

# UNIVERSIDAD DE ZARAGOZA

## PROYECTO FINAL

**AUTOR:** RODRIGO PEREZ RAMIREZ

**Master o Postgrado** MASTER EUROPEO EN ENERGÍAS RENOVABLES

“DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN PEQUEÑO AEROGENERADOR DE  
100 W PARA SU APLICACIÓN EN ZONAS INDIGENAS DE MEXICO”

**TUTOR:** JOSE ANTONIO DOMINGUEZ

**Dpto./Área/Empresa** DEPARTAMENTO DE INGENIERIA ELECTRICA  
COLEGIO SUPERIOR DE INGENIEROS

**Año Académico:** 2005-2006

**Fecha de entrega:** 23 de diciembre 2006

# UNIVERSIDAD DE ZARAGOZA

## PROYECTO FINAL

**AUTOR:** RODRIGO PEREZ RAMIREZ

**Master o Postgrado** MASTER EUROPEO EN ENERGÍAS RENOVABLES

“DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN PEQUEÑO AEROGENERADOR DE 100 W PARA SU APLICACIÓN EN ZONAS INDIGENAS DE MEXICO”

**TUTOR:** JOSE ANTONIO DOMINGUEZ  
**Dpto./Área/Empresa** DEPARTAMENTO DE INGENIERIA ELECTRICA

**Año Académico:** 2005 - 2006

**Fecha de entrega:** 23 diciembre 2006

### DECLARACIÓN del AUTOR

El abajo firmante declara que el contenido del resumen del presente Proyecto Final de Master o Postgrado NO tiene carácter confidencial y autoriza su divulgación en cualquier medio y soporte.

El abajo firmante declara que el contenido completo del Proyecto Fin de Master o Postgrado:

**SÍ** tiene carácter confidencial

**NO** tiene carácter

confidencial

**SÍ** autoriza su consulta a uso docente

**NO** autoriza su consulta a

uso docente

**SÍ** autoriza su divulgación a través de cualquier medio o soporte

**NO** autoriza su divulgación

En ..Zaragoza España a 23 de Diciembre de 20006

Fdo. ....

*Nombre y apellidos del alumno*

<b>1. INTRODUCCIÓN</b>	1
1.2 Antecedentes y contexto.	2
1.3 El Sector Eléctrico	4
1.4 La Electrificación Rural	5
1.5 El papel de la energía en el desarrollo humano	7
1.6 La energía desde los Objetivos de Desarrollo del Milenio	8
1.7 Opciones tecnológicas	11
1.8 Uso del aerogenerador de baja potencia	12
<b>2.- OBJETIVOS</b>	15
<b>3.- DIAGNOSTICO DE LA REGION QUE ABARCA EL PROYECTO</b>	15
3.1 Los pueblos indígenas	15
3.2 Localización	17
3.3 Recurso eólico	19
3.4 Evaluación del Potencial eólico	20
3.5 Fundamentos de la estimación del recurso del Viento.	22
<b>4 . METODOLOGIA Y METODOS UTILIZADOS</b>	26
4.1 Proceso general de diseño	26
4.2 Análisis de factibilidad y determinación de los lineamientos generales del proyecto	26
4.3 Sistema de Control	27
4.4 Mediciones y ensayos preliminares de Anemometría(estudio de la velocidad del viento)	28
4.5 Diseño mecánico	28
<b>5.- DISEÑO, CONSTRUCCION Y CARACTERIZACION DE LA INSTALACION Y AEROGENERADOR.</b>	30
5.1 Determinación de la carga	30
5.2. Estudio potencial eolico	34
5.3 . Descripción del aerogenerador	39
5.3.1 Estator	40
5.3.2 Palas	41
5.3.3 Las bobinas	49
5.3.4 Rotores magnéticos	50
5.3.5 Los imanes	51
5.3.6 El buje	51
5.3.7 El eje	52
5.3.8. El montaje eléctrico	52
5.3.9 Los discos del rotor	54
5.3.10 La montura del aerogenerador	55
5.3.11 Parte interna de la bisagra de la cola	57
5.3.12 Cola del aerogenerador	57
5.3.13. Veleta	59
5.3.14 La estructura (torre)	60
5.3.15 Conexión a las baterías	60
<b>6.- MATERIALES Y PESO DEL AEROGENERADOR</b>	61
<b>7. ESTUDIO ELÉCTRICO DEL AEROGENERADOR</b>	62
7.1 Cálculo teórico de la tensión eficaz inducida en una bobina	64
7.2. Cálculo teórico de la tensión de salida del generador	67
7.3 - Caracterización del aerogenerador	70
<b>8. ESTUDIO DE VIABILIDAD ENERGÉTICA</b>	72
8.1. Energía incorporada a los materiales	72
8.2. Consumo total de energía	75

8.3 Cálculo del tiempo de retorno energético	77
8.4. Mantenimiento	77
<b>9. ESTUDIO MEDIO AMBIENTAL Y SOCIAL</b>	<b>78</b>
9.1. El impacto ambiental de la energía eólica	78
9.1.1. Ahorro de emisiones	78
9.1.2. Otros beneficios	78
9.1.3 Interacciones con el medio físico	79
9.1.4. Interacciones con el medio biótico	79
9.1.5 Vegetación	80
9.1.6. Interacciones con el medio humano	80
9.1.6 El ruido	81
9.2. Impacto socioeconómico regional	82
9.2.1 Coste económico de la construcción del aerogenerador	82
<b>10.- CONCLUSIONES</b>	<b>84</b>
<b>11. BIBLIOGRAFIA</b>	<b>85</b>

# DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN PEQUEÑO AEROGENERADOR DE 100 W PARA SU APLICACIÓN EN ZONAS INDIGENAS DE MEXICO

**Pérez Ramírez, Rodrigo**

**Abstract:** el presente documento tiene por finalidad presentar la experiencia en el desarrollo tecnológico de un micro aerogenerador de 100 w para su aplicación en zonas indígenas de México. El objetivo principal fue desarrollar la tecnología de diseño, fabricación e instalación de aerogeneradores pequeños para el cargado de baterías, para el desarrollo de este generador se toma como base el diseño realizado por itdg Perú y Hugg Piggot, para lo cual fue necesario evaluar también las condiciones energéticas eólicas del lugar con el fin de conocer los parámetros característicos del viento, que son el de forma  $k$  y de escala  $c$  de la ecuación de Weibull, cuyos valores obtenidos con el método de la desviación estándar y los registros de viento por un periodo de 6 meses son:  $k=1,83$  y  $c=5,85$ , velocidad media  $5,2$ . Las principales características del generador fueron 8 pares de polos de imanes permanentes colocados en forma axial sobre discos de freno de un automóvil compacto, 6 bobinas en el estator conectadas en estrella simple trifásico rectificado por un puente de diodos, diámetro de palas de  $2,4$ , sistema de control mediante veleta de corte. El sistema trabaja a bajas velocidades de giro del rotor, en un rango de  $180$  a  $450$  rpm, genera potencia a partir de una velocidad de viento de  $4$  m/s y una velocidad de corte de  $13$  m/s. Para una velocidad de viento de  $7,1$  m/s se obtiene una potencia de  $100$  w con una velocidad de giro de  $260$  rpm, el rango de mayor eficiencia para velocidades de viento esta entre  $5$  y  $8$  m/s. La eficiencia total del sistema a condiciones nominales es del  $12\%$ , muy por debajo de los aerogeneradores actualmente conocidos pero para economías de bajos recursos este sistema puede ser una alternativa energética ya que su costo de construcción es de  $690,23$  €.

**Palabras clave:** Generador de imanes permanentes, pequeños aerogeneradores, aeroturbinas.

## 1. INTRODUCCIÓN

En lugares apartados de la red eléctrica nacional es necesario un suministro estable de energía eléctrica para determinadas aplicaciones, una fuente muy usada en el mundo es la producción de esta a partir de generadores de imanes permanentes, si bien es cierto la adaptación de alternadores de autos para generar brindan resultados satisfactorios para ciertas condiciones de cargas y requerimientos de potencia, no lo son, en aquellos casos donde la fuerza motriz es variable se necesita otro tipo de equipamiento, entonces se hace

necesario el uso de un generador de imanes permanentes, este tipo de máquina no necesita sistemas de transmisión ni alimentación a un circuito de campo[1].

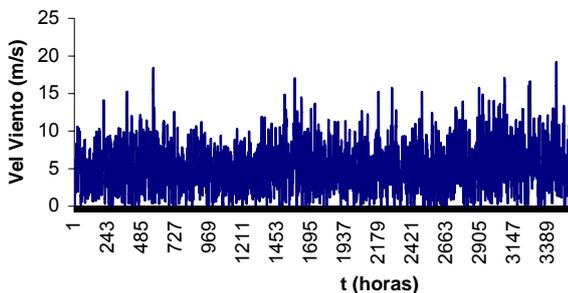
El principal problema que se busca solucionar con el diseño y construcción de este generador es que su funcionamiento sea adecuado aún en condiciones de bajas velocidades de rotación, debido a que los alternadores convencionales de automóviles están diseñados para cargar baterías a  $12V$  cuando su velocidad de rotación se encuentra a  $3600$  RPM[2]. Una de las ventajas de esta clase de generador es que se puede adaptar directamente al rotor del eologenerador lo que evita la utilización de sistemas mecánicos de transmisión que originan pérdidas indeseables para el sistema. Además esta clase de generadores de imanes permanentes no necesitan de una corriente excitatriz para producir el campo magnético ya que este es suministrado constantemente por los imanes evitando el consumo de parte de la potencia eléctrica obtenida por el sistema[2].

Así también el desarrollo tecnológico fue pensando principalmente en las necesidades energéticas de la población rural. Es importante indicar también, que antes de hacer los diseños técnicos fue necesario hacer un análisis de las necesidades del sector rural a fin de diseñar un modelo que por un lado ofrezca una solución al problema de la falta de energía de la población rural y por otro lado que su costo esté al alcance al menos de una buena fracción de esta población indígena rural Mexicana.

## 2. ESTUDIO ANEMOMETRICO DEL EMPLAZAMIENTO

La evaluación de los recursos eólicos se realizó en campo, para ello se utilizó un anemómetro digital Wind master 2, instalada a  $6$  metros de altura en la Comunidad del Carrizal Paxtlán, México. Fueron evaluados las condiciones energéticas eólicas del lugar con el fin de conocer los parámetros característicos del viento, que son el de forma  $K$  y de escala  $C$  de la ecuación de Weibull, cuyos valores obtenidos con el método de la desviación estándar y los registros de viento por un periodo de  $6$  meses son: Velocidad media  $5$  m/s, Desviación estándar  $2,97$ ,  $K=1,83$  y  $C=5,85$ . Ver gráfico 1.

Grafico 1. Frecuencia de Velocidades, El Carrizal, San Andrés Paxtlán. Elaboración Propia (julio – Diciembre 2006).



10

social y económico indicados anteriormente fueron cruciales en el diseño del aerogenerador se busco un diseño optimo a bajo costo, así el aerogenerador, en lo tecnológico queda conceptualmente definido a diseñar con las siguientes características:

- Máquina “lenta” y con baja velocidad de diseño, ello permite más horas de trabajo al año, este criterio afecta especialmente el diseño de la turbina.[3]
- Fabricación barata y simple, siendo para ello lo más conveniente el uso de madera para los álabes, ya que son muy fáciles de trabajar y modelar.
- Generador eléctrico de imanes permanentes, la principal ventaja de este tipo de generadores es que trabaja en un amplio rango de velocidades de giro y por lo tanto se acoplan muy bien con las turbinas eólicas las cuales giran acorde a la velocidad de los vientos existentes en la zona.[3]
- Simplicidad para la instalación, operación y mantenimiento. Entre los elementos tomados en cuenta está el acoplamiento directo turbina-generador.
- Almacenamiento de la energía generada, utilizando baterías automotrices de 12V por ser las más comerciales y baratas.[3]

La altura de la torre debe tener en cuenta todas las facilidades de instalación y la necesidad de la menor intervención posible de personal especializado para su montaje, de tal forma que pueda ser instalado por agentes de locales.

Entre otros datos relevantes para el diseño, por ejemplo, se encontró que: los consumos en zonas rurales especialmente en aquellos hogares pobres oscilan entre los 10 y 20 kWh al mes, que los ingresos anuales de la población campesina está concentrada en el rango de US\$ 300 a US\$ 1500 por familia (con pocas excepciones), que las necesidades más urgentes de energía eléctrica para ese sector de la población es el alumbrado, pequeñas radios y TVs y muy eventualmente algunos artefactos pequeños[4].

Tomando en cuenta todos estos elementos y otros, se llegó a determinar que un aerogenerador de 100W podría satisfacer medianamente estas

necesidades, ya que un aerogenerador de esta potencia puede producir aproximadamente un promedio de 0.6kWh de energía por día a velocidades moderadas de viento como es el caso de la mayoría de zonas rurales Mexicanas. Obteniéndose así un promedio de generación mensual de 18kwh.[4]

Asimismo, tecnológicamente se ha optimizado el uso de materiales y componentes de modo que permita bajos costos y pueda en un plazo corto ser una alternativa real en el mercado, es así que el costo aproximado de esta máquina para el comprador final se estima que será de € 350 incluyendo todos sus componentes (excepto la batería), costo que puede fácilmente competir con otras alternativas técnicas.

### 3. DISEÑO DE INGENIERIA

El diseño de esta máquina fue desarrollado utilizando las ecuaciones aerodinámicas correspondientes[5], utilizando perfiles estandarizados para la sección de los alabes y la necesaria compatibilidad entre los parámetros de la turbina con los del generador.

#### 3.1 Diseño de la turbina eólica

3.1.1 Cálculo del diámetro del rotor: Para este calculo se utilizó la ecuación de potencia de las turbinas eólicas.

$$P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot (A) \cdot V^3 \cdot C_p \cdot \eta \quad (1)$$

$$A = \left( \pi \cdot \frac{d^2}{4} \right) \quad (2)$$

$$d = \sqrt{\left( \frac{8 \cdot P}{\pi \cdot \rho \cdot V^3 \cdot C_p \cdot \eta} \right)} \quad (3)$$

Donde:

d: Diámetro del rotor de la turbina eólica (m)

P: Potencia de diseño del aerogenerador (W)

$\rho$ : Densidad del aire, variable con la a.s.n.m (1.23 kg/m<sup>3</sup> a nivel del mar)

V: Velocidad del viento (m/s)

A: Área barrida por la turbina (m<sup>2</sup>)

$C_p$ : Coeficiente de potencia (adimensional)

$\eta$ : Eficiencia del generador

$$\lambda = \frac{U}{V_D} = \frac{\pi \cdot N \cdot d}{60 \cdot V_D} \quad (4)$$

$$N = \left( \frac{60 \cdot \lambda \cdot V_D}{\pi \cdot d} \right) \quad (5)$$

Donde:

N: Velocidad de giro de la turbina eólica (r.p.m.)

U: Velocidad tangencial al extremo de la pala (m/s)

$V_D$ : Velocidad de diseño (m/s)

$\lambda$ : Celeridad

Utilizando la ecuación (3), con un  $C_p=0.35$ , velocidad de viento igual a la velocidad de diseño de 5.2 m/s (figura 1), densidad del aire de 1.23 kg/m<sup>3</sup>, potencia de 100 W a la salida del generador y una eficiencia del 75% para el generador (valor aceptable en pequeños generadores de imán permanente)[3], se obtiene un diámetro de 2.4 m.

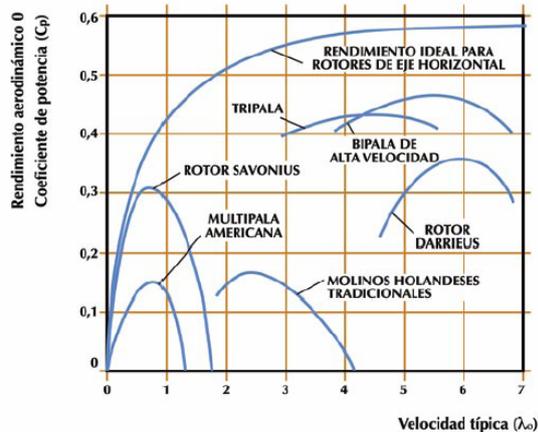


Figura 1. Rendimientos Aerodinámicos de aerogeneradores

De la ecuación (5), seleccionando el valor de 5 para la celeridad de diseño, (valor moderado, conveniente para zonas de regímenes de viento moderados, como es el caso de la mayoría de zonas de posible aplicación de esta turbina, se puede considerar también como un valor conservador)[3] se obtiene la velocidad de giro de 207 r.p.m.

Por tanto se tiene una turbina de tres álabes, de 2.4 m de diámetro y una velocidad de giro de 207 r.p.m.

### 3.2 Cálculo de la sección del álabes y selección del perfil

Para el cálculo de la sección del álabes se utilizaron las siguientes ecuaciones:

$$\lambda_r = \frac{\lambda_o \cdot r}{R} \quad (6)$$

$$\phi = \frac{2}{3} \cdot \arctan\left(\frac{1}{\lambda_r}\right) \quad (7)$$

$$C = \frac{8 \cdot \pi \cdot r \cdot (1 - \cos\phi)}{Z \cdot C_l} \quad (8)$$

$$\beta = \phi - \alpha \quad (9)$$

$$\alpha = -\alpha_o + \left[ \frac{C_y}{C_x} \right] \left[ 1 + \frac{3}{\Delta L} \right] \quad (10)$$

$$\Delta L = \frac{R}{L} \quad (11)$$

Siendo:

$$\bar{L} = \frac{\sum L_{tramo}}{10} \quad (12)$$

Donde:

$\lambda_r$ : Celeridad local para el radio r

$\lambda_o$ : Celeridad de diseño

r: Distancia del centro del rotor a la sección evaluada (m)

R: Radio de la turbina (m)

$\phi$ : Angulo formado por la velocidad relativa con el plano de giro del rotor

C: Cuerda de la sección del álabes

Z: Número de álabes o palas

$C_l$ : Coeficiente de sustentación del álabes

$\beta$ : Angulo formado por el álabes con el plano de giro

$\alpha$ : Angulo de ataque, depende del perfil seleccionado.

$\alpha_o$ : Constante, 5.

L: Longitud estación.

Utilizando las ecuaciones (7), (8), (9) y (10), para una turbina tripala y  $C_y=0.85$ , este valor del coeficiente de sustentación se obtiene de la gráfica  $C_y$  vs  $C_x$  (Figura1) del perfil seleccionado previamente, para presente caso, es el NACA 4212[6], por su buen coeficiente de sustentación, su facilidad para la fabricación y porque tiene una sección relativamente gruesa que permite soportar los esfuerzos en la raíz del álabes, aunque esta rigidez tiene que ver también con los materiales que se utilizan.

Para diferentes valores de radio “r”, se obtiene los valores del ángulo de posición y la longitud de cuerda respectivas.

Los resultados de los cálculos antes indicados nos dan valores variables no lineales, tanto para la cuerda como para ángulo de posición, lo cual hace complicado el proceso de fabricación de los álabes, para simplificar esto se adopta el concepto de linearización del álabes.

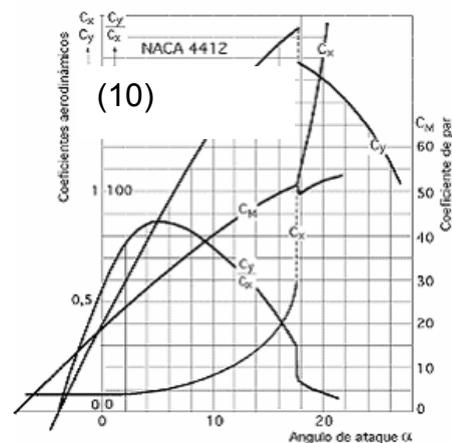


Figura 2.  $C_y$  vs  $C_x$  Perfil NACA 4412

### 3.3. Linearización del álabes

Este concepto viene siendo utilizado por los diseñadores y fabricantes desde comienzos de la década de los 80's (siglo pasado)[5]; que consiste en

transformar tanto a la cuerda (C) del alabe como al ángulo ( $\beta$ ) en parámetros lineales dependientes de la posición del radio. Las rectas de linearización toman como puntos de paso  $r=0.5R$  y  $r=0.9R$ . Luego a partir de las rectas obtenidas se procede al cálculo de la cuerda y ángulo definitivos, ver resultados en la tabla 1.

Las dimensiones características de una pala están definidas según estaciones. Cada estación constituye una sección transversal de la pala (ver Fig. 3), y lleva asociada un número (número de la estación). Así se consigue caracterizar una pala sólo con determinar las dimensiones características de un número acotado de estaciones (secciones):

- El radio local, el cual es la distancia de la estación al centro del rotor.
- La anchura de cuerda, que es la anchura de la pala de un extremo al otro en una estación determinada. La línea de cuerda es la línea más larga dentro de la sección de la pala, y es la que une el borde principal o de ataque con el borde posterior o de fuga.
- El ángulo de la pala (beta), que es el ángulo entre la línea de cuerda de una estación determinada y el plano sobre el que gira el rotor.

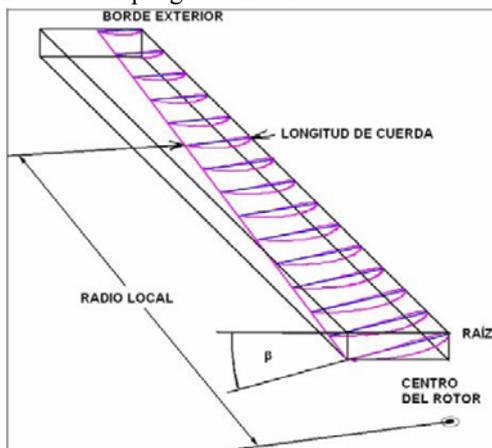


Figura 3 . Seccionamiento de las palas

### 3.2. GENERADOR ELECTRICO

La configuración básica consiste en un rotor de imanes permanentes de Neodimio los cuales poseen una inducción magnética que es 7 a 10 veces superior a los materiales magnéticos tradicionales [2] para este tipo de imanes la temperatura de trabajo puede llegar hasta 120°C, siendo esta condición una de sus principales desventajas frente a otros materiales magnéticos como el Samario – Cobalto donde su temperatura puede llegar hasta los 350 °C.[2]

Si los imanes son sometidos a temperaturas superiores durante su trabajo, estos pueden perder permanentemente hasta el 80% de la capacidad de producir inducción magnética, de tal forma que quedarían completamente inservibles para esta aplicación[2]. Las características geométricas y magnéticas de los imanes utilizados se encuentran enunciadas en la tabla 1 y 2.

Tabla 2 . Características geométricas.

Material	Longitud	Espesor	Ancho
Tierras Raras	46mm	10mm	21mm

Tabla 3. Características Magnéticas

Producto de (B-H)máxima	280 kJ/m <sup>3</sup>
Remanencia	11400 – 12000 Gauss
Temperatura de Curie	120 °C
Densidad	7.5 Kg/m
Fuerza Campo Coercitivo	3930kA/m

Estos imanes establecen el flujo magnético de forma axial (figura 4). Se opta por esta disposición debido a la simplicidad del diseño y por el hecho de que este tipo de generadores trabajan muy bien a velocidades de giro variables y por lo tanto compatibilizan con las velocidades de giro que se pueden obtener en una turbina de viento.

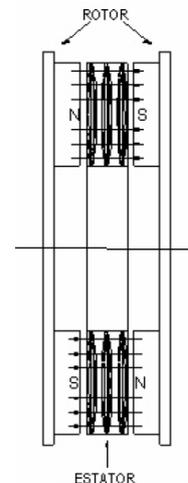


Figura 4 . Disposición de Rotores y Estator.

Para el diseño del generador de imanes se consideraron los siguientes parámetros:

- Velocidad nominal igual a la de la turbina (207 r.p.m.)
- Ocho pares de imanes
- Generación de corriente alterna y rectificadas a través de diodos a corriente continua
- Poco peso y fácil construcción

Tabla 1: Resultado de la linearización del alabe (Elaboración Propia)

r (mm)	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1080	1100	1200
$\beta$ (°)	14,3	13,2	12,1	11,0	9,9	8,8	7,7	6,6	5,5	4,4	3,3	2,2	1,1
C (mm)	167,55	158,41	149,27	140,13	131,00	121,86	112,72	103,58	94,44	85,30	76,16	67,02	57,88

El generador consta de una parte estática conformada por el estator y 6 bobinas dispuestas simétricamente. La parte giratoria es constituida por un par de discos de freno de un automóvil compacto. El voltaje inducido en el devanado depende del número de vueltas de cada una de las bobinas, y la velocidad relativa entre el devanado y el campo[7]. Para obtener un voltaje suficiente en el estator, el generador debe tener la máxima cantidad posible de bobinas y vueltas en cada una de ellas. Considerando las condiciones geométricas de los rotores, se disponen 6 bobinas con 85 vueltas cada una. Cada bobina se fabrica con alambre de cobre esmaltado AWG No. 14, con un diámetro de 0.912 mm, y una capacidad máxima de corriente de aproximadamente 12 A. Estas se disponen en un molde fabricado con resina poliéster y fibra de vidrio, esto permite obtener una alta permeabilidad magnética.

La configuración puede ser en DELTA (TRIÁNGULO) o ESTRELLA. Dado que las maquinas que operarán en regímenes de cargas variable deben poseer la capacidad de conmutación entre ambas configuraciones[1].

En el caso de operar con una línea de tensión de 12V será conveniente que el generador tenga una configuración DELTA (TRIÁNGULO) en el bobinado; para el caso de una línea de 24V lo conveniente será una configuración ESTRELLA[1]. En nuestro caso nuestra configuración elegida será la estrella (Figura 5).

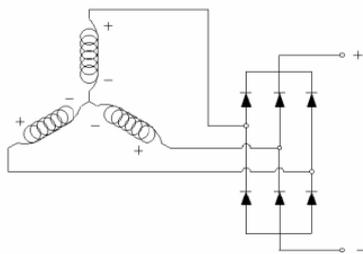


Figura 5. Configuración en estrella.

#### 4. MONTAJE EXPERIMENTAL

Para caracterizar el funcionamiento, el generador es montado en el buje de un vehículo automotor, con valores fijos de velocidad entre 60 a 2245 RPM, verificando este valor con un tacómetro. El objetivo de este montaje es determinar la potencia extraída del generador a la salida de los rectificadores, obtenida por la corriente total que circula por el circuito eléctrico y el voltaje a la salida del puente de rectificación.

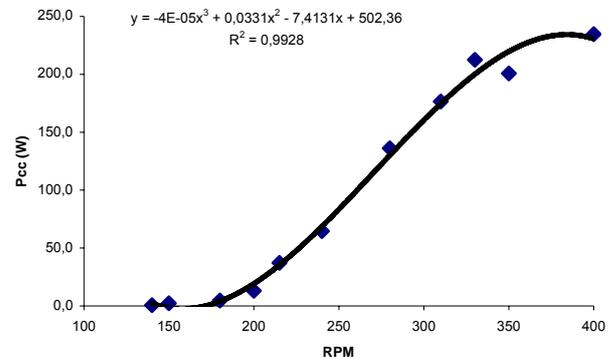
#### 5. RESULTADOS

Los principales resultados de las evaluaciones del sistema son: El aerogenerador funciona en el rango de 4m/s a 13 m/s, para luego salir del viento si las

velocidades son superiores, la máxima eficiencia del sistema obtenida fue de aproximadamente 12%.

Los resultados obtenidos se pueden observar en el gráfico 2. Los datos han sido ajustados a una ecuación potencial con un exponente 3 y el coeficiente de correlación  $R^2=0.9988$  indican un buen ajuste de los datos a la curva.

Grafico 2. Rpm vs Potencia



Los valores de eficiencia se determinaron utilizando la ecuación [13]; este resultado es el valor de la eficiencia total del sistema, genera 100 W de potencia a la salida de los rectificadores con un viento de 7,1 m/s.

$$n_s = \frac{8.(V * I)}{\pi.\rho.D^2.v^3} = n_g.C_p. \quad [13]$$

Donde:

$N_s$ : Eficiencia del sistema

$V*I$ : Valores de voltaje y corriente obtenidos en campo (potencia en watts)

$\rho$ : Densidad del lugar de influencia (emplazamiento), 1.22 kg/m<sup>3</sup>

$V$ : Velocidad del viento m/s (7,1 m/s).

$D$ : Diámetro del rotor (2,4 m)

El sistema trabaja a bajas velocidades de giro del rotor, estando ahora en una rango de 180 a 450 rpm para valores de máxima eficiencia, respecto a los del sistema con generador de imanes de ferrita (400 a 900 rpm). El sistema genera potencia a bajas velocidades de viento. A partir de una velocidad de viento de 4 m/s se inicia la generación de potencia. Para la velocidad de diseño, velocidad de viento, se obtiene una potencia de 100 w a una velocidad de giro de 260 rpm, siendo el rango de mayor eficiencia para velocidades de viento entre 5 y 8 m/s.

#### 6. ANALISIS ECONOMICO

La sencillez de su construcción, la fácil y económica adquisición en México de los materiales necesarios para la construcción del aerogenerador, así como para la construcción de los moldes y plantillas previos, hacen muy factible la aplicación de este tipo de tecnología en el ámbito indígena de México. Respecto al coste económico de adquirir un aerogenerador de este tipo, hay que señalar que sólo

un 15 % aproximadamente es debido a los materiales, y lo que dispara el precio es el coste de la mano de obra.

El coste total estimado para la construcción y puesta en marcha de este aerogenerador se resume en la siguiente tabla 4.

Tabla 4 . Coste Total del aerogenerador.

CONCEPTO	COSTE (€)
coste materiales, moldes y plantillas	285,77
coste total taller	274,39
costes desplazamiento	130
<b>PRESUPUESTO FINAL</b>	<b>690,16</b>

## 7. CONCLUSIONES

Aunque aún no existe un mapa eólico detallado, hay suficiente evidencia de la existencia de recursos para su explotación a pequeña escala, que podría ser interesante para el desarrollo de las poblaciones indígenas de México.

Existe un mercado interesante para pequeñas máquinas eólicas de generación eléctrica, sin embargo su introducción en el mercado necesita un importante trabajo de promoción y demostración.

Los aerogeneradores fácilmente pueden competir con otras alternativas, siempre y cuando existan los recursos eólicos (aún con vientos relativamente ligeros), los aerogeneradores pueden competir fácilmente con otras alternativas.

La unidad de 100W diseñada en este proyecto es para uso familiar con cargado de baterías. Los pobladores rurales de menos recursos pueden beneficiarse con estos micro sistemas.

Se ha logrado la caracterización final del sistema de aerogeneración:

### Rotor

- diámetro nominal de 2,4 m
- tres palas, perfil aerodinámico naca 4412
- potencia nominal, 100 w
- velocidad nominal de viento, 7,1 m/s
- velocidad nominal del rotor, 260 rpm
- velocidad de salida 13 m/s

### Generador

- acople directo al rotor
- trifásico de imanes permanentes, neodimio (ndfeb)
- ocho pares de polos, conexión en estrella
- 100 w potencia nominal
- 260 rpm velocidad nominal
- eficiencia total del sistema a condiciones nominales 12%.

Desde el punto de vista energético, es evidente que la totalidad del consumo energético necesario para la construcción de un aerogenerador es debido a la energía incorporada a la adquisición de los materiales, ya que los procesos de mecanizado y soldadura prácticamente no suponen consumo energético.

En cuanto a la instalación de aerogenerador en la Comunidad con un viento moderado, se recupera la energía consumida en la construcción que incluye también adquirir y conformar las plantillas y los moldes, en un tiempo aproximado de 321 días de funcionamiento continuo. Un tiempo que se puede considerar pequeño para la vida útil de aproximadamente 20 años, que se espera del aerogenerador y los vientos a los que puede verse sometido en otras localizaciones que reducirían el tiempo de retorno energético en meses. Por tanto, se puede afirmar que el aerogenerador de imanes permanentes de Neodimio descrito en el presente proyecto, desde el punto de vista energético es totalmente sostenible y económicamente viable para el mercado de bajos recursos contribuyendo así en el desarrollo energético de las comunidades indígenas aisladas de México.



Figura 6. Aerogenerador Instalado en el Carrizal Paxtlán, Oaxaca México.

## 8. AGRADECIMIENTOS

El autor agradece a todas las personas que hicieron posible este trabajo. A la Fundación Ford, por haber permitido la realización de este Master en España y creer en que el desarrollo sustentable de los pueblos indígenas debe partir de en ellos mismos.. Al director del proyecto, D. José Antonio Domínguez, por su colaboración y ayuda en la realización de este trabajo. A la familia indígena que acepto la instalación de este aerogenerador, a mis padres por la ayuda en la instalación, transporte y toma de medidas.

## 7. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Msc. Fariñas Wong, Ernesto Yoel, Dr. Ing. Jacomino Bermúdez, Abdel y Msc. Matínez Yong, Idielin. Generador de imanes permanentes en la Generación de energía Centro de estudios de termo energética azucarera. C.e.t.a. La Habana Cuba 2004.
- [2] Santos Jaimes, Alfonso y Álvaro Enrique Pinilla Sepúlveda Adaptación de un Generador Eléctrico de Imanes Permanentes y flujo radial. Universidad de los Andes Venezuela, 2001.
- [3] Sánchez Campos, Teodoro y Ramírez Atahui Saúl. Desarrollo tecnológico de micro generadores eolicos. ITDG (Intermediate Technology Development Group) 2000.
- [4] Ruiz Guillén, Javier. Electrificación de comunidad rural situada en país en vías de desarrollo mediante energías renovables. Tesis de grado, Universidad de Cali, Colombia, 1999.
- [5] Martin O.L Hansen; Aerodynamics Wind Turbines, Rotors, Loads And Structure. James & James –Inglaterra-1995.
- [6] Oliveros Alfredo, Sánchez Teodoro, Comportamiento De Aerobombas De Baja Solidez, Itintec, 1982.
- [7] J.R. Hendershot Jr and TJE Miller “Design of Brushless Permanent-Magnet Motors” Magna Physics Div. Tridelta Industries Inc., Hilsboro, Ohio and Oxford University Press Inc., New York, 1994.

Palabras Clave: Pequeños aerogeneradores, generador de imanes permanentes, turbinas eolicas.

## 1. INTRODUCCIÓN

En la última cumbre de la ONU sobre la Tierra en Johannesburgo quedó fijada como una de las líneas prioritarias para el desarrollo el facilitar el acceso a la energía eléctrica a los países en vías de desarrollo. Uno de los problemas a los que se enfrentan estos países es la dispersión de su población, el agrupamiento en torno a núcleos rurales a los que es complicado conectar a una red general de distribución de una forma económicamente rentable. Como consecuencia la mayoría de la población agrícola de los países no desarrollados no tienen acceso a la electricidad, favoreciéndose así la entrada en una espiral perniciosa de subdesarrollo local, emigración masiva a la ciudad, falta de acceso a los recursos y en resumen perpetuación de la situación estructuralmente injusta del mundo actual [1].

Ante este panorama, la respuesta clásica ha consistido en la instalación de un grupo electrógeno diesel. Sin embargo existen lugares en los que el traslado del combustible es complicado y costoso hasta el punto de convertirse en inviable. En los países del llamado tercer mundo esta situación se da más a menudo y de manera más acuciante que en los países del “mundo desarrollado” ya que las infraestructuras son bastante más precarias y por tanto el transporte más complejo con lo que se dificultan aún más las iniciativas encaminadas a potenciar el suministro eléctrico [1].

Además, existen otros factores de tipo medioambiental a tener en cuenta. Basta con contemplar los desastres de nuestro entorno para comprender que el modelo energético vigente basado en las energías fósiles y el despilfarro no es sostenible a largo plazo. En ese sentido hay que realizar un esfuerzo especial para que las nuevas iniciativas de desarrollo no cometan los mismos errores que las antiguas y buscar alternativas. Las emisiones de CO<sub>2</sub>, la contaminación acústica, y demás degradaciones del ambiente deberían ser valoradas a la hora de escoger un sistema de generación apropiado.

Por todas las razones expuestas arriba, un sistema eólico de baja potencia representa una opción a considerar ante un proyecto de electrificación.

Son máquinas pequeñas que se utilizan para alimentar cargas que están alejadas de las redes eléctricas convencionales. Típicamente, se combinan con bancos de baterías para almacenar la electricidad que generan y poder acoplar en el tiempo la generación con la demanda. En el mercado actual se ofrecen con una capacidad unitaria inferior a 35 kW pero se pueden integrar arreglos con varias unidades para suministrar energía eléctrica a cargas mayores (por ejemplo para electrificación rural) [2].

La energía eólica de baja potencia se ha presentado en los últimos años como una versátil y económicamente rentable solución a muchos problemas, tanto de abastecimiento de energía eléctrica en zonas aisladas, como de alimentación de bombas de extracción de agua en pequeños pozos aislados.

En su aplicación para suministro de energía eléctrica, estos sistemas ofrecen un abastecimiento totalmente autónomo, y con una calidad de la electricidad

muy alta, incluso superior a la que ofrece la red eléctrica, ya que con estas instalaciones, cada usuario consume la energía directamente de su generador de señal, sin que existan otros usuarios cuyos consumos puedan influir en la calidad de la energía que entra en la propia vivienda.

El impacto sobre el medioambiente es mucho menor que el de un grupo electrógeno o la extensión de la red; económicamente llega a ser competitivo rápidamente cuando se trata de poblaciones muy alejadas de la red general o de acceso complicado y la mejora en el nivel de vida de la comunidad afectada resulta evidente: permite acceder a una iluminación de mayor calidad que la de, por ejemplo, las lámparas de queroseno; abre la posibilidad de implantar un sistema de comunicación incluso con acceso a Internet o televisión (y por tanto a una herramienta de educación poderosísima); crea oportunidades para las microempresas; garantiza el suministro necesario para el mantenimiento de vacunas...etc...

Por último, hay que destacar el papel de promoción de justicia social de un proyecto de estas características. La electricidad abre las puertas a un abanico de opciones que contribuyen a sellar la enorme brecha existente entre Norte y Sur, facilitando el camino hacia una vida más digna y más acorde con lo que debería ser un mundo realmente equitativo.

## **1.2.- ANTECEDENTES Y CONTEXTO.**

Aunque México cuenta con un nivel relativamente alto de cobertura (alrededor del 95%), este porcentaje es significativamente menor en los estados del Sur del País, quienes cuentan con menor infraestructura, inferior calidad en los servicios y donde más del 10% de las viviendas carece de energía eléctrica [3].

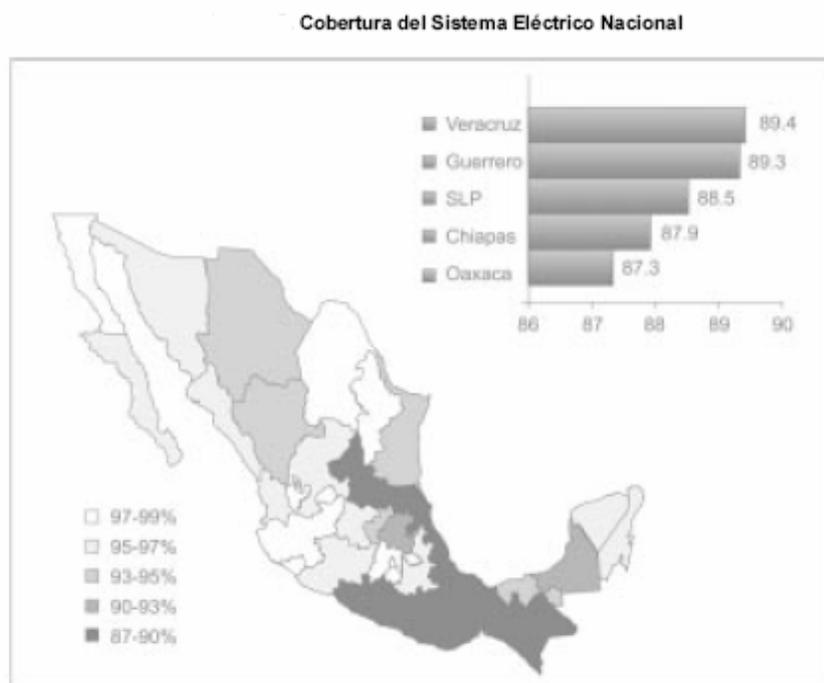
Estas viviendas satisfacen sus necesidades de energía eléctrica con fuentes fósiles como candelas, GLP y diesel oil, que emiten GEI perjudicando el ambiente global. La baja demanda potencial, la alta dispersión rural y la reducida densidad habitacional hacen que la solución convencional para electrificar estas comunidades sean las energías renovables.[3]

En estas zonas, muchas casas utilizan baterías eléctricas para tener potencia eléctrica, y a menudo se cargan en la ciudad más cercana, lo que puede ser costoso en dinero, tiempo y conveniencia. Los pequeños aerogeneradores son una opción mejor para cargar las baterías [2]. El presente proyecto se desarrolla con el objetivo de crear unos conocimientos acerca de la caracterización constructiva, mecánica y eléctrica de este tipo de aerogeneradores, para que en un futuro, se pueda continuar el estudio llegando a fabricar un prototipo en estas, que a su vez permita establecer más información y mejoras sobre el comportamiento de estos mecanismos.

México es un país con abundancia de recursos hídricos, que han sido aprovechados parcialmente con la construcción de grandes hidroeléctricas que junto a las plantas geotérmicas representan el 25.4 % de la capacidad total del Sistema Eléctrico Nacional en 2002, y aportan el 15.1% de la generación nacional. Esta enorme capacidad instalada permite al país tener cubierta la

demanda potencial de electricidad de los próximos 25 años. Sin embargo, aunque México cuenta con un nivel relativamente alto de cobertura (alrededor del 95%, según cifras oficiales), este porcentaje es significativamente menor en los estados del Sur del País, quienes cuentan con menor infraestructura, inferior calidad en los servicios y donde mas del 10% de las viviendas carece de energía eléctrica. [1]

Figura 1 Cobertura del Sistema Eléctrico Nacional.



Fuente: INEGI; XI Censo general de Población y Vivienda

Las comunidades que aun no cuentan con el servicio se encuentran en zonas montañosas (la mayoría de ellos de origen indígena), primordialmente en las fronteras de los estados. Acceder a estos lugares empleando la red resulta en un incremento significativo de los costos. De hecho, la información de la Comisión Federal de Electricidad muestra que la colocación de la red en este entorno cuesta tres veces mas de lo que costaría la colocación de sistemas no convencionales de energías alternas. [1]

La energía es una parte fundamental de cualquier actividad productiva; su ausencia socava la posibilidad de un desarrollo sustentable. Así mismo, la generación, transporte, uso y consumo de esta tienen un fuerte impacto sobre el medio ambiente y la calidad de vida de la población. El sector energético de México representa entre el 4 y el 7% del PIB, genera cerca del 40% de los ingresos del sector público, y produce cerca del 8% de las exportaciones.[1]

En el contexto Mexicano, el crecimiento de la energía rural descentralizada está basada en la productividad, a diferencia del paradigma convencional basado en pobreza, donde el servicio eléctrico se caracteriza por la cultura del no pago y la creencia de que la electricidad es un deber del Estado. Al igual que en muchos países, en México, las líneas de transmisión de alta tensión cruzan regiones donde la gente no tiene electricidad.[4]

### 1.3.- El Sector Eléctrico

La provisión del Servicio de Energía Eléctrica en gran escala consta principalmente de las siguientes actividades: Generación, Despacho, Transmisión, Distribución y Comercialización. Estas actividades, por disposición de ley son competencia exclusiva de la Comisión Federal de Electricidad (CFE) y de Luz y Fuerza del Centro (LFC), cuando tengan por objeto la prestación del servicio público. CFE tiene a su cargo la prestación del Servicio Público de Energía Eléctrica en todo el Territorio Nacional, salvo en el Distrito Federal y parte de los estados de México, Morelos, Hidalgo y Puebla, áreas atendidas por LFC. Actualmente entre ambos organismos públicos atienden a 25 millones de usuarios [4].

La capacidad actual de generación de energía eléctrica del sector en su conjunto es de 50,679 MW, de la cual, el 74.0% corresponde a CFE, 1.7% a LFC, 3.9% a PEMEX, 14.3% a PIE, 4.3% a Autoabastecimiento, y 1.8% a Cogeneración.

Tabla 1. Capacidad Instalada México.

Capacidad Instalada en México 2004	MW	%
CFE	37,512	74.0
LFC	834	1.7
PEMEX	1,973	3.9
PIE	7,265	14.3
AUTOABASTECIMIENTO	2,185	4.3
COGENERACIÓN	909	1.8
TOTAL	50,679	100.0

Nota: Con información a mayo 2004

En el periodo comprendido entre 2003 y 2012 se plantea agregar capacidad al sector del orden de 28,200 MW, así como modernizar los Sistemas de Transmisión y Distribución a fin de alcanzar Estándares Internacionales en Calidad y Eficiencia del Servicio. Estas necesidades implican inversiones del orden de 583,000 millones de pesos. Durante el mismo periodo, sólo se llevarán a cabo retiros por alrededor de 4,2004 MW, es decir, sólo se está respondiendo al crecimiento de la demanda dejando de lado la modernización de los activos del sector, cuya situación se encuentra lejos de los parámetros internacionales de calidad. [4]

En particular hoy en día el 44% de las unidades de generación cuenta con más de 30 años de vida activa, para 2012 esa proporción se acercará a 70%. [4]

Las necesidades en materia de electricidad de una Economía Globalizada como la Mexicana exigen una constante expansión y modernización para mantener la competitividad de la Industria Nacional. Por lo tanto, es urgente una Reforma Estructural del Sector y de su Marco Normativo para que los Capitales de los Sectores Público, Social y Privado puedan participar en el desarrollo de la industria sin necesidad de contar con garantías.

La actual política energética considera la necesaria diversificación en la generación de electricidad, mediante el impulso y desarrollo de las tecnologías

que aprovechan las fuentes primarias de energía, de tal forma que contribuyan al desarrollo sustentable del país. La ubicación geográfica y orográfica de México permite disponer de un significativo potencial de generación eléctrica con energía renovable.

#### **1.4 La Electrificación Rural**

Las energías renovables ofrecen importantes oportunidades para aplicaciones en entornos donde la energía convencional no llega, o llega solo de manera parcial. Esto es particularmente útil en el entorno rural, entre poblaciones con altos niveles de marginación. La falta de energía en comunidades rurales aisladas constituye una situación crítica, ya que suele estar asociada con la ausencia de telecomunicaciones, educación, servicios de salud, y frecuentemente, agua potable.

En términos generales, no existen planes oficiales de utilización de las energías renovables como fuente para la electrificación rural descentralizada.

No existe ningún tipo de reglamentación, ley o plan que promueva las fuentes renovables para la Electrificación rural. Los esfuerzos medioambientales son relativamente recientes a nivel oficial, por lo que la prioridad, reflejada en el marco legal e institucional, aún es la biodiversidad, el manejo de los recursos forestales y las diversas formas de contaminación ambiental [7].

Por ello, se hace necesario coordinar acciones entre la CFE, las instancias federales responsables de las política social, y los gobiernos estatales y locales, buscando que la CFE asista a las municipalidades para manejar los términos técnicos de las ofertas de servicios de energía. Las instancias federales de política social juegan un papel crucial: los programas de apoyo, y en particular las políticas de lucha contra la pobreza, consideran la provisión de infraestructura básica como componente central.

La estrategia de micro regiones, que incluye un fuerte componente de participación comunitaria, busca crear polos comunitarios de desarrollo para mejorar el acceso a agua, electricidad, educación, telecomunicaciones y servicios de salud.

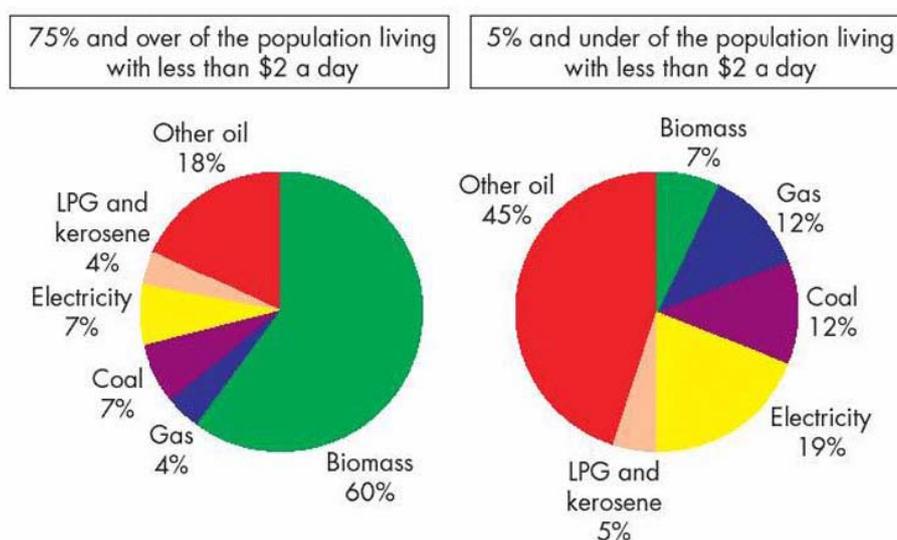
De igual manera, la estrategia que ha venido siguiendo la Comisión Nacional para el Desarrollo de los Pueblos Indígenas (CDI), ha incluido el desarrollo de infraestructura de caminos, agua y electricidad. En esta última, el énfasis se ha puesto en la colocación de red eléctrica en pueblos de mediano tamaño (de entre 1,200 y 2,400 personas). Una segunda etapa considera la introducción de energías renovables de abastecer pueblos menores, con mayores dificultades de acceso. [2]

Existen ya proyectos en operación para la provisión de energía en el sector rural mediante el uso de energías renovables. El Fideicomiso de Riesgo Compartido de la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Social, Pesca y Alimentación (SAGARPA), por ejemplo, ha venido impulsando un

programa con apoyo del GEF, para instalar equipos de bombeo agrícola que operan mediante energía fotovoltaica. [2]

Mientras tanto las comunidades rurales sin acceso a la electricidad satisfacen sus necesidades de iluminación y comunicaciones sociales con fuentes alternativas: candelas de parafina, GLP, gasoil, diesel oil y en algunos casos, baterías de automóvil. En el siguiente gráfico se muestra la proporción del uso de combustibles en las poblaciones más pobres de los países en desarrollo. A la izquierda, los países con un 75% o más de su población viviendo con menos de \$2 al día (umbral de pobreza), consumen mayoritariamente biomasa como energía final. A la derecha, los países con un 5% o menos de la población viviendo por debajo del umbral de pobreza, consumen mayoritariamente combustibles fósiles y electricidad [8].

Figura 2. Distribución por tipo de energía en el consumo de energía final en los países en desarrollo, según el nivel de pobreza, en 2002. Fuente: AIE (2004)

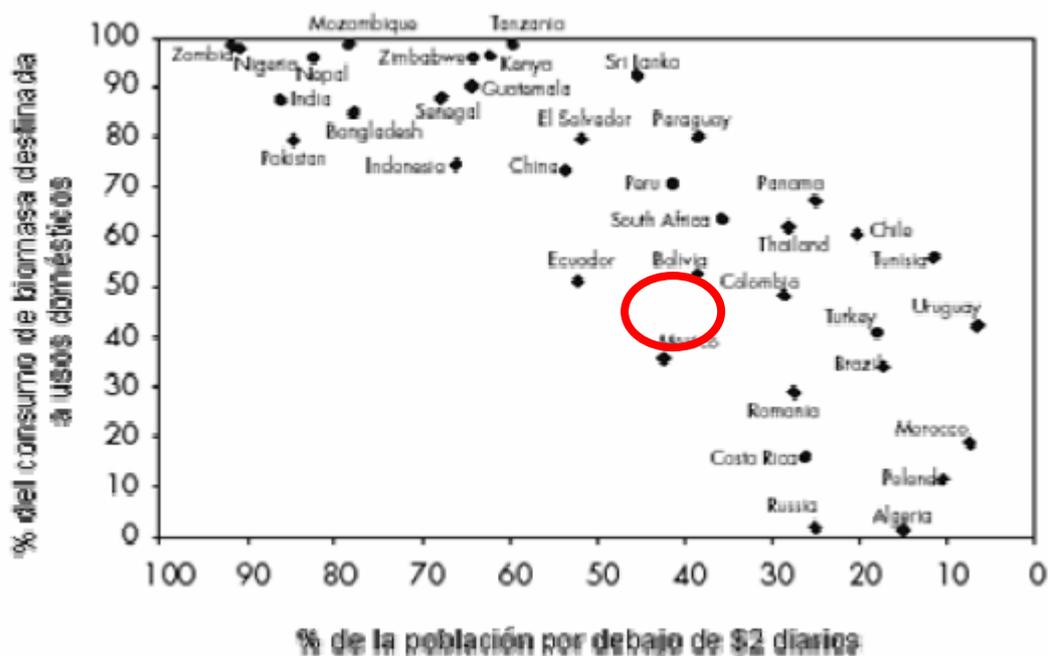


Se estima (AIE, 2004) que en todo el mundo 2.400 millones de personas –más de un tercio de la humanidad— dependen de la biomasa tradicional para suplir sus necesidades energéticas para cocinar y calentarse. En promedio, la biomasa suple cerca del 40% de la demanda energética de los países en desarrollo, porcentaje que se eleva en algunos países de África Subsahariana a valores por encima del 80%, Tabla 7. [10]

Existe una cierta correlación entre los niveles de pobreza y el uso tradicional de la biomasa (Figura 3).

Alrededor de 2/3 de todos los hogares en los países en desarrollo dependen de los biocombustibles no procesados (madera, estiércol, residuos de cultivos) para sus necesidades diarias de cocina y calentamiento; ello incluye al 80% de toda la población en el África Subsahariana [10].

Figura 3. Relación entre la pobreza y el uso doméstico de la biomasa



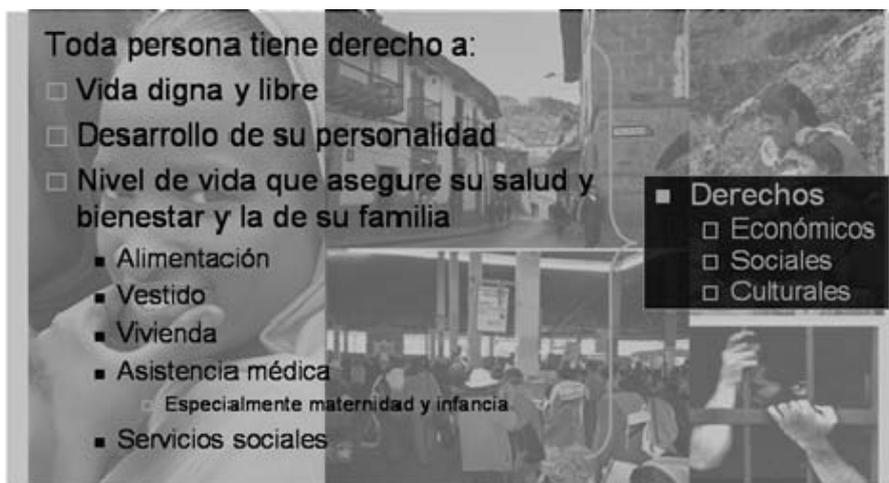
El uso de la biomasa en sí no representa un problema, sino que el problema radica en la forma ineficiente y contaminante en la que se aprovecha su energía (uso tradicional), lo que tiene consecuencias negativas para la economía, la salud y el medioambiente. Además, implica grandes esfuerzos económicos y humanos para las familias más pobres.

### 1.5 El papel de la energía en el desarrollo humano

Fruto de la *Declaración del Milenio* (AGNU, 2000), nació el compromiso de los estados miembros de conseguir una serie de metas, conocidas como Objetivos de Desarrollo del Milenio (ODM). Esta lista de objetivos pretende paliar las consecuencias, sin entrar en las causas de los problemas. Es tal vez por este motivo que ninguno de los objetivos, ni sus indicadores de evaluación correspondientes, cita el acceso a fuentes y servicios energéticos como factor clave para el desarrollo [11].

Este "olvido" ha sido, sin embargo, paliado en los años subsiguientes a través de diversas publicaciones que señalan la importancia de la provisión de energía como requisito previo para alcanzar las metas de desarrollo. En la actualidad, los ODM se han constituido, junto con los objetivos de desarrollo sostenible, los principales ejes vertebradores que dictan las políticas energéticas en los foros internacionales. Los ODM pueden considerarse actualmente como la "agenda internacional" en lo que se refiere a energía y cooperación para el desarrollo.

Figura 4. Extracto de derechos de la "Declaración universal de los derechos Humanos".



Sin embargo, en la medida que se acepta el derecho de las personas a una vida digna, larga, saludable y creativa, al acceso a la educación, a la movilidad, a la participación social, etc., es obvio que se está reconociendo el derecho de las personas a un acceso a la energía que permita desarrollar todas estas facetas.

La realidad, tal y como se ha visto, dista mucho de garantizar tales derechos en determinados países y regiones. La falta de acceso a recursos energéticos económicamente asequibles, fiables, seguros y respetuosos con el medioambiente, crea severas restricciones en el desarrollo de los pueblos.

Aunque el acceso a la energía siga sin ser reconocido de forma explícita como un derecho fundamental de las personas, la *Declaración del Milenio* y su posterior evolución, ha constituido un cambio y una llamada de atención para la comunidad internacional.

### 1.6 La energía desde los Objetivos de Desarrollo del Milenio

Desde 2002 han aparecido distintas publicaciones que enlazan los ODM con el acceso a la energía, la primera la del Department for International Development (DFID) británico (2002). Se trata pues de un marco de referencia para marcar objetivos, también en el campo de la energía, que ya se está utilizando de forma amplia en las últimas publicaciones del Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD, 2004 y 2005), de la Agencia Internacional de la Energía (AIE, 2004) y del organismo interagencias UN-Energy1 (2005) creado en 2005 para coordinar todas las acciones de las agencias de la ONU relacionadas con la energía. [12]

Aunque no existe ningún objetivo de desarrollo del milenio que explicita el acceso a los servicios energéticos, los objetivos de desarrollo del milenio no pueden alcanzarse sin un aumento del acceso a servicios energéticos de calidad y de la diversificación de fuentes de energía.

Algunas de las relaciones entre la energía y los Objetivos de Desarrollo del Milenio, se muestran a continuación:

- Erradicar la pobreza extrema: El acceso a los servicios energéticos aumenta la productividad con el uso de maquinaria, la generación de ingresos fuera de las horas diurnas y favorece la creación de mercados locales.
- Lograr la educación primaria universal y la igualdad de género: los servicios energéticos liberan a mujeres y niños de parte del tiempo dedicado a las actividades domésticas, la iluminación permite el estudio en el hogar y aumenta la seguridad, y la electrificación da la posibilidad de utilizar materiales educativos multimedia en las escuelas y el uso de las tecnologías de la información y las comunicaciones.
- Reducir la mortalidad infantil, mejorar la salud materna y luchar contra las enfermedades: la energía es una componente clave en el funcionamiento de los centros de salud (electrificación de las salas de operaciones, refrigeración de vacunas y medicamentos, equipos de esterilización, etc.), así como en el acceso al agua potable.

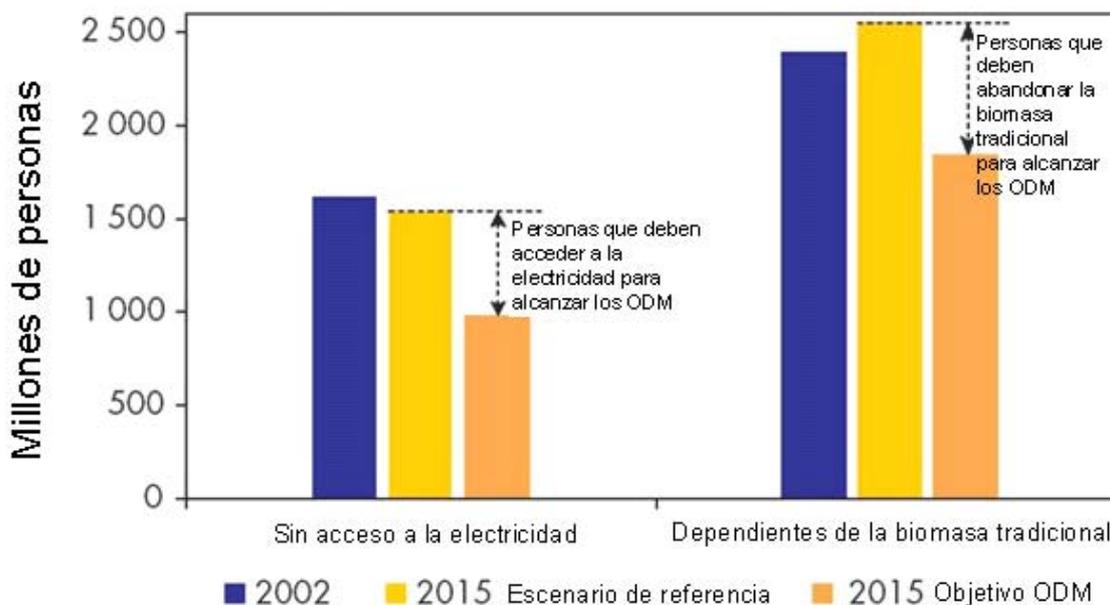
"Sentarse a esperar a que la gente se vuelva rica a medida que la economía global se expande no será suficiente" (AIE, 2004). Los países en desarrollo no verán incrementados sus ingresos y sus niveles de vida sin un incremento en el uso de servicios energéticos modernos. El desarrollo energético es un efecto del crecimiento económico y del desarrollo, pero también es una causa.

Las proyecciones de futuro (si las políticas siguen como hasta ahora), predicen que las desigualdades en el ámbito de la energía se mantendrán con pocas variaciones. En cuanto al cumplimiento del ODM-1, de reducir a la mitad el % de personas que viven en condiciones de extrema pobreza (menos de \$1 diario), la AIE (2004) predice lo siguiente:

- El número de personas sin acceso a la electricidad disminuirá sólo de 1.600 millones en 2002 a 1.540 millones en 2015. Este número debería reducirse a 981 millones.
- El número de personas dependientes de la biomasa para cocinar y calentarse, debería pasar de los 2.400 millones en 2002 a 1.850 millones en 2015. Se estima, sin embargo, que este número en lugar de disminuir, aumentará hasta los 2.550 millones.

Claramente, se necesitará mucha más energía para impulsar el crecimiento económico y para ampliar las oportunidades de los miles de millones de personas en los países en desarrollo que no tienen un acceso adecuado a los servicios energéticos.

Figura 3. Implicaciones de la energía en la reducción a la mitad de la proporción de personas pobres en los países en desarrollo para 2015. Diferencias entre las proyecciones (escenario de referencia) y las necesidades para conseguir este objetivo. Fuente: WEO-2004 (AIE, 2004).



Los sistemas energéticos actuales y las políticas que los sustentan se muestran claramente ineficaces para cumplir estos objetivos. En este contexto, la mejora de los estándares de vida en los países en desarrollo requiere que se hagan fuertes inversiones en infraestructuras de suministro energético, lo que resulta inaccesible para las economías de muchos países, especialmente en África.

Con el modelo actual de desarrollo, la reducción entre las diferencias en el acceso y consumo de energía entre países industrializados y países en desarrollo aumentará considerablemente la presión sobre las fuentes de energía disponibles.

En muchos países en desarrollo han fracasado las aproximaciones convencionales para la provisión de servicios energéticos (instalaciones de suministro gestionadas por el estado y extensión de la red eléctrica nacional)[11].

Muchos países han financiado sus sectores energéticos con préstamos concedidos por instituciones de préstamos bilaterales o multilaterales. Por varias razones, estas instituciones han favorecido fuertemente el uso de combustibles fósiles y grandes infraestructuras hidroeléctricas.

Todo ello ha dejado a los países en desarrollo con grandes deudas y con grandes impactos ambientales tanto a nivel global como local, mientras que se proveía de servicios energéticos adecuados sólo a una pequeña fracción de la población.

Se necesita evolucionar hacia otros modelos de desarrollo que fomenten la sostenibilidad a nivel global al tiempo que permitan disminuir gradualmente las desigualdades en materia energética.

El apoyo al sector rural, las estrategias a nivel regional, el desarrollo de capacidades y la movilización de la técnica y la tecnología se apuntan como elementos clave.

Como hemos visto, la provisión de servicios energéticos es condición necesaria pero no suficiente para conseguir el desarrollo rural.

Para ser más efectivas, ciertas formas de energía deben introducirse conjuntamente con otras infraestructuras (PNUD 2000, 2004, 2005b). Para conseguir esta integración, es esencial que haya una comunicación horizontal entre todas las agencias involucradas en el desarrollo rural.

Se trata de coordinar, junto con la provisión de energía, todos los aspectos relacionados con

- a agricultura,
- el transporte,
- el suministro de agua,
- la educación,
- la generación de ingresos y
- los servicios de salud.

Allí donde se ha perseguido un desarrollo integral, la disponibilidad de suministros de energía modernos ha demostrado ser un catalizador de la transformación económica y social.

Otro punto importantes es Involucrar a la población rural en la toma de decisiones , por encima de todo, la planificación del desarrollo energético rural debe tener una componente descentralizada y debe involucrar a la población en la planificación y en la toma de decisiones.

La participación de las mujeres y de sus organizaciones es fundamental, pues son ellas las que llevan la mayor carga derivada de los sistemas energéticos tradicionales y son las principales gestoras de la economía doméstica y del uso que se hace de la energía.

Aunque no nos abocaremos a hablar de los aspectos sociales de la energía, conviene insistir en ello, pues la participación no sólo es imprescindible para la sostenibilidad social de los proyectos, sino que permite acelerar el desarrollo rural gracias a la identificación adecuada de los problemas energéticos y la formulación e implementación de planes para solventarlos.

### **1.7 Opciones tecnológicas**

La identificación de las opciones tecnológicas para las fuentes de energía depende mucho del horizonte temporal. El PNUD (2004), empezando por las tecnologías existentes, distingue tres tipos de tecnologías:

- Tecnología a corto plazo: permite una mejora inmediata de la situación actual.

- Tecnología a medio plazo: para conseguir un espectacular avance en un periodo de 5 a 10 años.
- Tecnología a largo plazo: aquella que debería prevalecer después de 20 a 30 años y proporcionar una solución sostenible.

Tabla 2. Fuentes de energía para corto, medio y largo plazo. Fuente: Adaptado de PNUD (2004)

Fuentes y tareas	Presente	Corto plazo	Medio plazo	Largo plazo
Fuente de electricidad	Red eléctrica o sin electricidad	Generación a partir de biomasa Motores de combustión interna acoplados a un generador Eólica Geotérmica Pequeña hidráulica Fotovoltaica	Generación a partir de biomasa usando micro-turbinas y gasificadores integrados en ciclo combinado	Células de combustible para cubrir la demanda valle Electricidad termo solar
Combustibles	Madera / carbón vegetal/ estiércol/ residuos agrícolas	Biocombustibles Gas Natural/ GLP/ biogás Aceites vegetales	Biocombustibles Gases licuados (GLP) Gas de síntesis Dimetil eter (DME)	Biocombustibles
Cocinas	Cocinas de leña	Cocinas mejoradas Cocinas de GLP	GLP/biogás/gas natural/ cocinas de DME	Cocinas con biogás, o eléctricas/ quemadores catalíticos
Agua potable	Superficial y de pozo	Agua filtrada/tratada Depuración ultravioleta	Agua tratada y canalizada Tratamiento centralizado o descentralizado	Agua canalizada ultra segura/tratada
Iluminación	Lámpara de aceite o queroseno	Luces eléctricas	Fluorescentes / lámparas de bajo consumo	Fluorescentes / lámparas de bajo consumo
Fuerza motriz	Equipos movidos por tracción humana o animal	Motores eléctricos o de combustión interna	Motores mejorados movidos por biocombustibles	Motores mejorados movidos por biocombustibles o células de combustible
Transporte	Vehículos de tracción animal / bicicletas	Vehículos diesel, gasolina, GLP o GN comprimido.	Vehículos con biocarburantes	Vehículos con células de combustible

Los tres tipos deberían ser compatibles, de forma que la tecnología en cualquier etapa pueda ser modernizada a una versión mejor. En los esfuerzos de planificación, sería sensato disponer de una cartera equilibrada con la combinación de los tres tipos de tecnología.

### 1.8 Uso del aerogenerador de baja potencia

En zonas sin red eléctrica, muchas casas utilizan baterías eléctricas de motocicletas, coches o camiones para tener potencia para radios o televisión. Esta pequeña cantidad de energía puede mejorar desproporcionadamente la vida normal de los más pobres. Cuando hay suficiente energía para dar luz, se puede mejorar las oportunidades de mucha gente; por ejemplo mejorando las oportunidades que tendrán los niños en su vida posteriormente, permitiéndoles estudiar cuando anochezca, o permitiendo realizar trabajos diversos a la población cuando anochezca con los beneficios que esto puede reportar. Es importante señalar que en países como México, anochece a las 6 de la tarde,

con lo cual el hecho de disponer o no de luz influye de manera significativa en la vida de ciertas poblaciones.

Es en la carga de estas baterías donde entra el juego la utilización de aerogeneradores de baja potencia, con sus puntos a favor y contra a tener en cuenta.

### **Ventajas**

- La cantidad de energía disponible de las baterías puede aumentar, y no se tendrán que comprar nuevas baterías tan frecuentemente: En una buena localización, y cuidando el manejo de la energía y la batería, la cantidad de energía disponible para usarse por un hogar será mayor cuando la batería se cargue gradualmente que cuando se cargue periódicamente. La potencia de la batería se utiliza para iluminar, esto puede reducir el gasto en baterías de queroseno y baterías secas, que se estima en más de 5 dólares al mes. Además, las baterías actualmente se estropean por descargas muy fuertes, y esto las deja inservibles más rápido que si fueran cargadas por un aerogenerador. [13]

- Las baterías se pueden cargar cerca de la casa, ahorrando tiempo y dinero: En Sri Lanka más de la mitad de las casas utilizaban baterías de automóvil para dar potencia a radios y televisores. Recargar implica un coste económico y un viaje de 6 km dos veces al mes. [13]

- La energía eólica respeta el medio ambiente: Aunque se utiliza energía en la construcción de un aerogenerador, una vez están funcionando, no consume combustibles fósiles y por tanto no emite gases de efecto invernadero. Debido a que la electricidad producida para iluminar descarta el uso de queroseno, el ambiente de la casa mejora. El ruido producido a las bajas velocidades de giro es muy pequeño y muchísimo menor que el producido por generadores diesel. El impacto sonoro y visual del sistema descrito no ha causado preocupación en ninguna de las instalaciones probadas. [13]

- La energía eólica es más barata que sus alternativas: Donde el recurso eólico es bueno, la energía producida mediante aerogeneradores es más barata que utilizando generadores diesel o fotovoltaicos, particularmente si el suministro de combustible está lejos del usuario. Si el sitio está localizado cerca de un río o riachuelo, la potencia hidráulica debería estudiarse primero, ya que esta puede ser más competitiva. La electricidad (de red), si está disponible, será lo más barato de todo. En áreas remotas, sin embargo, el coste de la conexión a la red es tan elevado, que excede mucho de los sistemas que utilizan baterías (solares o eólicas). [13]

- Puede ser una opción aún más atractiva: La potencia de la batería puede ser un paso intermedio antes de la conexión a la red, ya que mediante el uso de inversores se consigue corriente alterna que va a parar a los diferentes conexiones y aparatos de la casa que en un futuro sin ser modificados sirven para la conexión a la red. Por otro lado, se puede compartir un aerogenerador grande (pero de baja potencia) por 2 o 3 casas facilitando la inversión inicial

que se comparte, al igual que el mantenimiento. Además las máquinas de manufactura local pueden mantenerse fácilmente, aportan empleo local, resultan más baratas y se adaptan mejor a las condiciones locales de diseño. [13]

### **Desventajas**

- La importancia del régimen de viento: El factor más importante en el éxito o fracaso de cualquier instalación eólica es la fuerza y naturaleza del viento.
- Coste inicial: Para poner el generador y las palas en la trayectoria del viento, el aerogenerador necesita ser colocado en el extremo superior de una torre, que requiere tiempo preparar y levantar. Finalmente, será necesario alojar las baterías y el circuito de control en un edificio a prueba de la intemperie. [13]
- Mala reputación de los aerogeneradores: Agencias de ayuda en el pasado han puesto a punto prototipos inapropiados, que importaban la tecnología del país donante. Quizá no se han comprendido correctamente los puntos fuertes y débiles de los aerogeneradores y es posible que haya sido demasiado difícil de resolver la tecnología unifamiliar. Otra causa de la engañosa mala fama es la carencia en muchos casos de datos disponibles del viento más concretos para cada población (no se puede generalizar con los datos de un país). [13]

## **2.- OBJETIVOS**

El proyecto planteado tiene como objetivo principal recorrer el proceso de proyectar e instalar una instalación eólica para la carga de baterías de automóvil para una comunidad indígena de México, detectando los problemas que se plantean y sugiriendo las soluciones apropiadas en cada caso. Los pasos seguidos serán:

- La identificación de las necesidades concretas de las comunidades o familias.
- La evaluación de los recursos energéticos median estudios anemométricos in situ.
- Diseño y construcción de un aerogenerador de 100 W
- Instalación y caracterización del aerogenerador.

Para contribuir a la ampliación de conocimientos se ha estudiado el comportamiento mecánico y eléctrico del aerogenerador. El estudio mecánico se basa fundamentalmente en el análisis del funcionamiento de los alabes y de los parámetros dimensionales del mecanismo, mientras que el estudio eléctrico consiste en la determinación teórica de la potencia eléctrica entregada en función de la velocidad del viento.

Se plasma también en un listado preciso de todos los materiales necesarios para la construcción y montaje de los diferentes elementos que componen el aerogenerador, así como un listado completo de los materiales necesarios para manufacturar los moldes y plantillas que requiere la construcción del aerogenerador descrito.

Además se ha incluido un estudio del coste económico y un estudio del coste energético derivado de la construcción íntegra del aerogenerador, que permite analizar más objetivamente la viabilidad de construir más aerogeneradores de este tipo en el futuro.

## **3.- DIAGNOSTICO DE LA REGION QUE ABARCA EL PROYECTO**

### **3.1 Los pueblos indígenas**

Sin duda, el gran rasgo común de los municipios con menor índice de desarrollo humano de México es su condición indígena. La problemática más apremiante en ellos es la ausencia de una estructura productiva sólida que garantice fuentes de ingreso estables para la población.

La migración se ha convertido en una estrategia fundamental para la subsistencia. Los flujos migratorios adquieren un cariz distinto según la región de que se trate: pueden ser temporales o permanentes, internos de cada región, hacia otros puntos de la República Mexicana o hacia Estados Unidos; para dedicarse a labores agrícolas, o bien a actividades tan diversas como la construcción, los servicios o el comercio ambulante [14].

Otro rasgo común de estos municipios es la riqueza natural de los territorios que habitan. Su diversidad abarca todo tipo de ecosistemas, desde el semidesierto hasta el bosque de coníferas, el bosque mesófilo y el bosque tropical o selva. Todos ellos albergan una diversidad biológica de gran importancia para el país; sin embargo, en muchos casos estos ecosistemas han sido sometidos a una explotación intensiva o a una excesiva presión demográfica que los ha colocado en grave situación de riesgo [14].

En la mayor parte de estos municipios prevalecen formas de gobierno que tienen su origen en prácticas tradicionales, en muchos casos reconocidas legalmente, como en los municipios de Oaxaca regidos por el sistema de usos y costumbres. En otros, pese a no tener reconocimiento constitucional, las autoridades tradicionales tienen gran relevancia en los procesos de acceso y ejercicio del poder; así como en la toma de decisiones importantes para la población del municipio.

Las últimas décadas han marcado otro denominador común para la mayor parte de los municipios con menor IDH del país: el de una creciente conflictividad social, que frecuentemente ha dado lugar a estallidos violentos y al desplazamiento interno de poblaciones. [14]

Asimismo, en todos estos municipios se observa un importante rezago en materia de procuración e impartición de justicia, entre cuyas principales causas se encuentran la inexistencia de recursos e infraestructura, las violaciones procesales sistemáticas y la falta de garantías de seguridad para las víctimas. Existe dilación en la investigación de los hechos y en los procedimientos penales; en general, hay una falta de resultados en la obtención de justicia.

Entre los 50 municipios con el menor índice de desarrollo humano del país, seis se ubican en la región Costa y Sierra Sur de Oaxaca: San Andrés Paxtlán, San Lorenzo Texmelucan, Santa Cruz Zenzontepec y Santa Lucía Miahuatlán, de la Sierra Sur; y Santa María Temaxcaltepec y Santo Domingo de Morelos, de la Costa de Oaxaca.

En los municipios que integran la región Costa y Sierra Sur habitan e interactúan distintos pueblos indígenas: triqui, amuzgo, mixteco, zapoteco, zapoteco sureño, mixe, chontal, chatino y chinanteco; también cuenta con presencia de población afroamericana, así como con población no indígena.

Las actividades económicas de los diferentes pueblos indígenas son desarrolladas por las estrategias de subsistencia agrupadas en el sistema de la milpa, las cuales se combinan con la producción de cultivos comerciales: ajonjolí, café, caña, etcétera. La venta de su fuerza de trabajo y otras actividades productivas han sido incorporadas por las unidades domésticas de los diferentes pueblos indígenas para acceder a los productos que requieren del mercado. Recurren así al desarrollo de otras actividades productivas, como las artesanías, a explotar los recursos naturales y, sobre todo, a la migración.

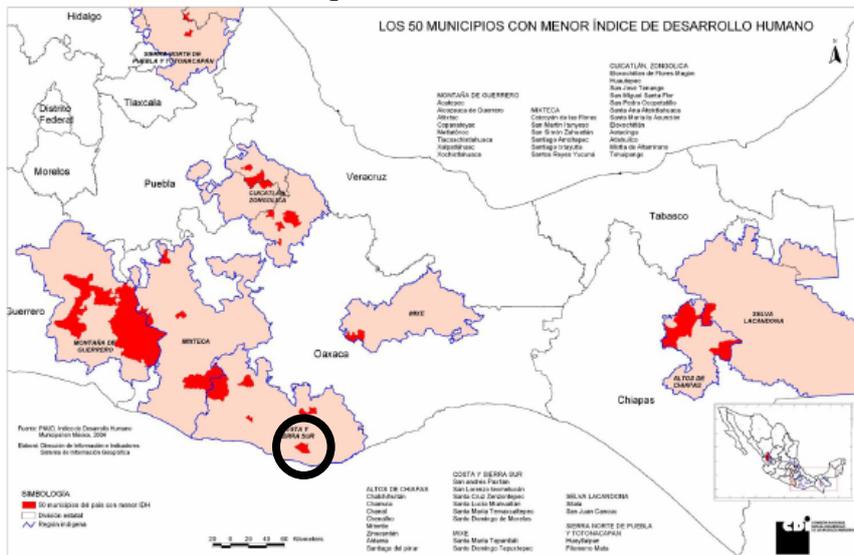
Para formar parte de la comunidad, todos los adultos tienen la obligación moral de formar parte del poder comunal, sobre todo al asistir a las asambleas

generales y al cumplir con los servicios para los que son electos de acuerdo al sistema de cargos. En las tradiciones culturales indígenas oaxaqueñas existe la tendencia generalizada a establecer un sistema de grados de edad. Esa posición generacional define los distintos papeles domésticos: hijo, hermano, padre, abuelo; pero a su vez se determina la vida política mediante la inserción generacional dentro de los sistemas de cargos civiles y religiosos.

### 3.2 LOCALIZACIÓN

Se localiza en la parte sur del estado, en las coordenadas 96° 30' longitud oeste, 16° 13' latitud norte y a una altura de 2,000 metros sobre el nivel del mar. Limita al norte con el municipio de Miahuatlán de Porfirio Díaz; al sur con San Mateo Río Hondo; al oriente con Santo Tomás Tamazulapan; al este con Miahuatlán de Porfirio Díaz. Su distancia aproximada a la capital del estado es de 123 kilómetros y La superficie del municipio tiene 77.83 km<sup>2</sup> que representan el 0.1% del total del territorio estatal.

Figura 4. Localización del lugar de estudio



En los cuadros siguientes se resumen las principales características del municipio:

Tabla 3. Datos estadísticos del Municipio

Población total	3723
% Población analfabeta de 15 años o más	41.20
% Población sin primaria completa de 15 años o más	68.04
% Ocupantes en viviendas sin drenaje ni servicio sanitario exclusivo	10.75
% Ocupantes en viviendas sin energía eléctrica	36.62
% Ocupantes en viviendas sin agua entubada	64.84
% Viviendas con algún nivel de hacinamiento	87.06
% Ocupantes en viviendas con piso de tierra	90.67
% Población en localidades con menos de 5 000 habitantes	100.00
% Población ocupada con ingreso de hasta 2 salarios mínimos	92.59
Lugar que ocupa en el contexto estatal	24

**Índice de desarrollo humano (IDH) 0.536**

Lugar que ocupa en el contexto nacional	56
Tasa de mortalidad infantil	46.8
Porcentaje de las personas de 15 años o más alfabetos	58.8
Porcentaje de las personas de 6 a 24 años que van a la escuela	49.6
PIB per cápita en dólares ajustados	1005
Índice de sobre vivencia infantil	0.667
Índice de nivel de escolaridad	0.557
Índice de PIB per cápita	0.385
Lugar a nivel Nacional	2367

Cuenta con 6 rancherías :

El Carrizal, La Venta, La Ciénega, La Concepción, El Portillo, San Pedro Loma Larga

Flora: Se tiene una gran variedad de flora como: pinos, encinos, poleo, flor del fandango, flor de Nochebuena, muzgo, hongos, mala mujer, latex, rabo de iguana; en cuanto a frutas tenemos: naranjas, peras, mangos, duraznos, zapotes, tejocotes, higos, capulin, aguacates; como plantas medicinales encontramos: la ruda, el albahácar, el romero, la espinocilla, la sabila, la malva, el tomillo, el gordolobo y el toloache.

Fauna: En la fauna también se encuentra gran variedad de especies como: jilguero, lechuzas, aguiluchos, tecolotes, zopilotes, zorras, zorrillos, armadillos, iguanas, tlacuaches, coyotes, venados, víbora de cascabel, víbora sorda, araña capulina, chintatlahua, escorpión, alacranes

Orografía. El cerro principal es el Tepalcatillo, se encuentran otros como el Cerro de las Flores, el Cerro de La Postema, el Cerro de Piedra Manchada que es una mojonera que limita con San Sebastián y San José del Pacífico.

Hidrografía: Se riega con las afluentes de los ríos: Oscuro, Manzanillo y Molino.

Clima: Es templado con lluvias en verano.

Grupos étnicos: De acuerdo con el XII Censo General de Población y Vivienda 2000, efectuado por el Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI), la población total de indígenas en el municipio asciende a 2,668 personas. Las lenguas indígenas son: el zapoteco y el zapoteco sureño.[15]

Evolución demográfica. De acuerdo con el XII Censo General de Población y Vivienda 2000, efectuado por el INEGI, la población total del municipio es de 3,723 habitantes, de los cuales 1,833 son hombres y 1890 mujeres. La población total del municipio representa el 0.11 por ciento, en relación con la población total del estado

Religión: Al año 2000, de acuerdo al citado Censo, efectuado por el INEGI, la población de 5 años y más que es católica asciende a 3,169 habitantes,

mientras que los no católicos, en el mismo rango de edades, suman 48 personas.

Salud: Se cuenta con dos unidades médicas dependientes del I.M.S.S., así como tres casas de salud dependientes de la S.S.A

Abasto: El municipio cuenta con 2 tiendas de abasto popular. Para proveerse de lo necesario acuden los días lunes al tianguis de Miahuatlán.

Vivienda: De acuerdo con el XII Censo General de Población y Vivienda, efectuado por el INEGI, el municipio cuenta al año 2000 con 535 viviendas. La mayoría de las viviendas que existen en esta población están construidas de techos de láminas y pared de adobe, muy pocas son las casas que están hechas de material industrializado. [15]

Servicios Públicos: La cobertura de servicios públicos, de acuerdo con las apreciaciones del Ayuntamiento es:

Servicio Cobertura (%)

Agua potable 100

Alumbrado público 90

Baños ecológicos 30

Fosas sépticas 70

Seguridad pública 30

Medios de comunicación: Los medios de comunicación más importantes con los que cuenta el municipio son: estaciones de radio, señales de televisión abierta, se cuenta con una caseta telefónica, se captan señales de telefonía celular

Vías de comunicación: Se cuenta con un camino de terracería de 7 kilómetros que entronca con la Carretera Federal Oaxaca-Puerto Ángel, en el kilómetro 120.

Actividades económicas: El 80% de la población se dedica a la agricultura. Se cultiva principalmente maíz, frijol, chícharos, trigo, calabazas. También la fruticultura como: tejocote, duraznos, manzanas criollas; también cosechan verduras como: lechugas, rábanos, acelgas.[15]

### **3.3 RECURSO EOLICO**

Uno de los primeros escollos que se encuentran a la hora de diseñar un sistema basado en energías renovables para electrificación rural en países en vías de desarrollo (PVDs en adelante) es el desconocimiento de los recursos de la zona.

Existen fuentes de información a escala global como las mediciones vía satélite o mapas elaborados por instituciones internacionales como el UNEP (United Nations Environmental Program) o el NREL (National Renewable Energies Laboratory) que aportan datos de potencial Solar y eólico pero normalmente

serán demasiado dispersos o poco fiables. Por eso tendrán que complementarse con la intuición, la experiencia de los habitantes de la zona o con mediciones in situ durante un corto periodo de tiempo.[1]

Un elemento de valor importante en el proyecto será la rapidez con que pueda entrar en funcionamiento. El objetivo del diseñador consistirá en implementar la instalación en el menor tiempo, con la mayor fiabilidad y al menor coste realizando para ello las aproximaciones inteligentes lo más cercanas posibles a la realidad que sean necesarias. Para ello se darán unas orientaciones sobre como estimar los recursos de una manera más “artesanal”.

### **3.4 Evaluación del potencial eólico**

Las características principales asociadas al recurso eólico ya que es un conocimiento de la física elemental que lo rige permitirá al diseñador aprovechar efectos localizados puntualmente y predecir mejor los valores esperables. A continuación se tratará de cómo debe efectuarse la medición in situ; si bien no será necesario medir durante un periodo tan dilatado de tiempo como ante un parque eólico de grandes dimensiones, tener datos de uno o dos meses en el propio emplazamiento del aerogenerador puede aportar información valiosa para el diseño de la instalación.

Seguidamente se presentará una breve visión del fundamento de los modelos numéricos de predicción; que si bien escapan del ámbito de este proyecto, resultan interesantes como una alternativa en el futuro. Por último se apuntarán unas orientaciones de cómo aproximarse cualitativamente al recurso a partir de métodos menos científicos que en ocasiones son una opción que proporciona información suficientemente buena y que sirve como elemento de contraste y validación.

#### **Evaluación mediante la medición in situ**

Al diseñar un gran parque eólico, pequeñas diferencias en la velocidad predicha del emplazamiento se revelan significativas en cuanto a la rentabilidad esperada.

Por ello se realizan medidas durante un período mínimo de un año a fin de asegurar un conocimiento preciso de las condiciones del lugar escogido. En una instalación más pequeña no es necesaria una descripción tan exhaustiva del recurso y en muchas ocasiones prima más ser capaz de realizar la instalación rápidamente que un diseño totalmente ajustado. Aun así, la medición in situ también es un complemento útil a otras fuentes de datos, permitiendo extrapolar el histórico disponible de estaciones meteorológicas cercanas a nuestro entorno, su aplicación al ámbito de este proyecto no exigirá tanto detalle y que habrá que adaptarlo a este caso.

#### **Aproximaciones cualitativas al recurso**

Una característica del recurso eólico es que puede variar mucho en distancias cortas según la orografía, la altura de la torre del aerogenerador y la rugosidad

del terreno. Además, puesto que la energía contenida en el viento depende de la velocidad al cubo, las diferencias se amplifican rápidamente al traducirlas a energía disponible. Así que, aunque no merezca la pena realizar las mediciones durante un año, sí conviene conocer lo más aproximadamente posible las características del emplazamiento exacto del aerogenerador.

Los datos provenientes de las fuentes “oficiales” muchas veces son interpolaciones entre dos estaciones de medición lejanas entre sí o la media en un cuadrado de 1° de lado en el caso de la medición vía satélite con lo que pueden diferir bastante de la realidad de la localización escogida.

Por ejemplo, la mayoría de las estaciones meteorológicas que proporcionan datos útiles de viento corresponden a las situadas en aeropuertos lo que significa que seguramente las medidas se han tomado en el lugar con menos velocidad media de toda la zona, ya que los aviones aterrizan mejor cuanto menor sea la turbulencia atmosférica. Además, incluso aunque no se trate de un aeropuerto, muchas estaciones de medición tienen sus aparatos en zonas de turbulencia (detrás de un edificio, entre los árboles) por lo que sus datos no tienen la fiabilidad que sería deseable. Por tanto, habrá que tomar su predicción como una base mínima del recurso y no como una cifra exacta, recurriendo para contrastar a las correlaciones explicadas en el apartado de la evaluación mediante la red de estaciones meteorológicas y a aproximaciones como las que se explicarán en este apartado.

Algo similar ocurre con las mediciones vía satélite: en el mar la resolución de 1° es aceptable; como no existen efectos puntuales y se trata de una superficie homogénea, tomar una media del área se acercará bastante a la realidad. Sin embargo, en tierra firme, en la cima de una colina, el viento puede llegar a ser hasta un 100% del existente en la base; resulta obvio que no se pueden tomar sin precauciones los datos de la telemetría, del Instituto de Meteorología correspondiente o del atlas apropiado y que el diseñador tendrá que guiarse tanto por su conocimiento de las características particulares del recurso eólico como por métodos cualitativos que si bien no proporcionan datos estrictos permiten conocer con una buena aproximación las posibilidades del emplazamiento. Algunos de estos métodos son:

### **La experiencia de los habitantes de la zona**

Aunque no podrán apuntar una cifra, hablar con ellos permite hacerse una idea de las características del lugar. Sensaciones como que el viento está continuamente soplando, que tiene suficiente fuerza como para llevarse la ropa tendida o que los árboles están en perpetuo movimiento son indicadoras de que hay posibilidades de un buen recurso eólico. Los vecinos del lugar habrán experimentado durante un periodo largo todos estos efectos y poseerán un conocimiento intuitivo de la zona de mucho valor, no sólo de la cantidad de viento sino incluso de sus características a lo largo del año (de su estacionalidad).

Además, en un proyecto como este, obtener la participación de la comunidad local resulta muy importante para su viabilidad ya que son ellos quienes tendrán que garantizar su mantenimiento una vez se ha concluido el proyecto.

#### □ *Deformaciones en la vegetación*

Un viento fuerte y constante en una dirección puede deformar los árboles del lugar. En particular las coníferas y otros árboles de hoja perenne son más sensibles a este fenómeno puesto que presentan resistencia al paso del viento durante todo el año y no sólo en verano. Además resulta más evidente en aquellos árboles que están aislados y tienen cierta altura; en los bosques, los árboles actúan como un bloque compacto, protegiéndose unos a otros del viento y es más difícil detectar formas extrañas. Los biólogos han usado este método desde hace décadas y en muchos libros de ecología aparecen tablas como la incluida a continuación[14].

Por último hay que señalar que si bien la aparición de deformaciones en la vegetación es garantía de que hay viento en el área, la ausencia no implica que no lo haya: puede haber factores que afectan a la interacción del viento con los árboles y que permanezcan ocultos a la vista del diseñador llevándole a un diagnóstico erróneo. Además, en las costas, las partículas salinas de la brisa pueden actuar como amplificadores del efecto del viento, empujando a sobreestimar la velocidad media.

### **3.5 Fundamentos de la estimación del recurso del Viento.**

Esta sección conoceremos los conceptos básicos de la valoración del recurso del viento y algunas de las fuentes de datos que se pueden utilizar en un estudio del emplazamiento.

Los estudios del emplazamiento del recurso del viento se pueden clasificar en tres categorías básicas:

- Identificación preliminar de área.
- Evaluación del recurso del viento del área.
- Micrositing.

Los atlas del recurso del viento de NREL son útiles para las primeras dos categorías, pero no contienen la información detallada necesitada para los estudios micrositing [15].

#### **Velocidad y dirección del viento**

La velocidad del viento es la representación más simple del viento en un punto dado. Los anemómetros u otros instrumentos calibrados miden velocidad del viento. Las velocidades del viento se pueden calcular como promedio o expresar como valor instantáneo. La velocidad del viento que hace un promedio de los intervalos usados comúnmente en estudios del emplazamiento del recurso incluye 1 o 2 minutos (observaciones del tiempo), 10 minutos (el

estándar para los programas de supervisión de la energía del viento), de cada hora, la publicación mensual, y períodos anuales.

Es importante saber la altura de la medida para una velocidad del viento dada debido a la variación de la velocidad del viento con altura. Es también deseable saber la exposición de una localización particular a los vientos predominantes porque los obstáculos próximos tales como árboles y edificios pueden reducir la velocidad del viento.

La dirección del viento se mide con una paleta del viento, situada generalmente en la misma altura que el anemómetro. El conocimiento de la dirección del viento predominante es importante en la determinación del recurso disponible. La alineación correcta de la paleta del viento a una dirección de la referencia es importante medir exactamente la dirección del viento, pero siempre no se alinea correctamente.

Las observaciones de la dirección del viento en las estaciones meteorológicas se basan a menudo en un compás 36 puntos (cada 10 grados). Unos ciertos datos de la dirección del viento se expresan en intervalos menos exactos 8-point (cada 45 grados), 12-point (cada 30 grados), o 16-point (cada 25 grados). La distribución de la dirección del viento se presenta a menudo como rosa de vientos (un diagrama de la frecuencia de la ocurrencia por la dirección). Las rosas de viento pueden también representar cantidades tales como la velocidad media o por ciento de la energía disponible para cada dirección [15].

### **Distribución de frecuencias de Velocidad de Viento**

La distribución de frecuencia de la velocidad del viento caracteriza el viento en una localización dada de dos maneras.

Primero, la distribución de frecuencia se determina cómo una velocidad del viento dada, se observa a menudo en la localización, y en segundo lugar, identifica la gama de las velocidades del viento observadas en esa localización.

Este análisis es logrado a menudo clasificando las observaciones de la velocidad del viento en los 1-metro-por-segundo (m/s) y computando el porcentaje en cada lapzo. La distribución de la velocidad del viento es importante porque los sitios con velocidades del viento medias idénticas pero diversas distribuciones pueden dar lugar a recurso disponible substancialmente diverso del viento. Estas diferencias pueden ser tan grandes como un factor de dos o tres.

### **Función de Distribución de Weibull**

La distribución de frecuencia de la velocidad del viento en muchas áreas se puede aproximar por la función de distribución de Weibull. Se define la función de Weibull como:

$$f(V) = (k/c)(V/c)^{k-1} \exp(-V/c)^k \quad (1)$$

Donde:

$f(v)$  = la función de la densidad de la probabilidad de Weibull, la probabilidad de encontrar una velocidad del viento de  $V$  m/s

$c$  = el factor de escala de Weibull, que se relaciona típicamente con la velocidad del viento media con el factor de la forma, expresada en m/s;

$k$  = el factor de la forma de Weibull, que describe la distribución de las velocidades del viento.

Las explicaciones detalladas de la función de distribución de Weibull y de su uso están disponibles en muchos textos, tales como Rohatgi y Nelson (1994).

### V.2.5 Densidad de Energía del Viento

El recurso del viento en un sitio se puede describir por la velocidad del viento, pero la densidad de energía del viento proporciona una indicación más verdadera del potencial de la energía del viento de un sitio. La densidad de energía del viento expresa la energía media del viento sobre un metro cuadrado ( $W/m^2$ ). La densidad de energía es proporcional a la suma del cubo promedio instantáneo (o a corto plazo) de la velocidad del viento y de la densidad del aire debido a este término cúbico, dos sitios con la misma velocidad del viento media pero diversas distribuciones pueden tener valores de densidad muy diversos de energía del viento. La densidad de energía del viento, en unidades de  $W/m^2$ , esta definida por la ecuación siguiente:

$$WPD = \frac{1}{2n} \sum_{i=1}^n \rho \cdot v_i^3 \quad (2)$$

donde:

WPD = la densidad de energía del viento en  $W/m^2$ ;

$n$  = el número de expedientes en el intervalo que hace un promedio;

$\rho$  = la densidad del aire ( $kg/m^3$ ) en un rato particular de la observación;

$V^3$  = el cubo de la velocidad del viento (m/s) en el mismo tiempo de la observación.

Esta ecuación se debe utilizar solamente para los valores individuales de la medida (cada hora, 10-minutos, etc.) y no para los valores medios a largo plazo tales como un valor mensual o anual. Usando esta ecuación con promedios a largo plazo subestimaré la densidad de energía del viento porque el largo plazo hace un promedio que no incluirá la mayoría de los valores de la alta velocidad que calcularían más exactamente la densidad de energía del viento.

El término de la densidad del aire ( $kg/m^3$ ) es dependiente en temperatura y la presión y puede variar por el 10% a el 15% estacional. Si se saben la presión y la temperatura del sitio, la densidad del aire se puede calcular usando la ecuación siguiente:

$$\rho = \frac{P}{R \cdot T} \quad (3)$$

donde:

$\rho$  = la densidad del aire en kg/m<sup>3</sup>  
 $P$  = la presión de aire (PA o N/m<sup>2</sup>)  
 $R$  = la constante de gas específica para el aire (287 J/kgK)  
 $T$  = temperatura del aire los grados Kelvin (°C+273).

Si la presión del sitio no está disponible, la densidad del aire se puede estimar en función de la elevación del sitio ( $z$ ) y de la temperatura ( $t$ ) como sigue:

$$\rho = \left( \frac{P_0}{R \cdot T} \right) \varepsilon^{\left( \frac{-gz}{R \cdot T} \right)} \quad (4)$$

donde:

$\rho$  = la densidad del aire en kg/m<sup>3</sup>;  
 $P_0$  = la presión atmosférica del nivel del mar estándar (PA 101.325), o el nivel del mar real ajustada a la lectura de la presión de un aeropuerto local;  
 $g$  = la constante gravitacional (9.8 m/s<sup>2</sup>);  
 $z$  = la elevación del sitio sobre el nivel del mar (m).

Substituyendo en los valores numéricos para  $P_0$ ,  $R$ , y  $g$ , la ecuación que resulta es:

$$\rho = \left( \frac{353.05}{T} \right) \varepsilon^{-0.034 \left( \frac{z}{T} \right)} \quad (5)$$

Esta ecuación de la densidad del aire se puede sustituir en la ecuación de la densidad de energía del viento (WPD) para la determinación de cada uno de los valores medios instantáneos o múltiples.

### Variación del viento y la ley de la energía

La variación del viento es una descripción del cambio en velocidad del viento horizontal con altura. La magnitud de la variación del viento depende del sitio-especifico y dependiente en la dirección del viento, la velocidad del viento, y la estabilidad atmosférica.

Determinando la variación del viento, uno puede extrapolar datos existentes de la densidad de la velocidad del viento o de energía del viento a otras alturas. La forma siguiente de la ecuación de la ley de la energía se puede utilizar para hacer estos ajustes:

$$U = U_0 (z/z_0)^\alpha \quad \text{[Wind Speed]} \quad (6)$$

$$WPD = WPD_0 (z/z_0)^{3\alpha} \quad \text{[Wind Power Density]} \quad (7)$$

donde:

$U$  = la velocidad del viento desconocida en la altura  $z$  sobre la tierra;  
 $U_0$  = la velocidad sabida en una altura  $z_0$  de la referencia;  
 $WPD$  = la densidad de energía desconocida del viento en la altura  $z$  sobre la tierra;  $WPD_0$  = la densidad de energía sabida del viento en una altura  $z_0$  de la referencia;  $\alpha$  = el exponente de la ley de la energía. Un exponente de 1/7 (o

0.143), que es representante de áreas bien-expuestas con aspereza superficial baja, se utiliza a menudo para extrapolar datos a alturas más altas.

#### **4 . METODOLOGIA Y METODOS UTILIZADOS**

Como se ha comentado en los objetivos, este proyecto va encaminado a estudiar el proceso integral de diseño, construcción y ensayo de aerogeneradores. Se decidió llevar a cabo esta tarea tanto en forma teórica, con la búsqueda de bibliografía reciente sobre la materia, como en forma práctica, construyendo un prototipo de baja potencia (100 W nominales).

Durante los meses de Junio y Diciembre del 2006 se cumplieron todas las etapas planteadas. El aerogenerador se encuentra actualmente instalado y funcionando en el Carrizal Paxtlán, comunidad Indígena de México

##### **4.1 Proceso general de diseño**

La secuencia de pasos necesaria para diseñar y dimensionar un aerogenerador es:

- Definir la necesidad energética a satisfacer. Los factores a tener en cuenta son:
- Interconexión a la red de transmisión o instalación aislada.
- Magnitud de la instalación (micro, pequeña, mediana o grande):
- Potencia máxima a instalar
- Energía anual media a entregar
- Realizar un estudio anemométrico.
- Elegir un generador eléctrico acorde y realizar los ensayos correspondientes.
- Diseñar la hélice para entregar al generador la potencia mecánica.
- Calcular las sollicitaciones mecánicas que debe soportar la estructura y dimensionarla en consecuencia.
- Elegir y diseñar un sistema de control apropiado

##### **4.2 Análisis de factibilidad y determinación de los lineamientos generales del proyecto**

Se consideró que la potencia nominal del aerogenerador no debía superar los 1000W, sabiendo que aquellos que lo superan presentan los mismos problemas técnicos que las grandes turbinas eólicas, imposibilitando su concreción con los tiempos y recursos disponibles para este proyecto.

Teniendo en cuenta los objetivos planteados en términos de la dimensión del proyecto, se buscó que el generador eléctrico tuviera las siguientes características:

- Capacidad de generar energía a bajas revoluciones
- Potencia acorde a las dimensiones del proyecto (micro aerogenerador).
- Pequeñas dimensiones.

- Bajo peso.
- Bajo costo.
- Robustez adecuada.

### **Localización**

Fue necesario elegir un lugar alto, abierto a los vientos y que respetara las actividades, el entorno del lugar y sobre todo la seguridad. El sitio también debía ser de fácil acceso para facilitar su construcción y mantenimiento. Se escogió finalmente instalarlo a 10 metros de la casa. El lugar fue inspeccionado y aprobado por el Jefe de la familia.

### **Estructura de soporte**

Para simplificar las tareas de instalación, ensayos y reparaciones (evitando las dificultades de acceder al aerogenerador desde la base de la torre) se diseñó un sistema que permitiera rebatirlo, pivotando la estructura en su punto de apoyo más bajo. De esta manera se alcanza al aerogenerador sin necesidad de trabajar en altura.

### **Sistema de control**

La energía captada por un aerogenerador varía con el cubo de la velocidad del viento, por lo que un dispositivo eólico que capta 100W de potencia nominal sería capaz de generar 27 veces esa cantidad (2700W) cuando la velocidad del viento se triplica. El ejemplo anterior pone en evidencia la necesidad de implementar un sistema de control para evitar que esto suceda, debido a las cargas mecánicas excesivas que dañarían el aparato.

Siendo la seguridad otro aspecto importante en el análisis de la factibilidad del proyecto, también fue considerada al momento de diseñar el sistema de control.

El mismo debía ser:

- simple.
- con baja probabilidad de falla.
- económico.
- eficiente (en el sentido de permitir el mejor aprovechamiento posible de la energía).

Todos los aerogeneradores de pequeña potencia tienen sistemas de control mecánicos que son más simples y económicos (aunque menos eficientes) que los electrónicos. Los primeros aprovechan alguna propiedad que varíe con la velocidad del viento incidente (en general la fuerza centrífuga de las aspas o el empuje axial de las mismas) para variar la cantidad de energía captada.

Para este proyecto se optó utilizar el primer método, que tiene como ventaja la posibilidad de incluir un dispositivo de accionamiento manual para el caso de falla mecánica.

#### **4.4 Mediciones y ensayos preliminares de Anemometría(estudio de la velocidad del viento)**

Un estudio anemométrico usualmente se realiza en las primeras fases de diseño para evaluar factores:

- de factibilidad: determinar si es posible técnica y económicamente la instalación de un aerogenerador en una zona o región geográfica
- de localización: elegir el lugar óptimo de emplazamiento
- técnicos: obtener parámetros necesarios para el diseño tanto del aerogenerador como de la estructura de soporte.

Debido a que el lugar de instalación fue elegido en base a consideraciones especiales, el estudio se realizó en este caso para:

- Aprender a realizar un estudio anemométrico
- Conocer el potencial eólico del lugar de emplazamiento

#### **Metodología experimental**

Se instaló un anemómetro en la localidad del Carrizal Paxtlán, lugar de instalación del aerogenerador.

Para describir las distribuciones de la velocidad del viento se utilizan distintas funciones de densidad de probabilidad; entre ellas la Weibull, Rayleigh (caso particular de la anterior), la Beta y la LogNormal. La mayoría de los autores se inclina por la de Weibull de dos parámetros y es la que se utilizó.[16]

Se procesó la información que el sistema de adquisición de datos recopiló durante 4082 horas (27/06/2006 al 30/12/2006). Los valores instantáneos de velocidad del viento, se tomaron por hora. Se guardaron, además de estos valores, los registros de tiempo de los mismos.

#### **4.5 Diseño mecánico**

##### **Hélice**

Se definieron los siguientes parámetros:

*Velocidad de viento nominal* A partir del estudio anemométrico se encontró la velocidad media, se tomó de 5.2 m/s, valor adecuado para pequeños aerogeneradores en aplicaciones aisladas (no conectadas a la red de distribución).

*Velocidad de rotación nominal*: Se determinó un valor de 201 rpm, que es un

valor razonablemente para un adecuado acople directo con el generador eléctrico, pero que está limitado debido a que valores mayores tendrían como consecuencia un diseño de palas con muy poca resistencia estructural.

*Número de palas:* Se eligió hacer una hélice de 3 palas. Un número mayor tendría un costo demasiado elevado comparado con la poca ganancia en eficiencia. Los otros valores posibles, 1 o 2 palas, fueron descartados porque, si bien se ahorra considerablemente en costo, tienen mayores problemas de alineación, balanceo y vibraciones.

### Aspas

El primer paso fue elegir el perfil de aspa a utilizar. Se eligió un perfil NACA 4212. Éste perfil tiene muy buen comportamiento estructural y aerodinámico, debido a su forma cóncavo-convexa. Ha sido utilizado con éxito en otros aerogeneradores, entre ellos el PMG realizada por el ITDG Perú, y el proyecto de Sry Lanka por Hugo Piggot [15].

Para optimizar los valores de los parámetros de diseño fue necesario recurrir a teorías de aerodinámica que incluyen efectos complejos.

### Partes mecánicas:

La mayoría de las piezas del aerogenerador fueron materiales en desuso y adquiridas en deshuesaderos de automóviles.

## 5.- DISEÑO, CONSTRUCCION Y CARACTERIZACION DE LA INSTALACION Y AEROGENERADOR.

### 5.1 DETERMINACION DE LA CARGA

La vivienda tiene una superficie de unos 10 m<sup>2</sup> con un área de influencia de un radio de 6 m. Las casas están compuestas por una sola planta y una única habitación en su interior por lo que para lograr un buen nivel de iluminación basta con dos puntos de luz en el interior y un tercero en el exterior (para iluminar por ejemplo la entrada en momentos puntuales). Dadas las características del equipo de generación, las bombillas serán de alta eficiencia, consumiendo 10 ó 20 W en lugar de los 60 o 100 W que consumen las bombillas incandescentes normalmente usadas en los países desarrollados.

Figura 5 Vivienda a electrificar.



La experiencia muestra que la potencia pico de este tipo de instalación ronda los 250 w y el consumo energético diario se puede estimar en torno a 0'5 kWh. Por ello no tiene sentido pensar en aplicaciones que exijan una potencia elevada pero conviene prever dos tomas de corriente de usos generales para aparatos como radio, un pequeño ventilador o televisor.

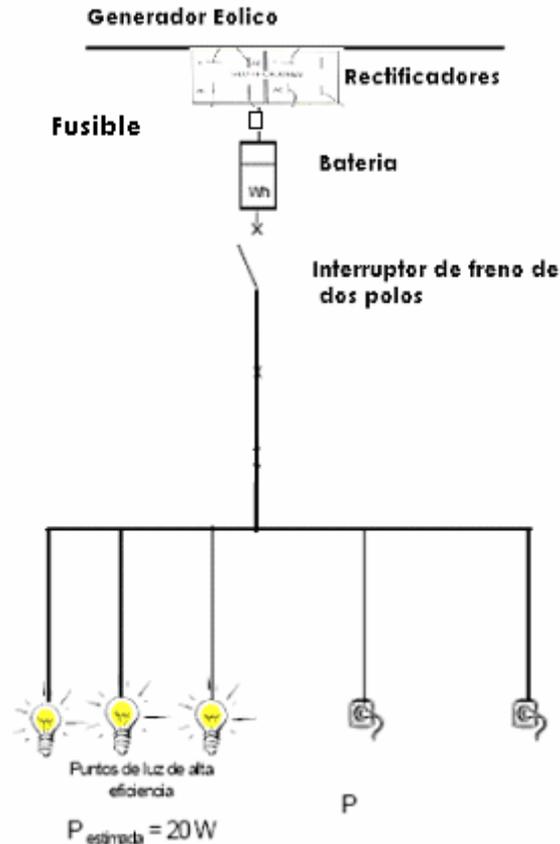
El orden de magnitud de consumo de estos pequeños electrodomésticos está en la decena o centena de vatio, coherente con la demanda doméstica previsible. Se incluye a continuación una tabla con algunos consumos típicos.

Tabla 4 Consumos típicos (Fuente ISF)

Equipo	Potencia (W)
Lámparas	8,10,15,18,20
Televisión Blanco y Negro	40
Televisión Color	200-400
Radio	6
Ventilador	50-100

Partiendo de estas consideraciones se propone un diseño previo de lo que pudiera ser la instalación doméstica interior de las viviendas, un pequeño esquema unifilar indicando los elementos principales del sistema.

Figura 6 Esquema Unifilar de la Instalación.



Para el cálculo de carga, una de las primeras tendencias detectadas se deriva del uso de la iluminación. Cabe pensar que durante el día, cuando el sol proporciona un nivel de iluminación suficiente en las viviendas, las lámparas estarán apagadas.

La lógica dicta que tras el ocaso, cuando los habitantes estén en el interior de las casas y se desarrolle en las mismas más actividad, el consumo subirá incluso hasta las dos lámparas encendidas. Este nivel de iluminación se mantendrá después de la puesta del sol durante más o menos tiempo en función de los hábitos de cada lugar pero al menos podemos suponer que se mantendrá una o dos horas e irá decayendo en un intervalo de una hora.

En cuanto a la lámpara de iluminación exterior, la tendencia puede ser de un uso esporádico, por ejemplo cuando llegue alguien a la puerta, o bien mantenida como una forma de iluminación del vial o del poblado. En este proyecto se considerará la segunda opción, siendo mantenida la lámpara tras el ocaso encendida unas tres horas. Algo similar ocurrirá por la mañana, cuando empieza la actividad en las casas pero el sol no tenga aún fuerza como para garantizar un nivel de iluminación suficiente en las mismas. Las luces se encenderán para proporcionar esa luz y se apagarán una vez dejen de ser necesarias, como se trata de una comunidad agrícola, los pobladores se levantan casi con el sol, así que bastará con considerar un intervalo de una hora centrado en el momento en que el sol supera el horizonte.

Durante el resto del día, puede suponerse incluso que el uso de la iluminación será esporádico o incluso nulo, únicamente en casos puntuales de días muy

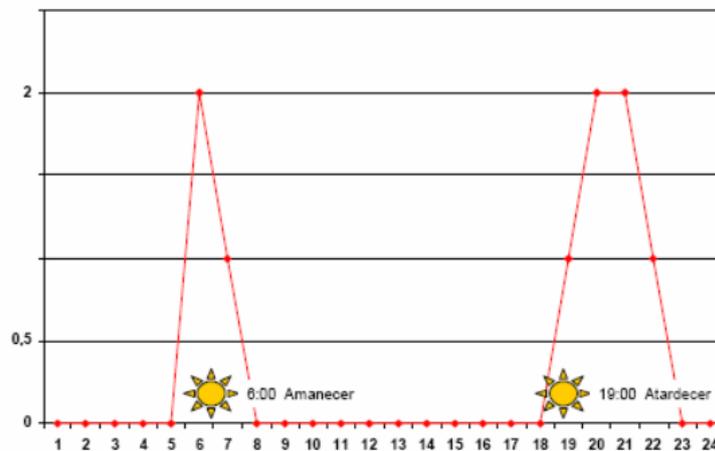
nublados o de viviendas con pocas aberturas al exterior y por lo tanto oscuras, se prevé el caso de iluminación fuera de las horas previstas.

En cuanto a las tomas de corriente, la previsión de cómo se distribuirá su consumo es compleja, al no estar sujeta a un patrón tan claro como la iluminación. Atendiendo a su destino, pequeños electrodomésticos como radio, televisión o ventilador, parece que el consumo será más constante a lo largo del día, suponiendo que la radio estará conectado casi permanentemente durante las horas de actividad.

En cuanto a las variaciones anuales y semanales del consumo, vuelve a presentarse una fuerte dependencia del emplazamiento del proyecto. Como primera influencia directa se observa la distribución de las horas de sol y por tanto del consumo de la iluminación, que irá desplazándose a lo largo del año en función de la hora de amanecer y de puesta del sol.

Además, existen otras consideraciones más sutiles como el papel de la temperatura, que obviamente influirá en el tiempo que los pobladores permanezcan en el interior de la vivienda consumiendo. Tampoco hay que despreciar variaciones semanales en la forma de la carga condicionadas por actos colectivos como puedan ser los servicios religiosos durante los cuales el consumo es previsible que se reduzca a su mínima expresión, o los domingos cuyo efecto más directo será seguramente retrasar la punta de la mañana y prolongar el consumo en la noche del día anterior (sábado).

Figura 7 Esquema del uso de la Iluminación en el poblado.



Con las explicaciones realizadas es ya posible realizar una aproximación a un consumo máximo de la vivienda, Las hipótesis se resumen a continuación:

- Amanece a las 6:30, durante esa hora se conectan los dos puntos de luz de la vivienda de forma que sobre las 6:00 se encendería el primero y se apagaría sobre las 7:00, cuando ya hay suficiente luz. Los puntos de luz son de alta eficiencia, siendo su consumo de 20 W.
- Al atardecer se encienden los tres puntos de luz durante las tres horas siguientes (de 18:00 a 22:00), a esa hora se reduce el consumo a uno o dos puntos de luz (el externo y otro interno), hasta que se apaga

totalmente la iluminación a las 23:00.

- Durante el día la radio (6 W de consumo) está casi permanentemente conectada en las horas de actividad de la casa, esto es, de 7:00 a 18:00, cuando se supone que atardece y se encienden los puntos de luz.
- Por la noche se mantiene algo del consumo derivado del uso de un aparato de radio o una televisión (40 W) en las dos horas subsiguientes al posible fin de la cena, cuando puede suponerse que los ocupantes se reúnen para escuchar o ver algún programa.
- El fin de semana se produce una variación en la carga, el consumo nocturno se prolonga durante más tiempo (hasta las 00:00) y el domingo se retrasa la mañana
- Además, en las horas centrales de ambos días cae el consumo derivado del uso de las tomas de corriente por la asistencia a actos religiosos.

Grafico 1 Consumos Energéticos de la vivienda (Elaboración Propia)

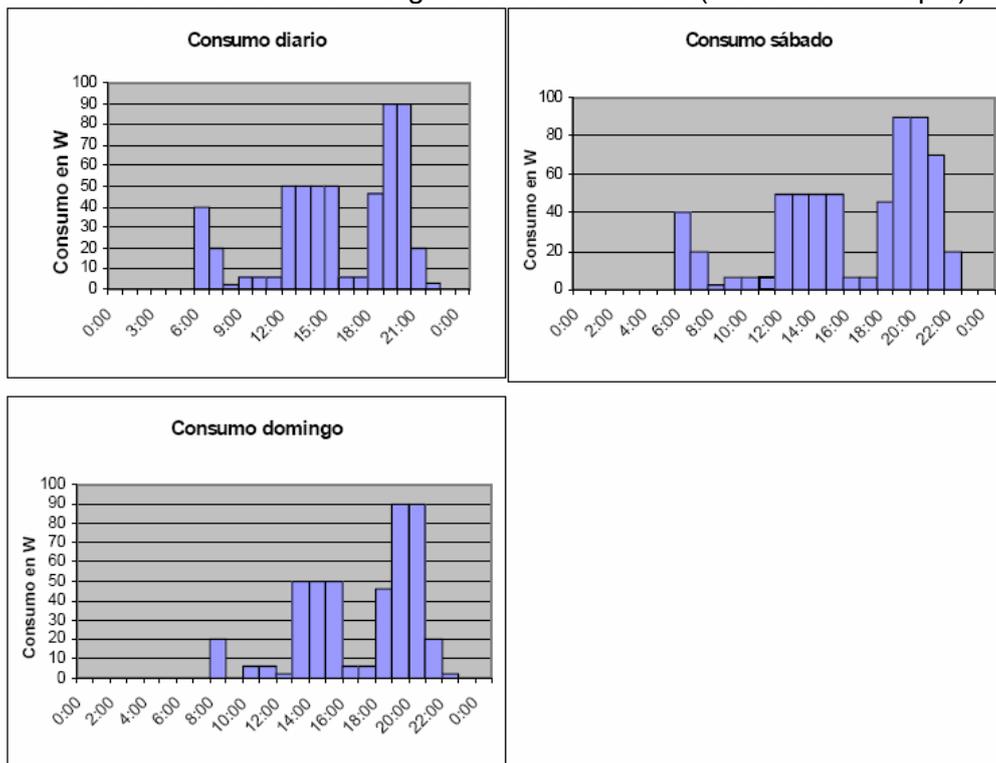


Tabla 4 Consumos Máximos y Total Diarios

	Punta (W)	Total (Wh)
Diario	90	541
Sábado	90	608
Domingo	90	444

## 5.2. ESTUDIO POTENCIAL EOLICO

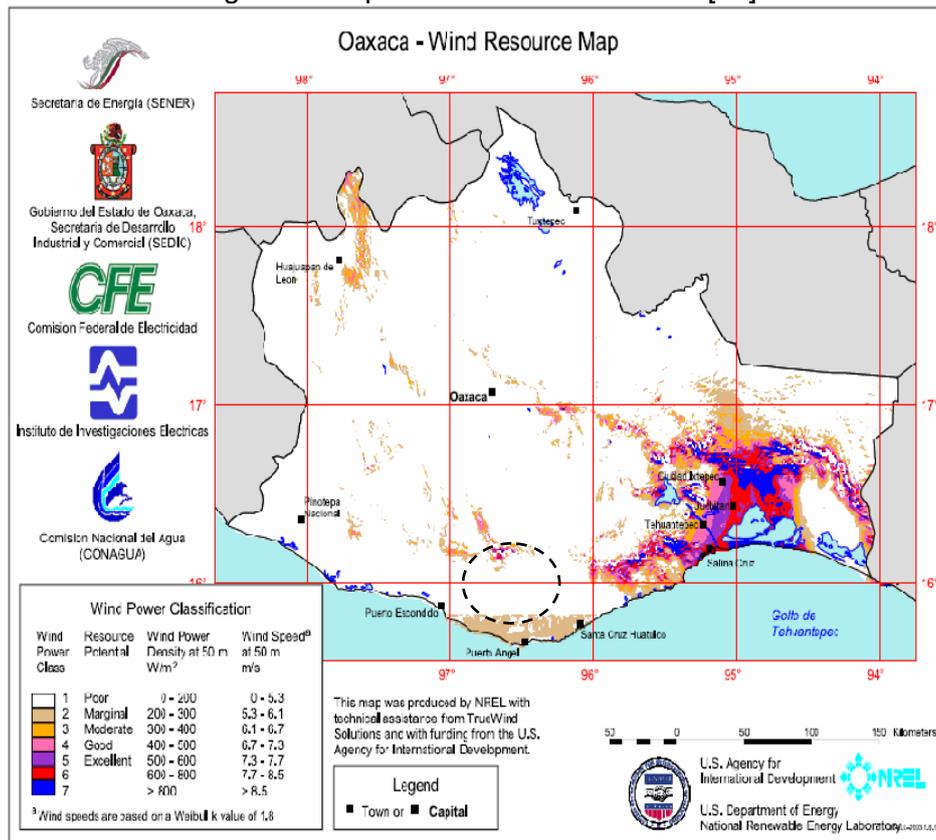
En la figura 13 se muestra el mapa recopilado por NREL sobre la velocidad del viento en Oaxaca, cuyos valores se presentan en la tabla 5 y deben considerarse teniendo en cuenta las características de rugosidad del terreno.[15]

Tabla 5 Potencias de Viento [15]

Class	Resource Potential (Utility Scale)	Wind Power Density (W/m <sup>2</sup> ) @ 50 m agl	Wind Speed <sup>(a)</sup> (m/s) @ 50 m agl
1	Poor	0 – 200	0.0 – 5.3
2	Marginal	200 – 300	5.3 – 6.1
3	Moderate	300 – 400	6.1 – 6.7
4	Good	400 – 500	6.7 – 7.3
5	Excellent	500 – 600	7.3 – 7.7
6	Excellent	600 – 800	7.7 – 8.5
7	Excellent	> 800	> 8.5

<sup>(a)</sup> Mean wind speed is estimated assuming a sea level elevation and a Weibull distribution of wind speeds with a shape factor (k) of 1.8. The actual mean wind speed may differ from these estimated values by as much as 20%, depending on the actual wind speed distribution (or Weibull k value) and elevation above sea level.

Figura 8 Mapa de vientos de Oaxaca.[15]



El mapa de viento demuestra muchas áreas que se estiman para tener recurso de bueno a excelentes de viento (clase 4 y más alto). Las mejores áreas del recurso de viento de Oaxaca se concentran en la región del Suroeste del estado, sobre todo en la parte meridional del istmo de Tehuantepec.

La región ventosa del istmo amplía de la costa hacia el norte aproximadamente 60 kilómetros, y aproximadamente 60 kilómetros a 80 kilómetros del este al oeste. El recurso excelente del viento (clase 5 de la energía y arriba) es extenso en esta región del istmo. El recurso más alto (la clase 7) en el istmo ocurre cerca de las colinas (la incluyendo Mata, la Venta, y la Ventosa), de los cantos, y de costa.[15]

Muchas otras regiones de Oaxaca tienen estimadas recurso de bueno a excelente del viento, están situadas en áreas específicas en el Noroeste, central y Sureste de Oaxaca. En todas estas regiones, las mejores áreas se estiman donde el terreno ofrece un cambio y/o aceleración de los vientos del Noreste.

En Oaxaca central, las áreas más notables están situadas aproximadamente 40-70 kilómetros al este de la ciudad de Oaxaca (cerca de Mitla). Aquí, los vientos del Noreste aparecen acelerados sobre los cantos relativamente bajos al norte y al este de Mitla mientras que divergen alrededor del extremo meridional de montañas altas en el sierra de Oaxaca. En el Sureste de Oaxaca las altas áreas del recurso están situadas aproximadamente 80-110 kilómetros de sur de la ciudad de Oaxaca cerca de la ciudad de Miahuatlán, que es donde precisamente se ubica nuestra región de estudio en donde existe un viento superior a 7 m/s, con un promedio de densidad de potencia anual es alrededor de 700, W/m. [15]

## ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DEL SISTEMA INICIAL

La evaluación del sistema se realizó en campo, en condiciones de uso, para ello se utilizó un anemómetro Windmaster 2, el cual es de elevada precisión, trabaja con unos niveles de viento bajos, desde cualquier posición sin necesidad de ser ajustado a la dirección del viento, arrojando medidas con intervalo de una hora, con capacidad de almacenar 80 datos, muy útil en nuestro caso para estimar el recurso eólico de la zona.

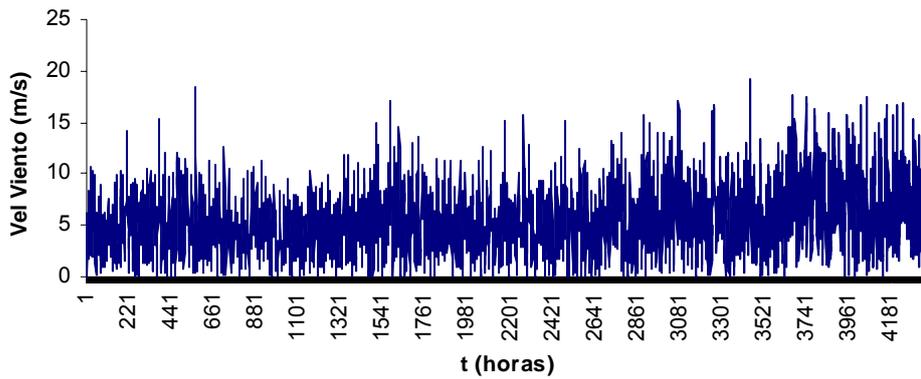
Figura 9 Características principales del anemómetro utilizado

Rangos:	De 2.5 hasta 150 Km/h. De 0 hasta 42 m/s.	De 1.3 hasta 81 nudos De 1.5 hasta 93 MPH
Resolución:	0.1 (0 hasta 19.9)	1 (20 hasta 150)
Precisión:	± 4 %, ± 1 dígitos	
Temperatura de funcionamiento	- 20 hasta + 50 °C	



El anemómetro fue instalado a una altura de 6 metros (altura de buje) en el emplazamiento escogido anteriormente para el aerogenerador, esto con el fin de estimar y conocer los parámetros característicos del viento, que son el de forma K y de escala C de la ecuación de Weibull.

Grafico 2. Frecuencia de Velocidades, El Carrizal, San Andrés Paxtlan. Elaboración Propia (julio – Diciembre 2006).



Los datos de enero a junio fueron obtenidos mediante promedios de la estación Meteorológica ubicada a 135 km del emplazamiento (Ver anexo 1), y con ayuda de programas informáticos (HOGA)[17], se realiza una estimación anual del recurso (Grafico 2) y con ello una curva de frecuencia de velocidades a lo largo de un año.

Grafico 3 Velocidades incidentes / año, El Carrizal, San Andrés Paxtlán Elaboración Propia.

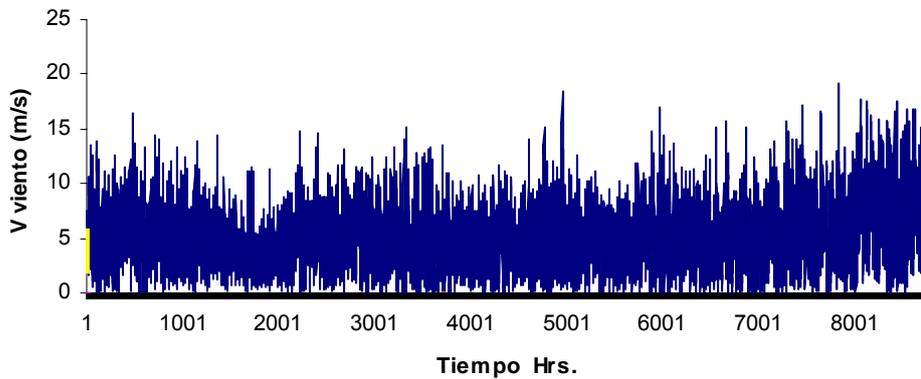
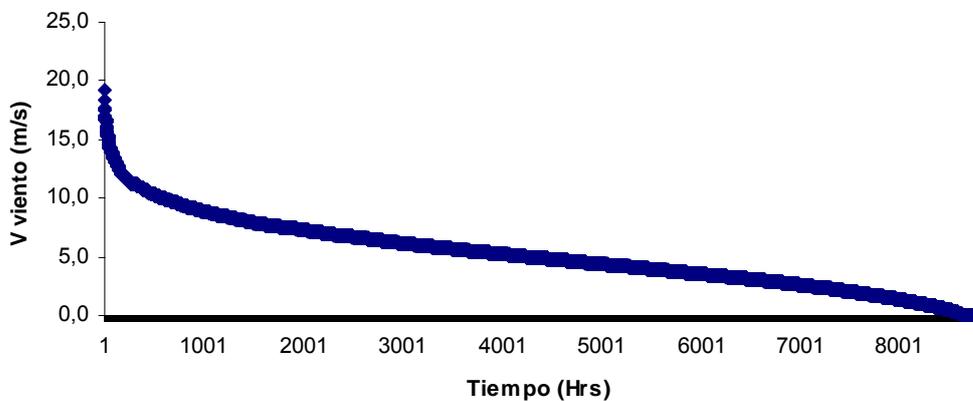


Grafico 4 Frecuencia de Velocidades Anual, El Carrizal Paxtlán. Elaboración Propia



En función de las velocidades realizadas se estudia la distribución de Weibull, se estiman los parámetros y se calcula el potencial eólico del emplazamiento.

Usando la distribución estadística de Weibull mediante la herramienta de cálculo Excel (Tomando como base hojas de cálculo de Sallan Jesús, 2005), se tienen los siguientes resultados:

Tabla 5 Mediciones horarias de Viento

Altura de medida:		6,00	
Mediciones	viento (m/s)		
1	4,6876	media	5,20
2	4,9736	desv. típica	2,96732931
3	2,4485		
4	2,1225		
5	6,8199		
6	4,9736	<b>Método 1</b>	
7	2,5348		
8	5,5	k	1,83872178
9	7,5071	c	5,85206885
10	4,9736		
11	2,3169	<b>Método 2</b>	
12	2,5281		
13	2,6757		
14	9,9658	k	1,83872178
15	8,9113	c	5,85614559
16	9,2597		
17	9,9912		

^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^

8747	7,8926
8748	5,4899
8749	9,5627
8750	8,3114
8751	14,348
8752	6,6324
8753	8,6207
8754	8,9366
8755	3,1852
8756	4,5249
8757	8,1773
8758	4,8831
8759	10,2936
8760	8,5516

Parámetro de forma	1,83872178
Parámetro de escala	5,85206885

Velocidad media (m/s)	5,20
-----------------------	------

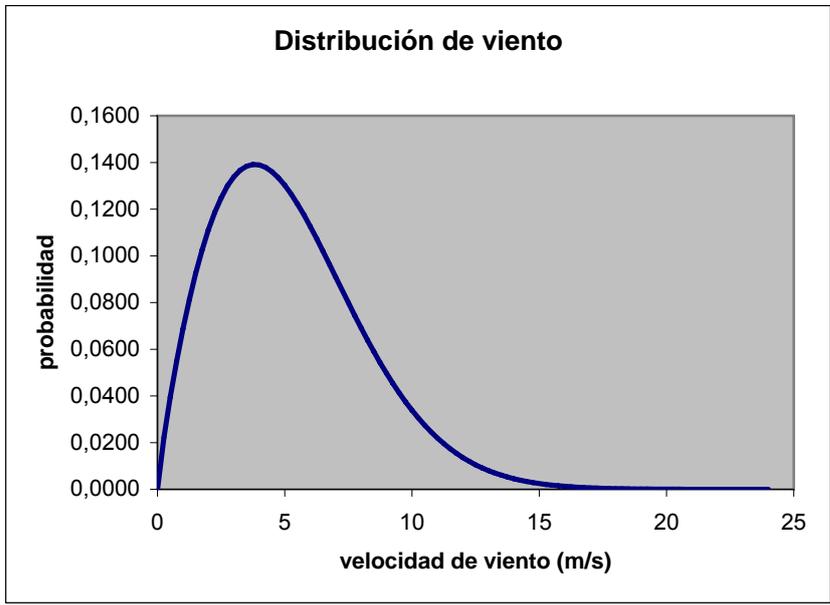


Gráfico 5 Curva de Distribución de Viento

Una vez determinada la distribución de velocidad de viento, se puede determinar fácilmente la potencia media. Para ello hay que integrar la curva que se obtiene multiplicando la densidad de probabilidad de cada velocidad por la potencia del viento a esa velocidad. La energía disponible en un año se puede obtener multiplicando la potencia media por la duración del año, con lo cual obtenemos los siguientes resultados.

Tabla 6 Determinación de Potencia media.

viento (m/s)	prob.	pot*prob1 (W/m <sup>2</sup> )
0,5	0,0334	0,003
1	0,0685	0,042
1,5	0,0923	0,131
2	0,1110	0,544
2,5	0,1247	1,194
3	0,1337	2,212
3,5	0,1383	3,632
4	0,1389	5,443
4,5	0,1360	7,588
5	0,1302	9,968
5,5	0,1222	12,455
6	0,1126	14,903
6,5	0,1021	17,168
7	0,0910	19,120
7,5	0,0799	20,653
8	0,0692	21,694
8,5	0,0590	22,209
9	0,0497	22,200
9,5	0,0413	21,700
10	0,0339	20,769
10,5	0,0275	19,487
11	0,0220	17,940
11,5	0,0174	16,219
12	0,0136	14,412
12,5	0,0105	12,593
13	0,0080	10,829
13,5	0,0061	9,168
14	0,0045	7,645
14,5	0,0034	6,282
15	0,0025	5,089
15,5	0,0018	4,066
16	0,0013	3,204
16,5	0,0009	2,492
17	0,0006	1,913
17,5	0,0004	1,450
18	0,0003	1,085
18,5	0,0002	0,802
19	0,0001	0,586
19,5	0,0001	0,423
20	0,0001	0,301
20,5	0,0000	0,212
21	0,0000	0,148
21,5	0,0000	0,102
22	0,0000	0,069
22,5	0,0000	0,047
23	0,0000	0,031
23,5	0,0000	0,021
24	0,0000	0,013
24,5	0,0000	0,009
25	0,0000	0,006

V media	5,2
des. Típica	2,96733
k	1,839
c	5,857

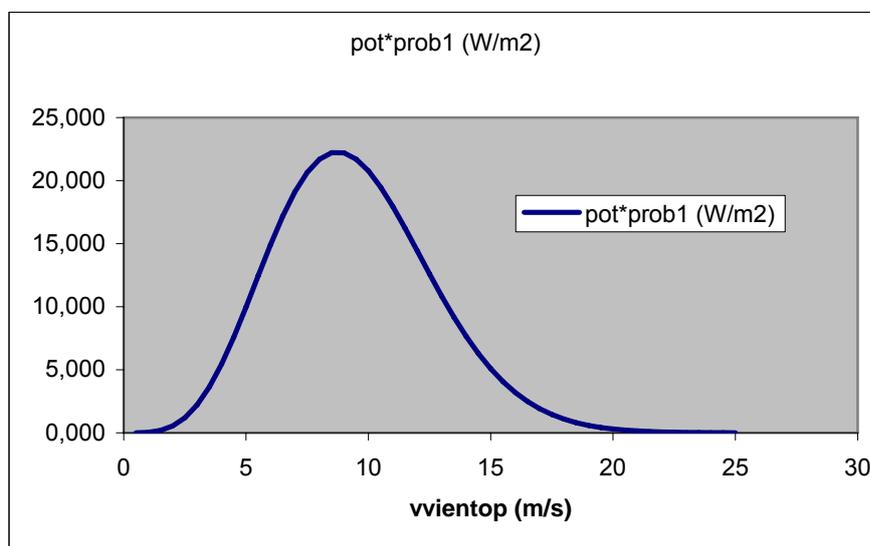


Gráfico 6 Curva Potencia \* Probabilidad (W/m<sup>2</sup>)

Potencia media	180,165605	W/m <sup>2</sup>
----------------	------------	------------------

Estos resultados nos muestran que existe un buen potencial eólico de la zona, un promedio anual de 5.2 m/s y con una potencia media de 180 W/m<sup>2</sup>.

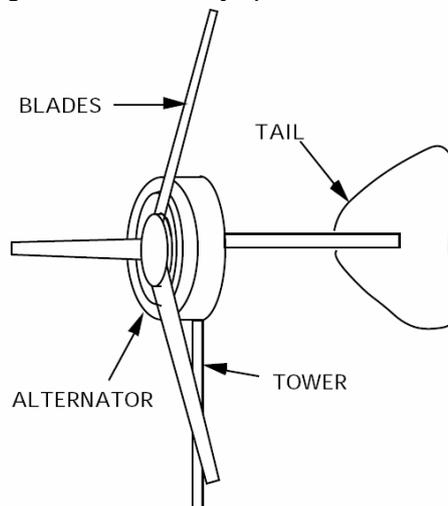
### 5.3 . DESCRIPCIÓN DEL AEROGENERADOR

El tipo de aerogenerador que se trata en este proyecto ha sido diseñado para hogares familiares en zonas de vientos moderados sin acceso a la red eléctrica.

Está pensado para construcción local, y ha sido diseñado para ser lo más barato posible. Los rasgos básicos (mostrados en la Fig. 10) son comunes a muchos pequeños aerogeneradores.

El aparato eólico se compone de: el generador, el rotor eólico (las palas), la montura del aerogenerador y la cola (formando ambos el mecanismo de cola de veleta) y la estructura que soporte el esfuerzo del peso de todo el conjunto y el momento flector derivado del empuje del viento sobre las palas.

Fig. 10 Partes de un aerogenerador de baja potencia de imanes permanentes.[18]



Los dos discos del rotor están montados sobre un eje de cojinetes gracias a un buje, para que puedan rotar sobre el eje. Los rotores magnéticos están conducidos directamente por las palas del aerogenerador. Están diseñados especialmente con el propósito de extraer potencia del giro lento de las palas con la mejor eficiencia, el mínimo coste y la mínima complejidad.

Entre los dos discos del rotor hay un estator, encastado con resina epoxica, que contiene las bobinas de alambre de cobre.

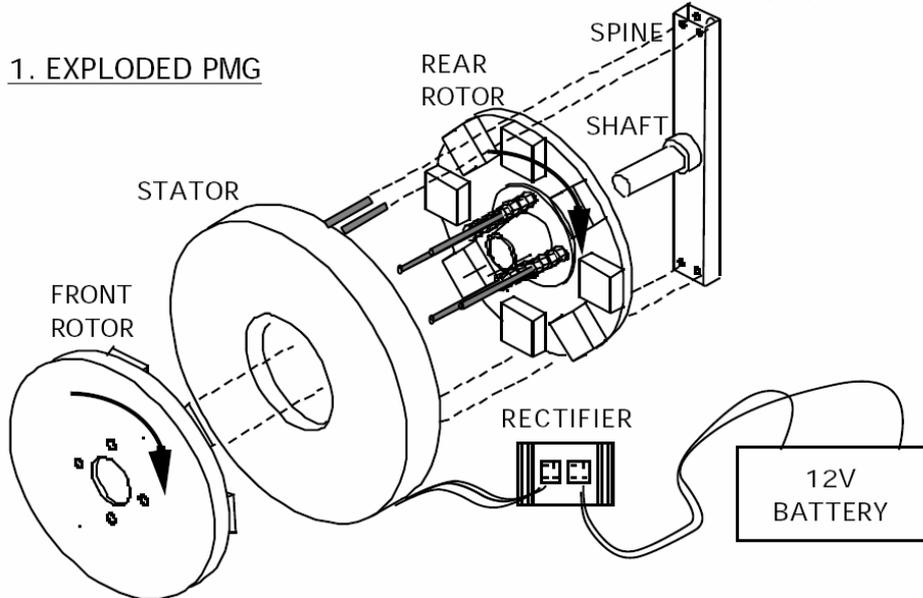
La electricidad se genera por el giro de los imanes de los discos magnéticos al girar a un y otro lado de las bobinas encastadas en el estator.

El campo magnético induce tensión en las bobinas, tensión que ha de permitir alimentar una batería. A velocidades de giro bajas la tensión es insuficiente para cargar la batería, pero cuando se alcanza un cierto umbral en la velocidad del viento, se establece una corriente eléctrica que permitirá la carga de la batería[18].

El generador produce corriente alterna AC, las bobinas están dispuestas en dos fases para hacer más eficiente el uso del espacio disponible y que, a la salida del rectificador la tensión de la corriente continua sea lo más lisa posible.

A continuación se describen más detalladamente la composición y funcionalidad de cada elemento componente del generador.

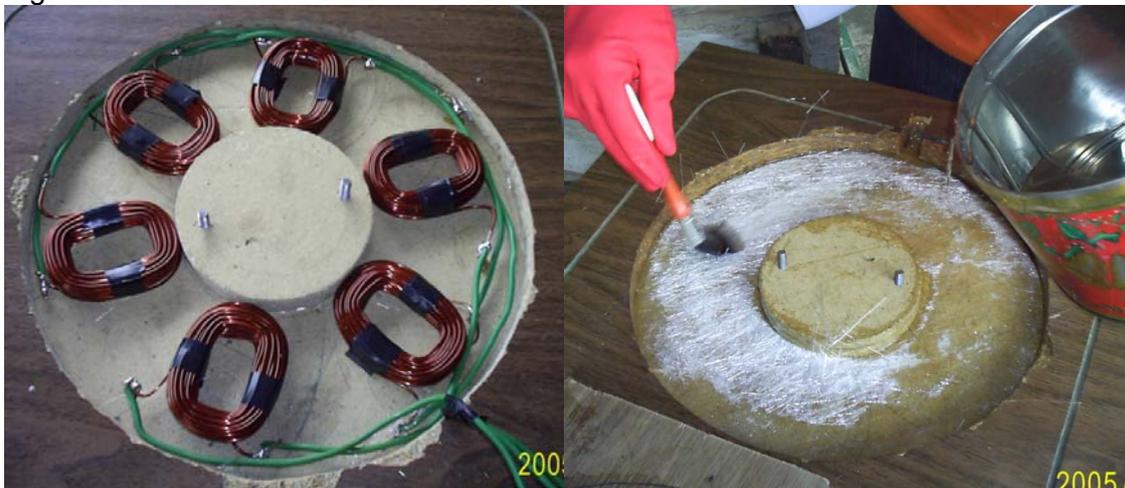
Figura 4.7 Partes del un Generador de Imanes Permanentes. [16]



### 5.3.1 Estator

El estator en sí mismo consiste en un elemento circular sólido (ver Fig.11) que contiene seis bobinas equidistantes en su interior. Es fruto de un encastamiento de resina con catalizador y talco, en moldes de madera. Para reforzar el encastamiento, el estator contiene incrustadas tiras rectangulares y circulares de fibra de vidrio en la resina, de manera que la fibra de vidrio con resina en su interior rodea al encastamiento de bobinas.

Fig. 11. Encastamiento Estator reforzado con fibra de vidrio.



El posicionamiento de las bobinas, queda determinado por la propia forma del estator. El estator tiene forma de anillo, de tal modo que todas las bobinas distan de su centro al centro del estator unos 125 mm.

### **5.3.2.- Palas**

Según sea el tipo de unión u anclaje de las palas con el buje existen dos posibles soluciones.

Una de ellas son las palas de paso variable, las cuales admiten rotación controlada sobre su eje a través de unos rodamientos. Esta solución precisa de un equipo de control de paso electrónico. El controlador electrónico comprueba varias veces por segundo la potencia generada. Cuando ésta alcanza valores demasiado altos, el controlador envía ordenes al mecanismo de cambio de ángulo de paso, que hace girar las palas ligeramente. Este sistema precisa de una ingeniería muy desarrollada para asegurar que las palas giren exactamente el ángulo deseado.

Las palas de paso fijo no admiten rotación sobre su eje, realizándose el control de potencia mediante un diseño de pérdida aerodinámica de las palas. Esto se consigue torsionando la pala a lo largo de su eje, es decir, aumentando el ángulo de ataque del perfil de la pala a lo largo de su eje. Gracias a esto, la pala pierde sustentación de forma gradual y se evita que se transmita un par excesivo sobre el rotor. Este tipo de solución es la más adoptada en aerogeneradores de baja potencia ya que comparada con las palas de paso variable, en esta se evitan instalar partes móviles del rotor y un complejo sistema de control, que aumentan los costes considerablemente.

Finalmente se seleccionan palas de paso fijo debido a su mayor simplicidad y su menor coste.

El material utilizado para las palas debe responder a frecuentes variaciones en la velocidad del viento y a ráfagas de vientos fuertes. Por ello el material de las palas debe ser:

- Ligero
- Perfectamente homogéneo
- Indeformable
- Resistente a la fatiga mecánica
- Resistente a la erosión y a la corrosión
- De coste bajo para que el aerogenerador sea en cuanto a precio competitivo

Para estas solicitaciones hay varias alternativas:

Madera: sencilla, ligera, fácil de trabajar y resiste bien a la fatiga

Metales: se emplean aleaciones ligeras de aluminio con silicio o con magnesio ya que con estos materiales se obtienen costes muy bajos si se producen en grandes series. Una de las desventajas es que el aluminio resiste mal a la fatiga, lo cual limita su empleo.

Materiales sintéticos, resinas, fibras y plásticos: destacan por su bajo peso, insensibilidad a la corrosión y su buena resistencia a la fatiga pero el coste es más elevado que en los casos anteriores.

Para esta aplicación se selecciona la madera como material de las palas, ya que cumple con las sollicitaciones y el coste es más bajo que otro tipo de material.

Se selecciona un perfil NACA 4412 por su buen coeficiente de sustentación, su facilidad para la fabricación y porque tiene una sección relativamente gruesa que permite soportar los esfuerzos en la raíz del álabe, aunque esta rigidez tiene que ver también con los materiales que se utilizan, estudiando los ángulos de ataque, sustentación e inclinación de varias secciones se perfilan las palas.

### Parámetros de diseño de Palas

El diseño de esta máquina fue desarrollado utilizando las ecuaciones aerodinámicas correspondientes, utilizando perfiles estandarizados para la sección de los alabes y la necesaria compatibilidad entre los parámetros de la turbina con los del generador.

### Diseño de la turbina eólica

- Cálculo del diámetro del rotor. Para este calculo se utilizó la ecuación de potencia de las turbinas eólicas.

$$P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot (A) \cdot V^3 \cdot C_p \cdot \eta$$

$$A = \left( \pi \cdot \frac{d^2}{4} \right)$$

$$d = \sqrt{\left( \frac{8 \cdot P}{\pi \cdot \rho \cdot V^3 \cdot C_p \cdot \eta} \right)} \quad (8)$$

Donde:

- d: Diámetro del rotor de la turbina eólica (m)
- P: Potencia de diseño del aerogenerador (W)
- $\rho$ : Densidad del aire, variable con la a.s.n.m (1.23 kg/m<sup>3</sup> a nivel del mar)
- V: Velocidad del viento (m/s)
- A: Área barrida por la turbina (m<sup>2</sup>)
- C<sub>p</sub>: Coeficiente de potencia (adimensional)
- $\eta$ : Eficiencia del generador

$$\lambda = \frac{U}{V_D} = \frac{\pi \cdot N \cdot d}{60 \cdot V_D}$$

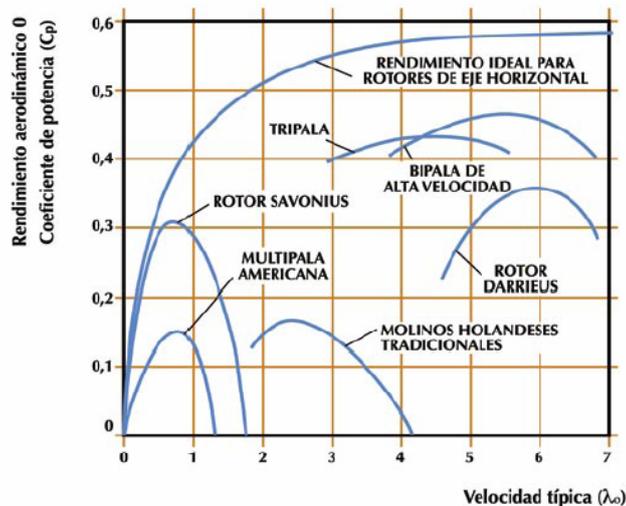
$$N = \left( \frac{60 \cdot \lambda \cdot V_D}{\pi \cdot d} \right) \quad (9)$$

Donde:

- N: Velocidad de giro de la turbina eólica (r.p.m.)
- U: Velocidad tangencial al extremo de la pala (m/s)
- $V_D$ : Velocidad de diseño (m/s)
- $\lambda$ : Celeridad

Utilizando la ecuación (8), con un  $C_p=0.35$ , velocidad de viento igual a la velocidad de diseño de 5.2 m/s (Tabla 5) , densidad del aire de  $1.23 \text{ kg/m}^3$ , potencia de 100 W a la salida del generador y una eficiencia del 75% para el generador (valor aceptable en pequeños generadores de imán permanente), se obtiene un diámetro de 2.4 m.

Figura 12.- Rendimientos Aerodinámicos de aerogeneradores



De la ecuación (9), seleccionando el valor de 5 para la celeridad de diseño, (valor moderado, conveniente para zonas de regímenes de viento moderados, como es el caso de la mayoría de zonas de posible aplicación de esta turbina, se puede considerar también como un valor conservador) se obtiene la velocidad de giro de 207 r.p.m.

Por tanto se tiene una turbina de tres álabes, de 2.4 m de diámetro y una velocidad de giro de 207 r.p.m.

### Cálculo de la sección del álabes y selección del perfil

Para el cálculo de la sección del álabes se utilizaron las siguientes ecuaciones:

$$\lambda_r = \frac{\lambda_o \cdot r}{R} \quad (10)$$

$$\phi = \frac{2}{3} \cdot \arctan\left(\frac{1}{\lambda_r}\right) \quad (11)$$

$$C = \frac{8 \cdot \pi \cdot r \cdot (1 - \cos\phi)}{Z \cdot C_l} \quad (12)$$

$$\beta = \phi - \alpha \quad (13)$$

$$\alpha = -\alpha_o + \left[ \frac{C_y}{C_x} \right] \left[ 1 + \frac{3}{\Delta L} \right] \quad (14)$$

$$\Delta L = \frac{R}{\bar{L}} \quad (15)$$

Siendo:

$$\bar{L} = \frac{\sum L_{tramo}}{10} \quad (16)$$

Donde:

$\lambda_r$ : Celeridad local para el radio r

$\lambda_o$ : Celeridad de diseño

r: Distancia del centro del rotor a la sección evaluada (m)

R: Radio de la turbina (m)

$\phi$ : Angulo formado por la velocidad relativa con el plano de giro del rotor

C: Cuerda de la sección del alabe

Z: Número de alabes o palas

$C_l$ : Coeficiente de sustentación del álabe

$\beta$ : Angulo formado por el álabe con el plano de giro

$\alpha$ : Angulo de ataque, depende del perfil seleccionado.

$\alpha_o$ : Constante , 5.

L: Longitud estación.

Utilizando las ecuaciones (10), (11), (12) y (13), para una turbina tripala y  $C_y=0.85$ , este valor del coeficiente de sustentación se obtiene de la gráfica  $C_y$  vs  $C_x$  (Figura13) del perfil seleccionado previamente, para presente caso, es el NACA 4212. Para diferentes valores de radio "r", se obtiene los valores del ángulo de posición y la longitud de cuerda respectivas.

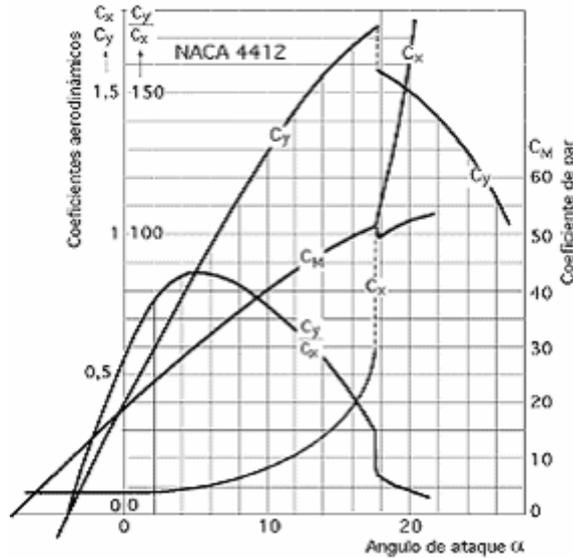


Figura 13  $C_y$  vs  $C_x$  Perfil NACA 4412

Los resultados de los cálculos antes indicados nos dan valores variables no lineales, tanto para la cuerda como para ángulo de posición, lo cual hace complicado el proceso de fabricación de los alabes, para simplificar esto se adopta el concepto de linearización del alabe.

### Linearización del alabe

Este concepto viene siendo utilizado por los diseñadores y fabricantes desde comienzos de la década de los 80's (siglo pasado)[19]; que consiste en transformar tanto a la cuerda ( $C$ ) del alabe como al ángulo ( $\beta$ ) en parámetros lineales dependientes de la posición del radio. Las rectas de linearización toman como puntos de paso  $r=0.5R$  y  $r=0.9R$ . Luego a partir de las rectas obtenidas se procede al cálculo de la cuerda y ángulo definitivos, ver resultados en la tabla 7.

$r$ (mm)	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1080	1100	1200
$\beta$ (°)	14,3	13,2	12,1	11,0	9,9	8,8	7,7	6,6	5,5	4,4	3,3	2,2	1,1
$C$ (mm)	167,55	158,41	149,27	140,13	131,00	121,86	112,72	103,58	94,44	85,30	76,16	67,02	57,88

Las dimensiones características de una pala están definidas según estaciones.

Cada estación constituye una sección transversal de la pala (ver Fig. 14), y lleva asociada un número (número de la estación). Así se consigue caracterizar una pala sólo con determinar las dimensiones características de un número acotado de estaciones (secciones):

- El radio local, el cual es la distancia de la estación al centro del rotor.
- La anchura de cuerda, que es la anchura de la pala de un extremo al otro en una estación determinada. La línea de cuerda es la línea más larga dentro de la

sección de la pala, y es la que une el borde principal o de ataque con el borde posterior o de fuga.

- El ángulo de la pala (beta), que es el ángulo entre la línea de cuerda de una estación determinada y el plano sobre el que gira el rotor.

Figura 14. Parámetros característicos de la pala.[18]

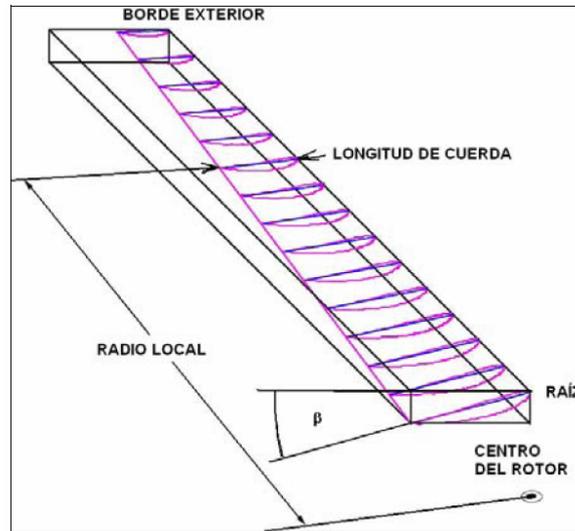


Figura 15. Seccionamiento Palas

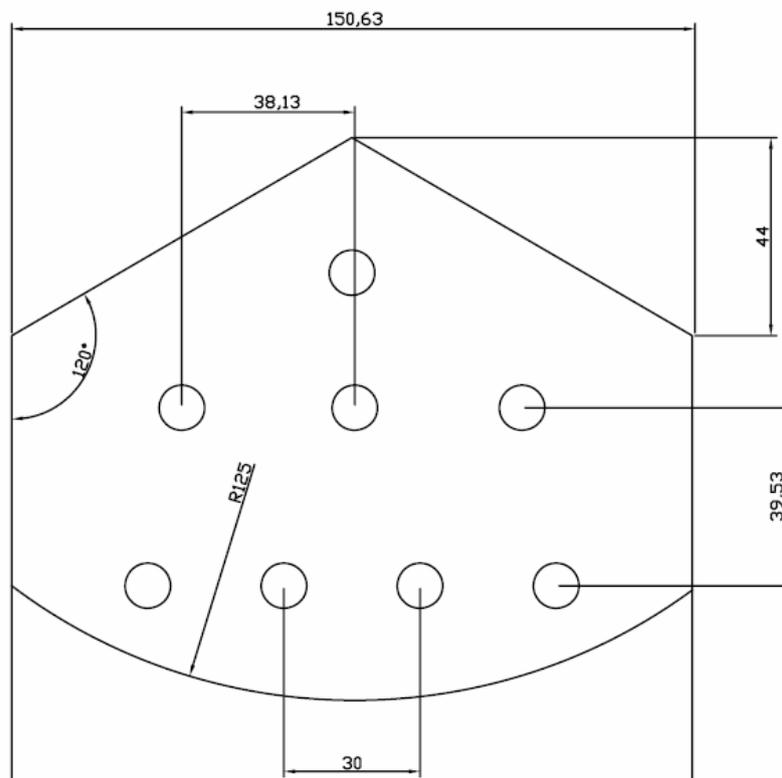


### El extremo raíz

El extremo raíz es idéntico en cada pala y es necesario para ajustar cada pala al rotor del generador. Es por eso que las palas tienen dos partes, una primera que es perfil de ala de la pala que es la parte que capta la energía eólica, y una segunda parte en el extremo grueso donde se produce una suave transición entre el final del perfil de ala hacia la forma del extremo raíz.

Este extremo raíz, no incluido en la longitud de la pala, consiste en un bloque de madera (extremo de la misma pieza que el resto de la pala) que tiene las dimensiones indicadas:

Figura. 16 Extremo raíz de una pala. Diseño Hugo Piggott.



## ESFUERZOS SOBRE LAS PALAS

### Calculo de la Fuerza Centrifuga

La fuerza centrífuga empuja las palas hacia afuera y tiende a arrancarlas del cubo del rotor viene dada por la ecuación: [20]

$$F_{cent} = \frac{1}{2} m_{pala} \frac{v_G^2}{r_G} \quad (17)$$

Donde:

$m_{pala}$ : Masa de la pala.

$r_G$ : Distancia del centro del rotor al centro de gravedad de la pala.

$v_G^2$ : Velocidad en el c.d.g.

La velocidad en el c.d.g. esta dada por la ecuación:

$$v_G = \omega r_G = n \frac{2\pi}{60} r_G \quad (18)$$

Como no se conoce la geometría de la pala, se supone que el c.d.g. de la pala se encuentra a la mitad de su longitud [20].

Sustituyendo Ec. 17 en Ec. 18 se obtiene la fórmula final para el cálculo de fuerza centrífuga en Ec. 19.

$$F_{cent} = \frac{1}{2} m_{pala} \frac{\left( n \frac{2\pi}{60} r_G \right)^2}{r_G} = \frac{\pi^2}{1800} m_{pala} n^2 r_G \quad (19)$$

Sabiendo que la masa de cada pala es 1,35 kg, que la distancia del rotor al c.d.g. de la pala es 0,6 m y que la velocidad de giro media de funcionamiento (5.2 m/s) es de 207  $\text{min}^{-1}$  se calcula la  $F_{cent}$  en Ec. 12 dando como resultado **60.6 Nm**.

### Cálculo de la resistencia aerodinámica de la pala

Una fórmula aproximada [21] para determinar la resistencia de un aerogenerador en rotación, inmerso en una corriente de aire de velocidad  $v_m$  se puede expresar según Ec. 13 donde A representa el área de barrido de las palas.

$$F_{aerod} = 0,062 A v^2 = 0,062 \cdot \left( \frac{\pi \cdot 2,4^2}{4} \right) \cdot 5,2^2 = 7,59 Nm \quad (20)$$

En cambio si la eólica se encuentra parada, pero inmersa en la corriente de aire, la resistencia estática aerodinámica por pala se calcula mediante la expresión que se indica en Ec. 21, donde  $\Omega$  es el coeficiente de solidez. [21]

$$F_{est-aerod} = 2\Omega F_{aerod} \quad (21)$$

La solidez indica la relación entre el área geométrica de la pala y el área barrida por ella en su giro respecto al eje de baja velocidad. En la Ec. 22 se muestra la expresión de la solidez.

$$\Omega = \frac{n_{palas} S_{pala}}{A_{rotor}} = \frac{n_{palas} S_{pala}}{\pi R^2} \quad (22)$$

Donde la superficie de las palas tiene un valor de 1199.46  $\text{m}^2$ :

$$\Omega = \frac{n_{palas} S_{pala}}{A_{rotor}} = \frac{n_{palas} S_{pala}}{\pi R^2} = \frac{3 \cdot 0,1199}{\pi \cdot 1,2^2} = 0,07$$

Finalmente se calcula la fuerza estática aerodinámica en la Ec. 21

$$F_{est-aerod} = 2\Omega F_{aerod} = 2(0,07)(7,59) = 1,06 Nm$$

### Cálculo del momento flector de la pala

El momento flector de la pala se calcula a partir de las fuerzas aerodinámicas que actúan sobre las palas, que son paralelas al eje de giro, a la distancia  $d_G$  del mismo según Ec. 23.

$$M_{flector} = d_G F_{est-aerod} \quad (23)$$

En la Ec. 24 y en la Ec. 25 se muestran los momentos flectores para el modo operativo (máquina en funcionamiento) y para el modo estacionario (máquina parada) respectivamente.

$$M_{flector} = d_G F_{aerod} = 0.6 \cdot 7,59 = 4,554 Nm \quad (24)$$

$$M_{flector-est} = d_G F_{est-aerod} = 0,6 \cdot 1,06 = 0,636 Nm \quad (25)$$

### 5.3.3 Las bobinas

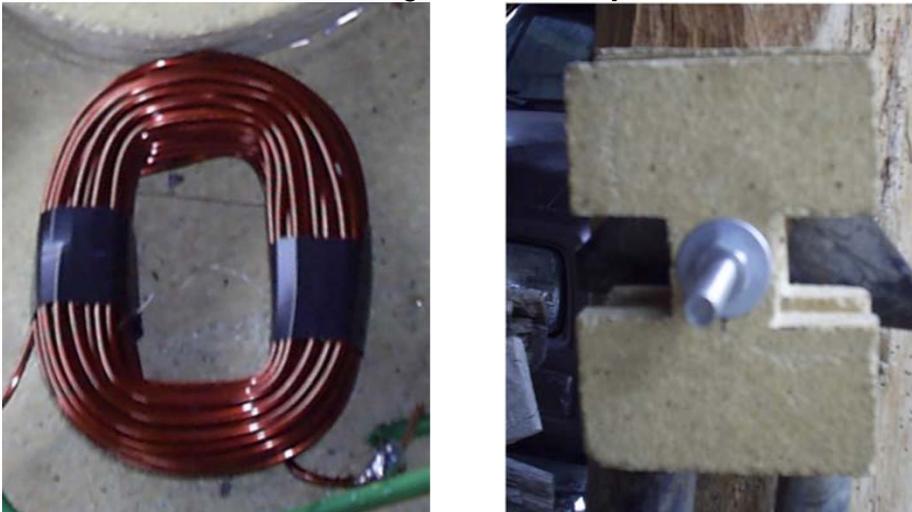
El voltaje producido por las bobinas dependerá de dos factores: la velocidad de rotación y la corriente suministrada por el alternador. Algo de voltaje se pierde internamente cuando la corriente recorre las bobinas. [22]

El voltaje producido a ciertas revoluciones por minuto (rpm) es proporcional al numero de vueltas de hilo por el numero de vueltas de hilo por bobina, por lo que se puede doblar el voltaje doblando el numero de vueltas y usando hilo mas fino[22].

Cada una de las bobinas consiste en un enrollado de 85 vueltas de hilo de cobre esmaltado de diámetro 1,6 mm, de dimensiones 100 x 110 mm (forma aproximada de cuadrado), un agujero cuadrado interior de 10 x 45 mm y un espesor de 13 mm. Es importante que sea cobre con capa de esmalte que aisle cada espira (vuelta) de la bobina y el fenómeno de inducción magnética sea óptimo.

Los extremos de las bobinas van soldados a 12 cables de cobre del mismo diámetro que sobresalen del encastramiento del estator para realizar la conexión eléctrica deseada de las bobinas.

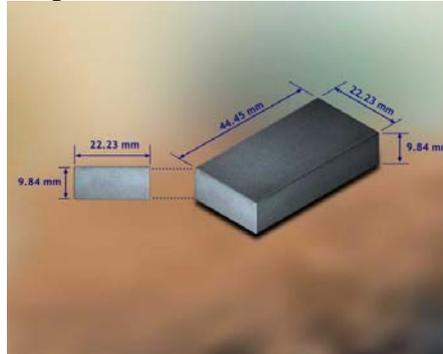
Figura 17 Bobina y Bobinador



### 5.3.4 Rotores magnéticos

El rotor del aerogenerador consiste fundamentalmente en un disco de acero al que se le pegan 8 imanes de Neodimio (NdFeB) equidistantes, encargados de crear la variación de campo magnético al girar solidarios al rotor (ver Figura 18).

Figura 18. Imanes de Neodimio



Para que el disco y los imanes formen una sola estructura, se crea un encastramiento de resina que pegue y a la vez contenga a los imanes en el disco de acero y finalmente se refuerza este encastramiento con tiras de fibra de vidrio en el interior y con alambre de acero inoxidable alrededor para evitar que se desenganchen los imanes debido a la fuerza centrífuga que tendrán que soportar.

Los dos rotores se diferencian en la colocación de los imanes como se verá más adelante, quitando esta excepción, son exactamente iguales.

### El disco de acero

Cada rotor magnético está constituido por discos de freno de un automóvil Volkswagen de acero de 264 mm de diámetro, de 6 mm de grosor, y un agujero central de 65 mm de diámetro.

Figura 19 Discos de freno

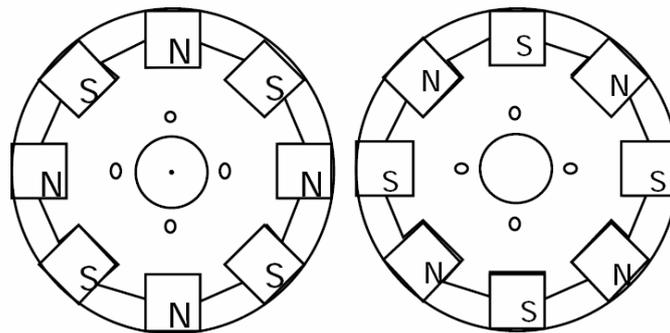


### 5.3.5 Los imanes

Los 8 imanes o bloques magnéticos que lleva cada rotor, son bloques de Neodimio (NdFeB) premagnetizados, de 46x 21 x 10 mm, y van colocados planos sobre el disco de acero( Figura 18).

Cada imán tiene un polo norte y un polo sur. La polaridad de un imán está distribuida tal como se indica en la Fig. 19 Y en cada disco magnético está distribuida de manera diferente.

Figura 19 Colocación de los imanes:[18]



### 5.3.6 El buje

Para la sujeción del generador a la estructura principal, y mantener el movimiento de rotación, se utiliza un buje de coche. Este proyecto, se ha realizado con el buje del eje trasero de un Chevrolet 86, por tanto el diseño de los agujeros del rotor y de los elementos de ensamblaje del conjunto (tuercas, tornillos, varilla roscada) se han tenido en cuenta a partir de conocer el buje.

Un parámetro importante de este buje es que en su collarín tenga 4 agujeros de diámetro 10mm equidistantes sobre un diámetro de 102mm (ver la Fig. 20).

Figura 20. Características de un buje de la rueda de un Chevrolet



El buje encaja sobre el eje por medio de dos cojinetes cónicos que vienen ya incorporados, uno más grande en la parte inferior del eje y otro menor en la parte superior, que permiten el movimiento libre de giro del buje con los rotores incorporados sobre el eje.

Además de disponer de estos cojinetes, el buje también incorpora: el propio eje y una tuerca M15, una cupilla que sirve de pasador de cierre y un guardapolvo para no dejar entrar suciedad a los cojinetes.

### **5.3.7 El eje**

El eje del Generador, es un elemento fundamental del conjunto del generador ya que sobre el eje va montado el buje y sobre éste los dos rotores. Esta pieza se ajusta a la montura del buje permitiendo que ésta sea el soporte del generador y a la vez permita el giro del buje (con los rotores) montado al eje sobre cojinetes que permiten el giro del buje.

No hace falta construir el eje, ya que viene incorporado al buje, de manera que al disponer de un buje de Chevrolet, ya se dispone de su eje correspondiente de acero, perfectamente conformado como se observa en la Figura 20.

### **5.3.8. El montaje eléctrico**

Es fundamental un soporte eléctrico para el funcionamiento del aerogenerador. Como ya se ha comentado, el funcionamiento del aerogenerador consiste en que la fuerza del viento hace girar la turbina eólica (las palas) que al estar montada solidaria a los discos del rotor, los hace girar. Al girar los rotores, como éstos contienen imanes, lo que se consigue es que el campo magnético que hacen los imanes, varíe. La variación de campo magnético induce corriente alterna en las bobinas del estator que está en medio de la variación de campo magnético.

Para aprovechar la inducción de corriente producida en el estator, lógicamente son necesarios una serie de elementos eléctricos que hagan que la corriente inducida en las bobinas sea transportada, transformada y controlada de manera correcta. Estos elementos eléctricos van conectados a la salida del estator sobre un disipador de calor que se atornilla sobre la montura del aerogenerador. Así pues, en este apartado del manual se describen los elementos eléctricos y también las conexiones a realizar para que funcione el sistema.

#### **Elementos eléctricos**

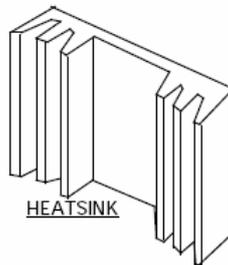
- El rectificador trifásico necesario para pasar de corriente alterna trifásica que se obtiene en la salida del cableado de las bobinas del estator a corriente continua que se desea tener en la entrada de la batería que se conecte, está formado en este caso por dos rectificadores de puente monofásicos de 25 A, 400 V que se conectan a las bobinas de tal modo que equivalen a un solo rectificador trifásico.

Figura 21 Dos rectificadores monofásicos de puente. [19]



- Ambos rectificadores van montados gracias a una tuerca y un tornillo en cada rectificador, sobre un Disipador de Calor que como su propio nombre indica disipa el calor que se genera como pérdidas de potencia por efecto Joule en éstos.

Fig. 22. Disipador de calor de aluminio. [19]



- Las conexiones entre las bobinas, las conexiones de éstas a los rectificadores y las conexiones de los rectificadores a la batería, se llevan a cabo enrollando extremos de cable flexible unipolar de 1,5 mm de diámetro, tomando como elementos de unión los bloques conectores de una regleta estándar.

### Conexión de las bobinas a los rectificadores

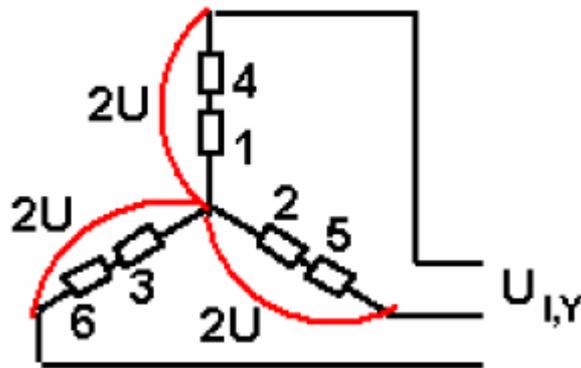
Para la conexión definitiva del generador hay que tener en cuenta varias opciones. Para bajas velocidades del viento es ideal la conexión de las bobinas en estrella y para velocidades elevadas del viento y por tanto más corriente de salida es necesario conectar las bobinas en triángulo.

No obstante, la conexión concreta que se realiza es la conexión en estrella simple, aconsejable cuando se tengan velocidades del viento bajas que hagan girar el generador hasta velocidades no superiores a 250 rpm. Las bobinas en fase se conectan en serie entre ellas. Es decir, se conecta la bobina 1 en serie con la 4, la bobina 2 en serie con la 5 y la bobina 3 en serie con la 6, y seguidamente se conectan las tres ramas en estrella a los rectificadores.

Figura 23. Conexión Bobinas



Fig. 24. Esquema eléctrico de la conexión en estrella de las bobinas[20].



### 5.3.9 Los discos del rotor

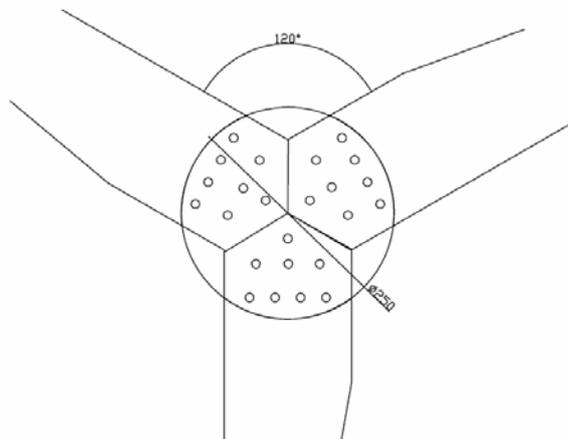
Las palas no van ensambladas directamente sobre la parte frontal del rotor de imanes, porque las fuerzas de inercia de las palas crearían tensión en el rotor de imanes y harían que los imanes golpearan al estator. Para evitar esto, se ensamblan las palas al generador con la ayuda de 2 discos de madera que hacen un “sándwich” con las palas.

Figura 25. Uno de los discos del rotor eólico.



Los dos discos conteniendo las 3 palas ajustadas a ellos a  $120^\circ$  cada pala (ver Fig. 3.13), se ajustan directamente sobre los Clavos del Rotor que sobresalen por la parte frontal del rotor frontal.

Figura 26. Posición de las palas sobre un disco del rotor eólico.



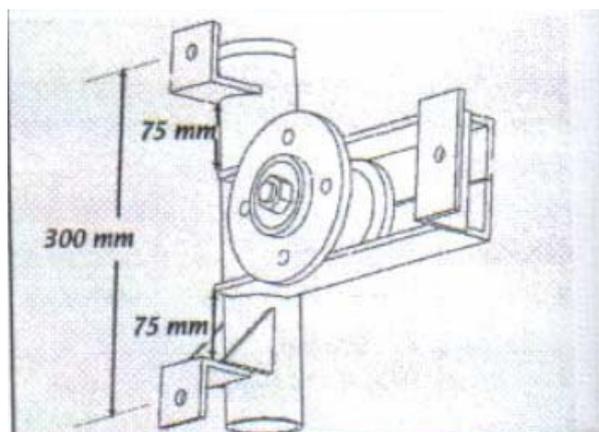
### 5.3.10 La montura del aerogenerador

La montura del aerogenerador es una pieza de acero sobre la cual va montado el generador con el rotor eólico incluido por un lado, quedando fijado el estator y permitiendo el giro de los rotores. Por otro lado, la montura tiene la parte interior de la bisagra de cola que forma parte del mecanismo de orientación y viraje del aerogenerador; sobre esta parte interior de la bisagra de cola que es un saliente de la montura, va montada la cola del aerogenerador con la veleta.

La veleta es la encargada de llevar a cabo el sistema de protección de sobre-velocidad. El mecanismo empleado será un mecanismo de viraje tanto del generador como bloque solidario a la montura de éste, como de viraje de la cola; funciona aprovechando el equilibrio entre la fuerza de empuje del viento (por un lado sobre las palas y por otro sobre la veleta de la cola) y la fuerza de la gravedad que supone el peso de la cola.

La montura del aerogenerador comprende varios elementos (ver Fig. 27). Estos elementos son: la montura del buje, los soportes del estator, el tubo de viraje (con su tapa) y la parte interna de la bisagra de la cola.

Figura 27. Montura del aerogenerador. [22].

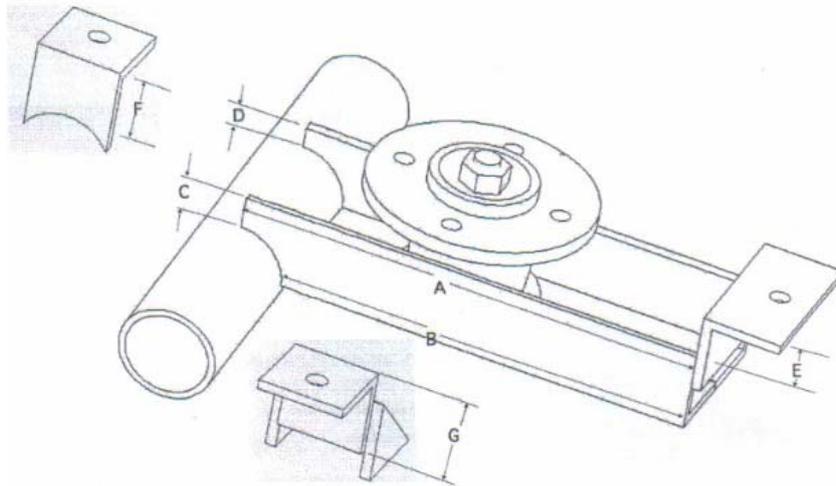


Todos estos elementos que forman la montura van soldados. La montura del buje lleva soldados en sus extremos los soportes del estator. Además el tubo de viraje lleva soldada la parte interior de la bisagra de cola y estos dos elementos (tubo y bisagra interna) van soldados en un extremo de la montura del buje consiguiendo una única pieza sólida preparada para encajar todos los elementos comentados en el primer párrafo.

#### Montura del buje

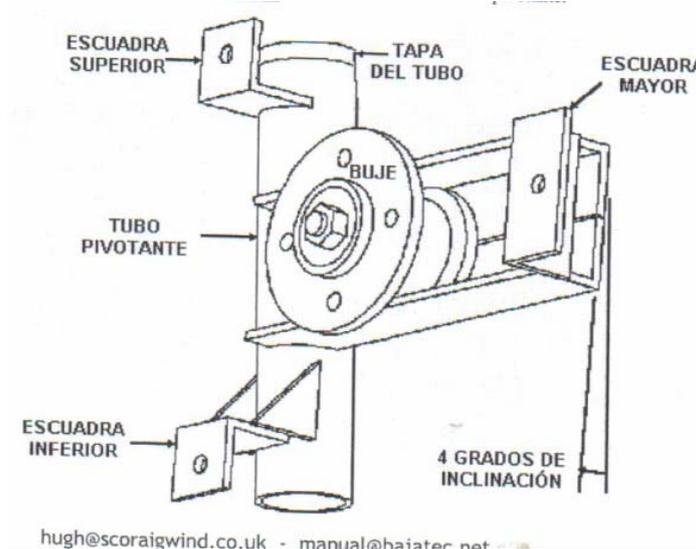
La montura del buje es la pieza formada por dos ángulos de acero (100 mm de longitud y una ala de 50x50 mm y 6 mm de espesor) que van soldados formando un bloque donde se ajusta el eje atornillado en los agujeros de la Fig. 28.

Figura 28. Montura del buje, como unión de dos ángulos. [22].



Pero como se observa, los cortes no están hechos a la misma distancia, consiguiendo con los cortes que al montar la montura del buje con el tubo de viraje vertical, se consiga obtener el ángulo  $\beta$  de 4 grados (ver Fig. 22) de inclinación de la montura del buje respecto la vertical para dejar un mayor margen entre los extremos de las palas y la torre.

Figura 29. Unión con ángulo  $\alpha$  de la montura del buje al tubo de viraje con la bisagra ya incluida. [22]



### Soportes del estator

Los soportes del estator son dos piezas de acero con forma de ángulo (igual que las piezas anteriores pero difiriendo la longitud). Se trata de dos piezas de 100 mm de longitud, un espesor de 6 mm y un ala de 50 x 50 mm. Estos soportes van soldados a la montura del buje (ver Fig. 22) y su función es hacer de soportes del estator, de manera que estos soportes disponen de agujeros

para que pasen a través de ellos los clavos del estator y se ajuste éste a la montura del aerogenerador[22].

### Tubo de viraje

El tubo de viraje es la pieza central del aerogenerador, ya que se encaja sobre la torre, y aguanta por un lado toda la montura del buje con el generador y las palas, y por otro lado aguanta la bisagra interior de la cola y toda la cola con la veleta. Consiste en una pieza tubular de 300 mm de longitud con un diámetro exterior de 60,3 mm y un espesor de 3 mm.

El tubo de viraje lleva incorporada una tapa que tiene como función evitar que entre suciedad en el interior del tubo de viraje, y por tanto en el interior de la torre y además para guiar el cableado que viene del generador hacia el interior del tubo y por tanto hacia el interior de la torre que sirve de guía del cableado hasta el suelo (Figura 22).

#### 5.3.11 Parte interna de la bisagra de la cola

La bisagra de la cola, como se comenta en la lista de materiales, sirve como elemento de unión del aerogenerador (ya que la bisagra se suelda al tubo de viraje) con la cola de la veleta. La parte interna de esta bisagra está formada por la unión por soldadura de dos piezas obteniendo la pieza mostrada en la Fig. 30.

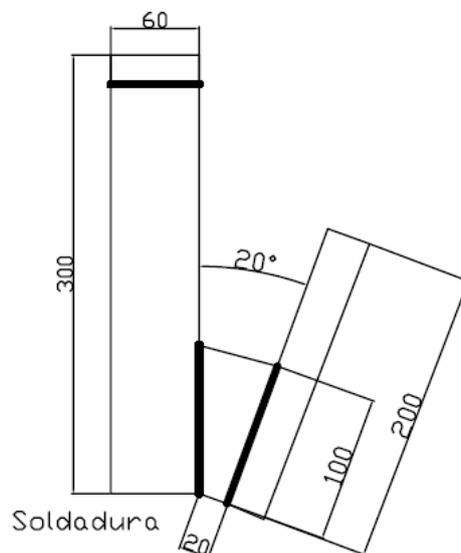


Figura 30. Parte interna de la bisagra de la cola. [22].

#### 5.3.12 Cola del aerogenerador

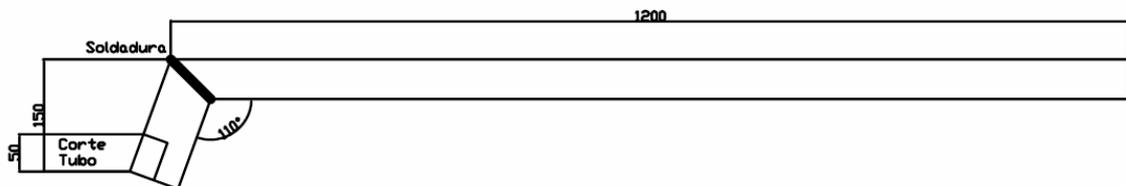
La cola de veleta se usa para encarar la máquina en el viento. Forma parte de un mecanismo que hace girar el generador y las palas fuera de toda la fuerza del viento, girando toda la máquina sobre un cojinete (que no es otra cosa que el tubo de viraje) en el extremo superior de la torre. Un mecanismo simple en la cola de veleta (bisagra de la cola) aprovechando la gravedad mantiene el

generador y las palas encarando al viento cuando el viento es moderado, pero se gira de lado con vientos muy fuertes. El sistema es esencial para proteger las palas de sobreaceleraciones y el PMG de estropearse. Hay varios mecanismos similares que pueden utilizarse para orientar la máquina de este modo.

## Cola

La cola se compone fundamentalmente de dos piezas tubulares soldadas (ver Fig. 3.19). La primera de ellas es el tubo exterior de la bisagra de la cola, y encaja con libertad de giro sobre el tubo interior de la bisagra. La segunda es la botavara del aerogenerador. Tiene un corte en un extremo para ir soldado correctamente a la parte exterior de la bisagra y un corte en el otro extremo para ir soldado a una pequeña barra de acero que sujete la veleta.

Fig. 31. Unión de la botavara al tubo exterior de la bisagra. [22].



### Funcionamiento de la cola:

El empuje del viento sobre la hélice es indicativo de la cantidad de energía capturada por el aerogenerador. Cuando ese empuje alcanza un cierto nivel y el viento va incrementando su velocidad, el generador con su centro desplazado siempre trata de volver la máquina horizontalmente.

El alternador se desplaza de manera que el empuje del viento actúa a un radio de 125 mm desde el centro del pivote de desorientación, sobre el que la máquina pivota para encarar al viento. Esto significa que el empuje crea un momento de desorientación u oscilación sobre el eje del pivote. El empuje del viento tratará siempre de volver la hélice lateralmente.

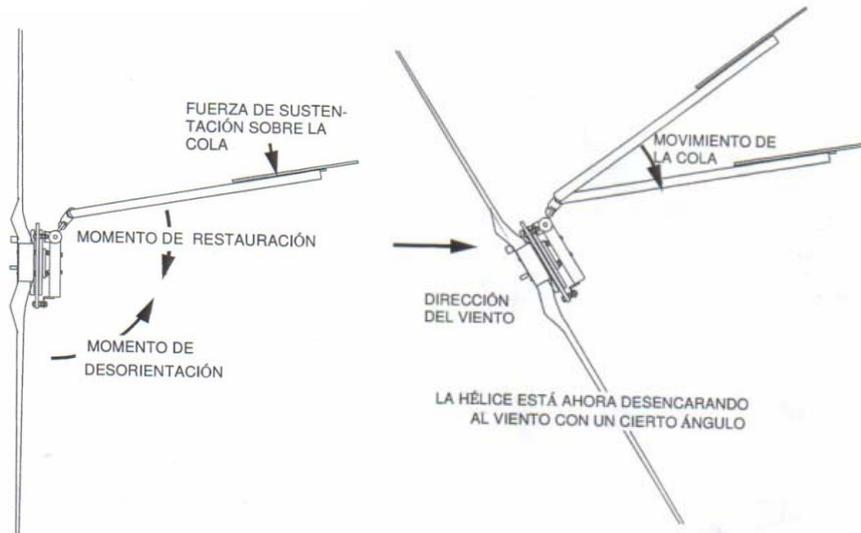
A velocidades del viento operativas, la fuerza del viento sobre la cola contrarresta el momento de desorientación. Cuando la máquina intenta girar, la cola oscila hasta una posición en la que se produce una fuerza de sustentación.

Dicha fuerza crea un momento de restauración que iguala al momento de desorientación y hace que la máquina se equilibre.

A medida que la velocidad del viento se incrementa, también se incrementa el empuje y el momento de desorientación. Sin embargo, la sustentación sobre la cola también se incrementa, de modo que este equilibrio de fuerzas mantiene a la hélice encarando al viento. Cuando la fuerza de sustentación alcanza una cierta magnitud, mueve la cola a una nueva posición. En esta posición la hélice

puede desencarar al viento, la fuerza de empuje es por tanto reducida y se establece un nuevo equilibrio.

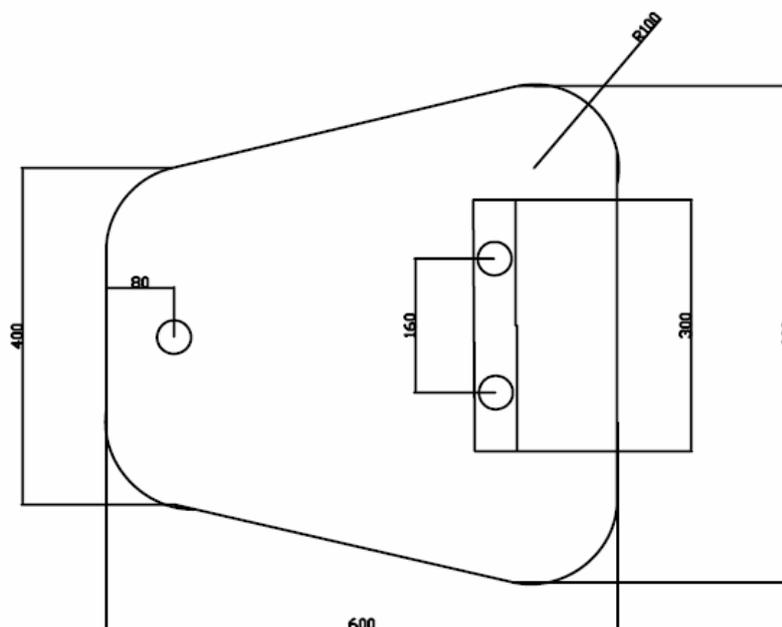
Figura 32. Funcionamiento de la Cola [22].



### 5.3.13. Veleta

La veleta, consiste en una pieza de madera contrachapada de 13 mm de grosor con la forma mostrada en la Fig. 33 que se asemeja a un trapecio regular. Va montada sobre la botavara con tres tornillos, uno de ellos directamente une la veleta a la botavara y los otros dos unen la veleta a una pequeña barra de acero que va soldada al extremo preparado para ello de la botavara. El viento actúa sobre su superficie consiguiendo que esté siempre prácticamente orientada en la dirección del viento[22].

Figura 33 Forma de la veleta y posición de los agujeros. Elaboración propia.



### 5.3.14 La estructura (torre)

El diseño escogido por cuestiones de economía y disponibilidad ha sido una torre de madera de 6 metros de altura con tensores, se le han adaptado en la base unos flotadores de 30 cms, los cuales estan anclados mediante un perno con una base de hormigón de 30x20x60.

La torre eleva al generador, las palas y la cola de veleta a una altura donde el viento es más fuerte y tranquilo que a nivel del suelo. La torre de este aerogenerador mide 6 m de alto, tiene un diámetro exterior de 54 mm y un espesor de 4 mm. La altura es la necesaria para estar por encima de todos los obstáculos de los alrededores.

Figura 34. Torre del Aerogenerador



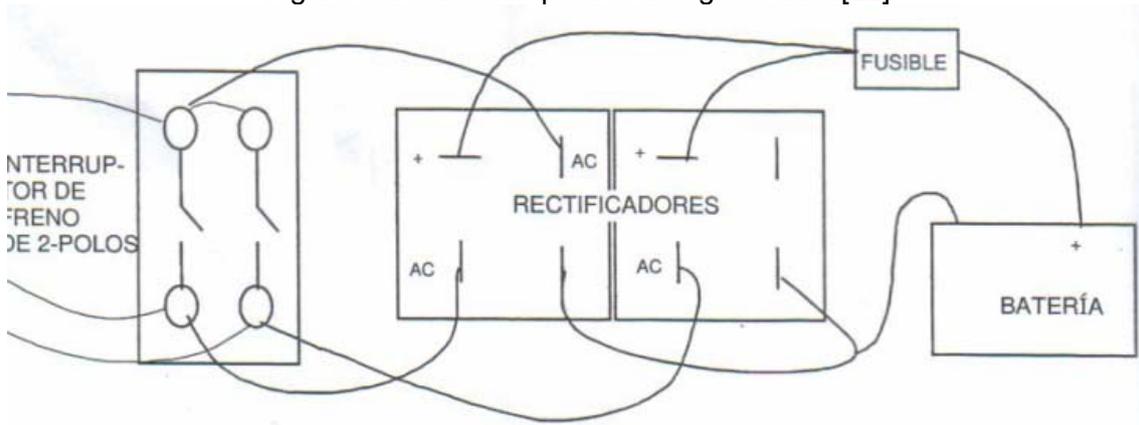
### 5.3.15 Conexión a las baterías

Los cables que bajan de la torre a la batería deben de ser un par resistente y flexible que puedan ser retorcidos a medida que la maquina encara al viento en diferentes direcciones.

Es muy importante también proteger el circuito, en este caso usaremos fusibles e instalaremos un interruptor de freno, esto con el fin de parar el aerogenerador cuando sea necesario.

El cable utilizado que baja del aerogenerador sera del calibre #12 AWG.

Figura 35. Cableado para el aerogenerador.[22]



## 6.- MATERIALES Y PESO DEL AEROGENERADOR

La lista de materiales hace referencia al conjunto de elementos que se utilizan en la construcción de un aerogenerador. Es importante resaltar que se trata de construir un aerogenerador de baja potencia manufacturado.

Además tiene como objetivo una finalidad de fondo social, y poder implantarse en la población indígena con poco nivel adquisitivo. Es por estas razones que se busca utilizar materiales que tengan la más alta relación calidad-precio, con precios asequibles en la medida de lo posible.

A continuación se muestran los resultados obtenidos del estudio de los materiales necesarios en la tabla 8.

Tabla 8 , Lista de Materiales y peso del aerogenerador.

MATERIALES	CANTIDAD Y/O DIMENSIONES	Peso (g)
GENERADOR		
ENCASTAMIENTO		
Resina con catalizador	2000 g	2.000
Polvo de Talco	700 g	700
Tela de fibra de vidrio	15	15
Cera para pulir		
Silicón para PVC		
ACERO		
Plancha de acero	2 frenos de discos diámetro 305 mm, espesor 8mm	3.579
Varilla Roscada Acero Inoxidable M12(1/2")	1 m	150
Tuercas de Acero Inox. M12	40	298
Arandelas de Acero Inox M12	8	34
Barra roscada M8	400 mm	125
Tuercas M8	12	75
Arandelas M8	8 de espesor 0,5 mm	8
ELEMENTOS ELÉCTRICOS		
Hilo de cobre	170 m, diámetro 1.4 mm	1.234
Cable flexible	6 m, diámetro 1,5 mm	56
Bloques Magnéticos	16 bloques 46x30x12mm de Neodimio	1.865
Alambre de Estaño	150mm de 1,5 mm de diámetro	5
Rectificadores monofásicos	2	48
Disipador de Calor	2 disipadores	130
Bloques conectores	1 regleta de 10 cm	3
OTROS		

Buje con eje y accesorios	1 buje de Chevrolet	2579
PESO DEL GENERADOR		12.904
ROTOR EÓLICO		
MADERA		
Tablas	3 piezas 1200x150x37mm de madera de pino	2331,00
Plancha de madera	2 discos, diámetro 250 mm, espesor 8 mm	758
ACERO		
Tornillos M6	9 de M6 x 70 mm	157
Tuercas M6	9	27
Arandelas M6	18	38
PESO DEL ROTOR EÓLICO		3311,00
MONTURA DEL AEROGENERADOR		
ACERO		
Tubo de 300 mm	1 tubo, diámetro exterior 60,3mm, espesor 3 mm	567
Ángulos	2 ángulos, longitud 305 mm, ala 50 mm, espesor 6 mm	2684
Ángulos soporte	2 ángulos, longitud 100 mm, ala 50 mm, espesor 6 mm	880
Anillo	1 de diámetros 60,3 y 15mm, espesor 6 mm	167
Tubo de 200 mm	1 tubo de diámetro exterior 33,4 mm, espesor 3 mm	235
Trapezio	1 de longitud 100 mm, anchura de 20 a 56, espesor 10 mm	296
PESO TOTAL MONTURA		4829
COLA DEL AEROGENERADOR		
ACERO		
Tubo de 150 mm	1 de diámetro exterior 42,2 mm, espesor 3 mm	206
Tubo de 1200 mm	1 de diámetro exterior 42,2 mm, espesor 3 mm	1883
Barra	1 de 300x30x8 mm	562
Tuercas M10	3	28
Tornillos M10	3 de M10 x 60	123
MADERA		
Madera contrachapada	1 de bases 900,600mm, altura 600mm, espesor 10mm	1890
PESO DE LA COLA		4692
Material para soldadura	1123 mm de varilla de Diámetro 3 mm	65
PESO TOTAL AEROGENERADOR		<b>25.801,00 kgs</b>

## 7. ESTUDIO ELÉCTRICO DEL AEROGENERADOR

El principal problema que se busca solucionar con el diseño y construcción de este generador es que su funcionamiento sea adecuado aún en condiciones de bajas velocidades de rotación, debido a que los alternadores convencionales de automóviles están diseñados para cargar baterías a 12V cuando su velocidad de rotación se encuentra a 3600 RPM, además para efectos de disminuir costos se optó por la utilización de materiales que se encuentran comercialmente en nuestro mercado[23].

La ecuación que rige el comportamiento de generación de voltaje interno en un alternador es[24],[25],[26]:

$$E = k * F_i * w \quad (25)$$

donde:

$E$  = El voltaje interno generado  
 $k$  = Constante de construcción de la máquina  
 $F_i$  = Flujo magnético a través del estator  
 $w$  = Velocidad angular de giro

De la ecuación 25 se puede observar que para obtener el mismo o un aumento de voltaje a bajas condiciones de giro del eje se hace necesario aumentar el flujo magnético que atraviesa las bobinas al igual que la constante de construcción de la máquina.

Para conseguir un aumento en el flujo magnético a través de las bobinas del estator se colocan 16 pares de polos de imanes permanentes de tierras raras (Neodimio, Hierro y Boro); los cuales poseen una inducción magnética que es 7 a 10 veces superior a los materiales magnéticos tradicionales[27], para este tipo de imanes la temperatura de trabajo puede llegar hasta 120°C, siendo esta condición una de sus principales desventajas frente a otros materiales magnéticos como el Samario – Cobalto donde su temperatura puede llegar hasta los 350 °C. Si los imanes son sometidos a temperaturas superiores durante su trabajo, estos pueden perder permanentemente hasta el 80% de la capacidad de producir inducción magnética, de tal forma que quedarían completamente inservibles para esta aplicación.

Las características geométricas y magnéticas de los imanes utilizados se encuentran enunciadas en la tabla 9 y 10.

Tabla 9. Características Geométricas de los Imanes

Material	Longitud	Espesor	Ancho
Tierras Raras	46mm	10mm	21mm

Tabla 10. Características Magnéticas de los Imanes[28]

Características Magnéticas	
Producto de (B-H)máxima	280 kJ/m <sup>3</sup>
Remanencia	11400 – 12000 Gauss
Temperatura de Curie	120 °C
Densidad	7.5 Kg/m <sup>3</sup>
Fuerza Campo Coercitivo	930kA/m

Estas características permiten determinar la energía máxima que los imanes pueden suministrar cuando son colocados en el generador por medio de la siguiente ecuación:

$$E_M = \frac{(B - H)_{m\acute{a}x} * V * N}{2} \quad (26)$$

Donde  $N$  es el número de imanes montados en el generador y  $V$  es el volumen de un imán. Reemplazando las características del imán seleccionado se obtiene:

$$E_M = \frac{280 \text{ kJ} / \text{m}^3 * (0.046 * 0.01 * 0.021) \text{ m}^3 * 16}{2}$$

$$E_M = 21.64 \text{ J}$$

La potencia eléctrica máxima que se puede producir resulta de multiplicar la energía máxima de los imanes por la velocidad angular a la cual se encuentran girando.

Tabla 11. Potencia Eléctrica Máxima

RPM	P. Eléctrica Máxima (W)	RPM	P. Eléctrica Máxima (W)
100	216,384	500	1081,92
200	432,768	600	1298,304
300	649,152	700	1514,688
400	865,536	800	1731,072

La tensión generada en el interior del generador será de forma aproximada alterna sinusoidal, debido a que la variación del flujo magnético, que es la causa de que si produzca una fuerza electromotriz inducida, puede aproximarse a sinusoidal.

Para determinar la tensión de salida del generador en función de la velocidad de rotación del aparato (rpm), se analiza aquí el proceso lógico de la generación de la tensión.

En primer lugar se tiene en cuenta la tensión inducida en una bobina, con sus características en el tiempo, posteriormente se tiene en cuenta la relación entre las tensiones temporales de las 6 bobinas.

### 7.1 Cálculo teórico de la tensión eficaz inducida en una bobina

Para calcular la tensión o fuerza electromotriz inducida (e) en una bobina habrá que calcular primeramente cómo varía el flujo en el tiempo, ya que la tensión inducida se calcula con la siguiente expresión:

$$e = \frac{-d\phi}{dt} \quad (27)$$

e = fuerza electromotriz inducida (V)

$\phi$  = flujo magnético (Wb)

Donde el flujo en este caso se obtiene como:

$$\phi = B(t) \cdot S \cdot N \quad (28)$$

B (t) = inducción o campo magnético en función del tiempo (T)

S = superficie de una espira de la bobina atravesada por el campo magnético (m<sup>2</sup>)

N = número de espiras que constituyen una bobina (número de vueltas)

El flujo magnético en este tipo de aerogenerador es un flujo axial (es decir perpendicular al radio de giro del aerogenerador), de manera que los dos

rotor de imanes permanentes generan un campo magnético entre cada uno de sus pares de polos de manera alterna, como se deriva de la disposición de los imanes[20].

Hay que recordar que existe un diámetro imaginario centrado en el generador sobre el cual están posicionados tanto los centros de los imanes como los centros de las bobinas.

Por tanto, si se toma como referencia una bobina cualquiera, el flujo que ve pasar a través de ella, en una vuelta entera del generador, tendrá  $p/2$  valores máximos de flujo (por ejemplo cuando pasa por delante de la bobina un par de polos con el Norte en el rotor frontal y el sur en el rotor trasero) y  $p/2$  valores mínimos de flujo (cuando pasa por delante de la bobina un par de polos con el sur en el rotor frontal y el norte en el rotor trasero).[20]

Donde  $p$  es el número de pares de polos (equivale al número de imanes de cada rotor).

Si se deben tener 4 máximos la expresión sinusoidal tiene cuatro máximos y cuatro mínimos, con lo que se deduce que el número de máximos es la mitad que el número de pares de polos.

Se observa, por tanto que imponiendo estos valores, para una bobina tomada como referencia, la expresión del campo magnético en función del tiempo que cumple estos valores es la siguiente:

$$B(t) = B \cdot \cos\left(\frac{p}{2} \cdot \alpha\right) \quad (28)$$

$$\alpha = \omega t \quad (29)$$

Donde :

$B$  = campo magnético uniforme creado entre dos bloques magnéticos enfrentados (T)

$\alpha$  = ángulo girado por el generador (rad)

$\omega$  = velocidad angular de giro del generador (rad/s)

$t$  = tiempo transcurrido para girar un ángulo  $\alpha$  (s)

Por tanto: de las ecuaciones (Ec.28) y (Ec.29) se obtiene que el flujo que atraviesa a una bobina será igual a  $B \cdot S \cdot N \cdot \cos(p/2 \cdot (\alpha))$ , que sustituyendo la ecuación (Ec.28) queda así:

$$\phi = B \cdot S \cdot N \cdot \cos\left(\frac{p}{2} \cdot (\omega t)\right) \quad (30)$$

Ahora que ya se conoce el flujo que atraviesa una bobina, se puede calcular el valor de la fuerza electromotriz inducida en una bobina, utilizando de la Ec. 27.

Así se obtiene que la expresión temporal de la tensión inducida en una bobina se calcula:

$$e = B \cdot S \cdot N \cdot \frac{p \cdot \omega}{2} \left( -\text{sen} \left( \frac{p}{2} \cdot (\omega t) \right) \right) \quad (31)$$

Al tratarse de una tensión senoidal, la constante que multiplica al seno, es el valor máximo de la tensión, con lo cual el valor eficaz de la tensión inducida en una bobina será el máximo dividido por raíz de dos:

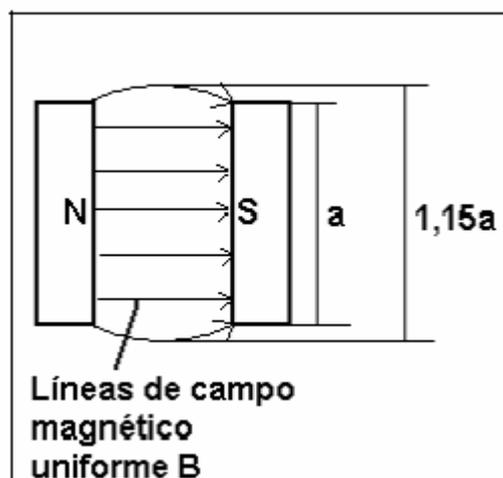
$$E_{ef} = B \cdot S \cdot N \cdot \frac{p \cdot \omega}{2\sqrt{2}} \quad (32)$$

Bien es cierto que esta es la expresión que se buscaba, pero mientras N, p y  $\omega$  son números que teóricamente son datos directos, hay que calcular el campo magnético uniforme que se crea en el espacio entre un par de polos enfrentados con polaridad opuesta, y también hay que calcular la superficie S de una espira de una bobina que es atravesada por el campo magnético uniforme B.

### Cálculo de la superficie S

La superficie a tener en cuenta es inferior a la superficie media de la bobina ya que el flujo de campo magnético abarca una superficie inferior a las dimensiones de las bobinas. De manera que se puede suponer que las líneas de inducción magnética abarcan una superficie cuadrada casi idéntica a la superficie de los bloques magnéticos, pero algo superior ya que la disposición de las líneas de campo magnético son un poco abombadas debido a la distancia existente entre los imanes (ver Fig. 5.3). [20]

Figura 36. Líneas de campo magnético y su ocupación entre los imanes.



Observando la Figura 36 se observa que un cálculo aproximado de la superficie (cuando la superficie de los imanes sea inferior a la superficie media abarcada por una espira) será:

$$S = (1,15 \cdot a)^2 \quad (33)$$

a = dimensión del bloque magnético (m)  
S = (m<sup>2</sup>)

### Cálculo del campo magnético uniforme B

Para calcular el campo magnético uniforme B, que se crea al colocar dos imanes idénticos, enfrentados con polaridad opuesta, hay que conocer varios parámetros característicos de los imanes, de su colocación, y del material que se interpone entre ellos hay que hacer algunas hipótesis.[20]

Los parámetros de los que depende el campo magnético B creado entre los imanes, son principalmente la distancia entre imanes (13 mm en nuestro caso), la dimensión de un polo del imán (46x21mm), la inducción remanente Br (T) característica del tipo de imán (para los imanes de Neodimio demandados en este proyecto es de 1,11 T) y finalmente es determinante el tipo de material que se encuentra entre los imanes y las propiedades magnéticas de éste.

De este modo, en el estudio de ITDG y la UNI [28] se determinó que el campo magnético uniforme B para imanes de Ferrita es de 0,2 T y para imanes de Neodimio de 0,585 T. Con lo que se demuestra que hay una relación proporcional entre B y Br, que se mantiene constante como se ha deducido en la siguiente tabla:

Tabla 12. Relación entre la inducción remanente y la inducción exterior.

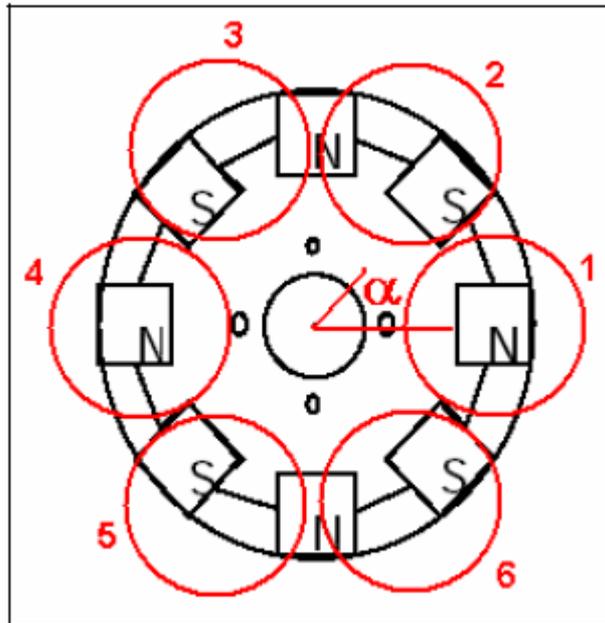
Tipo de Imán	Inducción remanente Br (T)	Inducción creada en el estator B(T)	Relación Br/B
Ferrita	0,38	0,2	1,900
Neodimio (NdFeB)	1,11	0,585	1,897

Por tanto, teniendo en cuenta la similitud entre el aerogenerador estudiado por ITDG [28] y el que es objeto de este proyecto, el campo magnético uniforme B (T), creado en el plano intermedio de los dos rotores (plano del estator), para el generador de imanes permanentes descrito en este documento puede tomarse como  $B = Br/1,9$ .

### 7.2. Cálculo teórico de la tensión de salida del generador

Para calcular la tensión alterna de salida que aportan todas las bobinas que forman el estator del generador, es necesario conocer el número de bobinas, y su colocación en el estator. En nuestro caso se tienen 6 bobinas, dispuestas de forma equidistante (el ángulo entre los centros de las bobinas adyacentes es de 60°).

Figura 37 Posicionamiento de las bobinas respecto a los imanes



Observando esta disposición se puede apreciar que las bobinas están en fase dos a dos, es decir, que las bobinas 1 y 4 se ven afectadas por las mismas variaciones de campo magnético, y de igual modo les sucede a las bobinas 2 y 5 y a las bobinas 3 y 6.

De la misma forma que se ha deducido la expresión (Ec 28) para una bobina que consideraremos que es la bobina 1, se pueden deducir las expresiones del campo magnético en función del tiempo para todas las bobinas:

De modo que el campo magnético que ven pasar las bobinas 1 y 4 es el mismo:

$$B(t)_{1,4} = B \cdot \cos\left(\frac{p}{2} \cdot (\omega t)\right) \quad (34)$$

Para ver cual es el campo que afecta a las bobinas 2 y 5 se repite el procedimiento realizado para encontrar la ecuación (Ec.34). Se evalúan los ángulos donde el campo magnético se sabe que será máximo en valor absoluto, para un rotor de 8 pares de polos:

Tabla 13. Valor de B(t) según el ángulo girado por el rotor respecto a las bobinas 2 y 5.

$S\alpha = 30^\circ (\pi / 6) \rightarrow B(t) = B$
$S\alpha = 75^\circ \rightarrow B(t) = -B$
$S\alpha = 120^\circ \rightarrow B(t) = B$
$S\alpha = 165^\circ \rightarrow B(t) = -B$
$S\alpha = 210^\circ \rightarrow B(t) = B$
$S\alpha = 255^\circ \rightarrow B(t) = -B$
$S\alpha = 300^\circ \rightarrow B(t) = B$
$S\alpha = 345^\circ \rightarrow B(t) = -B$

Por tanto se deduce que el campo magnético que ven pasar las bobinas 2 y 5 es:

$$B(t)_{2,5} = B \cdot \cos\left(4 \cdot \omega \cdot t - \frac{2 \cdot \pi}{3}\right) \quad (35)$$

Se repite el procedimiento para evaluar es el campo que afecta a las bobinas 3 y 6, y por tanto se evalúan los ángulos donde el campo magnético se sabe que será máximo en valor absoluto, para un rotor de 8 pares de polos:

Tabla 14. Valor de B(t) según el ángulo girado por el rotor respecto a las bobinas 3 y 6.

$\text{Si } \alpha = 15^\circ \rightarrow B(t) = B$
$\text{Si } \alpha = 60^\circ \rightarrow B(t) = -B$
$\text{Si } \alpha = 105^\circ \rightarrow B(t) = B$
$\text{Si } \alpha = 150^\circ \rightarrow B(t) = -B$
$\text{Si } \alpha = 195^\circ \rightarrow B(t) = B$
$\text{Si } \alpha = 240^\circ \rightarrow B(t) = -B$
$\text{Si } \alpha = 285^\circ \rightarrow B(t) = B$
$\text{Si } \alpha = 330^\circ \rightarrow B(t) = -B$

Por tanto se deduce que el campo magnético que ven pasar las bobinas 3 y 6 es:

$$B(t)_{3,6} = B \cdot \cos\left(4 \cdot \omega \cdot t + \frac{2 \cdot \pi}{3}\right) \quad (36)$$

Obtenidas estas expresiones:

$$e_{1,4} = B \cdot S \cdot N \cdot 4 \cdot \omega \cdot \text{sen}(4 \cdot \omega \cdot t)$$

$$e_{2,5} = B \cdot S \cdot N \cdot 4 \cdot \omega \cdot \text{sen}\left(4 \cdot \omega \cdot t - \frac{2 \cdot \pi}{3}\right)$$

$$e_{3,6} = B \cdot S \cdot N \cdot 4 \cdot \omega \cdot \text{sen}\left(4 \cdot \omega \cdot t + \frac{2 \cdot \pi}{3}\right)$$

Se observa que la tensión eficaz en todas las bobinas será:

$$U = \frac{B \cdot S \cdot N \cdot 4 \cdot \omega}{\sqrt{2}} \quad (37)$$

Además,  $\omega$  se puede expresar como:

$$\omega = \frac{2 \cdot \pi \cdot n}{60} \quad (38)$$

$\omega$ : velocidad angular del aerogenerador (rad/s)

n: velocidad angular del aerogenerador (rpm)

Por tanto ,la ecuación de la tensión en una bobina:

$$U = \frac{B \cdot S \cdot N \cdot 2 \cdot \pi \cdot n}{15 \cdot \sqrt{2}} \quad (39)$$

Substituyendo los valores del caso concreto del aerogenerador que se estudia:

$B = B_r / 1.19$  , con imanes de Neodimio  $B_r = 1,11 \text{ T}$ ;  $B = 0,585 \text{ T}$   
 $S = (1,15 \cdot a)^2$  , con  $a = 0,021 \text{ m}$   $S = 5,83 \text{ E-4 m}^2$   
 $N = 85$  espiras

**Se obtiene el valor teórico de la tensión en cada bobina, en función de las rpm:**

$$U = 0,007114 \cdot n \text{ (Ec.5.25)} \quad (40)$$

Tabla 15, Tensión por bobina en función de las rpm.

RPM	Tension V	RPM	Tension V
100	0,7114	500	3,557
200	1,4228	600	4,2684
300	2,1342	700	4,9798
400	2,8456	800	5,6912

Al estar desfasadas las parejas de bobinas  $120^\circ$  entre ellas, si se conectan o bien en serie o bien en paralelo las bobinas 1 con la 4, la 2 con la 5 y la 3 con la 6, se obtiene un sistema de generación eléctrica trifásico.

Al conectar en serie las bobinas se puede considerar que la bobina 1 con la 4 forman una sola bobina equivalente con el doble de resistencia, inductancia y tensión. Lo mismo sucede con las otras parejas de bobinas al conectarse en serie la 2 con la 5 o la 3 con la 6.

Finalmente, para conocer cuál será la tensión alterna de línea de salida habrá que estudiar nuestro caso particular:

### Conexión en estrella

La conexión en estrella de las bobinas sigue el esquema de la Fig.24, de manera que la tensión de línea será la tensión en una rama multiplicada por raíz de 3 con lo cual se deduce que [20]:

$$U_{1,Y} = \sqrt{\frac{3}{2}} B \cdot S \cdot N \cdot 8 \cdot \omega \quad (41)$$

### 7.3 - CARACTERIZACION DEL AEROGENERADOR

Una de las características de este proyecto es su adaptabilidad al entorno, usando el material y medio existentes en las zonas indígenas, las pruebas

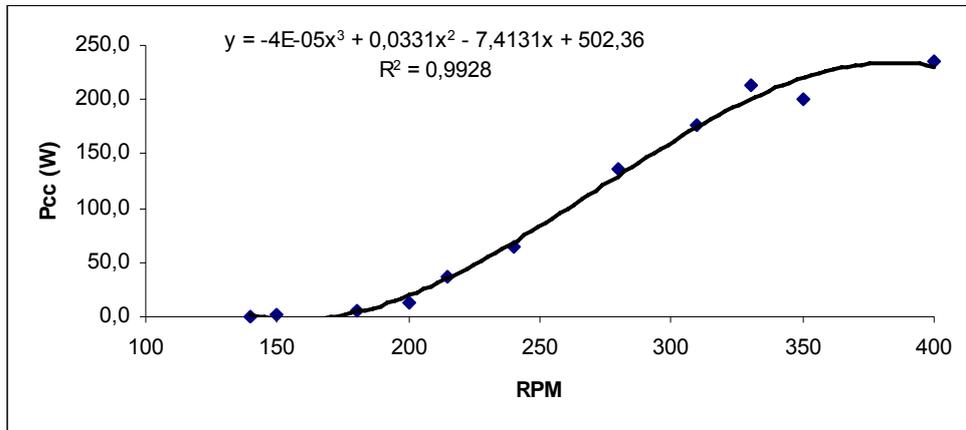
realizadas consiste en el montaje del generador en la llanta trasera de un vehículo automotor, para determinar potencia eléctrica en función de las rpm.

Figura 38. Pruebas realizadas al Aerogenerador



Se obtuvieron las siguientes medidas:

Grafico 8. Potencia de Salida en función de la rpm.



En función de las rpm y la potencia obtenida, con ayuda de la Ecuación 42, se pueden calcular los valores de velocidad de rotación en función del viento. Así pues con la expresión 42 y las relaciones anteriores, se calculará el valor de la lambda (T.S.R.) en función de la velocidad del viento en condiciones reales.

$$T.S.R. = \frac{\omega r}{v} \quad (42)$$

Donde:

- $\omega$ : velocidad de rotación del aerogenerador [rad/s].
- $r$ : radio del rotor [ 1,24 m].
- $v$ : velocidad del viento [m/s].

Sustituyendo

$$T.S.R = \frac{240 * \pi * 1,2}{30 * 6,5} = 4,6$$

Con el valor obtenido de la TSR en condiciones reales, despejando la Velocidad en la ec 42 podemos estimarla en función de las rpm y el radio de las palas del aerogenerador, con lo que obtenemos el siguiente grafico..

Grafico 9. Estimación de la velocidad de giro en función de la TSR

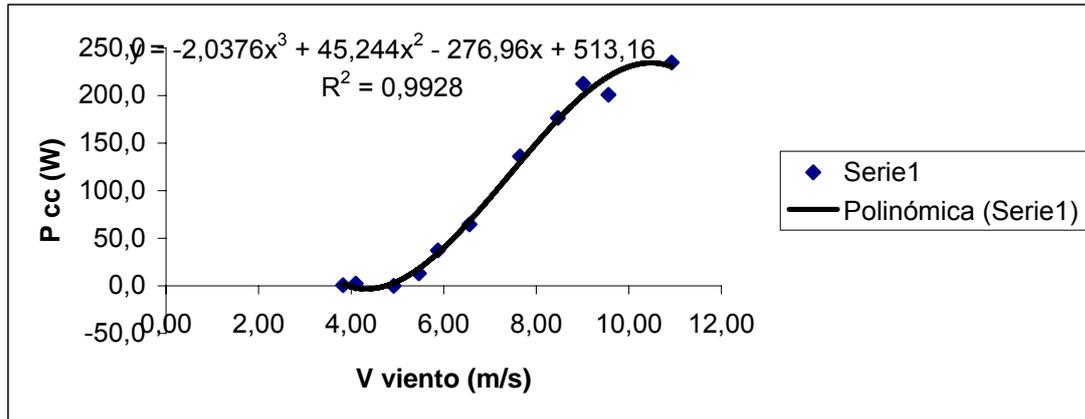


Tabla 16 Relación entre Potencias, rpm y velocidad del viento

Pcc (w)	rpm	V viento (m/s)
0,7	140	3,82
2,3	150	4,10
4,7	180	4,92
13,2	200	5,46
37,2	215	5,87
64,6	240	6,56
136,1	280	7,65
176,6	310	8,47
212,5	330	9,02
200,8	350	9,56
234,7	400	10,93

## 8. ESTUDIO DE VIABILIDAD ENERGÉTICA

### 8.1. Energía incorporada a los materiales

Aunque no existe un método estándar para el cálculo de la energía incorporada en los materiales de construcción, sí existe una definición generalmente aceptada: “la energía incorporada de un material incluye toda la que se necesitó en los distintos procesos necesarios para llevar el material a su lugar en los establecimientos pertinentes: desde la extracción de las materias primas, hasta su manufactura; incluye la energía asociada al transporte (y a la parte proporcional de la infraestructura necesaria para que éste sea posible), así como la parte proporcional de los equipos y maquinaria necesarios para todos esos procesos”. [20]

Todos estos conceptos se han tenido en cuenta para obtener los factores de energía que permitan calcular la energía incorporada a un material, en función de su masa, según una serie de autores que se indican unas líneas más adelante.

Hay que decir que se han considerado los materiales tanto de la construcción del aerogenerador como de los moldes y plantillas necesarios. No obstante se han considerado los materiales más significativos en cuanto a importancia energética y de masa, es decir que se ha confeccionado una lista prácticamente igual a la lista de materiales, pero no es exactamente la lista completa.

El cálculo de la energía incorporada a un material, por lo tanto, será tan sencillo como multiplicar el factor de energía incorporada a ese tipo de material (kWh/kg) por la masa de material utilizado en la construcción del aerogenerador. De manera que la expresión utilizada para el cálculo de la tercera columna de la tabla 8 es:

$$E = \frac{F_{EI} \cdot M}{1000} \quad (42)$$

Donde:

E: energía consumida para fabricar una cantidad de material determinado (kWh)

F<sub>EI</sub>: factor de energía incorporada a un tipo de material (kWh/kg)

M: masa consumida de un tipo determinado de material (g)

1000: conversión de g a Kg.

Se han tenido en cuenta principalmente los siguientes tipos de materiales: Acero, acero inoxidable, resina, aluminio, cobre, plástico y madera. De tal modo que se obtienen los resultados presentados en la siguiente página:

Tabla 17 Energía Consumida por los materiales del aerogenerador

MATERIALES	PESO (g)	Factor de Energía	Energía kWh
<b>GENERADOR</b>			
ENCASTAMIENTO			
Resina con catalizador	2.000	24	48,00
<b>ACERO</b>			
Plancha de acero	3.579	11	39,37
Varilla Roscada Acero Inoxidable M12(1/2")	150	11	1,65
Tuercas de Acero Inox. M12	298	11	3,28
Arandelas de Acero Inox M12	34	11	0,37
Barra roscada M8	125	11	1,38
Tuercas M8	75	11	0,83
Arandelas M8	8	11	0,09
<b>ELEMENTOS ELÉCTRICOS</b>			
Hilo de cobre	1.234	25	30,85
Cable flexible	56	25	1,40
Bloques Magnéticos	1.865	50	93,25
Alambre de Estaño	5	25	0,13

Rectificadores monofásicos	48	30	1,44
Disipador de Calor	130	52	6,76
Bloques conectores	3	25	0,08
OTROS			
Buje con eje y accesorios	2579	4,7	12,12
<b>ROTOR EÓLICO</b>			
MADERA			
Tablas	2331,00	1,25	2,91
Plancha de madera	758	1,25	0,95
ACERO			
Tornillos M6	157	11	1,73
Tuercas M6	27	11	0,30
Arandelas M6	38	11	0,42
<b>MONTURA DEL AEROGENERADOR</b>			
ACERO			
Tubo de 300 mm	567	11	6,24
Ángulos	2684	11	29,52
Ángulos soporte	880	11	9,68
Anillo	167	11	1,84
Tubo de 200 mm	235	11	2,59
Trapecio	296	11	3,26
<b>COLA DEL AEROGENERADOR</b>			
ACERO			
Tubo de 150 mm	206	11	2,27
Tubo de 1200 mm	1883	11	20,71
Barra	562	11	6,18
Tuercas M10	28	11	0,31
Tornillos M10	123	11	1,35
MADERA			
Madera contrachapada	1890	1,25	2,36
<b>Coste energético total de los materiales del aerogenerador (kWh)</b>			<b>333,59</b>
<b>MATERIALES DE MOLDES Y PLANTILLAS</b>			
MADERA			
Tabla de compuesto de madera	16833	1,25	21,04
Tabla de compuesto de madera	293	1,25	0,37
Tabla de compuesto de madera	280	1,25	0,35
Madera contrachapada	413	1,25	0,52
ACERO			
Placa (60x30x6mm)	84	11	0,92
Placa (125x125x1mm)	122	11	1,34
Tornillos M6 x 60	28	11	0,31
Tornillos M10 x 70	189	11	2,08
Tornillos M12 x 150	139	11	1,53
Tuercas M6	4	11	0,04
Tuercas M8	25	11	0,28
Tuercas M10	38	11	0,42
Tuercas M12	14	11	0,15
Arandelas M6	20	11	0,22
Arandelas M10	1	11	0,01
Arandelas M12	196	11	2,16
Barra tubular hueca	196	11	2,16
<b>Coste energético total de los materiales de moldes y plantillas (kWh)</b>			<b>33,89</b>
<b>ENERGÍA TOTAL (kWh)</b>			<b>367,48</b>

## 8.2. Consumo total de energía

Una vez calculados los consumos energéticos debidos a la incorporación del material y con los resultados obtenidos en el cuadro Anterior referentes al consumo energético de los procesos constructivos del aerogenerador, se obtiene la Tabla 18 como resumen con el consumo total de energía que supone la construcción de un aerogenerador por primera vez.

El consumo de energía de construcción del aerogenerador lleva incorporados el término de consumo energético debido a la obtención de los materiales del aerogenerador, de sus moldes y plantillas, y un segundo término relacionado con el consumo energético de los procesos realizados en taller para la manufactura del aerogenerador así como para la manufactura de los moldes[20].

Tabla 18. Consumo de energía Total [20].

<b>CONSUMOS ENERGÉTICOS [kWh]</b>		
Consumo energético del proceso de torneado de madera	0,3	kWh
Consumo energético del proceso de corte de acero	0,025	kWh
Consumo energético del proceso de corte de madera	0,025	Kwh.
Consumo energético del proceso de taladrado de madera	0,104	kWh
Consumo energético del proceso de taladrado de acero	3,383	kWh
Consumo energético del proceso de soldadura de estaño	0,001	kWh
Consumo energético del proceso de soldadura oxiacetilénica	2,169	kWh
<b>Energía total consumida en procesos de construcción en taller</b>	<b>5,709</b>	<b>kWh</b>
<b>Energía incorporada a los materiales del aerogenerador</b>	<b>333,59</b>	<b>kWh</b>
<b>Energía incorporada a los materiales de moldes y plantillas</b>	<b>33,89</b>	<b>kWh</b>
<b>ENERGÍA TOTAL CONSUMIDA aerogenerador</b>	<b>373,19</b>	<b>kWh</b>

Para poder realizar el estudio de viabilidad energética, es necesario realizar una previsión de la energía media generada en un día.

A este valor de energía media generada diaria, se le va a denominar  $E_g$  y tiene unas unidades de kWh/día. Para poder calcular el valor de esta magnitud para el aerogenerador descrito en este proyecto, se tomará el valor de la energía anual generada  $E_{g,año}$  (kWh) y se dividirá por los días del año, es decir 365 h.

## 10.3. Estimación de la potencia eléctrica media anual

Conociendo la potencia de cada intervalo de velocidad del viento, y el número de horas que se tiene dicha potencia, se puede calcular la energía generada en todo el año para una velocidad del viento concreta, con la siguiente expresión:

$$E_i = \frac{P_i \cdot t_i}{1000} \quad (43)$$

Donde:

Pi= Potencia suministrada por el aerogenerador a la salida (W)

ti= Numero de horas de incidencia del viento

Sustituyendo valores obtenemos la siguiente tabla:

Tabla 19 Estimación de la potencia eléctrica anual. Elaboración Propia

v (m/s)	ti (horas)	Pi (W)	Ei (kWh)
0	514	0	0
1	673	0	0
2	922	0	0
3	628,1	0	0
3,5	513,9	0,69	0,35
4	601	2,3	1,38
4,5	573	4,7	2,69
5	592	14,42	8,54
5,5	540	18,84	10,17
6	495	38,54	19,08
6,5	448	64,64	28,96
7	365	97,77	35,69
7,5	421	123,07	51,81
8	264	157,32	41,53
8,5	241	176,57	42,55
9	195	212,45	41,43
9,5	169	239,7	40,51
10	147	259,67	38,17
10,5	98	269,26	26,39
11	107	234,65	25,11
11,5	48	264,18	12,68
12	68	0,00	0,00
13	48	0,0	0,00
14	27	0,0	0,00
15	18	0	0
16	12	0	0
16-19	30	0	0
<b>TOTAL</b>	<b>8758</b>	<b>2178,77</b>	<b>427,04</b>

La suma del total de las energías Ei anuales para cada intervalo de velocidad da como resultado la energía anual generada.

Observando la tabla 19, la energía anual generada es de:

$$E_{g,\text{año}} = 427,04 \text{ kWh}$$

Por tanto, la energía media diaria generada es de:

$$E_g = 427,04 \text{ kWh} / 365 = 1,16 \text{ kWh} / \text{ día}$$

### 8.3 Cálculo del tiempo de retorno energético

El tiempo de retorno energético, o tiempo en el que se genera la cantidad de energía que se ha consumido en la construcción del aerogenerador se calcula como el cociente entre la energía total consumida por la construcción del mismo y la energía generada diaria. De manera que para el primer aerogenerador se puede calcular como:

$$T = \frac{E_{TC1}}{E_g} \quad (44)$$

T: tiempo de retorno energético(días)

$E_{TC1}$ : Energía total consumida en la construcción del aerogenerador ( 373,19 kWh) Tabla 18.

$E_g$ : Energía media diaria generada (1,161 kWh/día)

En este caso será de: **T = 321 días**

Este tiempo puede considerarse pequeño para la vida útil que se espera del aerogenerador, que se estima que es de unos veinte años [20].

Por otra parte, el viento que se produce en la región de estudio, se puede clasificar como moderado (Tabla 5), ya que la mayor parte del tiempo, la velocidad del viento suele estar entre 3,5 y 6 m/s. Si el aerogenerador se instalara en zonas con regimenes de viento más elevados, se podría reducir el tiempo de retorno energético en varios meses. Se puede afirmar que el aerogenerador de imanes permanentes de Neodimio descrito en el presente proyecto, desde el punto de vista energético es totalmente sostenible.

### 8.4. Mantenimiento

Dentro de las tareas de mantenimiento se debe distinguir entre mantenimiento preventivo o planificado y el correctivo o no planeado como respuestas a problemas descubiertos por el usuario.

En este capítulo se habla de mantenimiento preventivo. Dentro de las tareas de mantenimiento se deben realizar inspecciones anuales de:

- Inspección y ajuste de tuercas
- Inspección de las palas
- Inspección de los ejes
- Inspección del alternador
- Engrasar los rodamientos del soporte de la góndola
- Inspección de las conexiones eléctricas

## **9. ESTUDIO MEDIO AMBIENTAL Y SOCIAL**

### **9.1. El impacto ambiental de la energía eólica**

El primer aspecto a destacar es el hecho de que la producción de electricidad a partir del viento es un proceso “limpio” tal y como es aplicado el término actualmente, es decir, que elimina la contaminación en el origen y no al final del proceso a través de costosas medidas correctoras. A diferencia de otras fuentes convencionales, la producción de energía eólica no provoca la emisión de grandes cantidades de contaminantes atmosféricos, ni un gran volumen de residuos sólidos.

A la hora de cuantificar la contaminación evitada por la sustitución de fuentes de energías no renovables por energía de origen eólico aparecen varias dificultades: por una parte, resulta difícil valorar las emisiones asociadas a todo el proceso de producción de la energía ya que debe incluir tanto los procesos de extracción del combustible, la construcción de las instalaciones de producción, la operación y mantenimiento, y el tratamiento de los residuos finales. Por otra parte, una vez obtenidos estos datos su extrapolación a otros espacios geográficos puede ser también compleja ya que los procesos pueden variar de forma importante. No obstante se han realizado importantes estudios que pueden dar una idea de la contaminación evitada por la instalación de un parque eólico. Según los datos conocidos, realizaremos una interpolación para nuestro caso de manera que conozcamos de manera aproximada el valor de la cantidad de emisiones reducidas.

#### **9.1.1. Ahorro de emisiones**

Lógicamente al tratarse de un aerogenerador de baja potencia las cantidades no emitidas son pequeñas, lo importante es que no sólo no se emiten contaminantes a la atmósfera si no que además por poco que sea, se consigue generar energía que de otro modo contaminaría.

#### **9.1.2. Otros beneficios**

Una forma de valorar los beneficios obtenidos por la utilización de energía eólica consiste en incluir los costes externos o sociales a la hora de cuantificar los costes de producción de la energía. Estos costes, no incluidos a la hora de reflejar el precio de la energía y que provocan por ello importantes desviaciones a la hora de valorar la rentabilidad de las distintas fuentes, incluirían básicamente los aspectos ambientales. La cuantificación de aspectos como las emisiones atmosféricas emitidas o el riesgo asociado a las centrales nucleares es realmente compleja. A menudo se han utilizado métodos que relacionan las emisiones con un cierto número de enfermos o muertos; este número es posteriormente transformado en un valor económico al cual debe añadirse el valor asociado al impacto producido sobre la flora, la fauna, etc.

A pesar de la complejidad que supone la aplicación de este método, este es comúnmente aceptado en la elaboración de eco balances. Debido a esta complejidad los resultados de diferentes análisis ofrecen un rango de

valoración bastante amplio ya que este oscila entre los 0,01€ y los 0,1€/kWh generado. Esto significaría para la producción total del aerogenerador la energía anual generada un ahorro ambiental que se cuantificaría en un valor que oscilaría entre los 4 y los 40 euros anuales.

### **9.1.3 Interacciones con el medio físico**

#### Ocupación del Terreno

Un argumento citado frecuentemente en contra del desarrollo de la energía eólica es la gran necesidad de terreno debido a la dispersión de la fuente, en contraposición, por ejemplo, con la gran concentración de la fuente en el caso de la energía nuclear. La gran diferencia yace en el hecho de que, mientras que en la energía eólica la mayor parte del terreno usado permanece intacto, en las fuentes no renovables el terreno tiene un uso exclusivo para ese aprovechamiento y su recuperación posterior para otros usos es también difícil.

En el caso de la colocación del aerogenerador de baja potencia que nos atañe, la ocupación del terreno es ínfima y su recuperación tras la fase de desmantelamiento es total.

### **9.1.4. Interacciones con el medio biótico**

#### Riesgo de la Avifauna

Los riesgos para las aves causados por los aerogeneradores son los derivados de la posibilidad de colisión con las palas o con la torre. El movimiento de las palas hace que los aerogeneradores sean más visibles para las aves que otras estructuras similares: torres eléctricas, antenas, etc.

Es evidente que debe tenerse en cuenta las rutas de migración y especiales zonas de alto número de especies sensibles o en peligro de extinción.

No obstante hay que decir, que a la par de la experiencia operativa de una gran cantidad de centrales Eolo eléctricas en el mundo, se han emprendido estudios sobre la mortalidad de aves al chocar contra los rotores y las estructuras de los aerogeneradores. También se ha estudiado el efecto de los aerogeneradores sobre el hábitat y costumbres de las aves. Estudios llevados a cabo en varios países sugieren que los aerogeneradores no tienen impacto significativo en la vida de las aves, al compararse con otras actividades humanas.

Las líneas de transmisión de energía eléctrica presentan una amenaza mucho mayor que los aerogeneradores. Por tanto en lo que respecta a la instalación del aerogenerador del presente proyecto, debido a la pequeña superficie ocupada por las palas y a que la línea eléctrica va conducida por el interior de la torre hasta el suelo, se puede considerar que el riesgo de la avifauna es mínimo.

### **9.1.5 Vegetación**

Se considera como impacto sobre la vegetación el equivalente impacto por erosión del suelo, puesto que en la erosión queda implícita la pérdida de la vegetación. La importancia y significación de la vegetación en la identificación de los impactos ambientales radica en ser, por lo general, un elemento fundamental en la expresión de los ecosistemas. Desempeña un papel básico como asimilador de la energía solar, constituyéndose así en el productor primario, que mantiene y soporta los demás niveles tróficos. También son importantes sus relaciones con el resto de los componentes bióticos y abióticos del medio y contribuye a precisar las condiciones micro climáticas que caracterizan el hábitat de los ecosistemas.

En la estimación de los impactos sobre la vegetación es preciso considerar dos cuestiones: el valor de la vegetación presente en la zona en la que se va a colocar el aerogenerador, y la incidencia en ella de las operaciones de construcción y posterior funcionamiento.

Los impactos sobre la vegetación pueden ser directos (desaparición de la vegetación), o indirectos (interrupción de cursos fluviales, utilización de herbicidas, incendios, pastoreo). Los primeros tienen lugar preferentemente en el momento de la construcción del parque, son fáciles de prever:

- Movimientos de tierras en la preparación de los accesos al aerogenerador (en caso de ser necesarios).
- Realización del anclaje al suelo (no se necesita cimentación).

### **9.1.6. Interacciones con el medio humano**

El impacto visual

Respecto al impacto visual, no hace falta reseñar la dificultad de evaluación del mismo, ya que si bien es verdad que cualquier estructura recortada vertical con partes móviles destaca en el paisaje y atrae la atención del observador, no es menos verdad que esta reacción es subjetiva y difícil de cuantificar, ya sea positiva o negativamente.

El impacto visual depende de la percepción de las personas. Para algunas los aerogeneradores son feos y deterioran el paisaje, mientras que para otras son agradables y representan una tecnología amigable al medio ambiente. Al igual que el problema de ruido, el impacto visual depende de la cercanía entre las poblaciones y la instalación del aerogenerador.

Asimismo, adquiere mayor o menor dimensión dependiendo de varios factores psicológicos y sociales. Por ejemplo, si la generación Eolo eléctrica ayuda a crear nuevas fuentes de empleo y contribuye al desarrollo regional, difícilmente los aerogeneradores pueden verse rechazados por motivos estéticos.

En encuestas realizadas en muchísimos países desarrollados, la gran mayoría de la población responde positivamente ante la implantación de sistemas óleo eléctricos cercanos a su entorno.

De todas formas, con objeto de evitar, en la medida de lo posible, el efecto visual negativo se empleará un color adecuado, una posición apropiada de las instalaciones en la orografía del lugar y cuidar la distribución del aerogenerador atendiendo a la perspectiva desde las carreteras más cercanas. Los elementos característicos de una instalación eólica que producen este tipo de impacto es el propio aerogenerador, los accesos, las líneas eléctricas y los centros de transformación.

Los accesos minimizan su impacto evitando al máximo posible el movimiento de tierras necesario, recuperando inmediatamente el cubriente vegetal afectado y autorizándose el paso al personal de explotación de la instalación o trabajadores de la finca, ya que se trata de una propiedad privada.

En general, para este tipo de impacto puede indicarse que:

- La orografía de los terrenos juega un papel importante.
- La orientación respecto al observador supone criterios de tipo subjetivo.

Los ángulos de visualización y el impacto pueden establecerse en tres niveles:

1. Primer nivel: dentro de la instalación o colindante con esta, con un gran impacto.
2. Segundo nivel o intermedio: en el que la topografía suele minimizar el impacto hasta hacerlo incluso nulo.
3. Tercer nivel: a partir de un kilómetro de la instalación, en la que el impacto depende muy directamente de la dirección de visualización del observador.

Dadas las pequeñas dimensiones de territorio ocupado para la colocación del aerogenerador, el impacto visual será de tercer nivel.

### **9.1.6 El ruido**

El ruido de origen mecánico depende de una serie de factores que en el caso de el aerogenerador de baja potencia de imanes permanentes sólo depende del diseño del generador.

En cuanto al ruido de origen aerodinámico hay que considerar los siguientes parámetros:

- La velocidad de giro de las palas. Este factor es el más importante; un incremento del 20% de la velocidad multiplicada por tres el ruido producido.
- El material de que están construidas las palas.

- El diseño de las palas, principalmente el espacio que existe entre el cuerpo de la pala y su extremo. Cuanto más pequeño sea este espacio, menor será el ruido generado.
- La velocidad del viento y sus turbulencias. Este factor puede incrementar tanto el ruido producido por los aerogeneradores, como el ruido ambiental.
- El número de palas. Los límites de ruido varían, tomando como límite de ruido industrial aceptable entre 40 y 60 dB. Para dar una idea del ruido equivalente a cada nivel de sonoridad, se adjunta a continuación la siguiente tabla:

Tabla 20 Nivel de sonoridad en función de actividades significativas.

Nivel de sonido	Umbral de audibilidad	Caída de hojas	Susurro	Conversación	Tráfico urbano	Concierto de rock	Avión a reacción
dB	0	10	30	60	90	120	150

El ruido que provoca un aerogenerador de baja potencia, entendiendo por baja potencia una potencia inferior a 1kW, es prácticamente inapreciable, ya que a bajas velocidades del viento, al girar las palas tan pequeñas a poca velocidad no producen ruido, y a velocidades entre 4 y 7 m/s y superiores, el ruido que provoca el viento en la atmósfera (debido a que choca con el suelo, árboles o cualquier obstáculo) enmascara al ruido producido por el aerogenerador.

## 9.2. Impacto socioeconómico regional

La instalación de este tipo de aerogeneradores en zonas pobres del planeta donde el recurso de la energía eléctrica es inviable a través de la red, tiene una notable importancia desde el punto de vista social y de las repercusiones positivas que comporta, debido tanto a la creación de puestos de trabajo directos como a los indirectos que se derivan del volumen de suministros contratados, además de la comentada contaminación evitada y del hecho fundamental de prestar un servicio que de otro modo sería imposible ofrecer.

En el ámbito tecnológico, la construcción de un aerogenerador y una instalación eólica, abarca un importante número de sectores industriales. Se requiere la participación de la industria del metal, industria de componentes eléctricos electrónicos; construcción con fibra de vidrio y componentes mecánicos.

### 9.2.1 Coste económico de la construcción del aerogenerador

Este presupuesto se descompone en el coste de los materiales para el aerogenerador, el coste de los materiales para construir los moldes y plantillas, el coste de la energía consumida en los procesos, así como el coste de las horas dedicadas para la construcción y montaje.

Así pues, en primer lugar se muestra el presupuesto de la adquisición de los materiales:

Tabla 21 Coste materiales del aerogenerador.

MATERIALES	CANTIDAD DEMANDADA	PRECIO \$ PESOS MEX	COSTE (\$ MEX)
<b>GENERADOR</b>			
ENCASTAMIENTO			
Resina con catalizador	2 kg	110	220,00
Polvo de Talco	1,5 kg	35	52,50
Tela de fibra de vidrio	1 m2	46	46,00
Cera para pulir	50 grs	23	23,00
Silicón para PVC	50 grs	12	12,00
ACERO			
Disco de Freno Volkswagen	2 Piezas	50	100,00
Varilla Roscada Acero Inoxidable M12(1/2")	1,5 m	35	35,00
Tuercas de Acero Inox. M12	44	1,5	66,00
Arandelas de Acero Inox M12	16	1	16,00
Barra roscada M8	1,5 m	34	34,00
Tuercas M8	12	2	24,00
Arandelas M8	8	1	8,00
ELEMENTOS ELÉCTRICOS			
Hilo de cobre	1,5 kg	170	255,00
Cable flexible	20 m	5	100,00
Bloques Magnéticos	16	110	1760,00
Alambre de Estaño	1 rollo	50	50,00
Rectificadores monofásicos	2 (25 A,400 V)	45	90,00
Disipador de Calor	2 bloques	Reciclado	0,00
Bloques conectores	1	25	25,00
OTROS			
Buje con eje y accesorios	1 buje Chevrolet	250	250,00
<b>ROTOR EÓLICO</b>			
MADERA			
	3 pzas 150x30x4,6 cm		0,00
Tablas		60	180,00
Plancha de madera	1 80x50 cm	35	35,00
ACERO			
Tornillos M6	15	4	60,00
Tuercas M6	15	2	30,00
Arandelas M6	15	1	15,00
<b>MONTURA DEL AEROGENERADOR</b>			
ACERO			
Tubo de 300 mm	Pieza Completa		
Ángulos	Con Materiales		
Ángulos soporte	de	90	90,00
Anillo	Sobrante		
Tubo de 200 mm			
Trapecio			
<b>COLA DEL AEROGENERADOR</b>			
ACERO			
Tubo de 150 mm	Material Sobrante	0	0,00
Tubo de 1200 mm	1 pieza	60	60,00
Barra	Material Sobrante	0	0,00
Tuercas M10	3	3	9,00
Tornillos M10	3	3	9,00
MADERA			
Madera contrachapada	80x50x13 cms	35	35,00

<b>MATERIALES DE MOLDES Y PLANTILLAS</b>			
<b>MADERA</b>			
Tabla de compuesto de madera	50x50x13	35	105,00
Madera contrachapada	30x20x13	25	25,00
Tornillos M6 x 60	2	4	8,00
Tornillos M10 x 70	4	2,5	10,00
Tuercas M6	2	0,5	1,00
Tuercas M10	4	1	4,00
Arandelas M6	4	0,5	2,00
Arandelas M10	4	0,5	2,00
COSTE TOTAL (\$ PESOS MEXICANOS)			<b>3846,50</b>
<b>COSTE TOTAL (EUROS, 13,46 CAMBIO MONETARIO 20/12/2006)</b>			<b>285,77</b>

Tabla 22. energía consumida en los procesos

CONCEPTO	COSTE UNITARIO	CANTIDAD CONSUMIDA	COSTE (€)
Horas Diseño	9,01 €/h	30 hrs	270,3
Energía procesos Tabla 18	0,085764 €/kWh	5,709 kWh	0,49
Luz	0,085764 €/kWh	70 h consumiendo 600 W	3,6
<b>COSTE TOTAL TALLER</b>			<b>274,39</b>

Teniendo en cuenta todos los conceptos descritos, desde el diseño del presente proyecto hasta la puesta a la práctica de la construcción del primer aerogenerador descrito en el proyecto, se obtiene el presupuesto final.

Tabla 23.- Presupuesto Final

CONCEPTO	COSTE (€)
coste materiales, moldes y plantillas	<b>285,77</b>
coste total taller	<b>274,39</b>
costes desplazamiento	<b>130</b>
<b>PRESUPUESTO FINAL</b>	<b>690,16</b>

## 10.- CONCLUSIONES

Durante el proyecto se recorrió el proceso de diseño de una pequeña instalación eólica para el cargado de baterías, tal y como fijó como objetivo al principio de su desarrollo.

Se comenzó recorriendo las características principales del recurso eólico a fin de adquirir un conocimiento del mismo vital para que el diseñador pueda realizar un trabajo apropiado en el menor tiempo posible ante la ausencia de datos que es nota común en un proyecto como el presente.

Se recogieron distintas maneras de evaluar el recurso como la realización de un estudio anemométrico en la zona, que en un proyecto como el presente estará muy limitado por el tiempo y por el coste.

Una vez conocidas las características de los distintos recursos se realizó una investigación sobre el escenario (comunidad indígena Mexicana) en que el

proyecto se llevaría realmente a cabo, planteando al cabo de la misma unas hipótesis creíbles que sirviera como base de trabajo al siguiente apartado de determinación de la carga, tratando de desentrañar los posibles patrones de consumo de cada una de ellos. Una tarea compleja por el desconocimiento de los hábitos de cada comunidad en concreto.

Se pueden extraer varias conclusiones de la realización del presente proyecto, principalmente relacionadas con la construcción del aerogenerador, la energía y dinero necesarios para la misma y también se pueden extraer conclusiones a cerca del funcionamiento del aerogenerador.

Por un lado la sencillez de su construcción y por otro lado la fácil y económica adquisición en México de los materiales necesarios para la construcción del aerogenerador, así como para la construcción de los moldes y plantillas previos, hacen que sea factible que una o varias personas con pocos conocimientos y medios de fabricación, construyan su propio aerogenerador de baja potencia con la seguridad de un buen funcionamiento y vida útil.

Respecto al coste económico de adquirir un aerogenerador de este tipo, hay que señalar que sólo un 15 % aproximadamente es debido a los materiales, y lo que dispara el precio es el coste de la mano de obra.

En el estudio mecánico se ha obtenido una simulación aproximada del comportamiento del aerogenerador en función de la velocidad del viento. De este capítulo, también se han deducido varios puntos importantes a tener en cuenta en futuros proyectos, como sería el estudio más exhaustivo del valor de la fuerza del viento que actúa sobre las palas del rotor, así como variar parámetros geométricos que permitan optimizar el comportamiento del sistema. En el capítulo del estudio eléctrico, se ha estimado la potencia del aerogenerador en función de la velocidad del viento. Aunque sea una curva hecha a partir de varias hipótesis, muestra una idea del comportamiento eléctrico del sistema. Este capítulo también ha servido para establecer que puntos deberían ser estudiados con mayor exactitud, que debido a la imposibilidad de trabajar en laboratorio y obtener datos fiables, no se ha podido hacer y se consideran puntos importantes, como son la relación entre el coeficiente de potencia y el parámetro  $\lambda$  y la caracterización exacta del circuito eléctrico.

Desde el punto de vista energético, es evidente que la práctica totalidad del consumo energético necesario para la construcción de un aerogenerador es debido a la energía incorporada a la adquisición de los materiales, ya que los procesos de mecanizado y soldadura prácticamente no suponen consumo energético.

En cuanto a la instalación de aerogenerador en la Comunidad con un viento moderado, se recupera la energía consumida en la construcción que incluye también adquirir y conformar las plantillas y los moldes, en un tiempo aproximado de 321 días de funcionamiento continuo. Un tiempo que se puede considerar pequeño para la vida útil de aproximadamente 20 años [20], que se espera del aerogenerador y los vientos a los que puede verse sometido en

otras localizaciones que reducirían el tiempo de retorno energético en meses. Por tanto, se puede afirmar que el aerogenerador de imanes permanentes de Neodimio descrito en el presente proyecto, desde el punto de vista energético es totalmente sostenible.

Desde un punto de vista medioambiental es muy importante que el tiempo no sea muy elevado, puesto que si se requiere de mucho tiempo en la fase de funcionamiento para poder generar la energía equivalente a la incorporada a la construcción del aerogenerador, significa que no merece la pena construirlo y entonces la premisa de que el aerogenerador es un buen medio para abastecer a poblaciones sin red eléctrica entra en debate y es importante estudiar la viabilidad de empezar a construir infraestructuras eléctricas en lugar de este tipo de energías.

Es importante comentar que se ha tenido en cuenta que la generación de energía eléctrica es en un lugar determinado con un viento medio determinado y que este factor determina de manera importante la energía media diaria generada, de manera que si se tiene en cuenta que la fase de funcionamiento se va a llevar a cabo en otra localización, la generación de energía será diferente y por tanto el tiempo de retorno y la viabilidad energética también.

Además, se llegó a la conclusión de que la electrificación rural no puede ser un laboratorio donde se ensayen las nuevas tecnologías, sino que se debe primar la robustez y fiabilidad de los elementos instalados para reducir al máximo las necesidades de recambios no siempre fáciles de encontrar in situ. Por último quedó patente el esfuerzo económico que esta alternativa requiere y la sinceramente se quiere repartir la riqueza del mundo de una forma más equitativa. Creando comunidades de desarrollo que actúen impulsando su entorno hacia estándares de vida más cercanos al llamado primer mundo. Es un deber ético derivado del propio principio del destino universal de los bienes de la tierra.

## BIBLIOGRAFIA

- [ 1 ] Ruiz Guillén, Javier. Electrificación de comunidad rural situada en país en vías de desarrollo mediante energías renovables. Tesis de grado, Universidad de Cali, Colombia, 1999.
- [ 2 ] Martínez Miralles, Jordi Hernández Agriarte, Javier. Diseño de un aerogenerador de baja potencia. Universitat Politècnica de Catalunya. Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Industrial de Barcelona, Septiembre 2006
- [ 3 ] [ 1 ] Department of Energy Mexico, Renewable Energies in Mexico Paper of Information. 1999.
- [ 4 ] Pérez Ramírez Rodrigo, A simulation study on the economic aspects of hybrid energy systems for remote indigenous communities in Mexico, Trabajo de Investigacion Doctorado 2005. Universidad de Zaragoza.
- [ 5 ] Charles J. Hanley and Michael P.R. Developing sustainable renewable energy markets in México: results and future challenges, Sandia national laboratories, New Mexico State University, Technology Development Institute.
- [ 6 ] [www.sener.gob.mx](http://www.sener.gob.mx), [pagina de la secretaria de energía Mexico.](#)
- [ 7 ] Pérez Ramírez Rodrigo, "Energía renovable para la electrificación rural de comunidades indígenas de la region chatina." Proyecto de gestion Municipal, Mexico 2000.
- [ 8 ] PNUD (2000). World Energy Assessment (WEA). Energy and the challenge of Sustainability. Plan de las Naciones Unidas para el Desarrollo. Disponible en <http://www.undp.org/energy/activities/wea/drafts-frame.html> [Fecha de consulta: 27/01/2006]
- [ 9 ] [www.cfe.gob.mx](http://www.cfe.gob.mx), [portal de la commission federal de electricidad, México. Fecha de consulta 12/11/2006.](#)
- [ 10 ] AIE (2004), World Energy Outlook 2004. Agencia Internacional de la Energía, París. Disponible en <http://www.worldenergyoutlook.org> [Fecha de consulta: 27/01/2006]
- [ 11 ] Pérez Foguet, A., Morales, M., Sanz, A. (2005) Introducción a la Cooperación al Desarrollo para las ingenierías. Una propuesta para el estudio. Ingeniería Sin Fronteras. Disponible en [http://www-lacan.upc.es/perez/libro\\_ICDI\\_vdef.pdf](http://www-lacan.upc.es/perez/libro_ICDI_vdef.pdf).
- [12] PNUD (2004), World Energy Assessment. 2004 update. PNUD. Disponible en [http://www.undp.org/energy/docs/WEAOU\\_full.pdf](http://www.undp.org/energy/docs/WEAOU_full.pdf) [Fecha de consulta: 27/01/2006]
- [13] Sánchez Campos, Teodoro y Ramírez Atahui Saúl. Desarrollo tecnológico de micro generadores eolicos. ITDG (Intermediate Technology Development Group) 2000.
- [14] Comision nacional de los Pueblos Indígenas, Diagnostico de los 50 municipios con el menor indice de desarrollo del Pais, CDI, 2000.
- [15] D. Elliott, Wind Energy Resource Atlas of Oaxaca, National Renewable Energy Laboratory NREL. USA 2003
- [16] Ayestarán, Alejandro C. Bodoira, Jorge A. Zimmermann, Nicolás "Diseño, construcción y ensayo De un micro aerogenerador" Instituto Tecnológico de Buenos Aires, 2004.

- [17] Rodolfo Dufo, Lopez , Design and Control Strategies of PV- Diesel Systems Using Genetic Algorithms, Department of Electrical Engineering, University of Zaragoza, Spain. 2004
- [18] Hugh Piggott-Scoraig Wind Electric-February 2001. PMG construction Manual.
- [19] ITDG, Documentos internos; Small Wind Systems for Battery Charging-2000
- [20] Marco Ibáñez, Natxo; Monterrubio Montesó, Juan Antonio UPC, Especificación técnica para la réplica en la UPC de un aerogenerador de baja potencia destinado a la cooperación para el desarrollo humano ETSEIB (UPC). Ingeniería Industrial
- [21] Pedro Fernández Díez, energía eólica. Departamento de ingeniería eléctrica y energética Universidad de Cantabria 2000.
- [22] Hugh Piggott-Scoraig Wind Electric-February 2004. PMG construction Manual.
- [23] Santos Jaimes, Alfonso y Álvaro Enrique Pinilla Sepúlveda Adaptación de un Generador Eléctrico de Imanes Permanentes y flujo radial. Universidad de los Andes Venezuela, 2001.
- [24] Sánchez Campos, Teodoro y Ramírez Atahui Saúl. Desarrollo tecnológico de micro generadores eólicos. ITDG (Intermediate Technology Development Group) 2000.
- [25] Bernal, Iván. Reacondicionamiento del Aerogenerador Fiva I, Universidad de los Andes, 1994
- [26] Rodríguez, Uribe Daniel. Puesta en Marcha de un Aerogenerador, Universidad de Los Andes, 1993
- [27] Siskind, Charles Seymour. Electrical machines; direct & alternating current. 1897.
- [28] MSC Teodoro Sánchez C., Ing. José E. Chiroque B. Evaluación y mejoras del aerogenerador ITDG modelo IT-PE-100. ITDG-CONCYTEC-UNI, Perú, Junio 2005.