

**SISTEMA CONVERTOR DE ENERGÍA EÓLICA  
DE BAJA POTENCIA. DISEÑO Y  
CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO**

**JOHNNY ALEXANDER ALFONSO BERNAL  
JUAN CARLOS ORJUELA HERRERA**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO - MECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA  
BUCARAMANGA**

**2.008**

# **SISTEMA CONVERTOR DE ENERGÍA EÓLICA DE BAJA POTENCIA. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO**

**JOHNNY ALEXANDER ALFONSO BERNAL  
JUAN CARLOS ORJUELA HERRERA**

**Trabajo de Grado para optar al título de  
Ingeniero Mecánico**

**Director  
OMAR ARMANDO GELVEZ AROCHA  
Ingeniero Mecánico**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO - MECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA  
BUCARAMANGA**

**2.008**

## DEDICATORIA

Al Universo.

## **AGRADECIMIENTOS**

*A nuestros familiares, amigos y colaboradores..*

## CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	21
1. ENERGÍAS RENOVABLES	23
1.1. ENERGÍA SOLAR TÉRMICA	24
1.2. CENTRALES TÉRMICAS SOLARES	25
1.3. ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTÁICA	26
1.4 HIDRÁULICA	29
1.5. ENERGÍA GEOTÉRMICA	31
1.6. BIOMASA	33
1.7. ENERGÍA EÓLICA	35
2. ENERGIA EOLICA	36
3. AEROGENERADORES	45
3.1 DESCRIPCION FISICA	45
3.1.1 Rotor	45
3.1.2 Transmisión	45
3.1.3 Generador	45
3.1.4 Nacelle o Góndola	45
3.1.5 Torre	46
3.1.6 Sistema de Direccionamiento	46
3.1.7 Sistema de Control	46
3.2 CARACTERIZACIÓN DE LAS PALAS	47
3.2.1 Caracterización geométrica	47
3.2.2 Caracterización dinámica	52
3.3.3 El Cubo	55
3.3 TRANSMISION	56

3.4 LOS GENERADORES	57
3.4.1 Clasificación de los generadores	58
3.5 ACUMULADORES	63
3.5.1 Acumulador de plomo	64
3.5.2 Batería alcalina	64
3.5.3 Baterías Níquel-Cadmio (Ni-Cd).	65
3.6 REGULACIÓN	65
3.7 TORRE	68
3.7.1 Torres Tubulares	68
3.7.2 Torres en Celosía	69
3.7.3 Torres de Mástil	69
3.7.4 Torres Mixtas	70
4. DISEÑO Y SELECCIÓN	72
4.1 ESTUDIO DEL VIENTO	72
4.2 PRUEBAS DEL GENERADOR	81
4.3. DISEÑO DEL ROTOR	87
4.3.1 Valores de diseño de la Pala	88
4.3.2 Diseño de la Pala	97
4.3.3 Diseño del Cubo o Dado	103
4.4. DISEÑO DEL SISTEMA DIRECCIONAL	107
4.5. TRANSMISIÓN	108
4.5.1 Eje 1 de alta velocidad.	109
4.5.2 Eje 2 de baja velocidad.	111
4.5.3 Piñón.	114
4.5.4 Rueda.	116
4.5.5 Eje Soporte.	118
4.6. TORRE	120
4.7. BANCO DE BATERÍAS	125

5. ANALISIS Y JUSTIFICACION ECONOMICA	128
5.1 IMPACTO SOCIAL	128
5.2 IMPACTO ECONOMICO	128
5.3 COSTOS DE PRODUCCION	129
5.4 PRODUCCION NACIONAL DE SISTEMAS DE GENERACION DE ENERGIA EOLICA	133
5.5 POSIBILIDADES DE FINANCIACIÓN Y ACCESIBILIDAD AL SISTEMA	134
5.5.1 Crédito Especializado para Electrificación propuesto por FINAGRO	135
6. CONCLUSIONES	139
7. RECOMENDACIONES:	141
BIBLIOGRAFIA	143
ANEXOS	145

## LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Colector solar plano, <a href="http://www.randbenergy.com">www.randbenergy.com</a>	24
Figura 2. Instalaciones solares térmicas para el calentamiento de agua potable en viviendas unifamiliares <a href="http://www.renewables-made-in-germany.com/es">www.renewables-made-in-germany.com/es</a>	25
Figura 3. Principio de funcionamiento. Centrales Termicas. a. Torre solar. b. Colector cilindrico parabolico <a href="http://www.randbenergy.com">www.randbenergy.com</a>	26
Figura 4. Evolución de la Energía Solar Fotovoltaica en Europa	27
Figura 5. Instalación fotovoltaica en el barrio gubernamental de Berlín. <a href="http://www.randbenergy.com">www.randbenergy.com</a>	28
Figura 6. Reducción de costos gracias al desarrollo técnico. Producción de módulos solares en MWp – capacidades de los fabricantes alemanes. Fuente: BSW	29
Figura 7. Central Maremotriz. <a href="http://www.revista.consumer.es/web/es">www.revista.consumer.es/web/es</a>	30
Figura 8. Esquema simplificado de funcionamiento sobre el aprovechamiento de la energía geotérmica profunda. <a href="http://www.renewables-made-in-germany.com/es">www.renewables-made-in-germany.com/es</a>	32
Figura 9. Tipos de Biomasa	34
Figura 10. Calefacción con bioenergía. 1) Depósitos. 2) Caldera de pellets.3) Transporte automático de pellets. 4) Pellets. 5) Suministro de pellets. . <a href="http://www.randbenergy.com">www.randbenergy.com</a>	34
Figura 11. Evolución de la potencia eólica instalada en el mundo (en MW). Fuente <a href="http://www.uco.es">www.uco.es</a>	36
Figura 12. Emisiones de gases de invernadero 1990 (fuente INGEI)	41
Figura 13. Emisiones de CO <sub>2</sub> por sectores (fuente UPME)	42

Figura 14. Partes de un aerogenerador	47
Figura 15. Cuerda de un Perfil	48
Figura 16. Perfil biconvexo asimétrico	49
Figura 17. Perfil plano convexo	49
Figura 18. Fuerzas de arrastre y ascensional en un perfil fijo. Pedro Fernández Diez	50
Figura 19. Diferentes ángulos de ataque para un perfil NACA 4412, $v = 8$ m/s, $Re = 2.1 \times 10^5$	51
Figura 20. Geometría de una pala de un aerogenerador	53
Figura 21. a) Velocidades b) Fuerzas	54
Figura 22. Cubo: Disco y buje. Palas montadas en el Dado, con cubierta	55
Figura 23. Acople, conector entre el eje de alta velocidad y el generador.	56
Figura 24. Partes del sistema de Transmisión.	57
Figura 25. Características del generador de corriente continua.	60
Figura 26. Curva característica de un alternador	61
Figura 27. Acumuladores	64
Figura 28. Control por pérdida aerodinámica, stall control.	66
Figura 29. Control del ángulo de calaje de las palas, pitch control.	67
Figura 30. Torres Tubulares	68
Figura 31. Torres en Celosía	69
Figura 32. Torre de Mástil	70
Figura 33. Torre Mixta	70
Figura 34. Vegetación en el lugar de emplazamiento.	72
Figura 35. Mapa de ubicación del lugar de emplazamiento del SICOE	73
Figura 36. Anemómetro de cazoletas, con aleta direccional.	76
Figura 37. Rosas de los Vientos Características para un flujo dominante dentro de un valle, en una planicie y por encima de las elevaciones extremas	

de un valle. La del centro, emplazamiento en un valle, es la que caracteriza el caso en estudio.	77
Figura 38. Ejemplos de Rosa de los Vientos en dos aeropuertos, fuente IDEAM	78
Figura 39 .Curva de comportamiento de la velocidad y frecuencia.	79
Figura 40. Curva de Weibull, determinada con el programa de <a href="http://www.windpower.org">www.windpower.org</a>	80
Figura 41. Montaje del motor y el generador	81
Figura 42. Montaje Motor, generador y variador.	82
Figura 43. Montaje del circuito, para la prueba con carga.	85
Figura 44. Voltaje vs. Frecuencia, para la prueba del GIP en vacío	86
Figura 45. GIP, voltaje vs. frecuencia	87
Figura 46. Metodología del diseño de un aerogenerador	88
Figura 47. Grafica de $C_p$ vs. $\lambda$ de acuerdo a Siegfried Heder	90
Figura 48. Coeficientes de arrastre, $C_x$ y sustentación, $C_y$ , para el perfil FX60-126. Fuente Pedro Fernández Diez	95
Figura 49. Diseño Mecánico del SICOE (entradas y salidas)	97
Figura 50. Diagrama de Fuerzas y Velocidades en un Rotor. a. Fuerzas y velocidades generadas por el viento al atravesar el rotor de una turbina eólica. b. Velocidades sobre el perfil aerodinámico. Fuente Pedro Fernández Diez	98
Figura 51. Valores del SP y del SR en función de $\theta$ . Fuente Pedro Fernández Diez.	99
Figura 52. Valores del SP en función del SR. Fuente Pedro Fernández Diez.	99
Figura 53. Perfil FX60-126, con las características principales. BA, borde de ataque, BS, borde de salida y L, cuerda	100
Figura 54. Partes de la pala	101
Figura 55. Variación del perfil desde la raíz hasta la punta de la pala	101

Figura 56. Fuerzas sobre el perfil aerodinámico de la pala. Fuente Pedro Fernández Diez	102
Figura 57. Dado o Cubo, sin las palas y con las palas instaladas.	104
Figura 58. Buje montado sobre el eje de baja velocidad, se observan los 3 pernos de sujeción para el Disco	105
Figura 59. Diseño del Buje con Solid Edge.	105
Figura 60. Montaje del Disco y el Buje	106
Figura 61. Montaje del Dado, Disco, Buje y Tornillos	106
Figura 62. Aerogenerador con aleta direccional.	107
Figura 63. Aerogenerador SICOE con aleta direccional.	108
Figura 64. Torre total.	122
Figura 65. Detalle de la Brida en la parte superior de la Torre	123
Figura 66. Placa y peldaños de la Torre	123
Figura 67. SICOE instalado en la Torre	124
Figura 68. Base de la Torre que va empotrada en la zapata de cimentación.	124
Figura 69. Cimentación de la Torre, secado del concreto.	125
Figura 70. Diferentes tipos de conexiones de Bancos de Baterías	127
Figura 71. Comparación de precios entre una turbina importada y una de fabricación nacional	134

## LISTA DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
Tabla 1.- Potencia eólica instalada en la Unión Europea a finales de 1999 (en MW). Fuente <a href="http://www.uco.es">www.uco.es</a>	37
Tabla 2.- Potencia eólica instalada en el mundo a finales de 1999 (en MW). Fuente <a href="http://www.uco.es">www.uco.es</a>	38
Tabla 3. Polución evitada al medio ambiente	39
Tabla 4.-Proyección de potencias eólicas suplementarias en el horizonte del año 2003 (en MW). <a href="http://www.uco.es">www.uco.es</a>	40
Tabla 5. Velocidades del viento, para cinco días, datos tomados en la finca La Bonita, Mesa de los Santos	74
Tabla 6. Resultados generales del estudio de viento.	79
Tabla 7. Velocidad y Frecuencia del viento	79
Tabla 8. Características técnicas del motor	83
Tabla 9. Características técnicas del variador "ALTIVAR 16	83\
Tabla 10. Datos de frecuencia y voltaje para el GIP, prueba en vacío.	84
Tabla No 11. Datos de amperaje, voltaje y frecuencia, tomados de la prueba con carga para el GIP	85
Tabla 12. Relación entre el TSR y el Número de palas. Fuente Pedro Fernández Diez	91
Tabla 13. Resultados de Área y Potencia para $V_{\text{viento}}=7$ m/s, $\beta=4^\circ$ y $n=300$ rpm.	92
Tabla 14. Resultados de Área y Potencia para $V_{\text{viento}}=7,5$ m/s, $\beta=4^\circ$ y $n=300$ rpm.	92

Tabla 15. Resultados de Área y Potencia para $V_{\text{viento}}=8$ m/s, $\beta=4^\circ$ y $n=300$ rpm.	92
Tabla 16. Resultados de Area y Potencia para $V_{\text{viento}}=7$ m/s, $\beta=5^\circ$ y $n=300$ rpm.	93
Tabla 17. Resultados de Area y Potencia para $V_{\text{viento}}=7,5$ m/s, $\beta=5^\circ$ y $n=300$ rpm.	93
Tabla 18. Resultados de Area y Potencia para $V_{\text{viento}}=8$ m/s, $\beta=5^\circ$ y $n=300$ rpm.	93
Tabla 19. Resultados de Area y Potencia para $V_{\text{viento}}=7$ m/s, $\beta=6^\circ$ y $n=300$ rpm.	94
Tabla 20. Resultados de Area y Potencia para $V_{\text{viento}}=7,5$ m/s, $\beta=6^\circ$ y $n=300$ rpm.	94
Tabla 21. Resultados de Area y Potencia para $V_{\text{viento}}=8$ m/s, $\beta=6^\circ$ y $n=300$ rpm.	94
Tabla 22. Características de la pala.	100
Tabla 23. Valores $F_{\text{par}}$ , $F_{\text{axial}}$ y Par motor	103
Tabla 24. Rugosidades según el terreno.	121
Tabla 25. Número de baterías necesarias para dos días de autonomía.	126
Tabla 26. Costos de Producción	130
Tabla 27. Comparación de precios entre una turbina importada y una de fabricación nacional	134

## LISTA DE ANEXOS

	<b>Pág.</b>
Anexo A. FABRICACION DE LAS PALAS	146
Anexo B. PRUEBA DE BALANCEO DEL ROTOR	152
Anexo C. INSTALACION DEL SICOE	155
Anexo D. SIMULACION DEL SICOE	162

## NOMENCLATURA O GLOSARIO

### NOTACIÓN

A	Área, m <sup>2</sup> .
B	Número de palas
C <sub>p</sub>	Coefficiente de Potencia.
C <sub>y</sub>	Coefficiente de sustentación.
C <sub>x</sub>	Coefficiente de arrastre.
dr	Sección de pala, m.
D	Diámetro, m.
D <sub>p</sub>	Diámetro primitivo, mm.
dS	Superficie de sección de pala, m.
F <sub>a</sub>	Fuerza axial total, N.
F <sub>c</sub>	Fuerza centrífuga, N.
F <sub>p</sub>	Fuerza par total, N.
g	Aceleración gravitacional, m/s <sup>2</sup> .
GIP	Generador de imanes permanentes
L	Longitud de la cuerda, m
M	Modulo.
N	velocidad de rotación, rpm.
P	Potencia del generador, W.
Par	Par motor, Nm.
SICOE	Sistema Conversor de Energía Eólica
SP	Parámetro de forma.
SR	Relación de velocidad por sección de pala

TSR	Relación de velocidad periférica.
V	Velocidad del viento, m/s
U	Velocidad del viento producida por el giro de la pala, m/s
W	Carga en el diente del engranaje, N.
Wa	Carga axial en el diente del engranaje, N.
Wr	Carga radial en el diente del engranaje, N.
Wt	Carga tangencial en el diente del engranaje, N.
	. . . . .

### LETRAS GRIEGAS

$\alpha$	Angulo de incidencia, grados o radianes.
$\beta$	Angulo de calaje, grados o radianes.
$\delta$	Densidad del aire, Kg/m <sup>3</sup>
$\theta$	Ángulo aparente del viento, grados o radianes.
$\Omega$	Coficiente de solidez
	. . . . .
	. . . . .

## RESUMEN

### TÍTULO: SISTEMA CONVERSION DE ENERGÍA EÓLICA DE BAJA POTENCIA. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO\*

#### AUTORES:

Johnny Alexander Alfonso Bernal. \*\*

Juan Carlos Orjuela Herrera. \*\*

#### PALABRAS CLAVES:

Energía eólica, rotor, perfil aerodinámico, generador, emplazamiento, velocidad del viento, ángulo de incidencia, baja potencia.

#### DESCRIPCIÓN:

El objetivo de este proyecto es contribuir al desarrollo de sistemas de energías alternativas en Colombia a través de la investigación y la búsqueda de soluciones dentro del marco de la energía eólica.

El SICOE se diseño con base en el estudio del viento, hecho con un anemómetro, en la localidad de la Mesa de los Santos, finca La Bonita. Este estudio dio las herramientas para determinar la potencia que se puede obtener del viento, con las implicaciones que tiene al atravesar el rotor y llegar finalmente al usuario de esa energía. Este proceso se realiza con transformación de la energía cinética a mecánica y finalmente eléctrica.

Para el diseño se tuvo en cuenta el **Teorema de Bernoulli**, con el cual se encuentra la ecuación que relaciona la energía del viento con la geometría de la pala, ayudados con información sobre pruebas experimentales desarrolladas en empresas dedicadas a la aeronáutica, específicamente en perfiles aerodinámicos. Para el resto del diseño se utiliza la teoría de fatiga, vibraciones mecánicas; complementadas con software para diseño como **Solid Edge** y **ANSYS**.

El resultado es un prototipo de turbina eólica de baja potencia, con sus respectivos componentes, que cumple con unas características mínimas para transformar energía. Y que nos entrega una potencia nominal mayor a 200 W.

---

\* Trabajo de Grado

\*\* Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas, Escuela de Ingeniería Mecánica, Universidad Industrial de Santander

## SUMMARY

### TITLE:

**SYSTEM CONVERTER OF AEOLIAN ENERGY OF LOW POWER. DESIGN AND CONSTRUCTION OF THE PROTOTYPE \***

### AUTHORS:

Johnny Alexander Alfonso Bernal. \*\*

Juan Carlos Orjuela Herrera. \*\*

### KEY WORDS:

Aeolian energy, rotor, aerofoil profile, generating, location, wind speed, angle of incidence, low power.

### DESCRIPTION:

The objective of this project is to contribute to the development of systems of alternative energies in Colombia through the investigation and the search of solutions within the frame of the Aeolian energy.

The SICOE design with base in the study of the wind done, with and anemometer in the locality of Mesa of the Saints, property "the Pretty one". This study gave the tools to determine the power that can be obtained from the wind, with the implications that the rotor has when crossing and to arrive finally at the user of that energy. This process is made with transformation of the kinetic to mechanics and finally electrical energy.

For the design the **Theorem of Bernoulli** considered, with which is the equation that relates the energy of the wind to the geometry of the blades, helped with information on experimental tests developed in dedicated companies to the aeronautics, specifically in aerofoil profiles. For the rest of the design the fatigue theory is used, mechanical vibrations; complemented with software for design like **Solid Edge** and **ANSYS**.

The result is a prototype of Aeolian turbine of low power, with its respective components, that fulfil minimum characteristics to transform energy. And that gives a nominal power to us greater to two hundred watts.

---

\* Degree Work.

\*\* Physical-Mechanical Engineering Faculty, Mechanical Engineering School, Universidad Industrial de Santander

## INTRODUCCIÓN

En Colombia se han hecho diferentes estudios sobre energías alternativas y en el caso de la energía eólica ha habido un gran avance, esto ha provocado la primera instalación de un parque eólico en Colombia en el departamento de la Guajira, con una potencia cercana a los 27 MW. Sin embargo la transmisión de la energía sigue siendo la clave para recurrir a turbinas de baja potencia que puedan ser ubicadas en lugares distantes evitando la transmisión a largas distancias.

En el área de las turbinas de baja potencia se han hecho estudios a nivel universitario tanto en pregrado como en posgrado, solo que se quedan en el nivel académico y no se aplican a las necesidades de las zonas no interconectadas del país, las cuales son un 65% del territorio, según la UPME, Unidad de Planeación Minero Energética. De este porcentaje hay potencial eólico en zonas como la costa y los llanos orientales, así como en puntos específicos de algunos departamentos, lo cual da pie para la aplicación de esta propuesta.

Otro factor determinante es la emisión de contaminantes por las termoeléctricas ya sea por carbón, fuel oil y gas, que con base en estudios realizados en otros países se demuestra que se reducirían sustancialmente estas emisiones. Además, la tendencia mundial esta en la búsqueda del uso de energías alternativas pues los combustibles fósiles tienden a agotarse.

Teniendo en cuenta los diferentes estudios de vientos en Colombia (mapas y rosas de los vientos de los diferentes aeropuertos) se puede comprobar que la

región correspondiente al departamento de Santander no posee un alto potencial eólico, sin embargo, en estos estudios no se tienen en cuenta vientos específicos, como son los vientos de montaña, que son vientos con características propicias para la generación de mediana y baja potencia. Realizando un pequeño sondeo se llega al sector conocido como la Mesa de los Santos donde se hace un estudio menor de vientos para comprobar el potencial eólico del lugar.

Determinando una potencia básica para consumo, con en el estudio de vientos y con las limitaciones derivadas del generador eléctrico por su baja comercialización, se definen unos parámetros para el desarrollo del diseño y la construcción del prototipo o SICOE. Esto se hace con base en las teorías de los fluidos, de diseño, resistencia de materiales, el estado del arte en esta área, con la ayuda del Solid Edge y Ansys como programas de diseño y además, con la ayuda de estudiantes de la escuela de Ingeniería Eléctrica en la parte de selección y control del generador eléctrico.

## 1. ENERGÍAS RENOVABLES

Uno de los grandes problemas de la humanidad es su dependencia de los combustibles fósiles, ya que provocan un fuerte impacto ambiental además de diversos trastornos económicos. El reto está en conseguir que las energías alternativas y renovables vayan sustituyendo paulatinamente a esos combustibles. La principal ventaja de las energías renovables es la de su menor impacto ambiental ya que reducen el número de contaminantes a la atmósfera pero además su distribución territorial es más dispersa y menos concentrada<sup>1</sup>.

Las energías renovables podrían solucionar muchos de los problemas ambientales, como el cambio climático, los residuos radiactivos, las lluvias ácidas y la contaminación atmosférica. Las energías renovables podrían cubrir un tercio del consumo de electricidad y reducir las emisiones de dióxido de carbono en un 20% para el año 2.005<sup>2</sup>.

El potencial de las energías renovables en el mundo, aún con las limitaciones actuales de tecnología y costos económicos, es muy elevado. En el año 2005 éstas llegaron a proporcionar 8,1 Mtep (Miles de toneladas equivalentes de petróleo). Tal cifra debe crecer rápidamente a partir del año 2.005, para alcanzar las 14,5 Mtep en el año 2020<sup>3</sup>.

---

<sup>1</sup> [www.uco.es](http://www.uco.es)

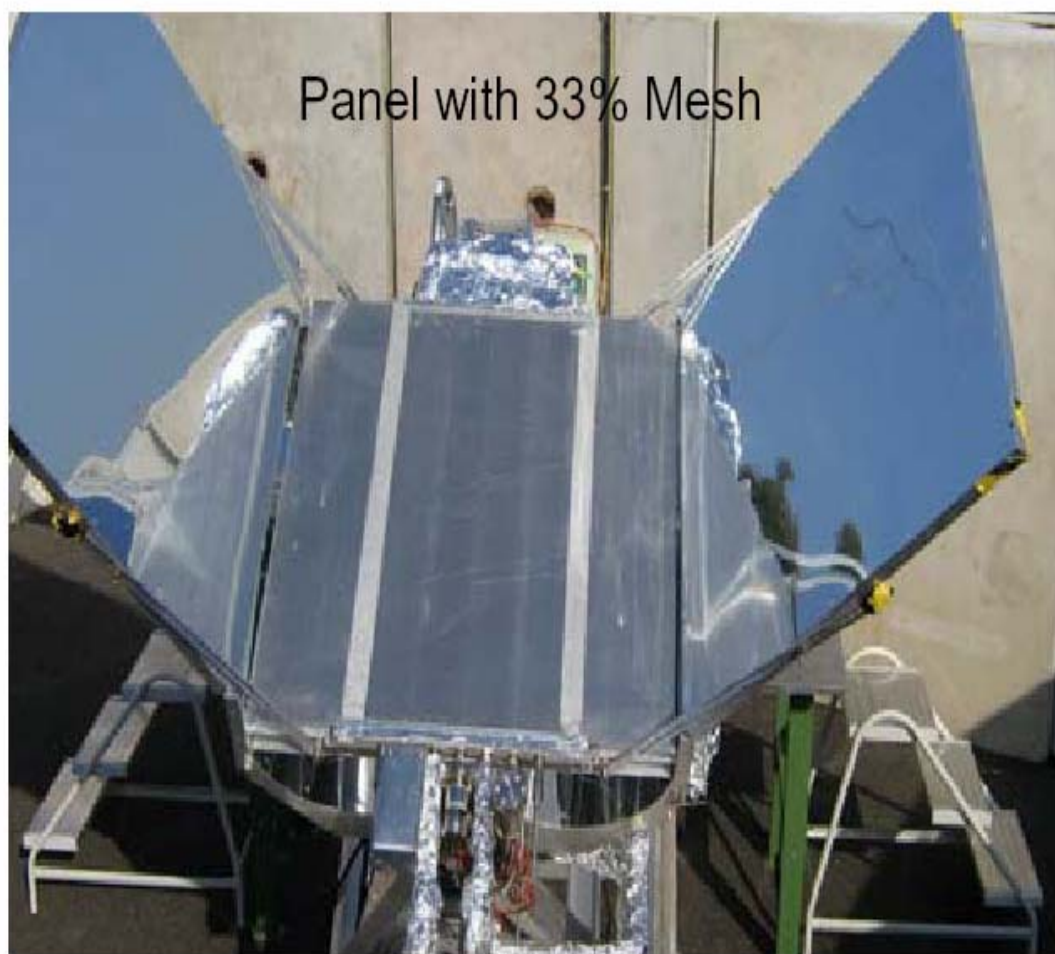
<sup>2</sup> [www.uco.es](http://www.uco.es)

<sup>3</sup> [www.uco.es](http://www.uco.es)

## 1.1. ENERGÍA SOLAR TÉRMICA

El colector solar plano, figura 1, es la aplicación más común de la energía térmica del sol. Países como Japón, Israel, Chipre o Grecia han instalado varios millones de unidades. Cada metro cuadrado de colector puede producir anualmente una cantidad de energía equivalente a la que producen 100 Kg. de petróleo<sup>4</sup>.

Figura 1. Colector solar plano, [www.randbenergy.com](http://www.randbenergy.com)

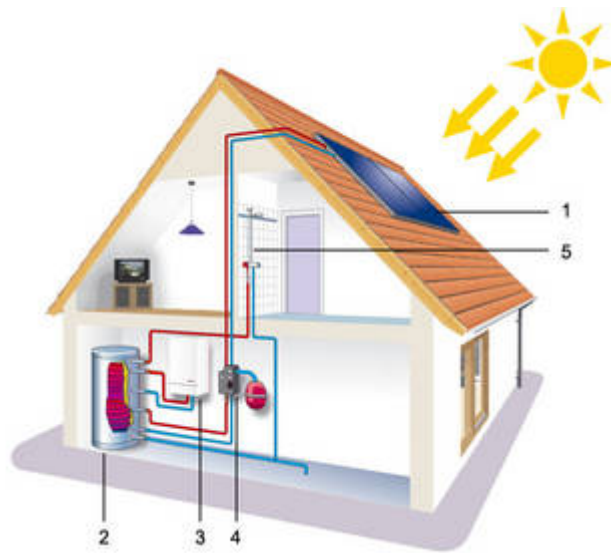


---

<sup>4</sup> [www.randbenergy.com](http://www.randbenergy.com)

La energía solar no sólo es un recurso poderoso sino también flexible. Las aplicaciones más extendidas son la generación de agua caliente para hogares, piscinas, hospitales, hoteles, procesos industriales, calefacción, empleos en los que se requiere calor a bajas temperaturas y que pueden llegar a representar más de una décima parte del consumo.

**Figura 2. Instalaciones solares térmicas para el calentamiento de agua potable en viviendas unifamiliares [www.renewables-made-in-germany.com/es](http://www.renewables-made-in-germany.com/es)**



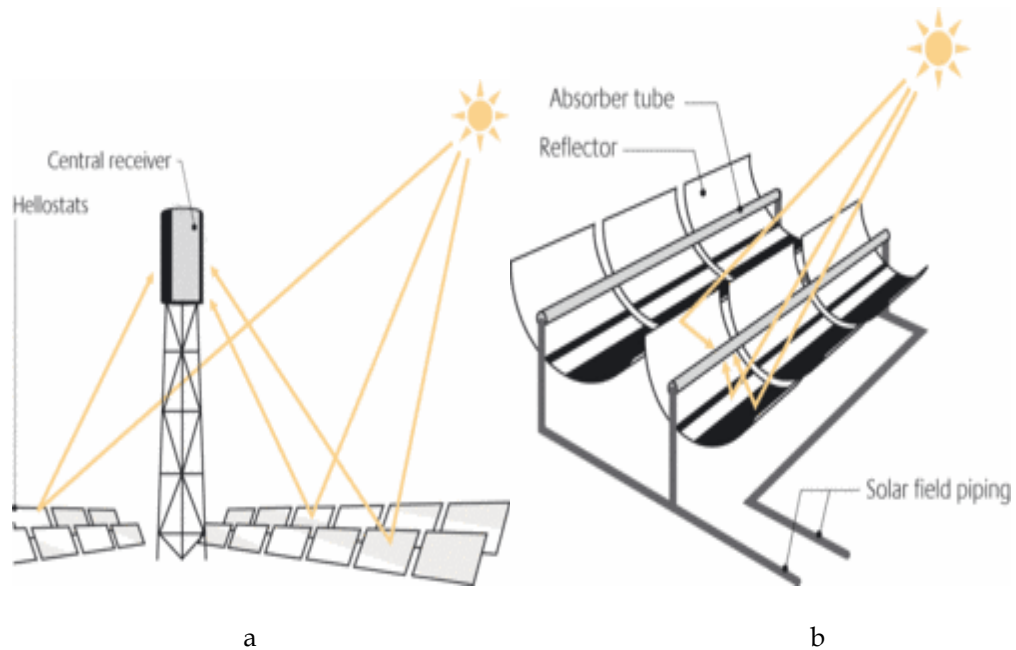
- 1) Colector
- 2) Acumulador
- 3) Caldera de calefacción
- 4) Estación solar
- 5) Consumidor de agua caliente sanitaria (por ejemplo: la ducha)

## 1.2. CENTRALES TÉRMICAS SOLARES

Con las centrales térmicas solares se puede utilizar la energía del sol a escala industrial para la generación de corriente. Para ello, se emplea la radiación solar transformada en calor. En plantas de colectores cilindros parabólicos y torres solares, a través de la concentración de la luz solar se alcanza un nivel

de temperatura que permite la utilización de turbinas de central eléctrica conectadas. Los sistemas de colectores concentradores pueden alcanzar temperaturas útiles de hasta 1.000°C y son necesarios ya que los colectores planos o de tubos de vacío habituales sin concentración no pueden alcanzar el nivel de temperatura necesario. La posterior transformación de la energía calorífica en energía eléctrica se produce en la planta de turbinas de gas o vapor ya existente.

**Figura 3. Principio de funcionamiento. Centrales Termicas. a. Torre solar. b. Colector cilindrico parabolico [www.randbenergy.com](http://www.randbenergy.com)**

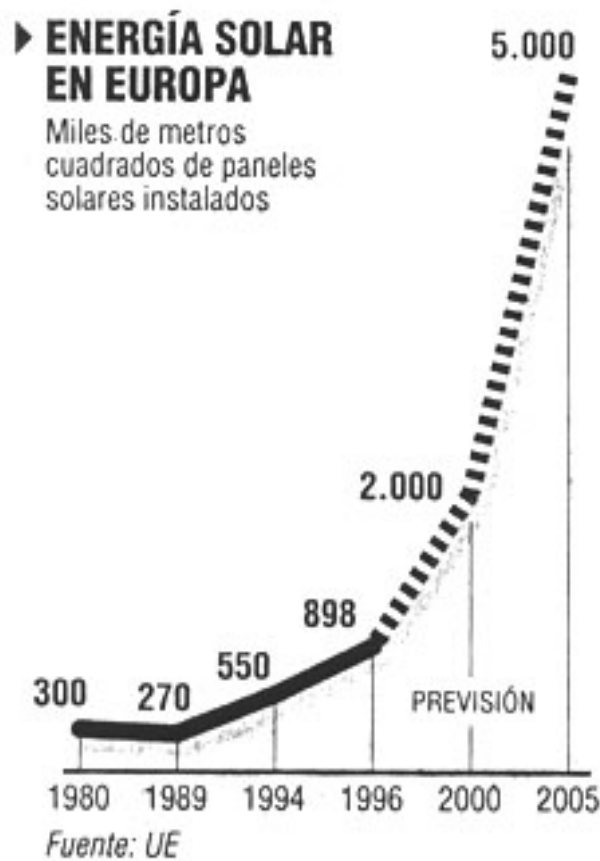


### 1.3. ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTÁICA

Algunas células solares funcionan en base a una plaqueta delgada de silicio monocristalino, que ha sido tratada para poder convertir la luz del sol en corriente eléctrica. El silicio se obtiene de la arena ordinaria. Dada la eficiencia de la célula solar y la duración de su vida útil, se calcula que una tonelada de arena puede generar la misma cantidad de electricidad que se

produce quemando más de 500.000 toneladas de carbón. (Philippe Ilailly/SPL). Por esta razón y la disminución del costo de instalación, el cual ha disminuido sustancialmente en los últimos años el crecimiento de la energía eléctrica obtenida a través de células solares en Europa ha crecido en los últimos años, como lo muestra la figura 4<sup>5</sup>.

Figura 4. Evolución de la Energía Solar Fotovoltaica en Europa



La producción de electricidad a partir de células fotovoltaicas en 1.997 es aún seis veces más cara que la obtenida en centrales de carbón, pero hace tan sólo una década era dieciocho veces más, lo que permite que el empleo de células

<sup>5</sup> [www.uco.es](http://www.uco.es)

fotovoltaicas para producir electricidad en lugares alejados de las redes de distribución ya compita con las alternativas existentes, como generadores eléctricos a partir del petróleo.

Hay tres tamaños principales de instalaciones fotovoltaicas. El 40 % de la potencia de estos sistemas se instala en edificios de viviendas particulares. Colocados por encima de las tejas (instalaciones sobre tejado), estos sistemas alcanzan un pico de potencia de hasta 10 kilovatios, unos 3 kilovatios por término medio.

Los sistemas más grandes de una potencia que llega hasta varios cientos de kilovatios se instalan la mayoría de las veces en naves industriales, edificios públicos, edificios destinados a tareas agrícolas, oficinas, etc.

Junto a estas instalaciones estándares existe un número creciente de instalaciones de energía solar que resultan, desde el punto de vista arquitectónico, muy atractivas y que se pueden integrar en el tejado o en la fachada de edificios<sup>6</sup>.

**Figura 5. Instalación fotovoltaica en el barrio gubernamental de Berlín.**  
[www.randbenergy.com](http://www.randbenergy.com)

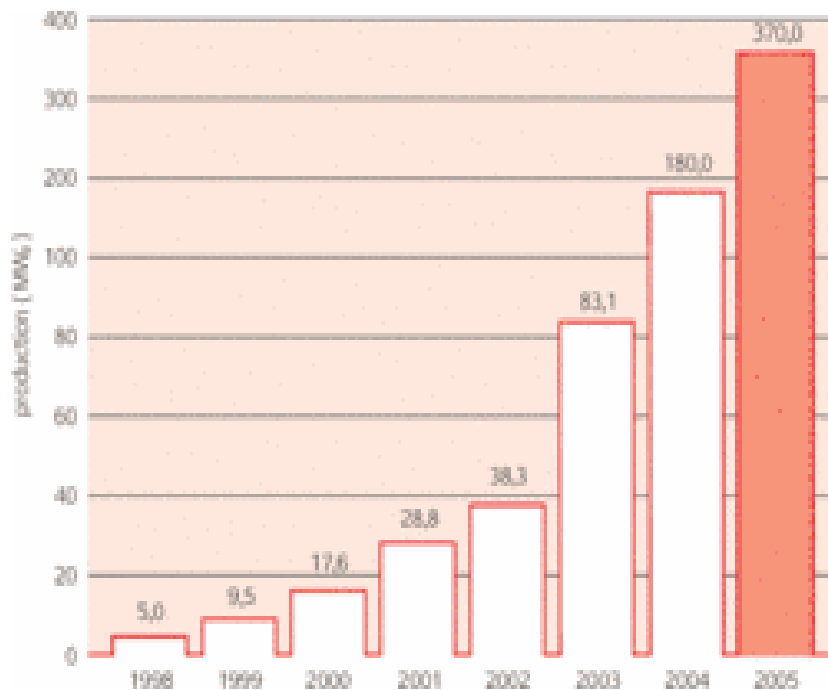


---

<sup>6</sup> [www.renewables-made-in-germany.com.es](http://www.renewables-made-in-germany.com.es)

En los países en vías de desarrollo en los que tradicionalmente el abastecimiento irregular de electricidad representa un grave problema, se instalan sistemas autónomos (Solar Home Systems), bombas hidráulicas solares de agua, sistemas de telecomunicaciones, farolas y sistemas de refrigeración para medicamentos.

**Figura 6. Reducción de costos gracias al desarrollo técnico. Producción de módulos solares en MWp - capacidades de los fabricantes alemanes. Fuente: BSW**

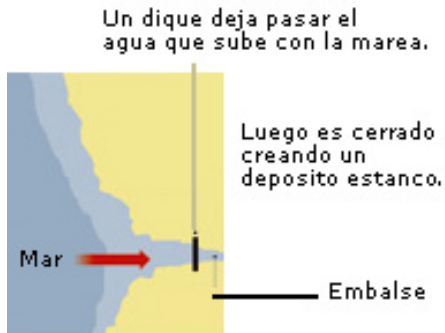


#### 1.4. HIDRÁULICA

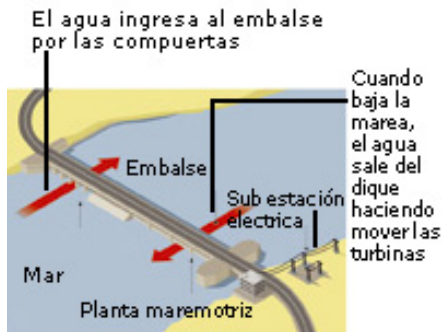
Hay una gran variedad de formas de generar energía por medio de agua en movimiento. En la figura No. 5 muestra el prototipo de una central maremotriz la cual fue construida en la isla de Islay, Escocia, sobre un barranco que encierra una columna de agua marina, a medida que el mar sube y baja, hace pasar el agua a través de una turbina, accionando un

generador eléctrico, (Martin Bond/SPL) . Los sistemas maremotrices podrían abastecer casi tres cuartas partes de las necesidades energéticas actuales de la Comunidad Europea. Las posibilidades para las mini-centrales hidroeléctricas son también significativas. En China hay más de 60.000 de estas centrales en funcionamiento, lo que es sólo una quinta parte del potencial hidroeléctrico total. En los EEUU, si las 67.000 presas existentes, la mayoría de ellas construidas para controlar inundaciones, fueran utilizadas para producir electricidad, sería posible abastecer a varios millones de hogares<sup>7</sup>.

Figura 7. Central Maremotriz. [www.revista.consumer.es/web/es](http://www.revista.consumer.es/web/es)

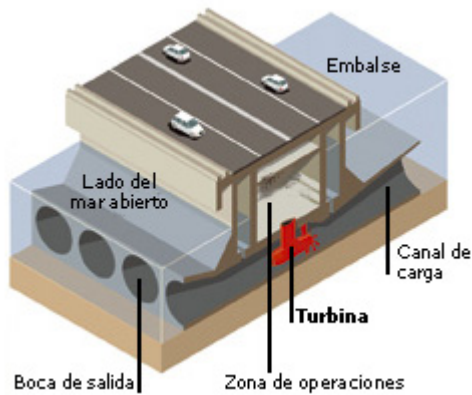


El lugar ideal para instalar un central maremotriz es un estuario, una bahía o una ría donde el agua de mar penetre.

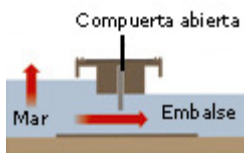


La construcción de una central maremotriz es sólo posible en lugares con una diferencia de al menos 5 metros entre la marea alta y la baja.

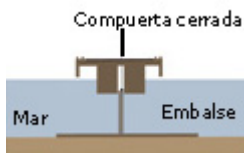
<sup>7</sup> [www.revista.consumer.es/web/es](http://www.revista.consumer.es/web/es)



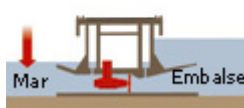
El agua, al pasar por el canal de carga hacia el mar, acciona la hélice de la turbina y ésta, al girar, mueve un generador que produce electricidad.



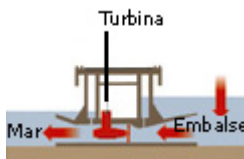
Cuando la marea sube, las compuertas del dique se abren y el agua ingresa en el embalse



Al llegar el nivel del agua del embalse a su punto máximo se cierran las compuertas.



Durante la bajamar el nivel del mar desciende por debajo del nivel del embalse.



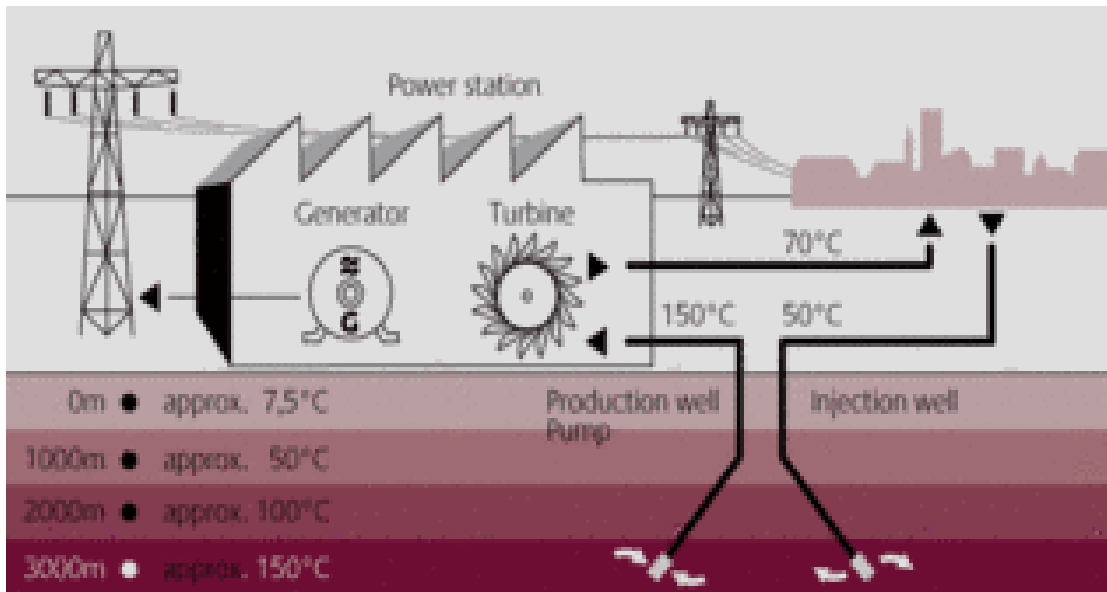
Cuando la diferencia entre el nivel del embalse y del mar alcanza su máxima amplitud, se abren las compuertas dejando pasar el agua por las turbinas.

## 1.5. ENERGÍA GEOTÉRMICA

Debajo de la litosfera, pero también directamente bajo la superficie terrestre, se encuentran yacimientos casi inagotables de energía esperando su explotación como recursos. El aprovechamiento del calor almacenado en los estratos geológicos es la divisa perseguida que con este fin pone a disposición productos y aplicaciones ajustados a la demanda y de probada eficacia. Las bombas térmicas, por ejemplo, demuestran su utilidad en el calentamiento y

la refrigeración de edificios empleando el calor difundido en las capas más superficiales de la tierra. La explotación de los yacimientos geotérmicos en los estratos más profundos – es decir, a profundidades de unos 400 metros bajo la superficie terrestre – requiere un procedimiento de perforación que posibilite la utilización del calor de fuentes termales o de rocas calientes para producir electricidad y calor<sup>8</sup>.

Figura 8. Esquema simplificado de funcionamiento sobre el aprovechamiento de la energía geotérmica profunda. [www.renewables-made-in-germany.com/es](http://www.renewables-made-in-germany.com/es)



En la actualidad, en Alemania, la capacidad instalada para la producción de la energía térmica mediante la geotermica se eleva a 570 MW. Mundialmente son instalados 28.000 MW.

<sup>8</sup> [www.renewables-made-in-germany.com/es](http://www.renewables-made-in-germany.com/es)

Además de la climatización de interiores, las tecnologías de aprovechamiento de la geotermia también encuentran aplicación en los invernaderos, para secar productos agrícolas y en usos industriales.

## **1.6. BIOMASA**

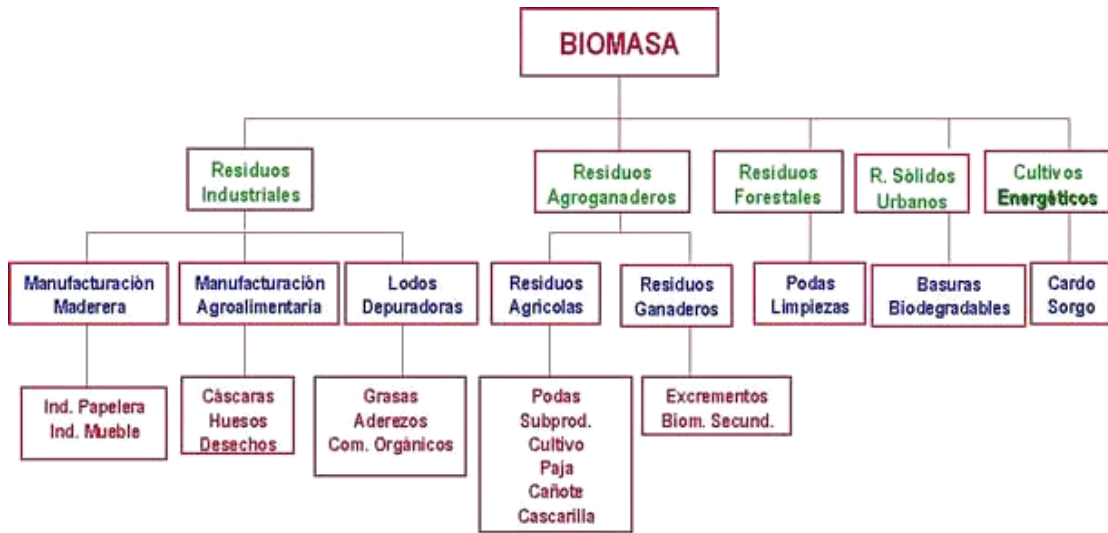
La Biomasa, abreviatura de "masa biológica", comprende una amplia diversidad de tipos de combustible energético que se obtiene directa o indirectamente de recursos biológicos. La biomasa comprende una amplísima gama de materiales orgánicos que son incorporados y transformados por el reino animal, incluido el hombre. Se transforma por procedimientos artificiales para obtener bienes de consumo. Todo este proceso da lugar a elementos utilizables directamente, pero también a subproductos que tienen la posibilidad de encontrar aplicación en el campo energético. A cada tipo de biomasa corresponde una tecnología diferente; así, la biomasa sólida, como es la madera, se quema o gasifica, mientras que la biomasa líquida, como aceites vegetales, se utiliza directamente en motores o turbinas, y la biomasa húmeda se puede convertir biológicamente en gas de combustión. En la figura No.11 están clasificados los diferentes tipos de biomasa.

La energía derivada de la biomasa es renovable indefinidamente. Al contrario de las energías eólica y solar, la de la biomasa es fácil de almacenar. En cambio, opera con enormes volúmenes combustibles que hacen su transporte oneroso y constituyen un argumento en favor de una utilización local y sobre todo rural<sup>9</sup>.

---

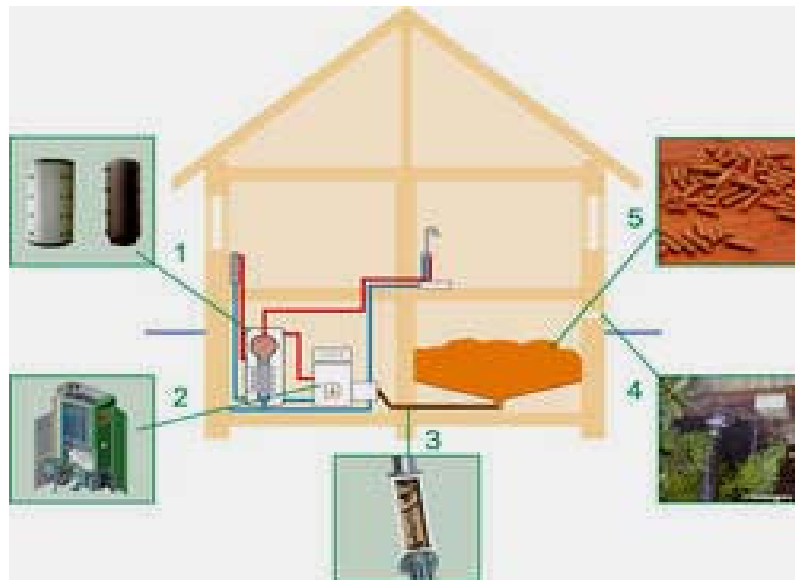
<sup>9</sup> [www.uco.es](http://www.uco.es)

Figura 9. Tipos de Biomasa



Esta forma de combustión es especialmente bien recibida en casas unifamiliares como alternativa a la calefacción por fuel o gas y sin que el usuario tenga que rebajar el confort en cuanto a la entrega o el almacenamiento del combustible. Hoy en día, en Alemania 45.000 hogares usan pellets de madera para la calefacción.

Figura 10. Calefacción con bioenergía. 1) Depósitos. 2) Caldera de pellets. 3) Transporte automático de pellets. 4) Pellets. 5) Suministro de pellets. . [www.randbenergy.com](http://www.randbenergy.com)



En el apartado de los combustibles, la bioenergía representa una alternativa muy prometedora a los combustibles convencionales, como gasolina o diesel. Biodiesel de colza es actualmente el representante más popular en Alemania de los biocombustibles. Aparte de éste, existe el bioetanol, que se genera a través de plantas que contienen azúcar o almidón, o bien paja; metano, que se obtiene de una biomasa lignocelulosa, como p.ej. madera, biogás o de la fermentación de residuos orgánicos, aceites vegetales de colza, girasol u otras varias plantas oleaginosas así como combustibles sintéticos logrados a partir de biomasa (Biomass To Liquid/BTL)<sup>10</sup>.

## 1.7 ENERGÍA EÓLICA

La conversión de la energía del viento en electricidad se realiza por medio de aerogeneradores, con tamaños, que abarcan desde algunos vatios, hasta los 4.000 Kw. Actualmente la capacidad instalada asciende a 7.000 MW, equivalente a siete grandes centrales nucleares. En 1.997 ya era competitiva la producción de electricidad con generadores eólicos de 600 Kw y en lugares donde la velocidad media del viento supera los 7 m/s. Se espera que dentro de unos pocos años también las máquinas grandes (entre 1 y 2 MW) lleguen a ser rentables. La energía eólica no contamina y su impacto ambiental es muy pequeño comparado con otras fuentes energéticas.

---

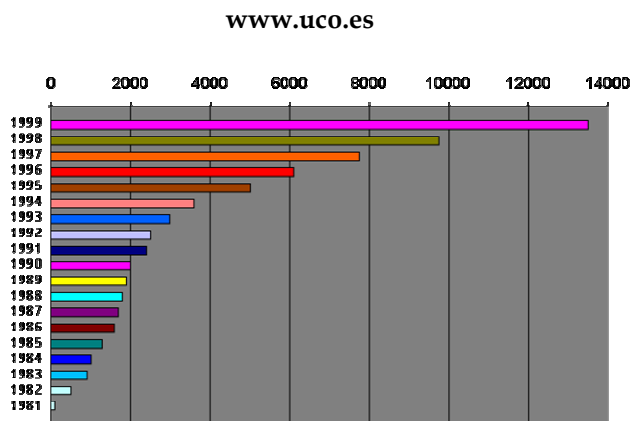
<sup>10</sup> [www.randbenergy.com](http://www.randbenergy.com)

## 2. ENERGÍA EÓLICA

La generación de energía eléctrica sin que exista un proceso de combustión o una etapa de transformación térmica supone, desde el punto de vista medioambiental, un procedimiento muy favorable por ser limpio, exento de problemas de contaminación. Así se suprimen radicalmente los impactos originados por los combustibles durante su extracción, transformación, transporte, combustión, lo cual beneficia la atmósfera, el suelo, el agua, la fauna, la vegetación, etc<sup>11</sup>.

El mayor interés que existe actualmente es la producción de electricidad a partir del viento con el fin de sustituir los costosos y cada vez más escasos combustibles fósiles. En general la energía eólica conjuntamente con otras fuentes de energía no convencionales, tendrán importancia en la contribución al suministro mundial de energía en el futuro, el cual deberá aprovechar todas las fuentes que sean razonablemente utilizables.

Figura 11. Evolución de la potencia eólica instalada en el mundo (en MW). Fuente



<sup>11</sup> www.uco.es

En la figura 11 se hace palpable el avance en la utilización de este tipo de energía en el mundo y como una muestra aun más contundente de la importancia que le han dado los países desarrollados se, pueden ver las cifras en MW instalados en la UE y EU, ver tabla 1 y 2.

**Tabla 1.- Potencia eólica instalada en la Unión Europea a finales de 1999 (en MW). Fuente [www.uco.es](http://www.uco.es)**

<b>País</b>	<b>1998</b>	<b>1999</b>	<b>Crecimiento 98/99</b>	<b>Crecimiento 98/99 en %</b>
Alemania	2.875	4.440	1.565	54,4
Dinamarca	1.450	1.761	311	21,4
España	834	1.478	644	77,0
Holanda	363	406	43	11,8
Reino Unido	334	351	17	5,1
Italia	180	227	47	26,1
Suecia	150	197	47	31,3
Irlanda	63	73	10	15,9
Portugal	60	60	0	0,0
Grecia	39	79	40	102,6
Austria	30	33	3	10,0
Francia	19	24	5	26,0
Finlandia	17	38	21	123,5
Bélgica	8	6	-2	-25,0
Luxemburgo	5	9	4	80,0
<b>Total U.E.</b>	<b>6.427</b>	<b>9.182</b>	<b>2.755</b>	<b>42,8</b>

Tabla 2.- Potencia eólica instalada en el mundo a finales de 1999 (en MW). Fuente [www.uco.es](http://www.uco.es)

Zona geográfica	1998	1999	Crecimiento 98/99	Crecimiento 98/99 en %
Unión Europea	6.427	9.182	2.755	42,8
Resto de Europa	34	47	13	38,0
Total Europa	6.461	9.229	2.768	42,8
EE.UU.	1.770	2.502	732	41,3
Canadá	83	127	44	53,0
México	2	3	1	50,0
Total América del Norte	1.855	2.632	777	41,8
India	968	1.062	94	9,7
China	224	182	-42	-18,8
Otros países asiáticos	43	65	22	51,0
Total Asia	1.235	1.309	74	6,0
Resto del mundo	110	186	76	69,0
Total Mundial	9.661	13.356	3.695	38,2

La energía eólica no contamina, es inagotable y frena el agotamiento de combustibles fósiles contribuyendo a evitar el cambio climático, además es una de las fuentes más baratas, puede competir en rentabilidad con otras fuentes energéticas tradicionales como las centrales térmicas de carbón (considerado tradicionalmente como el combustible más barato) e incluso con la energía nuclear, si se consideran los costos de reparar los daños medioambientales.

En tabla 3, se muestra la polución evitada al medio ambiente, al reemplazar la energía térmica por la eólica, para las turbinas en estudio y para la posible

ubicación de la central. Estudio realizado por Héctor F. Mayito y Graciela A. Ponce para Aeroenergía, Costa Rica.

**Tabla 3. Polución evitada al medio ambiente.**

<b>Determinación de Polución Evitada</b>			
Central Eólica Tejona			
Aerogenerador Micon Modelo M1500_750 KW			
kWh generados: 26.100.000			
Tiempo considerado en años: 1			
<b>Toneladas de contaminantes ahorrados anualmente</b>			
<b>Contaminantes</b>	<b>MÁX (Tn)</b>	<b>MÍN (Tn)</b>	<b>Media (Tn)</b>
Dióxido Sulfúrico	208,80	130,50	169,65
Oxido Nitroso	156,60	78,30	117,45
Dióxido de Carbono	32625,00	19575,00	26100,00
Partículas de Polvo	23,49	10,44	16,97
Cenizas	1827,00	1044,00	1435,50
<b>Total</b>	<b>34840,89</b>	<b>20838,24</b>	<b>27839,57</b>
<b>Toneladas de contaminantes ahorrados mensualmente</b>			
<b>Contaminantes</b>	<b>MÁX (Tn)</b>	<b>MÍN (Tn)</b>	<b>Media (Tn)</b>
Dióxido Sulfúrico	17,40	10,88	14,14
Oxido Nitroso	13,05	6,53	9,79
Dióxido de Carbono	2718,75	1631,25	2175,00
Partículas de Polvo	1,96	0,87	1,41
Cenizas	152,25	87,00	119,63
<b>Total</b>	<b>2903,41</b>	<b>1736,52</b>	<b>2319,96</b>
<b>Toneladas de contaminantes ahorrados semanalmente</b>			
<b>Contaminantes</b>	<b>MÁX (Tn)</b>	<b>MÍN (Tn)</b>	<b>Media (Tn)</b>
Dióxido Sulfúrico	4,35	2,72	3,53
Oxido Nitroso	3,26	1,63	2,45
Dióxido de Carbono	679,69	407,81	543,75
Partículas de Polvo	0,49	0,22	0,35
Cenizas	38,06	21,75	29,91
<b>Total</b>	<b>725,85</b>	<b>434,13</b>	<b>579,99</b>
<b>Toneladas equivalentes de petróleo ahorrado 2244,60</b>			
<b>Metros Cúbicos de Gas Natural ahorrados 2533413</b>			

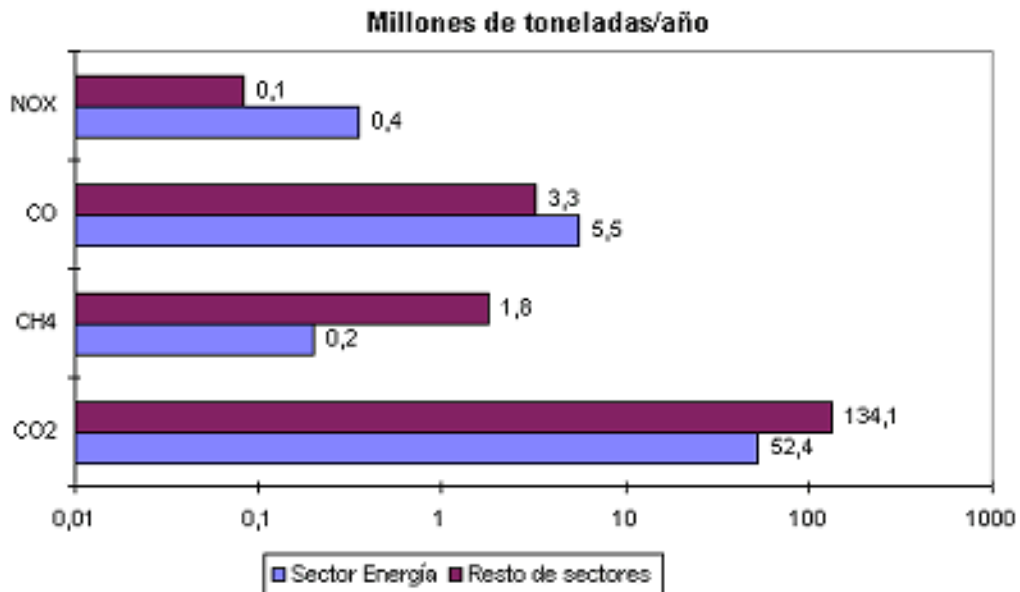
Por estas y otras razones, para el año 2003, se ha proyectado el uso de energía eólica en 30.881 MW instalados en el todo el mundo, lo que demuestra un aumento del 100% con respecto al año 1999, estas cifras están representadas en la siguiente tabla.

**Tabla 4.-Proyección de potencias eólicas suplementarias en el horizonte del año 2003 (en MW). [www.uco.es](http://www.uco.es)**

País	Capacidad instalada finales de 1999	Capacidad Suplementaria 2000-2003	Capacidad instalada finales de 2003
EE.UU.	2.502	1.600	4.102
Canadá	127	400	527
<b>América del Norte (sin México)</b>	<b>2.629</b>	<b>2.000</b>	<b>4.629</b>
Alemania	4.440	3.100	7.540
Dinamarca	1.761	1.050	2.811
España	1.478	3.900	5.378
Holanda	406	750	1.156
Reino Unido	351	925	1.276
Italia	227	550	777
Suecia	197	650	847
Grecia	79	180	259
Irlanda	73	250	323
Portugal	60	150	210
Finlandia	38	175	213
Francia	24	550	274
Otros U.E.	48	200	248
<b>Total U.E.</b>	<b>9.182</b>	<b>12.430</b>	<b>21.612</b>
Resto de Europa	47	750	797
<b>Total Europa</b>	<b>9.229</b>	<b>13.180</b>	<b>22.409</b>
Asia	1.309	1.350	2.659
Resto del mundo	189	995	1.184
<b>Total mundial</b>	<b>13.356</b>	<b>17.525</b>	<b>30.881</b>

Según el Inventario Nacional de Gases, que Producen Efecto Invernadero (INGEI), durante 1990 se emitieron en Colombia 190.1 millones de toneladas de CO<sub>2</sub>, 2 millones de toneladas de CH<sub>4</sub>, 8.8 millones de toneladas de CO y cerca de 570 mil toneladas de óxidos del nitrógeno y compuestos orgánicos volátiles diferentes al metano. La contribución relativa del efecto climático acumulado, sobre un horizonte de 100 años, se reparte básicamente entre el bióxido de carbono (78%) y el metano (20%), ver figura 14<sup>12</sup>.

Figura 12. Emisiones de gases de invernadero 1990 (fuente INGEI)

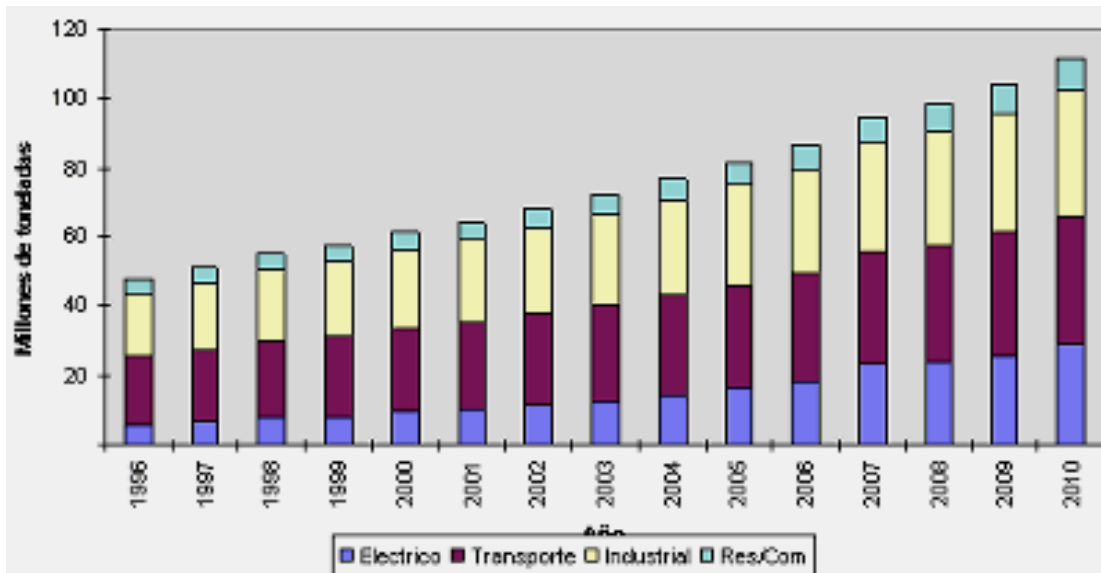


El sector energía es responsable del 27.5% de emisiones de CO<sub>2</sub>, 10% de CH<sub>4</sub>, 63% de CO (80% de nitrógeno y del 100% de compuestos orgánicos diferentes al metano. A pesar de que en el país las emisiones de CO, NO<sub>x</sub>, N<sub>2</sub>O y de compuestos orgánicos volátiles son en su mayoría ocasionadas por las actividades de combustión, su contribución relativa al cambio climático

<sup>12</sup> www.upme.gov.co

global es inferior al 2%. El sector energético incrementará las emisiones de CO<sub>2</sub>, ver figura 10, a una media anual de 6.3% hasta el año 2010, creciendo desde 47.4 millones de toneladas en 1996 hasta 111.3 millones de toneladas en el 2010. Los sectores mayoritarios son el transporte y el sector industrial. El sector eléctrico incrementa su participación desde un 10% en 1996, hasta un 26% en el 2010, debido a la fuerte componente de la expansión térmica. El sector industrial reduce su participación del 38% al 33%, comportándose como un sólido contribuyente, y el sector transporte pasa de 42% hasta 33%<sup>13</sup>.

Figura 13. Emisiones de CO<sub>2</sub> por sectores (fuente UPME)



El análisis de los requerimientos futuros de energía muestra la continuidad de la situación actual de alta dependencia en el petróleo. En el escenario de caso base, que corresponde a la trayectoria energética del país si se mantienen las tendencias y políticas actuales, de manera global la demanda final de energía (sin considerar la leña), crecerá a una media anual del 3.7% en el período 1996-2010. Este crecimiento, que estaría cerca de un punto por debajo

<sup>13</sup> www.upme.gov.co

del crecimiento esperado del PIB (4.6%), estará liderado por el gas natural, con una media anual del 6.7%, la electricidad 4.9%, los derivados del petróleo 3.5% y el carbón 2.7%. En el año 2010, más del 60% de las necesidades de energía del país corresponderán a productos del petróleo y al gas natural.

El potencial energético de Colombia está aún por desarrollar. De entre los recursos fósiles, las reservas probadas de petróleo eran a finales de 1996 de 2800 millones de barriles, con una relación reservas/producción equivalente a 12 años. Estos volúmenes son pequeños si se comparan con las de otros países exportadores de petróleo. Las reservas probadas de gas natural eran 7700 GPC, equivalentes a 46 años a los niveles actuales de producción. Colombia cuenta con las mayores reservas de carbón en Latinoamérica, 6749 Mt de reservas medidas, equivalentes a 220 años de producción<sup>14</sup>.

Las demandas interna y de exportación ejercen sobre los recursos no renovables presiones referentes a su agotamiento en un corto plazo. Esta afirmación es especialmente válida en nuestro país para el petróleo y el gas natural. En el caso del petróleo y para el escenario base, el país será autosuficiente en suministro de crudo hasta el año 2007 cuando, de no contar con nuevos descubrimientos de reservas, se haría necesaria la importación, no solo de gasolina, sino también crecientes volúmenes de crudo, para atender la demanda interna.

Para el gas natural, la creciente demanda por parte de los consumidores finales y los centros de transformación energética (refinerías y generación eléctrica), producirán un rápido deterioro de la relación

---

<sup>14</sup> [www.upme.gov.co](http://www.upme.gov.co)

Reservas/Producción, hasta el punto que en el año 2010, esta será de tan sólo 10 años.

Las soluciones para suministro de electricidad en zonas rurales se han concentrado en la generación de electricidad mediante plantas diesel en zonas no interconectadas y la extensión de redes de distribución rurales. Las plantas diesel presentan costos muy altos, difícil mantenimiento, problemas ambientales y alta indisponibilidad de los equipos. Las redes rurales son también muy costosas debido principalmente a la dispersión y condiciones económicas de los clientes. Es necesario considerar otras opciones tecnológicas para este propósito, así como evaluar alternativas para el uso de energéticos sustitutos en aquellos usos que lo permitan.

Con este panorama es de esperarse que en poco tiempo la crisis energética se acreciente y por ende la busca de soluciones viables y no contaminantes, de tal forma que la Energía Eólica cumple y cumplirá un papel importante para el mundo y por consiguiente para Colombia<sup>15</sup>

---

<sup>15</sup> [www.upme.gov.co](http://www.upme.gov.co)

### 3. AEROGENERADORES

#### 3.1 DESCRIPCIÓN FÍSICA

Los aerogeneradores están dispuestos de tal forma que la captación de la energía del viento sea de la forma mas eficiente, las partes y mecanismos de un aerogenerador se pueden ver en la figura 14 y se describen a continuación:

**3.1.1 Rotor**, del cual hacen parte dos o tres palas, normalmente, un sistema de fijación a la transmisión llamado buje o dado este se conecta al eje de baja velocidad por medio de sistemas de fijación como pernos, chavetas u otros.

**3.1.2 Transmisión**, que esta compuesta por dos ejes de transmisión, una de baja velocidad y otro de alta velocidad, conectados entre si por un par de engranajes que tienen una relación de velocidades apta para obtener una velocidad amplia en el eje de conexión al generador, dicha conexión se hace por medio de un acople.

**3.1.3 Generador**, es el encargado de convertir la energía mecánica de rotación en energía eléctrica, esta conectado a través de un acople al eje de alta velocidad.

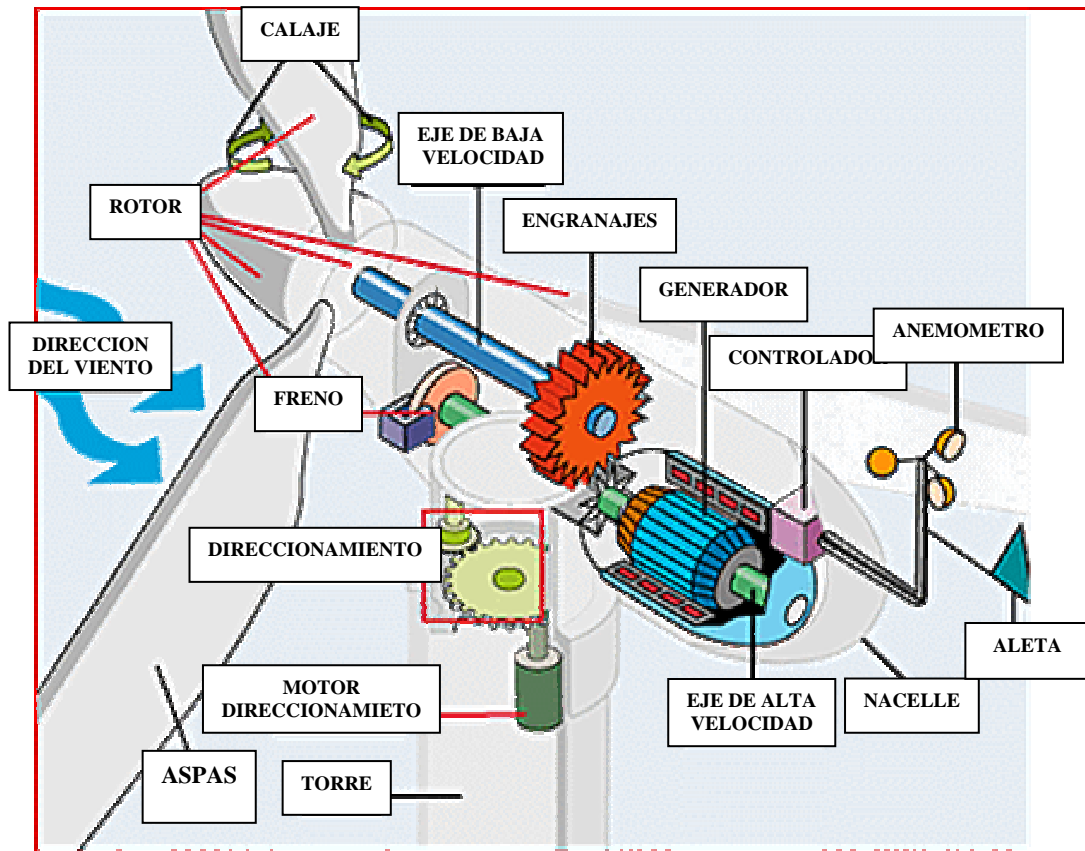
**3.1.4 Nacelle o Góndola**, es la estructura que contiene a la transmisión y al generador y a ella también se conecta el sistema de direccionamiento. Posee una cubierta para aislarla del ambiente.

**3.1.5 Torre,** el nacelle es soportado sobre la torre que erige las palas a la altura de operación del sistema. La torre es el elemento del sistema que soporta todo los sistemas anexos. La salida del generador se conecta a un sistema de acumulación representado por baterías que es exterior al sistema anterior.

**3.1.6 Sistema de Direccionamiento,** para que el rotor siempre este en la dirección del viento se necesita un sistema que lo haga y este sistema esta adaptado al nacelle o góndola. Este consta de una aleta direccional o de un mecanismo mas complejo según las necesidades.

**3.1.7 Sistema de Control,** se adapta según el diseño, al generador o a las aspas para tener un control de la potencia.. Este sistema de control es conectado a aparatos de medida como anemómetros u otros para mejorar el funcionamiento, desde el punto de vista de la eficiencia y también de seguridad.

Figura 14. Partes de un aerogenerador



### 3.2 CARACTERIZACIÓN DE LAS PALAS

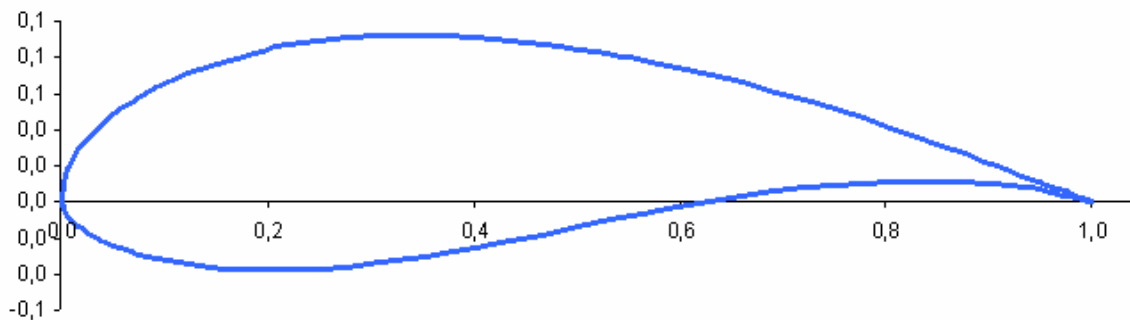
El rotor tiene dos componentes para su diseño: las características geométricas y las características dinámicas. Las características geométricas son determinadas en función de la potencia que queremos obtener y las dinámicas son producto del efecto del viento sobre el rotor. Sin embargo para definir las características del rotor es necesario tener en cuenta los dos aspectos, pues la influencia es recíproca.

**3.2.1 Caracterización geométrica.** La pala geoméricamente está definida por el diámetro del rotor, este diámetro depende directamente de la potencia que se desea obtener. El número de palas tiene que ver con el objetivo, ya sea

velocidad o torque, en el caso de generación eléctrica se necesita la velocidad y esta relacionada con un número de palas bajo, entre 1 y 3 palas, por efectos dinámicos, de vibración es preferible 3.

Las palas tienen una forma determinada, que le permite tener un comportamiento aerodinámico que es el perfil. El perfil es la forma aerodinámica que se observa al hacer un corte transversal sobre un punto de la pala. El perfil está definido por: la cuerda, el espesor, el borde de ataque y el borde de salida. La cuerda es la línea que une los dos bordes; el borde de ataque es la forma curva del perfil; el borde de salida es la forma más afilada del perfil y el espesor es la dimensión que lo hace más robusto o más delgado. En la figura 15, las coordenadas (0,0) son para el borde de ataque; (0,1) es la coordenada para el borde de salida; la línea recta que va de las coordenadas (0,0) hasta (0,1) es la cuerda del perfil y el espesor es la robustez que tiene el perfil en el 20% de la cuerda, para casi todos los tipos de perfiles.

**Figura 15. Cuerda de un Perfil**



Los perfiles tienen una forma determinada, esta forma está definida por diferentes autores y son el resultado de pruebas experimentales obtenidas para alas de avión. Se conocen varios tipos de perfiles como son los de la serie NACA, Wortmann (FX) o Liebeck, Whitcomb, tipo vela, S-8 gruesos, DOE-SERI. Los dos últimos perfiles son diseñados específicamente para

aplicaciones de turbinas eólicas, sin embargo los mas utilizados son los NACA y Wortmann. Normalmente se utilizan perfiles planos convexos o biconvexo asimétricos, que son aplicados en las diferentes denominaciones y se observan en la figura 15 y 16.

Figura 16. Perfil biconvexo asimétrico

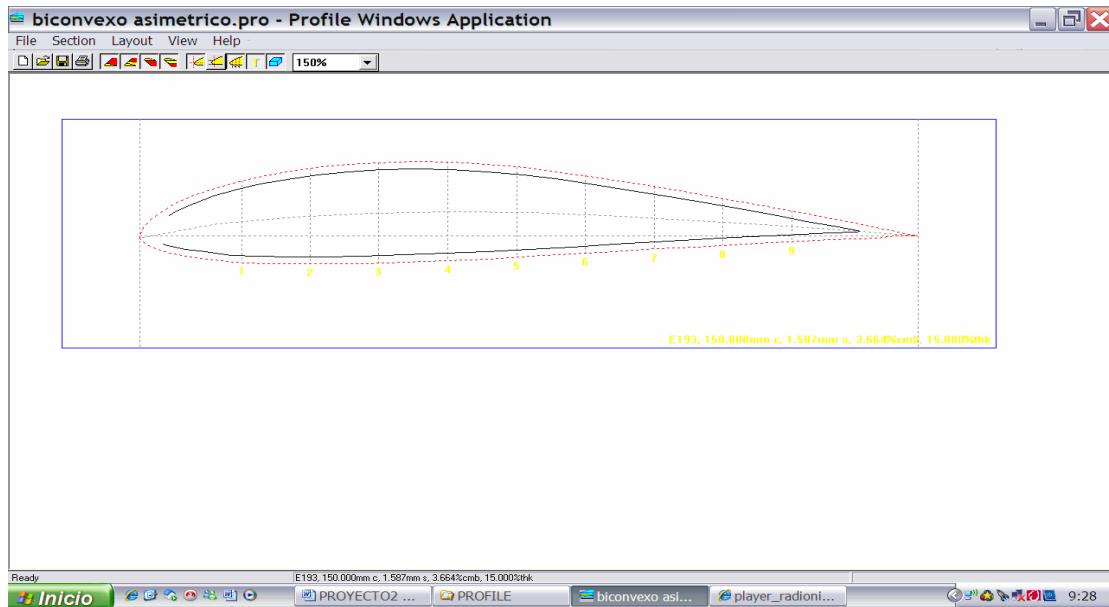
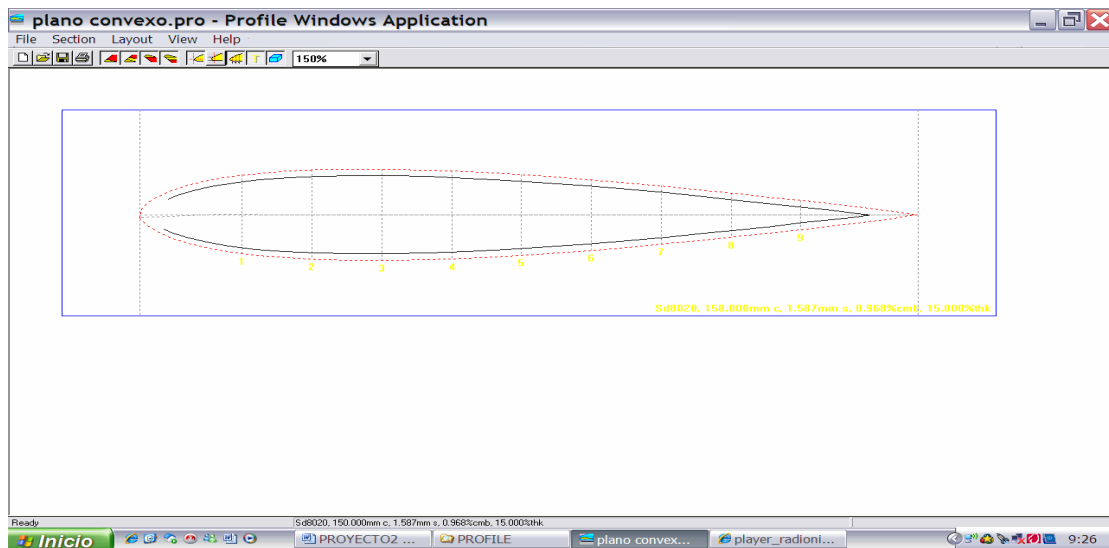


Figura 17. Perfil plano convexo



El perfil se caracteriza también, si se somete a la acción del viento y el perfil se deja estático, por generar una resultante,  $R$ , perpendicular a la cuerda.  $R$  es el producto de una fuerza ascensional,  $F_{asc}$  y de arrastre,  $F_{arr}$ . El eje  $x$  es paralelo a la dirección del viento. Y  $\alpha$  el ángulo de la cuerda con la dirección del viento.

Figura 18. Fuerzas de arrastre y ascensional en un perfil fijo. Pedro Fernández Díez

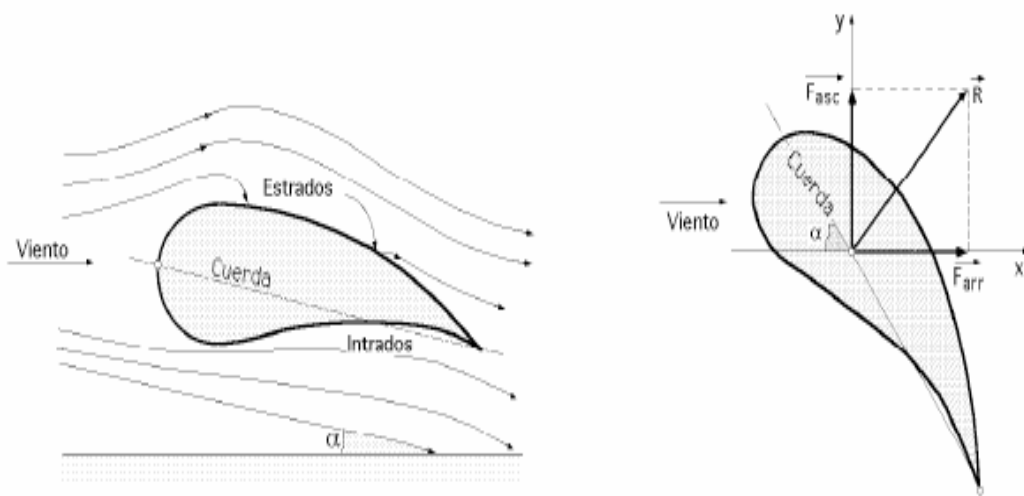
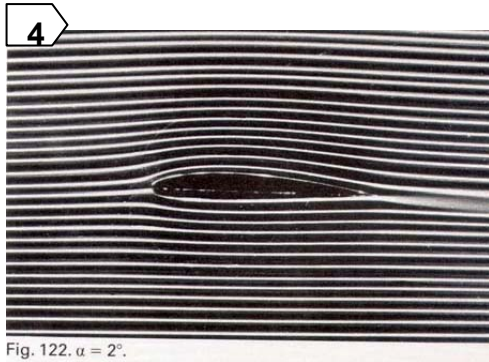
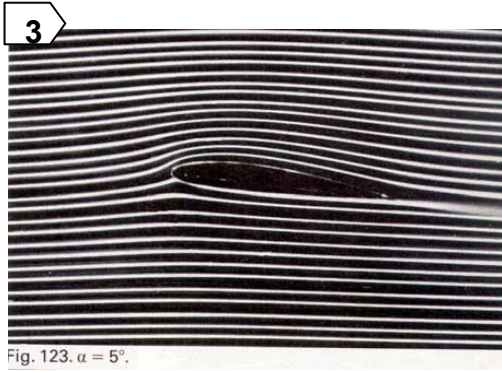
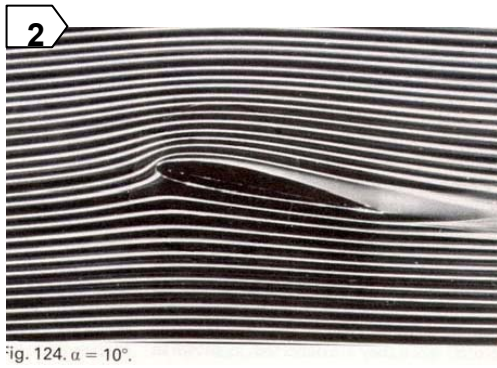
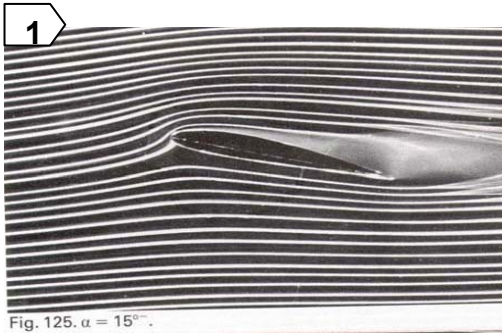
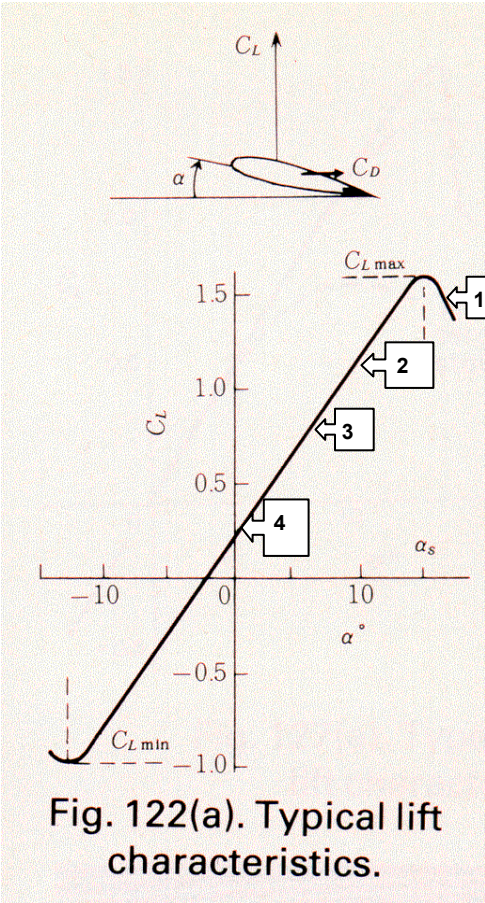


Figura 19. Diferentes ángulos de ataque para un perfil NACA 4412,  $v= 8 \text{ m/s}$ ,  $\text{Re}=2.1 \times 10^5$



En la figura 18 se observa el comportamiento y la curva característica típica de un perfil estático sometido a la acción del viento en un túnel del viento, se puede observar que al aumentar  $\alpha$  el  $C_L$ , coeficiente de sustentación o también  $C_y$ , aumenta. Para el caso de una turbina eólica la relación de  $C_L$  o  $C_y$ , sobre  $C_D$  o  $C_x$ , o coeficiente de arrastre,  $(C_y/C_x)$  debe ser la mayor. Las actuaciones de las aeroturbinas mejoran al aumentar el parámetro de eficiencia aerodinámica de los perfiles utilizados  $C_y/C_x$ .

Perfiles convencionales como los de la serie 230XX, 44XX o NACA6 tienen valores  $C_y/C_x$  en el intervalo 100- 120 con un  $C_y$  de operación de 1.0 - 1.1. Perfiles avanzados como Wortmann o Liebeck tienen  $C_y/C_x$  por encima de 150 y  $C_y$  de operación de 1.5. Perfiles Whitcomb muestran  $C_y/C_x$  de 85 a 90 para  $C_y$  de 0.8.

**3.2.2 Caracterización dinámica.** El perfil en acción con el viento y al estar en movimiento de rotación, tiene unas características geométricas que definen los ángulos que tiene la cuerda respecto a la velocidad real, aparente y con el plano de rotación. En la figura 17 se puede ver dicha geometría.  $\beta$  = ángulo que forma una cuerda del perfil con el plano de rotación; es el *ángulo de calaje* o de inclinación (cuerda/u).  $\alpha$  = ángulo que forma la cuerda del perfil con la velocidad aparente del viento  $c$ , *ángulo de incidencia o de ataque*. ( $\gamma$  = ángulo que forma el plano de rotación con la dirección aparente del viento que pasa por el borde de ataque; se conoce como ángulo aparente del viento.

---

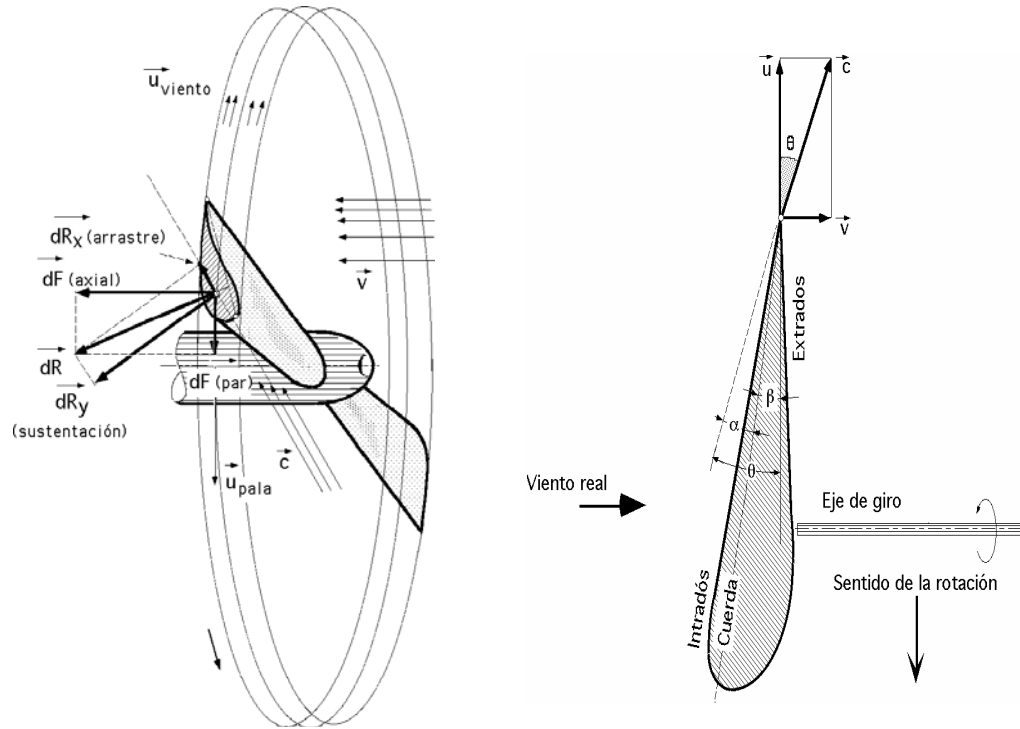
<sup>16</sup> <http://personales.ya.com/universal/TermoWeb/index.html>

**Figura 20. Geometría de una pala de un aerogenerador. Pedro Fernández Díez**

$\beta$  = ángulo que forma una cuerda del perfil con el plano de rotación; es el *ángulo de calaje* o de inclinación (cuerda/u).

$\alpha$  = ángulo que forma la cuerda del perfil con la velocidad aparente del viento  $c$ , *ángulo de incidencia* o *de ataque*.

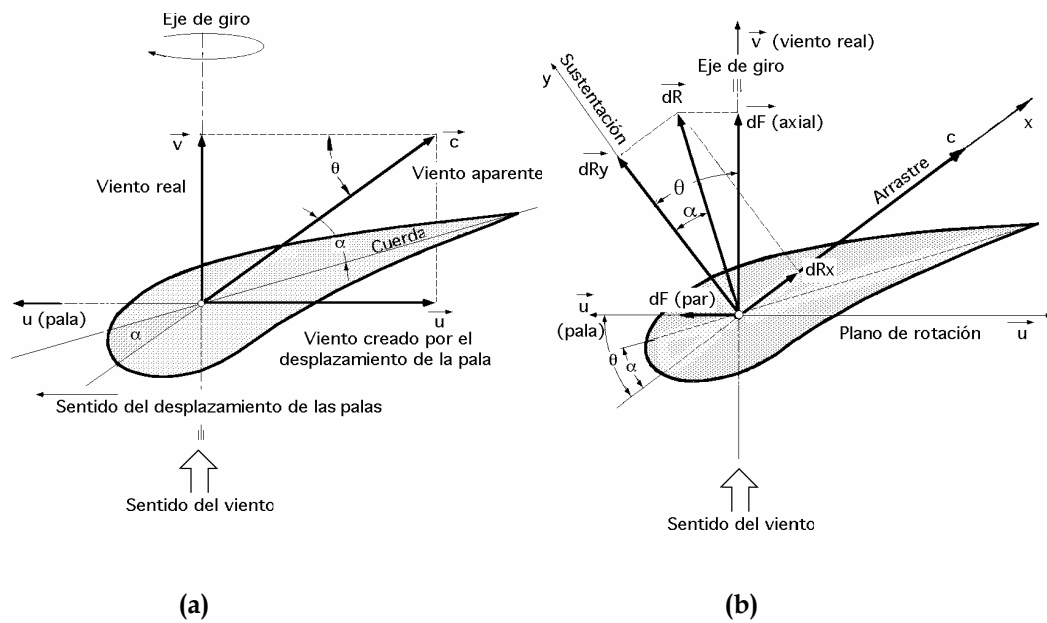
$\theta$  = ángulo que forma el plano de rotación con la dirección aparente del viento que pasa por el borde de ataque; se conoce como *ángulo aparente del viento*



Al recibir el movimiento producto del viento la pala tiene un comportamiento, dependiendo del diámetro del rotor el efecto del viento es variable. A gran diámetro el comportamiento del viento es diferente entre la punta y la raíz de la pala, a menor diámetro el comportamiento es mas parejo. Sin embargo esta variación da origen a las teorías dinámicas que se utilizan para determinar el comportamiento aerodinámico de la pala. Una de ellas es la teoría de la punta de pala o TSR ( Tip Speed Ratio). Cuando las palas giran, su movimiento induce una velocidad del aire igual y de sentido contrario al del giro de estas. Estas velocidades a causa del giro de las palas va variando

desde el cubo de la turbina hasta la punta de las palas. El viento que incide sobre las palas es el resultado de sumar el viento natural ( $v$ ) y el viento inducido por el giro de las palas ( $U$ ). Es importante conocer bien la dirección de este viento relativo ( $c$ ), ya que esto permite determinar el ángulo de calaje de las palas, que es una de las principales características de las palas de una turbina eólica. En la figura 18a se puede observar la conformación de las velocidades sobre el perfil.<sup>17</sup>

Figura 21. a) Velocidades b) Fuerzas



Las fuerzas producidas en un elemento de pala se muestran en la figura 18b, las cuales están relacionadas con la fuerza de arrastre,  $F_{arr}$  y de sustentación,  $F_{asc}$ , que son características de cada perfil, figura 16. Estas fuerzas de arrastre y ascensional producen la fuerza que genera el movimiento de rotación  $dF_{(par)}$  y la fuerza que ejerce una acción axial sobre el eje de la turbina,  $dF_{(axial)}$ .

<sup>17</sup> <http://personales.ya.com/universal/TermoWeb/index.html>

**3.3.3 El Cubo:** Es el elemento de conexión entre la transmisión de la turbina y las palas, el diseño es muy variado y critico, pues la pala se comporta como una viga empotrada, toda la zona critica se encuentra en la raíz, la cual se une al cubo en este punto. Dependiendo del tamaño de la turbina el cubo adquiere una dimensión. Se utilizan conexiones en forma de bridas en grandes turbinas, para el caso de turbinas de baja potencia la disposición depende del criterio del diseñador.

**Figura 22. Cubo: Disco y buje. Palas montadas en el Dado, con cubierta**



Como parte adicional se utiliza una cubierta en la parte frontal del cubo que sirve para un mejor comportamiento aerodinámico y también mejora la parte estética y visual.

### 3.3 TRANSMISIÓN

La transmisión es definida por el generador que se utilice, en el caso de grandes turbinas es necesario que la transmisión tenga uno o varios engranajes, caja de velocidades, para aumentar la velocidad del eje que se une con el generador y además para controlar la variación del viento, en algunos casos.

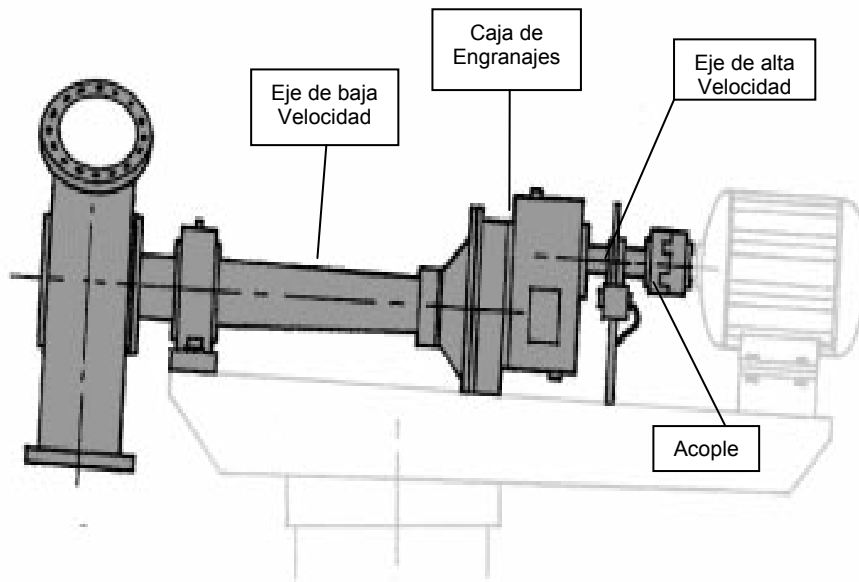
**Figura 23. Acople, conector entre el eje de alta velocidad y el generador.**



Para las pequeñas turbinas no es necesario en todos los casos los engranajes, pues es común utilizar generadores de imanes permanentes, GIP, que generan a velocidades relativamente bajas. Bajo estas condiciones la

transmisión consta de dos ejes, uno de alta velocidad y otro de baja velocidad y una caja de velocidades, cuya complejidad depende de las necesidades.

**Figura 24. Partes del sistema de Transmisión.**



### 3.4 LOS GENERADORES

El generador es una de las partes más importantes de los aerogeneradores, ya que su misión es la de transformar la energía de rotación en energía eléctrica. Tanto las dinamos (generadores de corriente continua) como el alternador se basan en el movimiento relativo de una bobina y un campo magnético, de forma que se produce una corriente eléctrica. Hay una gran variedad de dinamos y alternadores: Su diseño, construcción, potencia y otras características, son muy importantes, desde la de una de bicicleta hasta una de las grandes centrales, pasando por los generadores de autos, camiones, motos, etc.

### 3.4.1 Clasificación de los generadores

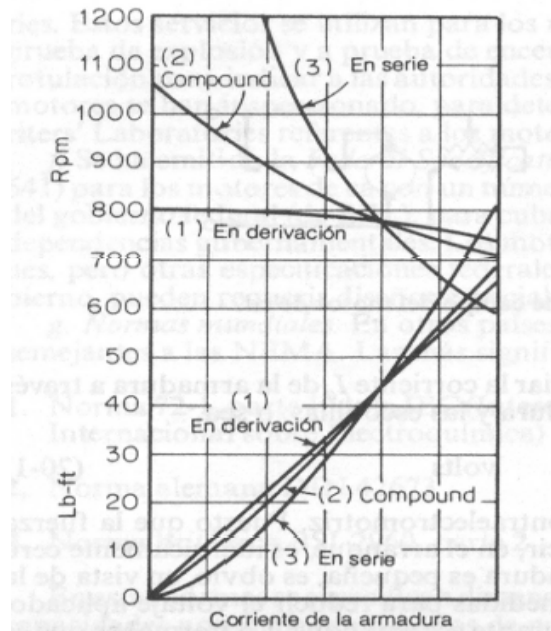
- **Generadores de corriente continua o dínamos.** Un dínamo es un generador eléctrico de corriente continua (su corriente siempre circula en el mismo sentido), que transforma la energía mecánica que recibe por su eje en energía eléctrica que suministra por sus bornes. Una dínamo esta formada básicamente por dos partes: la que gira, llamadas roto; constituida por el inducido y el colector, y la que esta quieta, llamada estator, que lleva las bobinas inductoras. La dínamo produce corriente al inducido, producida por el giro del mismo dentro del campo magnético creado por las bobinas inductoras del estator. Esta corriente sale del inducido por las escobillas que rozan sobre el colector. El colector esta formado por piezas de cobre aisladas eléctricamente entre ellas. Las dinamos tienen dos circuitos: el del inducido y el de las bobinas inductores. No obstante solo tienen tres bornes de conexión: el positivo (+), el negativo o masa (-) y el de excitación (Ex). Esto se debe a que la escobilla negativa, va unida al terminal negativo de las bobinas inductoras.

Cuando un dínamo funciona, se crea corriente al inducido y sale de este por las escobillas. Una parte de esta corriente, se hace pasar por las bobinas inductoras, para mantener el campo magnético creado por estos. Las bobinas inductoras son electroimanes, y por tanto, como más intensa sea la corriente que circula por ellos, más intenso es el campo creado. Sí el dinamo esta parado también tienen un poco de magnetismo, gracias a él cuando empieza a girar el dínamo, se produce una pequeña corriente que se hace pasar por las bobinas inductoras, con el que aumenta el voltaje.

Este proceso se llama auto-excitación. Funcionan normalmente a voltajes bajos para evitar las chispas que se producen entre las escobillas y el conmutador a voltajes altos. El potencial más alto que pueden desarrollar suele ser de 1500 v. Utilizan armaduras de tambor formadas por un gran número de bobinas agrupadas longitudinalmente en el núcleo de esta. La corriente que producen las bobinas de la armadura es prácticamente constante. Los generadores modernos están equipados con cuatro o más polos electromagnéticos que aumentan el tamaño y la resistencia del campo magnético.

Las dinamos se clasifican según el método que utilizan para proporcionar corriente del campo que excita los imanes del mismo, donde constan cuatro grupos: Generadores con excitación independiente en este tipo de generador, la tensión en los bornes es casi independiente de la carga de la máquina y de su velocidad, ya que la tensión se puede regular por medio del reóstato de campo. Generadores excitados en serie tienen su campo conectado en serie respecto de la armadura. Generadores de excitación en derivación (shunt) tienen su campo conectado en paralelo respecto la armadura. Generadores de excitación combinada (compound) tienen partes de sus campos conectados en serie y otros en paralelo. Los dos últimos tipos de generadores mencionados anteriormente tienen la ventaja de proporcionar un voltaje relativamente constante, mientras que, el de excitación en serie se utiliza sobretodo para proporcionar un corriente constante a voltajes variables.

Figura 25. Características del generador de corriente continua<sup>18</sup>.



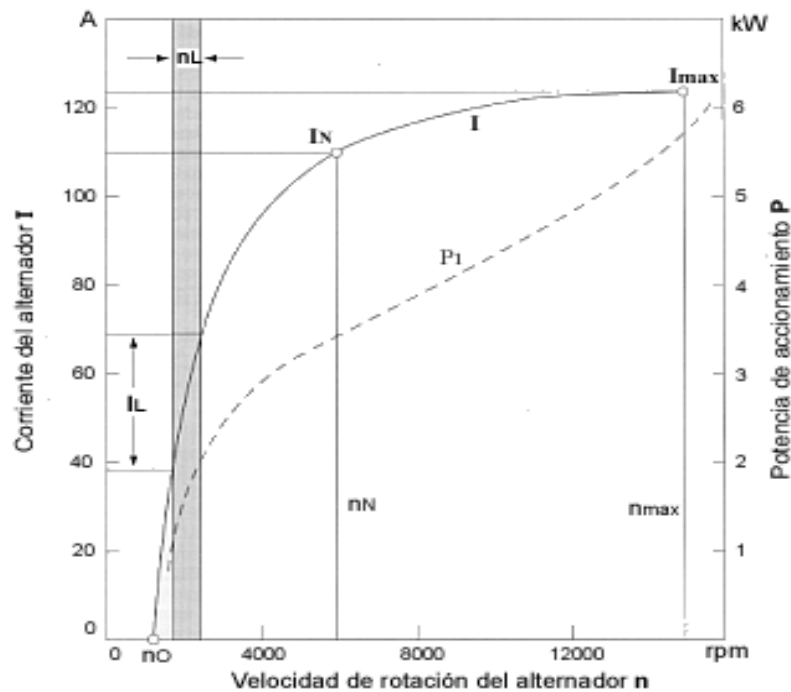
- **Generadores de corriente alterna.** Un alternador es un generador eléctrico de corriente alterna (la corriente va cambiando de sentido), que transforma la energía mecánica que recibe por el eje, en energía eléctrica que suministra por los bornes. En estos tipos de generadores el inducido es el estator y los inductores el rotor. El campo magnético creado por roto se puede originar de dos formas diferentes: mediante la corriente eléctrica a través de bobinas, o utilizando imanes permanente. Los alternadores del primer tipo son los de vehículos, mientras que los alternadores de imanes permanentes pueden encontrarse las "dínamos" de bicicleta, el plato magnético de una moto, etc.

Hay varios tipos de alternadores, como por ejemplo los que se nombran a continuación:

<sup>18</sup> <http://html.rincondelvago.com/generadores-y-motores-de-corriente-continua.html>

a) Alternadores síncronos. Estas maquinas se usan para la producción de corriente alterna a 120 V, 220 V, o más y su potencia va de 600 W hacia arriba. Se trata de generadores lentos, pesados, muy sólidos y que requieren poco mantenimiento. En su eje lleva acoplado una dinamo, la corriente de la cual se utiliza por activar la bobina inductora del alternador. También los alternadores para autos son generadores síncronos trifásicos que en principio generan corriente alterna, como se sabe el automóvil funciona con corriente continua, para solucionar este inconveniente se incorpora un puente de diodos en el alternador que tiene como misión convertir la corriente alterna en corriente continua. Además el alternador debe ir acompañado de un regulador de tensión que se encargara de estabilizar la tensión que proporciona en un valor fijo que será de 12V, para turismos y 24V. para vehículos industriales.

Figura 26. Curva característica de un alternador  
<http://mecanicavirtual.iespana.es/alternador.htm>



- b) Alternadores asíncronos. Los motores trifásicos de inducción se pueden utilizar como generadores, por acoplamiento de un grupo trifásico de condensadores. Las principales ventajas de este generador son que no tienen escobillas y que son muy robustos, por lo tanto casi no tiene averías. Su simplicidad en su funcionamiento y el bajo costo, lo hacen ideal en las instalaciones de cierta importancia, por cargar baterías de 110 o 220V. El motor trifásico se comporta como un generador gracias al grupo trifásico de condensadores acoplado a él. De esta forma, al girar el motor, el magnetismo permanente, con la ayuda de los condensadores, dan lugar al proceso de autoexcitación, parecido a lo que pasa en los dínamos.
- c) Alternadores lentos. A partir de un motor trifásico de rotor bobinado se puede construir un alternador auto-excitado lento, cambiando el bobinado del roto sin cambiar el bobinado del estator. El nuevo bobinado ha de formar tanto polos como los que tenía el motor anteriormente. El bobinado se construye de forma que vaya todo en serie, y el consumo de excitación sea pequeño. De esta forma conseguiremos un alternador de auto excitación lento.
- d) Alternadores de imanes permanentes. Tal y como indica su nombre, son alternadores que en su rotor tienen imanes permanentes, por lo tanto, son generadores sin escobillas ni bobinas inductoras, por esto, prácticamente no tienen averías. No se les puede regular el campo magnético creado por los imanes por lo que tienen una intensidad de salida limitada, que de la cual no se puede sobrepasar, excepto que se

le acoplen condensadores. Por ejemplo son alternadores de imanes permanentes les dinamos de bicicleta.<sup>19</sup>

1) Los generadores simples sin conmutadores producen un corriente eléctrico que cambia de dirección a medida que gira la armadura.

2) Es ventajosa para la transmisión de potencia eléctrica.

3) Se diferencia de los generadores de corriente continua en dos aspectos: Los extremos de las bobinas de su armadura están sacados de los anillos colectores sólidos sin segmentos del árbol del generador, en lugar de los conmutadores. Las bobinas de campo se excitan mediante una fuente externa de corriente continua.

4) Los alternadores se construyen con una armadura fija donde gira un rotor compuesto de un número de imanes de campo.

### **3.5 ACUMULADORES**

Se le llama batería eléctrica, acumulador eléctrico o simplemente acumulador, al dispositivo que almacena energía eléctrica usando procedimientos electroquímicos y que posteriormente la devuelve casi en su totalidad; este ciclo puede repetirse por un determinado número de veces. Se trata de un generador eléctrico secundario, es decir, de un generador que no puede funcionar sin que se le haya suministrado electricidad previamente mediante lo que se denomina proceso de carga. También se le suele denominar batería puesto que, muchas veces, se conectan varios de ellos en serie, para aumentar

---

<sup>19</sup> <http://mecanicavirtual.iespana.es/alternador.htm>

el voltaje suministrado. Así la batería de un automóvil está formada internamente por 6 elementos acumuladores del tipo plomo-ácido, cada uno de los cuales suministra electricidad con una tensión de unos 2 V, por lo que el conjunto entrega los habituales 12 V o por 12 elementos, con 24 V para los camiones.<sup>20</sup>

Figura 27. Acumuladores<sup>21</sup>



**3.5.1 Acumulador de plomo.** Está constituido por dos electrodos de plomo que, cuando el aparato está descargado, se encuentra en forma de sulfato de plomo ( $\text{PbSO}_4$ ) incrustado en una matriz de plomo metálico (Pb); el electrolito es una disolución de ácido sulfúrico. Este tipo de acumulador se sigue usando aún en muchas aplicaciones, entre ellas en los automóviles.

**3.5.2 Batería alcalina.** También denominada de ferroníquel; sus electrodos son láminas de acero en forma de rejilla con panales rellenos de óxido níqueloso (NiO), que constituyen el electrodo positivo, y de óxido ferroso (FeO) el negativo, estando formado el electrolito por una disolución de potasa cáustica (KOH). Durante la carga se produce un proceso de oxidación

<sup>20</sup> [http://es.wikipedia.org/wiki/Bater%C3%ADa\\_el%C3%A9ctrica](http://es.wikipedia.org/wiki/Bater%C3%ADa_el%C3%A9ctrica)

<sup>21</sup> <http://www.enalmex.com/paginas/baterias.htm>

anódica y otro de reducción catódica, transformándose el óxido níqueloso en níquelico y el óxido ferroso en hierro metálico. Esta reacción se produce en sentido inverso durante la descarga.

**3.5.3 Baterías Níquel-Cadmio (Ni-Cd).** Utilizan un ánodo de hidróxido de níquel y un cátodo de un compuesto de cadmio. El electrolito es de hidróxido de potasio. Esta configuración de materiales permite recargar la batería una vez está agotada para su reutilización. Cada célula de NiCd puede proporcionar un voltaje de 1,2 V y una capacidad entre 0,5 y 2,3 Ah. Sin embargo, su densidad de energía es de tan sólo 50 Wh/kg, lo que hace que tengan que ser recargadas cada poco tiempo. También se ven afectadas por el efecto memoria.

### **3.6 REGULACIÓN**

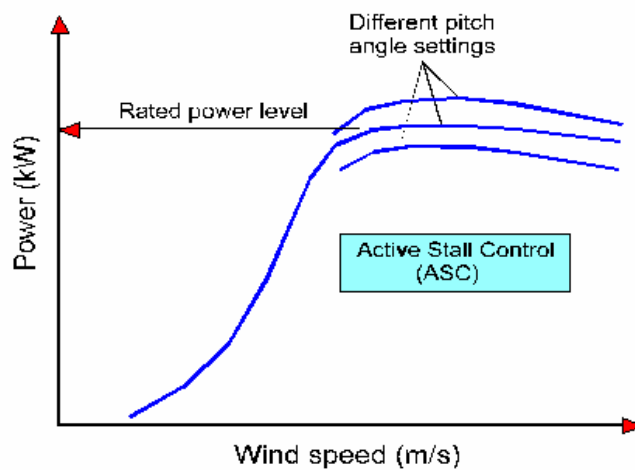
Los aerogeneradores tienen que disponer de sistemas de regulación para impedir que vientos extremadamente violentos puedan dañarlos. Por otra parte, a veces interesa establecer sistemas que permitan una arrancada con velocidades suaves del viento, para así aprovechar mejor el potencial eólico. Los sistemas de regulación tienen la misión de controlar las revoluciones y el par motor al eje del roto, evitan las fluctuaciones producidas por las variaciones de la velocidad del viento.

Los sistemas de regulación más simples trabajan solamente en las etapas de exceso de potencia, evitando velocidades de giro muy altas, que podrían poner en peligro la integridad de las turbinas. Se usan solo en máquinas de

una potencia baja y, en general, en grupos autónomos, en los que son aceptables variaciones de potencia en salida.

Los sistemas más elaborados mantienen las fluctuaciones en la velocidad de rotación dentro de un margen muy estrecho, y aun existe un tercer nivel de regulación que permite al sistema adaptarse a cualquier condición del viento y de potencia, incluidos los correspondientes a las operaciones de puesta en marcha.

Figura 28. Control por pérdida aerodinámica, stall control.

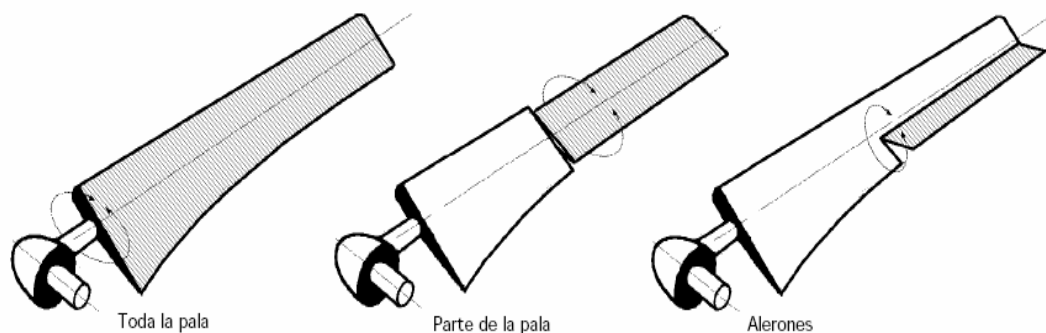


Los dos grupos de sistemas de regulación vienen definidos por su forma de actuación, en unos el control se realiza sobre el rotor, aumentando o disminuyendo la potencia absorbida. En las otras regulaciones se llevan a cabo sobre el eje motor.

Existen dos tipos de regulación de la potencia y por ende de la velocidad de rotación de las aspas, una que se hace por variación del ángulo de paso, pitch control, y la segunda por pérdida aerodinámica o stall control.

En un aerogenerador de regulación por cambio del ángulo de paso, el controlador electrónico de la turbina comprueba varias veces por segundo la potencia generada. Cuando ésta alcanza un valor demasiado alto, el controlador envía una orden al mecanismo de cambio del ángulo de paso, que inmediatamente hace girar las palas del rotor ligeramente fuera del viento. Y a la inversa, las palas son vueltas hacia el viento cuando éste disminuye de nuevo. Así pues, las palas del rotor deben ser capaces de girar alrededor de su eje longitudinal (variar el ángulo de paso).<sup>22</sup>

**Figura 29. Control del ángulo de calaje de las palas, pitch control. Pedro Fernández Díez**



El diseño de aerogeneradores controlados por cambio del ángulo de paso requiere una ingeniería muy desarrollada, para asegurar que las palas giren exactamente el ángulo deseado. En este tipo de aerogeneradores, el ordenador generalmente girará las palas unos pocos grados cada vez que el viento cambie, para mantener un ángulo óptimo que proporcione el máximo rendimiento a todas las velocidades de viento. El mecanismo de cambio del ángulo de paso suele funcionar de forma hidráulica.

---

<sup>22</sup> <http://personales.ya.com/universal/TermoWeb/index.html>

### 3.7 TORRE

La torre es elemento que sostiene y soporta la mayor parte de la carga que ejerce el viento sobre el sistema, dependiendo de la altura de la torre, de la carga instalada y por consiguiente del diámetro de las palas se elige el tipo de torre que habrá de soportar el sistema. Adicionalmente se piensa en la complejidad de la instalación o montaje según las herramientas con las que se cuenta y el acceso al lugar. Hay varias clases de torres; torres tubulares, torres en celosía, torres en mástil con cables de tensado y las mixtas, que son una mezcla de las anteriores.

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

**Figura 30. Torres Tubulares**



**3.7.2 Torres en Celosía.** Las torres de celosía son fabricadas utilizando perfiles de acero soldados. La ventaja básica de las torres de celosía es su costo, puesto que una torre de celosía requiere sólo la mitad de material que una torre tubular sin sustentación adicional con la misma rigidez. La principal desventaja de este tipo de torres es su apariencia visual (aunque esa cuestión es claramente debatible). En cualquier caso, por razones estéticas, las torres de celosía han desaparecido prácticamente en los grandes aerogeneradores modernos.

**Figura 31. Torres en Celosía.**



**3.7.3 Torres de Mástil.** Muchos de los aerogeneradores pequeños están contruidos con delgadas torres de mástil sostenidas por cables tensores. La ventaja es el ahorro de peso y, por lo tanto, de costo. Las desventajas son el difícil acceso a las zonas alrededor de la torre, lo que las hace menos apropiadas para zonas agrícolas. Finalmente, este tipo de torres es más propensa a sufrir actos vandálicos, lo que compromete la seguridad del conjunto.

**Figura 32. Torre de Mástil**



**3.7.4 Torres Mixtas.** Algunas torres están hechas con diferentes combinaciones de las ya mencionadas. Un ejemplo es la torre de tres patas Bonus 95 kW de la fotografía, de la que podría decirse que es un híbrido entre una torre de celosía y una torre tensada con vientos.

**Figura 33. Torre Mixta**



Generalmente, es una ventaja disponer de una torre alta en zonas con una elevada rugosidad del terreno, dado que la velocidad del viento aumenta conforme nos alejamos del suelo. Las torres de celosía y las de mástil tensado con vientos tienen la ventaja de ofrecer menos abrigo que una torre maciza.<sup>23</sup>

---

<sup>23</sup> [www.windpower.dk](http://www.windpower.dk)

## 4. DISEÑO Y SELECCIÓN

### 4.1 ESTUDIO DEL VIENTO

El desarrollo del diseño del SICOE parte de la necesidad del viento como fuente de energía, para esto es necesario determinar el lugar de emplazamiento de la turbina, definido por el potencial eólico, o sea, la velocidad, dirección y constancia del viento en el lugar proyectado para instalar la turbina. El lugar de emplazamiento se determina en primer lugar por simple inspección y conocimiento de sensación de viento en el lugar. Para esto se hace una visita al lugar y se observan detalles como la dirección que tiene la vegetación. En la foto se puede observar la tendencia de las ramas del árbol. Esta observación preliminar sirve de punto de partida para hacer las medidas con un anemómetro de cazoletas.

**Figura 34. Vegetación en el lugar de emplazamiento.**



Los resultados tomados de la velocidad del viento y dirección, con un anemómetro en el sitio determinado para el emplazamiento del SICOE, fueron obtenidos en la vereda El Guayabal, Finca La Bonita, municipio de Piedecuesta, ver el mapa. Y los datos fueron los siguientes:

Figura 35. Mapa de ubicación del lugar de emplazamiento del SICOE

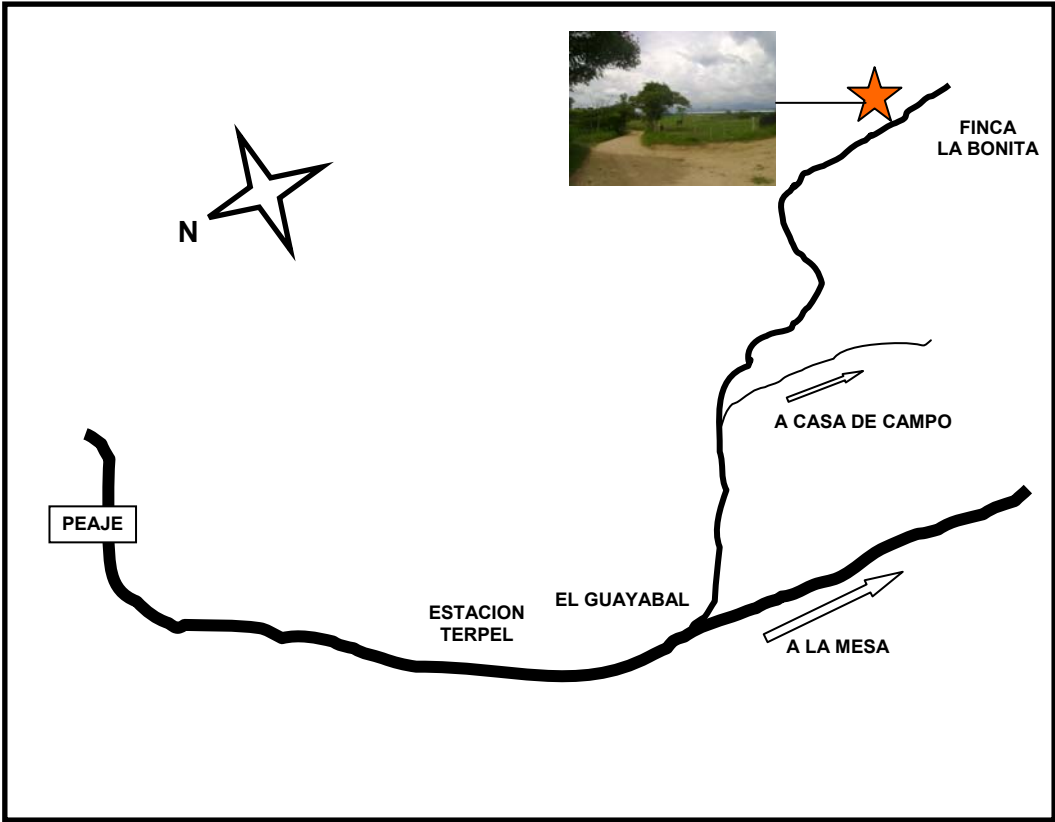


Tabla 5. Velocidades del viento, para cinco días, datos tomados en la finca La Bonita,  
Mesa de los Santos.

HORA	DIRECCION	V1 m/s	V2 m/s
09:00	E	2,01	2,35
09:30	E	3,32	3,88
10:00	SO	2,01	2,35
10:30	O	1,54	1,8
11:00	NO	3,1	3,62
11:30	NO	4,5	5,26
12:00	NO	4,5	5,26
13:30	NO	7,05	8,24
14:00	NO	8,84	10,34
14:30	NO	7,19	8,41
15:00	NO	6,86	8,02
15:30	NO	6,95	8,13
16:00	NO	8,34	9,75
16:30	NO	5,4	6,31
17:00	NO	5,55	6,49
18:00	NO	5,97	6,98
18:30	NO	6,97	8,15
<b>15/02/2006</b>			<b>5,7112</b>

HORA	DIRECCION	V1 m/s	V2 m/s
08:00	SO	0,98	1,14
09:00	SE	2,34	2,73
09:30	SO	2,76	3,22
10:00	SO	3,54	4,14
10:30	NO	3,04	3,55
11:00	O	2,71	3,17
11:30	NO	4,52	5,28
12:00	O	3,63	4,24
12:30	SO	2,34	2,73
13:00	NO	6,47	7,56
13:30	NO	7,36	8,61
14:00	NO	10,5	12,28
14:30	NO	10,1	11,81
15:00	NO	9,11	10,65
15:30	NO	8,31	9,72
16:00	NO	8,42	9,85
16:30	NO	5,85	6,84
<b>16/02/2006</b>			<b>5,838</b>

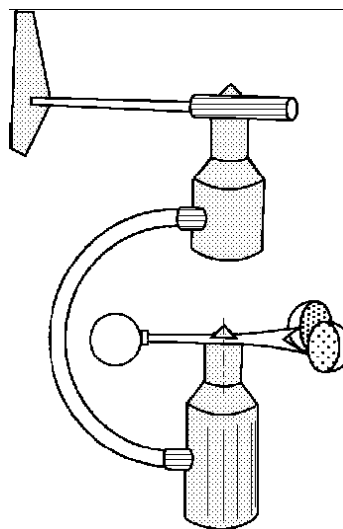
HORA	DIRECCION	V1 m/s	V2 m/s
10:30	SE	3,49	4,08
11:00	NO	3,63	4,24
11:30	NO	4,1	4,79
12:00	NO	7,36	8,61
12:30	NO	8,06	9,42
13:00	NO	8,53	9,97
13:30	NO	8,65	10,11
14:00	NO	9,56	11,18
14:30	NO	8,65	10,11
15:00	NO	8,75	10,23
15:30	NO	9,11	10,65
16:00	NO	7,83	9,16
16:30	NO	8,17	9,55
17:00	NO	5,19	6,07
17:30	NO	7,61	8,9
18:00	NO	7,3	8,54
<b>18/02/2006</b>			<b>7,78</b>

HORA	DIRECCION	V1 m/s	V2 m/s
10:00	NO	2,43	2,84
10:30	NO	2,9	3,39
11:00	NO	3,74	4,37
11:30	NO	5,99	7
12:00	NO	8,01	9,37
12:30	NO	8,08	9,45
13:00	NO	7,92	9,26
13:30	NO	10,3	12,05
14:00	NO	8,78	10,27
14:30	NO	8,95	10,47
15:00	NO	9,17	10,72
15:30	NO	8,72	10,2
16:00	NO	8,71	10,19
16:30	NO	8,92	10,43
17:00	NO	5,72	6,69
17:30	NO	7,72	9,03
18:00	NO	6,8	7,95
<b>19/02/2006</b>			<b>7,839</b>

HORA	DIRECCION	V1 m/s	V2 m/s
08:00	E	1,87	2,18
08:30	E	2,21	2,58
09:00	SE	2,93	3,42
09:30	NE	2,46	2,87
10:00	NE	2,87	3,35
10:30	N	2,67	3,12
11:00	NE	1,16	1,35
11:30	NO	4,36	5,1
12:00	NO	4,91	5,74
13:00	NO	9,42	11,02
13:30	NO	8,11	9,48
14:00	NO	9,46	11,06
14:30	NO	8,93	10,44
15:30	NO	11,1	12,98
16:00	NO	8,31	9,72
16:30	NO	8,36	9,78
17:00	NO	8,58	10,03
17:30	NO	9,06	10,59
20/02/2006			<b>6,432</b>

Este estudio se hizo con un anemómetro de cazoletas, para las velocidades y para determinar las direcciones con un anemómetro casero, que consta de un eje direccional y una aleta, colocados sobre un mapa cardinal determinado por una brújula.

**Figura 36. Anemómetro de cazoletas, con aleta direccional.**



Los datos se tomaron con un intervalo promedio de 30 minutos y dos velocidades por tiempo, estos valores de velocidad son suministrados por el anemómetro en rango de tiempo muy pequeño, el mínimo y el máximo. La dirección se determina con el anemómetro casero. Con estos datos se determina la velocidad promedio, que es la base para determinar la velocidad de diseño y la potencia a generar, ver la tabla 6. También se asume un valor máximo para el diseño por resistencia y por fatiga, teniendo en cuenta la máxima velocidad que se registra.

Es importante la dirección que tiene el viento en un intervalo de tiempo y se observa en las tablas que la dirección predominante del viento es de NO a SE, esto facilita la captación, pues elimina un sistema complejo de dirección. Este tipo de viento es el que se presenta en un valle como se ve en la figura 17, la cual es la rosa de los vientos, no es la del lugar específico, pero su comportamiento es muy similar.

**Figura 37. Rosas de los Vientos Características para un flujo dominante dentro de un valle, en una planicie y por encima de las elevaciones extremas de un valle. La del centro, emplazamiento en un valle, es la que caracteriza el caso en estudio. Pedro Fernández Díez**

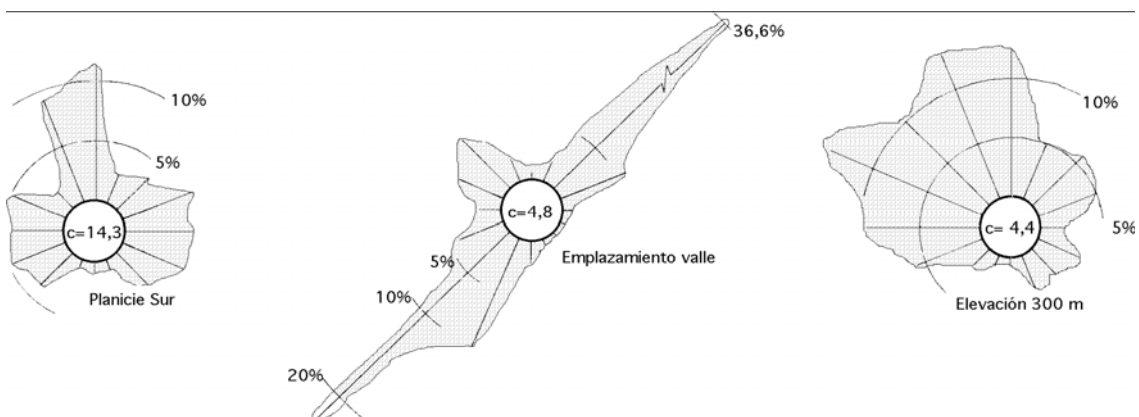
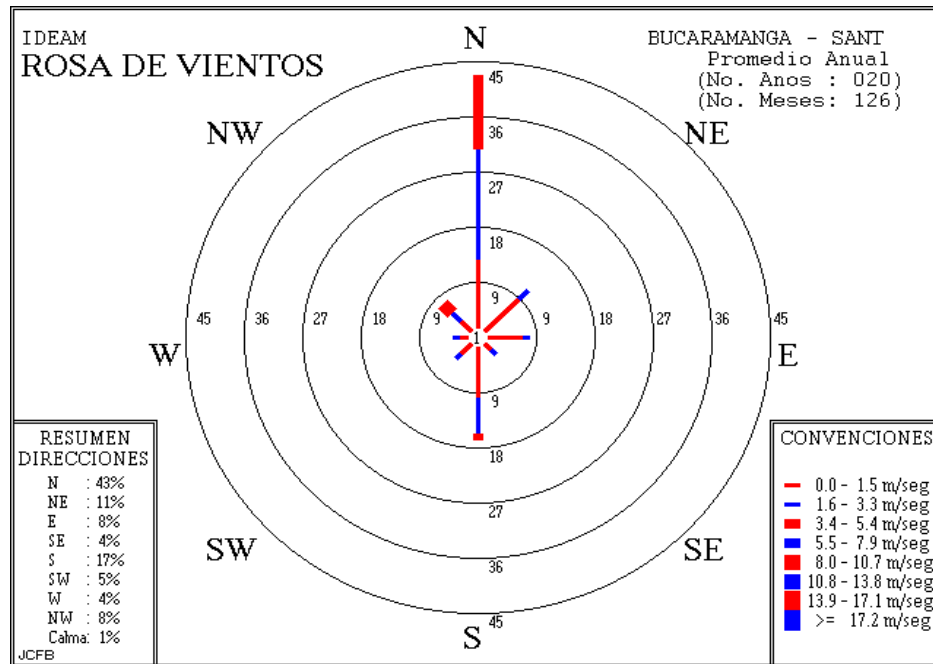
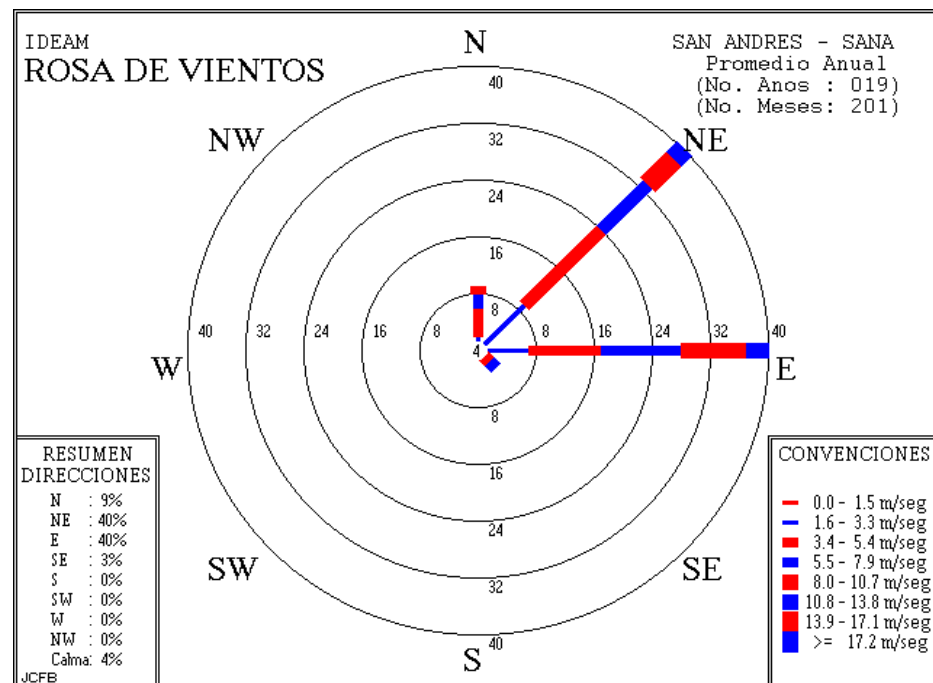


Figura 38. Ejemplos de Rosa de los Vientos en dos aeropuertos, fuente IDEAM.

RÉGIMEN ANUAL DE VIENTO, BUCARAMANGA



RÉGIMEN ANUAL DE VIENTO, SAN ANDRÉS



**Tabla 6. Resultados generales del estudio de viento.**

PROMEDIO m/s	6,76733728
MEDIANA m/s	6,4
D ESTANDAR	2,99612359
VELOCIDAD MAX. m/s	12,98
VELOCIDAD MIN. m/s	1,14

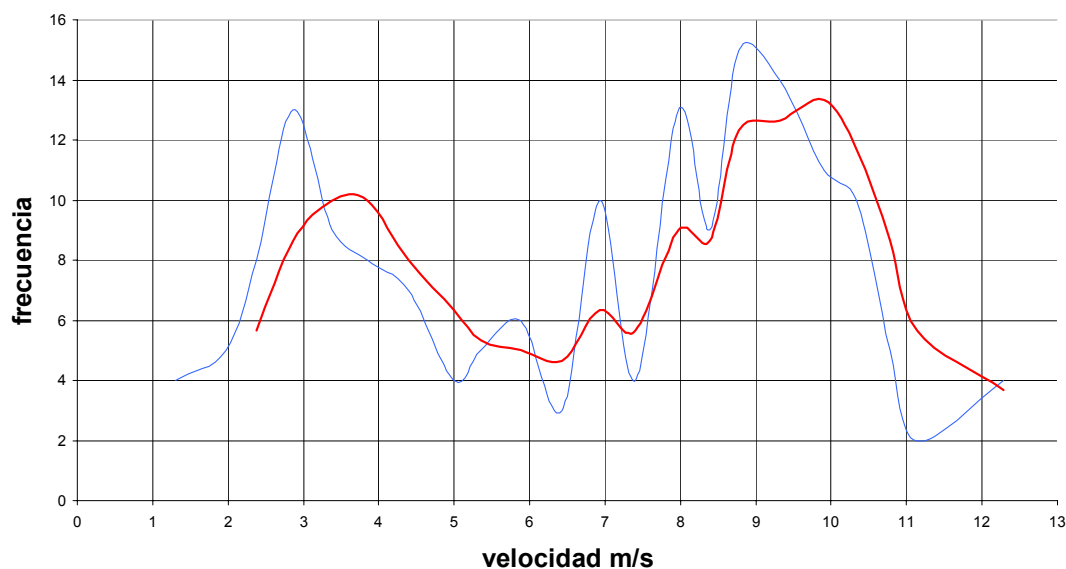
**Tabla 7. Velocidad y Frecuencia del viento**

VELOCIDAD	1,298	1,974	2,383	2,867	3,383	3,853	4,390	4,998	5,350	5,890	6,423
FRECUENCIA	4	5	8	13	9	8	7	4	5	6	3
VELOCIDAD	6,933	7,395	7,982	8,384	8,775	9,327	9,914	10,337	10,782	11,140	12,280
FRECUENCIA	10	4	13	9	15	14	11	10	5	2	4

De la tabla 7 se obtiene la figura 38 en la que se puede visualizar la velocidad de operación del sistema y la velocidad máxima en el lugar de emplazamiento. La curva azul es la curva real y la roja es la tendencia.

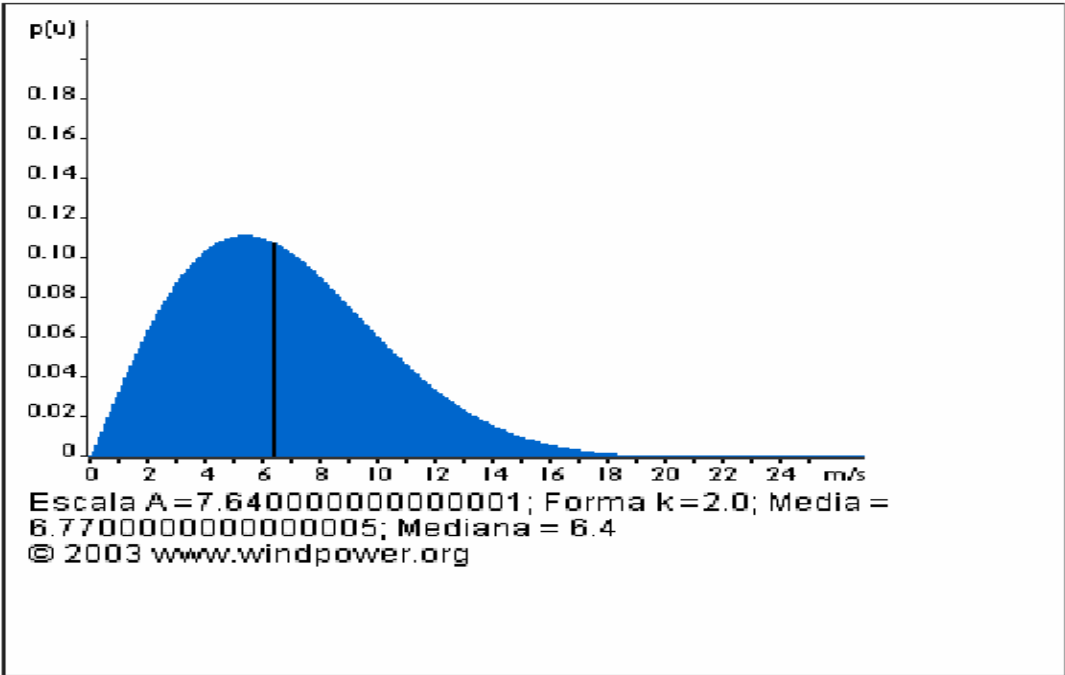
Sin embargo para un emplazamiento mas formal se necesita un estudio del viento de mínimo un año, este se realiza con un software y la ayuda de otros aparatos de medida como un higrómetro, un termómetro, manómetro, que serian los necesarios para determinar las características del emplazamiento.

**Figura 39 .Curva de comportamiento de la velocidad y frecuencia.**



Con la distribución de Weibull<sup>24</sup>, que determina la probabilidad con que una velocidad de viento se mantenga y se produzca durante un determinado tiempo, se tiene para el caso en estudio que la probabilidad de que se produzcan vientos mayores de 20 m/s, es casi imposible, este valor lo tomamos como el máximo para las condiciones de diseño. También se puede observar que la mayoría de los vientos en el lugar de toma de datos es de 6.4 m/s, luego esta se debe tomar como la velocidad de operación y la de arranque menor a esta, según la realidad de 5m/s. En los anexos se muestra la teoría para la distribución de Weibull, así como links acerca del tema.

Figura 40. Curva de Weibull, determinada con el programa de [www.windpower.org](http://www.windpower.org)



<sup>24</sup> [www.rcm2-soporte.com/documentos/Fundamentos.pdf](http://www.rcm2-soporte.com/documentos/Fundamentos.pdf)

## 4.2 PRUEBAS DEL GENERADOR

En este capítulo se describirán los pasos y etapas que se realizaron para hacer las pruebas del generador. El objetivo de estas pruebas es caracterizar y comparar el funcionamiento entre un alternador y un generador de imanes permanentes (GIP), de esta comparación se tiene como resultado la elección del generador que se utilizara en el diseño final del SICOE. La caracterización tiene como objetivo, obtener las características del generador como: el voltaje y la corriente máximas generadas, la velocidad mínima a la cual empieza a generar y la potencia.

Figura 41. Montaje del motor y el generador

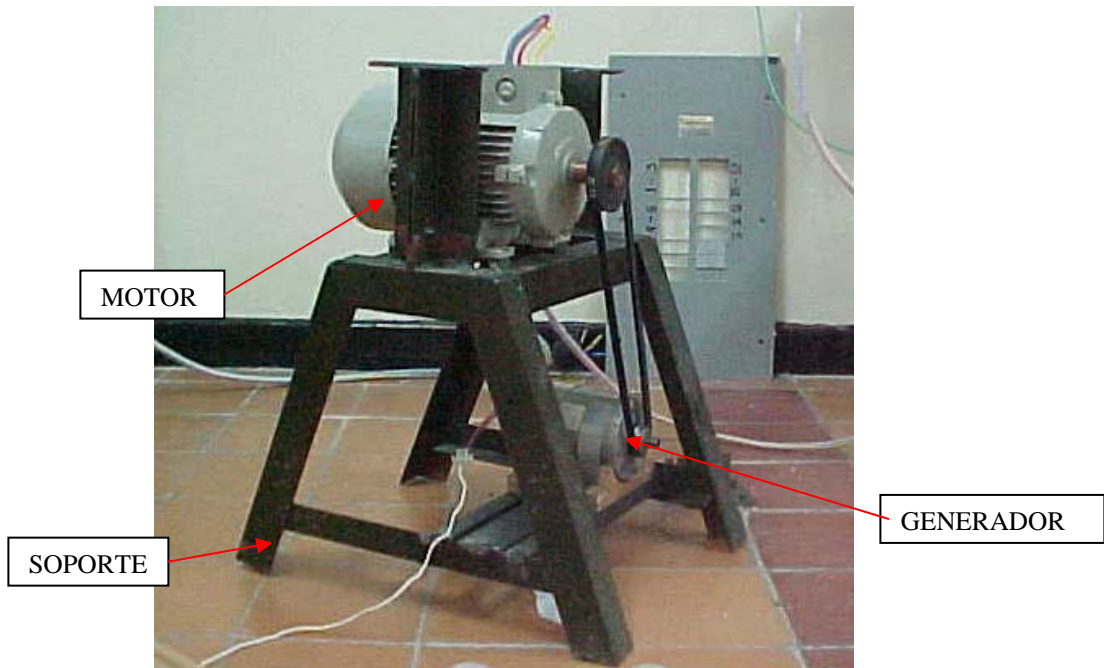
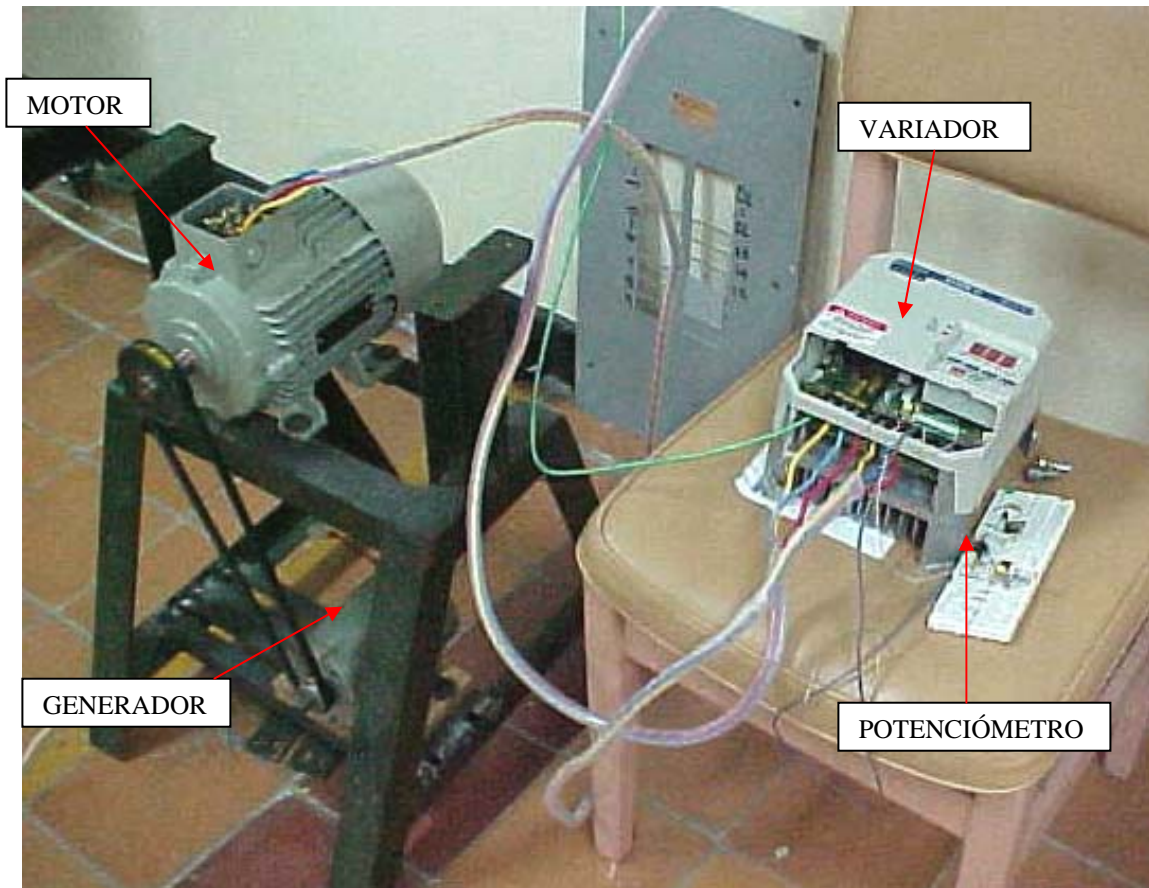


Figura 42. Montaje Motor, generador y variador.



El montaje para hacer las pruebas consta de un motor, un variador, y el generador, ya sea de imanes permanentes o un alternador de automóvil, dos poleas para transmitir la potencia y una estructura que soporta todo lo anterior como se ve en la figura 39 y 40. Para el motor las especificaciones están dadas en la tabla 8, la transmisión de esta energía se hará a través poleas, con una relación de diámetros de 2:1, para simular las fluctuaciones en la velocidad del viento es necesario utilizar un variador para motores eléctricos, en este caso un ALTIVAR 16, tabla 9. Por medio de la variación de frecuencia obtenemos distintas velocidades en el eje del motor y por ende en el del generador.

**Tabla 8. Características técnicas del motor**

TENSIÓN DE ALIMENTACIÓN	TIPO Y REFERENCIA	POTENCIA	RPM	INTENSIDAD
220YY / 440Y V 60 Hz Cos 0.80 Trifásica	IEC 34 1LA7 090-4YA60 SIEMENS	2.0 HP 1.5 KW	1700	7.0 A 3.5 A

**Tabla 9. Características técnicas del variador "ALTIVAR 16**

TENSIÓN DE ALIMENTACIÓN	REFERENCIA	POTENCIA MOTOR KW/HP	INTENSIDAD (A)			POTENCIA TOTAL DISIPADA BAJO CARGA NOMINAL W
			Línea	Nominal	Máx.	
208/240 v -10% +10% 50/60 ± 2 Hz Mono/Trifásica	ATV-16U29M2	1.5/2	14/10	7.1	10	55

Las pruebas realizadas en el generador, fueron las siguientes:

Prueba en vacío

Prueba con carga

Prueba de corto circuito

La prueba en vacío tiene como objetivo caracterizar el generador sin someterlo a ningún tipo de carga, para realizarla se tiene conectado el motor al variador y simultáneamente al generador, con ayuda de un voltímetro conectado a las salidas del generador se toman las variaciones de voltaje en función de las variaciones de frecuencia, que se hacen por medio del variador, de esta prueba se obtuvieron los siguientes datos:

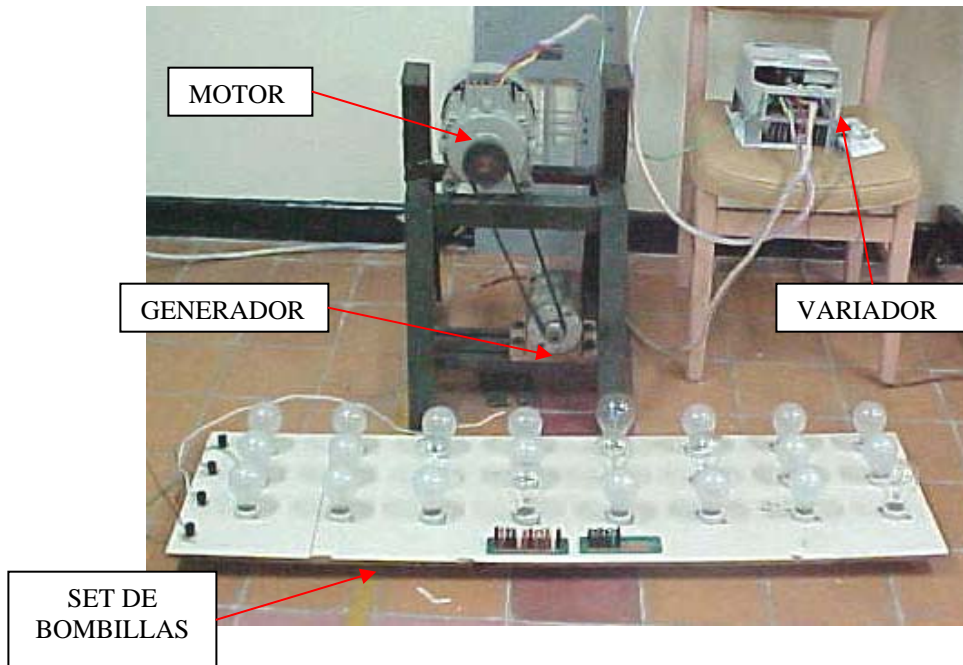
Tabla 10. Datos de frecuencia y voltaje para el GIP, prueba en vacío.

FRECUENCIA Hz	VOLTAJE V	FRECUENCIA Hz	VOLTAJE V	FRECUENCIA Hz	VOLTAJE V
5,0	20,0	14,0	28,0	21,5	42,0
5,1	20,0	15,0	30,0	22,0	43,0
5,3	20,0	15,5	31,0	22,5	44,0
5,7	21,0	16,0	31,0	23,0	45,0
6,0	22,0	16,5	32,0	23,5	47,0
7,0	20,0	17,0	33,0	24,0	48,0
9,0	20,0	17,5	34,0	24,5	48,0
10,0	20,0	18,0	36,0	25,0	49,0
11,0	22,0	18,5	36,0	25,5	49,0
11,6	23,0	19,0	37,0	26,0	50,0
12,0	24,0	19,5	39,0		
12,5	25,0	20,0	39,0		
13,0	26,0	20,5	40,0		
13,5	27,0	21,0	41,0		

Con los datos obtenidos en esta prueba se realizó una gráfica, figura 41, la cual nos muestra una dependencia casi lineal del voltaje en función de la frecuencia. También podemos decir que entre los 5 y los 10 Hz no hay una variación significativa del voltaje y que a partir de 10 Hz comienza a ver un aumento del voltaje.

Para la prueba del generador con carga se utilizó un set de bombillas, con este set se puede variar la carga, aumentando o disminuyendo el número de bombillas que entran en funcionamiento por medio del circuito de la tabla. En la parte inicial se empieza trabajando con cuatro bombillas de 100W cada una, además se hace un circuito con un amperímetro y un voltímetro del tal forma que podemos determinar la potencia nominal del generador, este montaje se puede ver en la figura 43.

Figura 43. Montaje del circuito, para la prueba con carga.



Con los valores obtenidos, hasta que el voltímetro marque 50 voltios, que es el máximo valor que soporta el generador, se tiene la siguiente tabla:

Tabla No 11. Datos de amperaje, voltaje y frecuencia, tomados de la prueba con carga para el GIP

AMPERAJE mA	VOLTAJ E V	FRECUENCI A Hz	AMPERAJE mA	VOLTAJE V	FRECUENCI A Hz
540,0	19,0	10,0	730,0	39,0	21,0
560,0	21,0	11,0	750,0	40,0	22,0
580,0	22,0	12,0	760,0	43,0	23,0
600,0	24,0	13,0	780,0	44,0	24,0
620,0	26,0	14,0	800,0	46,0	25,0
630,0	28,0	15,0	810,0	48,0	26,0
640,0	30,0	16,0	830,0	50,0	27,0
660,0	32,0	17,0	840,0	51,0	28,0
680,0	33,0	18,0	850,0	53,0	29,0
700,0	35,0	19,0	870,0	56,0	30,0
710,0	37,0	20,0			

De esta tabla se desprenden dos graficas, figuras 43 y 44, las graficas nos indican que la relación entre voltaje y amperaje con frecuencia es casi lineal.

**Figura 44. Voltaje vs. Frecuencia, para la prueba del GIP en vacío**

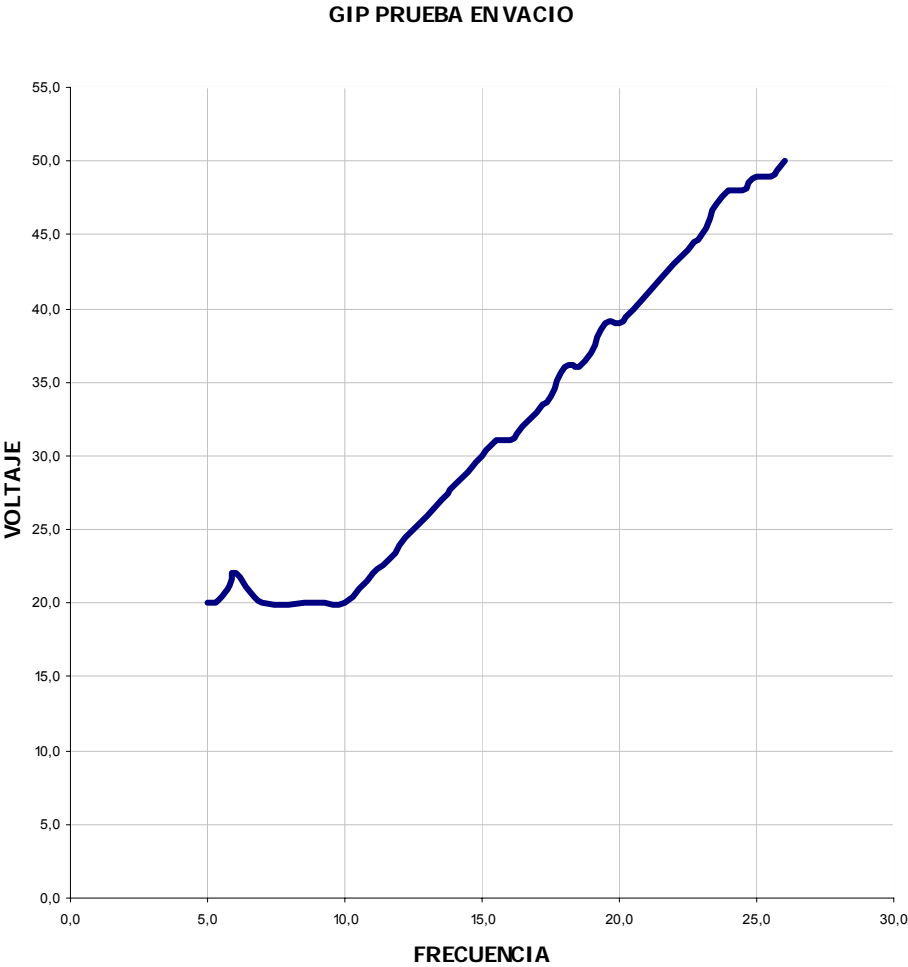
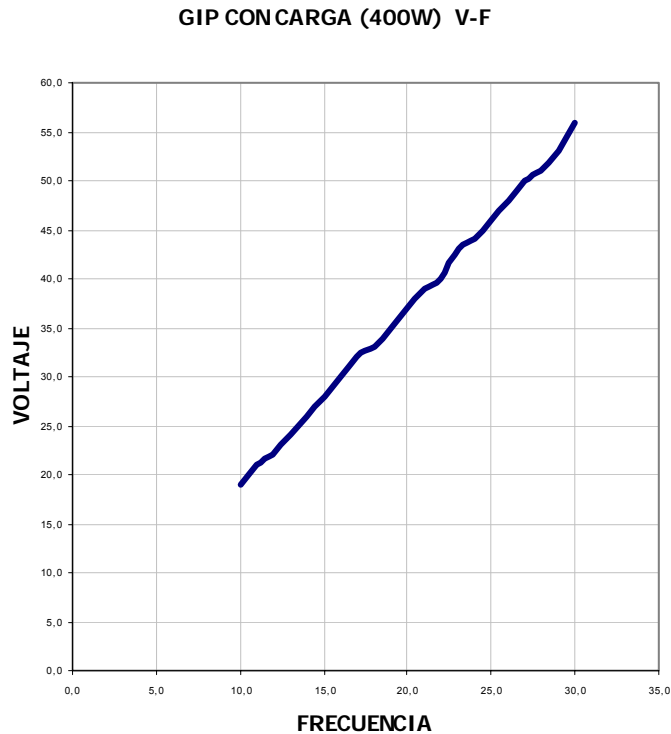


Figura 45. GIP, voltaje vs. frecuencia

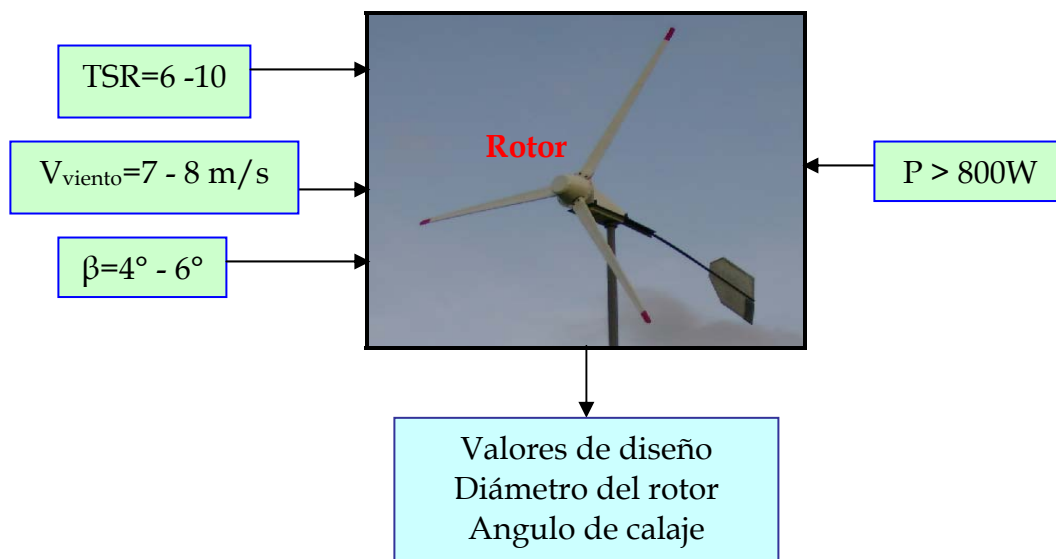


### 4.3 DISEÑO DEL ROTOR

El rotor esta compuesto por las palas o alabes y por el cubo o dado. Para definir las características geométricas y físicas de las palas necesitamos encontrar unos parámetros de diseño que son los valores principales con los cuales vamos a definir todas las características geométricas y físicas del generador, debido a que estos valores son dependientes unos de otros y son demasiadas las incógnitas, se deben realizar diferentes cálculos para determinar estos valores, además, asumir algunos de ellos que solo se pueden encontrar en forma experimental. Estos valores son: potencia generada, velocidad del viento (velocidad de diseño), diámetro del rotor, velocidad de rotación o giro del rotor, coeficiente de potencia ( $0,38 < C_p < 0,42$ ) y la relación de velocidad periférica o TSR (velocidad específica).

**4.3.1 Valores de diseño de la Pala.** El proceso que llevamos a cabo comienza por definir el valor de la potencia que deseamos obtener con nuestro SICOE y los “parámetros de diseño”, velocidad del viento (velocidad de diseño), coeficiente de potencia, relación de velocidad periférica, velocidad de giro del rotor y la relación de velocidad periférica, hasta obtener las dimensiones reales (diámetro y área del rotor) de las palas o alabes. Ver figura 45, corresponde a las entradas y salidas del diseño.

**Figura 46. Diseño del SICOE (entradas y salidas para el diseño)**



Las ecuaciones que se ven en los siguientes párrafos determinan las características geométricas del SICOE, se deben realizar unas combinaciones y despejar algunas de las incógnitas de estas ecuaciones para encontrar todos los valores que se necesitan para caracterizar nuestra turbina:

1. Características de la ecuación general.

$$P = \frac{1}{2} \times C_p \times \eta_{eléctrica} \times \eta_{mecánica} \times \rho \times V^3 \times A \quad \text{Ecuación 1}$$

La ecuación 1 es la ecuación general que muestra la potencia entregada por el viento a la turbina y en ella intervienen casi todas las variables mas importantes que caracterizan una turbina eólica, en ella se encuentran el coeficiente de potencia,  $C_p$ , que determina la cantidad de energía que se puede aprovechar del viento y tiene un valor máximo conocido como límite de Betz<sup>25</sup> y es de 0,59259, también se encuentran las eficiencias mecánica y eléctrica que dependen de la transmisión y del generador respectivamente, la densidad del aire en el lugar del emplazamiento, la velocidad del viento y el área del rotor.

De la ecuación 1 despejamos el área  $A$  y obtenemos:

$$A = \frac{2 \times P}{C_p \times \eta_{eléctrica} \times \eta_{mecánica} \times \rho \times V^3} \text{ Ecuación 2}$$

$$A = \pi \times \frac{D^2}{4} \text{ Ecuación 3}$$

De la ecuación 3 despejamos el diámetro  $D$  y obtenemos:

$$D = \sqrt{4 \times A / \pi} \text{ Ecuación 4}$$

2. Relaciones para el coeficiente de potencia  $C_p$ . El coeficiente de potencia es un valor que depende de la velocidad específica TSR y el ángulo de paso o calaje  $\beta$  (ver figura 19), esto nos implica buscar otras relaciones que nos determinen estos valores. El coeficiente de potencia para las turbinas es siempre objeto de investigación, el cálculo de este coeficiente necesita el uso de la teoría del elemento de pala, para esto se han desarrollado varias aproximaciones numéricas, para el caso en estudio se toma la propuesta por Siegfried Heder<sup>26</sup> que entrega las siguientes ecuaciones:

---

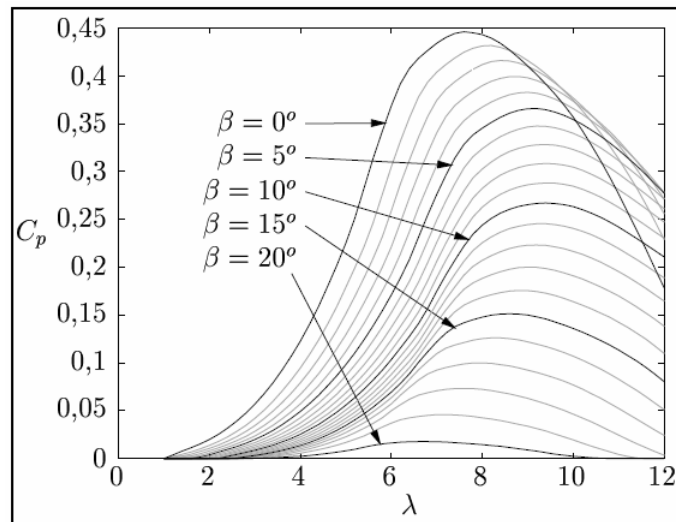
<sup>25</sup> [www.rcm2-soporte.com/documentos/Fundamentos.pdf](http://www.rcm2-soporte.com/documentos/Fundamentos.pdf)

<sup>26</sup> HEIER Siegfried, "Grid Integration of Wind Energy Conversion Systems," 1998

$$C_p(\lambda, \beta) = 0.22 \left( \frac{116}{\lambda_i} - 0.4\beta - 5 \right) \times e^{\frac{-12.5}{\lambda_i}} \quad \text{Ecuación 5}$$

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \quad \text{Ecuación 6, siendo } \lambda = TSR$$

Figura 47. Grafica de  $C_p$  vs.  $\lambda$  de acuerdo a Siegfried Heder



3. Proceso para obtener el coeficiente de potencia  $C_p$ . Se toman valores pequeños de  $\beta$  entre 4 y 6 grados para obtener los valores mas altos de coeficiente de potencia ver figura 46, con estos valores se halla  $\lambda_i$  de la ecuación 6 y lo reemplazamos en la ecuación 5 para encontrar los diferentes valores de  $C_p$ .

4. Determinación de la relación de velocidad periférica TSR o  $\lambda$ . Se deben tomar valores de TSR ( $\lambda$ ) para los cuales el valor de  $C_p$  sea mas alto y así mismo cumpla con los requerimientos de velocidad de giro. Se necesitan valores altos de TSR ya que se requiere mas de 900 rpm en el generador y la relación de transmisión será de 1:4 máximo, es decir mas de 250 rpm la cual será la velocidad de giro del rotor. Según el número de palas, ver tabla 12 y

teniendo en cuenta otros autores que proponen que para rotores de eje horizontal se debe tomar entre 8 y 10<sup>27</sup> en este caso el TSR debe ser mayor a 6 y menor a 10.

**Tabla 12. Relación entre el TSR y el Número de palas. Fuente Pedro Fernández Díez.**

TSR	1	2	3	4	5 a 8	8 a 15
Número de palas	6 a 20	4 a 12	3 a 8	3 a 5	2 a 4	1 a 2

$$TSR = \pi \times D \times \frac{n}{60} \times V \quad \text{Ecuación 7}$$

5. Proceso final de diseño. Con los valores de velocidad del viento entre 7 y 8 m/s y asumiendo un valor de n (velocidad de rotación del rotor) de 300 rpm y para diferentes diámetros, se encuentran los valores de TSR, según ecuación 7. Con las ecuaciones 5 y 6 se obtiene el factor de potencia  $C_p(\lambda, \beta)$ , con la ecuación 3 se determina el área del rotor y finalmente con la ecuación 1 se halla la potencia del viento absorbida por el rotor. Los resultados se muestran en las tablas 13, 14 y 15 para  $\beta=4^\circ$ , 16, 17 y 18 para  $\beta=5^\circ$ , 19, 20 y 21 para  $\beta=6^\circ$  respectivamente, con velocidades de viento de 7, 7,5 y 8 m/s que son los que se acercan al valor de diseño. Se hace entonces una lista de las ecuaciones en la forma que se utilizan para encontrar los datos que se encuentran en las tablas:

$$P = \frac{1}{2} \times C_p \times \eta_{eléctrica} \times \eta_{mecánica} \times \rho \times V^3 \times A \quad \text{Ecuación 1}$$

$$A = \pi \times \frac{D^2}{4} \quad \text{Ecuación 3}$$

---

<sup>27</sup> PEÑA Alfredo, "Construcción de Rotor Eólico para pequeña Generación Eléctrica" 2003

$$C_p = f(\lambda, \beta), \quad C_p(\lambda, \beta) = 0.22 \left( \frac{116}{\lambda_i} - 0.4\beta - 5 \right) \times e^{\frac{-12.5}{\lambda_i}} \quad \text{Ecuación 5}$$

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \quad \text{Ecuación 6, siendo } \lambda = TSR$$

$$TSR = \pi \times D \times \frac{n}{60} \times V \quad \text{Ecuación 7}$$

6. Tablas de los resultados obtenidos con las ecuaciones anteriores y conclusiones respectivas para obtener los mejores resultados.

**Tabla 13. Resultados de Área y Potencia para  $V_{viento}=7$  m/s,  $\beta=4^\circ$  y  $n=300$  rpm.**

D	TSR(7)	Cp(5)	A(3)	P(1)
2,50	5,610	0,34709134	4,909	288,750
3,00	6,732	0,36827983	7,069	441,184
3,50	7,854	0,36135684	9,621	589,212
4,00	8,976	0,33573179	12,566	715,009
4,50	10,098	0,2983824	15,904	804,261

**Tabla 14. Resultados de Área y Potencia para  $V_{viento}=7,5$  m/s,  $\beta=4^\circ$  y  $n=300$  rpm.**

D	TSR(7)	Cp(5)	A(3)	P(1)
2,50	5,236	0,33192047	4,909	339,627
3,00	6,283	0,36377561	7,069	536,000
3,50	7,330	0,36743275	9,621	736,890
4,00	8,378	0,35124481	12,566	920,065
4,50	9,425	0,32188653	15,904	1067,128

**Tabla 15. Resultados de Área y Potencia para  $V_{viento}=8$  m/s,  $\beta=4^\circ$  y  $n=300$  rpm.**

D	TSR(7)	Cp(5)	A(3)	P(1)
2,50	4,909	0,31482684	4,909	390,955
3,00	5,890	0,35561239	7,069	635,908
3,50	6,872	0,36873708	9,621	897,486
4,00	7,854	0,36135684	12,566	1148,764
4,50	8,836	0,33969626	15,904	1366,754

Aquí tenemos valores buenos de potencia para diámetros mayores a 4 m y velocidad de viento mayor a 7,5. Pero un TSR demasiado alto para velocidades inferiores a 8 m/s. Además un ángulo de paso  $\beta$  pequeño, lo que provocará un ángulo de ataque  $\alpha$  mayor, es decir, un mayor coeficiente de arrastre.

**Tabla 16. Resultados de Area y Potencia para  $V_{\text{viento}}=7 \text{ m/s}$ ,  $\beta=5^\circ$  y  $n=300 \text{ rpm}$ .**

D	TSR(7)	Cp(5)	A(3)	P(1)
2,50	5,610	0,33842512	4,909	281,541
3,00	6,732	0,35324633	7,069	423,174
3,50	7,854	0,3409277	9,621	555,901
4,00	8,976	0,31078378	12,566	661,877
4,50	10,098	0,26963265	15,904	726,769

**Tabla 17. Resultados de Area y Potencia para  $V_{\text{viento}}=7,5 \text{ m/s}$ ,  $\beta=5^\circ$  y  $n=300 \text{ rpm}$ .**

D	TSR(7)	Cp(5)	A(3)	P(1)
2,50	5,236	0,32557127	4,909	333,131
3,00	6,283	0,35117339	7,069	517,431
3,50	7,330	0,34940351	9,621	700,732
4,00	8,378	0,32860734	12,566	860,767
4,50	9,425	0,29534059	15,904	979,122

**Tabla 18. Resultados de Area y Potencia para  $V_{\text{viento}}=8 \text{ m/s}$ ,  $\beta=5^\circ$  y  $n=300 \text{ rpm}$ .**

D	TSR(7)	Cp(5)	A(3)	P(1)
2,50	4,909	0,31055802	4,909	385,654
3,00	5,890	0,34526603	7,069	617,406
3,50	6,872	0,35297643	9,621	859,125
4,00	7,854	0,3409277	12,566	1083,820
4,50	8,836	0,31527061	15,904	1268,479

En las tres tablas anteriores para  $\beta=5^\circ$  se tienen los valores sombreados que corresponden a datos muy cercanos a los propósitos de diseño de la turbina,

con TSR dentro del rango necesario para turbinas de eje horizontal y de tres palas.

**Tabla 19. Resultados de Area y Potencia para  $V_{viento}=7$  m/s,  $\beta=6^\circ$  y  $n=300$  rpm.**

D	TSR(7)	Cp(5)	A(3)	P(1)
2,50	5,610	0,32917575	4,909	273,846
3,00	6,732	0,33757309	7,069	404,398
3,50	7,854	0,31976759	9,621	521,398
4,00	8,976	0,28498351	12,566	606,930
4,50	10,098	0,23988943	15,904	646,599

**Tabla 20. Resultados de Area y Potencia para  $V_{viento}=7,5$  m/s,  $\beta=6^\circ$  y  $n=300$  rpm.**

D	TSR(7)	Cp(5)	A(3)	P(1)
2,50	5,236	0,31865263	4,909	326,051
3,00	6,283	0,33795793	7,069	497,959
3,50	7,330	0,33069017	9,621	663,202
4,00	8,378	0,30518542	12,566	799,415
4,50	9,425	0,26788773	15,904	888,109

**Tabla 21. Resultados de Area y Potencia para  $V_{viento}=8$  m/s,  $\beta=6^\circ$  y  $n=300$  rpm.**

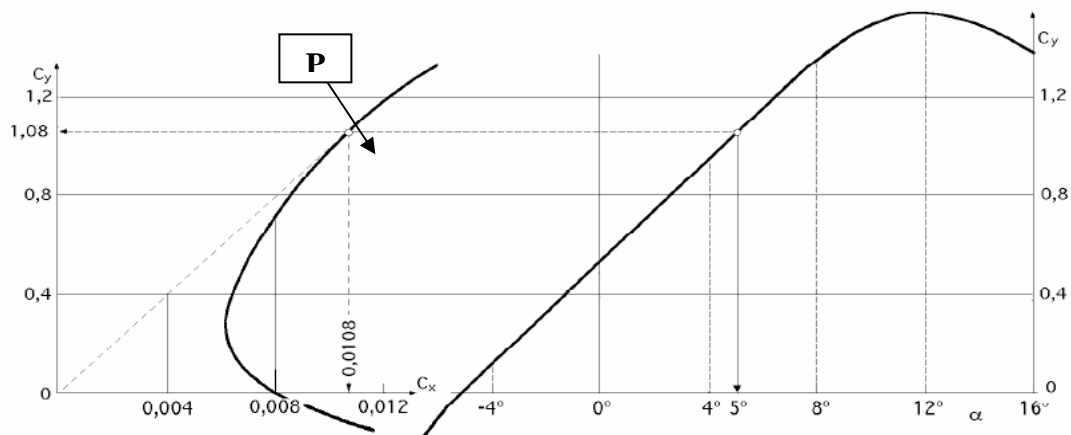
D	TSR(7)	Cp(5)	A(3)	P(1)
2,50	4,909	0,30573219	4,909	379,661
3,00	5,890	0,33432517	7,069	597,842
3,50	6,872	0,33656657	9,621	819,185
4,00	7,854	0,31976759	12,566	1016,551
4,50	8,836	0,29000916	15,904	1166,840

Y en las últimas tablas para  $\beta=6^\circ$  se obtienen solo valores aceptables de potencia para diámetros y velocidades de viento mayores ya que el coeficiente de potencia Cp va disminuyendo a medida que el ángulo de paso  $\beta$  aumenta.

- Características del perfil que determinan las dimensiones de la Pala. Para definir las características de la pala (diámetro,  $C_p$ , potencia), se necesitan obtener algunos valores que dependen del tipo de perfil:

1. El valor del coeficiente de sustentación se toma de la figura 47. La determinación del perfil se hace basado en la mejor relación  $C_y/C_x$ , este mayor valor da una mejor eficiencia aerodinámica. Para la selección de este perfil se debe tener en cuenta el comportamiento aerodinámico. El comportamiento aerodinámico esta dado por los estudios hechos en túneles de viento para determinadas geometrías, que son producto en su mayoría de prueba y error, luego a algunas se les dio un carácter matemático, como en el caso de los perfiles NACA. En el caso de estudio se escoge el perfil FX60-126.

Figura 48. Coeficientes de arrastre,  $C_x$  y sustentación,  $C_y$ , para el perfil FX60-126. Fuente Pedro Fernández Díez<sup>28</sup>



2. Determinación del ángulo de paso  $\beta$ . En la Figura 47 se presenta la polar del perfil FX60-126 y a la misma escala la representación de  $C_y$  en función del ángulo de ataque  $\alpha$ ; de ellas se obtiene que la sustentación máxima se

<sup>28</sup> FERNÁNDEZ Pedro, "Energía Eólica" <http://www.termica.webhop.info/>

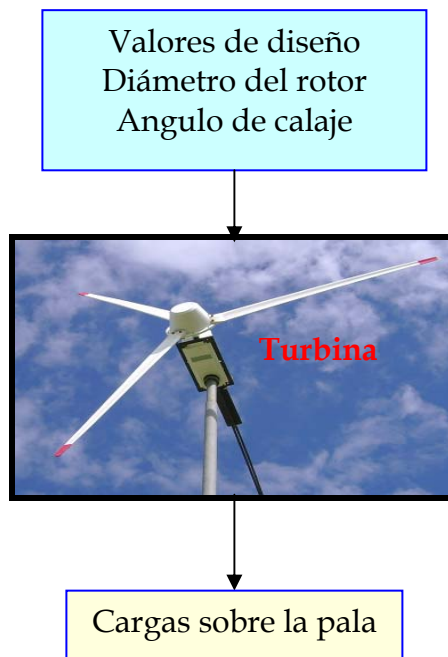
presenta para un ángulo de ataque  $\alpha = 12^\circ$  y que el arrastre mínimo se produce para un valor de  $C_x = 0,006$  que corresponde con un coeficiente de sustentación  $C_y = 0,2$ . El mejor funcionamiento de la pala se produce para un ángulo de ataque  $\alpha$  en el que la relación  $C_y/C_x$  sea máxima, es decir, el coeficiente ascensional tiene que ser grande, pero no necesariamente el máximo absoluto, al tiempo que el coeficiente de arrastre tiene que ser lo más pequeño posible, compatible con la relación anterior. También se observa que el mínimo arrastre se produce para  $C_y = 0,2$  que es un valor bajo comparado con el máximo posible  $C_y = 1,6$ . Para encontrar el ángulo de ataque  $\alpha$  para el que la relación  $C_y/C_x$  se hace máxima, se traza la tangente a la polar desde el origen de coordenadas; el punto de tangencia **P** corresponde con el máximo valor de  $C_y/C_x$  del perfil de la pala, proporcionando en este caso un valor de  $C_y = 1,08$  y un valor de  $C_x = 0,0108$ , obteniéndose un ángulo de ataque  $\alpha = 5^\circ$  y una relación:

$$\frac{C_y}{C_x} = \frac{1,08}{0,0108} = 100$$

Colocando el perfil con este ángulo, para una determinada velocidad del viento, estará en condiciones óptimas de funcionamiento. Como nuestro perfil no va a ser alabeado por cuestiones de construcción y ya que la eficiencia por este motivo para turbinas menores a 50 Kw no variara mucho, el ángulo de paso será constante a lo largo de la pala. Se utilizará el promedio como ángulo de paso, es decir  $\beta = 5^\circ$ . Teniendo en cuenta que la velocidad característica del diseño es 7,5 m/s, entonces, los demás valores de diseño serán los sombreados en la tabla 17.

**4.3.2 Diseño final de la Pala.** Este diseño se hace con base a los diferentes datos encontrados en el apartado anterior y define las características geométricas y las cargas del perfil que van a completar el diseño de nuestro sistema, es decir, las dimensiones restantes de la turbina, como la transmisión y la torre, así como el tamaño físico de todo el sistema. Las entradas y salidas del proceso se encuentran en la figura 48.

Figura 49. Diseño Mecánico del SICOE (entradas y salidas).



1. Obtención del parámetro de forma  $SP$  y el ángulo aparente del viento  $\theta$ . Para definir la pala se procede a hacer un esquema de esta, dividiéndola en varias secciones a lo largo de su diámetro desde el centro hacia la punta, se calcula la relación  $SR$  para cada una de las secciones.  $SR$  es la relación que existe entre la velocidad de rotación de la pala,  $U$ , y la velocidad del viento,

V, para cada sección, estos vectores se pueden ver en la figura 49. Esta relación se calcula con la relación de velocidad periférica TSR, ver ecuación 8.

$$SR = \frac{U}{V} = \frac{2\pi \times r \times n}{60V} = TSR \times \frac{r}{R} \text{ Ecuación 8}$$

TSR=8

R=2m

r= variación a lo largo de la pala, entre 0,21m y 2m

Con el valor de SR y las graficas 50 y 51, obtenemos  $\theta$  y SP, que es el parámetro de forma.

**Figura 50. Diagrama de Fuerzas y Velocidades en un Rotor. a. Fuerzas y velocidades generadas por el viento al atravesar el rotor de una turbina eólica. b. Velocidades sobre el perfil aerodinámico. Fuente Pedro Fernández Díez.**

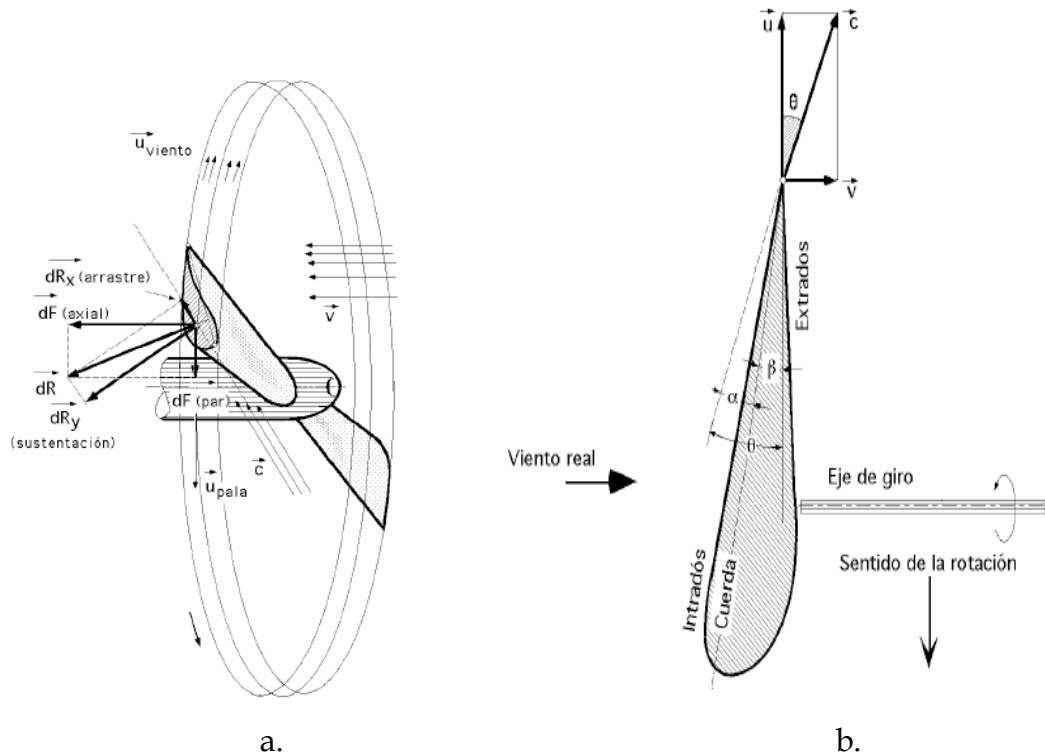


Figura 51. Valores del SP y del SR en función de  $\theta$ . Fuente Pedro Fernández Díez.

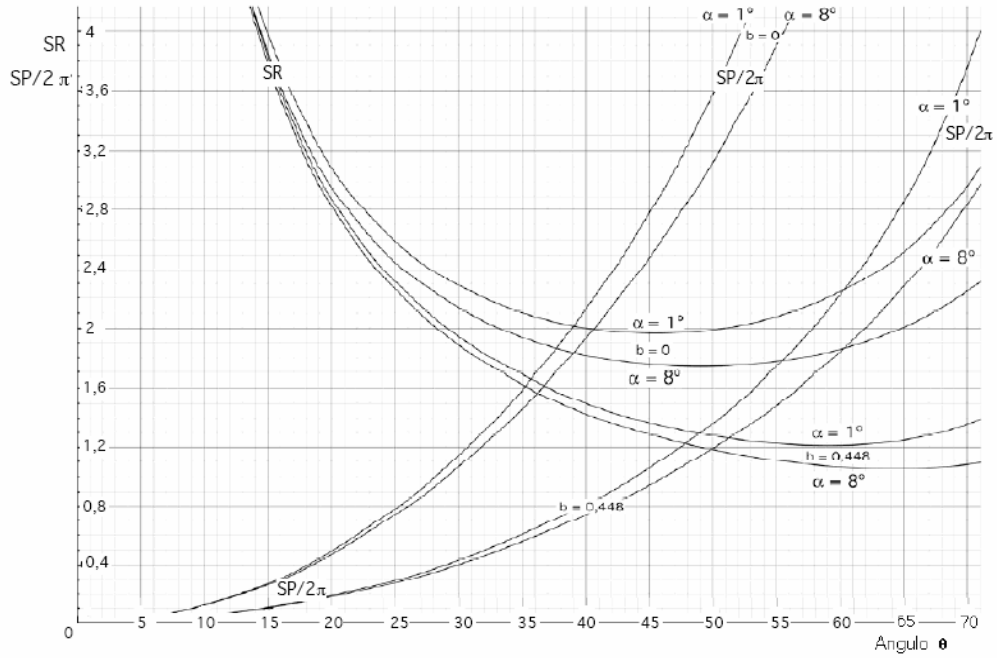
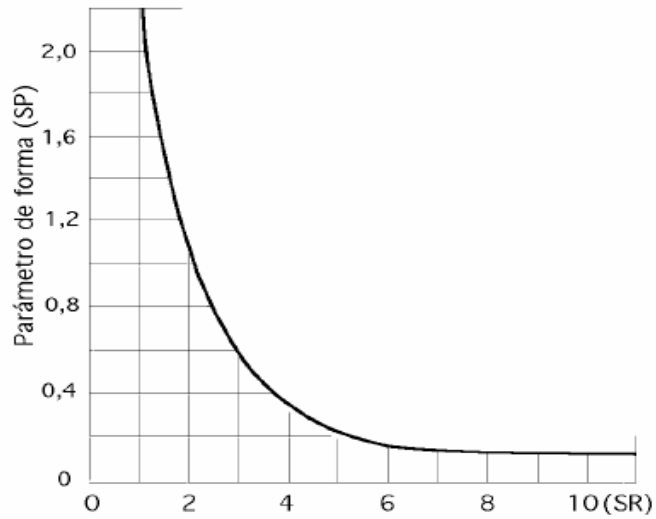


Figura 52. Valores del SP en función del SR. Fuente Pedro Fernández Díez.

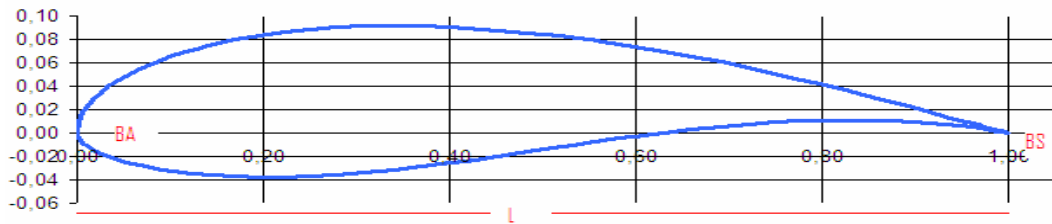


2. Cálculo de la cuerda  $L$  y el ángulo de ataque  $\alpha$  en cada sección. Con los valores obtenidos se define la cuerda  $L$  y el ángulo  $\alpha$  en cada sección,  $L$  es la distancia entre el borde de ataque, parte curva y el borde de salida del viento, parte aguda, que atraviesa el perfil. Ver figura 52.

$$L = SP \times \frac{r}{C_y \times Z} \text{ Ecuación 9, Donde, } C_y = 1,08 \text{ y } Z = 3 \text{ (número de palas)}$$

$$\alpha = \theta - \beta \text{ Ecuación 10}$$

**Figura 53. Perfil FX60-126, con las características principales. BA, borde de ataque, BS, borde de salida y L, cuerda**



3. Con estos datos obtenidos de las graficas y de las definiciones que se dieron de SR, SP, L,  $\theta$ ,  $\alpha$  y ds, donde ds = Ldr (ecuaciones 8, 9 y 10), donde dr es una de las 10 secciones en la que se divide la pala para obtener su geometría, se obtiene la siguiente tabla para todos los valores de r.

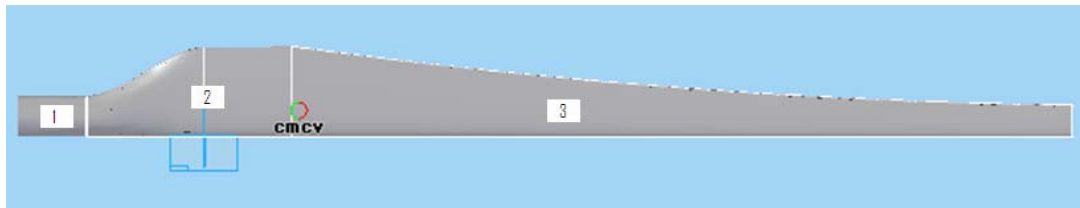
**Tabla 22. Características de la pala.**

r (m)	SR ec. 8	$\theta$	SP	L ec. 9	ds	$\alpha$ ec. 10
0,21	0,96	29,38	2,4	0,1556	0,0327	24,38
0,364	1,664	20	1,4	0,1573	0,0242	15
0,518	2,368	14,38	0,84	0,1343	0,0207	9,38
0,672	3,072	11,88	0,525	0,1089	0,0168	6,88
0,826	3,776	9,38	0,4	0,1020	0,0157	4,38
0,98	4,48	8,13	0,3	0,0907	0,0140	3,13
1,134	5,184	7,38	0,21	0,0735	0,0113	2,38
1,288	5,888	6,25	0,16	0,0636	0,0098	1,25
1,442	6,592	5,63	0,13	0,0579	0,0089	0,63
1,596	7,296	5	0,11	0,0542	0,0083	0
2	8	4,69	0,1	0,0540	0,0083	-0,31

4. Algunas observaciones de los resultados de acuerdo a las figuras obtenidas que representan la geometría de la pala. En la primera sección, figura 53, de la pala no se recomienda utilizar perfil aerodinámico, pues por su cercanía al entronque con el cubo se hace de un espesor muy grande, factor que disminuye considerablemente la eficiencia para transmitir torque. Por lo cual se recomienda que entre 10% a 15% de la longitud de la pala en la cercanía al

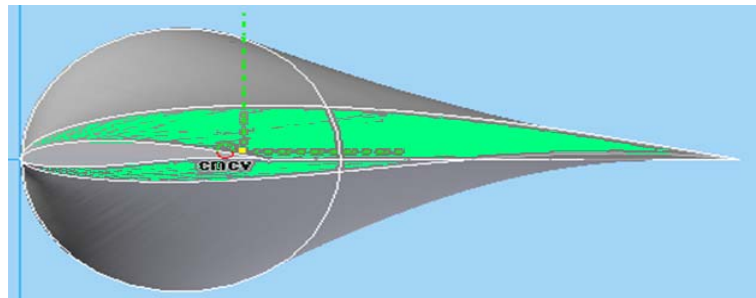
cubo no se utilice perfil aerodinámico, para el caso se toma un valor del 12%<sup>29</sup>. Esto nos dice que el primer perfil está 0,21 m de la raíz de la pala. Con los valores de la tabla y con el Solyd Edge 18 se define la siguiente forma para la pala, vista de planta. La zona 1 es de sección transversal circular; la zona 2 es la sección de transición, de circular a sección tipo perfil aerodinámico, para el caso FX60-126; y la zona 3 es la sección cuya cuerda y perfil por ende, varía disminuyendo hacia la punta de la pala y es la zona de aporte en la transmisión de torque al sistema.

**Figura 54. Partes de la pala**



En la zona tres la variación del perfil aerodinámico se puede ver en la figura 54, la zona rellena en gris es el perfil de la punta de la pala y la zona rellena de verde es el primer perfil del aspa, el círculo gris representa la sección de la raíz de la pala.

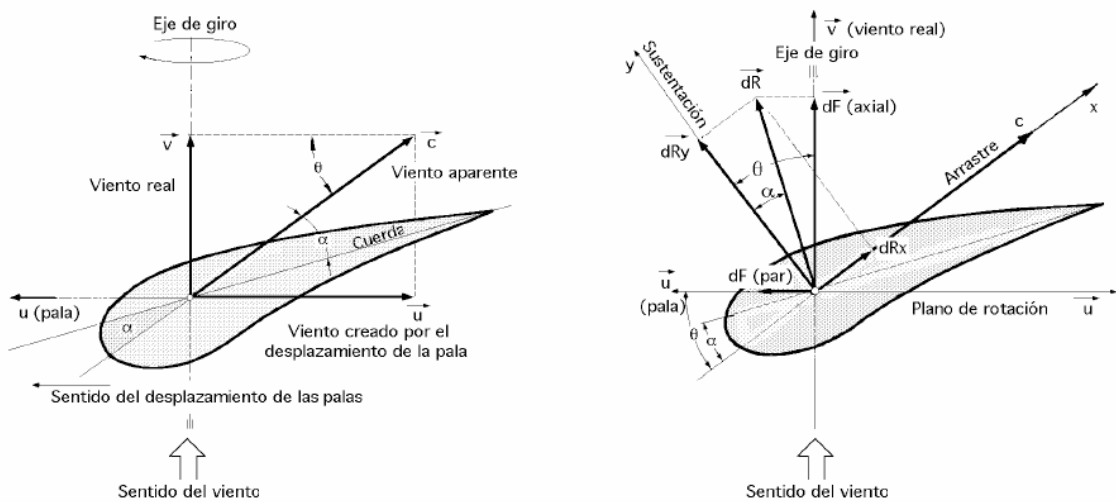
**Figura 55. Variación del perfil desde la raíz hasta la punta de la pala**



<sup>29</sup> FERNÁNDEZ Pedro, "Energía Eólica" <http://www.termica.webhop.info/>

5. Definición de las cargas que actúan sobre un perfil aerodinámico. Para el diseño de la transmisión se trasladan la cargas que ejerce el viento sobre las palas, estas fuerzas son determinadas en cantidad y dirección por el perfil aerodinámico que descompone la velocidad y las fuerzas de la forma que se ve en la figura 55. La fuerza par y axial son las resultantes de proyectar la fuerza de sustentación y arrastre, que produce el viento sobre el perfil, en el plano de rotación. Como se ve la fuerza par  $dF_{par}$  es la que esta en dirección del giro y paralela a la velocidad de giro y la de arrastre  $dF_{axial}$  es perpendicular, lo que significa que es una fuerza que presiona al rotor y por consiguiente al eje sobre su soporte.

Figura 56. Fuerzas sobre el perfil aerodinámico de la pala. Fuente Pedro Fernández Díez



Al hacer el análisis sobre toda la pala se obtiene la fuerza par total  $F_{par}$  y la fuerza axial total  $F_{axial}$ . Este análisis se obtiene de los resultados del diseño geométrico de la pala y de la tabla 22. La fuerza de sustentación aumenta conforme el ángulo de ataque lo haga, hasta un máximo y luego disminuye. Para el caso del SICOE, el ángulo  $\alpha$  y el ángulo  $\theta$  varían a lo largo de la pala, para que  $\beta$  se mantenga constante, o sea, el calaje de la pala es cero, esto es

debido a que para turbinas de baja potencia es inoficioso variar el calaje pues no representa una gran variación en la eficiencia aerodinámica, no sucede lo mismo para la turbinas de gran potencia, pues la longitud de la pala crea una diferencia sustancial en la velocidad del viento y la premisa es obtener constante  $\alpha$  y variable  $\beta$ . Las ecuaciones<sup>30</sup> para estas fuerzas están dadas por:

$$dF_{\text{par}} = \frac{1}{2} \rho v^2 dS C_y \frac{\text{sen}(\theta - \alpha)}{\text{sen}^2 \theta \cos \alpha} \quad \text{Ecuación 11}$$

$$dF_{\text{axial}} = \frac{1}{2} \rho v^2 dS C_y \frac{\cos(\theta - \alpha)}{\text{sen}^2 \theta \cos \alpha} \quad \text{Ecuación 12}$$

6. Resultados obtenidos para una pala. Con las ecuaciones 11, 12 y la tabla 22 se obtiene la tabla 23, tomando los valores a lo largo de la pala y con las condiciones de variación de los ángulos antes dichos.

**Tabla 23. Valores Fpar, Faxial y Par motor**

dFpar (N)	dF axial (N)	par (Nm)	$\theta$ (rad)	$\alpha$ (rad)
1,39	17,39	0,29	0,5128	0,4255
2,25	26,53	0,82	0,3491	0,2618
3,72	42,97	1,93	0,2510	0,1637
4,42	50,70	2,97	0,2073	0,1201
6,63	75,76	5,48	0,1637	0,0764
7,85	89,54	7,69	0,1419	0,0546
7,71	87,91	8,75	0,1288	0,0415
9,30	105,91	11,98	0,1091	0,0218
10,42	118,63	15,02	0,0983	0,0110
12,36	140,77	19,73	0,0873	0,0000
14,00	159,43	24,50	0,0819	-0,0054

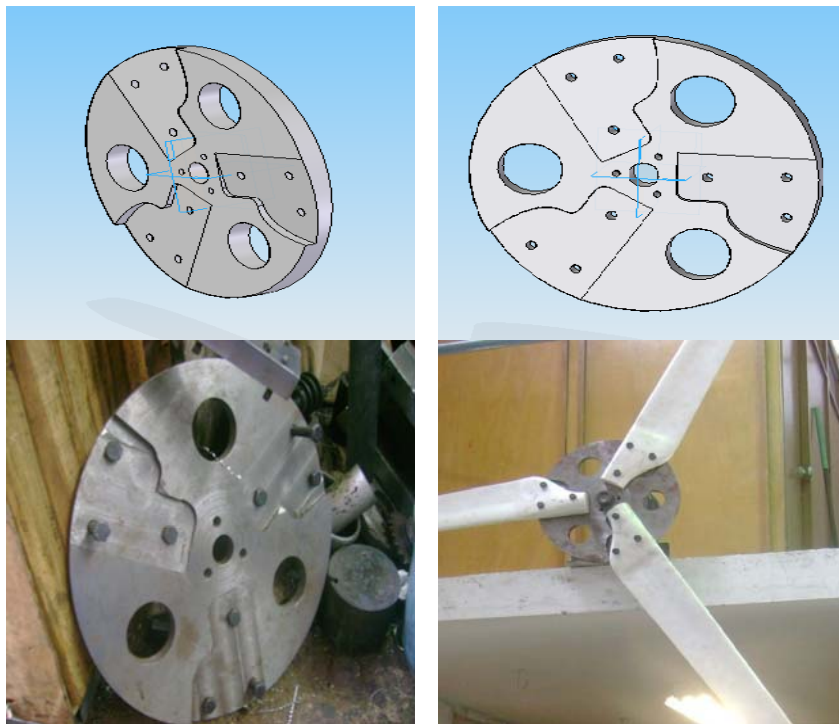
<b>Totales</b>	<b>80,07</b>	<b>915,55</b>	<b>99,17</b>
----------------	--------------	---------------	--------------

**4.3.3 Diseño del Cubo o Dado.** El dado o buje es el elemento por el cual se transmite el movimiento de rotación de las palas a la transmisión, tiene dos partes el Disco y el Buje. El Disco se adapta a las palas y a el ángulo de ataque

<sup>30</sup> FERNÁNDEZ Pedro, "Energía Eólica" <http://www.termica.webhop.info/>

necesario para que la eficiencia aerodinámica de las palas sea la mejor. Las palas van fijadas al rotor así que para darle la inclinación necesaria se hace un mecanizado al disco para obtener dicha inclinación. Para eliminar peso del disco se hacen 3 agujeros. El sistema de sujeción de las palas se hace por tornillos, que son 3 por pala. El cubo es el que soporta las cargas, pues la pala se comporta como una viga empotrada.

**Figura 57. Dado o Cubo, sin las palas y con las palas instaladas.**

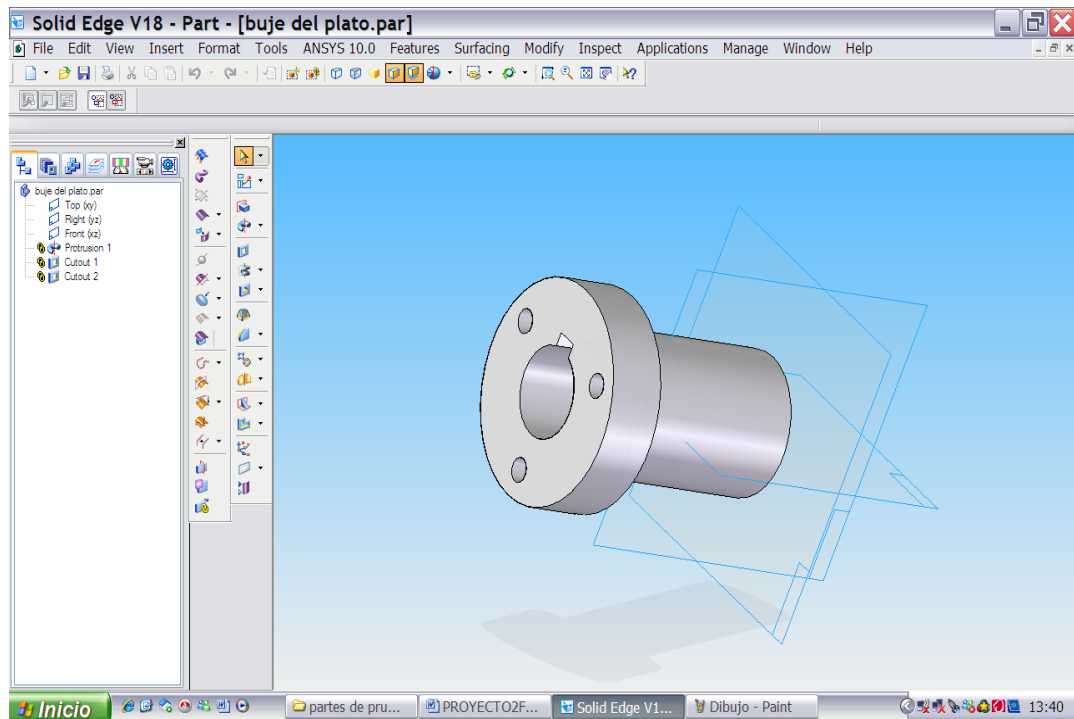


El Disco necesita de un elemento de sujeción con el eje de baja velocidad y ese elemento es el Buje, que se conecta al plato por pernos y al eje por medio de un chavetero. El sistema completo es el que transmite el movimiento a la transmisión.

**Figura 58. Buje montado sobre el eje de baja velocidad, se observan los 3 pernos de sujeción para el Disco**



**Figura 59. Diseño del Buje con Solid Edge.**



**Figura 60. Montaje del Disco y el Buje**



**Figura 61. Montaje del Dado, Disco, Buje y Tornillos.**

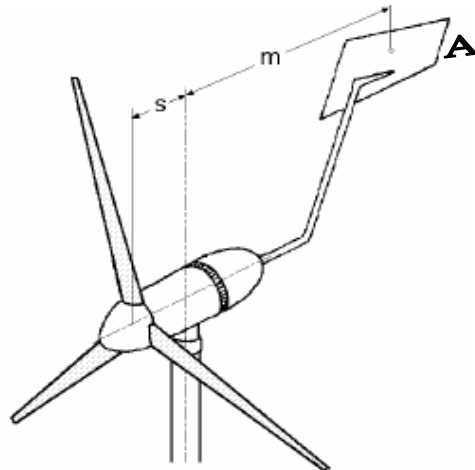


#### 4.4. DISEÑO DEL SISTEMA DIRECCIONAL

El diseño del sistema direccional depende de varios factores, por ejemplo el tamaño de la turbina, en los grandes parques eólicos las turbinas gigantes poseen sistemas automáticos como mecanismos de orientación, para las turbinas pequeñas se puede optar por la disposición a sotavento, en la cual el viento entra por la parte trasera de la turbina y ella se orienta por acción del viento sobre las palas. En nuestro caso se ha escogido la disposición a barlovento, es decir, el viento entra por el frente del rotor y la dirección depende de una aleta en forma de cola de avión y que siempre se ubicara paralela a la dirección del viento, esta disposición del rotor se usa para evitar la sombra que se crea al pasar el viento por el nacelle en la disposición contraria.

Viendo la figura 61 podemos calcular las dimensiones de la aleta sencillamente:

Figura 62. Aerogenerador con aleta direccional.



Si,  $m = 4s$ , entonces  $A = 0,04 \times S$  Ecuación 13, siendo:

S: superficie barrida por el rotor

A: área de la aleta direccional

s: distancia de la torre al rotor

m: distancia de la torre a la aleta,

en nuestro caso después de los cálculos los valores son los siguientes:

$S=12,56 \text{ m}^2$  (ver tabla 18), por lo cual el área de la aleta será,  $A=0,5 \text{ m}^2$ .

**Figura 63. Aerogenerador SICOE con aleta direccional.**



La forma definitiva de la aleta se determina de acuerdo a puntos de vista estéticos, la nuestra está en la figura 62.

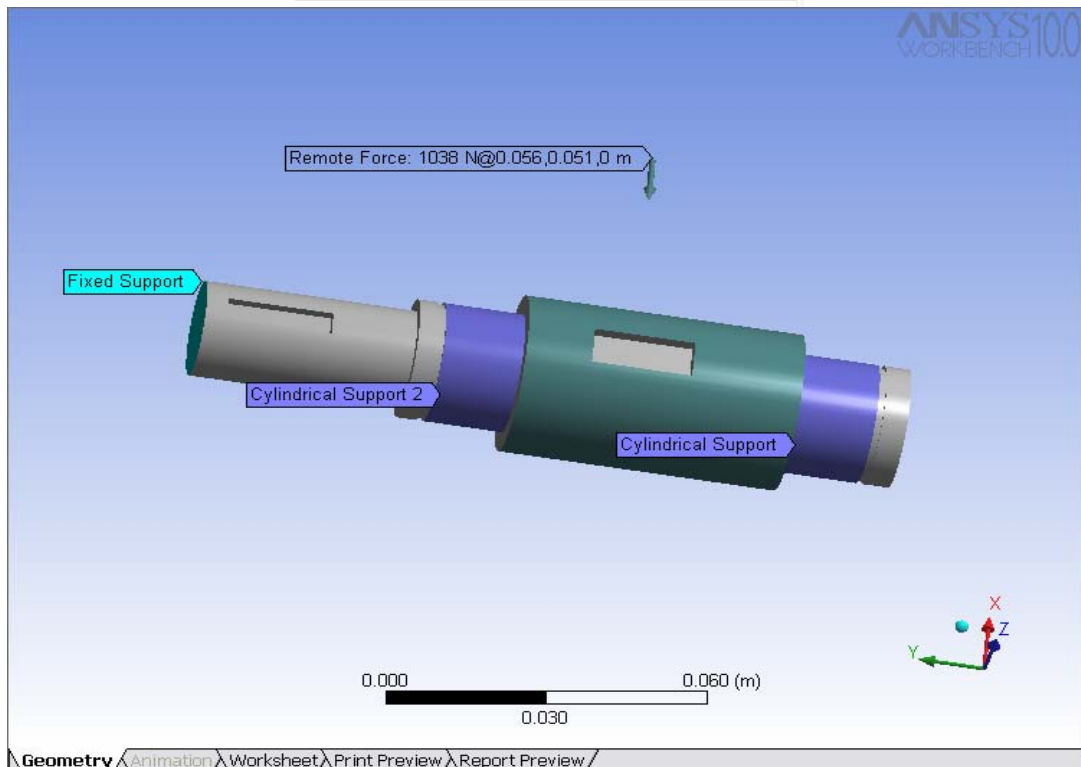
#### **4.5 TRANSMISIÓN**

El diseño de la transmisión que esta compuesta por: ejes, engranajes, rodamientos y otros elementos mecánicos que la complementan, fueron diseñados bajo la teoría de fatiga teniendo en cuenta el criterio de Misses Goodman. Además se obtuvieron los resultados aplicando la teoría de los elementos finitos, para el análisis de estas piezas con el software ANSYS workbench 10.0 y la geometría de las piezas con Solid Edge v18. En el caso de los rodamientos su cálculo y selección se llevo a cabo bajo los criterios del

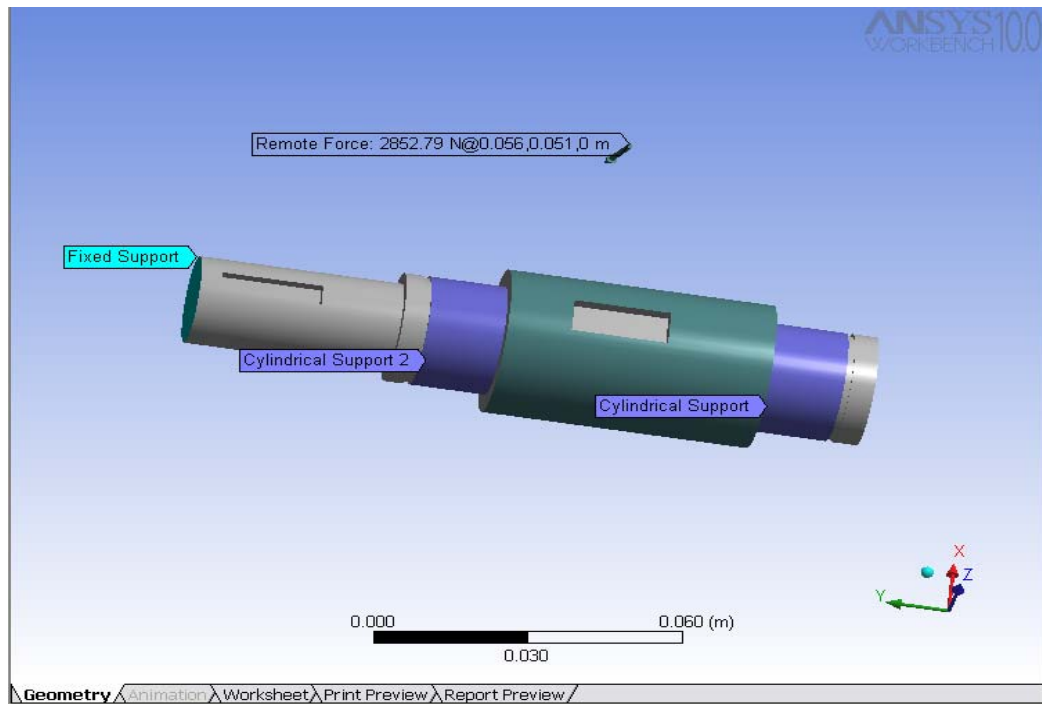
catálogo de rodamientos FAG y otras partes y uniones se seleccionaron del catalogo de piezas que incluye el software Solid Edge.

#### 4.5.1 Eje 1 de alta velocidad. Definición de los parámetros de carga y apoyos,

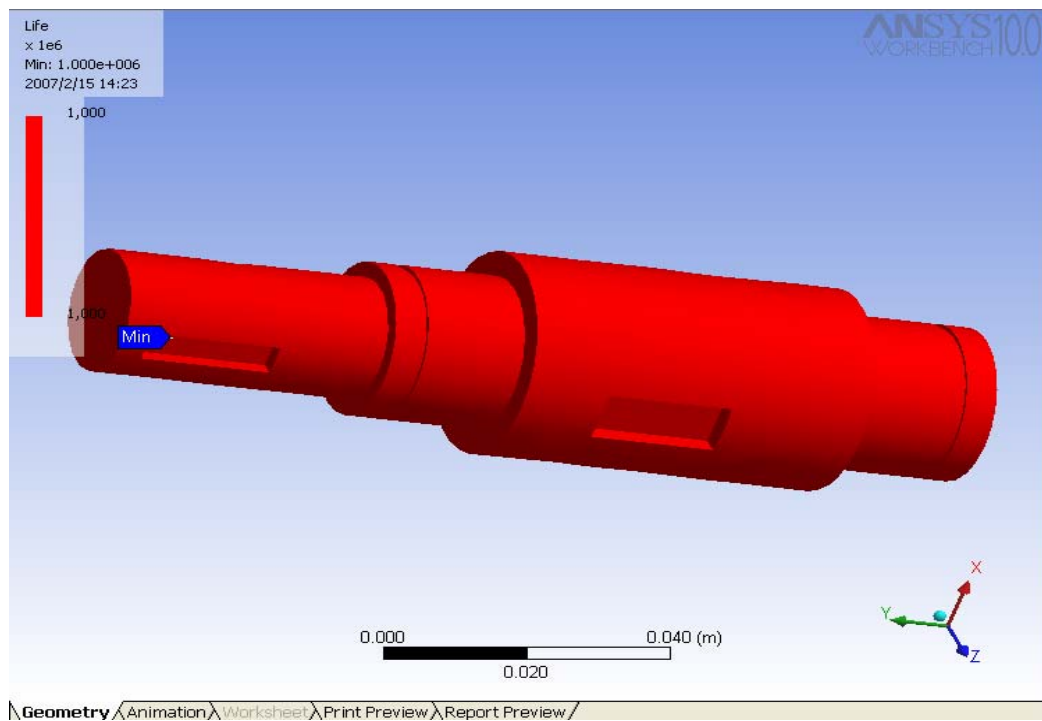
Definition	
Define By	Components
Type	Remote Force
<input type="checkbox"/> X Component	-1038, N
<input type="checkbox"/> Y Component	0, N
<input type="checkbox"/> Z Component	0, N
Suppressed	No

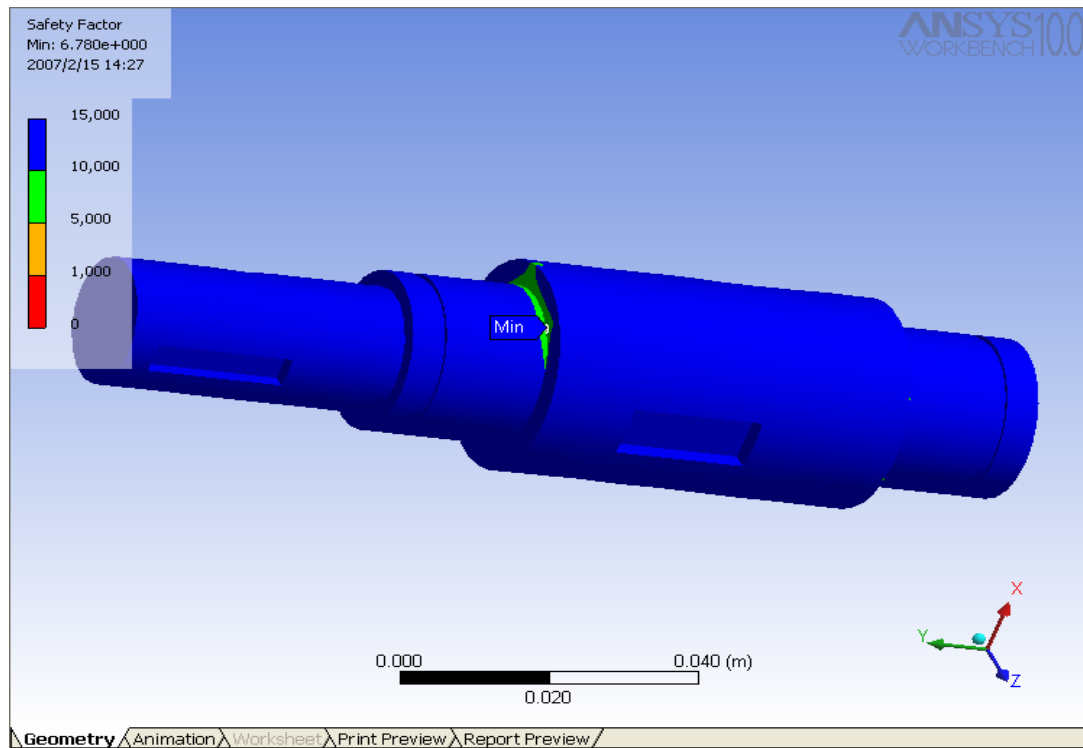


Definition	
Define By	Components
Type	Remote Force
<input type="checkbox"/> X Component	0, N
<input type="checkbox"/> Y Component	975, N
<input type="checkbox"/> Z Component	-2681, N
Suppressed	No



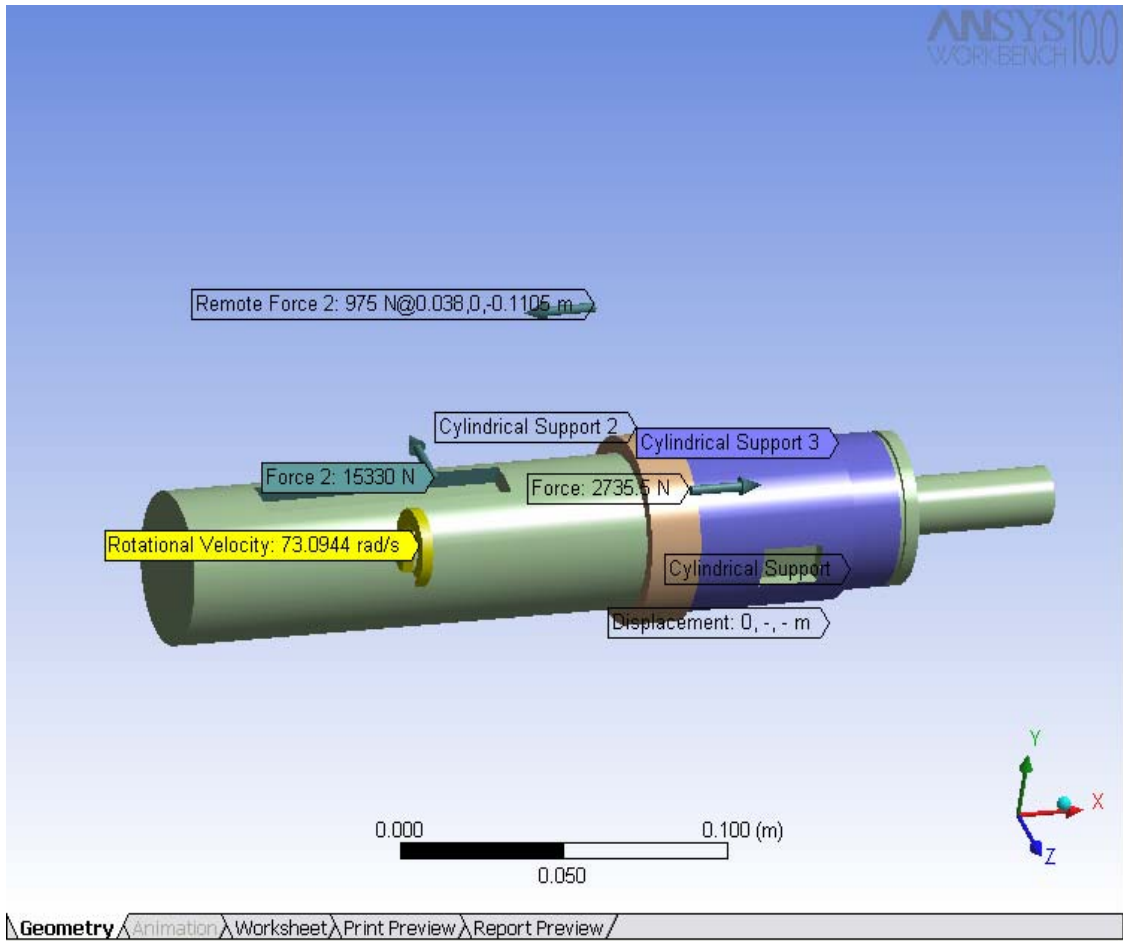
Resultados obtenidos de vida infinita y factor de seguridad,





4.5.2 Eje 2 de baja velocidad. Determinación de los parámetros de carga y apoyo,

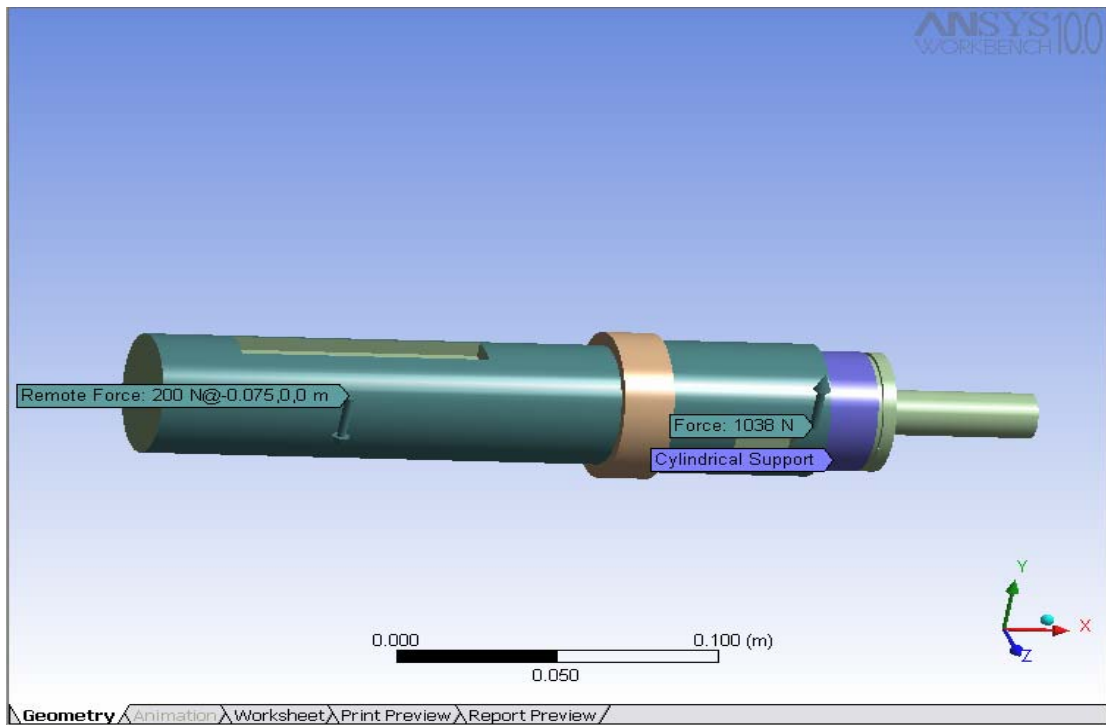
Definition		Definition		Definition	
Define By	Vector	Define By	Components	Define By	Vector
Type	Force	Type	Remote Force	Type	Force
<input type="checkbox"/> Magnitude	2735,5 N	<input type="checkbox"/> X Component	-975, N	<input type="checkbox"/> Magnitude	15330 N
Direction	Click to Change	<input type="checkbox"/> Y Component	0, N	Direction	Click to Change
Suppressed	No	<input type="checkbox"/> Z Component	0, N	Suppressed	No
		Suppressed	No		



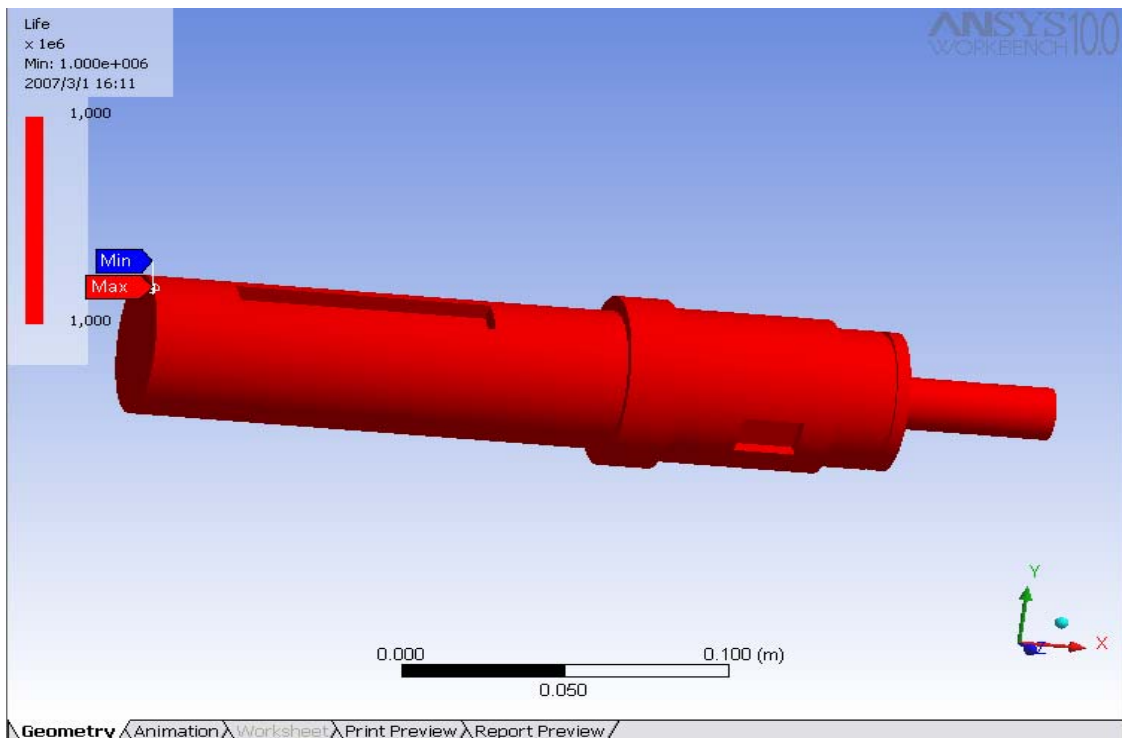
Geometry Animation Worksheet Print Preview Report Preview

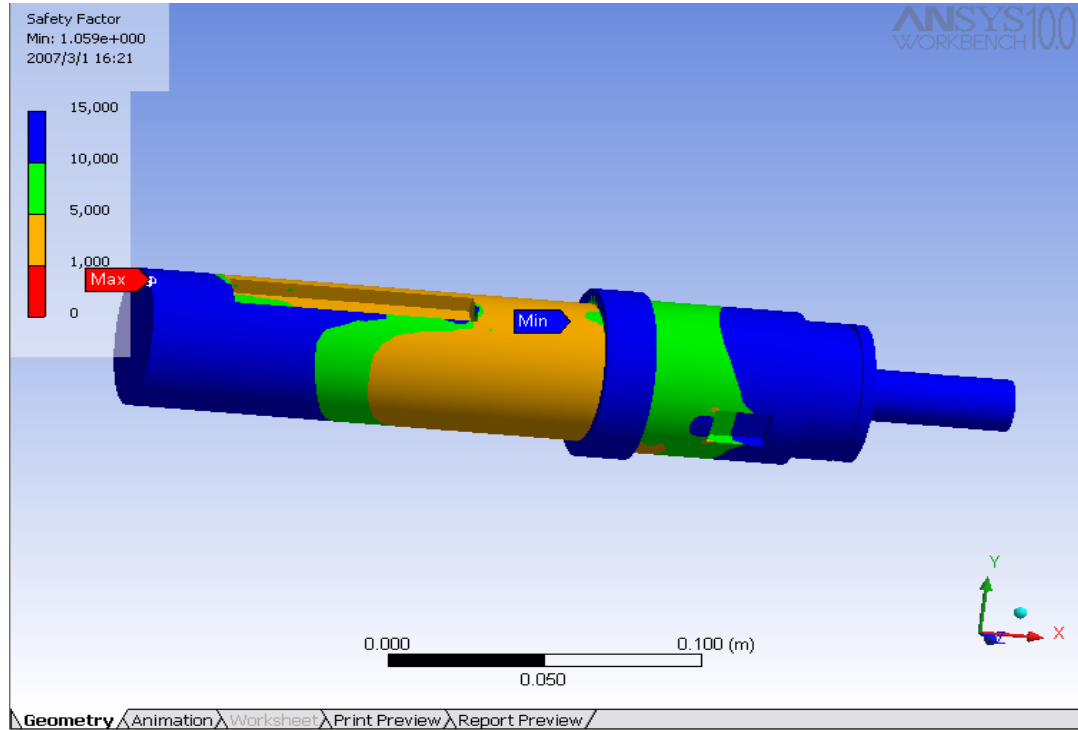
Definition	
Define By	Components
Type	Force
<input type="checkbox"/> X Component	0, N
<input type="checkbox"/> Y Component	1038, N
<input type="checkbox"/> Z Component	0, N
Suppressed	No

Definition	
Define By	Components
Type	Remote Force
<input type="checkbox"/> X Component	0, N
<input type="checkbox"/> Y Component	-200, N
<input type="checkbox"/> Z Component	0, N
Suppressed	No



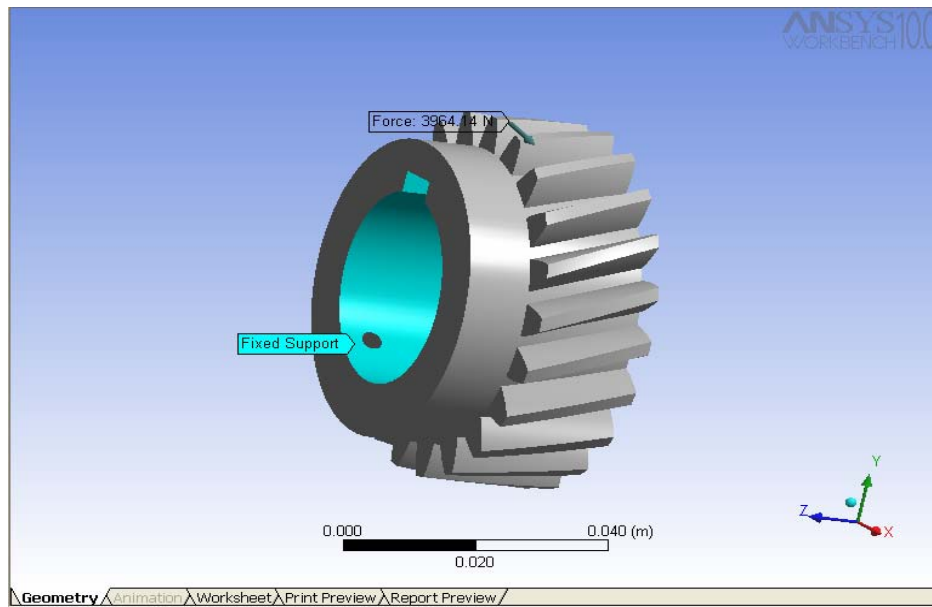
Resultados obtenidos de vida infinita y factor de seguridad,



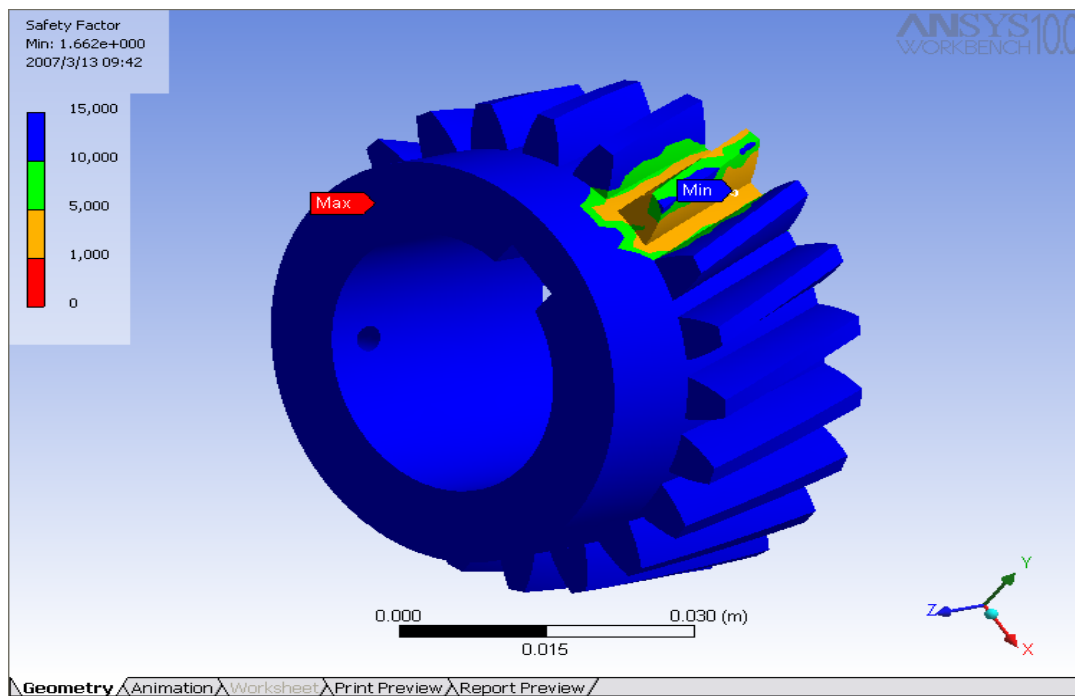


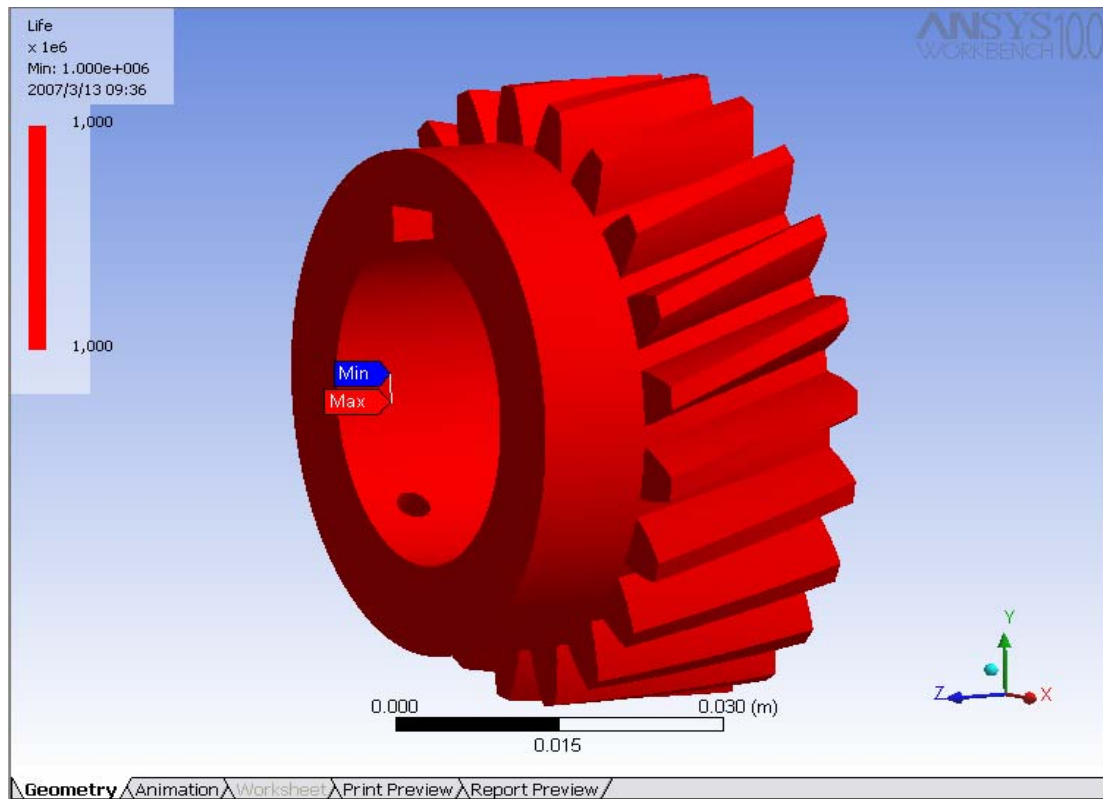
**4.5.3 Piñón.** Engranaje de alta velocidad, determinación de los parámetros de carga y apoyo,

Definition	
Define By	Components
Type	Force
<input type="checkbox"/> X Component	3500,7 N
<input type="checkbox"/> Y Component	-1356,7 N
<input type="checkbox"/> Z Component	-1272,2 N
Suppressed	No



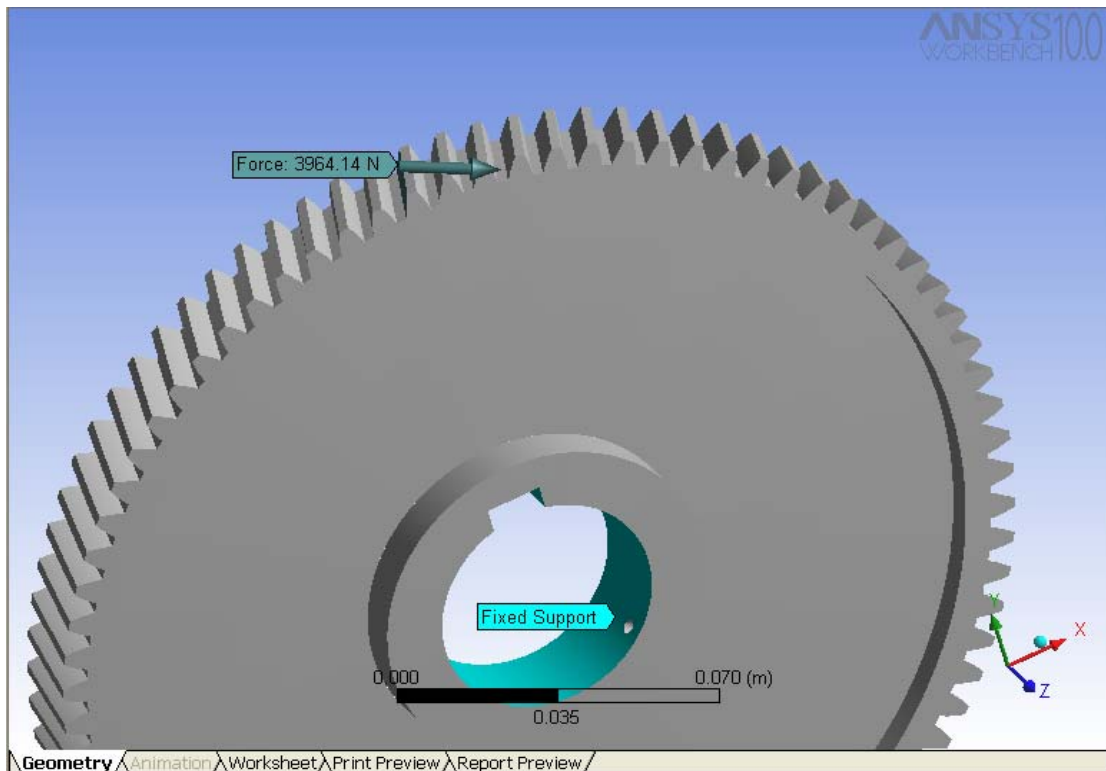
Resultados obtenidos de factor de seguridad y vida infinita,



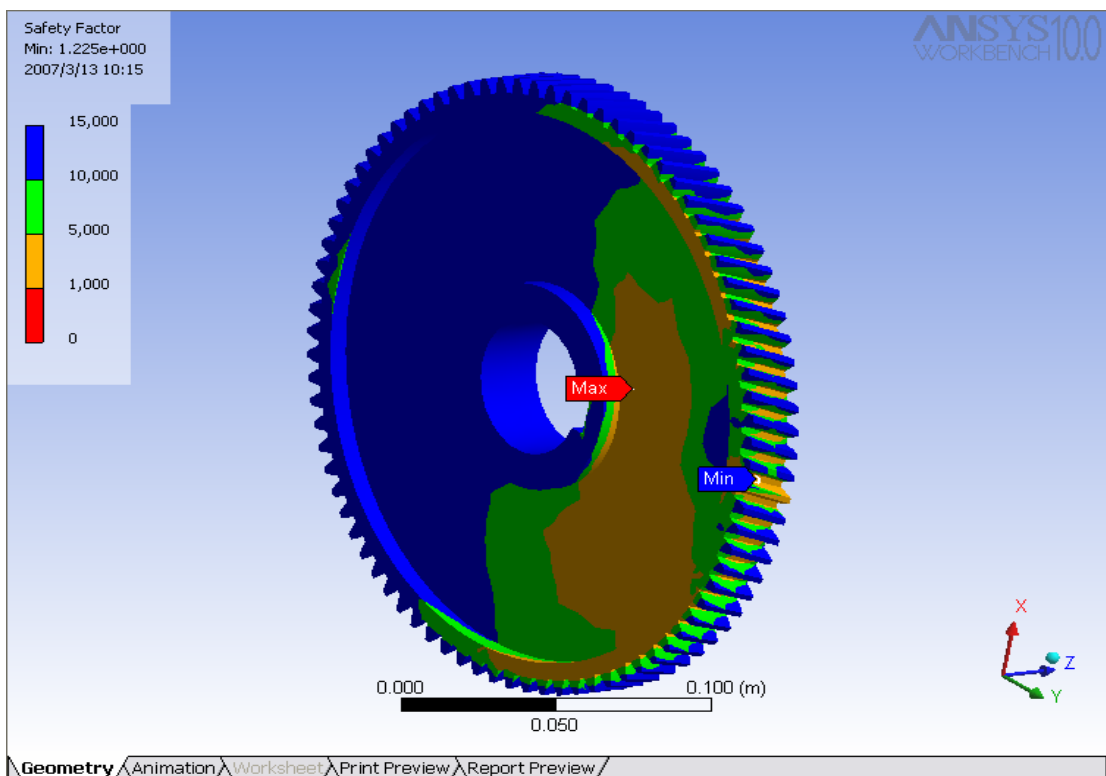


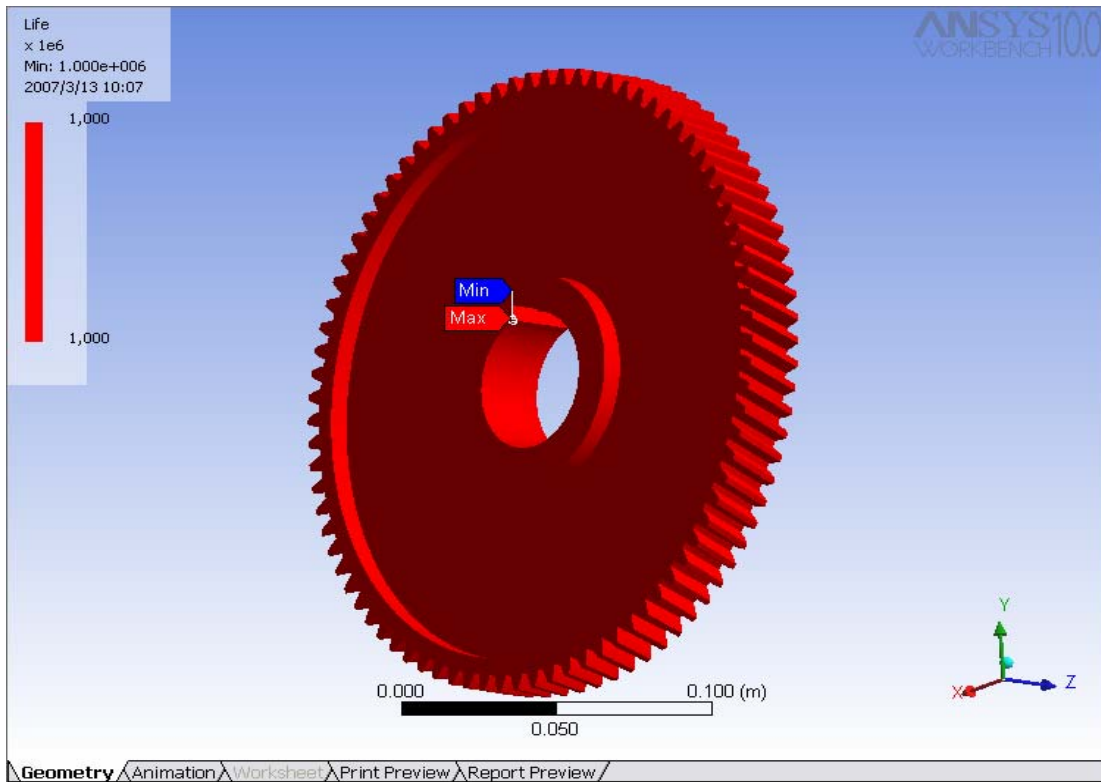
**4.5.4 Rueda.** Engranaje de baja velocidad, determinación de los parámetros de carga y apoyo,

Definition	
Define By	Components
Type	Force
<input type="checkbox"/> X Component	3500,7 N
<input type="checkbox"/> Y Component	-1356,7 N
<input type="checkbox"/> Z Component	1272,2 N
Suppressed	No



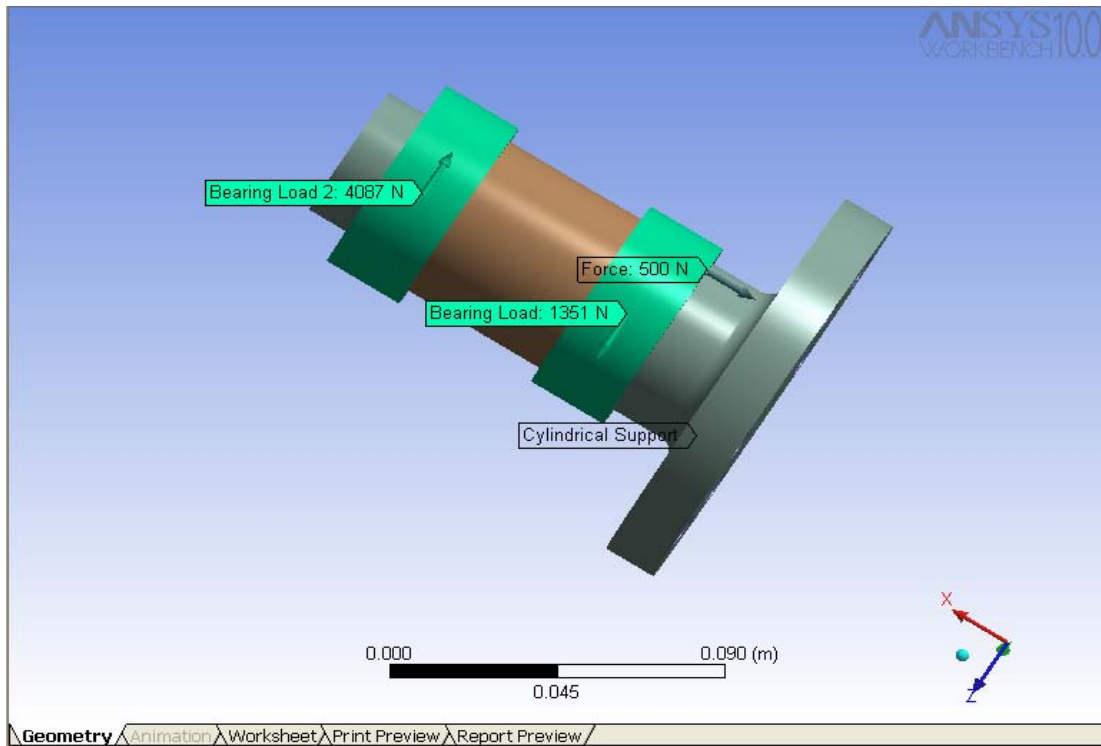
Resultados obtenidos de factor de seguridad y vida infinita,



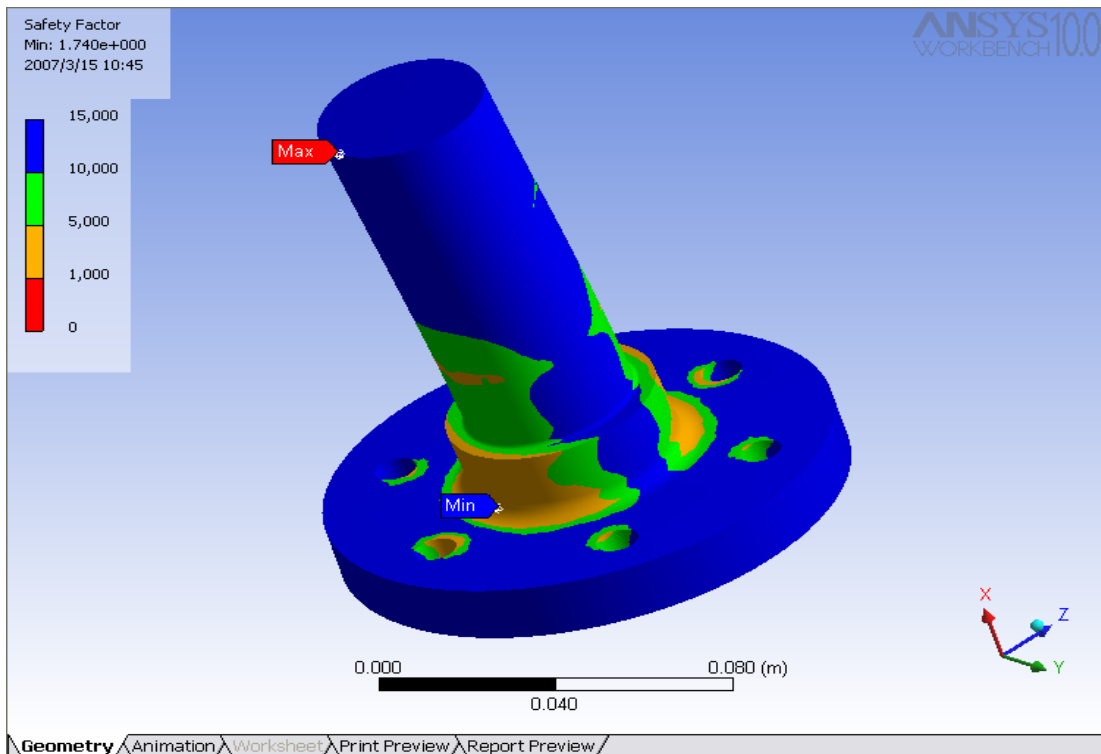


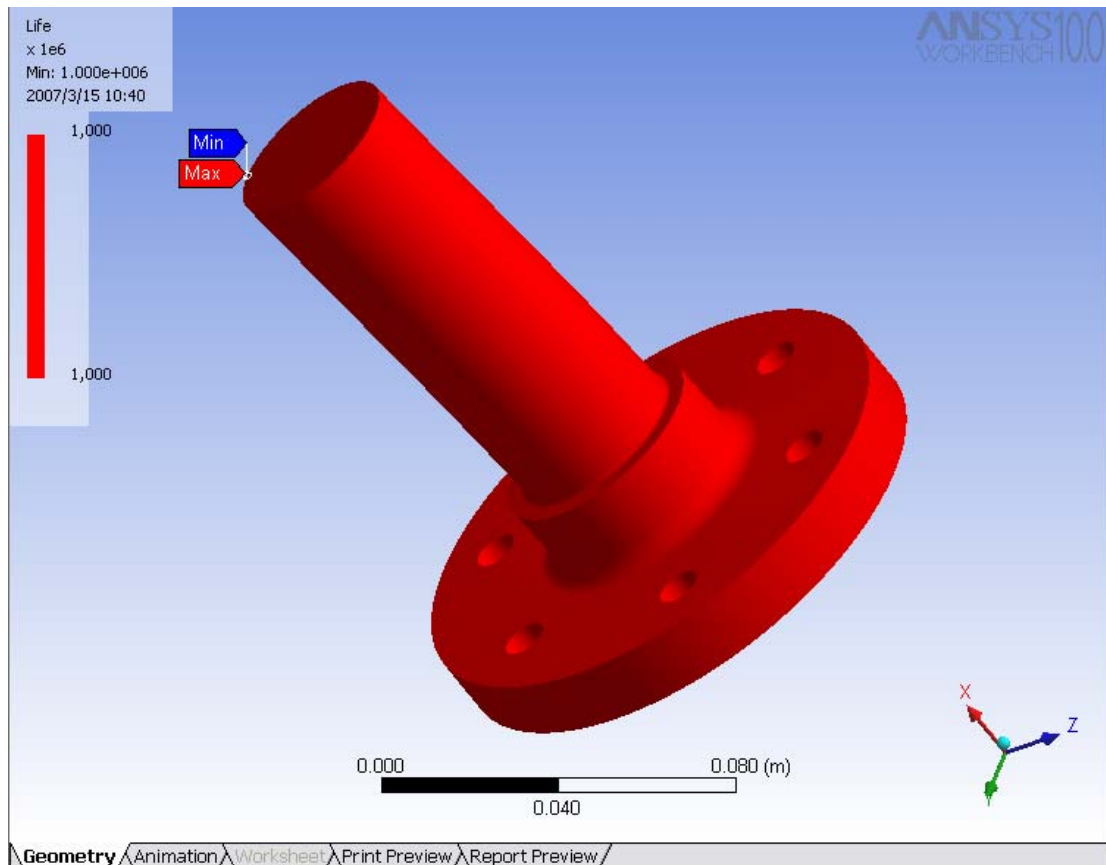
**4.5.5 Eje Soporte.** Eje que nos va a permitir el giro de la máquina para orientarse en la dirección del viento, y además será el apoyo de la turbina sobre la torre, determinación de los parámetros de carga y apoyo,

Definition		Definition		Definition	
Define By	Components	Define By	Components	Define By	Components
Type	Bearing Load	Type	Bearing Load	Type	Force
<input type="checkbox"/> X Component	0, N	<input type="checkbox"/> X Component	0, N	<input type="checkbox"/> X Component	-500, N
<input type="checkbox"/> Y Component	0, N	<input type="checkbox"/> Y Component	0, N	<input type="checkbox"/> Y Component	0, N
<input type="checkbox"/> Z Component	1351, N	<input type="checkbox"/> Z Component	-4087, N	<input type="checkbox"/> Z Component	0, N
Suppressed	No	Suppressed	No	Suppressed	No



Resultados obtenidos de factor de seguridad y vida infinita,





#### 4.6 TORRE

La torre debe estar elevada sobre el nivel del piso del lugar de emplazamiento a una determinada altura y esta elevación depende del factor de rugosidad que tenga la zona y de la potencia que se requiere. El factor de rugosidad depende de los barreras que puede ofrecer el paisaje ya sean árboles, edificaciones u otras. De la tabla 7 se puede dilucidar por medio del índice de energía, que es el porcentaje de energía que podemos obtener, dependiendo de los obstáculos de la zona indicada para la instalación. Como ya se ha hecho un estudio de vientos en el lugar, esta tabla nos ayuda a tener más criterios de selección del lugar.

Este lugar definido influye en la altura de la torre porque entre mayor índice de energía menor es la altura y viceversa, este esta ligado a que la altura de la torre debe ser mínima, por dos factores de importancia, primero, a mayor altura mayor velocidad de viento y segundo, las palas deben estar lejos del alcance de cualquier humano o animal que pueda tener contacto. Según la tabla 24 el lugar que se selecciono es el de un índice de energía de 45.

**Tabla 24. Rugosidades según el terreno.**

TABLA DE CLASES Y DE LONGITUDES DE RUGOSIDAD			
Clase de rugosidad	Longitud de rugosidad m	Índice de energía (%)	Tipo de paisaje
0	0,0002	100	Superficie del agua
0,5	0,0024	73	Terreno completamente abierto con una superficie lisa, p.ej., pistas de hormigón en los aeropuertos, césped cortado, etc.
1	0,03	52	Área agrícola abierta sin cercados ni setos y con edificios muy dispersos. Sólo colinas suavemente redondeadas
1,5	0,055	45	Terreno agrícola con algunas casas y setos resguardantes de 8 metros de altura con una distancia aproximada de 1250 m.
2	0,1	39	Terreno agrícola con algunas casas y setos resguardantes de 8 metros de altura con una distancia aproximada de 500 m.
2,5	0,2	31	Terreno agrícola con muchas casas, arbustos y plantas, o setos resguardantes de 8 metros de altura con una distancia aproximada de 250 m.
3	0,4	24	Pueblos, ciudades pequeñas, terreno agrícola, con muchos o altos setos resguardantes, bosques y terreno accidentado y muy desigual
3,5	0,8	18	Ciudades más grandes con edificios altos
4	1,6	13	Ciudades muy grandes con edificios altos y rascacielos

La selección y diseño de la torre dependen de la facilidad que se tiene para el montaje y de la carga que soporta. Según la clasificación hay dos opciones para el SICOE, una es la torre en celosía y la otra, torre de mástil. Por diseño y montaje la torre en celosía es más complicada, pues hay muchas piezas para el diseño y lo mismo para el montaje. La torre de mástil facilita el diseño, solo complica el transporte por las dimensiones.

La torre tiene 9 metros de altura, 2 de ellos van empotrados al piso y 7 sobre el nivel del piso, a esta misma altura se coloca una platina para anclar la torre por medios de tornillos a la cimentación.

**Figura 64. Torre total.**



**Figura 65. Detalle de la Brida en la parte superior de la Torre**



**Figura 66. Placa y peldaños de la Torre**



**Figura 67. SICOE instalado en la Torre**



**Figura 68. Base de la Torre que va empotrada en la zapata de cimentación.**



**Figura 69. Cimentación de la Torre, secado del concreto.**



#### **4.7 BANCO DE BATERÍAS**

Para la selección del banco de baterías, usamos los datos del generador que en este caso es un alternador de auto. Debemos diseñar un banco de baterías para un consumo de 800 Wh/día suponiendo una autonomía de dos días, para esto definimos las siguientes variables:

Cap: capacidad en amperios hora deseada.

Fac: Factor de acumulación que depende del tipo de batería y de la profundidad de descarga.

Consumo: el consumo del lugar en cuestión, es decir, 800 Wh/día.

Voltaje: voltaje de la batería en nuestro caso 12 V.

CapB: Capacidad de la batería Ah.

En la tabla 18 podemos observar el número de baterías que necesitamos para una autonomía de dos días, dependiendo de la capacidad de la batería y la profundidad de descarga. Vemos que entre mayor sea la capacidad de la batería y la profundidad de descarga menos es el número de baterías necesarias para suplir nuestro sistema<sup>31</sup>.

**Tabla 25. Número de baterías necesarias para dos días de autonomía.**

$$\text{Cap} = \text{Fac} * \text{Consumo} / \text{Voltaje} * \text{N}^\circ \text{días}$$

$$\text{N}^\circ \text{Baterías} = \text{Cap} / \text{CapB}$$

Voltaje= 12 V  
 N° de días= 2

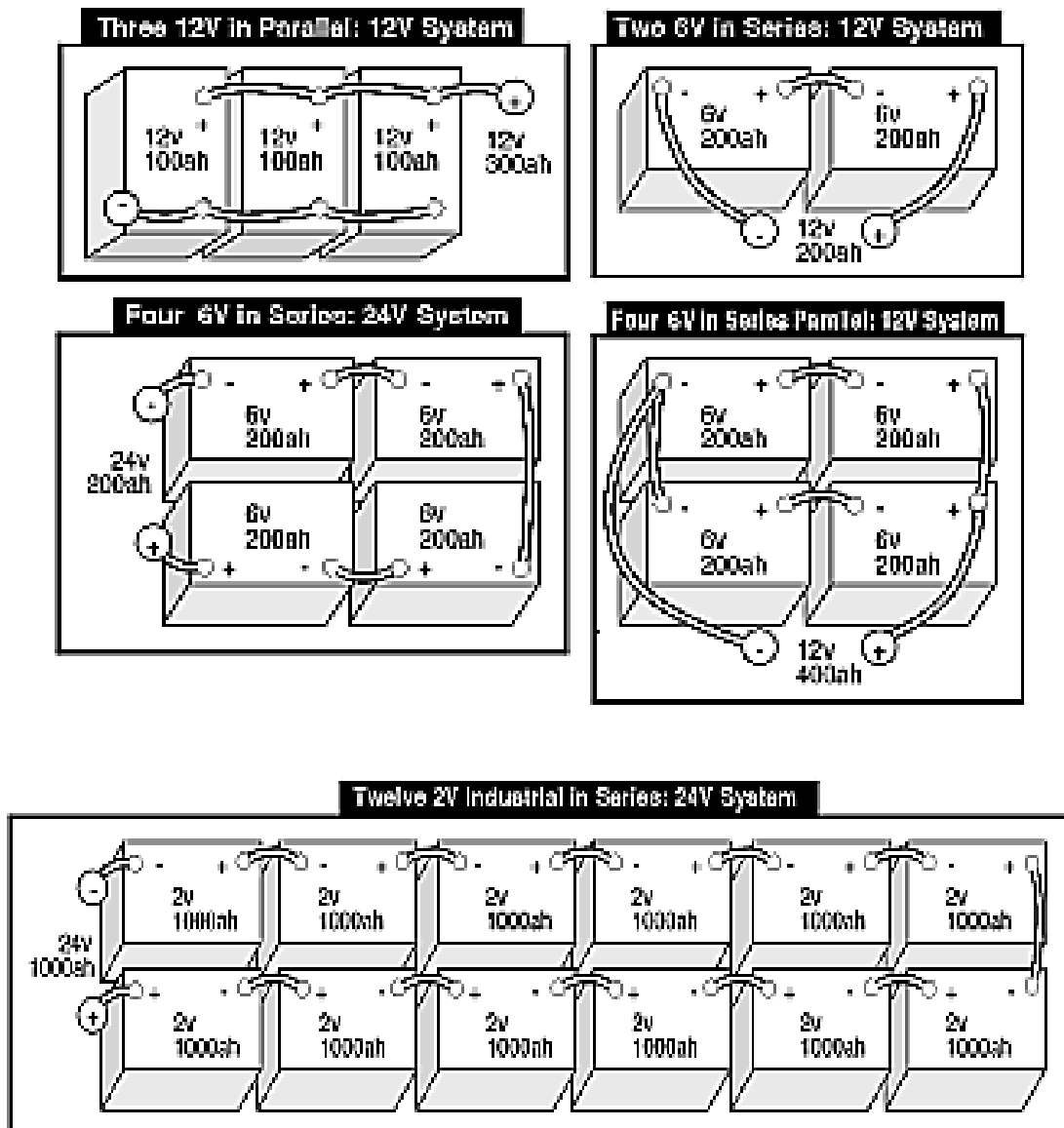
			Capacidad de las Baterías Ah				
			50	60	80	90	100
Profundidad %	Fac	Cap Ah	N°Baterías	N°Baterías	N°Baterías	N°Baterías	N°Baterías
100	1.00	133.33	3	2	2	1	1
95	1.05	140.35	3	2	2	2	1
90	1.11	148.15	3	2	2	2	1
85	1.18	156.86	3	3	2	2	2
80	1.25	166.67	3	3	2	2	2
70	1.43	190.48	4	3	2	2	2
60	1.67	222.22	4	4	3	2	2
50	2.00	266.67	5	4	3	3	3
40	2.50	333.33	7	6	4	4	3
30	3.33	444.44	9	7	6	5	4
20	5.00	666.67	13	11	8	7	7

Para elegir nuestro banco de baterías también debemos tener en cuenta su costo, y hacer un balance de acuerdo a nuestras necesidades y posibilidades.

<sup>31</sup> <http://www.xantrex.com/spanish/web/id/1346/page.asp>

Las baterías de automóvil no son las más aconsejables pero son muy económicas y cumplen con nuestras aplicaciones.

Figura 70. Diferentes tipos de conexiones de Bancos de Baterías<sup>32</sup>



<sup>32</sup> <http://www.enalmex.com/paginas/baterias.htm>

## **5. ANÁLISIS Y JUSTIFICACIÓN ECONÓMICA**

La implementación y uso de energía eólica resulta alternativa de impacto económico, social y medioambiental, gracias a la versatilidad de sus ventajas y uso:

### **5.1 IMPACTO SOCIAL**

Dado que la producción de SICOE viabiliza el acceso a una fuente de energía para las familias que por la ubicación geográfica distante o de difícil accesibilidad de sus viviendas, no cuentan con ninguna alternativa de servicio de red eléctrica, podemos empezar a vislumbrar el impacto de orden social derivado del mejoramiento de la calidad de vida implicada en la posibilidad de acceder a elementos de uso doméstico y agroindustrial básicos siendo una excelente solución para requerimientos eléctricos de baja potencia.

### **5.2 IMPACTO ECONÓMICO**

La implementación y uso de SICOE para las familias tienen acceso a servicio tradicional de electricidad -principalmente en área rural-, resulta económicamente atractiva ya que se trata de una inversión con un valor inicial de compra y uno muy bajo de mantenimiento, equiparable en muchos casos al costo de la factura que debe ser pagada indefinidamente en el

modelo tradicional mientras que en esta propuesta alternativa, se puede pagar en un periodo estimado de 5 años y disfrutar sus beneficios en uno de 20 a 30 años.

La posibilidad de construir y adaptar sistemas de generación de energía eólica puede resultar una medida de política social a ser implementada o promovida tanto por entidades de orden territorial como por familias interesadas en mejorar sus condiciones tanto de vida como de producción agrícola ya que se cuenta tanto con los atractivos mencionados de accesibilidad al servicio, como con la posibilidad de disminuir el impacto ambiental de la generación de otras fuentes de energía, a la vez que se viabiliza la cobertura por el bajo costo del montaje en relación a los altos costos de llevar redes a lugares remotos.

### **5.3 COSTOS DE PRODUCCIÓN**

El sistema propuesto de transformación de energía aerodinámica del viento en energía eléctrica con capacidad de generación promedio de **0.6 KW - 1 KW**, implica los costos de producción que a continuación se detallan, costo total al cual se incrementa un porcentaje estimado -el cual puede variar en términos de volumen de producción- de 25% para cubrimiento de gastos (administrativos, de comercialización, tributarios y legales) y se estima una utilidad esperada del 15%.

Tabla 26. Costos de Producción

<b>COSTOS DE PRODUCCION SICOE</b>				
<b>DETALLE</b>	<b>CANTIDAD</b>	<b>UNIDAD</b>	<b>VR UNITARIO</b>	<b>VR TOTAL</b>
<b><i>PALAS</i></b>				<b><i>1,200,000</i></b>
<b>Modelo Madera</b>	<b>1</b>		<b>200,000</b>	
Insumos			50,000	
Mano de Obra			150,000	
<b>Molde Fibra de Vidrio</b>	<b>1</b>		<b>200,000</b>	
Insumos			150,000	
Mano de Obra			50,000	
<b>Aspa en Fibra de Vidrio</b>	<b>3</b>		<b>800,000</b>	
Insumos			480,000	
Mano de Obra			320,000	
<b><i>DADO</i></b>				<b><i>1,116,000</i></b>
<b>Disco</b>	<b>1</b>		<b>896,000</b>	
Insumos			96,000	
Mano de Obra			800,000	
<b>Buje</b>	<b>1</b>		<b>112,000</b>	
Insumos			42,000	
Mano de Obra			70,000	
<b>Tornillos</b>	<b>12</b>		<b>8,000</b>	
<b>Cubierta</b>	<b>1</b>		<b>100,000</b>	
Insumos			30,000	
Mano de Obra			70,000	
<b><i>TRANSMISION</i></b>				<b><i>1,050,500</i></b>
<b>Eje de Alta Velocidad</b>	<b>1</b>		<b>105,000</b>	
Insumos			25,000	
Mano de Obra			80,000	
<b>Chaveta</b>	<b>1</b>		<b>5,500</b>	

<b>Eje de Baja Velocidad</b>	<b>1</b>		<b>48,000</b>	
Insumos			8,000	
Mano de Obra			40,000	
<b>Rodamientos</b>			<b>24,000</b>	
Alta Velocidad	2		6,000	
Baja Velocidad	2		6,000	
<b>Rueda</b>	<b>1</b>		<b>410,000</b>	
Insumos			60,000	
Mano de Obra			350,000	
<b>Piñón</b>	<b>1</b>		<b>130,000</b>	
Insumos			10,000	
Mano de Obra			120,000	
<b>Soportes de rodamiento</b>	<b>4</b>		<b>268,000</b>	
Insumos			12,000	
Mano de Obra			55,000	
<b>Acople</b>	<b>1</b>		<b>60,000</b>	
<b>ESTRUCTURA</b>				<b>1,010,800</b>
<b>Soporte de eje</b>	<b>2</b>		<b>380,000</b>	
Insumos			40,000	
Mano de Obra			150,000	
<b>Soporte de Torre</b>				
<b>Buje-Placa</b>	<b>1</b>		<b>200,000</b>	
Insumos			70,000	
Mano de Obra			130,000	
<b>Eje</b>	<b>1</b>		<b>155,000</b>	
Insumos			55,000	
Mano de Obra			100,000	
<b>Eje de Brida</b>	<b>1</b>		<b>50,000</b>	
<b>Rodamientos</b>	<b>2</b>		<b>14,000</b>	
<b>Marco</b>			<b>110,000</b>	
Insumos			50,000	
Mano de Obra			60,000	
<b>Cubierta</b>				
<b>Superior</b>	<b>1</b>		<b>60,000</b>	
Insumos			35,000	
Mano de Obra			25,000	

<b>Inferior</b>	<b>1</b>		<b>40,000</b>	
Insumos			25,000	
Mano de Obra			15,000	
<b>Tornillos</b>	<b>6</b>		<b>1,800</b>	
<b>TORRE</b>				<b>1,020,000</b>
<b>Tubo</b>			<b>240,000</b>	
Insumos	9	M	180,000	
Mano de obra			60,000	
<b>Placa</b>	<b>1</b>		<b>50,000</b>	
<b>Tornillos</b>	<b>6</b>		<b>33,000</b>	
<b>Brida</b>	<b>1</b>		<b>43,000</b>	
Insumos			8,000	
Mano de obra			35,000	
<b>Tornillos</b>	<b>6</b>		<b>4,000</b>	
<b>Anclajes</b>				
<b>Cimentación</b>	<b>1</b>		<b>35,000</b>	
Insumos			10,000	
Mano de obra			25,000	
<b>Gancho</b>	<b>4</b>		<b>8,000</b>	
<b>Vientos o Guayas</b>			<b>42,000</b>	
<b>Cable</b>	32	M	32,000	
<b>Perro</b>	12		6,000	
<b>Tensor</b>	4		4,000	
<b>Cimentación Torre</b>			<b>65,000</b>	
M de O Excavación			25,000	
Insumos			40,000	
<b>Instalación Torre</b>			<b>300,000</b>	
<b>Transporte</b>			<b>200,000</b>	
<b>SISTEMA ELECTRICO</b>				<b>496,750</b>
<b>Generador</b>	1		140,000	
<b>Cables</b>	15		36,750	
<b>Batería</b>	1		220,000	
<b>Instalación Sistema</b>			100,000	

<b>SISTEMA DIRECCION</b>	<b>DE</b>				<b>310,000</b>
<b>Aleta</b>		1		130,000	
Insumos				30,000	
Mano de Obra				100,000	
<b>Acople de Aleta</b>		1		20,000	
<b>Tornillos</b>		6		10,000	
<b>Contrapeso</b>		2		20,000	
<b>TOTAL COSTOS DIRECTOS</b>					<b>6,204,050</b>
<b>GASTOS ( 25%)*</b>					<b>1,551,013</b>
<b>SUBTOTAL</b>					<b>7,755,063</b>
<b>UTILIDAD (15%)</b>					<b>1,163,259</b>
<b>PRECIO COMERCIAL SICOE</b>					<b>8,918,322</b>

El valor comercial de SICOE en las condiciones técnicas propuestas y con la capacidad de transformación mencionada asciende a \$8.918.322

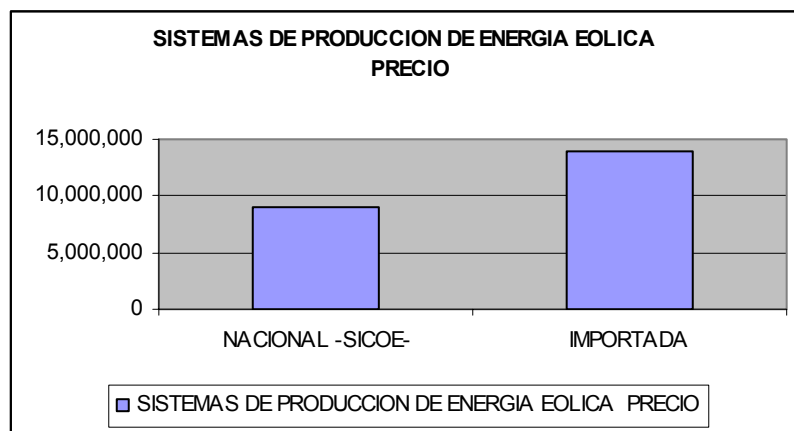
#### 5.4 PRODUCCIÓN NACIONAL DE SISTEMAS DE GENERACIÓN DE ENERGÍA EÓLICA

La propuesta aquí planteada de producción de sistemas de generación de energía nacionales, aumenta la accesibilidad para el usuario final en relación con la compra de sistemas de características y usos similares importados dado que la diferencia en precios de compra para el consumidor puede ser disminuida hasta en un 57% con unos beneficios y garantías equiparables, a la vez que se promueve la economía nacional.

**Tabla 27. Comparación de precios entre una turbina importada y una de fabricación nacional**

SISTEMAS DE PRODUCCION DE ENERGIA EOLICA		
ORIGEN	PRECIO	%
NACIONAL -SICOE-	8,920,000	100%
IMPORTADA	14,000,000	157%

**Figura 71. Comparación de precios entre una turbina importada y una de fabricación nacional**



## 5.5 POSIBILIDADES DE FINANCIACIÓN Y ACCESIBILIDAD AL SISTEMA

El análisis de la viabilidad de inserción en el mercado del sistema propuesto, nos lleva a analizar la población objetivo del producto, encontrando que está compuesto principalmente por familias de establecimiento rural cuyo ingreso puede ser variable dependiendo de la zona del país que se pretenda abarcar.

Sin embargo y en términos muy generales se plantea, dentro de las muchas otras posibilidades existentes en el mercado financiero, la siguiente opción que parece acorde con las necesidades crediticias de tal población como una

manera de viabilizar la accesibilidad para el mayor número posible de familias:

#### **5.5.1 Crédito Especializado para Electrificación propuesto por FINAGRO.**

FINAGRO es una entidad pública de orden nacional cuyo objetivo es la promoción del sector agrícola y sus componentes. Ofrece alternativas financieras de bajo costo con facilidades de plazos y tasas de interés y un beneficio adicional de un periodo de 5 de gracias, años que permite al usuario la puesta en marcha del proyecto y el disfrute y aprovechamiento de sus ventajas al punto de lograr un objetivo económico dadas las mejoras en su sistema productivo de base.

Se adjunta a continuación la simulación de un crédito para la compra del sistema de generación de energía SICOE, con las características financieras actuales, las cuales por obvias razones macroeconómicas varían con el tiempo.

En la proyección presentada se evidencia que la compra de un sistema que viabilizar el acceso a energía a una familia durante 20 a 30 años, tiene un valor que incluye costos financieros con cuota decreciente inicial de \$163 mil pesos y final de \$119.000 mensuales, pagaderos en cinco años con un periodo de gracia igual al del crédito.

Este valor de cambio puede no ser estimable en términos de su valor de uso, dado que la medición de la calidad de vida no es cuantificable, pero sí lo sería en su momento la retribución económica que permite el mejoramiento y tecnificación de los sistemas de producción aún cuando sean de baja escala.



**FINAGRO**

NOMBRE	JUAN PEREZ		
CODIGO RUBRO	347300	DTF ACTUAL (EA)	<b>8.69%</b>
PRODUCTO	ELECTRIFICACION		
LINEA	ADECUACION DE TIERRAS, TRANSFORMACION PRIMARIA Y COMERCIALIZACION		
VALOR DEL PROYECTO ==>	8,918,322	TASA DE INTERES NOMINAL	12.01% <u>PROPUESTA</u>
FECHA INICIO (DD/MM/AÑO) ==>	<b>1-nov-2007</b>	TIPO DE PRODUCTOR	PEQUEÑO
AMORTIZACION CAPITAL	0		0
PAGO INTERESES	0 0		
PERIODO DE GRACIA	180	0	
INGRESE PLAZO ESTIMADO ==>	60 MESES		
PERIODO GRACIA DIFERENTE ==>	<b>120</b> MESES		0
PUNTOS ADICIONALES AL DTF	4.00%	EA	0
VALOR A FINANCIAR	MAXIMO	CREDITO	0
DEL COSTO DEL PROYECTO DE LAS UNIDADES	100.00%	8,918,322	0
RECUERDE: EXISTEN LIMITES AL CREDITO PARA PEQUEÑO PRODUCTOR			

CUOTA No.	FECHA	ABONOS	INTERESES	CUOTA	SALDO	ABONO ICR
1-120			PERIODO DE GRACIA		8,918,322	
121		74,319		163,577	8,844,003	
122		74,319		162,833	8,769,684	
123		74,319		162,089	8,695,365	
124		74,319		161,345	8,621,046	
125		74,319		160,601	8,546,727	
126		74,319		159,857	8,472,408	
127		74,319		159,114	8,398,089	

128	74,319	84,051	158,370	8,323,770
129	74,319	83,307	157,626	8,249,451
130	74,319	82,563	156,882	8,175,132
131	74,319	81,819	156,138	8,100,813
132	74,319	81,076	155,395	8,026,494
133	74,319	80,332	154,651	7,952,175
134	74,319	79,588	153,907	7,877,856
135	74,319	78,844	153,163	7,803,537
136	74,319	78,100	152,419	7,729,218
137	74,319	77,357	151,676	7,654,899
138	74,319	76,613	150,932	7,580,580
139	74,319	75,869	150,188	7,506,261
140	74,319	75,125	149,444	7,431,942
141	74,319	74,381	148,700	7,357,623
142	74,319	73,638	147,957	7,283,304
143	74,319	72,894	147,213	7,208,985
144	74,319	72,150	146,469	7,134,666
145	74,319	71,406	145,725	7,060,347
146	74,319	70,662	144,981	6,986,028
147	74,319	69,918	144,237	6,911,709
148	74,319	69,175	143,494	6,837,390
149	74,319	68,431	142,750	6,763,071
150	74,319	67,687	142,006	6,688,752
151	74,319	66,943	141,262	6,614,433
152	74,319	66,199	140,518	6,540,114
153	74,319	65,456	139,775	6,465,795
154	74,319	64,712	139,031	6,391,476
155	74,319	63,968	138,287	6,317,157
156	74,319	63,224	137,543	6,242,838
157	74,319	62,480	136,799	6,168,519
158	74,319	61,737	136,056	6,094,200
159	74,319	60,993	135,312	6,019,881
160	74,319	60,249	134,568	5,945,562
161	74,319	59,505	133,824	5,871,243

162	74,319	58,761	133,080	5,796,924
163	74,319	58,018	132,337	5,722,605
164	74,319	57,274	131,593	5,648,286
165	74,319	56,530	130,849	5,573,967
166	74,319	55,786	130,105	5,499,648
167	74,319	55,042	129,361	5,425,329
168	74,319	54,299	128,618	5,351,010
169	74,319	53,555	127,874	5,276,691
170	74,319	52,811	127,130	5,202,372
171	74,319	52,067	126,386	5,128,053
172	74,319	51,323	125,642	5,053,734
173	74,319	50,579	124,898	4,979,415
174	74,319	49,836	124,155	4,905,096
175	74,319	49,092	123,411	4,830,777
176	74,319	48,348	122,667	4,756,458
177	74,319	47,604	121,923	4,682,139
178	74,319	46,860	121,179	4,607,820
179	74,319	46,117	120,436	4,533,501
180	74,319	45,373	119,692	4,459,182
<b>TOTALES</b>	<b>4,459,140</b>	<b>4,038,910</b>	<b>8,498,050</b>	

## 6. CONCLUSIONES

- El arranque de la turbina, según medidas de viento realizadas se presenta para velocidades de viento superiores a los 5 m/s, es una medida bastante razonable, en comparación con otras turbinas del mismo tipo que arrancan generalmente a velocidades superiores a los 4,5 m/s.
- Los cambios climáticos han originado vientos menos regulares y de menor velocidad. Se han medido vientos no superiores a los 10 m/s, lo que implica una menor velocidad de rotación (250 rpm aprox.) de la turbina de lo esperado, ya que se habían tomado medidas superiores a los 15 m/s.
- La experiencia obtenida con el análisis de los resultados obtenidos, nos da una amplia perspectiva de investigación y aplicación.
- El inicio de la investigación en aerogeneradores en el ámbito local tiene una perspectiva frente a las posibilidades de continuar en el camino de dicha investigación, pues se puede empezar por obtener información concreta y diciente del potencial eólico de la zona donde se instala la turbina, La Mesa de los Santos.
- La necesidad de definir estudios en el área de la aerodinámica de las palas y la consecución de libros de consulta en este tema es indispensable para proseguir en el camino de la energía eólica.

- Los sistemas de control y de dirección de los aerogeneradores se pueden mejorar con controles electrónicos y con el montaje de instrumentos de medida para optimizar el funcionamiento y las observaciones del comportamiento.
- La fabricación de las partes debe ser con previa investigación de costos y posibilidades de manufactura, esto disminuiría la incertidumbre del tiempo de construcción y las facilidades de montaje que en el papel no se dilucidan.
- Es hecho en la región. En el país se encuentran empresas que venden aerogeneradores de las mismas características solo que son importados en su totalidad o parcialmente.
- Como inicio de la investigación se obtienen herramientas de primera mano para hacer pruebas y para tomar decisiones de diseño en próximos proyectos de investigación y construcción.
- El SICOE es un aerogenerador de baja potencia lo cual no se debe desestimar, pues la dispersión de las viviendas rurales le dan importancia a su diseño y a su uso.
- El consumo de energía de una vivienda rural esta entre 700 y 1000 W, el diseño esta en este rango, luego la experiencia recopilada es de mucha importancia para la aplicación real.
- Como ya existe a la fecha más información en la red y en libros. Como experiencias en otros países, es posible hacer con mejores resultados un aerogenerador

## 7. RECOMENDACIONES

Las recomendaciones varían y dependen de muchos factores que implican el diseño de una turbina, desde su ubicación (comportamiento del viento) hasta la estructura de soporte para la turbina que incluye la torre.

- Se pueden usar materiales más livianos y más económicos que puedan disminuir la velocidad del viento con la que arranca la turbina.

- Es importante tener en cuenta la potencia del generador seleccionado para que corresponda con las dimensiones del rotor y la relación de la transmisión.

- En lo posible hacer todas las pruebas necesarias de los generadores que se pueden utilizar, con el fin de seleccionar con toda seguridad la mejor opción. En el caso de alternadores de automóviles verificar cada tipo de alternador ya que varían de acuerdo al tipo de automóvil.

- Para mejorar cada parte del aerogenerador se pueden hacer estudios específicos en el área de la aerodinámica de las palas, como estudio de perfiles en túneles de viento, comportamiento de las palas en su longitud, mejoras en el diseño y materiales para disminuir ruido tanto en las palas como en la transmisión.

- La UPME (Unidad de Planeación Minero Energética) plantea entre las metas hasta el 2010, sistemas híbridos de generación para las zonas no interconectadas del país. Para este caso las zonas que tengan un buen

potencial eólico, que según el mapa eólico colombiano esta en los Santanderes, Boyacá, Cundinamarca y alto Tolima, que serian zonas de influencia de la investigación ya iniciada.

- La necesidad de generar relaciones óptimas con los entes territoriales es de suma importancia pues los proyectos que pueden ser apoyados colocan esa condición para que se puedan desarrollar.

## BIBLIOGRAFÍA

**AGUIRRE BALCELLS, José A.** Una Introducción al Estudio de Perfiles Aerodinámicos. Limusa, 1984.

**BOADA ORTIZ, Eduardo.** Diseño Construcción y Montaje de un aerogenerador de 2,5 m de diámetro. Tesis de grado Universidad de los Andes. 1993.

**CUNTY, Guy.** Aeromotores y Aerogeneradores. Marzo 80, 1980.

**ELDRIDGE, Frank.** Wind Machines. Mitre. 1975.

**MUNERA GÓMEZ, Andrés.** Diseño y construcción de un Eolo-generador de baja potencia. Tesis de Grado Universidad de los Andes 1987.

**PARÉS, José M<sup>a</sup>.** Manual del Instalador de Motores Eléctricos. CEAC, 1974.

**PINILLA, Álvaro.** Manual de Aplicación de la Energía Eólica. Ministerio de Minas y Energía. 1997.

**ROSATO, Mario.** Diseño de Máquinas Eólicas de Pequeña Potencia. ProgenSA. 1991.

**S.M. Habali y I.A. Saleh.** Local design, testing and manufacturing of small mixed airfoil wind turbine blades of glass fiber reinforced plastics. Energy Conversion & Management. 1997.

**THALER George J y WILCOX Milton L.** Máquinas Eléctricas. Limusa-Wiley, 1966.

[www.altertec.com/productos/aerogenerador\\_whisper.htm](http://www.altertec.com/productos/aerogenerador_whisper.htm)

[www.amerlis.pt](http://www.amerlis.pt)

<http://thales.cica.es/rd/recursos/rd99>

<http://usuarios.arnet.com.ar>

[www.energiasrenovables.com](http://www.energiasrenovables.com)

[www.windpower.dk](http://www.windpower.dk)

[www.uco.es/grupos/labvirtual/tutoriales/eolica/PROYECTO/INDEX.htm](http://www.uco.es/grupos/labvirtual/tutoriales/eolica/PROYECTO/INDEX.htm)

[www.iit.upco.es/oscar/pfc/sesion\\_03.pdf](http://www.iit.upco.es/oscar/pfc/sesion_03.pdf)

[www.rcm2-soporte.com/documentos/Fundamentos.pdf](http://www.rcm2-soporte.com/documentos/Fundamentos.pdf)

[www.termica.webhop.info/](http://www.termica.webhop.info/)

<http://mecanicavirtual.iespana.es/alternador.htm>

[www.automecanico.com/auto2011/alt3.html](http://www.automecanico.com/auto2011/alt3.html)

[www.rcm2-soporte.com/documentos/Weibull.pdf](http://www.rcm2-soporte.com/documentos/Weibull.pdf)

[www.unesco.org.uy/phi/libros/microcentrales/lauterjung.html](http://www.unesco.org.uy/phi/libros/microcentrales/lauterjung.html)

[www.sotaventogalicia.com/area\\_tecnica/tecnologias\\_caracteristicas.php](http://www.sotaventogalicia.com/area_tecnica/tecnologias_caracteristicas.php)

# ANEXOS

## **Anexo A. FABRICACIÓN DE LAS PALAS**

Con el diseño de las palas ya definido se procede en la fabricación, la cual se hizo de la siguiente forma:

1. Modelo de la pala en madera. El modelo se obtiene con la forma del perfil cada 0.2 m y con la ecuación que describe el costado de la pala. Este es un trabajo de carpintería en su totalidad. Luego se rellenan las uniones de la madera con masilla para eliminar las discontinuidades del molde en fibra de vidrio. En la foto se puede observar que la pala tiene un anillo en el modelo en madera que se elimina para el molde en fibra de vidrio.

**Modelo en madera**



2. Molde en fibra de vidrio. Este se hace sobre el modelo en madera, este molde esta hecho en dos partes. Que se pulen, se pintan y se les vierte un químico para que la fibra no se pegue.

**Modelo en madera y molde en fibra de vidrio**



**Molde en fibra de vidrio, pulido**



**Molde en fibra pintado para impedir que la fibra se pegue, se le adiciona además un químico.**



3. Conformación de la Pala. Con los moldes listos se van colocando las capas de emulsión y de fibra de vidrio a lo largo del molde, para ir conformando la pala. Al llenar el tope del molde se deja endurecer por 24 horas.

**Vertido de la emulsión inicial**



**Primera capa de fibra.**



**Aplicación de varias capas de fibra y de la emulsión.**



#### Media pala solidificada



4. Pegue de la pala. Después del secado se vierte el pegante sobre una de los dos partes y e la otra se le aplica una capa muy delgada, se unen las dos partes y se amarran con caucho para que queden firmemente unidas, el tiempo de pegado es de 24 horas.

#### Aplicación del pegante para unir las dos partes de la pala



**Unión de las dos partes de la pala y amarre para secado.**



**Pala solidificada, una con pulida del pegue y la otra en proceso.**



5. Pulido y Enmasillado. Cuando ya cumplieron el tiempo de secado se les quita el molde y se pasan a la pulidora para eliminar la rebaba en la periferia del pegue y después al enmasillado para eliminar rugosidades sobre la superficie, esto hace mejor el comportamiento aerodinámico.

**Pulido en la periferia de pegue y enmasillado para evitar porosidades.**



6. Terminación de las Palas

**Pintado y terminación**



## **Anexo B. PRUEBA DE BALANCEO DEL ROTOR**

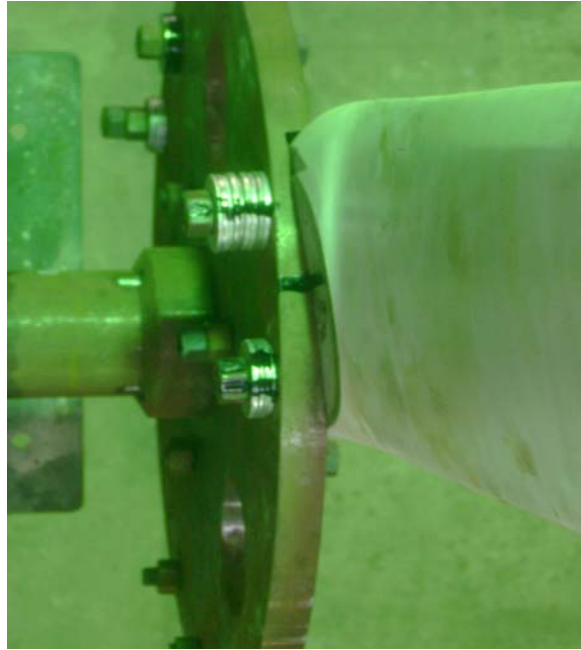
Como primera medida se hizo el montaje para las pruebas de la estructura del SICOE, se anclo a la placa del mezanine del taller de la escuela de Ingeniería Mecánica, para que las vibraciones fueran las menores.

En este proceso se utilizó un variador de velocidad y un motor eléctrico para simular el viento y así determinar el balanceo dinámico.

**Montaje de la estructura del SICOE para las pruebas de balanceo.**



**Adicionamiento de masas en las palas para hacer el balanceo estático, arandelas debidamente pesadas.**



**Pruebas de balanceo dinámico.**



Pruebas para determinar la frecuencia natural de las palas.  $f_n = 195$  rpm.



### **Anexo C. INSTALACION DEL SICOE**

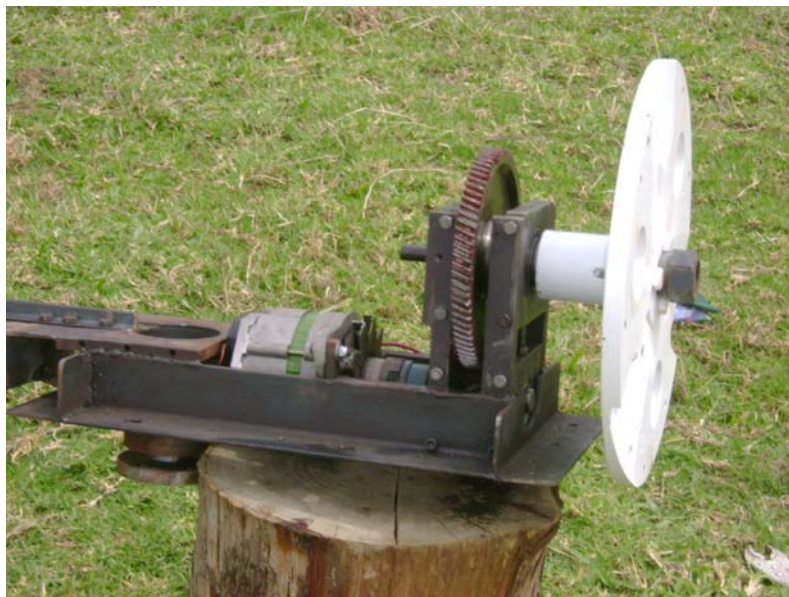
El SICOE esta instalado en la finca "LA BONITA" en la Mesa de los Santos. En el mismo lugar donde si hizo la toma de datos del viento. El proceso fue el siguiente:

1. Excavación para la cimentación de la Torre. Y cimentación de los anclajes, cada uno de ellos a 90 grados del eje de la torre y a 5 metros de de el mismo eje.

**Excavación de la zapata de la torre**



- Montaje del Nacelle. Dentro del nacelle se encuentra todo el sistema de transmisión y el generador, todo esto anclado a la estructura que se acopla a la torre, por medio de una brida atornillada, como se muestra en las figuras.







3. Colocación del Sistema de Orientación, e izada de la Torre. Instalado el Nacelle y el Sistema de Orientación en la torre, se procede a izar la torre en principio se coloca sobre un andamio como se ve en la figura y luego por medio de una horqueta instalada en la dirección opuesta y con la ayuda de un diferencial de eleva la torre lentamente. Con la ayuda de los tensores de cable, instalados previamente, se mantiene en un solo plano la izada de la torre.

**Instalación de los tensores a la altura de 5m de la torre**



**Torre con el SICOE, colocación sobre los andamios.**



**Horqueta. Lazo, tensores y diferencial para elevar la torre**



## Torre Izada



Después de izada la Torre se vierte la mezcla de concreto en la zapata, los tornillos se colocan en la placa atornillados a un numero de vueltas igual, antes de que se solidifique el concreto se aploma la torre con los tensores.

### Cimentación de la Zapata de la Torre



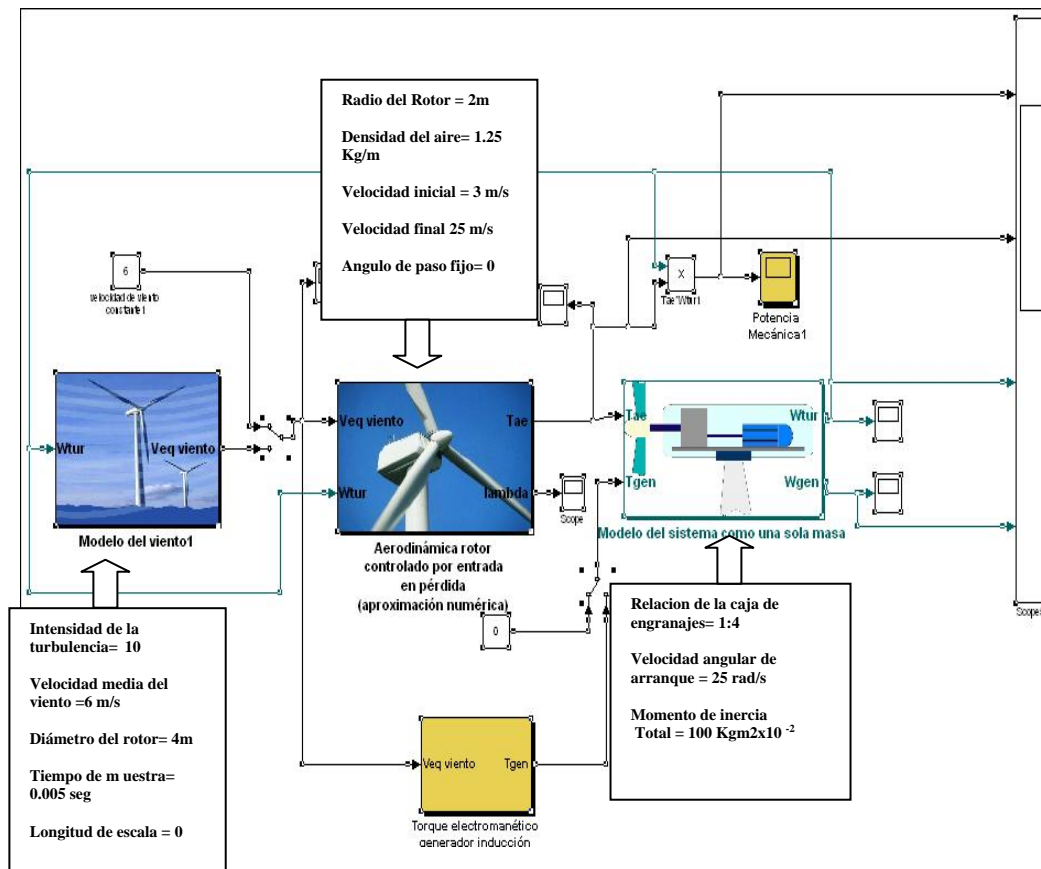
## Anexo D. SIMULACION DEL SICOE

Con el propósito de cumplir los requerimientos necesarios para determinar el comportamiento de la parte eléctrica del SICOE, se hace uso del proyecto de grado MODELADO Y SIMULACIÓN DEL SISTEMA MECÁNICO DE UN GENERADOR EÓLICO DE EJE HORIZONTAL CON TRES PALAS, desarrollado por Omar Uscátegui Cristancho y Dario Prada Parra. El objetivo de este proyecto es modelar y simular el sistema mecánico, que incide en la transformación de la energía eólica en energía eléctrica, de una turbina de viento de eje horizontal con rotor de tres palas. Utilizando el software **Matlab Simulink**.

El modelamiento y simulación total se dividió en cuatro subsistemas: modelo del viento, aerodinámica del rotor, sistema de transmisión mecánica y sistema de control para turbinas por control por variación del ángulo de paso y por diseño aerodinámico; cada uno de ellos se desarrolló con base a sus fundamentos teóricos, características y modelos matemáticos, luego se implementaron en **Matlab Simulink**. Después de esto se hizo el montaje total del sistema ensamblando e interconectando los cuatro bloques entre si para realizar la simulación total.

El modelo del viento, tiene como objetivo determinar y predecir su comportamiento de acuerdo con el lugar de emplazamiento. Este determina las características físicas del viento, la influencia y acción sobre el rotor de la turbina

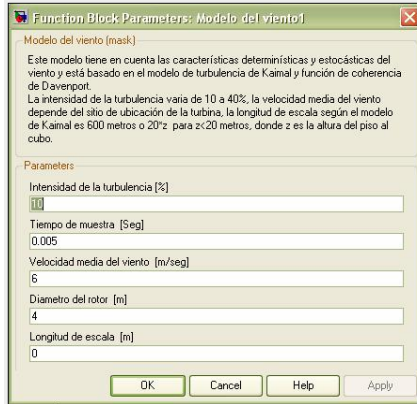
## Subsistemas para la simulación



El programa tiene una ventana para los datos de entrada en cada uno de los subsistemas. En el siguiente pantallazo, para el caso de estudio del SICOE se muestran los datos de entrada y los valores necesarios para el modelo del viento. En el pantallazo se muestra la base matemática del análisis y la explicación de cada parámetro. El tiempo de muestreo, velocidad media del viento, está medida a la altura del cubo de la turbina, es determinada por datos experimentales o atlas eólicos; Diámetro del rotor y Longitud de escala, que es un parámetro requerido por el espectro de turbulencia de Kaimal y tiene un valor definido de 600 metros para turbinas que generen más de 1

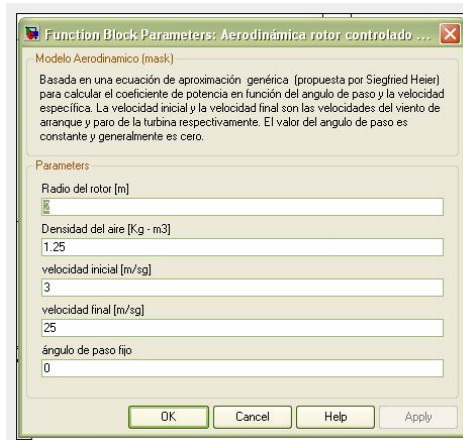
MW de potencia, de lo contrario este valor equivale a 20 veces la altura medida del piso al cubo de la turbina.

### Datos de entrada para el modelo del viento.



La aerodinámica del rotor, es el análisis del comportamiento del viento al atravesar el rotor y para este se incluye la caracterización geométrica y la dinámica de las palas, el diámetro del rotor y la teoría de Betz. Con los datos de entrada (radio del rotor, velocidad de giro del rotor y velocidad del viento) se calcula la velocidad específica ( $\lambda$ ) o TSR, con este valor y el ángulo de paso (para aerogeneradores con ángulo de paso variable) se entra a la tabla experimental de  $C_q$  y se obtiene el valor correspondiente al coeficiente de torque. Al igual que en la anterior la ventana describe la base teórica para el análisis.

### Datos de entrada para el modelamiento de la aerodinámica del rotor



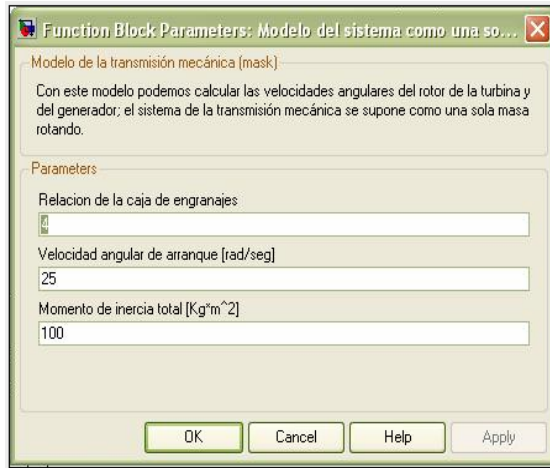
El sistema de transmisión mecánica de la turbina se diseña con la intención de obtener una velocidad mas amplia a la entrada del generador. El objetivo principal del modelamiento de la transmisión mecánica es hacer una abstracción del sistema real que permita una formulación matemática más sencilla pero con alto grado de precisión y similitud con el sistema real. Para empezar con la simplificación del sistema de transmisión mecánica, en el modelo sólo interesaran las partes de la turbina que puedan transmitir grandes oscilaciones o fluctuaciones a la potencia eléctrica de salida. Estas partes son: Las palas, el eje de baja velocidad, la caja multiplicadora y el eje de alta velocidad.

El eje de baja velocidad contiene el cubo y el de alta velocidad contiene el rotor del generador eléctrico. La caja multiplicadora se considera como un mecanismo de engranajes de ejes paralelos. Al analizar detalladamente el funcionamiento del sistema se puede deducir que la transmisión consta básicamente de dos masas rotando, una de mayor masa y momento de inercia que corresponde al rotor de la turbina (palas y cubo) y otra más pequeña que corresponde al generador. Los ejes se pueden modelar a través de su coeficiente de amortiguamiento y rigidez. El modelo a simular debe cumplir

con los siguientes requerimientos: El modelo debe representar las condiciones del sistema real con la mayor exactitud posible; la relación entre el sistema real y el modelo debe ser apreciable en cada una de las partes; debe ser posible introducir los parámetros del sistema en el modelo, estos parámetros deben coincidir con datos reales para lograr la máxima exactitud en los resultados.

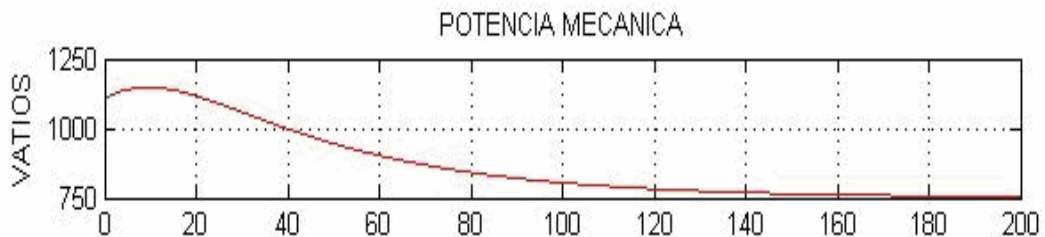
Las entradas al sistema son el torque aerodinámico que se toma del bloque donde se modeló la aerodinámica del rotor de la turbina, el torque del generador que proviene de las especificaciones técnicas del generador. Las salidas del sistema corresponden a la velocidad angular del rotor y del generador.

## Datos de entrada de la transmisión del SICOE

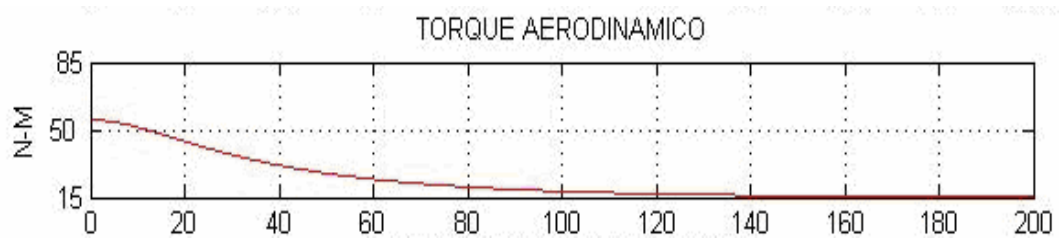


Los resultados de los datos de entrada son cuatro graficas que determinan el funcionamiento del SICOE. En todas las graficas se obtienen en un tiempo de simulación de 200 segundos y los resultados son las gráficas de Potencia Mecánica vs. Tiempo, Torque Aerodinámico vs. Tiempo, Velocidad angular del rotor vs. Tiempo y Velocidad Angular del Generador vs. Tiempo.

Se puede observar la curva de potencia vs. tiempo, esta curva muestra la variación que tiene la potencia desde el arranque hasta que se estabiliza la turbina, esto se hace alrededor de los 750 W, el valor coincide con el valor de diseño.



La gráfica del torque aerodinámico muestra un comportamiento similar a la de la potencia, estabilizándose en 15 N-m, la disminución del torque tiene que ver con la entrada en funcionamiento del generador.



Las dos últimas graficas muestran las velocidades angulares del rotor y del generador, la del rotor se estabiliza en 50 rad/s y la del generador a los 200 rad/s, conservando la relación de la transmisión.

