



UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL

FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO

**Previo a la obtención del título**

Ingeniero en Eléctrico-Mecánica con Mención en Gestión Empresarial Industrial

**Tema**

“INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO DE UN SOFTWARE PARA  
SUPERVISIÓN Y CONTROL DE UN AEROGENERADOR”

**Realizado por**

Ricardo Delgado Galarza

Carlos Heras Ramírez

Christian Merchán Pástor

**Director de Tesis**

Ing. Óscar Carrasco

Guayaquil – Ecuador

2011



FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO

TESIS DE GRADO

Título

“INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO DE UN SOFTWARE PARA SUPERVISIÓN Y CONTROL DE UN AEROGENERADOR”

Presentada a la Facultad de Educación Técnica para el Desarrollo, Carrera de Ingeniería en Eléctrico-Mecánica con Mención en Gestión Empresarial Industrial de la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil

Por

Ricardo Delgado Galarza

Carlos Heras Ramírez

Christian Merchán Pástor

Para dar cumplimiento con uno de los requisitos para optar por el título de Ingeniero en Eléctrico-Mecánica con Gestión Empresarial Industrial

Decano

Vocal principal

Director de Tesis

Director de Carrera

Vocal principal

Secretario

## **Dedicatoria**

Queremos dedicar este trabajo de titulación a nuestras familias, amigos y compañeros de universidad, profesores y a todos quienes tomaron parte en nuestra formación como profesionales.

A todos quienes desinteresadamente nos brindaron su apoyo y nos inspiraron a lograr nuestros objetivos inmediatos y a proponernos nuevas metas.

## **Agradecimiento**

### **Ricardo Delgado Galarza.**

Siempre estaré agradecido de Dios por darme la vida, salud y sobre todas las cosas poner alrededor mío, personas de las cuales recibí apoyo en todo momento.

A mis padres Fernando y María del Carmen, mis hermanos Fernando, Jorge y José quienes siempre estuvieron apoyándome y por siempre ser una guía en mi camino sin importarles las veces que me equivoqué. A mi enamorada Diana quien siempre estuvo cuando la necesité.

Muchas gracias.

### **Carlos Heras.**

Debo agradecer primeramente a Dios por haber permitido que terminara esta tesis ya que sin su ayuda no se puede lograr nada.

Es también para mí un verdadero placer utilizar este espacio para agradecer de manera más sincera a mis padres, hermanos y compañeros de tesis que con su apoyo y confianza me ayudaron a terminar satisfactoriamente este proyecto.

A todos ustedes, gracias...

### **Christian Merchán.**

Agradezco infinitamente a DIOS por todas las oportunidades y grandes satisfacciones que me ha dado en la vida.

Agradezco a mis padres Gavino y Ximena, a mis hermanos Daniel y Diego, y a mi enamorada Daniela por haber sido piezas fundamentales que me ayudaron en todo momento a culminar esta tesis.

Muchas gracias.

## ***Índice General***

### **CAPÍTULO 1**

1. Introducción. ....	17
1.1. Antecedentes. ....	17
1.2. Justificación del problema. ....	18
1.3. Definición del problema. ....	18
1.4. Objetivos. ....	18
1.4.1. Objetivo general. ....	18
1.4.2. Objetivos específicos. ....	18
1.5. Hipótesis o idea a defender. ....	19
1.6. Metodología. ....	19

### **CAPÍTULO 2**

<b>ESTADO DEL ARTE DE ENERGÍA Y SISTEMAS EÓLICOS. ....</b>	<b>21</b>
2.1 ¿Que es la energía eólica? .....	21
2.2 Importancia de la energía eólica. ....	22
2.2.1 Ventajas de la energía eólica. ....	23
2.2.2 Inconvenientes de la energía eólica. ....	24
2.3 Origen del viento. ....	25
2.3.1. Parámetros del viento. ....	27
2.3.2. Escala de Beaufort. ....	29
2.3.3. Régimen de vientos a escala planetaria. ....	30
2.4 La energía eólica en cifras. ....	33
2.5 La energía eólica en el Ecuador. ....	35
2.5.1 Proyectos de interés en el Ecuador (actualmente). ....	35
2.5.2 Barreras de la energía eólica. ....	35
2.6 Historia de los aerogeneradores y acontecimientos importantes. ....	37
2.7 Funcionamiento de un aerogenerador. ....	44
2.7.1 Según velocidades del viento. ....	46
2.7.2 Frenado de un aerogenerador. ....	47

2.7.3 Elementos principales de un aerogenerador. ....	47
2.7.4. Accesorios y componentes secundarios. ....	49
2.8 Tipos de aerogeneradores .....	50
2.8.1 Por la orientación del eje del rotor respecto al suelo. ....	50
2.8.2 Por la orientación del equipo con respecto al viento. ....	51
2.8.3 Por el número de palas. ....	52
2.8.4 Por la potencia nominal. ....	54
2.8.5 Por el mecanismo de orientación. ....	54
2.8.6 Según la forma de producir energía eléctrica. ....	55
2.9 Generación a escala. ....	56
2.9.1 Energía eólica de pequeña potencia. ....	57
2.10 Cantidad de energía aprovechable del viento. ....	58
2.10.1. Factores a considerar. ....	59
2.11 Eficacia y potencial eólico. ....	60
2.12 Modelos matemáticos para uso de la energía eólica. ....	62
2.13 Ley de Betz. ....	65
2.14 Comparación entre las potencias. ....	66
2.15 Impacto Ambiental. ....	67
2.16 Estudios previos para la instalación de un parque eólico. ....	67
2.17 Impactos ambientales más comunes. ....	69
2.17.1. Impacto Ecológico y Visual. ....	70
2.17.2. Impacto sobre la fauna avícola. ....	71
2.17.3. Impacto acústico. ....	72
2.17.4. Interferencia electromagnética. ....	73
2.17.5. Salud pública y seguridad. ....	74
 <b>CAPÍTULO 3</b>	
<b>ESTADO DEL ARTE DE LA PLATAFORMA VIRTUAL LABVIEW. ....</b>	<b>76</b>
3.1 ¿Qué es Labview? .....	76
3.2 Breve historial de Labview. ....	76
3.3 Usos de Labview. ....	78
3.4. Características de Labview. ....	79

3.4.1 Flujo de Datos. ....	80
3.5 VIs. ....	81
3.5.1 Panel frontal. ....	81
3.5.2 Diagrama de bloques. ....	82
3.5.3 Icono de conexión. ....	83
<b>CAPÍTULO 4</b>	
<b>DISEÑO EXPERIMENTAL A ESCALA DE UN AEROGENERADOR.....</b>	<b>84</b>
4.1 Descripción del prototipo. ....	84
4.2 Parte Mecánica.....	85
4.2.1. Materiales.....	85
4.2.2. Descripción y funcionamiento de los elementos mecánicos. ....	85
4.2.3. Explicación parte mecánica. ....	91
4.3 Parte eléctrica. ....	92
4.3.1. Descripción y funcionamiento de los elementos eléctricos.....	92
4.3.2. Explicación parte eléctrica. ....	109
<b>CAPÍTULO 5</b>	
<b>DESARROLLO DEL SOFTWARE PARA SUPERVISIÓN Y CONTROL DE</b>	
<b>PARÁMETROS BÁSICOS DE UNA TURBINA EÓLICA. ....</b>	<b>110</b>
5.1 Panel Frontal. ....	111
5.2 Diagrama de bloques. ....	113
5.2.1 Diseño.....	114
<b>CAPÍTULO 6</b>	
Conclusiones. ....	119
Bibliografía .....	121
<b>Índice De Figuras</b>	
<b>CAPÍTULO 2</b>	
<i>Figura 2.1: Parque eólico.</i> .....	23
<i>Figura 2.2: El origen del viento.</i> .....	26

<b>Figura 2.3:</b> Velocidad del viento. ....	28
<b>Figura 2.4:</b> Densidades del viento. ....	29
<b>Figura 2.5:</b> Circulación general del aire en la superficie. ....	31
<b>Figura 2.6:</b> Direcciones de viento. ....	32
<b>Figura 2.7:</b> Top 10 MW acumulados e instalados al año 2009. ....	33
<b>Figura 2.8:</b> Emisiones CO2 2005-2008. (APPA, 08) ....	34
<b>Figura 2.9:</b> Reparto de potencia instalada de energías renovables. (APPA, 08) ....	34
<b>Figura 2.10:</b> Molino Persa. ....	37
<b>Figura 2.11:</b> Molinos en el dique del polder Overwaard. ....	38
<b>Figura 2.12:</b> Vista aérea del Flevopolder, en los Países Bajos. ....	39
<b>Figura 2.13:</b> Modelo multipala americano. ....	39
<b>Figura 2.14:</b> Imagen de una pala de un aerogenerador. ....	41
<b>Figura 2.15:</b> Conversión de energía y componentes del sistema. ....	45
<b>Figura 2.16:</b> Partes de un aerogenerador o turbina eólica. ....	46
<b>Figura 2.17:</b> Tipos de torre. a) Tubular, b) Celosía, c) Tensada y d) Híbrida ....	49
<b>Figura 2.18:</b> Modelo Darrieus. ....	51
<b>Figura 2.19:</b> Generador monopala. ....	52
<b>Figura 2.20:</b> Generador bipala. ....	53
<b>Figura 2.21:</b> Generador tripala. ....	53
<b>Figura 2.22:</b> Generador multipala. ....	53
<b>Figura 2.23:</b> Algunos aerogeneradores. ....	56
<b>Figura 2.24:</b> Tamaño relativo de pequeñas turbinas eólicas. ....	56
<b>Figura 2.25:</b> Incremento de la velocidad del viento con la altura. ....	61
<b>Figura 2.26:</b> Potencia vs diámetro del aerogenerador. ....	64
<b>Figura 2.27:</b> Tubo de corriente de aire. ....	65
<b>Figura 2.28:</b> Gráfica comparativa del viento antes y después de llegar al rotor. ....	66
<b>Figura 2.29:</b> Gráfica comparativa de potencias. ....	66
<b>Figura 2.30:</b> Accesos y montaje de un parque eólico. ....	69
<b>Figura 2.31:</b> Impacto visual generado por un parque eólico. ....	70
<b>Figura 2.32:</b> Buitre muerto enfrente de un pequeño parque eólico. ....	72
<b>Figura 2.33:</b> Sonido llevado por el viento. ....	73

### CAPÍTULO 3

<i>Figura 3.1: Vista principal del Panel Frontal.</i> .....	81
<i>Figura 3.2: Diagrama de bloques.</i> .....	82

### CAPÍTULO 4

<i>Figura 4.1: Base del aerogenerador.</i> .....	85
<i>Figura 4.2: Aspas del prototipo.</i> .....	86
<i>Figura 4.3: Carcasa con veleta incorporada.</i> .....	87
<i>Figura 4.4: Eje de transmisión.</i> .....	88
<i>Figura 4.5: Rodamientos.</i> .....	88
<i>Figura 4.6: Engranajes externos.</i> .....	89
<i>Figura 4.7: Engranajes internos.</i> .....	90
<i>Figura 4.8: Caja multiplicadora.</i> .....	90
<i>Figura 4.9: Terminales de la dinamo.</i> .....	92
<i>Figura 4.10: Elementos internos de una dinamo.</i> .....	93
<i>Figura 4.11: Dínamo destapado para realizar pruebas.</i> .....	93
<i>Figura 4.12: Batería.</i> .....	94
<i>Figura 4.13: Potenciómetro lineal de 10K<math>\Omega</math>.</i> .....	95
<i>Figura 4.14 Sensor inductivo.</i> .....	96
<i>Figura 4.15: Representación gráfica del sensor inductivo.</i> .....	96
<i>Figura 4.16: Campo magnético asociado a la corriente del conductor del sensor inductivo.</i> .....	96
<i>Figura 4.17: Devanado interno del sensor.</i> .....	97
<i>Figura 4.18: Estados de un sensor inductivo.</i> .....	98
<i>Figura 4.19: Inversor.</i> .....	98
<i>Figura 4.20: Onda senoidal modificada por el inversor.</i> .....	99
<i>Figura 4.21: Prueba de batería e inversor.</i> .....	100
<i>Figura 4.22: Tarjeta de adquisición de datos.</i> .....	100
<i>Figura 4.23: Diagrama de bloques de la tarjeta.</i> .....	101
<i>Figura 4.24: Tarjeta USB-6009, I/O's analógicas y digitales.</i> .....	102
<i>Figura 4.25: Representación de fusible.</i> .....	105

<i>Figura 4.26: Caja portafusiles, contiene las protecciones para inversor, batería y dinamo.</i>	105
<i>Figura 4.27: Selector, boton de parada de emergencia, luz piloto.</i>	106
<i>Figura 4.28: Voltímetros DC y AC respectivamente.</i>	107
<i>Figura 4.29: Tarjeta divisor de voltaje con sus respectivas entradas y salida.</i>	108
<i>Figura 4.30: Tarjeta reguladora</i>	108

## CAPÍTULO 5

<i>Figura 5.1: Parámetros resultantes controlados.</i>	111
<i>Figura 5.2: Indicadores de voltaje y corriente de batería.</i>	112
<i>Figura 5.3: Señal de voltaje AC, a la salida del inversor.</i>	112
<i>Figura 5.4: Señal voltaje DC, de batería.</i>	113
<i>Figura 5.5: Botoneras virtuales de mando.</i>	113
<i>Figura 5.6: Panel frontal, de los parámetros controlados de la BATERÍA.</i>	115
<i>Figura 5.7: Diagrama de bloques, parámetros de BATERÍA.</i>	115
<i>Figura 5.8: Panel frontal. DÍNAMO.</i>	116
<i>Figura 5.9: Diagrama de bloques. DÍNAMO.</i>	116
<i>Figura 5.10: Panel frontal. INVERSOR.</i>	117
<i>Figura 5.11: Diagrama de bloques. INVERSOR.</i>	117
<i>Figura 5.12: Panel frontal. POSICIÓN Y NÚMERO DE VUELTAS.</i>	118
<i>Figura 5.13: Diagrama de bloques. POSICIÓN Y NÚMERO DE VUELTAS.</i>	118

## Índice de tablas

### CAPÍTULO 2

<i>Tabla 2.1: Escala de Beaufort.</i>	30
<i>Tabla 2.2: Crecimiento de la capacidad instalada 1966-2009.</i>	33
<i>Tabla 2.3: Evolución de los aerogeneradores, periodo 1982 – 2002.</i>	44

### CAPITULO 3

<i>Tabla 3.1: Historial de Labview.</i>	78
<i>Tabla 4.1: Terminales análogas.</i>	103
<i>Tabla 4.2: Terminales digitales. (National Instruments).</i>	104

## **GLOSARIO**

**Mw:** Megavatios.

**Kw:** Kilovatios

**Kw/h:** Kilovatio – hora

**m/s:** velocidad en metros por segundo.

**Km/h:** velocidad en kilómetros por hora.

**m:** metros.

**Kwh/año:** Kilovatio-hora consumidos por año.

**Ft:** Longitud en pies (feet).

**VAWTs:** Vertical Axis Wind Turbine, Turbina de viento de eje vertical.

**HAWTs:** Horizontal Axis Wind Turbine, Turbina de viento de eje horizontal.

**Microaer:** Micro aerogenerador.

**Miniaer:** Mini aerogenerador.

**W/m<sup>2</sup>:** Potencia del viento por metro cuadrado.

**Ecín:** Energía cinética.

**V:** Voltaje (voltios)

**I:** Intensidad (Amp: Amperios).

**F:** Flujo de aire.

**P:** Potencia.

**G:** Lenguaje gráfico en Labview.

**PACs:** Programmable Automation Controlers, Controlador de automatización programable.

**HIL:** Hardware in level, Hardware en ciclo.

**VI:** Virtual Instruments, Instrumentos virtuales.

## **Resumen**

El presente trabajo de titulación presenta la **INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO DE UN SOFTWARE PARA SUPERVISIÓN Y CONTROL DE UN AEROGENERADOR**, que pueda ser utilizado como una herramienta educativa para enseñar el comportamiento, operación y control de una turbina eólica.

El software (programa) permitirá supervisar las variables básicas a las cuales están sometidas las turbinas eólicas en su estado de funcionamiento.

Este trabajo consta básicamente de dos partes bien definidas:

### **1. Construcción de un aerogenerador a escala.**

El prototipo a escala consiste en una máquina eléctrico-mecánica que consta de varios elementos eléctricos, electrónicos y mecánicos, que ensamblados de manera conjunta aseguran el correcto funcionamiento de la máquina en cuestión.

Este aerogenerador a escala, cuenta con características similares a una turbina eólica de gran tamaño. Cabe recalcar que el diseño y construcción del prototipo se ha realizado bajo parámetros de pequeña potencia, ya que al ser un sistema a escala, proporcionará también una generación a escala.

Debemos poner énfasis en la característica no lineal del comportamiento aerodinámico de la turbina, esto quiere decir, que el funcionamiento del aerogenerador está limitado por el forzamiento de las condiciones variables externas, específicamente del viento.

### **2. Desarrollo del software de supervisión.**

Labview 2009 es la plataforma seleccionada para desarrollar el programa computacional en el que se visualizará el comportamiento aerodinámico del generador antes mencionado.

La programación en el software reproducirá los acontecimientos externos generados físicamente en la turbina eólica en un estado de tiempo real. Se han establecido diferentes etapas durante el diseño del programa, para de esta manera identificar cada una de las variables virtuales y sus acciones de supervisión y control.

Ambas partes (prototipo y software) están interconectadas mediante una interfaz que permite que las señales análogas sean codificadas para ser leídas en lenguaje virtual. Para esto se ha dispuesto del modulo interfaz de National Instruments (NI), perteneciente al laboratorio de electrónica de la Facultad Técnica para el Desarrollo.

Finalmente, no solo queremos resaltar el estudio teórico y práctico de la energía eólica, sino también fomentar el uso de las energías alternativas y limpias para de alguna manera incentivar a la formación de profesionales en esta área, que mucha falta hacen en el mundo y en especial en nuestro país, para contribuir con el cuidado del medio ambiente y el re fortalecimiento energético a través de nuevos recursos.

Dejamos abierta la posibilidad de incluir mejoras y estudios adicionales a futuro, dejando como guía este trabajo a los estudiantes de la Facultad Técnica para el Desarrollo de la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil.

## **Abstract**

This paper presents the INVESTIGATION AND DEVELOPMENT OF A WIND TURBINE SUPERVISION AND CONTROL SOFTWARE that can be used as an educational tool to teach the actions, operation and control of a wind turbine.

The software (program) will allow supervising the basic variables which the wind turbines are subjected in their operating status.

This work consists basically in two well defined parts:

### **1. Construction of a scale size wind turbine.**

The scale prototype consists in an electrical-mechanical machine that has some electrical, mechanical and electronic elements that in conjunction ensure the correct work of the machine.

This scale size wind turbine has similar characteristics of a full size wind turbine. Should be emphasized that the prototype's design and construction has been done under low power parameters, since being a scale size prototype the resultant power is scale sized too.

We must called attention in the no linear aerodynamic conduct of the turbine; this means that, the wind turbine operation is limited by the variable external conditions, specifically the wind.

### **2. Supervision software development.**

Labview 2009 is the chosen platform to develop the program in which will be visualized the aerodynamic operation of the wind turbine.

Programming in the software will reproduce the external events physically generated in the wind turbine in a real time condition. Have been established different stages in the program design in order to identify every one of the virtual variables and their supervision and control actions.

Both parts (prototype and software) are interconnected by an interface that allows analog signals to be encoded and read as virtual language. For this purpose is used the National Instruments (NI) interface module, belonging to Facultad Técnica para el Desarrollo.

Finally, we don't only want to emphasize the theoretical and practical study of the wind energy, but also promote the study of clean an alternative energies to somehow encourage the training of professionals in this area that are badly needed in the world and specially in our country, to contribute with environmental care and the energetic re strengthening through new resources.

We left open the possibility to include improvements and additional studies to this work, letting as a guide this to the student of Facultad Técnica para el Desarrollo of Universidad Católica de Santiago de Guayaquil.

### **Palabras clave**

*ENERGÍA EÓLICA      AEROGENERADOR      LABVIEW*  
*GENERACIÓN      IMPACTO AMBIENTAL*

# CAPÍTULO 1

## **1. Introducción.**

Desde los ojos de los ambientalistas, ingenieros y la sociedad común, las energías renovables son la respuesta a la crisis energética suscitada a lo largo de muchos años, no solo por el potencial de producir energía eficientemente sino también porque omite el uso de recursos naturales agotables y combustibles fósiles que producen impactos muchas veces irreversibles y con grandes consecuencias a corto, mediano y largo plazo.

Una de las alternativas es la energía eólica, que a pasos acelerados va ganando más adeptos y en todo caso según estadísticas su uso es superior a cualquier otro tipo de energías limpias. La energía eólica usa como recurso motriz al viento, que al ser inagotable, podríamos decir que es una de las pocas alternativas que cuenta con la seguridad de jamás perder la continuidad de servicio de generación.

No debemos pensar en energía eólica como una instalación imposible de materializar, más bien debemos incentivar su uso a escala para satisfacer necesidades cotidianas y hacer a un lado la dependencia de entidades de gobierno que suministran energía a nuestros hogares.

### **1.1 Antecedentes.**

La necesidad del correcto funcionamiento de un sistema o unidad de generación eléctrica y sus componentes, obliga a los ingenieros y operarios a dar constante seguimiento a las funciones y operaciones que esta realice a lo largo de su tiempo útil de vida. La actividad de supervisar y controlar procesos ha tomado un auge muy importante debido a que de esta manera se asegura la continuidad de servicio del sistema en cuestión y se garantiza que todos los sistemas principales y auxiliares

cumplan su función sin fallar en ningún momento, y de ser así, que se detecte el lugar y tipo de daño.

## **1.2 Justificación del problema.**

La implementación del software, aportará una herramienta efectiva de fácil entendimiento para el estudiante, de esta manera, sus conocimientos teóricos se reforzarán y tendrán una amplia perspectiva en la práctica de sistemas eólicos.

Hoy en día, el conocimiento de energías limpias renovables es de vital importancia en la formación académica de un estudiante de ingeniería, ya que la tendencia a sus aplicaciones a nivel mundial es cada vez mas requerida.

## **1.3 Definición del problema.**

Insuficiencia de herramientas y software didácticos y demostrativos de sistemas de generación eólica para prácticas en los laboratorios de la Facultad Técnica para el Desarrollo.

## **1.4. Objetivos.**

### **1.4.1. Objetivo general.**

Investigar y desarrollar un software para supervisión y control de un aerogenerador.

### **1.4.2. Objetivos específicos.**

- ❖ Establecer el estado del arte actual de los principios de generación eólica, sus componentes y los factores externos que la originan.
- ❖ Implementar el prototipo a escala de un sistema de generación eólica que cumple con características básicas de un aerogenerador.

- ❖ Implementar el software basado en la plataforma Labview que controlará y supervisará las variables básicas que intervienen en un sistema de generación eólica.

### **1.5. Hipótesis o idea a defender.**

Los elementos internos y los factores externos que intervienen en el funcionamiento de un aerogenerador, pueden ser controlados de manera eficiente a través de un programa computacional. Usando los principios de control que se aplican a los sistemas de gran escala, podemos controlar los parámetros reales de los sistemas para aplicaciones de pequeña escala.

### **1.6. Metodología.**

La metodología de investigación empleada para la elaboración de este trabajo de titulación es de tipo experimental.

Este tipo de metodología se caracteriza por ejercer un estricto control sobre el experimento por medio del establecimiento de distintas variables dependientes o independientes, y parámetros constantes con el fin de medir aquellas variables.

La manipulación de las variables permite comparar y analizar el comportamiento del objeto de experimentación, a lo largo de distintas pruebas.

Las etapas definidas para el proceso de la investigación de este trabajo, se detallan a continuación:

- ❖ Identificación y definición del problema.
- ❖ Definición de las hipótesis, variables y la operación de las mismas.
- ❖ Recopilación de información.
- ❖ Diseño del plan experimental.
- ❖ Determinación de elementos a ser utilizados.
- ❖ Selección de instrumentos de medición.
- ❖ Elaboración de piezas y adquisición de instrumentos.
- ❖ Obtención de datos experimentales.

- Prueba de confiabilidad de datos.
- Realización de experimento.
- Tratamiento de datos.

Los resultados experimentales se obtuvieron después de la realización de un sin número de pruebas eléctricas y mecánicas a cada una de las partes del prototipo individualmente y luego en conjunto. Superada esta etapa se procedió a hacer las pruebas de software en conjunto con el prototipo a escala, en las cuales fue necesaria la observación del comportamiento de las variables a controlar con el fin de obtener los resultados deseados.

Cabe recalcar que en la etapa de tratamiento de datos fue necesario establecer la diferencia entre el dato bruto, dato procesado y los datos resultantes, con los cuales se establecieron conclusiones, entendiéndose la palabra datos como las señales involucradas en la parte experimental.

## CAPÍTULO 2

### ESTADO DEL ARTE DE ENERGÍA Y SISTEMAS EÓLICOS.

#### 2.1 ¿Que es la energía eólica?

La energía eólica es la energía cuyo origen proviene del movimiento de masa de aire, es decir, del viento. En comparación a otras fuentes convencionales, el viento tiene la ventaja de ser inagotable porque se renueva en forma continua, sin ocasionar la emisión de gases contaminantes que inciden en el calentamiento global. Además, el rápido avance de la tecnología hace posible su explotación a escala industrial, permitiendo la producción de electricidad a un costo más competitivo. (Albert, 09).

Para aprovechar el potencial energético del viento se utiliza los aerogeneradores o turbinas eólicas, que transforman la energía cinética del aire en movimiento, en energía eléctrica.

La instalación de estos equipos genera mínimos impactos en el suelo y es factible en zonas costeras, cimas montañosas o islas sin obstáculos que impidan al viento alcanzar su mayor fuerza.

En la actualidad por los altos precios del petróleo y su agotamiento, la ciencia desarrolla nuevas tecnologías para el aprovechamiento de fuentes renovables. Durante los últimos años la energía eólica ha experimentado un crecimiento potencial.

La energía eólica es una de las fuentes de energías renovables para la que se dispone de una tecnología madura por lo que su explotación es técnica y económicamente viable y en unas condiciones de producción y coste que se prevé que a corto plazo sea competitiva con las fuentes de energía tradicionales (hidráulica, térmica clásica o termonuclear). Actualmente son varias las razones por las que se presta una especial atención a las energías renovables y en particular a la energía eólica. (Rodríguez, 03).

Entre ellas cabe citar:

- La necesaria búsqueda de fuentes de energía no convencionales que permitan atender la gran demanda de energía de las sociedades humanas. Cada vez el planeta está más poblado y el consumo de energía per cápita aumenta a medida que las sociedades menos desarrolladas tienden a un mayor desarrollo.
- Actualmente, la gran dispersión que existe entre el consumo por habitante entre las sociedades industrializadas y el resto de la población hace necesaria potenciar fuentes de energía que ahorren combustibles fósiles (carbón, petróleo y gas) para reducir el uso de recursos agotables y por lo tanto promover un modelo de desarrollo sostenible, además de diversificar los suministros energéticos mediante el uso de fuentes propias de energía para lograr una mayor independencia energética de otros países.
- Limitar la emisión de gases contaminantes (efecto invernadero, acidificación de la atmósfera, destrucción de la capa de ozono, etc.) y residuos sólidos y líquidos con potencial de contaminación química y radiactiva.

## **2.2 Importancia de la energía eólica.**

Para analizar la importancia que posee la energía eólica hay que tener en cuenta todos los eslabones de la cadena que son necesarios para fabricar o para desmontar los aerogeneradores que forman un parque eólico.

La explotación de una turbina de 1 MW instalada en un parque eólico puede llegar a evitar 2000 toneladas de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), si la electricidad producida ha sido emitida por centrales termoeléctricas.

Se estudia, además, el ciclo de vida de las turbinas eólicas. Un aerogenerador de 2,5 MW, con una vida útil de unos 20 años en condiciones normales de explotación, puede producir hasta 3.000 MW por año, que alcanza para el consumo de alrededor de 1.000 a 3.000 hogares por año. La vida útil de una turbina eólica se estima entre los 20 y los 25 años.

Se puede distinguir un “pequeño” aerogenerador que sirve para el bombeo de agua o para dar electricidad a los sitios aislados, mientras que los aerogeneradores más potentes (de 50 KW a 3 MW) están conectados a las redes eléctricas y son los que tienen cada vez mayor desarrollo. Estos últimos se encuentran, generalmente, reagrupados en lo que se denomina parque eólico, granja eólica o central eólica.



*Figura 2.1: Parque eólico. (Albert, 09).*

Los detractores de los parques eólicos en los países industrializados suelen argumentar que contaminan el paisaje, son ruidosos y poseen una producción insuficiente para cubrir las necesidades energéticas. La energía eólica debe ser considerada como una fuente de energía nueva, una energía limpia, en evolución y complementaria a otros tipos de producción. En cuanto a las molestias que puede llegar a ocasionar, serán siempre mucho menores que las provocadas por otra clase de energías como, por ejemplo, la energía térmica o la nuclear que provoca daños más grave en nuestra calidad de vida.

### **2.2.1 Ventajas de la energía eólica.**

Las principales ventajas de la energía eólica son las siguientes:

- Recurso inagotable y gratuito. No utiliza recursos agotables como el agua, petróleo, etc.

- Es una fuente energía renovable, sin requerir procesos de extracción subterráneos o a cielo abierto como ocurre en minería o geotermia
- No produce gases contaminantes, líquidos efluentes, gaseosos ni residuos sólidos.
- El uso de la energía eólica no implican riesgos ambientales de gran impacto ambiental (derrames, explosiones, incendios, etc.)
- Ahorra combustibles fósiles y diversifica el suministro energético.
- Con respecto a las otras fuentes de generación, la energía eólica tiene un nivel muy elevado de aceptación social por parte de la población, todo lo contrario a la energía nuclear, geotérmica, térmica, etc., que poseen un nivel muy bajo de aceptación.
- El 0,25% de la energía solar que llega a la Tierra por radiación, se convierte en corrientes de aire. Esta cantidad es 25 veces mayor al consumo energético total mundial actual.
- El costo de operación es menor con respecto a otras fuentes de generación.
- Su mantenimiento es escaso, solo necesitan una revisión cada seis meses.  
(Cándido, 07).

### **2.2.2 Inconvenientes de la energía eólica.**

Debido a que el viento es disperso y tiene una gran variabilidad y fluctuación. Por ende, el viento sufrirá cambios en su velocidad y dirección. Como consecuencia, no todos los lugares son adecuados para la explotación técnica y económicamente viable de la energía eólica.

- Los aerogeneradores generan contaminación acústica producida por el giro de las turbinas que puede ser molesto para las personas, es por esto que su ubicación debe ser alejada de la civilización.
- Los parques eólicos generalmente se sitúan en las zonas más altas de las colinas o elevaciones del terreno para la producción de electricidad a gran escala, por lo que pueden producir un cierto impacto visual en el paisaje.

- Los parques eólicos requieren de un área de terreno bastante grande lo que se debe mantener una distancia considerable entre aerogeneradores con el fin de evitar los efectos de sombra eólica o de la perturbación de las máquinas entre ellas.
- Los rotores de los aerogeneradores pueden producir interferencias con los campos electromagnéticos, lo cual puede afectar la transmisión de señales (telefonía, televisión, radio, etc.)
- El alto costo inicial es un inconveniente, en comparación con fuentes térmicas de generación, un proyecto eólico tiene un alto costo inicial. La inversión requerida puede ser una barrera para la realización del proyecto, sobre todo en zonas rurales aisladas. (Cándido, 07).

### **2.3 Origen del viento**

La energía eólica tiene su origen en el sol, específicamente en el calentamiento diferencial de masas de aire por el sol, estos se dan por varios factores como lo son, superficie marina y la continental, elevación del suelo, entre los más importantes. Las diferencias de radiación entre distintos puntos de la Tierra generan diversas áreas térmicas y los desequilibrios de temperatura provocan cambios de densidad en las masas de aire que se traducen en variaciones de presión. (Burton, 01).

Entre los sistemas de vientos globales, uno de los más importantes es el de los alisios, el cual tiene su origen en el mayor calentamiento de la región ecuatorial. En general, este sistema es activo entre latitudes de 30 grados norte y sur, por lo que es de alta relevancia para la región de América Central. De la energía solar que llega a la Tierra por radiación (unos 1.018 KW/h por año), sólo alrededor del 0,25% se convierte en corrientes de aire. Esta cantidad es 25 veces mayor al consumo energético total mundial actual.

La dirección del viento está determinada por efectos topográficos (ver figura 2.2) y por la rotación de la Tierra. Es de gran importancia el conocimiento de las

direcciones dominantes para instalar los equipos que extraerán la energía proveniente de este recurso. Los aerogeneradores se deben colocar en lugares donde exista la menor cantidad de obstáculos posibles en estas direcciones. (Textoscientificos.com).



*Figura 2.2: El origen del viento. (IDEA)*

Las causas principales del origen del viento son:

1. La radiación solar, donde es más importante en la zona ecuatorial que en los polos
2. La rotación de la Tierra que provoca desviaciones hacia la derecha en el Hemisferio Norte y hacia la izquierda en el Hemisferio Sur
3. Las perturbaciones atmosféricas. (Cándido, 07)

El movimiento de la Tierra se rige por la siguiente relación entre aceleraciones:

$$a_{(absoluta)} = a_{(relativa)} + a_{(arrastre)} + a_{(coriolis)}$$

Ecuación que aplicada al movimiento del aire y simplificada adecuadamente proporciona la siguiente ecuación vectorial:

$$dx/dt = \nabla p / \rho - \nabla \varphi - 2(w \wedge r)$$

En la que:

$v$  = Es la velocidad del viento

$p$  = La presión

$\rho$  = La densidad

$\omega$  = La velocidad angular de la Tierra

$\mathbf{r}$  = El vector de posición de las partículas

$\nabla\phi$  = La aceleración de origen gravitatorio

Esta ecuación vectorial da lugar a las ecuaciones diferenciales (Navier Stokes) que rigen el movimiento del aire sobre la Tierra, de la forma:

$$\begin{aligned}\frac{d^2x}{dt^2} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} - 2\omega \left( \cos\phi \frac{dz}{dt} - \sin\phi \frac{dy}{dt} \right) \\ \frac{d^2y}{dt^2} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} - 2\omega \cos\phi \frac{dx}{dt} \\ \frac{d^2z}{dt^2} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + 2\omega \cos\phi \frac{dx}{dt} - g\end{aligned}$$

### 2.3.1. Parámetros del viento.

La cantidad de energía tanto mecánica o eléctrica que pueda generar una turbina eólica depende mucho de las características del viento en el sitio donde se levantará la instalación. La rentabilidad de este tipo de proyectos depende directamente del recurso local. Debido a esto, es indispensable realizar estudios técnicos y estadísticos detallados de las características del viento a fin de obtener mayor eficiencia en el aerogenerador o los parques eólicos. (Cuesta, Pérez, Cabrera, 08).

El análisis necesario que se realizará depende directamente de la aplicación y de la escala que se necesite.

Existen tres componentes del viento que determinarán la potencia disponible de un sistema de energía eólica:

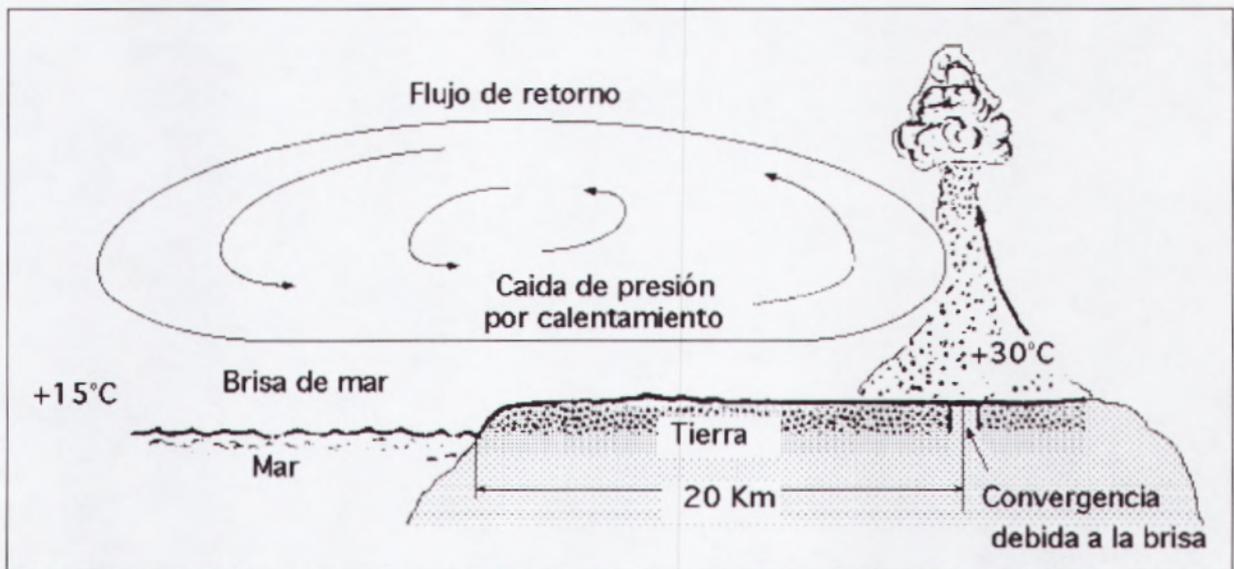
#### a) Velocidad del viento.

Como se estableció anteriormente, la velocidad del viento es un parámetro crítico, del cual depende en gran magnitud la potencia. La velocidad varía

directamente con la altitud sobre el suelo, por la fricción causada por montañas, árboles, edificios y otros objetos.

Las turbinas eólicas requieren una velocidad de viento mínima para empezar a generar energía:

- Para pequeñas turbinas: aproximadamente, de 3,5 metros por segundo (m/s)
- Para turbinas grandes: 6 m/s, como mínimo. (Fernandez,08)



*Figura 2.3: Velocidad del viento. (Moragues, 09)*

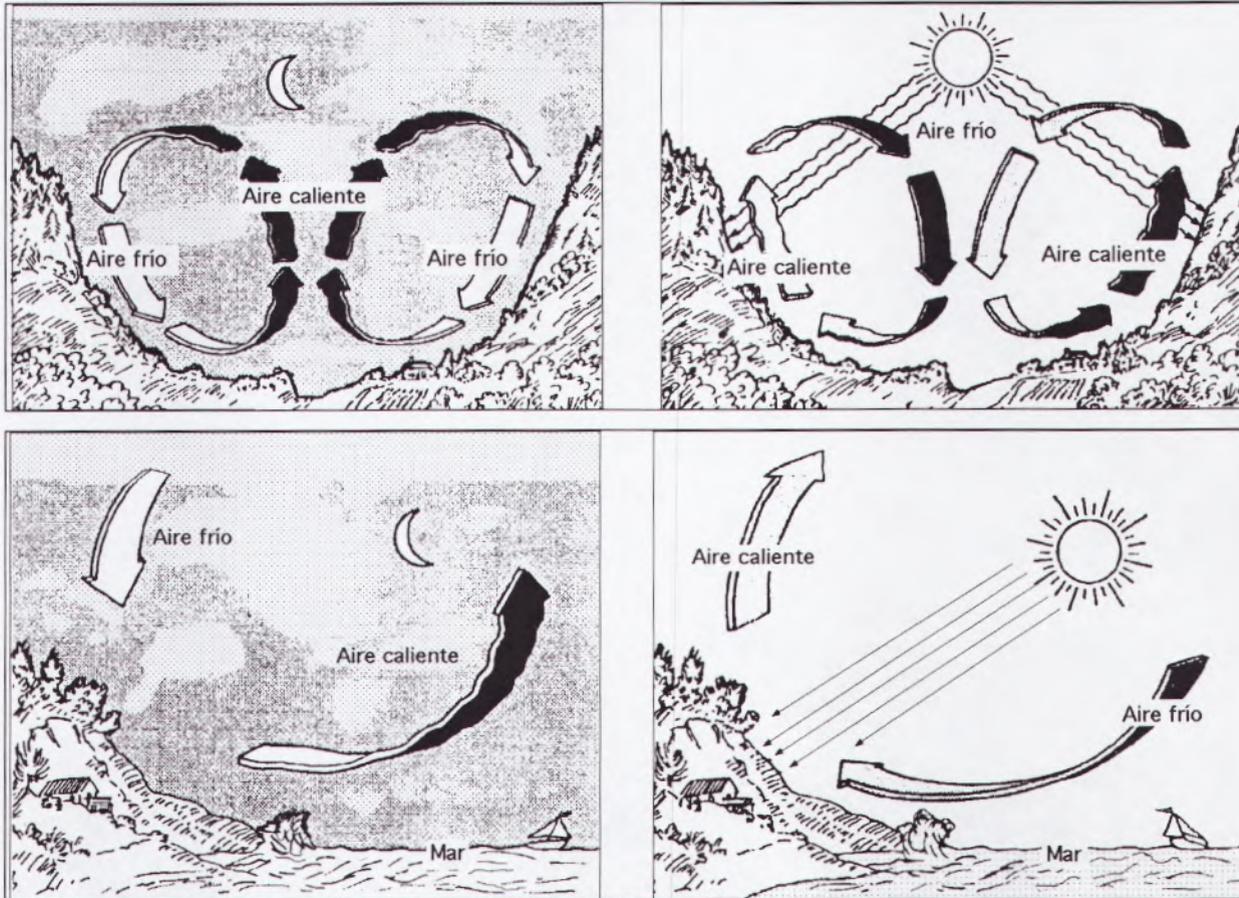
**b) Características del viento (turbulencia).**

Rasgos topográficos locales, que incluyen formaciones geográficas, flora y estructuras artificiales, determinan la diferencia entre un recurso eólico utilizable y uno que no lo es. (Fernández, 08)

**c) Densidad del aire.**

Temperaturas bajas producen una densidad del aire más alta. Mayor densidad significa más fluidez de las moléculas en un volumen de aire dado y más fluidez de las moléculas a través de las palas de la turbina produce un

rendimiento más alto de la potencia, para una velocidad del viento dada.  
(Fernández, 08)



*Figura 2.4: Densidades del viento. (Moragues, 09)*

### 2.3.2. Escala de Beaufort.

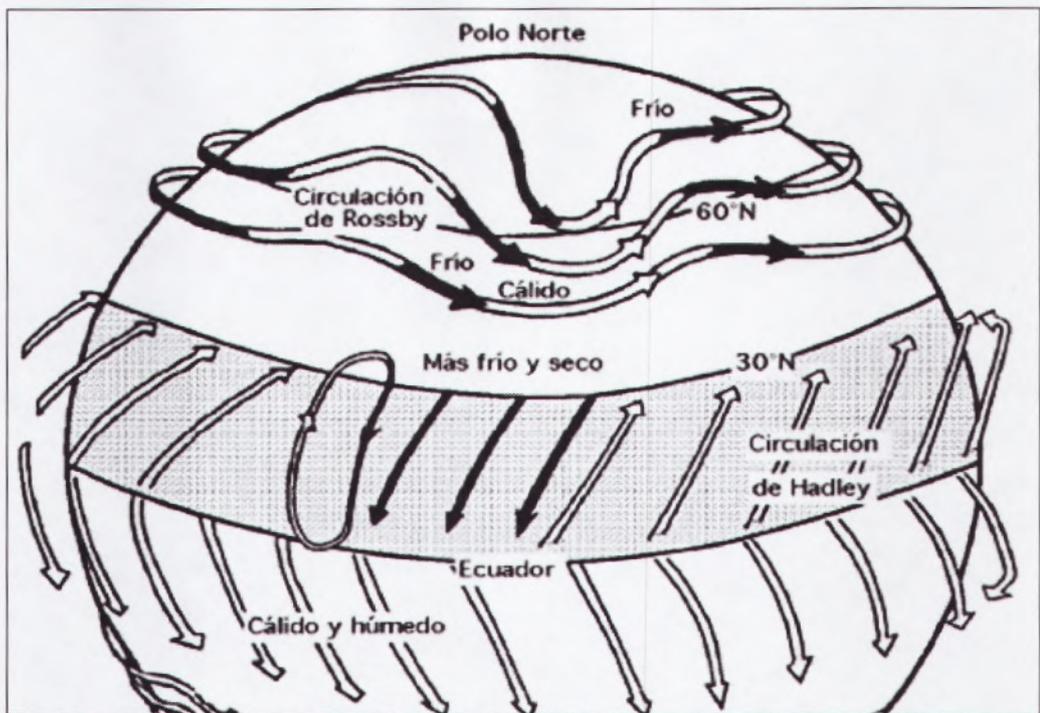
La escala de Beaufort es una medida empírica para la intensidad del viento, basada principalmente en el estado del mar, de sus olas y las fuerzas del viento. Su nombre completo es Escala de Beaufort de la fuerza de los vientos.

Grados Beaufort	Nudos		m/s		km/h		Descripción	Presión s/superficie Plana en daN/m <sup>2</sup>	
	de	a	de	a	de	a		de	a
0	<	1	0	0.2	<	1	Calma		
1	1	3	0.3	1.5	1.0	3.0	Ventolina	0.0	0.3
2	4	6	2.1	3.1	7.4	11.1	Brisa Suave	0.6	1.2
3	7	10	3.6	5.1	13.0	18.5	Brisa Leve	2	3
4	11	16	5.7	8.2	20.4	29.7	Brisa Moderada	4	9
5	17	21	8.8	10.8	31.5	38.9	Viento Refrescante	10	15
6	22	27	11.3	13.9	40.8	50.0	Viento Fuerte	17	25
7	28	33	14.4	17.0	51.9	61.2	Viento muy Fuerte	27	38
8	34	40	17.5	20.6	63.0	74.1	Temporal	40	55
9	41	47	21.1	24.2	76.0	87.1	Temporal Fuerte	58	76
10	48	55	24.7	28.3	89.0	101.9	Temporal muy Fuerte	79	104
11	56	63	28.8	32.4	103.8	116.8	Tempestad	108	137
12	64	71	32.9	36.5	118.6	131.6	Huracán	141	174
13	72	80	37.1	41.2	133.4	148.3		179	220
14	81	89	41.7	45.8	150.1	164.9		226	273
15	90	99	46.3	51.0	166.8	183.5		279	338
16	100	108	51.5	55.6	185.3	200.1		344	402
17	109	118	56.1	60.7	202.0	218.7	Ciclón	409	480

**Tabla 2.1:** Escala de Beaufort. (Martinez, 08).

### 2.3.3. Régimen de vientos a escala planetaria.

En las zonas donde la radiación solar es más intensa (la zona ecuatorial), la tierra acumula calor principalmente en el océano, todo lo contrario en los Polos que se pierde el calor. Sin embargo, ni en la zona del Ecuador ni los Polos vienen a ser, por consecuente, los lugares más calientes, o más fríos, de la superficie terrestre. (Fernandez, 09).



**Figura 2.5:** *Circulación general del aire en la superficie. (Sánchez, 09).*

Por la línea ecuatorial circulan vientos de diferentes densidades y provenientes de diferentes corrientes, esto quiere decir que el Ecuador está situado en una zona por la que corren vientos en diferentes direcciones y velocidades, haciéndolo un lugar propicio para la instalación de los dispositivos eólicos.

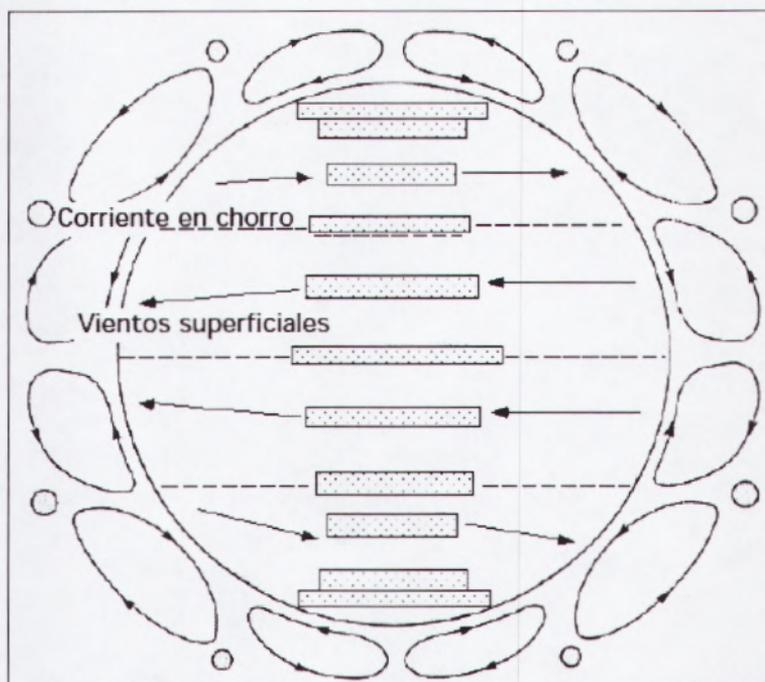
Existe un axioma que indica el movimiento o sentido de giro del viento:

***“Cuando el gradiente de presión y el gradiente de temperatura tienen distinta dirección, se produce una circulación de aire de sentido el camino más corto desde el gradiente de presión al de temperatura”.*** (Bjerknes).

Explicándolo de manera más específica, la circulación de aire (como la corriente eléctrica) toma el sentido de menor resistencia del diferencial de presión al de temperatura.

Generalmente, los desplazamientos verticales del aire no son muy comunes en relación a los desplazamientos horizontales, por lo que se puede considerar que la dirección del desplazamiento del viento es en general horizontal. (Fernández, 08).

Los vientos alisios son aquellos que al calentarse el aire ascienden y son sustituidos por el aire más próximo a los Polos, lo cual se denomina circulación de Hadley.



*Figura 2.6: Direcciones de viento. (Sánchez, 09).*

Un esquema de vientos generales es el siguiente:

- Entre  $90^{\circ}\text{N}$  y  $60^{\circ}\text{N}$ , aire ártico (muy frío) (Circulación de Rossby).
- Entre  $60^{\circ}\text{N}$  y  $40^{\circ}\text{N}$ , aire polar (frío).
- Entre  $40^{\circ}\text{N}$  y  $5^{\circ}\text{N}$ , aire tropical (templado).
- Entre  $5^{\circ}\text{N}$  y  $5^{\circ}\text{S}$ , aire ecuatorial (cálido).

En el límite de estas diferentes masas de aire existen zonas conflictivas o zonas frontales; así se puede decir que:

- Entre el aire ártico y el aire polar existe el frente ártico.
- Entre el aire polar y el aire tropical, existe el frente polar.
- Entre el aire tropical y el aire ecuatorial, existe la zona de convergencia intertropical, en la que soplan vientos regulares (alisios) del Nordeste, contorneando el anticiclón de las Azores, (Corriente de Hadley).

## 2.4 La energía eólica en cifras.

La energía eólica creció en el mundo un 31% en 2009. (Ver figura 2.7 y tabla 2.2)

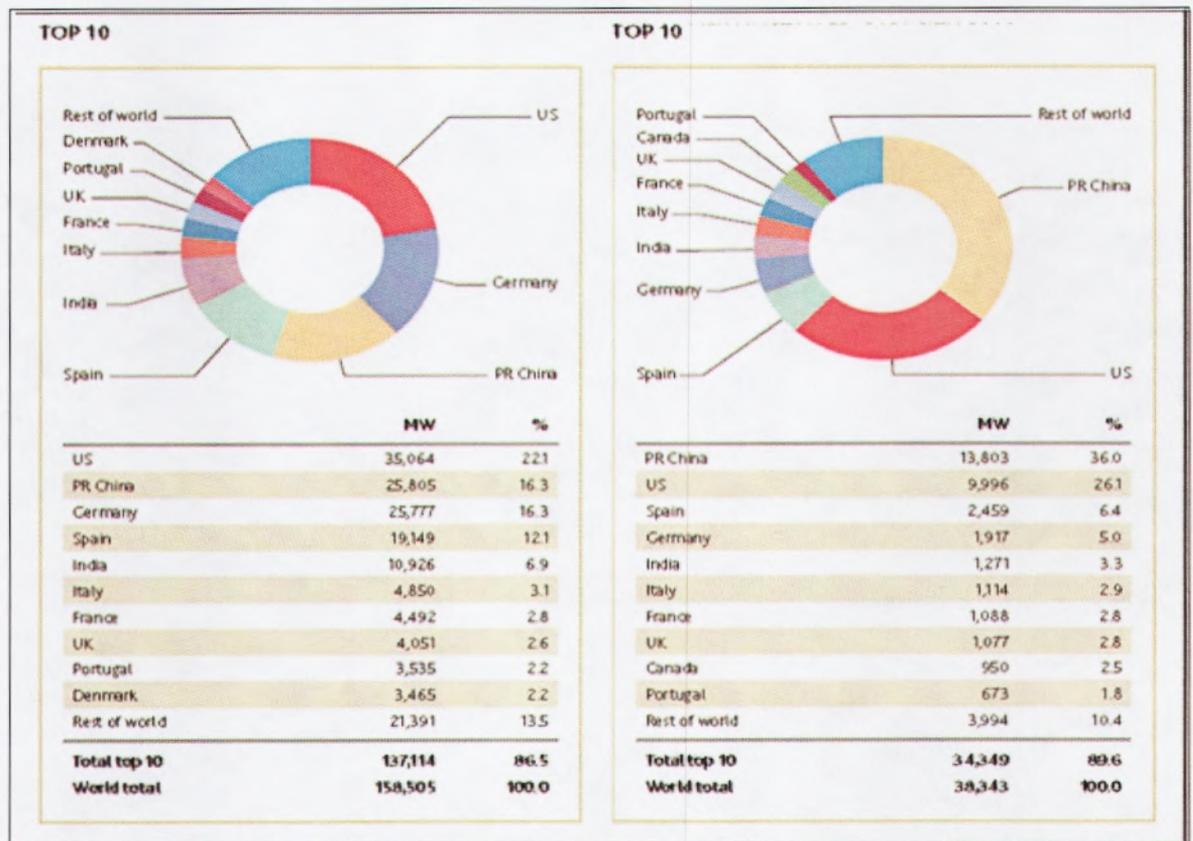


Figura 2.7: Top 10 MW acumulados e instalados al año 2009. (AEE, 09)

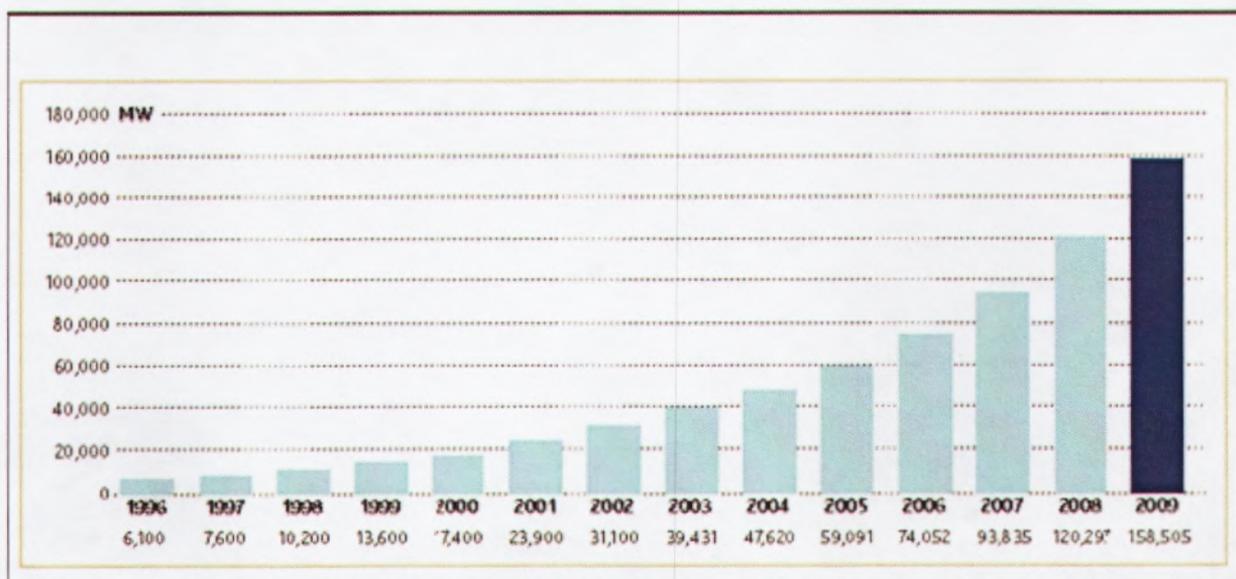


Tabla 2.2: Crecimiento de la capacidad instalada 1966-2009. Fuente: AEE

La energía eólica evitó en 2009 la emisión de 22 millones de toneladas de CO<sub>2</sub>.

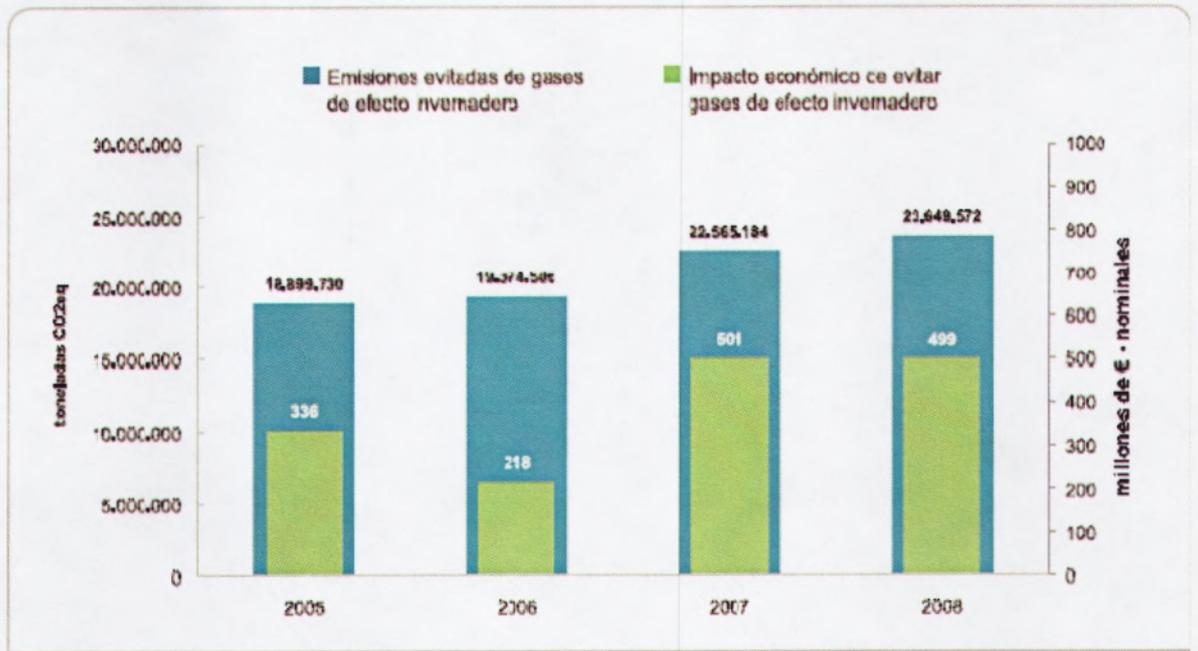


Figura 2.8: Emisiones CO<sub>2</sub> 2005-2008. (APPA, 08)

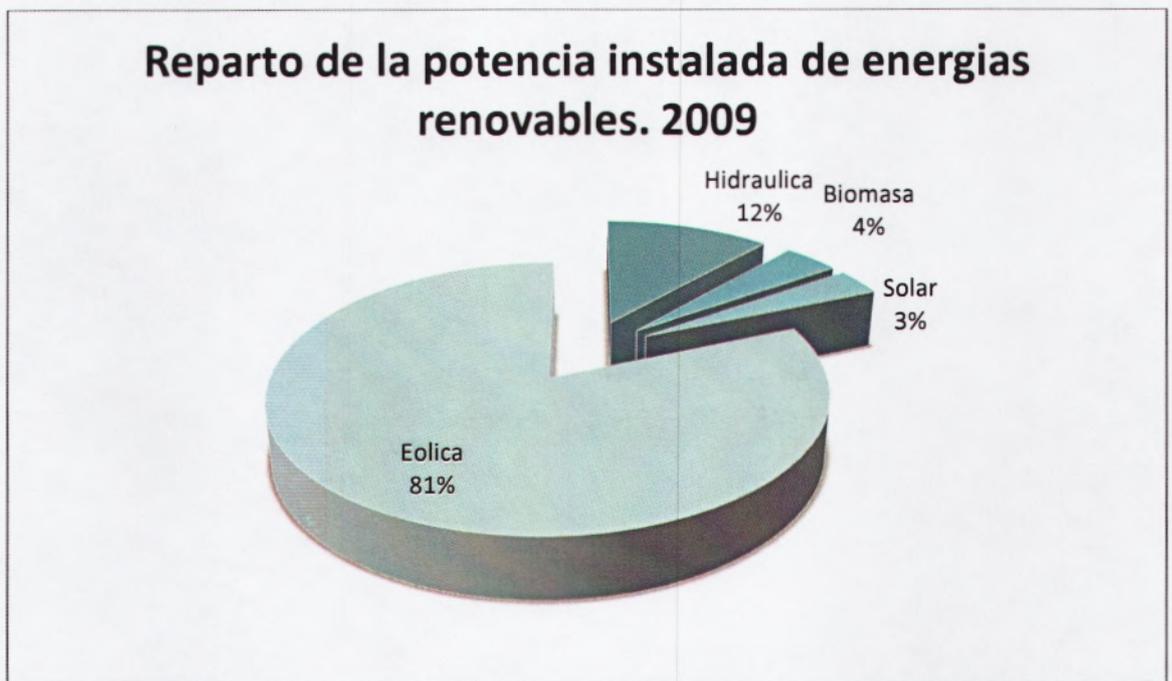


Figura 2.9: Reparto de potencia instalada de energías renovables. (APPA, 08)

## **2.5 La energía eólica en el Ecuador.**

El primer parque eólico en el Ecuador se encuentra operativo desde el año 2007 en la isla San Cristóbal del Archipiélago de Galápagos, el cual ha desplazando en un 52% el consumo de combustibles fósiles utilizados en la generación termoeléctrica. Tiene una potencia instalada de 2,4 MW (3 x 800 KW), las torres son de 51,5 m de altura y las palas cubren un diámetro de 59m.

Se estima una producción de 4'000.000 de Kwh/año, con un impacto en la reducción de emisiones de CO2 de 2800-3000 toneladas por año.

### **2.5.1 Proyectos de interés en el Ecuador (actualmente).**

- Villonaco, Loja: Estudios finalizados, 15 MW
- Membrillo, Loja: Estudios de pre factibilidad, 45 MW
- Las Chinchas, Loja: Estudios de factibilidad, 10-15 MW
- Salinas, Imbabura: Estudios finalizados 15 MW
- Santa Cruz, Galápagos: 3.2 –3.6 MW – Finalizado Estudios – Proceso
- Minas de Huascachaca, Azuay: Factibilidad 30 MW – ELECAUSTRO S.A.

### **2.5.2 Barreras de la energía eólica.**

En general, en los países en vías de desarrollo existen barreras de diferente índole que obstaculizan la inserción de la energía eólica como una fuente de generación.

Los que presentan un mayor grado de afectación son los recursos financieros, los recursos tecnológicos y capacitación profesional.

- *Barreras de información.*

A nivel mundial existe un gran vacío en lo que respecta a la información sobre la energía eólica. Existe un gran desconocimiento entre los desarrolladores de proyectos, el estado, universidades y población rural en sistemas eólicos de gran

capacidad. Existe cierta experiencia en sistemas eólicos pequeños (en su gran mayoría sistemas eólicos para bombeo de agua) pero esta iniciativa no es coordinada y no posee información del balance energético de los países.

Con respecto a la información, existen carencias de mapas de vientos que pueda orientar el desarrollo potencial de la energía eólica. (Le Gourieres, 83).

○ *Barreras tecnológicas.*

Las barreras tecnológicas son una problemática para la generación energética en sistemas eólicos, entre estas, la de mayor afectación es la variabilidad del viento, lo que significaría que no se podría disponer de la energía cuando el sistema lo demande y que se requiere un mecanismo de almacenamiento o compensación de otras fuentes. (Le Gourieres, 83).

○ *Barreras financieras.*

El financiamiento presenta un mayor grado de complicación en la viabilidad de este tipo de proyectos, entre estas tenemos:

- ❖ **Inversión inicial:** Esta es uno de los principales obstáculos para la realización de un proyecto eólico. Aunque, el costo total de operación, producción y mantenimiento sean bajos, este es un factor limitante.

Otra dificultad que se presenta frente a la alta inversión inicial, es a la recuperación de la inversión y se requiere obtener fuentes de financiamiento a largo plazo. En países que están en vías de desarrollo no hay la facilidad de financiamiento en lo que respecta al plazo, lo cual inhibe su progreso.

- ❖ **Riesgo de inversión:** La variación de las fluctuaciones del viento, es un factor determinante para el cual se debe efectuar estudios detallados de las características del viento a largo plazo, con el fin de asegurar y minimizar el riesgo de una fallida inversión inicial. (Le Gourieres, 83).

○ *Falta de capacitación:*

Al igual que los recursos financieros, la capacitación es un factor determinante. Es de vital importancia contar con profesionales capacitados en todas las áreas (instalación,

mantenimiento, control, etc.). La generación mediante parques eólicos o aerogeneradores ha tomado fuerza los últimos años lo que nos indica que existen profesionales destacados y con experiencia, aunque debe existir mayor fomento (profesional y social) del tema ya que por su dinámica creciente habrá cambios futuros. (Le Gourieres, 83).

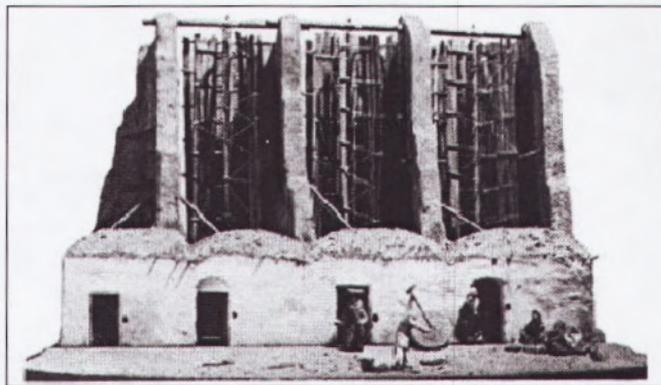
## **Sistemas eólicos.**

### **2.6 Historia de los aerogeneradores y acontecimientos importantes.**

Históricamente el viento ha proporcionado energía para desplazarse sobre el mar, para bombear agua y muchas otras actividades a lo largo de muchos siglos.

Existen referencias de molinos de viento en la antigua literatura china, aunque la primera descripción técnica parece que fue dada por Hero de Alejandría.

Hace mil años, los persas construían molinos de eje vertical con los que aprovechaban un viento constante que siempre iba en una misma dirección en cierta época del año.



*Figura 2.10: Molino Persa. (Urquia, 06).*

Durante la Edad Media (siglos V – XV) se construyeron muchos molinos llegando al extremo de que los feudales se reservaban el derecho de autorizar su construcción, como modo de obligar a sus súbditos a moler los granos en los molinos de su propiedad. Plantar árboles cerca de ellos estaba prohibido pues debía asegurarse la libre incidencia del viento. (Urquia, 82).

Las primeras máquinas eólicas de las que se tiene documentación datan del siglo VI d.c. Estas, eran de eje vertical y se las utilizaba para moler granos y bombear agua en la región de Sijistán, entre Irán y Afganistán. El uso de estos molinos, denominados panémonos, se remonta según distintos autores a entre 200 y 500 años antes de nuestra era. En el siglo XI d.c. los molinos de viento eran extensivamente utilizados en el Medio Oriente. (Tuleda, 06)

Es a partir de los siglos XII-XIII cuando empieza a generalizarse el uso de los molinos de viento para la elevación de agua. Recién en el siglo XIII y como consecuencia de las Cruzadas fueron introducidos en Europa.

Europa para esta época estaba llena de molinos, sobre todo en Bélgica y en los Países Bajos. Los molinos de Holanda estaban constituidos por 4 aspas de lona, mientras que los de Baleares y Portugal tenían 6, y los de Grecia, 12. De aquellos molinos con gran número de palas, resultaban velocidades de rotación relativamente bajas y un funcionamiento útil a partir de velocidades del viento del orden de 2 m/s.

En el siglo XIV los holandeses tomaron el liderazgo en el mejoramiento de los molinos y comenzaron a utilizarlos extensivamente para drenar las regiones pantanosas del río Rin. A fines del siglo XV se construyeron los primeros molinos de viento para la elaboración de aceites, papel y procesar la madera en aserraderos.

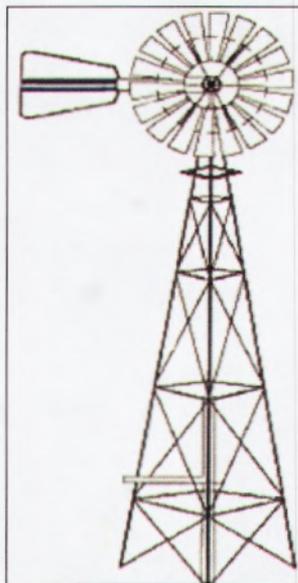


*Figura 2.11: Molinos en el dique del polder Overwaard. (Ramsdell, 07).*



**Figura 2.12:** Vista aérea del Flevopolder, en los Países Bajos. (Ramsdell, 07).

El desarrollo de los molinos de viento se interrumpe con la revolución industrial y la utilización masiva de vapor, la electricidad y los combustibles fósiles como fuentes de energía motriz. Es sin embargo en la segunda mitad del siglo XIX cuando tiene lugar uno de los más importantes avances en la tecnología del aprovechamiento del viento, con la aparición del popular "modelo multipala americano", utilizado para bombeo de agua prácticamente en todo el mundo, y cuyas características habrían de sentar las bases para el diseño de los modernos generadores eólicos. (Urquia, 82).



**Figura 2.13:** Modelo multipala americano. (Rapallini, 09).

Fue entre las guerras mundiales cuando aparecieron, como consecuencia de los progresos técnicos de las hélices de aviación, y con ellas los proyectos de grandes

aerogeneradores de dos o tres palas. Se tendió a construir casi únicamente los de dos, ya que resultan más baratos. Incluso se pensó en utilizar una única pala equilibrada con un contrapeso. Actualmente predominan los molinos tripalas. Estos aerogeneradores giran más rápidamente que los multipalas, lo que constituye una ventaja cuando se trata de alimentar máquinas de gran velocidad de rotación como los alternadores eléctricos. Los grandes aerogeneradores están situados en lo alto de una torre tronco-cónica de acero. (Ramos, 08).

A mediados del siglo XIX se empleaban unos 9000 molinos en los Países Bajos, en múltiples aplicaciones, algunos de hasta 65 Kw (90 HP). Con la introducción de las máquinas de vapor durante la Revolución Industrial comenzaron a declinar y menos de 1000 máquinas estaban en condiciones de operación a mediados del siglo XX.

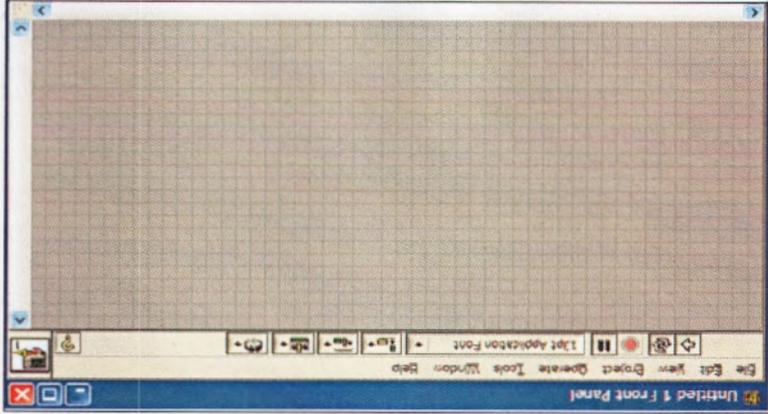
En ésta época, en Estados Unidos, había más de seis millones de pequeños aeromotores, de potencia inferior a 1 C.V. empleados en el bombeo de agua y la generación de electricidad. Estos realizaban en 1890 un trabajo estimado en mil millones de Kw/h.

En Dinamarca, al finalizar el siglo XIX, cerca de 3000 molinos eran utilizados con fines industriales y cerca de 30.000 en casas y granjas, proveyendo una potencia equivalente a 200 Mw. (Sánchez, 09).

Los aerogeneradores de eje vertical tienen la ventaja de adaptarse a cualquier dirección del viento. Por ello se los llama panémonos (todos los vientos). No precisan dispositivos de orientación. En su forma más moderna derivan todos ellos del inventado den 1925 por el ingeniero Francés Darrieus, patentado en Estados Unidos y luego caído en un olvido casi total. (Tuleda, 06)

El primer aerogenerador de este tipo fue construido en Francia, en 1929, pero se rompió a causa de una violenta tormenta. La compañía electromecánica construyó e instaló en Bourget un aerogenerador de dos palas de 20 metros de diámetro. El aparato fue destruido por las ráfagas de viento. (Monteso, 08).

**Figura 3.1: Vista principal del Panel Frontal. (National Instruments).**



El Panel Frontal es la interfaz con el usuario. Los usuarios podrán observar los datos del programa actualizados en tiempo real (como van fluyendo los datos; un ejemplo sería una calculadora, donde el usuario ingresa las entradas, y se muestra el resultado en la salida). En esta interfaz se definen los *controles* (los usamos como entradas; pueden ser botones, marcadores etc.) e *indicadores* (los usamos como salidas; pueden ser gráficas).

### 3.5.1 Panel Frontal.

- Panel Frontal
- Diagrama de Bloques

Cada VI consta de dos partes diferenciadas:

Los programas desarrollados con Labview se llaman Instrumentos virtuales, o VIs, y su origen provenía del control de instrumentos, aunque hoy en día se ha expandido ampliamente no sólo al control de todo tipo de electrónica (Instrumentación electrónica) sino también a su programación embebida.

### 3.5 VIs.

todos sus variables de entrada información o que las tareas predecesoras hayan terminado de ejecutarse. Debido al lenguaje gráfico el compilador con que cuenta Labview, es más versátil ya que sobre el mismo código de programación se puede ver fácilmente el flujo de datos, así como su contenido.

### 3.5.2 Diagrama de bloques.

Es el programa propiamente dicho, donde se define su funcionalidad, aquí se colocan iconos que realizan una determinada función y se interconectan entre sí mediante un cableado virtual.

Para realizar el diagrama de bloques se buscan las estructuras necesarias en el menú de funciones, estructuras y constantes. Los terminales aparecen automáticamente en el diagrama de bloques al armar el panel frontal.

A continuación se muestra el flujo de programa de un VI, y se compone de cinco tipos de elementos.

- Las terminales de conexión de los indicadores y de los controles del panel frontal. Se nota que las líneas del dibujo de la conexión de los controles es más gruesa que la de los indicadores, para diferenciarlos.
- Las constantes.
- Las funciones y cajas negras, donde se procesan las señales.
- Las estructuras de programación
- Los cables que conducen las diferentes señales, los cuales varían según la señal que conducen.

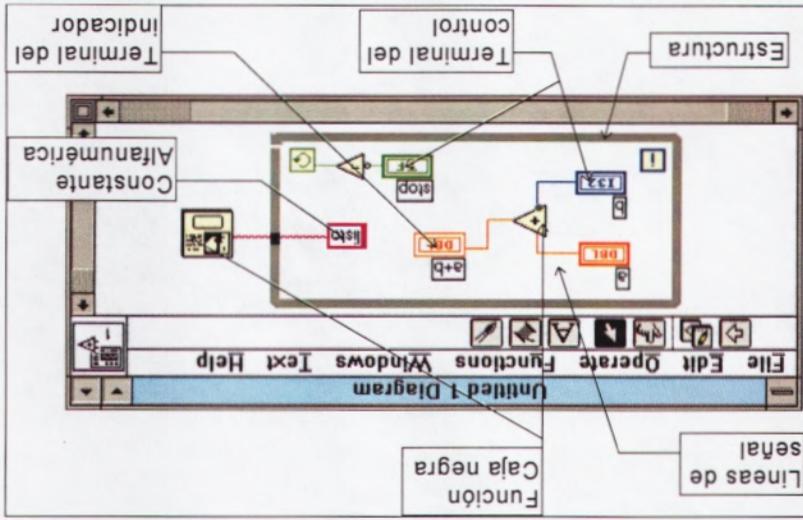


Figura 3.2: Diagrama de bloques. (National Instruments)

La idea es crear un sistema de programación modular, donde cada rutina creada llame otras rutinas, y estas a su vez otras de menor nivel, en una cadena jerárquica con cualquier límite deseado. Así cuando se use un módulo, no se requiere saber cómo funciona internamente, simplemente solo basta conocer sus entradas y salidas para ser así usado.

Se usa para utilizar el programa creado como subrutina en otro programa, donde el icono será la caja negra, y las entradas son las conexiones a los controles del programa subrutina, y las salidas son las conexiones a los indicadores del mismo subprograma. Al crear el icono, se conecta a través del alambre virtual a los indicadores y controles en la forma que se desee que se distribuyan las entradas y salidas en la caja negra, tal como en un circuito integrado.

### **3.5.3 Icono de conexión.**

Suele haber una tercera parte *icono/connector* que son los medios utilizados para conectar un VI con otros VIs.

## CAPÍTULO 4

### DISEÑO EXPERIMENTAL A ESCALA DE UN AEROGENERADOR.

#### 4.1 Descripción del prototipo.

Para el diseño y construcción del prototipo propuesto en este trabajo se han tomado en cuenta, diferentes áreas de la ingeniería, tales como:

- Mecánica.
- Eléctrica.
- Física.
- Modelos matemáticos.
- Aerodinámica.

El aparato eólico está estructurado físicamente (hardware) de una parte mecánica y otra eléctrica, dejando la parte de control (software), al programa desarrollado para la supervisión de los parámetros básicos que participan de la generación a través de sistemas eólicos. Tanto las partes del hardware y software serán detalladas posteriormente de manera individual.

Los elementos de construcción fueron elegidos bajo diferentes parámetros de entre los cuales podemos destacar: fiabilidad del material, peso, calidad, eficiencia y costo, siendo estos 3 últimos los de mayor consideración.

El prototipo a escala contiene básicamente los mismos elementos que podemos encontrar en una turbina eólica de tamaño industrial, con diferencias en su tamaño y capacidad las cuales, son características importantes de las que depende el resultado final de generación.

A continuación se describirán detalladamente las tres partes que forman en su totalidad al generador.

## 4.2 Parte Mecánica

### 4.2.1. Materiales

El siguiente listado muestra algunos materiales usados en la construcción de los diferentes elementos que constituyen la estructura física del prototipo.

- Gabinete: Plancha de acero 1/25" revestido de poliéster.
- Cuadrante de puerta de gabinete: plancha de acero 1" x 2mm revestido de poliéster.
- Base: Hierro negro, tubo 2 1/2" revestido de poliéster.
- Carcasa del aerogenerador: hierro fundido y plancha de acero.
- Eje y piñones: acero de transmisión.
- Aspas: Plástico.
- Vela: plancha de acero.

### 4.2.2. Descripción y funcionamiento de los elementos mecánicos.

#### ➤ Base.

#### Descripción.

La base soporta la estructura física del aerogenerador con el fin de balancear el peso de manera adecuada.



*Figura 4.1: Base del aerogenerador. (Fotografía tomada durante el desarrollo del prototipo).*

## ➤ Aspas.

### Descripción.

Las aspas son la superficie sobre la cual el viento actuará para dar movimiento al rotor y por tanto al eje. Estas aspas son hechas de plástico ligero y son siete (7) en total.

### Diseño.

Durante la etapa de diseño de las aspas, se presenta una problemática de tipo estructural. Esto se debe a la dicotomía de fabricar aspas muy resistentes pero que a la vez que no presenten una masa robusta que complique el funcionamiento normal del aerogenerador.

Las aspas (en general) serán sometidas a condiciones de trabajo muy duras como fenómenos de corrosión, desgaste, contracciones, dilataciones, vibración y muchas otras, de ahí la importancia del material con que se construyan. Existen varias opciones de materiales para la fabricación de las aspas, entre los cuales se derivan elementos de bajo y alto presupuesto.

Pueden ser hechas de tela o madera por nombrar algunos elementos que no presentan un mayor gasto, pero la solución más interesante consiste en utilizar aleaciones metálicas, consiguiendo así cierta rigidez de las aspas. Otras alternativas como la fibra de vidrio también son recomendadas.



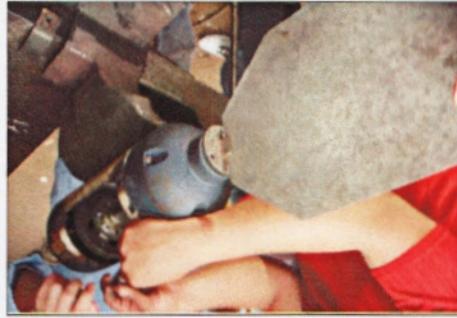
*Figura 4.2: Aspas del prototipo. (Fotografía tomada durante el desarrollo del prototipo).*

Se conoce como eje de transmisión a todo objeto axisimétrico diseñado para transmitir potencia. Estos elementos constituyen una parte fundamental de las

#### Descripción.

##### ➤ Eje.

*Figura 4.3: Carcasa con vela incorporada. (Fotografía tomada durante el desarrollo del prototipo).*



La vela es un dispositivo giratorio que consta de una placa plana que al ser golpeada por el viento gira libremente, en dirección a la fuerza actuante, en este caso la fuerza del viento. La vela para este prototipo ha sido fabricada de plancha de acero.

#### Descripción.

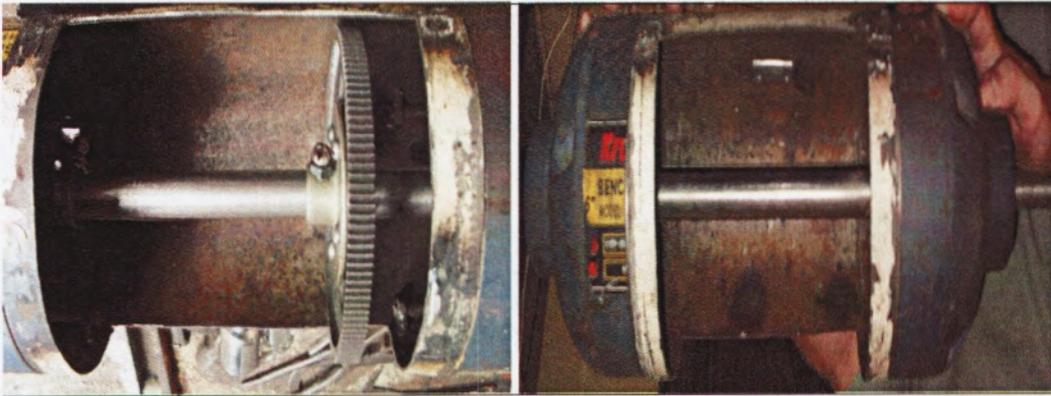
##### ➤ Vela.

La carcasa alojara en su interior a todos los elementos de montaje mecánico y eléctrico que originan el funcionamiento deseado del aerogenerador. Es básicamente una carcasa de protección (caparazón) cuya función es impedir que aquellos elementos estén dispuestos a las calamidades exteriores, asegurando así una mayor longevidad y mayor confiabilidad en el equipo.

#### Descripción.

##### ➤ Carcasa.

transmisiones mecánicas y son ampliamente utilizados en una gran diversidad de máquinas.

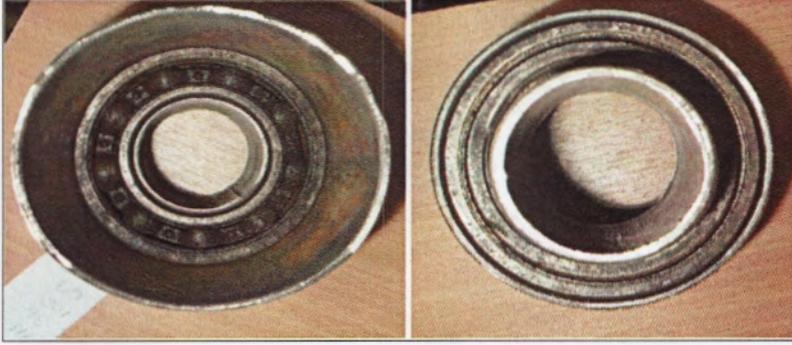


*Figura 4.4: Eje de transmisión. (Fotografía tomada durante el desarrollo del prototipo).*

#### ➤ Rodamientos.

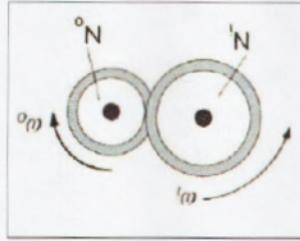
##### Descripción.

Los rodamientos, también denominados rulimanes o cojinetes, son elementos mecánicos que reducen la fricción entre un eje y las piezas conectadas a éste, que le sirve de apoyo y facilita su desplazamiento. Los rodamientos usados en el eje giratorio del aerogenerador son de tipo RS5025.



*Figura 4.5: Rodamientos. (Fotografía tomada durante el desarrollo del prototipo).*

Figura 4.6: Engranajes externos. (Freeman, 97)



a) Engranajes externos.

Existen dos formas de interacción entre los engranajes, estas son:

del engranaje de salida.  $N_1$  y  $W_1$  son el número de dientes en, y la velocidad angular del engranaje de entrada respectivamente, mientras  $N_0$  y  $W_0$  corresponden al número de dientes y velocidad

Donde:

$$\eta = \pm \frac{W_1}{W_0} = \pm \frac{N_1}{N_0} \quad (4.1)$$

La relación de velocidad está dada por:

existente en el tren.

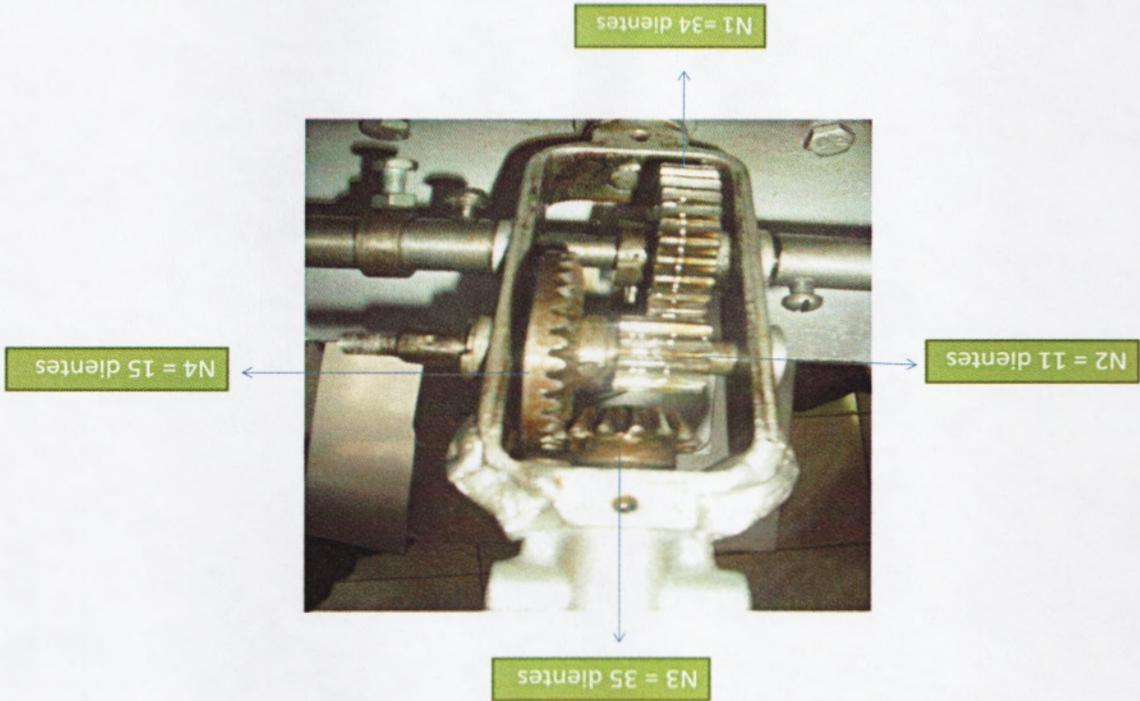
Debido al contacto entre dichos engranajes, entrarán en juego diversos fenómenos físicos que se deben tomar en cuenta para efectos de cálculos teóricos y pruebas. Inevitablemente y como es normal, durante el funcionamiento del sistema, habrán cambios en la velocidad angular y torque entre un engrane de "entrada" y otro de "salida", por así llamar a los engranajes actuantes independientemente de la cantidad dispuestos entre sí, formando una cadena se denomina tren de engranajes.

Un engranaje es un mecanismo que se utiliza para la transmisión de potencia de un componente a otro al interior de una máquina. Al grupo de dos o más engranajes

**Descripción.**

➤ **Caja de engranajes (Gear box).**

**Figura 4.8:** Caja multiplicadora. (Fotografía tomada durante el desarrollo del prototipo).

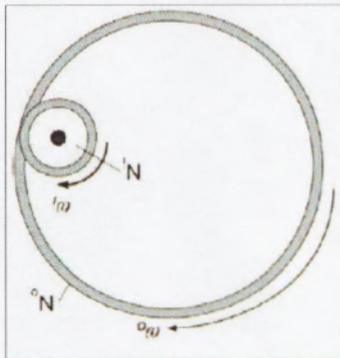


en la siguiente figura:

El sistema de engranajes que comprende la caja multiplicadora es como se muestra engranajes externos, o un signo positivo indica el uso de engranajes internos.

En la ecuación (6.1), un signo negativo es usado cuando tenemos el caso de

**Figura 4.7:** Engranajes internos. (Freeman, 97).



b) Engranajes internos.

La fuerza del viento entonces, es transmitida hacia el eje a través de las aspas, y a su vez el eje mecánicamente transmite movimiento hacia la caja de velocidades, que consta de cuatro piñones. Al interactuar estos engranes entre sí, existirán cambios en la velocidad angular en cada uno de ellos, y por medio de la transmisión que ejercen los unos entre otros logran finalmente mover el eje al cual se encuentra acoplada la dinamo para lograr el objetivo de generar energía eléctrica.

La fuerza cinética que contiene el viento actúa directamente sobre las aspas del aerogenerador logrando moverlas en dirección de la corriente antes mencionada. Claro está que para lograr este movimiento de las aspas debe existir una fuerza suficiente por parte de la corriente de viento para romper la inercia del conjunto aspas – eje.

#### 4.2.3. Explicación parte mecánica.

El valor de  $\eta$  nos indica la relación de vueltas desde el eje principal (proporcionado por el movimiento de las aspas), hacia el eje de la dinamo. Entonces la relación es de 1/7.20, en otras palabras, por cada vuelta o ciclo completo que gire el eje principal o las aspas en movimiento, el eje de la dinamo girará 7.20 veces. Comprobando de esta manera el funcionamiento correcto de la caja multiplicadora de velocidades y sus respectivos engranajes.

$$\eta = \left(-\frac{N_1}{N_2}\right) \left(-\frac{N_3}{N_4}\right) = \left(-\frac{34}{11}\right) \left(-\frac{15}{35}\right) = (-3.09)(-2.33) = 7.20$$

Aplicando la ecuación (4.1) tenemos:

#### 4.3 Parte eléctrica.

##### 4.3.1. Descripción y funcionamiento de los elementos eléctricos.

###### ➤ Dínamo.

###### Descripción.

Una dinamo es un generador eléctrico destinado a la transformación de energía mecánica en energía eléctrica mediante el fenómeno de la inducción electromagnética. La dinamo resulta de emplear de forma inversa un motor eléctrico. La corriente que se obtiene puede ser tanto continua, como alterna dependiendo de su principio de generación y la disposición de sus elementos internos. El dinamo utilizada puede producir de 12 a 25 V. Producirá doce voltios si la carga es conectada a sus terminales de tierra y el terminal vivo H.



**Figura 4.9:** Terminales de la dinamo. (Fotografía tomada durante el desarrollo de pruebas eléctricas).

###### Funcionamiento.

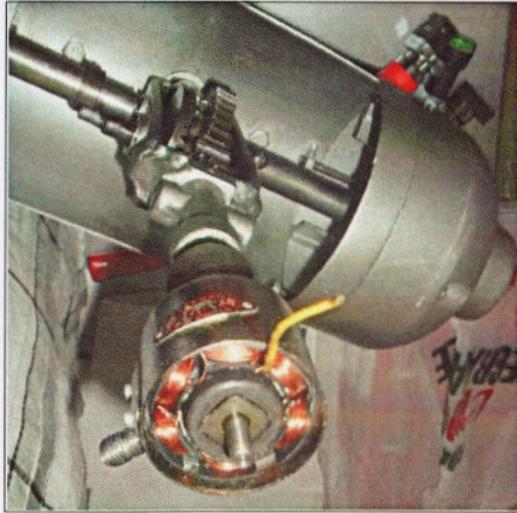
Para este trabajo se ha seleccionado una dinamo que consta de un imán permanente, que gira al interior de un núcleo compuesto por bobinas. La corriente generada es producida cuando el campo magnético creado por el imán (rotatorio) atraviesa una bobina e induce una corriente eléctrica.

Una batería es un acumulador, que como su nombre lo indica almacena energía eléctrica utilizando procedimientos electroquímicos. Las características eléctricas de la batería utilizada son:  $V = 12 \text{ VDC}$ ,  $A/h = 5.0$

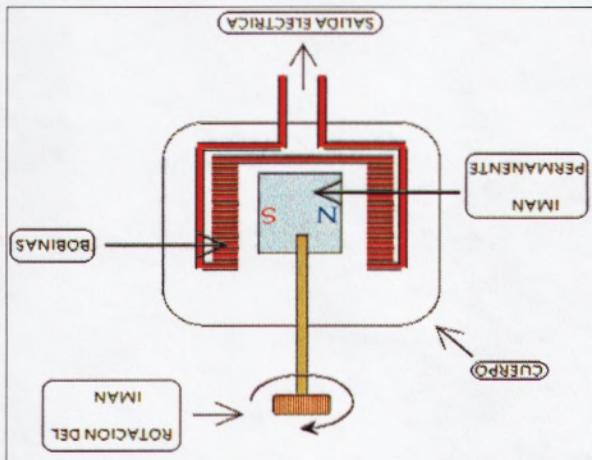
**Descripción.**

➤ **Batería.**

*Figura 4.11: Dinamo desapado para realizar pruebas. (Fotografía tomada durante el desarrollo de pruebas eléctricas).*



*Figura 4.10: Elementos internos de una dinamo. (EOLICCAT).*



Un potenciómetro lineal es un transductor de distancia y posición con contacto y rozamiento. La medida se obtiene mediante el deslizamiento de unas escobillas sobre

### Descripción.

#### ➤ Potenciómetro lineal.

Estas circunstancias son, en el caso de los acumuladores, el cierre del circuito externo, durante el proceso de descarga, y la aplicación de una corriente, igualmente externa, durante la carga.

adecuadas.

oxidación, y que a su vez puedan retornar al estado primero en circunstancias componentes no resultan consumidos ni extintos, sino que, cambian su estado de electrones) y el otro se reduce (gana electrones); es decir, un proceso cuyos reducción-oxidación (redox), en el cual uno de los componentes se oxida (pierde Su funcionamiento está basado esencialmente en un proceso reversible llamado terminal sea de carga positiva).

en su terminal positivo una gran ausencia de electrones (lo que causa que este producirá, en su terminal negativo, una gran cantidad de electrones (carga negativa) y sumergidos en un electrolito. La batería, por medio de una reacción química Una batería consta, en general, de dos electrodos, del mismo o de distinto material,

#### Funcionamiento de la batería.

*Figura 4.12: Batería. (Fotografía tomada durante el desarrollo de pruebas eléctricas).*



Los sensores inductivos son una clase especial de sensores que sirven para detectar materiales metálicos ferrosos. Este sensor se utilizará para el conteo de las RPM (revoluciones por minuto), del eje. El equipo a utilizar tiene un rango de voltaje nominal de 10 a 30 V DC.

### Descripción.

#### ➤ Sensor inductivo.

Este dispositivo es el que nos servirá para determinar la dirección de la turbinas y por ende la dirección del viento. El potenciómetro se encuentra encapsulado en un dispositivo mecánico especialmente diseñado para retener su forma, al mismo tiempo este dispositivo permite mantener fijo el potenciómetro mientras la base gira a razón de la dirección del viento, de esta manera se envía una señal de desplazamiento angular hacia la tarjeta de adquisición de datos y a través de esta al software.

### Funcionamiento.

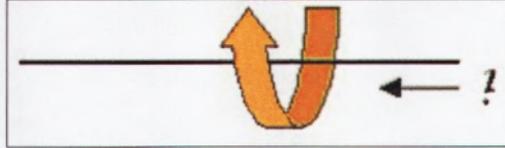
**Figura 4.13:** Potenciómetro lineal de  $10K\Omega$ . (Fotografía tomada durante el desarrollo de pruebas eléctricas).



una pista plástica resistiva, que en función del punto donde se encuentre, dará un valor proporcional en resistencia. En este tipo de potenciómetros la resistencia es proporcional al ángulo de giro.

Los sensores de proximidad inductivos contienen un devanado interno. Cuando una corriente circula por el mismo, un campo magnético es generado, que tiene la

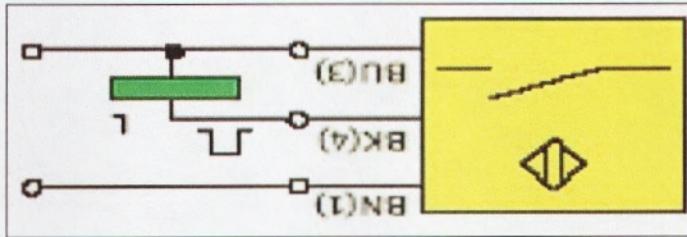
*Figura 4.16: Campo magnético asociado a la corriente del conductor del sensor inductivo. (wikipedia.com).*



Una corriente ( $i$ ) que circula a través del conductor, genera un campo magnético que está directamente asociado a ella.

**Funcionamiento.**

*Figura 4.15: Representación gráfica del sensor inductivo. (Electrónica pura.com)*



El sensor inductivo utilizado representa un contacto normalmente abierto tipo PNP.

*Figura 4.14 Sensor inductivo. (Fotografía tomada durante el desarrollo de pruebas eléctricas).*



Histéresis es la diferencia entre la distancia de activación y desactivación del sensor inductivo. Cuando un objeto metálico se acerca al sensor, éste lo detecta a la

## Histéresis

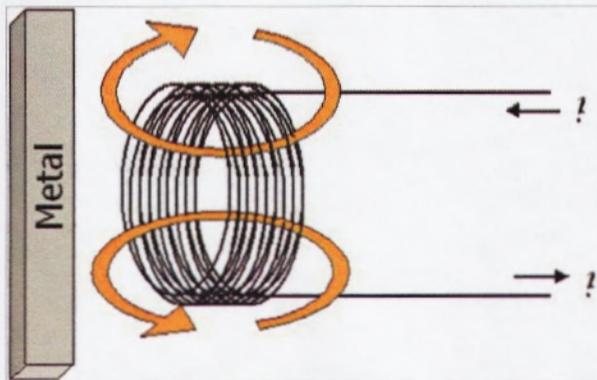
### Parámetros intrínsecos del sensor inductivo.

1. El eje del aerogenerador tiene acoplado en su superficie un tornillo, este ejercerá la función de elemento rozante.
2. Dado que el tornillo girará en iguales circunstancias que el eje, por cada vuelta que dé, el tornillo llegará al punto de roce con el sensor inductivo, de esta manera logrando un conteo de las revoluciones por minuto del eje del generador.

La secuencia de funcionamiento es la siguiente;

La bobina, o devanado, del sensor inductivo induce corrientes en el material a detectar, en este caso un tornillo acoplado al eje. Estas, a su vez, generan un campo magnético que se opone al de la bobina del sensor, causando una reducción en la inductancia de la misma. Esta reducción en la inductancia de la bobina interna del sensor, trae aparejado una disminución en la impedancia de esta.

*Figura 4.17: Devanado interno del sensor. (wikipedia.com).*



generado por el sensor de proximidad, éste es detectado. dirección de las flechas naranjas. Cuando un metal es acercado al campo magnético

*Figura 4.19: Inversor. (Fotografía tomada durante el desarrollo de pruebas eléctricas).*



La función del inversor es cambiar un voltaje de entrada de corriente continua a un voltaje simétrico de salida de corriente alterna, con la magnitud y frecuencia deseada.

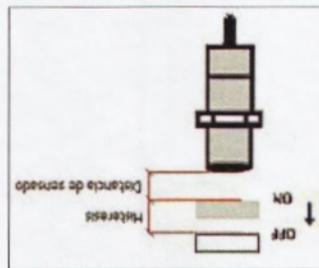
**Descripción.**

➤ **Inversor**

La distancia de censado ( $S_n$ ) está basada en un objeto estándar con medidas de 1" x 1" de hierro dulce. Este valor variará sensiblemente si se quiere detectar otros tipos de metales, incluso con materiales ferrosos como el acero inoxidable. Para otros no ferrosos, como el aluminio, pueden ser detectados, pero a menores distancias.

**Distancia de censado.**

*Figura 4.18: Estados de un sensor inductivo. (wikipedia.com).*

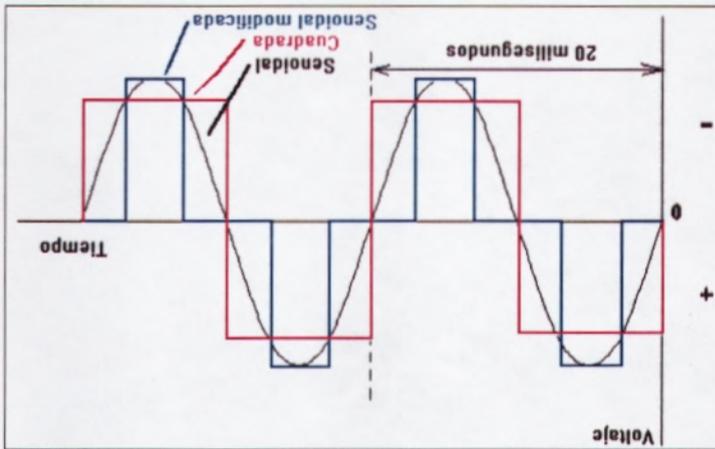


"distancia de detección" o "distancia de censado". Cuando el mismo objeto es alejado, el sensor no lo deja de detectar inmediatamente, sino cuando alcanza la "distancia de *reset*" o "distancia de restablecimiento", que es igual a la "distancia de detección" más la histeresis propia del sensor.

**Funcionamiento.**

El inversor consta de un oscilador que controla a un transistor, el cual se utiliza para interrumpir la corriente entrante y generar una onda cuadrada. Esta onda cuadrada alimenta a un transformador que suaviza su forma, haciéndola parecer un poco más una onda senoidal y produciendo el voltaje de salida necesario.

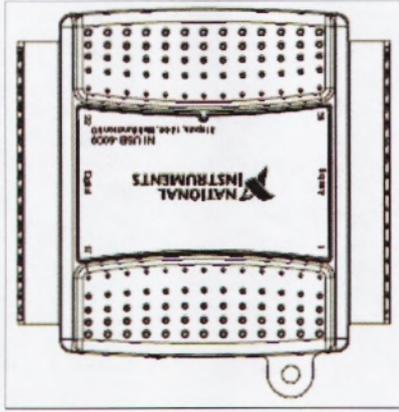
El inversor utilizado en el sistema eléctrico del prototipo convierte 12/24 V de corriente directa (DC), en 110/230/240 V de corriente alterna (CA), condicionándose estos resultados por los efectos de la carga instalada.



**Figura 4.20:** Onda senoidal modificada por el inversor. (Diaz, 09).

La onda senoidal modificada producida por el inversor tiene un valor RMS de 110 voltios. La mayoría de los voltímetros en AC (corriente alterna), están calibrados para medir voltajes RMS, asumiendo que la forma de onda medida será una onda senoidal pura. En consecuencia, estos medidores de voltaje no medirán el voltaje RMS modificado de la onda senoidal de manera correcta, en su lugar, la lectura resultante será de 20 a 30 voltios más baja. A continuación una figura demuestra descrito:

*Figura 4.22: Tarjeta de adquisición de datos. (National Instruments).*



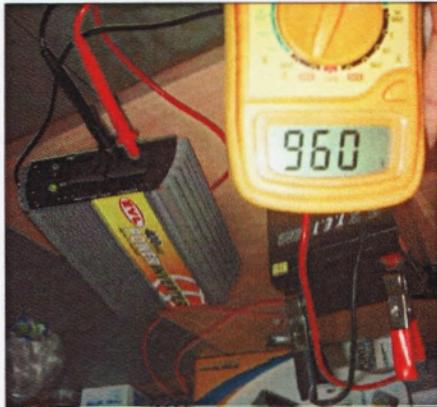
Este dispositivo además de funcionalidad de adquisición de datos, nos brinda registros de datos, medidas portátiles, y experimentos de distinta índole, principalmente académicos.

La tarjeta *USB-6009* de National Instruments, es un dispositivo utilizado para adquisición de datos. Sirve para transferir y convertir señales analógicas y digitales que serán usadas en un determinado software, en nuestro caso en *EL SOFTWARE DE SUPERVISIÓN Y CONTROL DE UNA AEROGENERADOR*, desarrollado en la plataforma *LABVIEW*.

#### Descripción.

#### ➤ Tarjeta de adquisición de datos.

*Figura 4.21: Prueba de batería e inversor. (Fotografía tomada durante el desarrollo de pruebas eléctricas).*



## Características

- 8 entradas analógicas (14 bits, 48 KS/s).
- 2 salidas analógicas (12 bits a 150 S/s), 12 E/S digitales; contador de 32 bits.
- Energizado por bus para una mayor movilidad, conectividad de señal integrada
- Compatible con LabVIEW, LabWindows/CVI y Measurement Studio para Visual Studio .NET.
- El software de NI-DAQmx y software interactivo NI LabVIEW SignalExpress LE para registro de datos.

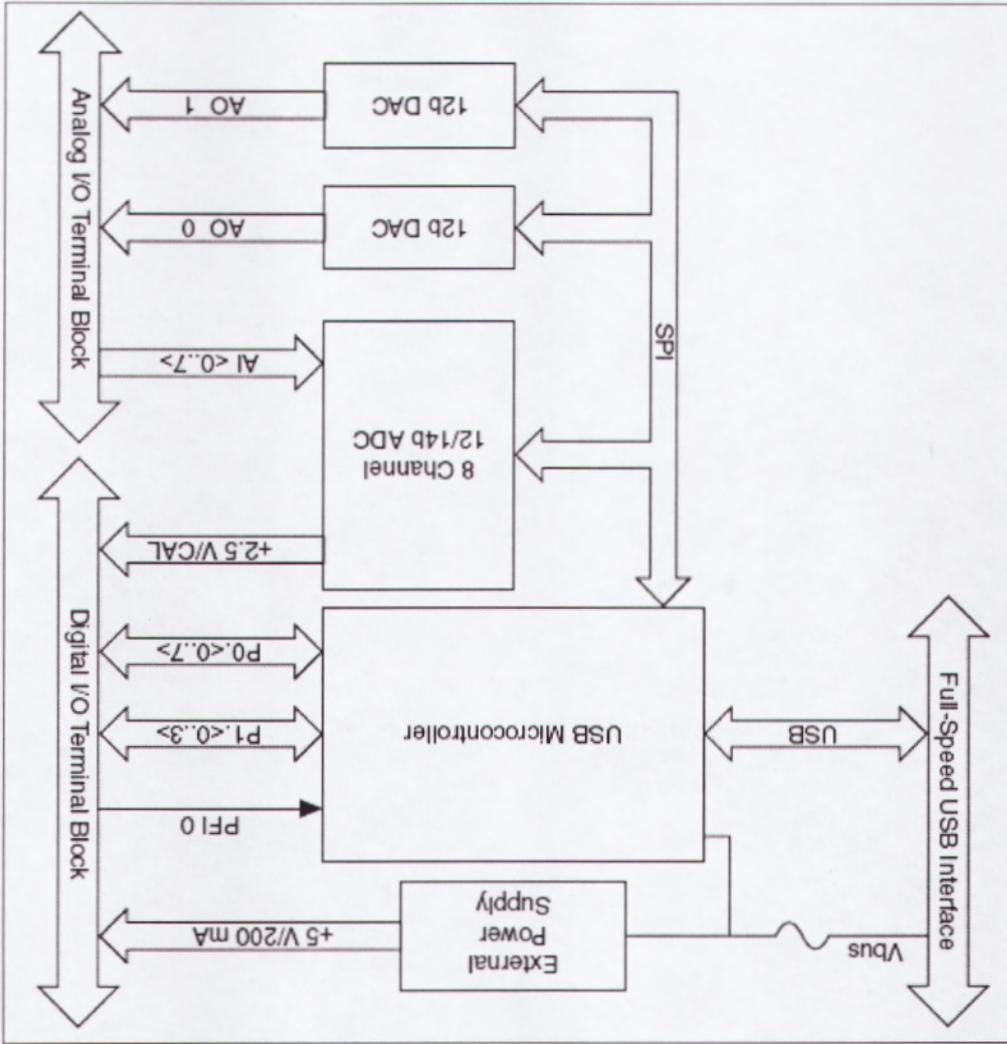


Figura 4.23: Diagrama de bloques de la tarjeta. (National Instruments).

## Funcionamiento.

Cuando el prototipo está en estado activo, todas las señales analógicas (en tiempo real) que genera son transferidas hacia la tarjeta de adquisición de datos a través de las conexiones de entradas analógicas. Estas son luego transformadas en señales digitales a través de la circuitería digital al interior de la tarjeta y luego transferidas hacia la bornera de salidas digitales.

Una vez procesada la información, las señales digitales se derivan al software en modo de mandos para ejecutar las diferentes acciones previamente programadas para el software de control, de modo que el resultado final, sea el control preciso de cada una de las variables a supervisar.

La siguiente figura muestra el diagrama de bloques que describe los componentes claves para el funcionamiento de la tarjeta.



*Figura 4.24: Tarjeta USB-6009, I/O's analógicas y digitales. (Fotografía tomada durante el desarrollo de pruebas eléctricas).*

Designación de terminales analógicas

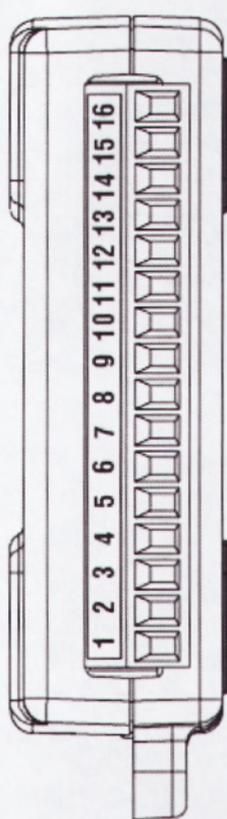
Señal	Terminal	Modulo	
Señal Modo Simple			
Modo Diferencial			
	1		GND
	2		AI0
	3		AI0-
	4		GND
	5		AI1
	6		AI1-
	7		GND
	8		AI2
	9		AI2-
	10		GND
	11		AI3
	12		AI3-
	13		GND
	14		AO0
	15	AO1	
	16	GND	

Tabla 4.1: Terminales analógicas. (National Instruments).

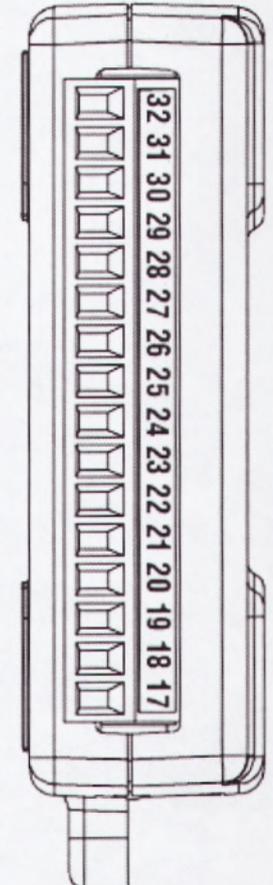
Señal	Terminal	Modulo
P0.0	17	
P0.1	18	
P0.2	19	
P0.3	20	
P0.4	21	
P0.5	22	
P0.6	23	
P0.7	24	
P1.0	25	
P1.1	26	
P1.2	27	
P1.3	28	
PF1.0	29	
+2.5 V	30	
+5 V	31	
GND	32	

Tabla 4.2: Terminales digitales. (National Instruments).

➤ Fusible.

Descripción.

Un fusible es un dispositivo, constituido por un filamento o lamina de un metal o aleación de bajo punto de fusión, que se intercala en un punto determinado de una instalación eléctrica para que se funda, por *Efecto Joule*, cuando la intensidad de corriente supere, por un cortocircuito o un exceso de carga, un determinado valor que

Los elementos de control son aquellos que nos permitirán manejar adecuadamente una instalación o circuito eléctrico, con el fin de dirigirla a voluntad. Esto se logra por medio de un correcto diseño y uso de los mismos controles.

**Descripción.**

➤ **Elementos de control eléctrico.**

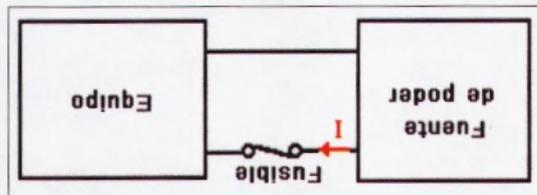
*Figura 4.26: Caja portafusibles, contiene las protecciones para inversor, batería y dinamó. (Fotografía tomada durante el desarrollo de pruebas eléctricas).*



El principio de funcionamiento del fusible se basa en intercalar un elemento más débil en el circuito, de esta manera cuando la corriente alcance niveles que podrían dañar a los componentes del mismo, el fusible se funda e interrumpe la circulación de la corriente.

**Funcionamiento.**

*Figura 4.25: Representación de fusible. (Electronicapura.com).*



podría hacer peligrar la integridad de los conductores y demás elementos de dicha instalación.

*Figura 4.27: Selector, boton de parada de emergencia, luz piloto. (Fotografía tomada durante el desarrollo de pruebas eléctricas).*



- Los elementos de control que intervienen en el sistema eléctrico del prototipo son:
- Luz piloto: Indica si el sistema se encuentra en estado de encendido (ON – generando) o en su defecto apagado (OFF – en reposo).
  - Selectores: Como su nombre lo indica, sirven para seleccionar que dispositivo eléctrico o electrónico funcionara en determinado momento, de acuerdo a las necesidades requeridas por el sistema eléctrico. En este caso los selectores son manuales.
  - Voltmetro AC y DC: Los voltímetros medirán los valores de voltajes de la batería en el caso de medición en DC, y de la dinamo en el caso de medición AC.
  - Botón de parada de emergencia: Este botón será accionado en caso de cualquier fallo o anomalía en el funcionamiento del sistema eléctrico del aerogenerador.

logrando así el objetivo de reducir o dividir el voltaje.

Donde,  $R_1$  y  $R_2$  pueden ser cualquier combinación de resistencias en serie o paralelo,

$$V_{out} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot V_{in} \quad (4.2)$$

De ser así tenemos la siguiente fórmula:

resistivas.

Para la conformación de tal configuración hemos utilizado resistencias. Un divisor resistivo es un caso especial donde ambas impedancias,  $Z_1$  y  $Z_2$ , son puramente

### Funcionamiento.

circuito se lo ha ensamblado en una baqueta.

Un divisor de tensión es una configuración de circuito eléctrico que reparte la tensión de una fuente entre una o más impedancias conectadas en serie. En este caso el

### Descripción.

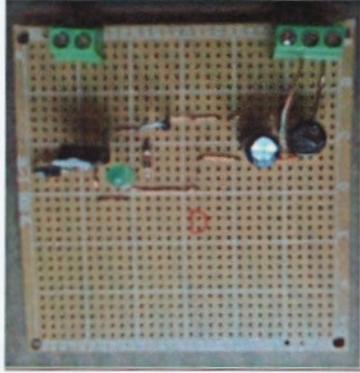
#### ➤ Tarjeta divisor de voltaje.

*desarrollo de pruebas eléctricas).*

**Figura 4.28:** Voltímetros DC y AC respectivamente. (Fotografía tomada durante el



**Figura 4.30:** Tarjeta reguladora. (Fotografía tomada durante el desarrollo de pruebas eléctricas).



La tarjeta posee una entrada de corriente alterna como una salida. En la entrada se introducen las señales alternas de diferentes frecuencias y en la salida se extraen esas señales atenuadas en mayor o menor medida según la frecuencia de la señal. Esta tarjeta hará la conversión de corriente alterna (AC) en corriente directa (DC) con el propósito de cargar la batería y la batería a su vez pueda alimentar al inversor.

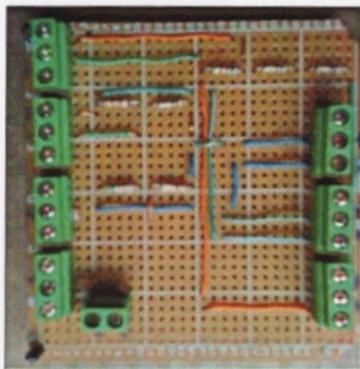
**Funcionamiento.**

La tarjeta en cuestión, es una fuente de poder que consta de un puente rectificador, regulador de voltaje, filtros y diodos. Esta tarjeta servirá para mantener la batería cargada cuando se está generando energía.

**Descripción.**

- Tarjeta de carga y regulación de voltaje para batería.

**Figura 4.29:** Tarjeta divisor de voltaje con sus respectivas entradas y salida. (Fotografía tomada durante el desarrollo de pruebas eléctricas).



#### 4.3.2. Explicación parte eléctrica.

Al girar el eje de la dinamo, paralelamente se mueve un imán permanente al interior de un núcleo de bobinas, induciendo de esta manera una corriente eléctrica de tipo alterna.

El voltaje generado será de 12VAC, el cual se utilizará para cargar la batería, un proceso similar al que ocurre en nuestros vehículos. Antes de pasar a la batería, el voltaje generado (en AC), entra a la tarjeta reguladora que hace la conversión de voltaje AC en DC.

El voltaje de salida de la tarjeta reguladora ingresa directamente al inversor a través de un conjunto de borneras, en donde el voltaje vuelve a transformarse en voltaje AC pero esta vez elevado a 120 V.

Este voltaje puede ser utilizado para energizar cualquier aparato eléctrico que comprenda un rango entre 90y 120V.

## CAPÍTULO 5

### DESARROLLO DEL SOFTWARE PARA SUPERVISIÓN Y CONTROL DE PARÁMETROS BÁSICOS DE UNA TURBINA EÓLICA.

Como previamente se especificó, la herramienta utilizada para el desarrollo del software de supervisión y control de las variables básicas que intervienen en la generación a través de sistemas eólicos es la plataforma Labview de National Instruments.

En la actualidad la supervisión y control de los sistemas de generación, distribución e incluso de transmisión eléctrica, son precisados por programas computacionales, que a través de distintos medios como la programación y la automatización logran un manejo eficiente de los parámetros que se deseen controlar, dejando de lado la presencia de un operador en muchos casos.

Mediante la elaboración de este software lograremos obtener la lectura y medida real de diferentes parámetros que se consideran esenciales para el control de una turbina eólica, en este caso a escala, tales como:

- Velocidad del viento.
- Dirección del viento.
- Dirección de la turbina.
- Velocidad de la turbina (RPM).
- Voltaje AC (Dinamo) y voltaje DC (Batería).
- Corriente AC (Dinamo) y corriente DC (Batería).
- Potencia.

La correcta y oportuna supervisión de estos parámetros, puede prevenir cualquier tipo de contratiempo relacionado al funcionamiento regular de la turbina, logrando así prolongar la vida de sus componentes y del servicio que esta preste.

El diseño del software se basa principalmente de dos partes:

- El panel frontal.
- Diagrama de bloques.

## 5.1 Panel Frontal.

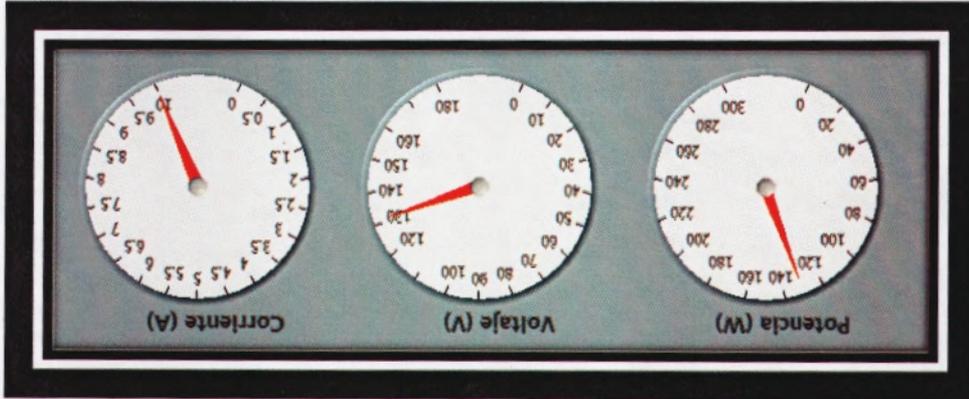
En el panel frontal se pueden identificar todos los indicadores visuales tanto digitales como analógicos y los demás esquemas gráficos necesarios para completar la interacción hombre – máquina, que juega un papel muy importante al momento del manejo del software. Es necesario también contar con un panel frontal ordenado y bien diseñado con el fin de que la ejecución del software sea sencilla y no distraiga al usuario.

A continuación detallamos los componentes utilizados en el panel frontal:

### ➤ Indicadores.

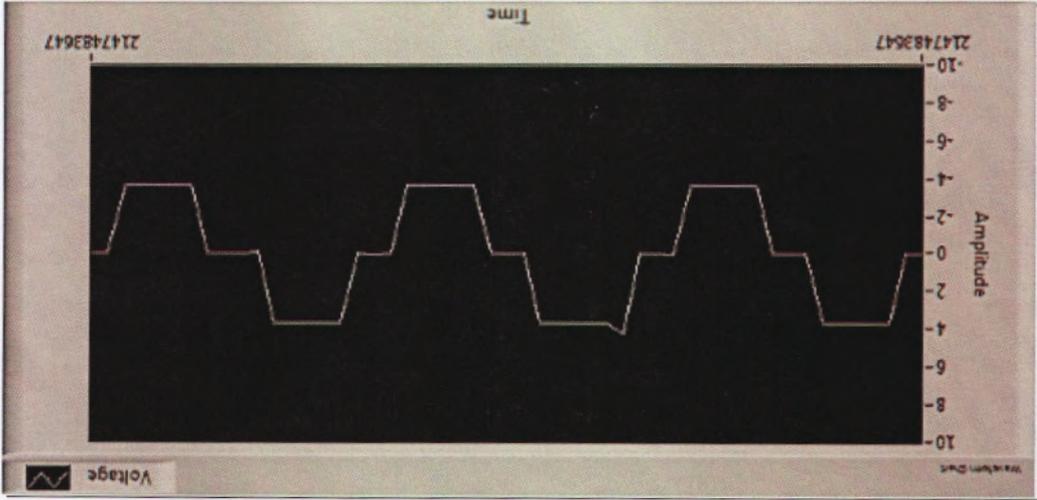
#### Descripción.

Los indicadores nos mostrarán la lectura real de las diferentes variables como voltaje, corriente, potencia, dirección del viento, dirección de turbina y velocidad de la turbina. Estos indicadores cumplen una función visual, que será identificada de manera directa por el usuario del software, para que este a su vez corrija o determine una función a realizar por el software.



*Figura 5.1: Parámetros resultantes controlados. (Gráfica tomada del software para supervisión y control de aerogenerador).*

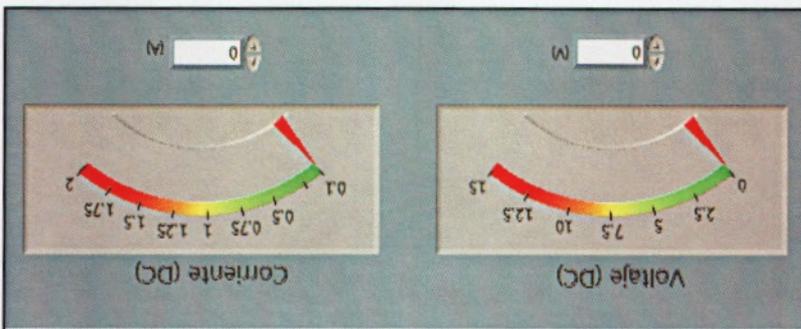
**Figura 5.3:** Señal de voltaje AC, a la salida del inversor. (Gráfica tomada del software para supervisión y control de aerogenerador).



Las gráficas y curvas son fundamentales para la explicación del proceso, ya que estas nos indicarán el comportamiento de todas las variables antes mencionadas con respecto al tiempo, en otras palabras en tiempo real. A continuación se muestran dos de las curvas resultantes de los diferentes parámetros a controlar a través del software desarrollado en este trabajo.

➤ **Gráficas y curvas.**

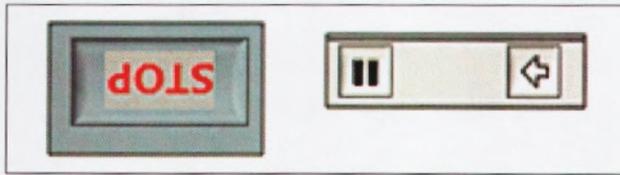
**Figura 5.2:** Indicadores de voltaje y corriente de batería. (Gráfica tomada del software para supervisión y control de aerogenerador).



El diagrama de bloques describe la funcionalidad misma del programa, ya que por medio de este, el panel frontal podrá cumplir con todas las funciones para el cual ha sido diseñado. El diagrama de bloques es el conjunto de herramientas virtuales, que

**5.2 Diagrama de bloques.**

*Figura 5.5: Botoneras virtuales de mando. (Gráfica tomada del software para supervisión y control de aerogenerador).*

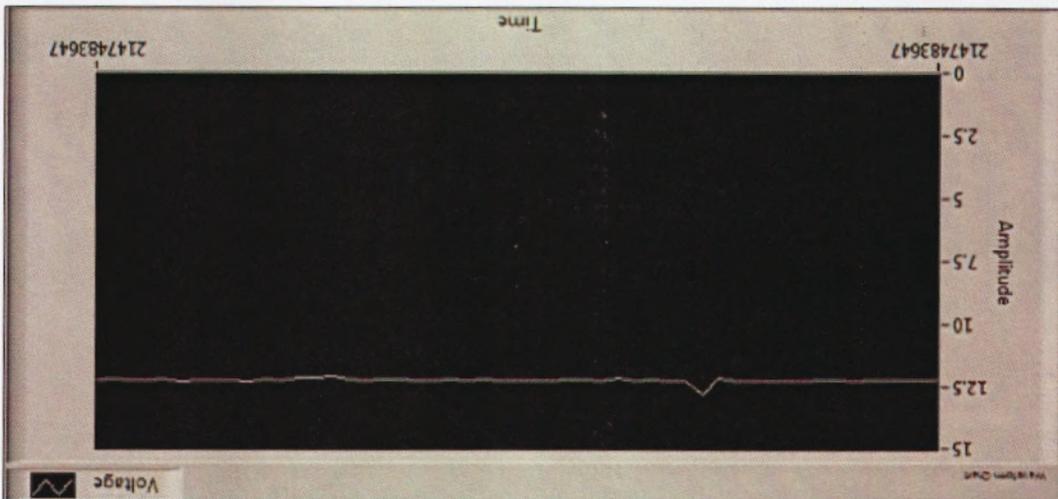


Los botones de mando son de vital importancia para dar marcha o finalizar un proceso tanto físico como virtual. Aunque su funcionamiento sea básico y sencillo hay que recalcar que sin estos componentes no es posible tener el dominio y control sobre el software.

**Descripción.**

➤ **Botones de mando.**

*Figura 5.4: Señal voltaje DC, de batería. (Gráfica tomada del software para supervisión y control de aerogenerador).*



interactuando entre sí, a través de fórmulas matemáticas, programación y lenguaje gráfico ejecutan el control del prototipo.

Una vez que los circuitos analógicos y digitales hayan sido conectados con sus respectivas variables, se ejecutará una simulación del software a tiempo real, donde se verificará el correcto funcionamiento de todas las funciones y señales que corren a través de la diagramación en bloque.

Seguido de esto, se debe conectar dichas señales a la tarjeta de adquisición de datos y con esto lograr la medición de las variables en tiempo real para un correcto control de las mismas.

Una vez ejecutada y confirmada la programación, se procede a poner en marcha el prototipo y software en conjunto.

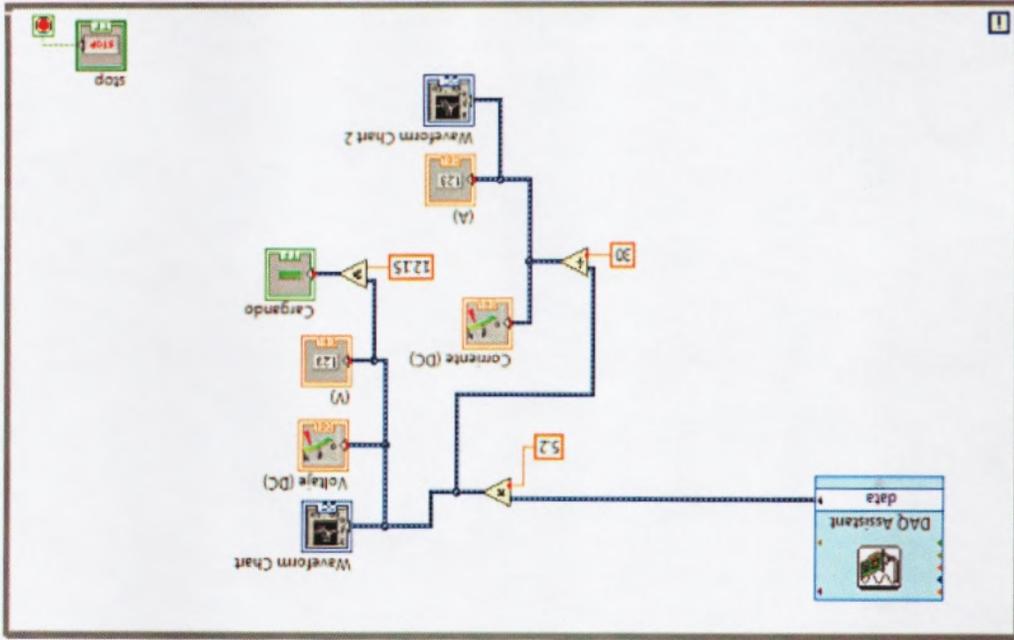
### 5.2.1 Diseño.

Para diseñar el software se ha separado cada uno de los parámetros como etapas sin dependencia de orden, logrando así un diseño más ordenado. Cada una de las etapas se diseñó en diferentes VIs.

Las siguientes gráficas muestran el panel frontal y el diagrama de bloques elaborado para cada uno de los parámetros a controlar. Con los resultados obtenidos se lograron obtener conclusiones acerca del funcionamiento de este prototipo y sus posibles aplicaciones a la vida real.

UNIVERSIDAD CATÓLICA SANTIAGO DE GUAYAQUIL  
ESCUELA DE LECTURA  
INSTRUMENTACIÓN PARA EL DESARROLLO

**Figura 5.7:** Diagrama de bloques, parámetros de BATERIA. (Gráfica tomada del software para supervisión y control de aerogenerador).



**Figura 5.6:** Panel frontal, de los parámetros controlados de la BATERIA. (Gráfica tomada del software para supervisión y control de aerogenerador).



➤ Etapa 1, Corriente y voltaje DC.

Figura 5.9: Diagrama de bloques. DINAMO. (Gráfica tomada del software para supervisión y control de aerogenerador).

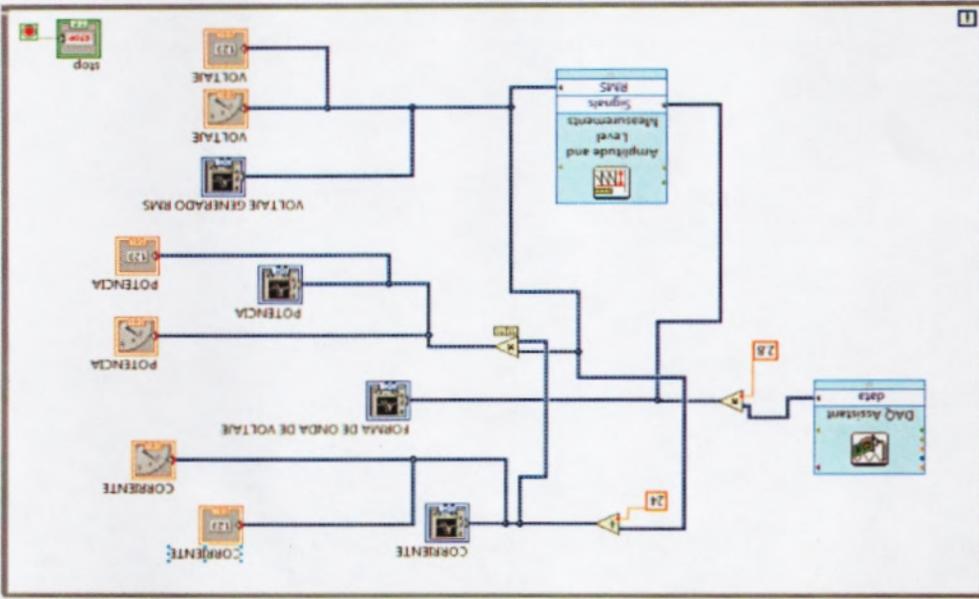
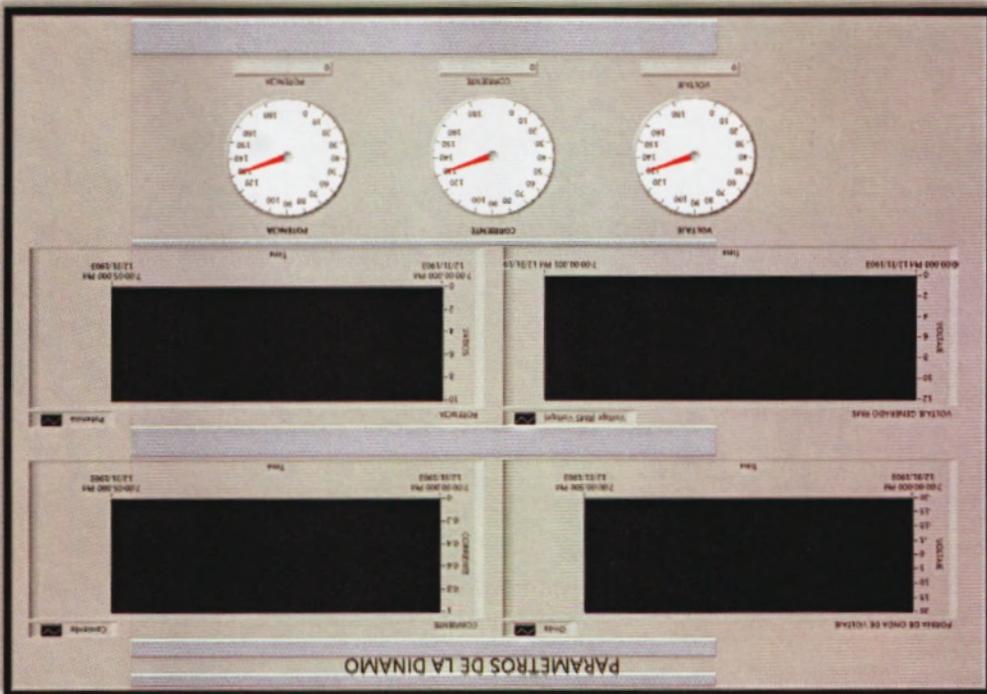


Figura 5.8: Panel frontal. DINAMO. (Gráfica tomada del software para supervisión y control de aerogenerador).



➤ Etapa 2, Voltaje, corriente y potencia generados.

➤ Etapa 3, Inversor.

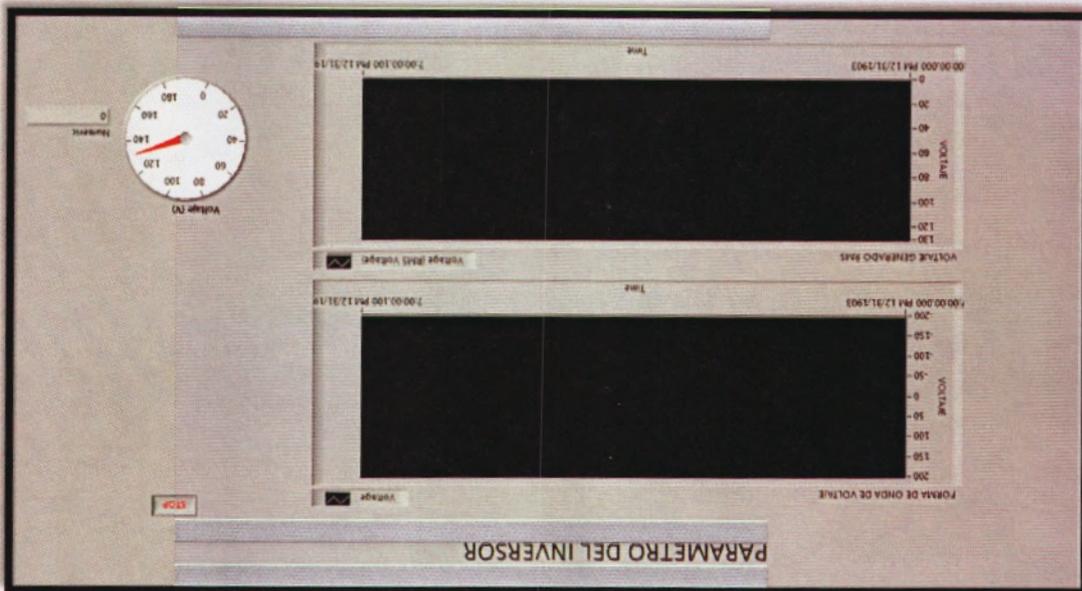


Figura 5.10: Panel frontal. INVERSOR. (Gráfica tomada del software para supervisión y control de aerogenerador).

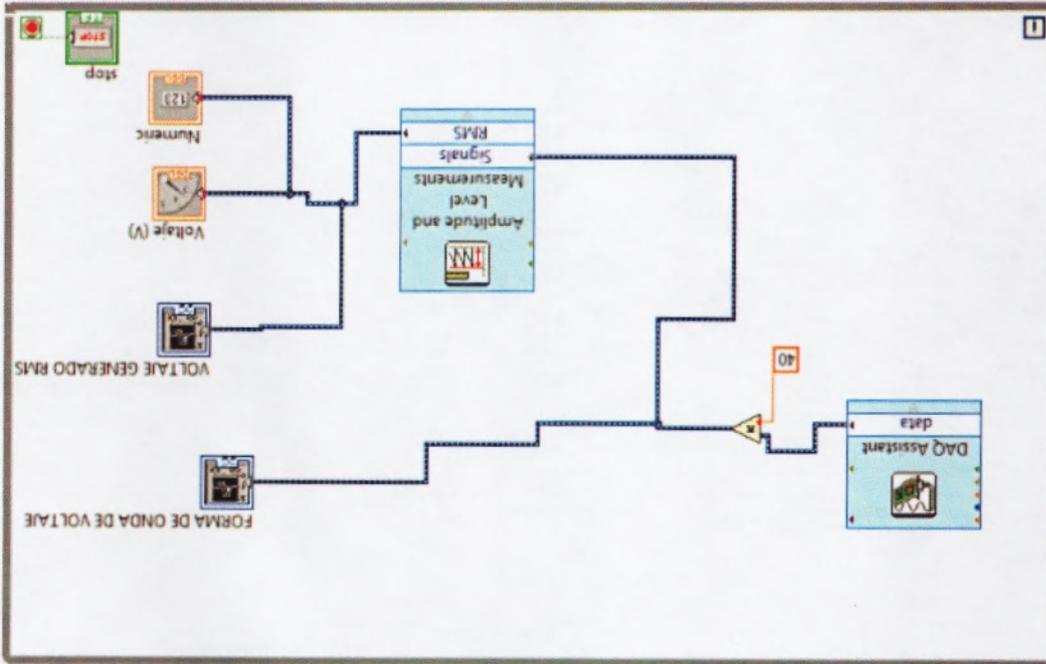


Figura 5.11: Diagrama de bloques. INVERSOR. (Gráfica tomada del software para supervisión y control de aerogenerador).

➤ Etapa 4, Posición del aerogenerador, y RPM's.

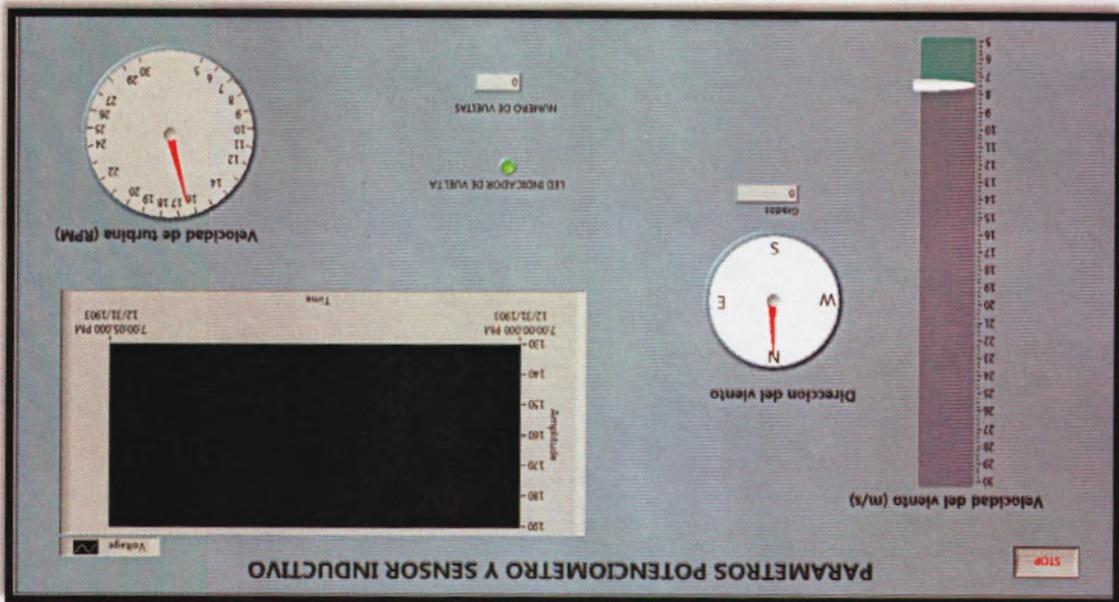


Figura 5.12: Panel frontal. POSICIÓN Y NÚMERO DE VUELTAS. (Gráfica tomada del software para supervisión y control de aerogenerador).

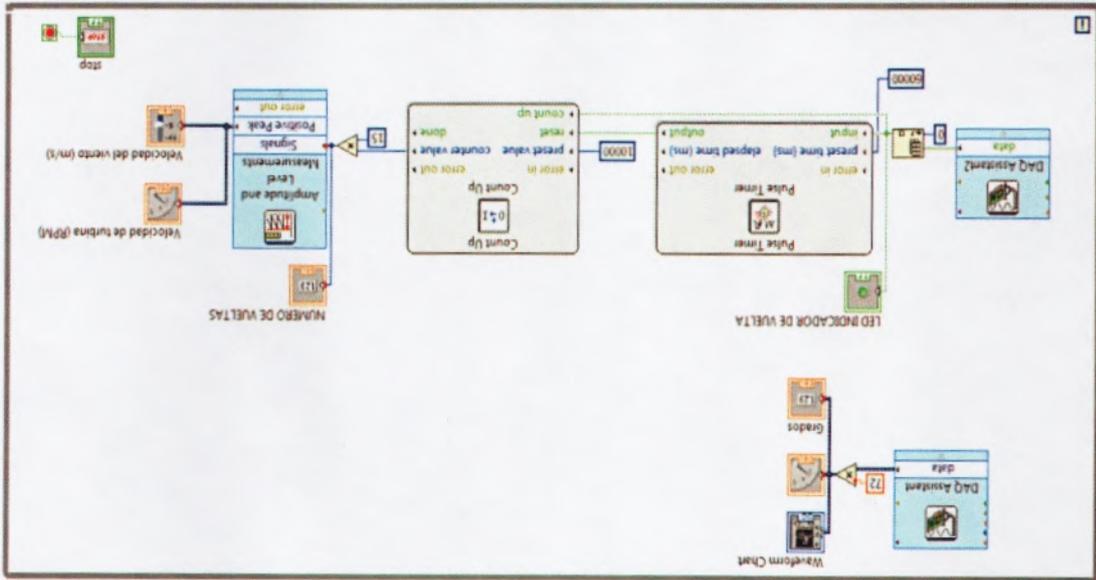


Figura 5.13: Diagrama de bloques. POSICIÓN Y NÚMERO DE VUELTAS. (Gráfica tomada del software para supervisión y control de aerogenerador).

## CAPÍTULO 6

### *Conclusiones.*

- Las energías alternativas son la respuesta y solución a problemas ambientales de gran magnitud, que desde hace una década o más vienen haciendo estragos debido al uso de tecnologías de generación convencionales.

- La energía eólica, a pesar de ser una tecnología de inversión inicial un tanto elevada, es una solución confiable, duradera y eficaz, cuyos costos se recuperan a lo largo de los años de producción de energía, en parques eólicos industriales.

- La energía eólica, como medio de generación a escala, es decir, para aplicaciones de pequeñas potencias, puede en muchos casos no representar una opción viable, ya que los costos de construcción, instalación y mantenimiento no son justificables en relación al producto final obtenido.

- La energía eólica, es muy limpia.

- El uso de programas computacionales para supervisión y control de procesos son y serán una práctica eficaz y eficiente, para administrar las funciones sobre las cuales se desea tener un control estricto.

- El diseño y construcción de un generador eólico debe ser realizado bajo criterios técnicos y económicos que garanticen el buen funcionamiento del mismo, tomando en cuenta la relación costo/provecho.

- Un software debe tener todas las herramientas necesarias para actuar correctamente, no solo ante el proceso en cuestión, sino también con el operario, a esto se le llama interfaz hombre – máquina (HMI).

➤ Un software de control pueden predecir futuros desperfectos o disfuncionalidades de equipos o sistemas de todo tipo.

➤ Los principios teóricos de control de grandes aerogeneradores, son aplicables para aerogeneradores a escala. La diferencia radica en los elementos instalados, el alcance de su funcionalidad y demás características como capacidad, peso, tamaño. En otras palabras los principios tecnológicos son los mismos.

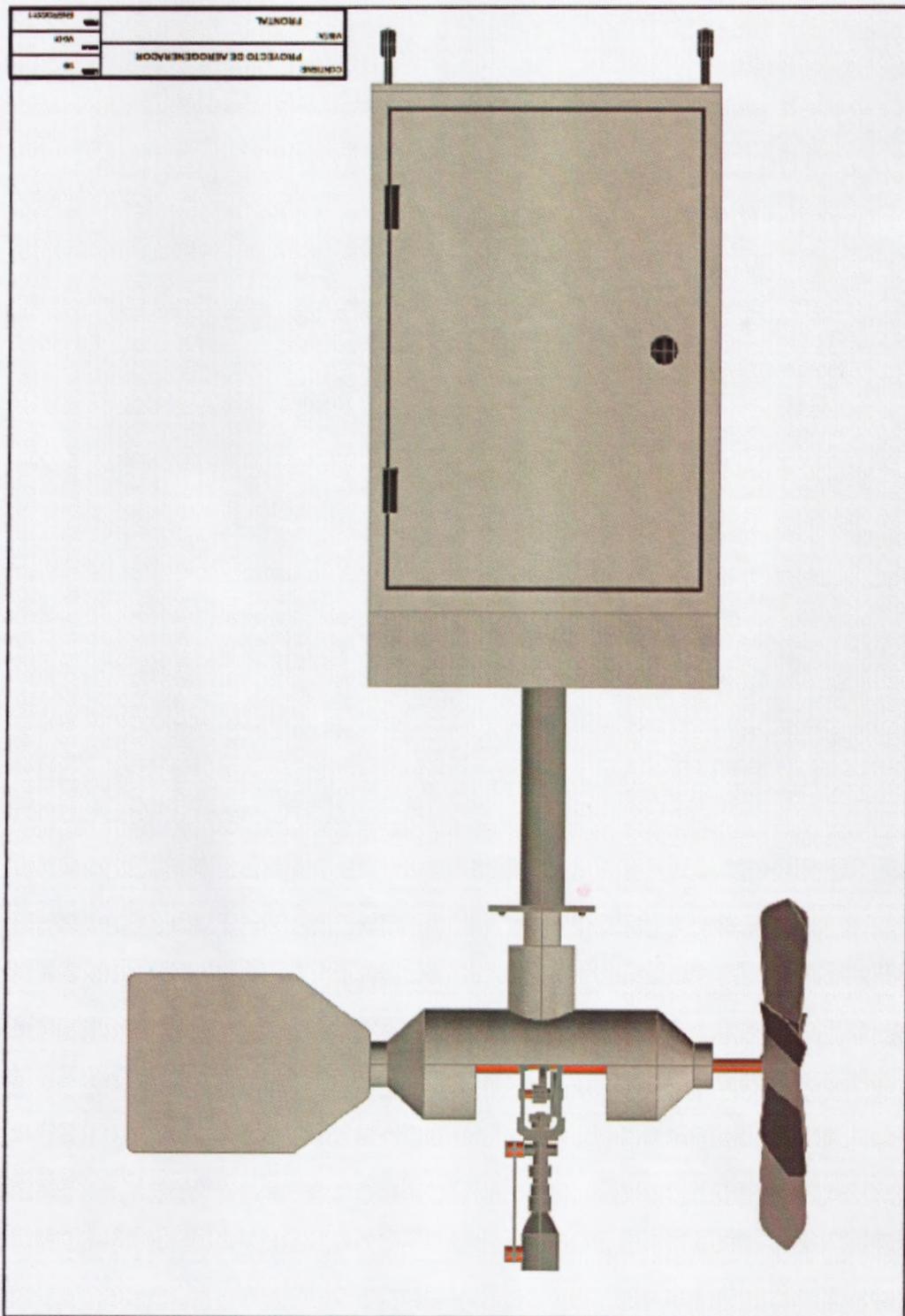
## Bibliografía

- Admin, A. (2009). *Energía Renovables: Funcionamiento de los aerogeneradores*. WordPress. Recuperado de <http://www.renovables-energia.com/2009/05/funcionamiento-aerogeneradores-eolicos/>
- Amanedo Rodríguez, J. L. (2003). *Sistemas eólicos de producción de energía eléctrica*. Madrid: Rueda.
- Antezana Nuñez, J. C. (2004). Diseño y Construcción de un Prototipo de Generador Eólico de Eje Vertical. *Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Chile*. Recuperado de <http://www.uv.es/~navasqui/OtrosAerogeneradores/Aerogen-vertical.pdf>
- Burton, T. (2001). *Wind Energy Handbook*. Oxford: Wiley.
- Cándido. (2007). *Alma de Herrerero: Parque eólico*. Barcelona . Recuperado de <http://almadeherrerero.blogspot.com/2007/12/parque-eolico-de-rubi.html>
- Cuesta Santianes, M. J., Pérez Martínez, M., & Cabrera Jiméñez, J. A. (2008). Aerogeneradores de potencia inferior a 100 kw. *CIEMAT*. Recuperado de [http://www.ciemat.es/recursos/doc/Areas\\_Actividad/Prospectiva\\_Tecnologica/34301686\\_211200911951.pdf](http://www.ciemat.es/recursos/doc/Areas_Actividad/Prospectiva_Tecnologica/34301686_211200911951.pdf)
- Devesa Fernández, A. (2008). *Energía Eólica*. Madrid.
- Digital, B. (2006). *Lo que le viento se llevo*. México.
- EOLICCAT. (2009). *Asociación Eólica de Cataluña: Cómo funciona un aerogenerador*. España: Cataluña. Recuperado de <http://www.eoliccat.net/energia-eolica/la-tecnologia/com-funciona-un-aerogenerador.html?L=1>

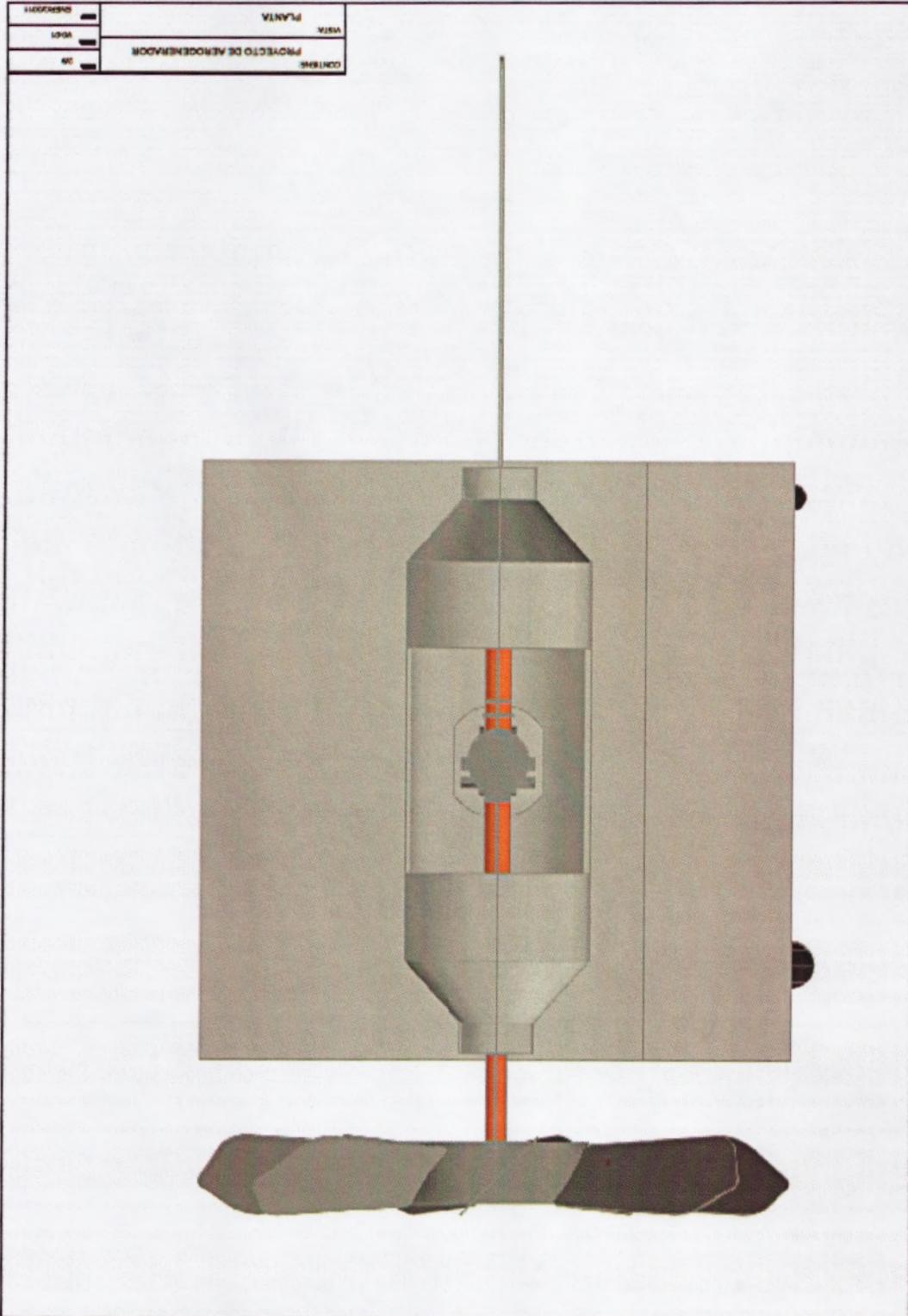
- Fernández Muerza, A. (2009). *Turbinas eólicas en postes eléctricos y carreteras*. España: Eroski Consumer. Recuperado de [http://www.consumer.es/web/es/medio\\_ambiente/energia\\_y\\_ciencia/2009/05/25/185516.php](http://www.consumer.es/web/es/medio_ambiente/energia_y_ciencia/2009/05/25/185516.php)
- Gipe, P. (2000). *Energía Eólica Práctica*. Madrid.
- Harrison, R. (2000). *Large Wind Turbines, Design and Economics*. Oxford: Wiley.
- Juan, I., & Urquia, S. (1982). *Manual Práctico de Energía Eólica*. Navarra/España: Grupo Ecologista de Tafalla.
- Le Gourieres, D. (1983). *Energía Eólica: teoría, concepción y cálculo práctico de las instalaciones*. Barcelona: Masson.
- Madico Jurado, J. (2001). *Financiación Global de proyectos*. Madrid: Esic.
- Manwell, F. J. (2002). *Wind Energy Explained: Theory, Design and Application*. Wiley.
- Mobiterrubio Montesó, J. A., & Ibáñez, N. d. (2006). *Aerogenerador Casero*. Recuperado de <http://www.uv.es/~navasqui/OtrosAerogeneradores/Aerogen-casero.pdf>
- Monterrubio Montesó, J. A., & Ibáñez, N. d. (2008). *Construcción de aerogenerador de baja potencia*. Recuperado de <http://www.scribd.com/doc/4865335/Construcción-de-aerogenerador-de-baja-potencia-1>
- Moragues, J., & Rapallini, A. (2009). *Energía Eólica*. Recuperado de [http://www.cedecap.org.pe/uploads/biblioteca/36bib\\_arch.pdf](http://www.cedecap.org.pe/uploads/biblioteca/36bib_arch.pdf)
- Moreno Figueredo, C. (2007). *Producción de electricidad con energía eólica*. Recuperado

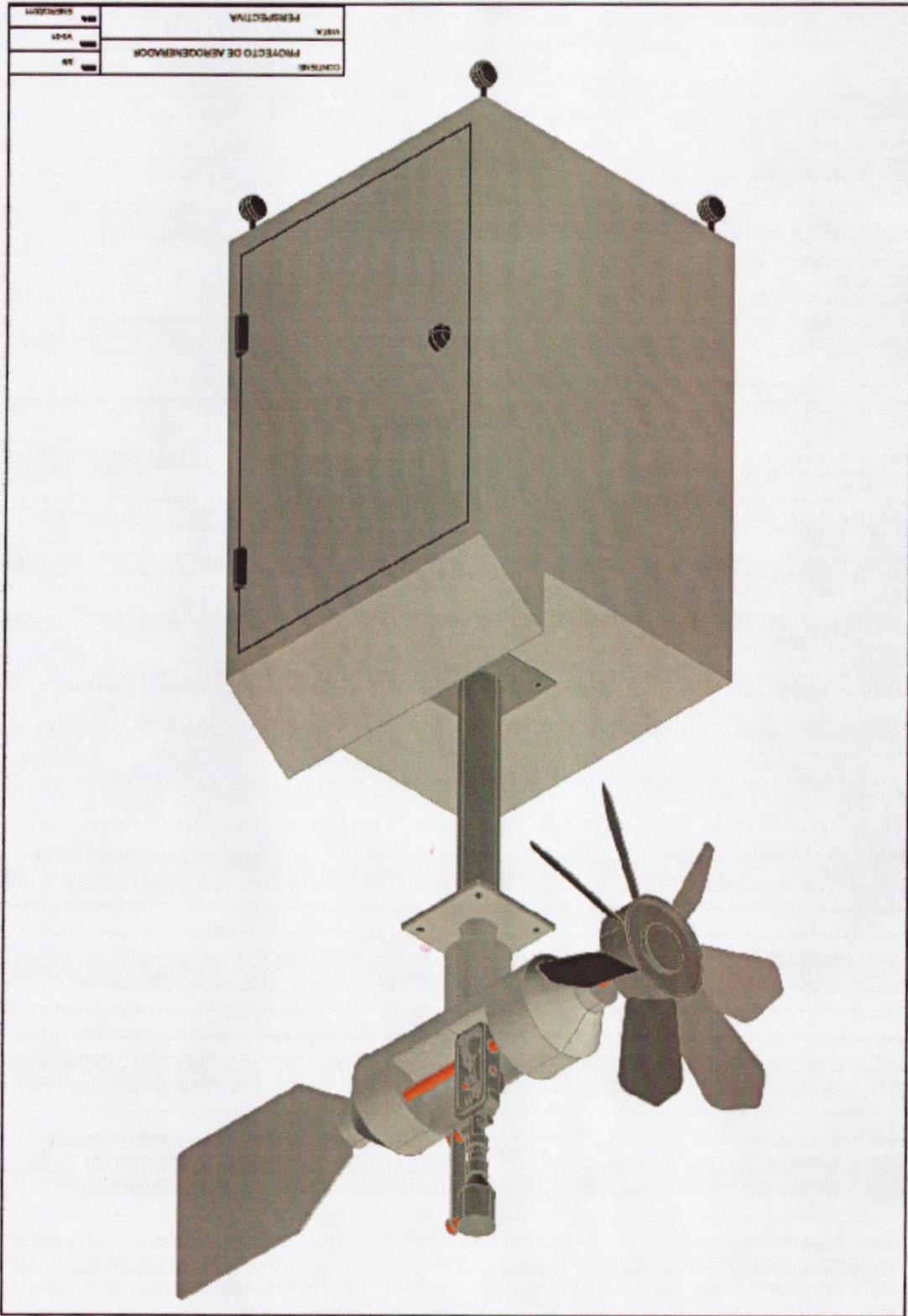
- <http://www.cubasolar.cu/biblioteca/energia/Energia32/HTML/articulo03.htm>
- Moreno Figueredo, C. (2008). *Tecnología de los pequeños aerogeneradores*. Recuperado de <http://www.cubasolar.cu/biblioteca/energia/Energia39/HTML/articulo03.htm>
- Paul, G. (2000). *Aprovechamiento de la energía eólica*. Mairena del Aljarafe: Progenssa.
- Ramos, A. A. (2008). Laboratorio de energías renovables. *UVA (Universidad de Valladolid)*. Recuperado de <http://www3.uva.es/renova/esp/ENERGIA%20EOLICA.pdf>
- Ruiz, J. M., & Tuleda Serrano, M. L. (2006). *Identificación de impactos ambientales significativos en la implantación de parques eólicos*. Recuperado de [http://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/7615/1/IG\\_41\\_09.pdf](http://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/7615/1/IG_41_09.pdf)
- Eco2site. (2003, Agosto). Estudios de impacto ambiental de Parques Eólicos: Paisajes y Calidad de vida. *CENSOLAR*. Recuperado de <http://www.eco2site.com/informes/eiaeolica.asp>
- Sánchez, M. (2009). *Inconvenientes de los aerogeneradores*. Recuperado de <http://alumnatbiogeo.blogspot.com/2009/03/inconvenientes-de-los-aerogeneradores.html>
- Valverde Martínez, A. (1987). *Aprovechamiento de la energía eólica*. Murcia.
- Viedma Robles, A. (2003). *Energía Eólica*. Cartagena.
- Villarrubia López, M. (2004). *Energía Eólica*. Madrid.

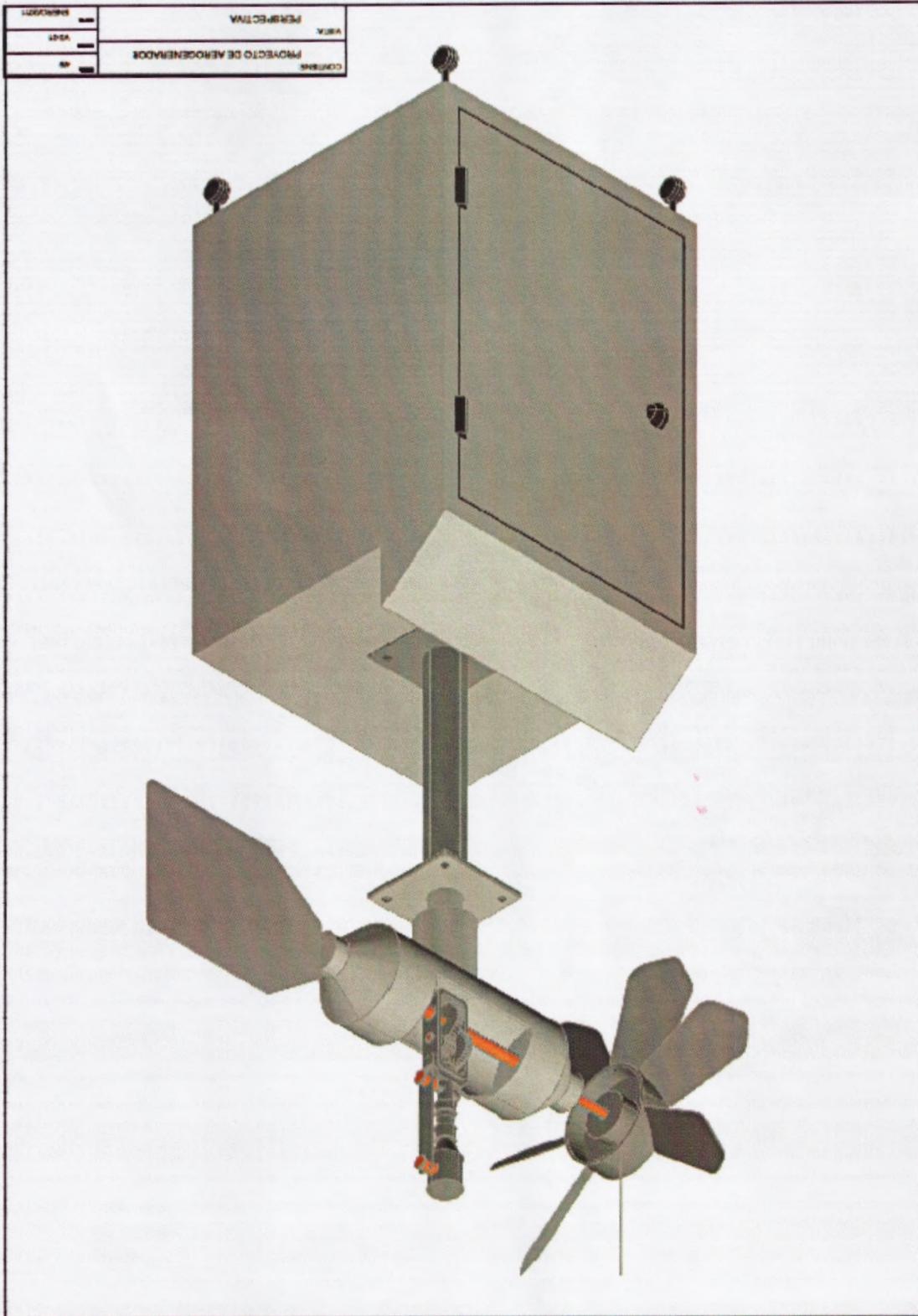
- Wegley, H., Ramsdell, J., Orgill, M., & Drake, R. (2007). *Manual para la localización de sitios para sistemas pequeños de conversión de energía eólica*. Recuperado de [http://www.windpoweringamerica.gov/pdfs/small\\_wind\\_small\\_wind\\_guide\\_spanish.pdf](http://www.windpoweringamerica.gov/pdfs/small_wind_small_wind_guide_spanish.pdf)

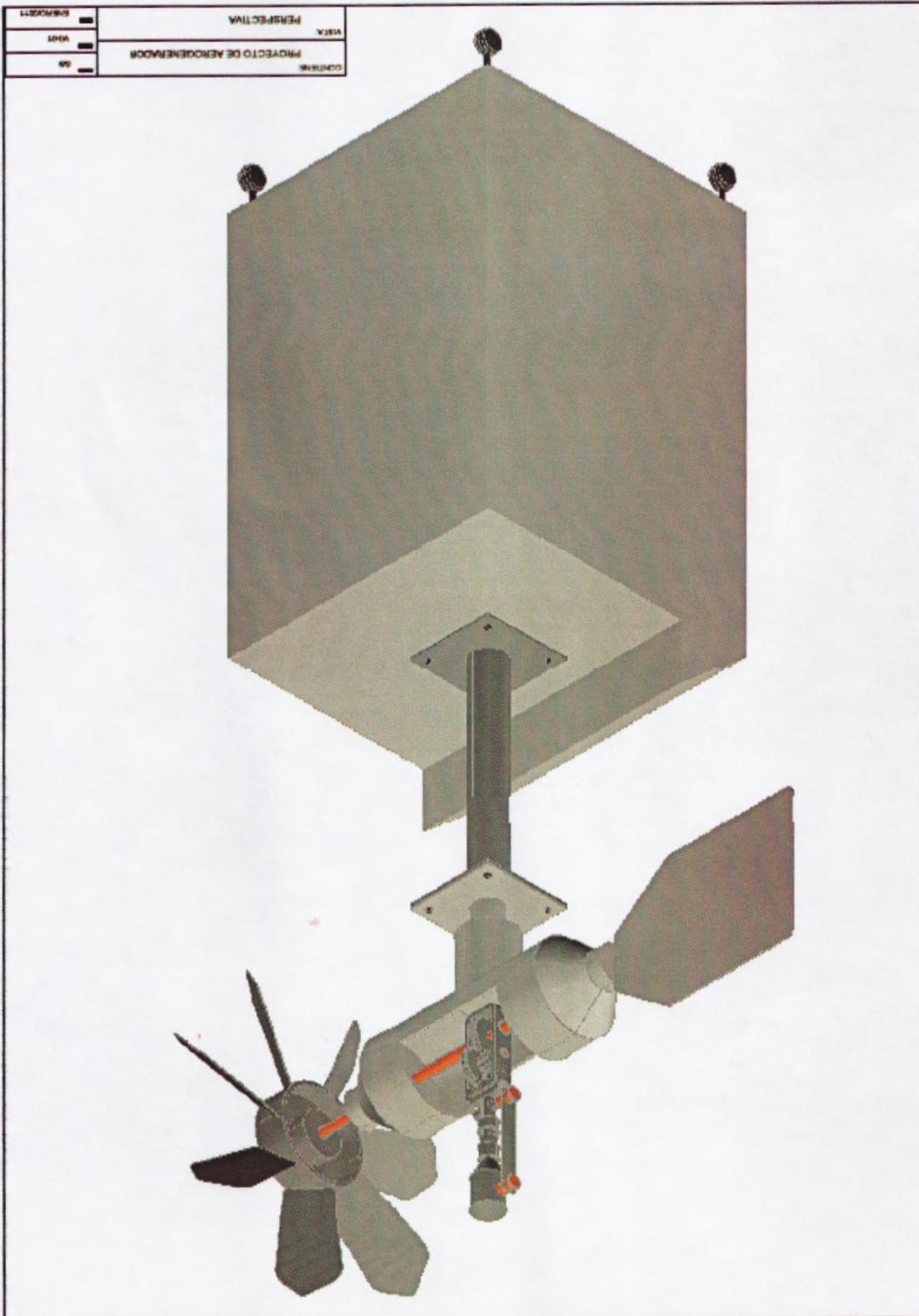


ANEXOS

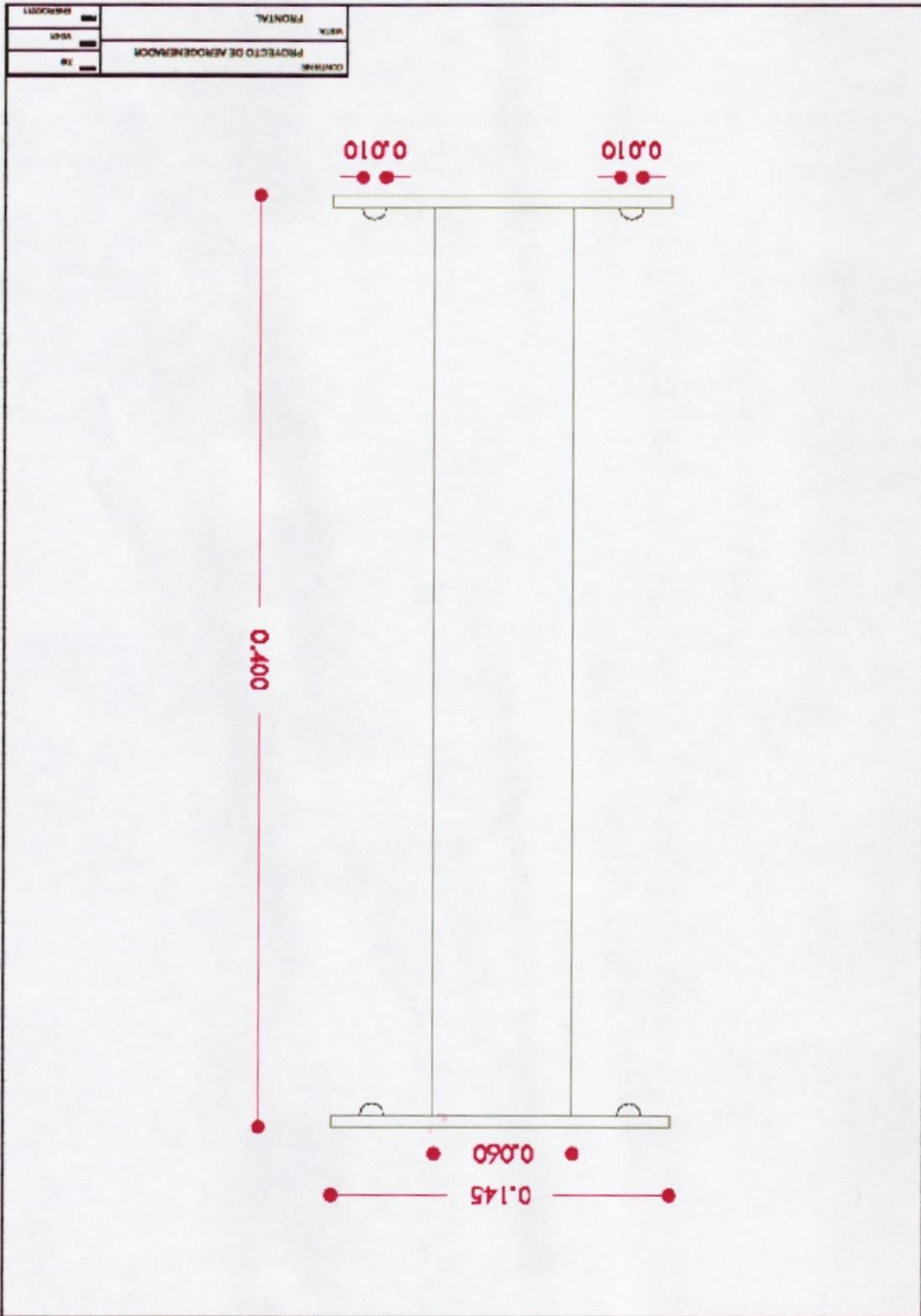






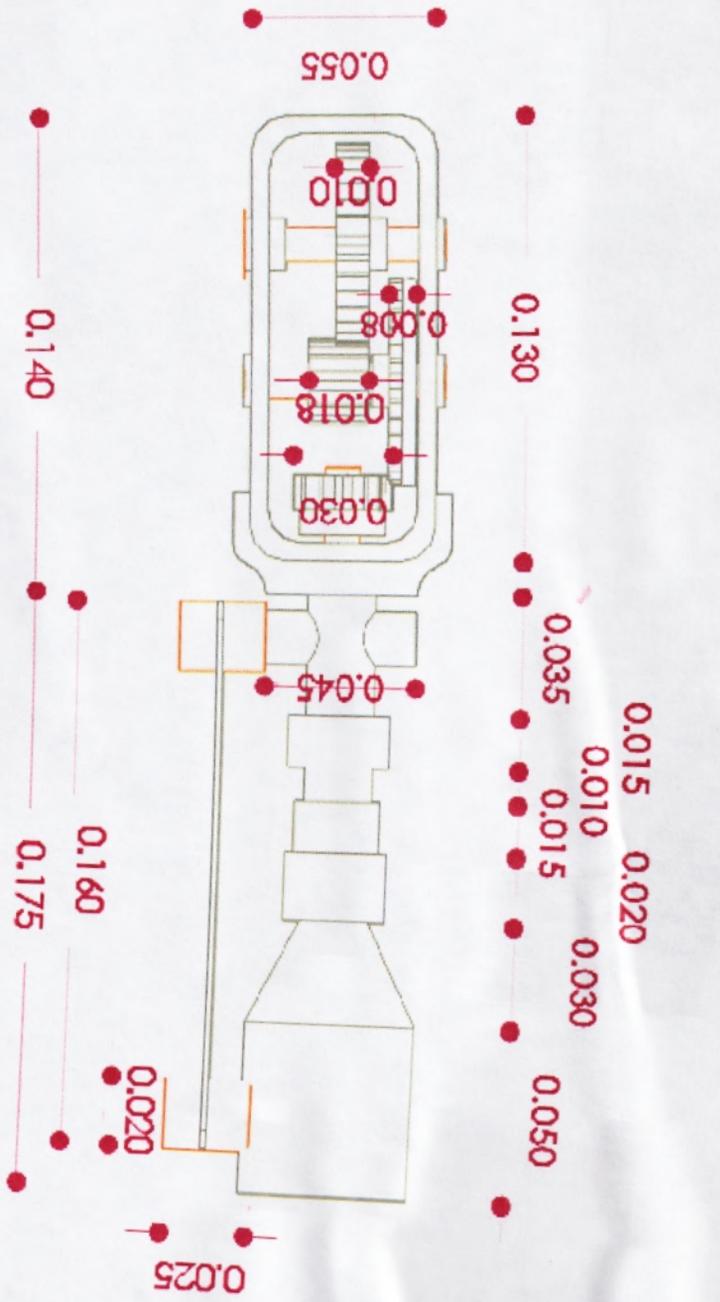








MEMORIA	FRONTAL
NO. 01	VERA
NO.	PROYECTO DE MEMORANDUM
NO.	



En Rusia se puso en funcionamiento en 1931, en Crimea, frente al mar muerto, un aerogenerador de 30 metros, que tenía que proporcionar 100 kw a la red de Sebastopol, la media durante dos años fue de 32 kw.

En 1941 la NASA construyó un bipala de 53 m de diámetro, previsto para una potencia máxima de 1.250 kw que se instaló en Vermont, en el nordeste de EEUU. Las pruebas continuaron durante aproximadamente 15 meses. Un pequeño incidente en 1943 bloqueó la máquina durante dos años. Vuelto a poner en marcha, el aerogenerador proporcionó corriente al sector durante veintitrés días, luego se rompió una de las palas y se abandonó el proyecto. (Monteso, 08).

Los primeros grandes aerogeneradores se encuentran en los Estados Unidos, donde en 1941 había ya una turbina eólica cuya hélice pesaba 7 toneladas y tenía un diámetro de 53 metros. También ésta se rompería durante una tormenta.



*Figura 2.14: Imagen de una pala de un aerogenerador. (Ramos, 08).*

En Alemania se construyó entre 1955 y 1957 un aerogenerador de dos palas de 34 metros de diámetro, de fibra de vidrio, a 80 Km. al este de Stuttgart. Esta máquina funcionó hasta 1968. Dinamarca construyó en 1957 el "Gedser Mill", hélice de tres palas de 24 metros de diámetro que funcionó hasta 1968. (Monteso, 08).

El aerogenerador "Best, Romani" tripala de 30 m de diámetro con chapas de aleación ligera fue instalado en Nogent-le-Roy en Beauce. Podía proporcionar 800 kw a la red con un viento de 60 Km/h. Esta máquina experimental aportó entre 1958 y 1962 un

gran número de informaciones sobre su funcionamiento en condiciones reales de explotación. (Drake, 07)

En Francia, la compañía Neyrpic instaló en Saint-Rémy-des-Landes (Manche) dos aerogeneradores de tres palas. El primero de 21 metros de diámetro y que producía 130 Kw de potencia, funcionó hasta marzo de 1966. El otro, de 35 metros y previsto para producir 1.000 Kw, proporcionó una potencia satisfactoria durante las pruebas, pero a la ruptura de un palier en 1964 hizo que se abandonase el programa de estudios. (Drake, 07)

La aparición de alternativas más baratas de abastecimiento energético hizo que paulatinamente fueran reemplazándose por máquinas térmicas o motores eléctricos alimentados desde las redes.

Procesos similares tuvieron lugar en otras regiones del mundo, haciendo que el uso del recurso eólico quedase relegado a satisfacer necesidades puntuales en medios rurales o comunidades aisladas, sin ninguna participación en el mercado energético. Fueron varios los factores que intensificaron la búsqueda de alternativas de abastecimiento energético haciendo que renazca el interés por el recurso eólico, entre ellos:

- ❖ La toma de conciencia sobre el agotamiento de los recursos energéticos no renovables (o de los renovables no debidamente utilizados).
- ❖ La creciente preocupación por el impacto sobre el medio ambiente de los combustibles fósiles y la energía nuclear.
- ❖ Las bruscas alzas de los precios del petróleo ocurridos en la década del 70.

A principios de los años 70, los norteamericanos, enfrentados al aumento de los problemas de abastecimiento de energía iniciaron un amplio programa para explotar el potencial de la energía eólica. En aquel momento se estimaba, en efecto, que esta energía renovable podría, aparte de sus aplicaciones tradicionales, proporcionar kw/h a las redes eléctricas a un precio igual o inferior al de las centrales térmicas. Ello

sería pronto una realidad con la puesta en servicio, de grandes aerogeneradores que producirán potencias eléctricas comprendidas entre 2 y 5 MW.

Desde entonces, EEUU cuenta con numerosos proyectos para la utilización de la energía del viento, incluso en combinación con otras centrales como las hidroeléctricas. También ha mostrado un gran interés en promocionar los aerogeneradores entre el público para que no los rechace y entre los posibles interesados (fabricantes y usuarios). (Urquia, 82).

Desde 1973, y bajo la responsabilidad de la NASA, Estados Unidos reanudo la construcción de turbinas eólicas gigantes. Las dos más grandes miden 61 y 91 metros de diámetro y funcionan desde 1978 en Boone (Ohio) y en Barstow (California). Producen de 2.000 a 2.500 Kw de electricidad.

Ya en los años ochenta la energía eólica recibe un impulso decisivo cuando los aspectos medioambientales se convirtieron en problemas de primer orden. Como consecuencia de la ya mencionada crisis energética de los 70, aparecen los primeros programas de investigación en torno a la energía eólica, en los países de primer orden, que trajeron como resultado los prototipos de aerogeneradores más avanzados.

A finales de la década de los años setenta aparecieron los primeros aerogeneradores comerciales, los que se denominan de nueva generación. De estas primeras máquinas, a los aerogeneradores que se están instalando actualmente, se ha alcanzando un notable desarrollo, que permite afirmar que la tecnología de los aerogeneradores, medianos y grandes. (Jurado, 01).

Para demostrarlo tomemos en cuenta la siguiente tabla; en esta se presenta una comparación entre la tecnología utilizada en los sistemas conectados a la red en las últimas dos décadas. Para la comparación se utilizaron aerogeneradores tipo de las dos épocas comparadas, entre los años ochenta al 2002.

<b>Características</b>	<b>1982</b>	<b>2002</b>
Diámetro del rotor (m)	15	52
Área barrida (m <sup>2</sup> )	177	2124
Altura de la torre (m)	20	50
Potencia nominal (kw)	55	850
Producción anual (kwh)	110000	2550000
Peso Total (T)	12	80
Costo estimado (\$)	66600	850000
Producción / área barrida (kwh/m <sup>2</sup> )	621	1200
Peso palas / área barrida (kg/m <sup>2</sup> )	1,6	0,85
Peso góndola / área barrida (kg/m <sup>2</sup> )	31	17
Peso total / área barrida (kg/m <sup>2</sup> )	67	37,6
Costo potencia instalada (\$/kw)	1212	1000

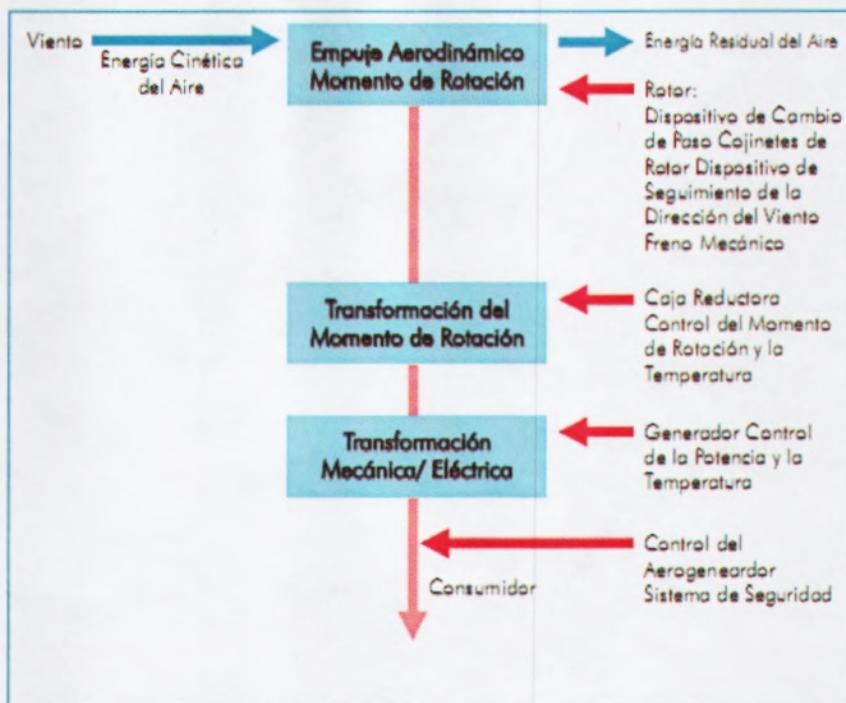
**Tabla 2.3:** Evolución de los aerogeneradores, periodo 1982 – 2002. (Orgill, 07).

La energía eólica se está volviendo más popular en la actualidad, al haber demostrado viabilidad industrial, y va ganando más adeptos en la búsqueda de una diversificación en el abanico de generación eléctrica ante un crecimiento de la demanda y una situación geopolítica cada vez más complicada en el ámbito de los combustibles tradicionales.

### **2.7 Funcionamiento de un aerogenerador.**

Los aerogeneradores son la evolución de los molinos de viento y hoy en día son aparatos de alta tecnología. Estos pueden trabajar de manera aislada o agrupados en parques eólicos o plantas de generación eólica, distanciados unos de otros, en función del impacto ambiental y de las turbulencias generadas por el movimiento de las palas. (Nuñez, 04).

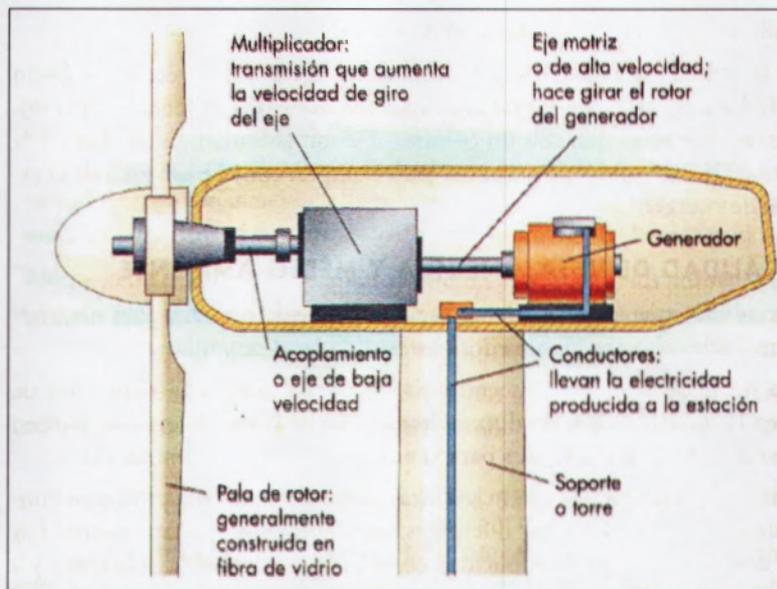
En términos simples, el funcionamiento de los aerogeneradores es de la siguiente manera; el viento mueve las hélices que conectadas a un generador transforman la energía mecánica rotacional en energía eléctrica.



**Figura 2.15:** Conversión de energía y componentes del sistema. (Wegley, 07).

Las turbinas eólicas se diseñan para convertir la energía del movimiento del viento (energía cinética) en energía mecánica, a través del movimiento de un eje al interior de la góndola, que entra a una caja de cambios. La caja de cambios (engranaje multiplicador) incrementa la velocidad de rotación del eje proveniente del rotor e impulsa el generador que utiliza campos magnéticos para convertir la energía rotacional en energía eléctrica. Todos estos mecanismos están colocados en una navecilla situada a gran altura sobre el suelo por medio de un soporte. (Albert, 09).

Para aportar energía a la red eléctrica, la energía del generador pasa por un transformador para adaptarla al voltaje necesario de la red de distribución. Los aerogeneradores deben estar dotados de un sistema de sincronización para que la frecuencia de la corriente generada se mantenga perfectamente sincronizada con la frecuencia de la red. La electricidad generada también puede ser almacenada en baterías, o utilizarse directamente en algunos casos. (UNESA).



**Figura 2.16:** Partes de un aerogenerador o turbina eólica. (Santianes, 08).

La mayoría de turbinas genera electricidad desde que el viento logra una velocidad de entre 3 y 4 metros por segundo, llegando a una velocidad máxima de 15 metros por segundo y se desconecta para prevenir daños cuando hay tormentas con vientos que soplan a velocidades medias superiores a 25 metros por segundo durante un intervalo temporal de 10 minutos. (Santianes, 08).

Los aerogeneradores en la parte superior de la góndola están provistos de instrumentos que miden la velocidad y la dirección del viento. Cuando el viento cambia de dirección, los motores giran la góndola y las palas se mueven con ella para ponerse de cara al viento. Las aspas también se inclinan o se ponen en ángulo para asegurar que se extrae la cantidad óptima de energía a partir del viento.

Toda esta información se almacena en los ordenadores y se transmite a un centro de control.

### **2.7.1 Según velocidades del viento.**

En la práctica las turbinas eólicas se diseñan para trabajar dentro de ciertas velocidades del viento, tales como:

- ❖ **Velocidad de corte inferior:** es la velocidad más baja, generalmente de 3 a 4 m/s, pues por debajo de esta velocidad no hay suficiente energía como para superar las pérdidas del sistema.
- ❖ **Velocidad de corte superior:** es determinada por la capacidad de una máquina en particular de soportar fuertes vientos.
- ❖ **Velocidad nominal:** es la velocidad del viento a la cual una máquina particular alcanza su máxima potencia nominal. Por arriba de esta velocidad, se puede contar con mecanismos que mantengan la potencia de salida en un valor constante con el aumento de la velocidad del viento.

### 2.7.2 Frenado de un aerogenerador.

En general se desea que el funcionamiento de un aerogenerador sea continuo pero, ¿qué sucede cuando por algún desperfecto mecánico, fallo eléctrico o mantenimiento se debe realizar una parada de emergencia?

Todo aerogenerador debe poseer un sistema que asegure la parada del rotor. Este subsistema consiste en un mecanismo capaz de reducir la velocidad del rotor hasta detenerlo totalmente. (Orgill, 07).

Los sistemas de frenado más empleados son:

- Mecánico.
- Aerodinámico.
- Pala a posición bandera (paralelo al viento).
- Desorientación.
- Cortocircuito eléctrico al generador.

### 2.7.3 Elementos principales de un aerogenerador.

Los elementos principales de cualquier turbina del viento son: el rotor, tren de potencia, generador, palas y la torre.

❖ **Rotor.**

Las palas del rotor se diseñan para que giren con en el viento, moviendo el generador de la turbina. Las turbinas del viento modernas de gran escala típicamente se equipan de rotores de tres palas con extensiones de 42 a 80 metros (138 a 262 pies) de diámetro. (Ramsdell, 07).

❖ **Tren de potencia o conversión mecánica.**

El tren de potencia está constituido por el eje de velocidad baja, la caja de cambios de velocidad, el eje de velocidad alta y las balineras o cojinetes que soportan los ejes. Se aplica en grandes sistemas eléctricos para adaptar la velocidad del eje a la del generador. Algunas turbinas no contienen la caja de cambios. (Wegley, 07)

❖ **Generador.**

Este es quien genera la electricidad cuando hay suficiente viento como para rotar las paletas. La electricidad se transfiere a la siguiente etapa usando el cableado (para el almacenaje, envió a la red o para el uso directo). Las turbinas de gran escala generalmente contienen generadores con capacidades entre 600 kilovatios y 2 MW. (Ramsdell, 07).

❖ **Palas.**

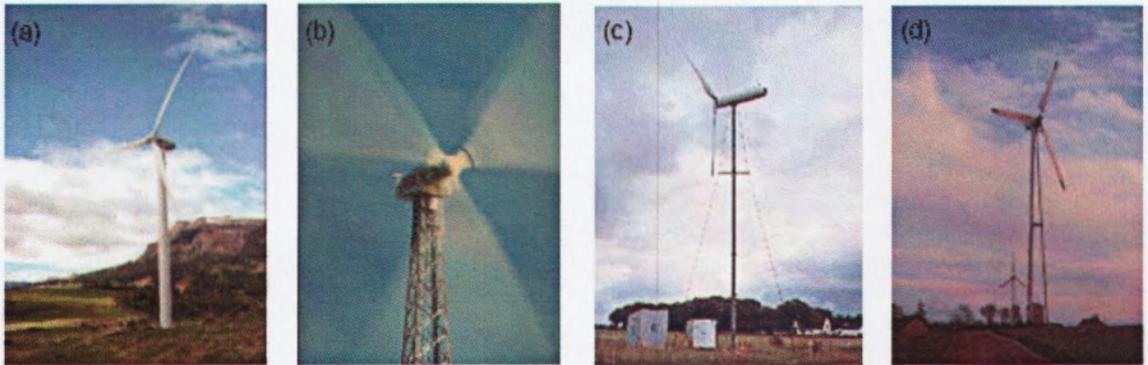
Capturan el viento y transmiten su potencia al buje. Se orientan para optimizar el rendimiento o detener el aerogenerador.

❖ **Torre.**

La torre eleva el montaje de las turbinas sobre las corrientes de aire turbulentas cerca de la tierra y permite capturar un viento de mayor velocidad. El diseño de torre es particularmente crítico, pues deben ser tan altas como sea económicamente posible (generalmente entre 40 y 100 metros), también deben ser robustas, permitir el acceso a la turbina para su mantenimiento, pero no agregar costo innecesario al sistema. Un aspecto

particularmente importante del diseño de torres es la eliminación de la resonancia entre la gama de frecuencias de las paletas que rotan y la frecuencia de resonancia de la torre. (Wegley, 07).

Las torres pueden ser:



*Figura 2.17: Tipos de torre. a) Tubular, b) Celosía, c) Tensada y d) Híbrida (Muerza, 09).*

#### 2.7.4. Accesorios y componentes secundarios.

❖ **Sistema de orientación (Veleta).**

Las máquinas de eje horizontal tienen este componente, el cual detecta la orientación del viento y coloca el rotor en su misma dirección para aprovecharlo al máximo. El sistema de orientación está compuesto por el cojinete, los motores eléctricos, los sensores y un freno mecánico.

❖ **Sistema de seguridad.**

Este pone la turbina en una situación estable y segura, en caso de que ocurran anomalías tales como pérdida de carga, velocidad de rotación o temperatura del generador a caja de cambios demasiado altas. (Ibañez, 06).

❖ **Anemómetro.**

Mide la velocidad del viento. En caso de que sea muy elevada el rotor se detiene automáticamente para evitar posibles daños.

❖ **Toma de aire.**

Para refrigerar el mecanismo.

❖ **Equipo de control y monitoreo.**

Permite por un lado detener la maquina y limitar su velocidad por razones de seguridad y por otro lado para la optimizar del funcionamiento de la turbina eólica. El sistema de control es diferente según el tamaño del aerogenerador.

❖ **Pararrayos.**

Protege de las descargas eléctricas.

## **2.8 Tipos de aerogeneradores**

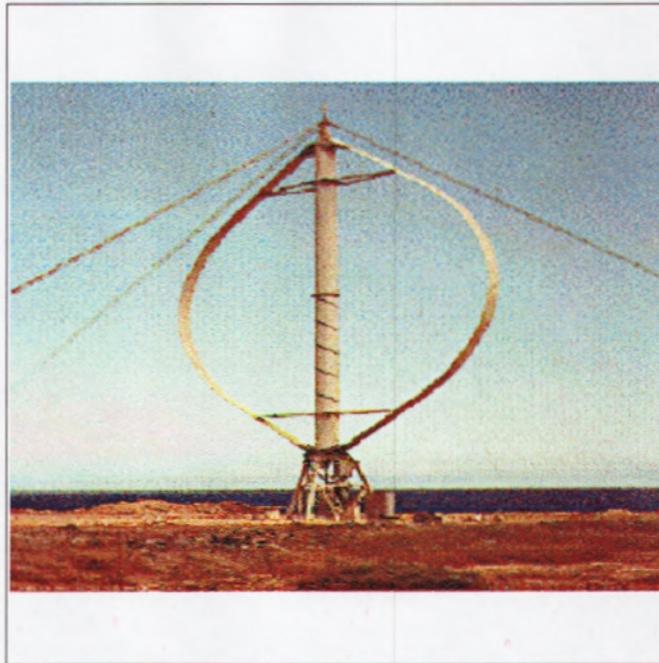
En la actualidad existe una enorme variedad de modelos de aerogeneradores, diferentes entre sí tanto por la potencia proporcionada, como por el número de palas o incluso por la manera de producir energía eléctrica. Pueden entonces atendiendo a distintos criterios clasificarse de la siguiente manera:

### **2.8.1 Por la orientación del eje del rotor respecto al suelo.**

❖ **Eje Vertical.**

Son también llamados "VAWTs", que corresponde a las siglas de la denominación inglesa "vertical axis wind turbines". Su característica principal es que el eje de rotación se encuentra en posición perpendicular al suelo. Existen tres tipos de estos aerogeneradores:

- a) *Darrieus*: Consisten en dos o tres arcos que giran alrededor del eje. (Rapallini, 09).



*Figura 2.18: Modelo Darrieus. (Albert, 09).*

- b) *Penémonas*: Cuatro o más semicírculos unidos al eje central. Su rendimiento es bajo.
- c) *Savonius*: Dos o más filas de semicilindros colocados opuestamente

❖ **Eje horizontal.**

Son los más habituales y en ellos se ha centrado el mayor esfuerzo de diseño en los últimos años. Se los denomina también "HAWTs", que corresponde a las siglas de la denominación inglesa "horizontal axis wind turbines". (Rapallini, 09).

**2.8.2 Por la orientación del equipo con respecto al viento.**

❖ **A barlovento:**

Son máquinas que tienen el rotor de cara al viento.

La principal ventaja de los diseños 'corriente arriba' es que se evita el abrigo del viento tras la torre. El principal inconveniente de los diseños corriente arriba es que el rotor necesita ser bastante inflexible, y estar situado a una cierta distancia de la torre.

Una máquina corriente arriba necesita un mecanismo de orientación para mantener el rotor de cara al viento. (Ramos, 08).

❖ **A sotavento:**

Son máquinas que tienen el rotor en la dirección opuesta al viento.

Las máquinas ‘corriente abajo’ tienen como ventaja que pueden ser construidos sin un mecanismo de orientación.

Si la máquina ha estado orientándose de forma pasiva en la misma dirección durante un largo periodo de tiempo y no dispone de un mecanismo de orientación, los cables eléctricos pueden llegar a sufrir una torsión excesiva.

La fluctuación de la potencia eólica, debida al paso del rotor a través del abrigo de la torre puede crear más cargas de fatiga en la turbina que con un diseño corriente arriba. (Ramos, 08).

### 2.8.3 Por el número de palas.

**Monopala:** Consta de una sola pala con un contra peso para nivelarse en el eje.



*Figura 2.19: Generador monopala. (UNESA.net).*

**Bipala:** Como su nombre lo indica tiene dos palas. Ver figura.



*Figura 2.20: Generador bipala. (UNESA.net).*

**Tripala:** Actualmente son los más utilizados por su gran eficiencia.



*Figura 2.21: Generador tripala. (UNESA.net).*

**Multipala:** tiene más de tres palas.



*Figura 2.22: Generador multipala. (UNESA.net).*

#### 2.8.4 Por la potencia nominal.

La producción de energía eléctrica a través del viento muchas veces se asocia con la imagen de numerosos y grandes aerogeneradores que forman los denominados parques eólicos. Sin embargo, también se pueden utilizar instalaciones eólicas de pequeño tamaño para dicho fin. La potencia de estas máquinas oscila desde apenas unos kilovatios hasta el centenar. (Ver tabla 2.4) .

Denominación	PN(kW)	Radio (m)	Aplicaciones
<b>Muy baja</b>	>1(microaer.) 1-10(miniaer.)	<1 1-3	Embarcaciones, sistemas de comunicación refugios de montaña, iluminación Granjas, viviendas aisladas, bombeo de agua
<b>Baja</b>	10-100	3-9	Comunidades de vecinos, PYME's
<b>Media</b>	100-1000	9-27	Parque eólicos (terreno complejo)
<b>Alta</b>	1000-10000	27-81	Parques eolicos (terreno llano, mar adentro,
<b>Muy alta</b>	>10000	>81	En fase de investigación y desarrollo. No antes del 2010.

*Tabla 2.4 Clasificación de los aerogeneradores por su potencia nominal.  
(Eco2site.com)*

#### 2.8.5 Por el mecanismo de orientación.

❖ **Mediante conicidad.**

Un motor eléctrico y una serie de engranajes llevan a cabo el giro del sistema.

❖ **Mediante una veleta.**

Es el método más sencillo para orientar un aerogenerador. Se emplea en sistemas pequeños.

❖ **Mediante molinos auxiliares.**

Esta tecnología no es muy usada; en ella unos pequeños rotores a ambos lados de la góndola y movidos pasivamente por el viento orientan al aerogenerador. (Le Gourieres, 83).

### **2.8.6 Según la forma de producir energía eléctrica.**

Se divide en dos: en conexión directa a la red de distribución convencional o de forma aislada:

❖ **Las aplicaciones aisladas** por medio de pequeña o mediana potencia se utilizan para usos domésticos o agrícolas (iluminación, pequeños electrodomésticos, bombeo, irrigación, etc.), incluso en instalaciones industriales para desalación, repetidores aislados de telefonía, TV, instalaciones turísticas y deportivas, etc. En caso de estar condicionados por un horario o una continuidad, se precisa introducir sistemas de baterías de acumulación o combinaciones con otro tipo de generadores eléctricos (grupos diesel, placas solares fotovoltaicas, centrales mini hidráulicas).

❖ **La conexión directa a la red** viene representada por la utilización de aerogeneradores de potencias grandes (más de 10 ó 100 kw). Aunque en determinados casos, y gracias al apoyo de los Estados a las energías renovables, es factible la conexión de modelos más pequeños, siempre teniendo en cuenta los costes de enganche a la red (equipos y permisos). La mayor rentabilidad se obtiene a través de agrupaciones de máquinas de potencia conectadas entre si y que vierten su energía conjuntamente a la red eléctrica. Dichos sistemas se denominan parques eólicos.

Por sus condiciones de producción caprichosa, está limitada en porcentaje al total de energía eléctrica (en la conexión directa a la red). Se considera que el grado de penetración de la energía eólica en grandes redes de distribución eléctrica, puede

alcanzar sin problemas del 15 al 20% del total, sin especiales precauciones en la calidad del suministro, ni en la estabilidad de la red. (Ruiz, 06).

En la siguiente figura se podrán reconocer algunos de los tipos de aerogeneradores antes mencionados:

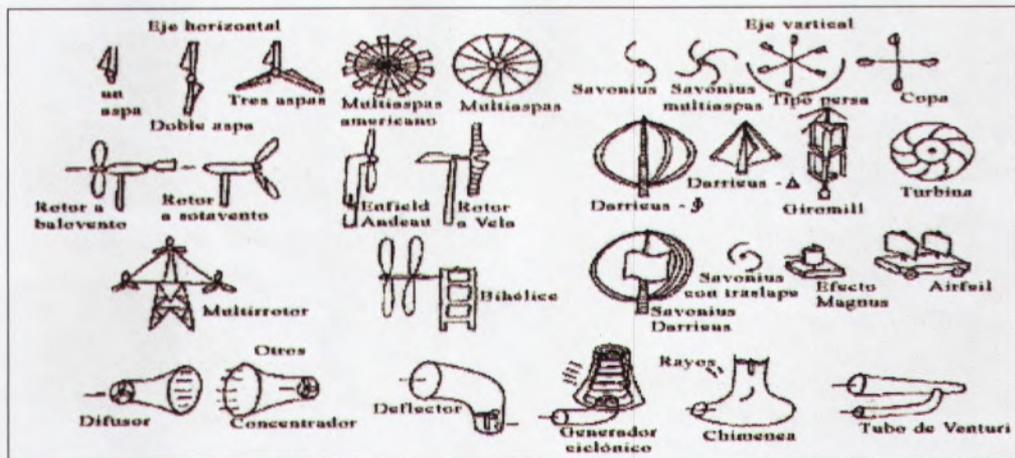


Figura 2.23: Algunos aerogeneradores. (Jurado, 01).

## 2.9 Generación a escala.

Generalmente al pensar en energía eólica nos viene a la mente la imagen de aquellas gigantescas instalaciones de las que anteriormente hablábamos, enormes campos y espacios de mar constituidos por cientos de inmensos aerogeneradores, pero también existe la opción de la energía mini eólica, que permite generar electricidad a nivel domestico, producir y consumir la electricidad nosotros mismos. (Harrison, 02).

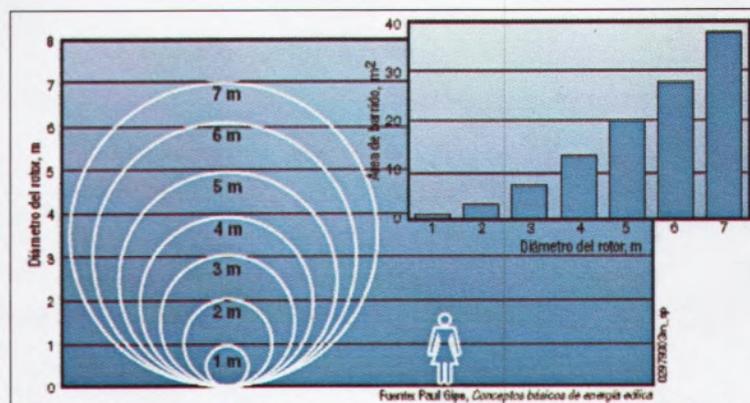


Figura 2.24: Tamaño relativo de pequeñas turbinas eólicas. (Ramos, 08).

Con la energía mini eólica producimos electricidad a pequeña escala, de forma sostenible, evitando los inconvenientes de la energía eólica convencional. Los pequeños aerogeneradores a diferencia de sus hermanos mayores tienen un efecto visual nulo en el entorno, no necesitan infraestructuras y tienen un fácil y económico mantenimiento. Hasta ahora uno de los inconvenientes de las instalaciones mini eólicas domésticas era su proximidad a las viviendas, el ruido y las vibraciones que producían, pero actualmente este problema está prácticamente solucionado con los mini aerogeneradores domésticos de última generación. Esta nueva generación de aerogeneradores domésticos, combina la energía mini eólica y la instalación de placas solares. (Muerza, 09).

La generación electricidad a pequeña escala con mini aerogeneradores puede ser la solución energética para zonas aisladas y alejadas de la red eléctrica, como viviendas aisladas, refugios de montaña, estaciones meteorológicas, etc. Aerogeneradores con potencias inferiores a los 100 Kw son ideales para el autoconsumo. (Cambria, 05).

Como se estableció anteriormente, si la instalación mini eólica se complementa con paneles solares térmicos y fotovoltaicos se puede conseguir la autosuficiencia energética y garantizar el suministro eléctrico de alguna instalación en particular.

La energía mini eólica es viable con vientos moderados y no necesita de estudios de viabilidad complicados. La sencillez de las instalaciones de estos mini aerogeneradores y su fácil mantenimiento son otra de sus principales ventajas.

El sector mini eólico está experimentando un fuerte desarrollo tecnológico, en el mercado se pueden encontrar pequeños aerogeneradores caseros de diferentes tamaños, versátiles, tecnológicamente muy fiables y de fácil instalación.

(Eco2site.com).

### **2.9.1 Energía eólica de pequeña potencia.**

La energía eólica de pequeña potencia puede cambiar radicalmente nuestro modelo energético. Gracias a los constantes avances tecnológicos, los pequeños

aerogeneradores son cada vez más eficientes, más seguros y menos ruidosos. Hasta hace poco estos mini aerogeneradores solo se podían utilizar en zonas aisladas debido principalmente al ruido y a las vibraciones que producían. En la actualidad cada vez se están instalando más aerogeneradores urbanos, modernas máquinas muy eficientes que demuestran el gran potencial de la generación distribuida de energía en nuestras ciudades. (windpowerinamerica.org).

Para el despegue de la energía eólica de pequeña potencia es necesario disminuir el coste por kw instalado. La combinación de una política que apoye al sector mini eólico y los futuros avances tecnológicos pueden llevarnos a una esperada y deseada revolución energética.

### **2.10 Cantidad de energía aprovechable del viento.**

Existen tres leyes físicas básicas que determinan la cantidad de energía aprovechable del viento.

- ❖ **La primera ley** indica que la energía generada por la turbina es proporcional a la velocidad del viento al cuadrado.
  
- ❖ **La segunda ley** indica que la energía disponible es directamente proporcional al área barrida de las paletas. La energía es proporcional al cuadrado de la longitud de las paletas.
  
- ❖ **La tercera ley** indica que existe una eficacia teórica máxima de los generadores eólicos del 59% (Ley de Betz, se detallará más adelante).

En la práctica, la mayoría de las turbinas de viento son mucho menos eficientes que esto, y se diseñan diversos tipos para obtener la máxima eficacia posible a diversas velocidades del viento. Los mejores generadores eólicos tienen eficacias del 35% al 40%.

### **2.10.1. Factores a considerar.**

Hay dos factores principales que hay que considerar al momento de realizar la instalación en campo de las turbinas eólicas. Estos son la localización donde se ubicarán las turbinas y el otro es la altura que tendrán las torres. A continuación se explican ambos factores.

#### **❖ Localización.**

Las estimaciones exactas de la velocidad del viento son críticas al momento de evaluar el potencial de la energía eólica en cualquier localización. Los recursos eólicos son caracterizados por una escala de clases de viento según su velocidad, que se extiende de la clase 1 (la más bajo) a la clase 7 (la más alta). Los desniveles de la superficie a través de la cual sopla el viento antes de llegar a una turbina determina la cantidad de turbulencia que ésta turbina experimentará. Los vientos turbulentos ejercen mayores tensiones sobre el rotor, reduciendo consecuentemente la expectativa de vida de la turbina. Así, la mayoría de granjas del viento están ubicadas en localizaciones rurales, lejos de edificios, de árboles y de otros obstáculos.

Pero esto bien podría ser una desventaja ya que una localización alejada de la red de distribución eléctrica puede llegar a ser poco rentable, pues se requerirán nuevas líneas de transmisión para conectar la granja eólica con la red. La infraestructura de transmisión existente puede llegar a necesitar una ampliación para poder manejar la fuente de energía adicional. Las condiciones del suelo y del terreno deben ser convenientes para la construcción de las fundaciones de las torres. Finalmente, la elección de una localización puede estar limitada por regulaciones sobre el uso de la tierra y la capacidad de obtener los permisos requeridos de las autoridades locales, regionales y nacionales. (eoliccat.com).

Clase	a 30 m de altura		a 50 m de altura	
	Velocidad del viento m/s	Potencia del viento W/m <sup>2</sup>	Velocidad del viento m/s	Potencia del viento W/m <sup>2</sup>
1	0-5.1	0-160	0-5.6	0-200
2	5.1-5.9	160-240	5.6-6.4	200-300
3	5.9-6.5	240-320	6.4-7.0	300-400
4	6.5-7.0	320-400	7.0-7.5	400-500
5	7.0-7.4	400-480	7.5-8.0	500-600
6	7.4-8.2	480-640	8.0-8.8	600-800
7	8.2-11.0	640-1600	8.8-11.9	800-2000

**Tabla 2.5** Escala de clases de viento según su velocidad. (Moreno, 02).

#### ❖ **Altura de la Torre.**

La altura de la torre afecta la cantidad de potencia que se puede obtener del viento con una turbina dada, así como las tensiones sobre el rotor. A una altura de un kilómetro sobre la superficie, las velocidades del viento no son influenciadas por el terreno que se encuentra debajo. El viento se mueve más lentamente cuanto más baja sea la altura, con la máxima reducción de velocidad del viento situada muy cerca de la superficie. Este fenómeno, conocido como esquileo del viento, es un factor determinante al momento de tomar la decisión sobre la altura de la torre, puesto que a mayor altura los rotores se exponen a vientos más rápidos. Además, las diferencias en la velocidad del viento entre la parte superior y la inferior del rotor disminuyen a mayores alturas, causando menor desgaste en la turbina. (EOLICCAT).

#### **2.11 Eficacia y potencial eólico.**

Un aerogenerador moderno está diseñado para captar con la máxima eficacia posible la energía contenida en la presión del viento.

- La altura de la columna sobre la que se asienta la barquilla (hasta 50 metros) permite la instalación de aspas enormes, de hasta 20 metros de largo. La

superficie de captación del viento (el círculo que cubren las aspas) es proporcionalmente grande, y por ende la cantidad de energía "atrapada".

- Las aspas son aerodinámicas, como las alas de un avión. Su diseño las fuerza a girar aun cuando el viento que reciban sea débil. Con vientos muy fuertes, la máquina debe pararse para evitar daños. (Nuñez, 04).

a) Potencia media durante un año.

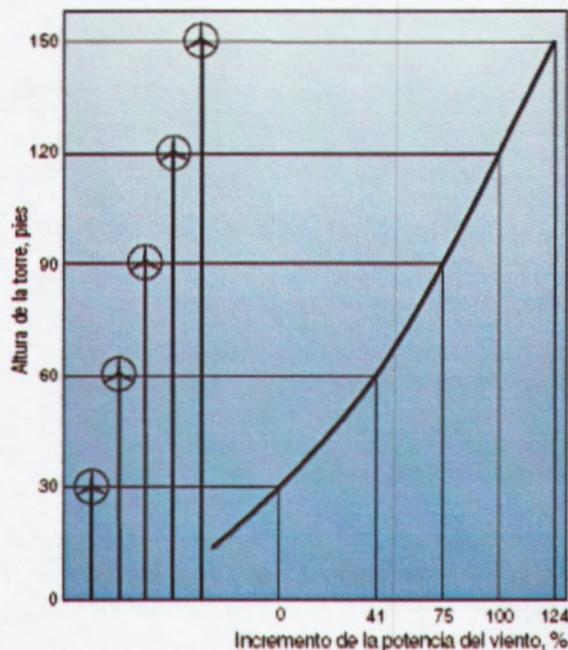
$$\bar{P} = \frac{1}{2} \rho A \bar{v}^3 = \frac{1}{2} \rho A c^3 \Gamma \left(1 + \frac{3}{k}\right)$$

b) Potencial eólico.

$$\frac{\bar{P}}{A} = \frac{1}{2} \rho c^3 \Gamma \left(1 + \frac{3}{k}\right)$$

c) Variación de la velocidad del viento con la altura

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



**Figura 2.25:** Incremento de la velocidad del viento con la altura. (Ramos, 08).

d) Variación del potencial eólico con la altura.

$$\frac{\overline{P'}}{\overline{P}} = \left(\frac{z'}{z}\right)^{3a}$$

## 2.12 Modelos matemáticos para uso de la energía eólica.

El viento es una masa de aire en movimiento. Al considerar la energía cinética asociada:

$$E_{cin} = \frac{1}{2} \cdot m_{aire} \cdot v^2 \quad (3.1)$$

- $E_{cin}$ : energía cinética del viento en [J].
- $m_{aire}$ : masa del aire en [kg].
- $v$ : velocidad del viento en [ $\frac{m}{s}$ ]

De la ecuación anterior se puede definir la potencia del viento como:

$$P(W) = \frac{dE_{cin}}{dt} = \frac{1}{2} \cdot \frac{dm_{aire}}{dt} \cdot v^2 \quad (3.2)$$

- $P$ : potencia del viento en [W].

La potencia es definida respecto a la cantidad de aire (masa) que circula por un determinado sector del espacio. (textoscientificos.com).

A su vez la masa puede ser expresada por:

$$m_{aire} (Kg) = \rho \frac{Kg}{m^3} \cdot V (m^3) \quad (3.3)$$

- $\rho$ : densidad del aire en ( $\frac{Kg}{m^3}$ )

- V: volumen de aire [ $m^3$ ]

Pero definir la variación de masa en el tiempo conlleva una variación del volumen de aire que circula por el mismo sector:

$$\frac{dm_{aire}}{dt} = \rho \cdot \frac{dV_{aire}}{dt} \quad (3.4)$$

A su vez el flujo está definido como:

$$F \left[ \frac{m^3}{s} \right] = \frac{dV_{aire}}{dt} \quad (3.5)$$

- F: flujo de aire [ $\frac{m^3}{s}$ ]

También es válida la siguiente igualdad:

$$F \left[ \frac{m^3}{s} \right] = A [m^2] \cdot v \left[ \frac{m}{s} \right] \quad (3.6)$$

- A: Sección ortogonal al vector

velocidad del aire<sup>2</sup> en  $m^2$ .

Se puede definir la variación del volumen en el tiempo como:

$$\frac{dV_{aire}}{dt} = A [m^2] \cdot v \left[ \frac{m}{s} \right] \quad (3.7)$$

Sustituyendo la ecuación 3.7 en la ecuación 3.4 se obtiene:

$$\frac{dm_{aire}}{dt} = \rho \cdot A [m^2] \cdot v \left[ \frac{m}{s} \right] \quad (3.8)$$

Luego sustituyendo 3.8 en 3.2, se obtiene la ecuación que define el comportamiento de la potencia de una masa de aire (viento) que se desplaza con una cierta velocidad por unidad de superficie.

$$P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^3 \quad (3.9)$$

Se puede notar que los factores que definen esta potencia son:

- A: Superficie  $m^2$
- $\rho$ : densidad del aire  $\frac{Kg}{m^3}$  (varia con la temperatura, la altura y la humedad).
- V: velocidad del viento en  $\frac{m}{s}$ .

La función 3.9 expresa la potencia en función del cubo de la velocidad del viento y proporcional a la superficie de la sección. Se puede afirmar que la potencia sigue un comportamiento cuadrático respecto al diámetro del aerogenerador si se considera la velocidad del viento como constante. El gráfico 3.1 muestra la magnitud de potencia de un aerogenerador a dependencia de su diámetro.

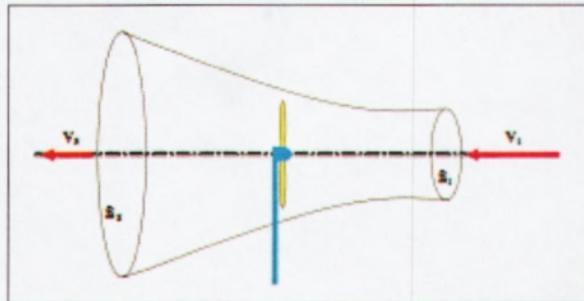


**Figura2.26:** Potencia vs diámetro del aerogenerador. (Monterrubio e Ibáñez, 02).

Se aprecia que la potencia crece proporcionalmente con el cubo de la velocidad y al cuadrado respecto al radio del aerogenerador (superficie).

### 2.13 Ley de Betz.

Para calcular la potencia promedio que es aprovechada por el rotor debemos usar la llamada ley de Betz, que es demostrada de la siguiente manera:



*Figura 2.27: Tubo de corriente de aire. (Drake, 07).*

Supongamos que la velocidad a la que entra el viento al tubo de corriente es de valor  $V_1$  y a la velocidad que sale es de  $V_2$ , podemos suponer que la velocidad a la que el viento entra al aerogenerador es de  $(V_1+V_2)/2$ .

El flujo másico que entra al rotor entonces tiene valor de:

$$M = \rho A \frac{(V_1 + V_2)}{2}$$

Dado que en un tubo de corriente se debe conservar la potencia, la potencia que entra a velocidad  $V_1$  tiene que ser igual a la suma de la potencia que sale a velocidad  $V_2$  y la que se va por el rotor.

Entonces la potencia que se va por el rotor es:

$$P_{rotor} = \frac{1}{2} M (V_2^2 - V_1^2)$$

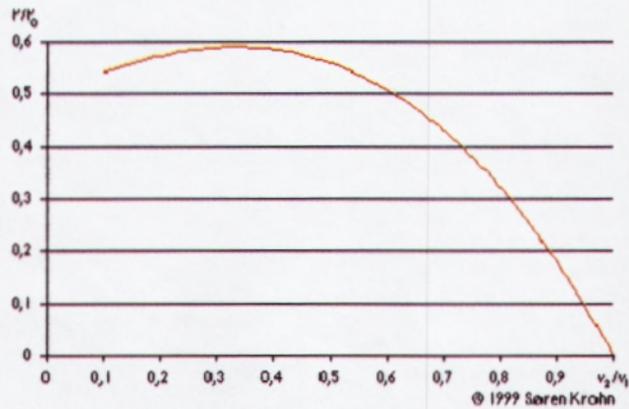
Y reemplazando la masa nos queda:

$$P = (\rho/4)(V_1^2 - V_2^2)(V_1 + V_2)A$$

La potencia que lleva el viento antes de llegar al rotor viene dado por:

$$P_0 = (\rho/2)V_1^3 A$$

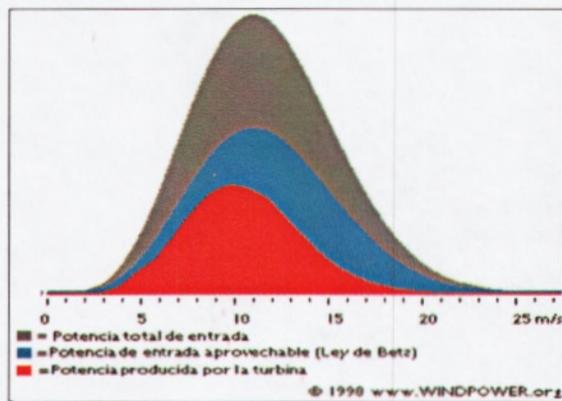
Ahora si la comparamos con la potencia que lleva el viento nos da la siguiente gráfica:



**Figura 2.28:** Gráfica comparativa del viento antes y después de llegar al rotor. (Fernández, 02).

Cuyo máximo viene dado por 0.59 aproximadamente, es decir la máxima potencia que se puede extraer del viento es de 0.59 veces esta potencia.

#### 2.14 Comparación entre las potencias.



**Figura 2.29:** Gráfica comparativa de potencias. Fuente: (Fernández, 02).

La figura 2.29 muestra las potencias del viento, la extraída por el rotor y la potencia transformada a electricidad.

La extraída por el rotor está limitada por la ley de Betz y la transformada a electricidad está limitada por la eficiencia del generador.

Como la potencia entregada dada por el generador eólico depende de la velocidad del viento la eficiencia va a depender también de la velocidad del viento registrándose eficiencias máximas del orden de 44%. (Windpower.com).

Hay que tener además bien en claro que para la lograr una eficiencia alta como la que sale aquí es necesaria muchos gastos que aumentarían el costo de producir un Kw. mas, por lo tanto máxima eficiencia no implica menor costo de generación.

### **2.15 Impacto Ambiental.**

El impacto ambiental es aquella alteración de la línea de base como consecuencia de la acción del hombre. De manera más concreta, podríamos decir que el impacto ambiental es el efecto que produce una determinada acción humana sobre el medio ambiente en distintos aspectos.

Actualmente, en el mundo se pretende conservar el planeta en toda su magnitud. Tanto así, que existen organismos y leyes internas en los países, que tienen como objetivo principal preservar el ecosistema. Estos consisten en estudios detallados de como minimizar el impacto ambiental y las medidas a tomarse para poder ser autorizados a dar marcha al proyecto. (Wegley, 07).

### **2.16 Estudios previos para la instalación de un parque eólico.**

Con el profundo estudio del impacto ambiental, se pretenden evaluar las alteraciones que puede sufrir el entorno por la implantación de fuentes de generación eólica en sus diferentes fases.

Estas fases son:

- Construcción (Emplazamiento)
- Explotación (Funcionamiento)
- Futuro abandono de las instalaciones

### **Fase de construcción**

Generalmente, es la fase en la cual se producen la mayor cantidad de alteraciones, ya que se lleva una profunda rutina para el montaje y se necesita construir accesos viales a la ubicación, estructuras y otro tipo de instalaciones que favorecen al desarrollo inicial del proyecto. (Catambria, 05).

### **Fase de explotación**

A lo largo del tiempo es necesario considerar que la instalación puede sufrir alteraciones. Lo que nos indica que se debe observar periódicamente las incidencias que se pueden producir o se están produciendo en el entorno, con el fin de corregirlas. Los posibles mantenimientos y etapas de supervisión podrían traducirse como impactos significativos debido al desarme y rearme de la maquinaria en cuestión y todo lo que conlleva hacerlo, como por ejemplo, repuestos y maquinaria nueva. (Catambria, 05).

### **Fase de abandono de las instalaciones**

Es conveniente considerar los cambios que pueden darse en el entorno con el futuro desmontaje del parque una vez finalizada su vida útil.



*Figura 2.30: Accesos y montaje de un parque eólico. (Tuleda, 06).*

Los estudios consisten en:

- 1.- Identificación técnica previa de la ubicación donde se instalará el parque eólico, con sus características principales del entorno.
- 2.- Definición de los parámetros medioambientales del proyecto.
- 3.- Predicción de las posibles alteraciones que ocasionará las fases de construcción del parque eólico.
- 4.- Estudio puntual de las medidas correctoras y realizar un plan de vigilancia ambiental durante la fase explotación. (Harrison, 2000).

Es importante prever los cambios medioambientales que puedan darse en el diseño del proyecto, pero existen casos que es difícil pronosticar la magnitud de las alteraciones, por lo que las medidas correctoras deben ir en función del plan de vigilancia. (cedecap.org).

### **2.17 Impactos ambientales más comunes.**

A pesar de que las plantas de generación eólica presentan un impacto ambiental relativamente pequeño en comparación con otras fuentes de energía, existe cierto rechazo principalmente por parte de los naturalistas. (cubasolar).

Las razones que aquejan son:

- Ruido producido por el giro del rotor.
- Impacto visual o paisajístico.
- Muerte de aves por colisión con las palas de las turbinas.

Gran parte de estos problemas se han solucionado o reducido mediante el desarrollo tecnológico o una adecuada ubicación de las plantas eólicas.

Entre los impactos más comunes tenemos:

- Impacto ecológico y visual.
- Impacto sobre la fauna avícola.
- Impacto acústico.
- Interferencia Electromagnética.
- Salud pública y seguridad.

#### **2.17.1. Impacto Ecológico y Visual.**



*Figura 2.31: Impacto visual generado por un parque eólico. (Ruiz, 06).*

Generalmente, los parques eólicos están ubicados en un entorno alejado, en zonas naturales (cimas montañosas, zonas costeras, o islas) por razones técnicas, produciendo de esa manera cierto impacto visual y ecológico.

Esto se refiere al movimiento de tierras, la construcción de carreteras y pistas de acceso al parque eólico. En comparación con los demás tipos de generación eléctrica podemos afirmar que ninguna otra permite restaurar de manera fácil el entorno al final de su vida útil. (Catambria, 05).

Por medio de la tecnología, ha sido posible mejorar este impacto. Entre las soluciones existen:

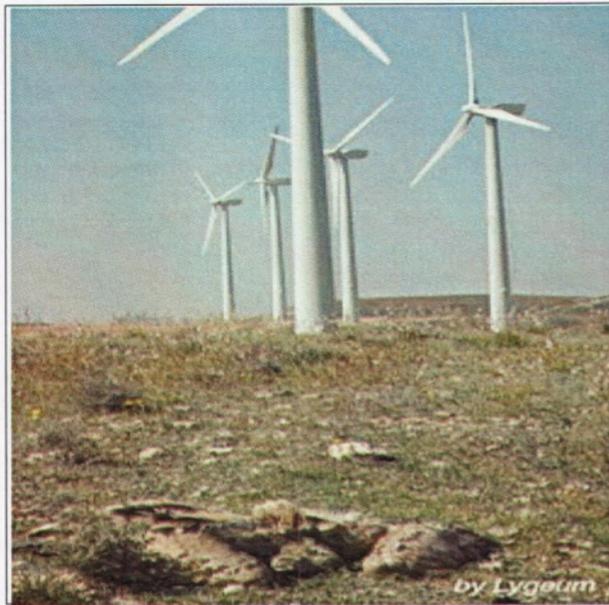
- Construcción de aerogeneradores de menor tamaño.
- Pintar los aerogeneradores con colores para mejorar el impacto paisajístico.
- Para las zonas llanas suele ser una buena estrategia disponer de turbinas con una buena distribución geométrica.
- En el caso de que sean instaladas en cimas montañosas se recomienda instalarlas sobre el contorno del paisaje para mejorar el impacto visual.

Existen estudios, para llevar a cabo la integración de generadores eólicos en las torres de red eléctrica. Con esto evitaremos nuevos impactos en zonas naturales y también el aprovechamiento de las estructuras previamente instaladas. (Masson, 83).

### **2.17.2. Impacto sobre la fauna avícola.**

El impacto sobre la fauna avícola es uno de los inconvenientes que afecta en su mayoría a las aves migrantes. Estudios minuciosos han comprobado que una vez que la obra haya sido finalizada (construida en su totalidad) el riesgo que corren las aves locales es casi nulo; no así, el de las aves migratorias que corren el riesgo de colisión contra las aspas, torres y tendidos eléctricos. (Masson, 83).

Dependerá mucho la fisionomía de las aves. Características como tamaño, visión y agilidad de vuelo para evitar una colisión.



*Figura 2.32: Buitre muerto enfrente de un pequeño parque eólico. (Lygeum, 06).*

Es por esto que previamente a la construcción de un parque eólico se realiza un estudio que otorgará un resultado de la presencia y el paso de aves, acompañado por un inventario de especies.

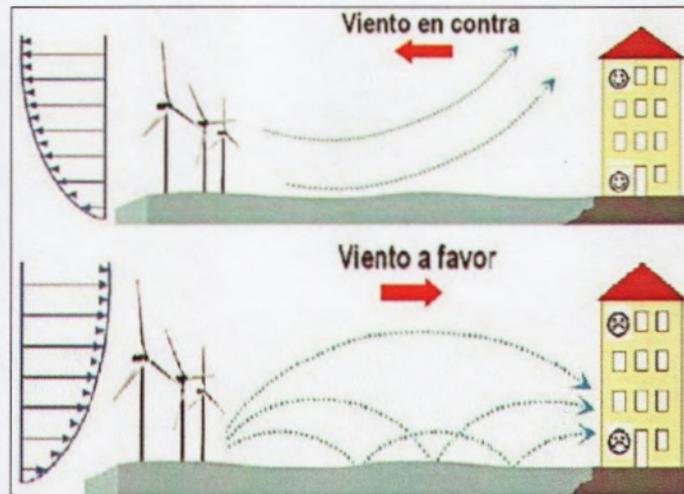
Por esta razón se han determinado las siguientes soluciones:

- Un dispositivo que genera un sonar perceptible solo para las aves, este ruido logrará que las aves puedan evadir los parques eólicos y tomen otra ruta.
- Otro mecanismo que está en planes es el de un artefacto que logra detectar la presencia de las aves y su trayectoria, con el fin de detener las palas (si es posible) de los aerogeneradores y evitar su colisión contra las aves.

### **2.17.3. Impacto acústico.**

La contaminación acústica afecta mayoritariamente a los seres humanos. Este tipo de contaminación consiste en ruidos y vibraciones provocadas por las turbinas eólicas. Cuando el viento va del aerogenerador hacia la población, el sonido puede ser tremendamente molesto, especialmente para agricultores y personas que residen en

las cercanías de la turbina. Todo lo contrario, cuando el viento recorre desde la población hacia el aerogenerador, el ruido es casi imperceptible. (Figueredo, 08).



*Figura 2.33: Sonido llevado por el viento. (Tuleda, 06).*

A continuación se presentan algunas soluciones:

- Los parques eólicos deben ser ubicados a una distancia significativa (1 km mínimo) de las viviendas más cercanas.
- Turbina esférica silenciosa: Los científicos están trabajando en la construcción de una turbina, que genera un ruido casi inaudible.

#### **2.17.4. Interferencia electromagnética.**

Este impacto afecta a las ondas de radio, microondas, comunicaciones (civiles y militares) y las señales de los sistemas de control de navegación y tráfico aéreo. Cualquier estructura grande que se mueva puede producir interferencia electromagnética (IEM).

Las turbinas eólicas pueden causar interferencias por reflexión de la señal en las palas del rotor y por lo tanto cualquier receptor cercano puede captar señal directa y reflejada. La interferencia ocurre porque la señal reflejada sufre un retraso debido a la diferencia entre la longitud del camino recorrido y el efecto Doppler (cambio de

frecuencia de una onda producido por el movimiento relativo entre la fuente y el emisor) ocasionado por el movimiento de las palas. (Windpoweringamerica.org).

Las palas metálicas afectan a las telecomunicaciones generando mayor interferencia electromagnética, ya que son fuertemente reflectantes.

Soluciones:

- Elaboración de palas más modernas: fabricadas de plástico reforzado con fibra de vidrio o palas de madera laminadas, lo que disminuyen considerablemente el impacto sobre las telecomunicaciones.
- Las interferencias pueden ser corregibles usando técnicas que no son muy caras tales como el uso de transmisores o receptores más direccionales

La experiencia científica ha demostrado que un diseño cuidadoso de un parque eólico puede eliminar cualquier disturbio al sistema de telecomunicaciones.

#### **2.17.5. Salud pública y seguridad.**

Este tema es fundamental para la seguridad personal de quienes trabajan o habitan en áreas aledañas a las turbinas eólicas.

##### Materiales tóxicos o peligrosos:

Estos materiales son pequeñas cantidades de aceites lubricantes, fluidos hidráulicos y aislantes utilizados en las turbinas. Sin embargo, hay que tener en cuenta que en pequeñas pérdidas de estos materiales pueden contaminar el agua, el aire o producir impactos sobre el hábitat en general si la pérdida no es controlada a tiempo.

##### Accidentes mecánicos:

En este tema están contemplados:

- La separación de una pala o pieza de la turbina del rotor que vuela en la dirección del viento puede causar desastres materiales e incluso lesiones o la muerte de personas.
- Desprendimientos de láminas sin romperse. Estos eventos son raros y usualmente ocurren bajo condiciones de viento inesperadas y sin precedentes.

#### Negligencia y descuido por parte de autoridades y transeúntes:

Aunque la mayoría de los proyectos eólicos están localizados en áreas rurales, son claramente visibles desde rutas públicas y accesibles al público. Incluso estas instalaciones se han destinado en muchas ciudades como atractivos turísticos que cada año ganan más visitas.

Dado que la tecnología y los equipos asociados con generación eólica son de alguna manera novedosos, nuevos e inusuales, puede ser un atractivo para aquellas personas que pasan cerca de los parques y desean acercarse o tocar una turbina eólica.

El movimiento de las palas podría causar:

- Roturas, desmembramiento de alguna parte del cuerpo o muerte por el movimiento de las palas.
- Colapso o caída de las turbinas.

## CAPÍTULO 3

### ESTADO DEL ARTE DE LA PLATAFORMA VIRTUAL LABVIEW.

#### 3.1 ¿Qué es Labview?

Labview es una herramienta gráfica para pruebas, control y diseño mediante la programación. El lenguaje utilizado se llama lenguaje G, donde la G simboliza que es lenguaje gráfico. Un lema tradicional de Labview es: "*La potencia está en el Software*". (National Instruments).

Este programa fue creado por National Instruments (1976) para funcionar sobre máquinas MAC, pero vio la luz comercial por primera vez en 1986. Ahora está disponible para las plataformas Windows, UNIX, MAC y Linux, incluyendo Windows Vista. (National Instruments).

#### 3.2 Breve historial de Labview.

Fue en 1986 que la primera versión de Labview se realiza sobre Macintosh. Se sigue un trabajo incesante para añadir funcionalidades:

<i>AÑO</i>	<i>VERSION</i>	<i>DESCRIPCION</i>
1986	LabVIEW 1.0	Primera versión en Mac OS
1990	LabVIEW 2.0	Máximo aprovechamiento de los resultados
1992	LabVIEW 2.5	Primera versión para Windows 3.1 y Solaris.
1993	LabVIEW 3.0	
1994	LabVIEW 3.0.1	Primera versión en Windows NT
1994	LabVIEW 3.1.	
1995	LabVIEW 3.1.1	Integración del Application Builder (creación de archivos

		ejecutables)
1996	LabVIEW 4.0.	
1997	LabVIEW 4.1.	
1998	LabVIEW 5.0	Multitarea, contenedores ActiveX, asistente para la adquisición de dato (tarjetas de adquisición DAQ) e asistente para el control de instrumentos.
1999	LabVIEW 5.1	Primera versión para Linux, primera versión de LabVIEW RT (Real Time).
2000	LabVIEW 6.0	Controles gráficos en 3D, referencias de controles.
2001	LabVIEW 6.1	Mejoramiento y correcciones, primera versión en Palm OS.
2003	LabVIEW 7.0	Primera versión en Windows Mobile 2003
2004	LabVIEW 7.1	Traducción en francés, alemán y japonés.
2005	LabVIEW 8.0	Project Explorer, XControls, shared variables.
2005	LabVIEW 8.1	Mejoramiento y correcciones.
2006	LabVIEW 8.2	Programación orientada a objetos.
2007	LabVIEW 8.5	Primera versión del toolkit FPGA y del toolkit Statechart.
2008	LabVIEW 8.6	Limpieza automática de los diagramas.

2009	LabVIEW 2009	MathScript RT, LabVIEW de 64 Bits, Recursividad Nativa, Orientación de Objetos en LabVIEW RT/FPGA, SSL (Seguridad) para Servicios Web, Limpieza Parcial de Diagrama de Bloques, Fácil Nuevos Controles de Visualización de Datos en 2D y 3D, Métricas de Complejidad de Código, Referencias de Datos, Acceso más Rápido a Archivos TDMS, , Herramientas de Réplica de Sistemas y VIs PDE (ecuación diferencial parcial).
2010	NI LabVIEW 2010	Incremento en tiempo de ejecución, resolución de problemas de soporte, integración de temporización y sincronización con lenguaje G.

**Tabla 3.1:** Historial de Labview. (National Instruments).

### 3.3 Usos de Labview.

Labview es usado principalmente por ingenieros y científicos para tareas como:

- Adquisición de datos y análisis matemático.
- Comunicación y control de instrumentos de cualquier fabricante.

- Automatización industrial y programación de PACs (Controlador de Automatización Programable).
- Diseño de controladores: simulación, prototipaje rápido, hardware-en-el-ciclo (HIL) y validación.
- Diseño embebido de micros y chips.
- Control y supervisión de procesos.
- Visión artificial y control de movimiento.
- Robótica.
- Demótica y redes de sensores inalámbricos.

Es muy utilizado también en el área de laboratorio en las universidades, aplicación en tiempo real de aplicaciones biomédicas, manipulación de imágenes y audio, diseño de filtros digitales, generación de señales, monitoreo de transportación, entre otras etc.

- En 2008 el programa fue utilizado para controlar el LHC, el acelerador de partículas más grande construido hasta la fecha.
- Juguetes como el Lego Mindstorms o el WeDo lo utilizan, llevando la programación gráfica a niños de todas las edades. (National Instruments).

### **3.4. Características de Labview.**

Una de las principales características de Labview es su facilidad de uso, esto permite que tanto principiantes como los usuarios más avanzados puedan desarrollar proyectos de manera sencilla y sin complicaciones.

Como se ha dicho es una herramienta gráfica de programación, esto significa que los programas no se escriben, sino que se dibujan, facilitando su comprensión. Al tener ya pre-diseñados una gran cantidad de bloques, se le facilita al usuario la creación del proyecto, con lo cual en vez de estar una gran cantidad de tiempo en programar un dispositivo/bloque, se le permite invertir mucho menos tiempo y dedicarse un poco más en la interfaz gráfica y la interacción con el usuario final. (National Instruments)

Presenta facilidades para el manejo de:

- Interfaces de comunicaciones:
  - Puerto serie
  - Puerto paralelo
  - GPIB
  - PXI
  - VXI
  - TCP/IP, UDP, DataSocket.
  - Irda.
  - Bluetooth
  - USB
  - OPC...
- Capacidad de interactuar con otros lenguajes y aplicaciones:
  - DLL: librerías de funciones
  - .NET
  - ActiveX
  - Multisim
  - Matlab/Simulink
  - AutoCAD, SolidWorks, etc.
- Herramientas gráficas y textuales para el procesado digital de señales.
- Visualización y manejo de gráficas con datos dinámicos.
- Adquisición y tratamiento de imágenes.
- Control de movimiento (combinado incluso con todo lo anterior).
- Tiempo Real estrictamente hablando.
- Programación de FPGAs para control o validación.
- Sincronización entre dispositivos.

### **3.4.1 Flujo de Datos.**

Otra característica primordial se encuentra en el flujo de datos, que muestra la ejecución secuencial del programa, es decir, una tarea no se inicia hasta no tener en