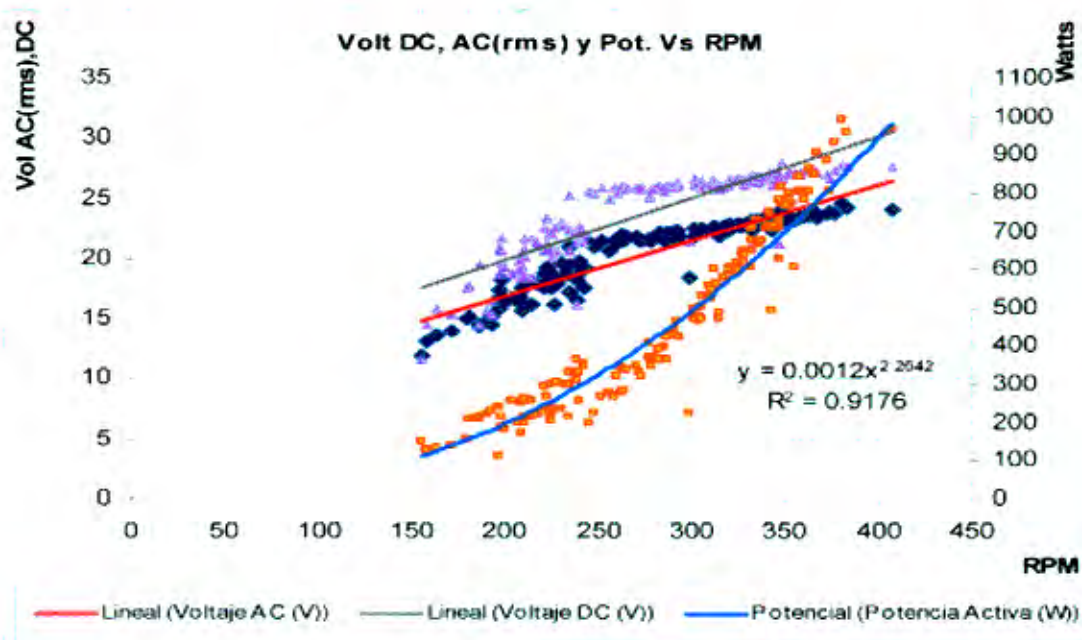
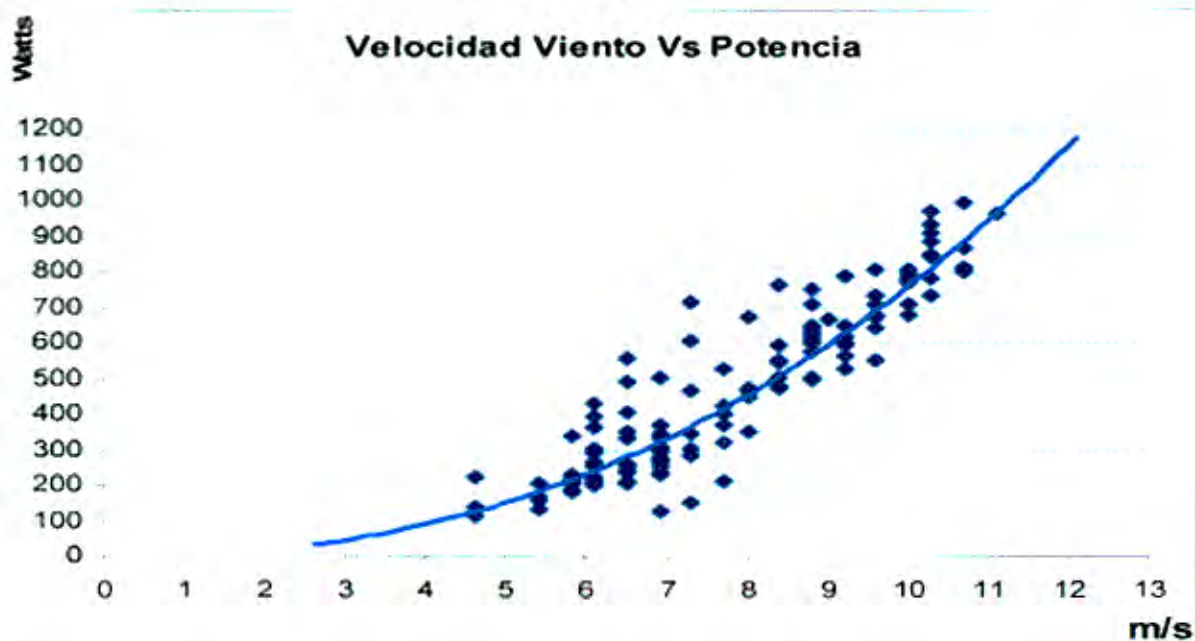


Figura 4.23: Voltaje y potencia en función de la velocidad de giro del rotor, operando con carga



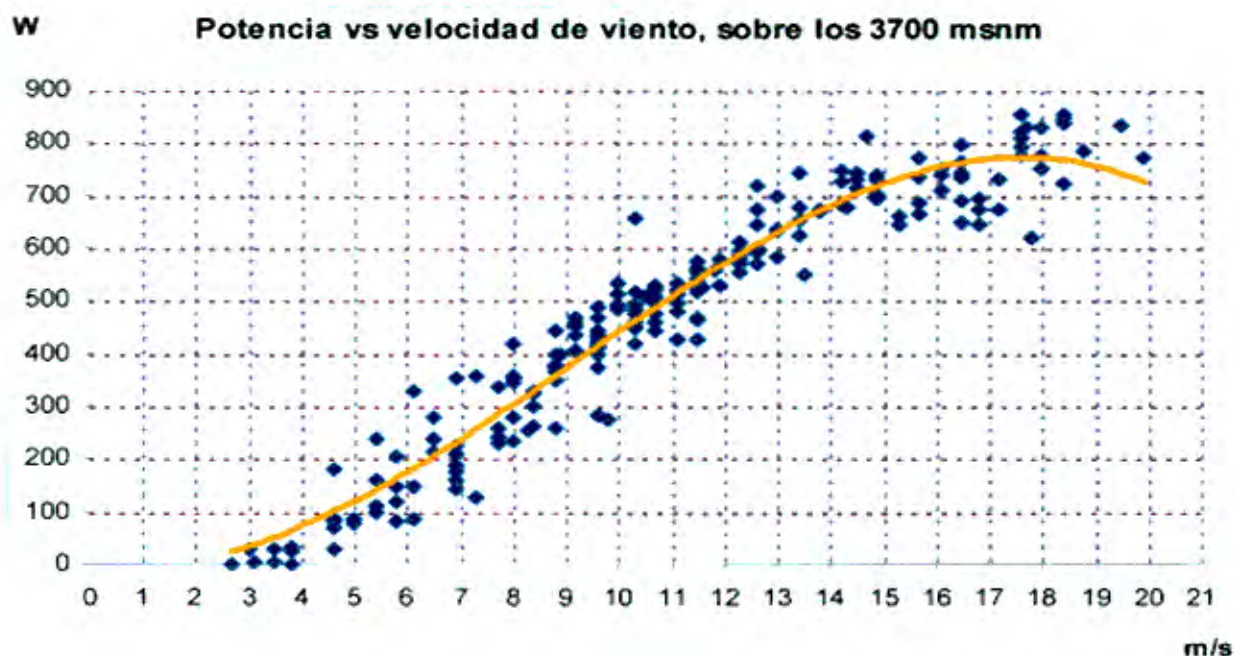
**Figura 4.24: Potencia en función de la velocidad de viento, operando con carga, prueba realizada en costa**



Las características del comportamiento de la máquina sobre los 3700 msnm se muestran en la curva de potencia versus velocidad del viento (ver figura 4.25), donde se presenta la potencia que genera la máquina en zona de sierra, cuya densidad a esta altitud es de  $0.83 \text{ kg/m}^3$ . La curva muestra la potencia neta en DC que ingresa a las baterías, por consiguiente, la potencia es ligeramente mayor si se toman en cuenta las pérdidas antes del sistema de rectificación - diodos y cables.

Como se observa, se presentan altas velocidades de viento de hasta 20 m/s en cierta época del año, siendo en estos casos cuando el mecanismo de protección o regulación de potencia debe funcionar adecuadamente. De no ser así, se puede comprometer al generador eléctrico y al controlador electrónico. El mecanismo es un componente muy importante que otorga el grado de fiabilidad de la máquina. Debe bloquear o desorientar de forma adecuada al rotor de la corriente de aire. En este caso se ha analizado y ajustado el cálculo teórico en campo, específicamente la excentricidad del mecanismo con respecto al eje, siendo inicialmente 3 cm y ajustada finalmente a 4.5 cm.

**Figura 4.25: Potencia en función de la velocidad de viento, operando en condiciones reales sobre los 3700 msnm, comunidad de Alto Perú**



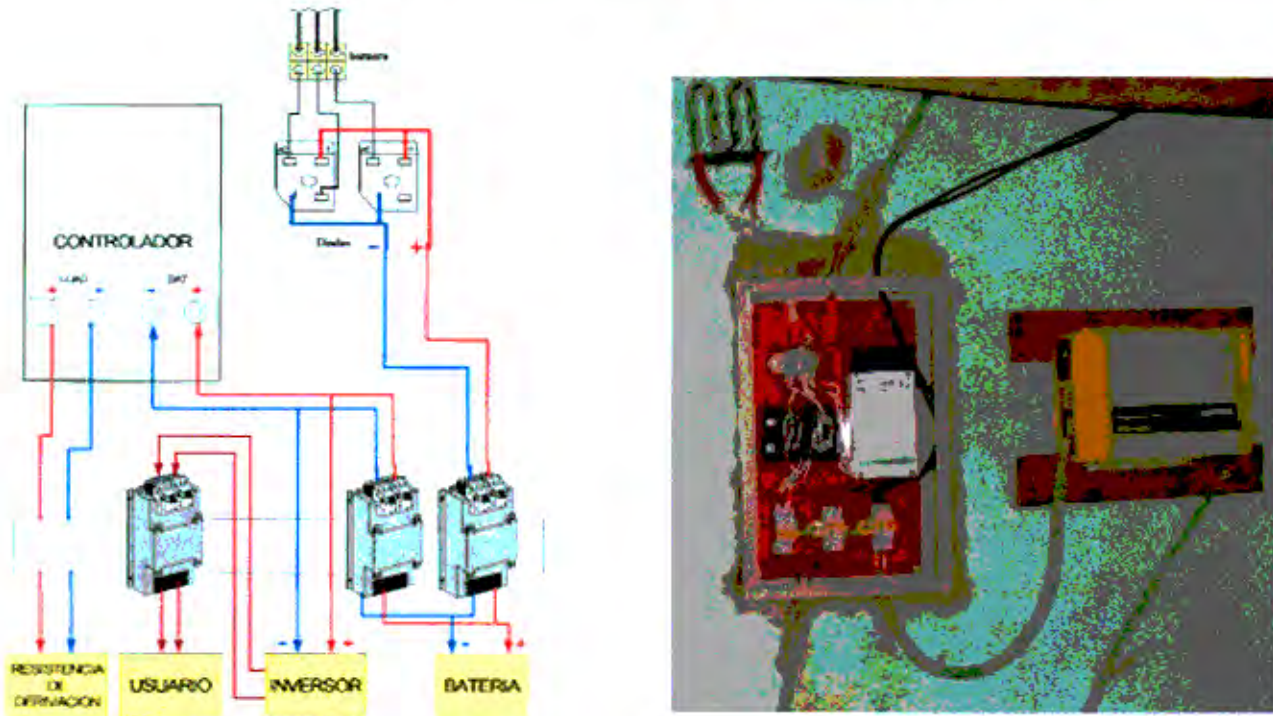
### **4.3 APLICACIÓN DEL SISTEMA DE AEROGENERACIÓN: CONFORMANDO MICRORREDES**

Hasta aquí, se ha terminado el desarrollo de los componentes y los ensayos, tanto del generador eléctrico como del sistema inicial instalado y monitoreado, habiéndose realizado también varias visitas de campo. Esta actividad ha tenido como propósito evaluar el comportamiento mecánico del sistema completo, poniendo mayor atención al mecanismo de regulación de potencia y de dirección, que es el que protege o bloquea la máquina cuando se presentan fuertes velocidades de viento para que no afecten al sistema. Un problema presentado, analizado y corregido con el monitoreo ha sido que las vibraciones para bajas velocidades de viento eran menores que 4 m/s, desde pues de una evaluación, se revisó y mejoró el balanceo estático del conjunto palas-generador eléctrico.

Teniendo una máquina confiable y habiendo identificado a la comunidad de El Alumbre y Alto Perú sin electricidad y con información favorable de velocidad de viento, se planificó la aplicación del empleo de los microaerogeneradores. Para esto se contó con el apoyo de Soluciones Prácticas-ITDG para dotar de energía eléctrica a la posta médica y a la escuela de la comunidad de El Alumbre a fines de 2008. A mediados de 2009, en una aplicación novedosa, se diseñó la implementación de máquinas para la generación centralizada y distribución por medio de redes, entregando electricidad a treces familias de la comunidad de Alto Perú y a una iglesia evangélica.

La aplicación de este desarrollo tecnológico requiere de otros componentes como un controlador electrónico de derivación y un inversor para transformar la energía DC de las baterías a 220 Vdc para empleo de los usuarios. El esquema de instalación se muestra en las figuras 4.26 y 4.27.

**Figuras 4.26 y 4.27: Esquema y tablero instalados en campo para operación del sistema en condiciones reales de trabajo, tableros instalados en las comunidades de El Alumbre y Alto Perú**



Cada aplicación requiere de una evaluación de la demanda a satisfacer y de la disponibilidad del recurso eólico (que debe ser suficiente para cubrir la demanda energética), con estos dos datos se determina el número de máquinas, la altura de instalación y la distancia entre las torres que las soportarán, además de Ah requeridos, número de baterías, tamaño del inversor y puesta a tierra. Una implementación específica requiere de una planificación y organización de una logística, así como de coordinar con las autoridades y usuarios de la comunidad para contar con su apoyo en los trabajos y en el mantenimiento futuro. Las figuras 4.28, 4.29 y 4.30 muestran las instalaciones en campo. Las aplicaciones realizadas hasta la fecha son:

- Una máquina en un taller de auxilio mecánico en el kilómetro 123.5 de la Panamericana Norte
- Una máquina en el centro de exhibición de las albuferas de Medio Mundo
- Dos máquinas para una posta y la escuela de la comunidad de El Alumbre
- Cuatro máquinas para generación centralizada y distribución por microrredes para dotar de energía a 13 familias y una iglesia evangélica en la comunidad de Alto Perú



**Figuras 4.28, 4.29 y 4.30: Aplicaciones del desarrollo tecnológico en la costa y la sierra**



#### 4.4 CONCLUSIONES Y OBSERVACIONES

1. Se ha logrado diseñar y construir un aerogenerador de 500 W, con características mecánicas fiables, accesibilidad y facilidad de operación.
2. De las pruebas de campo se tiene que, si bien el sistema fue diseñado para alcanzar una potencia nominal de 500 W a una velocidad de viento de 8 m/s, de acuerdo a las mediciones en campo, esta potencia se obtiene aproximadamente a 8.3 m/s; ello es un fiel indicador de un buen cálculo de gabinete.
3. Los costos de materiales y de fabricación del producto alcanzan los US\$ 570.00 (quinientos setenta y 00/100 dólares), si a este costo lo comparamos con los sistemas fotovoltaicos, un panel de 100 Wp cuesta aproximadamente igual, con la diferencia que se requiere de 5 paneles para igualar en potencia. En consecuencia, el costo es cinco veces mayor, además de tener una producción a gran escala, la producción de este desarrollo tecnológico es incipiente y tiene otras ventajas, disponibilidad en el mercado nacional, asistencia técnica local.
4. Las pruebas de campo del prototipo se han realizado en lugares representativos, zonas rurales y aisladas que se caracterizan por poseer el recurso, en la sierra norte la comunidad de Alto Perú en Cajamarca y Huacho en la costa.
5. A mediados de 2009 se han instalado 8 máquinas, dos en la costa y seis en la sierra, una instalación novedosa de cuatro máquinas, cuya concepción de diseño fue generar energía eléctrica de forma centralizada, almacenando la energía en un banco de baterías, para después ser distribuida por medio de microrredes para 14 familias de la comunidad de Alto Perú, provincia de San Pablo, Cajamarca. Asimismo, esta aplicación fue extendida a usos comunitarios, conformados por una escuela y una posta médica de la comunidad El Alumbre, Cajamarca.
6. Las experiencias implementadas han concitado el interés y la visita de representantes del sector Energía, alcaldes, y ha sido divulgada a través de informaciones periodísticas (Diario La República, y revista Energía y negocios - E&N) y un reportaje en la televisión (en Frecuencia Latina).
7. Las recientes instalaciones mencionadas, así como las futuras previstas en el plan referencial de energía 2008-2017 preparado por el MINEM, que prevén dotar de energía a 45 mil habitantes de zonas rurales, con pequeños aerogeneradores, confirman la utilidad del desarrollo de una tecnología apropiada para la generación de electricidad, con la finalidad de cubrir pequeñas cargas aisladas propias del sector rural.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Artículo técnico, aprobado para su participación en el VIII Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica. Cusco, octubre de 2007.
- [2] Sadiku, Matthew N. O. Elementos de Electromagnetismo, Oxford: University Press, 1996.
- [3] Johnson, Gary L. Wind Energy Systems. Manhattan: KS, 1994.
- [4] Dawes Chester L. Tratado de Electricidad I: Corriente Continua. Barcelona: Editorial Gustavo Gili, 1959.
- [5] Fitzgerald, A.E.; Kingsley, Charles; Umans, Stephen D. Máquinas Eléctricas. México: McGraw Hill, 1987.
- [6] Gieras, Jacek F.; Wang, Rong Jie; Kamper, Maarten J. Axial Flux Permanent Magnet Brushless Machines. Kluwer Academic Publishers, 2004.
- [7] Chapman, Tephén J. Máquinas eléctricas (3° edición). Canadá: Mc Graw Hill, 1996.
- [8] Gasch R.; Twele J. Wind power plants: fundamentals, design, construction and operation. Reino Unido: James& James, 1995.
- [9] Gevorgian, Vahan; Corbus, David A.; Drouilhet, Stephen; Holz, Richard. Modelling, testing and economic analysis of a wind-electric, battery charging station. Estados Unidos: National Renewable Energy Laboratory, 1998.
- [10] González, Salomé. Aerogeneración: una fuente energética competitiva (2° edición). Madrid, 1998.
- [11] Hansen, Martin O.L. Aerodynamics wind turbines, Rotors, Loads and Structure. James& James. Reino Unido. 1995.
- [12] Kingsley, Fitzgerald Jr. Máquinas eléctricas (5° edición). Canadá: Mc Graw Hill, 1992.
- [13] Sánchez, Teodoro. Bomba aspirante-impelente para 10 metros de altura y caudal de 1 l/s accionada por turbina eólica y proyecto banco de ensayo. Tesis para obtener el título de Ingeniero Mecánico: Universidad Nacional de Ingeniería. Perú, 1986.
- [14] ITDG. Small wind systems for battery charging. Reino Unido, 2000.
- [15] Muljadi, E.; Butterfield, C.P.; Wan, Yih-Huei. Axial flux, modular, permanent-magnet generator with a toroidal. Winding for wind turbine-applications.

- National Wind Technology Center. USA: National Renewable Energy Laboratory, 1998.
- [16] Muljadi, E.; Green, J. Cogging torque reduction in a permanent magnet wind turbine generator. USA: National Renewable Energy Laboratory, 2002.
- [17] Campbell, Peter. Permanent magnet materials and application. UK: Cambridge University Press, 1994
- [18] Niemela, M., Pyrhonen, J. Design of axial. Flux permanent. Magnet low. Speed Machines and performance comparison between radial flux and axial flux machines.
- [19] EWEA - European Wind Energy Association.
- [20] Daniel Garcia Galindo, Minieólica, fabricantes, productos y selección de equipos 2007.
- [21] Estudio " Diagnóstico de la situación actual del uso de la energía solar y eólica en el Perú ", Centro de Conservación de Energía y del Ambiente ( CENERGIA) 2006.
- [22] Estudio "Diagnóstico de las energías solar y eólica en el Perú", Centro de Energías Renovables (UNI), Abril 1996.
- [23] Ministerio de Energía y Minas Dirección General de Electrificación Rural, Mapa eólico del Perú, octubre del 2008.