



**UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS
DE HIDALGO**

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

TESIS

**Diseño de un Sistema de Generación Eólico para alimentar un
Fraccionamiento Típico**

Que para obtener el Título de Ingeniero Electricista

PRESENTA

José Manuel Zúñiga Martínez

ASESOR

Dr. Gilberto González Avalos

MORELIA, MICHOACAN.

ABRIL 2011



Agradecimientos

Antes que nada agradezco a Cristo por darme la vida y conducirme por el buen camino, pese a las adversidades y tentaciones.

A mis padres Ma. Carmen Martínez Paramo y José Alfredo Zúñiga Cerrito. Por su apoyo incondicional y confianza que han depositado en mí, al forjarme sus principios, valores y costumbres.

A la Facultad de Ing. Eléctrica dependiente de la Universidad Michoacana de san Nicolás de Hidalgo donde adquirí los conocimientos de ingeniería para desarrollarme profesionalmente.

A mi asesor el Dr. Gilberto González Avalos, jefe del laboratorio de instrumentos y control en el edificio de la división de estudios de posgrado en ingeniería eléctrica, por hacer un espacio de su tiempo y apoyarme de manera desinteresada, en la elaboración de este proyecto de tesis.

Dedicatoria

A la memoria de mis abuelos ya fallecidos.

A mis padres.

A mis hermanas Rocío, Zulema y Verónica.

Resumen

En este proyecto de tesis se diseñó un sistema de generación eólico para alimentar un fraccionamiento de 216 viviendas, ubicado en el municipio de Lázaro Cárdenas en el estado de Michoacán de Ocampo. Para llevar a cabo este trabajo primero se realizó una introducción donde se incluyen algunos antecedentes del uso de la energía eólica en la antigüedad, se menciona el objetivo del proyecto y una breve descripción de los capítulos. Se analiza la forma de transformar la energía eólica en energía eléctrica en la actualidad por medio de aerogeneradores y/o turbinas eólicas. Se estudian los tipos de aerogeneradores y sus características que los distinguen unos de otros.

Se estudió el potencial eólico del lugar en específico y se realizaron los cálculos de electrificación y alumbrado a casas habitación para poder conocer la carga instalada del fraccionamiento, para evaluar las condiciones y de esta forma se propuso el tipo de aerogenerador y su capacidad de generación de electricidad, se elaboraron los planos generales de media y baja tensión ya que el fraccionamiento también es alimentado con la red de distribución de energía eléctrica de CFE, se realizaron los cálculos de regulación de voltaje y pérdidas de potencia tomando en cuenta las bases de diseño, las normas de construcción de CFE y la norma oficial mexicana (NOM – 001- SEDE - 2005).

Contenido

Agradecimientos	ii
Dedicatoria	iii
Resumen	iv
Contenido	v
Lista de Figuras	ix
Lista de Tablas	xi
Lista de Símbolos y Abreviaciones	xii
 Capítulo 1. Introducción	 1
1.1. La generación de energía eléctrica basada en energía eólica a pequeña escala	1
1.2. Objetivo	4
1.3. Justificación	4
1.4. Metodología	4
 Capítulo 2. La generación de energía eléctrica basada en energía eólica	 6
2.1 Introducción	6
2.2 Energía eólica	6
2.3 El aerogenerador	8
2.3.1 El tubo de corriente	9
2.4 Aerogeneradores de eje horizontal	9
2.5 Aerogeneradores de eje vertical	12
2.6 Aerogeneradores Maglev	13
2.7 Aerodinámica en aerogeneradores	13
2.7.1 Sustentación	14
2.7.2 Pérdida de sustentación	14

2.7.3 Secciones de un perfil.....	15
2.7.4 Angulo de ataque	16
2.7.5 Fuerza aerodinámica	16
2.8 Diseño de turbinas eólicas	18
2.8.1 Hélices de una pala	19
2.8.2 Hélices de dos palas	19
2.8.3 Hélices de tres palas	20
2.8.4 Hélices multipalas	20
2.9 Generadores de turbinas eólicas	21
2.9.1 Máquina síncrona	21
2.9.2 Generador síncrono	22
2.9.3 Turbinas eólicas con generadores síncronos	24
2.9.4 Generadores asíncronos (o de inducción)	24
2.9.4.1 El rotor de jaula	25
2.9.4.2 Funcionamiento como motor	26
2.9.4.3 Funcionamiento como generador	26
2.9.4.4 Deslizamiento del generador	27
2.9.4.5 Generador de inducción aislado	28
2.9.4.6 Generador de número de polos variable, dos velocidades	28
2.9.4.7 Generadores de deslizamiento variable para turbinas eólicas	29
2.9.4.8 Funcionamiento a velocidad variable de una turbina de regulación por cambio del ángulo de paso ("pitch controlled")	30
2.9.4.9 Mejora de la calidad de potencia	30
2.9.5 Conexión indirecta a red de aerogeneradores.....	31
2.9.5.1 Generación de corriente alterna (CA) a frecuencia variable	31
2.9.5.2 Conversión a corriente continua (CC)	31
2.9.5.3 Conversión a corriente alterna de frecuencia fija	32
2.9.5.4 Filtrado de la corriente alterna	32
2.9.5.5 Ventajas de la conexión indirecta a red: velocidad variable	32

2.9.5.6 Desventajas de la conexión indirecta a red	33
2.9.6 Cajas multiplicadoras para aerogeneradores	33
2.10 Potencia desarrollada por un aerogenerador	35
2.11 Control de potencia	36
 Capítulo 3. Diseño de un sistema de generación eólico	38
3.1 Introducción	38
3.2 Medición del Recurso	38
3.3 Zonas con potencial eólico en México	39
3.4 Potencial de Producción	42
3.5 Localización geográfica	42
3.5.1 Clima	43
3.5.2 Vientos.....	43
3.5.3 Topografía	44
3.6 Vivienda	44
3.6.1 Cálculos de electrificación y alumbrado a casas habitación	46
3.6.2 Factores relacionados con la carga instalada	48
3.6.2.1 Demanda máxima	48
3.6.2.2 Factor de demanda	49
3.6.2.3 Factor de utilización	49
3.6.2.4 Factor de diversidad	50
3.6.2.5 Factor de simultaneidad	51
3.7 Aerogenerador seleccionado	53
3.7.1 Descripción del aerogenerador	53
3.7.2 Características técnicas	54
3.7.3 Uso recomendado	55

3.7.4 Características generales	56
3.8 Instalaciones	57
3.8.1 Instalación aislada	57
3.8.2 Conexión a red	58
Capítulo 4. Aplicación del sistema de generación al fraccionamiento típico	59
4.1 Introducción	59
4.2 Instalaciones conectadas a la red eléctrica	59
4.3 Propuesta del Sistema de Generación Eólico con Aerogeneradores de 10 KW	60
4.3.1 Aerogenerador de 10 KW	60
4.3.2 Suministro de energía	60
4.3.3 Distribución de energía eléctrica	61
4.3.4 Costos del sistema de generación	66
4.4 Propuesta del Sistema de Generación Eólico con Aerogeneradores de 20KW	66
4.4.1 Aerogenerador de 20KW	66
4.4.2 Especificaciones técnicas	68
Capítulo 5. Conclusiones y Recomendaciones	71
5.1 Conclusiones	71
5.2 Recomendaciones	72
Apéndices	73
A. Catálogo de Aerogeneradores	73
Referencias	85

Lista de Figuras

2.1 Las áreas más calientes en el planeta tierra	7
2.2 Circulación del aire sin considerar el movimiento de rotación del planeta	7
2.3 Circulación del aire considerando el movimiento de rotación del planeta ...	8
2.4 Tubo imaginario de corriente alrededor del rotor de la turbina eólica	9
2.5. Esquema de una turbina eólica	10
2.6 Aerogenerador tipo Savonius	12
2.7 Perfil cortado del ala de un avión	13
2.8 El flujo de aire deja de estar en contacto con la superficie del ala	14
2.9 Terminología utilizada en un perfil	15
2.10 Angulo de ataque	15
2.11 Flujo sobre un plano aerodinámico	16
2.12 Descomposición de la fuerza aerodinámica	16
2.13 Fuerzas actuantes sobre un plano aerodinámico	17
2.14 Gráfico de Rendimiento Aerodinámico (C_p) vs Velocidad Especifica (λ), para diferente número de palas	18
2.15 Hélice monopala	19
2.16 Hélice de dos palas	19
2.17 Hélice de tres palas	20
2.18 Hélice multipalas	20
2.19 Motor síncrono	21
2.20 Generador síncrono	22
2.21 Rotor cilíndrico y rotor de polos salientes	22
2.22 Motor trifásico de inducción	24
2.23 Rotor jaula de ardilla	24
2.24 Corriente inducida en las barras del rotor	25
2.25 Curva característica par-velocidad	26
2.26 Aerogenerador con conexión indirecta a la red	30
2.27 Multiplicador	33
2.28 Caja multiplicadora	33

2.29 Área de barrido del rotor y volumen de aire	34
2.30 Curva de potencia	36
3.1 Plantas eólicas en la República Mexicana	40
3.2 Principal potencial eólico en México 3, 000 – 5,000 MW	41
3.3 Zona de estudio para el frente urbano	42
3.4 Circulación general del viento a nivel del suelo	43
3.6 Planta Arquitectónica	44
3.7 Cuadro de cargas y diagrama unifilar de una vivienda	45
3.8 Aero Nueva Energía 10 KW	52
3.9 Instalación aislada	55
3.10 Conexión a red	56
4.1 Esquema de instalaciones conectadas a la red	58
4.2 Gráfica del nivel de ruido de las turbinas eólicas	59
4.4 Red secundaria	62
4.6. Aerogenerador INNOVA de 20KW	64

Lista de Tablas

3.1 Cuadro de cargas	45
3.2 Cuadro de cargas para todas las viviendas	46
3.3 Factores de coincidencia Normativos	49
3.4 Demandas máximas	50
4.1 Cálculos de regulación de voltaje y pérdidas de potencia	62

Lista de Símbolos y Abreviaturas

<i>Hz</i>	hertz
V	volts
W	watts
Ω	ohms
X	reactancia
R	Resistencia
<i>P</i>	potencia real
KW	kilowatts
CFE	Comisión Federal de Electricidad
IIE	Instituto de Investigaciones Electricas
m	Metros
s	Segundos
Al	Aluminio
HP	Caballos de Fuerza
CA	Corriente Alterna
CC	Corriente Continua
r.p.m.	Revoluciones por minuto
msnm	Metros sobre el nivel del mar
mm	Milímetros
2F-3H	Dos fases tres hilos
USD	Dólar de Estados Unidos
¢USD	Centavos de Dólar de Estados Unidos
ton	Toneladas

Capítulo 1

Introducción

Históricamente, las primeras aplicaciones de la energía eólica fueron la impulsión de navíos, la molienda de granos y el bombeo de agua, y sólo hasta finales del siglo pasado la generación de energía eléctrica. Actualmente, las turbinas eólicas convierten la energía cinética del viento en electricidad por medio de aspas o hélices que hacen girar un eje central conectado, a través de una serie de engranajes (la transmisión) a un generador eléctrico.

¿Puedo utilizar la energía del viento para alimentar mi casa o negocio? Esta es una cuestión que se está preguntado cada vez más en todo el mundo a medida que más y más gente busca fuentes de electricidad asequibles económicamente y fiables. Se están realizando avances en la tecnología de los aerogeneradores todos los días.

En el presente trabajo realizaremos el diseño de un sistema de generación eólica de energía eléctrica para alimentar un conjunta habitacional.

1.1 La generación de energía eléctrica basada en energía eólica a pequeña escala

Hace miles de años que se utiliza la energía del viento (eólica). Los persas fueron los pioneros de los molinos de viento. La energía eólica o el aerogenerador de hoy ya no se parece tanto al modelo de estos antepasados que la utilizaban para moler trigo. Esta energía eólica recibe su nombre de Aeolus, nombre del dios del viento en la antigua Grecia.

En México, el desarrollo de la tecnología de conversión de energía eólica a electricidad, se inició con un programa de aprovechamiento de la energía eólica en el Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE) en febrero de 1977, cuando la Gerencia General de Operación de Comisión Federal de Electricidad, cedió al IIE la Estación Experimental Eoloeléctrica de El Gavillero, en las cercanías de Huichapan, Hidalgo, donde se pretendía energetizar el ejido ya electrificado y con servicio, a partir de una microcentral eólica, integrada por dos aerogeneradores australianos Dunlite de 2 KW cada uno, un

banco de baterías, y un inversor de 6 KW. para alimentar la red de distribución del poblado. El inversor, construido por personal de CFE, fallaba arriba de los dos KW de demanda por problemas de calidad de los componentes, por lo que físicamente no pudo realizarse el experimento, sin embargo, estando instrumentado el sitio, se tenían los promedios horarios de velocidad del viento y conociéndose las características de respuesta de los aerogeneradores era posible estimar numéricamente la energía que podría suministrarse al ejido. El régimen de vientos del lugar producía exceso de energía en verano y déficit en invierno para el consumo normal del poblado.

La Estación Experimental de El Gavillero se habilitó como centro de prueba de pequeños aerogeneradores y en ella se construyó además un simulador de pozo de agua para la prueba y caracterización de Aerobombas. La Estación estuvo en operación hasta 1996 en que fue desmantelada.

El IIE desarrollo y probó en El Gavillero, los siguientes prototipos de aerogeneradores:

1. Un aerogenerador de 1.5 KW, con rotor horizontal de tres aspas de aluminio, con control del ángulo de ataque para regular la potencia entregada (1977-1978). Después de las pruebas de caracterización, que resultaron satisfactorias y corroboraban las expectativas de diseño, estando parado, frenado y con las aspas amarradas a la torre, un gran remolino lo impactó, arrancándole dos aspas y destruyéndolas. Los exámenes posteriores evidenciaron un error en los procedimientos de soldadura en el soporte rotatorio del mango del aspa. Dicho prototipo no fue reconstruido al evidenciarse problemas de suministro de componentes y materiales, así como del control de calidad en los procesos de fabricación.

2. El Fénix, de 2 KW, eje horizontal y tres aspas fijas de lámina de hierro, y control de cola plegable (1981-1983). El que sometido a pruebas y mejoras, evolucionó a tres aspas de fibra de vidrio de alta eficiencia aerodinámica, generador trifásico de imanes permanentes y sistema de control a base de timón de cola plegable, que lo mismo limita la potencia que lo inhabilita para condiciones de vientos extremos. Este pequeño aerogenerador es capaz de proporcionar del orden de 250 KWh por mes, lo que permitiría energizar una vivienda rural con todos los servicios eléctricos usados responsablemente.

Este aerogenerador es también objeto de trámites de patentes y su transferencia a la industria está disponible.

3. El Albatros I, de 10 KW, eje horizontal, 11 m de diámetro, tres aspavels de estructura de Aluminio y forradas de tela de dacrón de alta resistencia. (1981-1985). Constituyó el mayor aerogenerador desarrollado en México. Durante las pruebas del Albatros I en El Gavillero, vientos enrachados estando en operación, provocaron la fractura de la estructura de aluminio de una aspavels, partiéndose a la mitad. La estructura del aspavels falló por errores en el proceso de soldadura al recalentar el larguero principal y degradar sus características de resistencia a la tracción, fracturándose con el esfuerzo. El dacrón importado, de alto costo y las dificultades constructivas de la estructura de la aspavels, llevó a reconsiderar el diseño del rotor.

4. El Albatros II, de 10 KW, eje horizontal, tres aspas de fibra de vidrio superdelgada con control por torcimiento del aspa. (1986-1987). Este aerogenerador, mucho más esbelto y sencillo, funcionaba bien en sus primeras pruebas operacionales antes de ser instrumentado para su caracterización.

5. La segunda versión del Fénix, con tres aspas de fibra de vidrio. (1992-1995)

6. El Avispa, de 300 Watts, eje horizontal, tres aspas de fibra de vidrio y control por timón de cola plegable. (1990-1995). El Avispa resume la experiencia de más de una década diseñando, construyendo y probando aerogeneradores.

7. También se desarrolló una aerobomba mecánica, denominada "Itia", de eje horizontal, 5 aspas metálicas, con potencia del orden de 1/4 de HP, que bombeaba agua de pozos de hasta 50 m de profundidad. Este sistema, probado también en El Gavillero, en el simulador de pozos, fue objeto de una patente para el IIE, y aunque se concedió licencia para su fabricación y comercialización, la carencia de un mecanismo de financiamiento de riesgo compartido, la dificultad para la creación de la red de distribución y servicios, como la falta de financiamiento a los usuarios potenciales, impidió su diseminación.

1.2 Objetivo

El propósito de este trabajo de investigación es diseñar un sistema de generación eólico de energía eléctrica para alimentar un fraccionamiento típico, y de esta forma aprovechar la energía eólica, es decir, la energía cinética generada por el efecto de las corrientes de aire, y que es transformada en otras formas de energía útil para las actividades humanas.

1.3 Justificación

La energía eólica no contamina, es inagotable y frena el agotamiento de combustibles fósiles contribuyendo a evitar el cambio climático. Es una tecnología de aprovechamiento totalmente madura y puesta a punto.

La generación de electricidad a partir del viento evita la producción de gases tóxicos que contribuyan al efecto invernadero y a la lluvia ácida. Se considera, energía limpia, pues para generar esa electricidad no origina productos secundarios y peligrosos para el hombre, tierra y atmósfera.

La energía eólica es una de las energías renovables que proceden del sol más baratas. La rentabilidad es mucho mayor con respecto a otras fuentes energéticas tradicionales como las Térmicas de carbón. El hecho de generar electricidad sin que exista un proceso de combustión, visto con respecto al medio ambiente, suprime los impactos originados por los combustibles por su extracción, transformación y combustión, beneficia la atmósfera, los movimientos de suelos, vegetación etc.

1.4 Metodología

Primeramente, se estudiará la generación de energía eléctrica basada en energía eólica (conversión de energía eólica en energía eléctrica), los tipos de aerogeneradores de acuerdo a la posición de su eje, la teoría aerodinámica y la configuración de rotores de acuerdo al número de palas o hélices, también se estudiará la máquina de inducción como generador y sus ventajas con respecto a otros generadores. Posteriormente se hará el diseño de un sistema de generación de energía eólica basado en el análisis de las cargas instaladas de los usuarios, los componentes que lo conforman y sus características de operación,

posteriormente se tendrá la aplicación del sistema de generación, que en nuestro caso será la alimentación de un fraccionamiento.

Capítulo 2

La generación de energía eléctrica basada en energía eólica

2.1 Introducción

La energía eólica es un tipo de energía renovable cuya fuente es la fuerza del viento. La forma típica de aprovechar esta energía es a través de la utilización de **aerogeneradores** o **turbinas de viento** para obtener electricidad, el movimiento de las aspas o paletas acciona un generador eléctrico (un alternador o un dinamo) que convierte la energía mecánica de la rotación en energía eléctrica. La electricidad puede almacenarse en baterías o ser vertida directamente a la red. El funcionamiento es bastante simple, y lo que se va complicando es la construcción de aerogeneradores que sean cada vez más eficientes. Uno de los problemas más frecuentes que presentan los aerogeneradores es su gran tamaño así como las vibraciones y ruido que provocan. Por esta razón suelen ubicarse en zonas alejadas de viviendas. Sin embargo empresas y científicos de todo el mundo siguen trabajando para construir aerogeneradores más pequeños, y silenciosos que puedan ubicarse en zonas urbanas.

2.2 Energía eólica

La energía eólica es la energía cinética del aire, que es producida por los vientos. En la tierra el movimiento de las masas de aire se deben principalmente a la diferencia de presiones existentes en distintos lugares de esta, moviéndose de alta a baja presión, este tipo de viento se llama viento geoestrófico. Es un tipo de energía renovable ya que tiene su origen en procesos atmosféricos debidos a la energía que llega a la Tierra procedente del sol. Las regiones alrededor del ecuador, a 0° de latitud, son calentadas por el sol más que las zonas del resto del globo, según se observa en la Figura 2.1

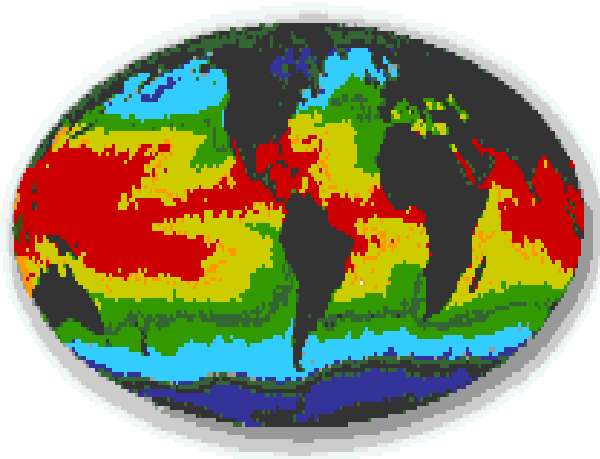


Figura. 2.1 Las áreas calientes están indicadas en la foto en colores cálidos, rojo, naranja y amarillo. (Foto tomada de un satélite de la NASA, NOAA-7, en julio de 1984).

El aire caliente es más ligero que el aire frío, por lo que subirá hasta alcanzar una altura aproximada de 10 Km. y se extenderá hacia el norte y hacia el sur. Si el globo terrestre no rotara, el aire simplemente llegaría al Polo Norte y al Polo Sur, como se ilustra en la Figura 2.2

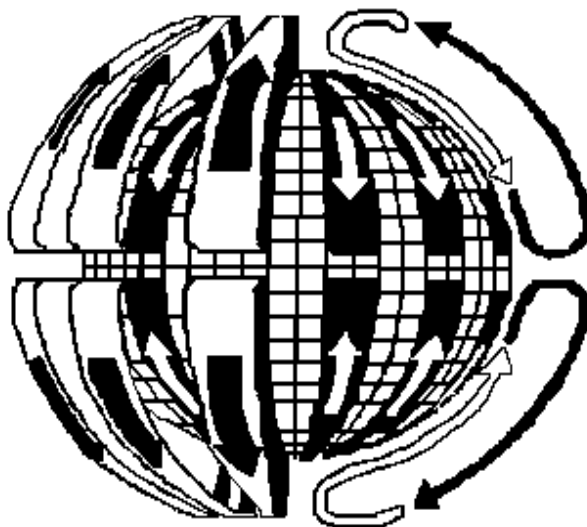


Figura 2.2 Circulación del aire sin considerar el movimiento de rotación del planeta.

Si consideramos el movimiento de rotación de la Tierra, el modelo de circulación global del aire sobre el planeta se hace mucho más complicado. La fuerza de Coriolis o efecto de *Coriolis*, fue descrito por el científico francés Gaspard-Gustave Coriolis, en 1835. Se trata de la fuerza producida por la rotación de la Tierra en el espacio, que tiende

a desviar la trayectoria de los objetos que se desplazan sobre la superficie terrestre; a la derecha en el hemisferio norte y a la izquierda, en hemisferio sur.

En el hemisferio norte, el movimiento del aire en las capas altas tiende a desviarse hacia el ESTE y en las capas bajas hacia el OESTE, por efecto de las fuerzas de inercia de Coriolis. En el hemisferio sur ocurre al contrario, lo cual se muestra en la Figura 2.3. Estas fuerzas de Coriolis aparecen en todas las partículas cuyo movimiento esté asociado a unos ejes de referencia que a su vez está sometido a un movimiento de rotación.

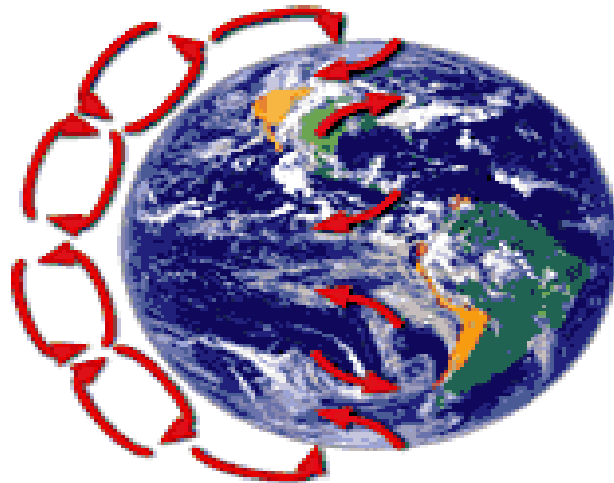


Figura 2.3 Circulación del aire considerando el movimiento de rotación del planeta.

En general las mejores zonas de vientos se encuentran en la costa, debido a las corrientes térmicas entre el mar y la tierra; las grandes llanuras continentales, por razones parecidas; y las zonas montañosas.

2.3 El aerogenerador

Un aerogenerador es un generador eléctrico movido por una turbina accionada por el viento (turbina eólica). Sus precedentes directos son los molinos de viento que se empleaban para la molienda y obtención de harina. En este caso, la energía eólica, en realidad la energía cinética del aire en movimiento, proporciona energía mecánica a un rotor hélice que, a través de un sistema de transmisión mecánico, hace girar el rotor de un generador, normalmente un alternador trifásico, que convierte la energía mecánica rotacional en energía eléctrica.

2.3.1 El tubo de corriente

De la Figura 2.4, el rotor de la turbina eólica debe obviamente frenar el viento cuando captura su energía cinética y la convierte en energía rotacional. Esto implica que el viento se moverá más lentamente en la parte posterior del rotor que en la parte frontal. Dado que la cantidad de aire que pasa a través del área barrida por el rotor desde la parte frontal debe ser igual a la que abandona el área del rotor por la parte posterior, el aire ocupará una mayor sección transversal (diámetro) en la parte posterior del plano rotor. Este efecto puede apreciarse en la Figura 2.4, donde se muestra un tubo imaginario, el llamado tubo de corriente, alrededor del rotor de la turbina eólica. El tubo de corriente muestra cómo el viento moviéndose lentamente hacia la izquierda ocupará un gran volumen en la parte posterior del rotor. El viento no será frenado hasta su velocidad final inmediatamente detrás del plano del rotor. La ralentización se producirá gradualmente en la parte posterior del rotor hasta que la velocidad llegue a ser prácticamente constante.

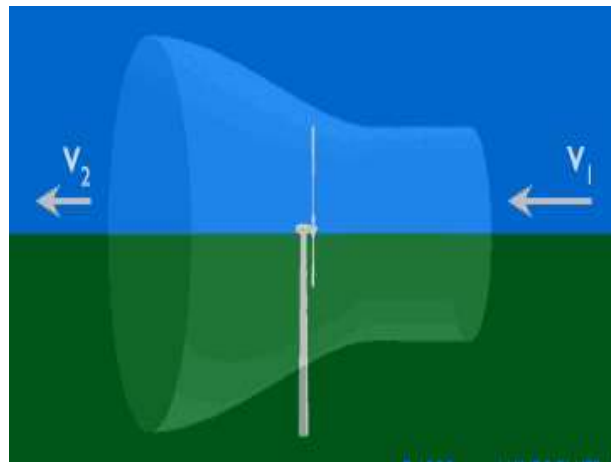


Figura 2.4 Tubo imaginario de corriente alrededor del rotor de la turbina eólica.

Existen diferentes tipos de aerogeneradores, dependiendo de su potencia, la disposición de su eje de rotación, el tipo de generador, etc.

2.4 Aerogeneradores de eje horizontal

Son aquellos en los que el eje de rotación del equipo se encuentra paralelo al piso, como se observa en la Figura 2.5. Esta es la tecnología que se ha impuesto, por su eficiencia y confiabilidad y la capacidad de adaptarse a diferentes potencias.

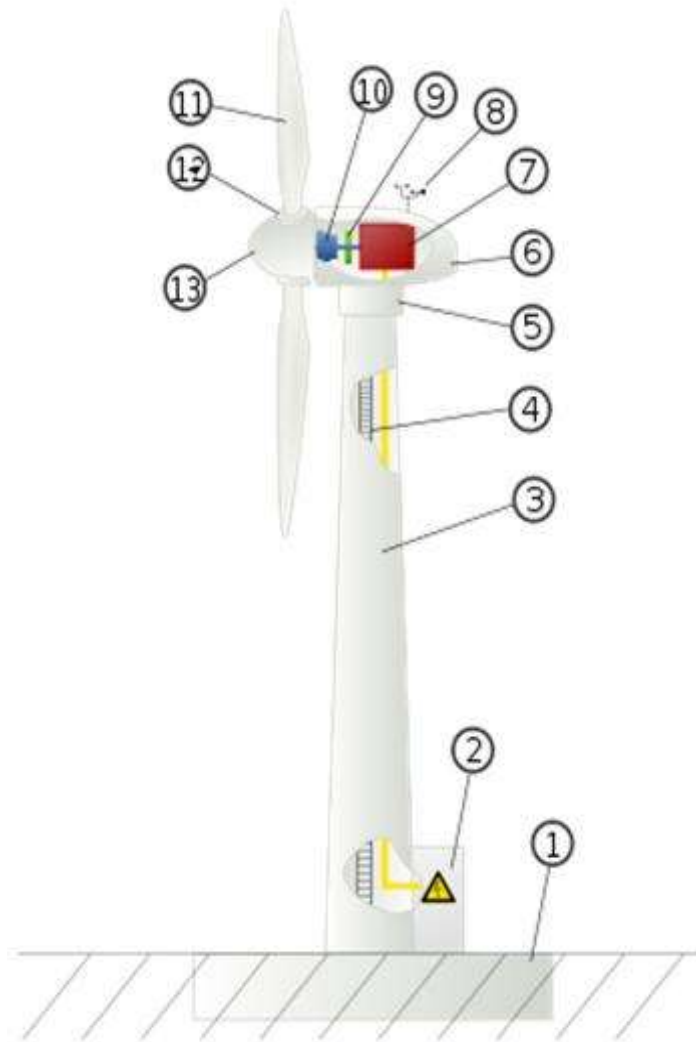


Fig. 2.5. Esquema de una turbina eólica

- | | |
|---------------------------------|-----------------------------|
| 1. Cimientos. | 8. Anemómetro. |
| 2. Conexión a la red eléctrica. | 9. Freno. |
| 3. Torre. | 10. Transmisión. |
| 4. Escalera de acceso. | 11. Pala. |
| 5. Sistema de orientación. | 12. Inclinación de la pala. |
| 6. Góndola. | 13. Buje del rotor. |
| 7. Generador. | |

Las partes principales de un aerogenerador de eje horizontal son:

1. Base de hormigón u otro material para la sujeción del aerogenerador.
2. Salida de la electricidad producida, para su envío a la red eléctrica.
3. Torre del aerogenerador. Cuanto mayor sea su altura más posibilidades existen de alcanzar vientos de mayor velocidad.
4. Escalera interior de acceso a la góndola y resto de los componentes para su inspección y mantenimiento.
5. Sistema de orientación, según sople el viento.
6. Góndola donde se incluyen equipos del aerogenerador.
7. Generador, que es el produce la electricidad a partir de la energía mecánica de las palas.
8. Anemómetro, para conocer la velocidad y dirección del viento en todo momento.
9. Freno de control del aerogenerador.
10. Caja de cambios.
11. Palas. Normalmente los aerogeneradores tienen tres palas.
12. Inclinación variable de la pala.
13. Buje del rotor.

Todos los aerogeneradores de eje horizontal tienen su eje de rotación principal en la parte superior de la torre, la cual se orienta hacia el viento de alguna manera. Los aerogeneradores pequeños se orientan mediante una veleta, mientras que los más grandes utilizan un sensor de dirección y se orientan por servomotores. Dado que la velocidad de rotación de las aspas es baja, la mayoría hacen uso de una caja multiplicadora para aumentar la velocidad de rotación del generador eléctrico. En general, la hélice está emplazada de tal manera que el viento, en su dirección de flujo, la encuentre antes que a la torre (rotor a barlovento). Esto disminuye las cargas adicionales que genera la turbulencia de la torre en el caso en que el rotor se ubique detrás de la misma (rotor a sotavento). Las palas de la hélice se montan a una distancia razonable de la torre y tienen alta rigidez, de tal manera que al rotar y vibrar naturalmente no choquen con la torre en caso de vientos fuertes. A pesar de la desventaja en el incremento de la turbulencia, se han construido aerogeneradores con hélices localizadas en la parte posterior de la torre, debido a que se

orientan en contra del viento de manera natural, sin necesidad de usar un mecanismo de control. Sin embargo, la experiencia ha demostrado la necesidad de un sistema de orientación para la hélice que la ubique delante de la torre. Este tipo de montaje se justifica debido a la gran influencia que tiene la turbulencia en el desgaste de las aspas por fatiga. La mayoría de los aerogeneradores actuales son de este último tipo.

2.5 Aerogeneradores de eje vertical

Los aerogeneradores de eje vertical son aquellos en los que el eje de rotación se encuentra perpendicular al suelo, como se observa en la Figura 2.6. También se denominan VAWT (del inglés, Vertical Axis Wind Turbine).

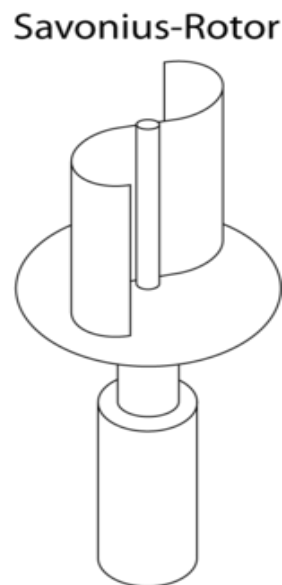


Fig. 2.6 Aerogenerador tipo Savonius.

Sus ventajas son:

- No necesitan torre, por lo que la instalación y mantenimiento de los sistemas de generación es más fácil.
- No necesitan mecanismo de orientación para orientarse respecto al viento.

Sus desventajas:

- Al estar cerca del suelo la velocidad del viento es baja.
- Baja eficiencia.

- No son de arranque automático, requieren conexión a la red para poder arrancar utilizando el generador como motor.
- Requieren cables tensores.

2.6 Aerogeneradores Maglev

El país de China anuncia el primer aerogenerador magnético-levitatorio del mundo. Investigadores Chinos han dado a conocer en la Exposición Asia Energía Eólica 2006, el primer aerogenerador que funcionaría con levitación magnética permanente. El invento ha sido presentado como un punto y aparte en relación con la tecnología existente de generación eólica. Ha sido desarrollado por el Instituto de Investigación Energético de Guangzhou bajo la supervisión de la Academia China de Ciencias. Se espera que este tipo de turbinas eleve la producción de energía eólica un 20% con respecto a las tradicionales. Requieren muy poco viento para funcionar: el aerogenerador MagLev podrá utilizar vientos iniciales de 1.5 m/s y comenzará a producir electricidad con vientos de 3 m/s. El Worldwatch Institute afirma que podría ser la solución para aquellas localizaciones que no cuentan con suministro eléctrico y que ahora podrán aprovechar recursos eólicos de baja velocidad que antes no eran aprovechables. Además, el aerogenerador MagLev podrá proveer iluminación artificial a lo largo de la red de carreteras, aprovechando las corrientes de los vehículos que pasan.

2.7 Aerodinámica en aerogeneradores

El **rotor**, compuesto por las palas del rotor y el buje, está situado en la parte superior de la torre y la góndola en la mayoría de los aerogeneradores modernos. Esto se hace sobre todo porque la corriente de aire tras la torre es muy irregular (turbulenta). ¿Qué es lo que hace que el rotor gire? La respuesta parece obvia: el viento. Pero en realidad, no se trata simplemente de moléculas de aire que chocan contra la parte delantera de las palas del rotor. Los aerogeneradores modernos toman prestada de los aviones y los helicópteros tecnología ya conocida, además de tener algunos trucos propios más avanzados, ya que los aerogeneradores trabajan en un entorno realmente muy diferente, con cambios en las velocidades y en las direcciones del viento.

2.7.1 Sustentación

Observe la Figura 2.7, es el perfil cortado (sección transversal) del ala de un avión. La razón por la que un aeroplano puede volar es que el aire que se desliza a lo largo de la superficie superior del ala se mueve más rápidamente que el de la superficie inferior.

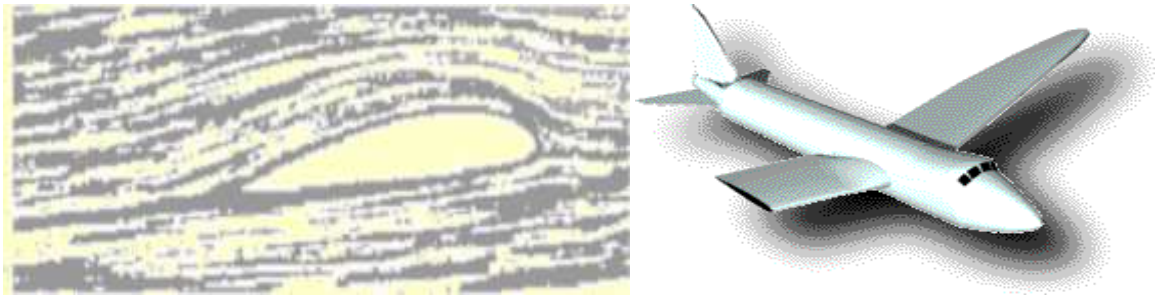


Figura 2.7. Perfil cortado del ala de un avión

Esto implica una presión más baja en la superficie superior, lo que crea la **sustentación**, es decir, la fuerza de empuje hacia arriba que permite al avión volar. La sustentación es perpendicular a la dirección del viento.

2.7.2 Pérdida de sustentación

Ahora bien, ¿qué es lo que ocurre cuando un avión se inclina demasiado hacia atrás en un intento de subir más rápidamente? La sustentación del ala va de hecho a aumentar, pero en la Figura 2.8. Puede verse que, repentinamente, el flujo del aire de la superficie superior deja de estar en contacto con la superficie del ala.



Figura 2.8. El flujo de aire deja de estar en contacto con la superficie del ala.

En su lugar, el aire gira alrededor de un vórtice irregular bruscamente, (condición que también se conoce como **turbulencia**). La sustentación derivada de la baja presión en la

superficie del ala desaparece. Este fenómeno es conocido como **pérdida de sustentación**.

2.7.3 Secciones de un perfil.

En la Figura 2.9, se muestran los términos utilizados en un perfil.

1. **LÍNEA DE LA CUERDA:** Es la línea recta que pasa por el borde de ataque y por el borde de fuga.
2. **CUERDA:** Es la línea recta que une el borde de ataque con el borde de fuga. Es una dimensión característica del perfil.
3. **LÍNEA DE CURVATURA MEDIA:** Línea equidistante entre el extrados y el intrados. Esta línea "fija" la curvatura del perfil. Aunque se puede dar en cifra absoluta, lo normal es que se exprese en % de la cuerda.



Figura 2.9. Terminología utilizada en un perfil.

4. **ORDENADA MÁXIMA:** Es la máxima distancia entre la línea de curvatura media y la cuerda del perfil. El valor suele darse en % de la cuerda.
5. **ESPESOR MÁXIMO Y POSICIÓN:** Son dos características importantes, que se expresan en % de la cuerda. El valor varía desde un 3 % en los perfiles delgados hasta un 18 % en los más gruesos.
6. **RADIO DE CURVATURA DEL BORDE DE ATAQUE:** Define la forma del borde de ataque y es el radio de un círculo tangente al extrados e intrados, y con su centro situado en la línea tangente en el origen de la línea de curvatura media.

2.7.4 Ángulo de ataque

Se llama ángulo de ataque, al formado entre la línea de la cuerda y la dirección de la corriente libre del aire (resultante del viento relativo). Observe la Figura 2.10.

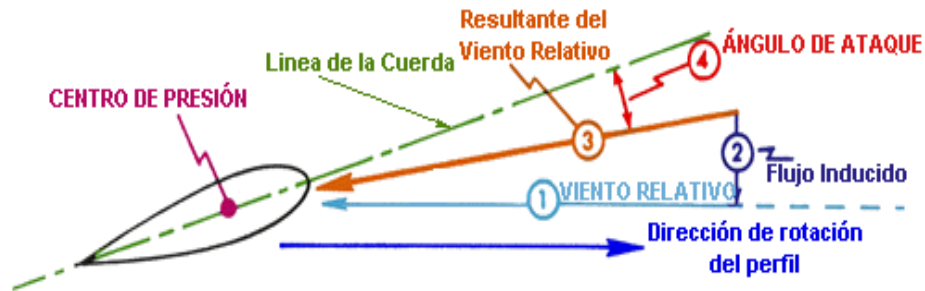


Figura 2.10. Ángulo de ataque.

Cuando el ángulo de ataque es incrementado las presiones en el extrados son inferiores a las del intrados, obteniéndose una fuerza resultante llamada **sustentación**. El punto donde se puede considerar aplicada esa fuerza se denomina **centro de presión**. El conocimiento y significado del Viento Relativo es esencial para el entendimiento de la aerodinámica sobre las alas rotativas. El **Viento Relativo** es definido como el flujo de aire "relativo" que ataca a un perfil.

2.7.5 Fuerza aerodinámica

Una fuerza aerodinámica es generada cuando una corriente de aire fluye sobre y por debajo de un perfil. El punto donde esta corriente se divide se lo denomina "punto de impacto". Como se ilustra en la Figura 2.11.

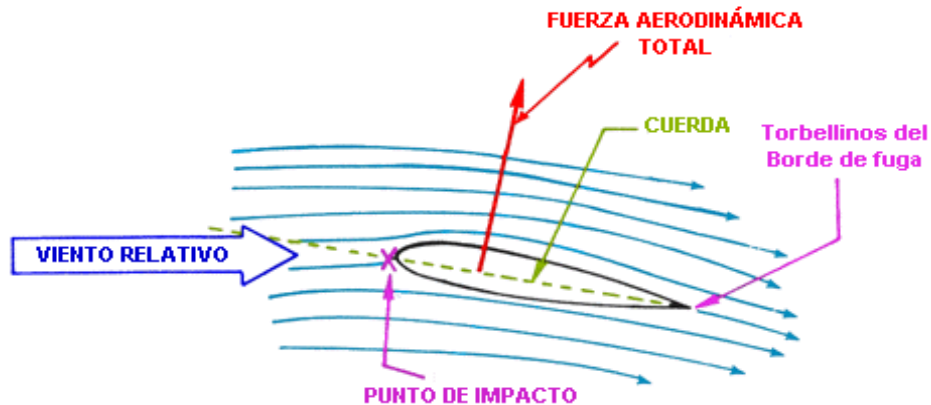


Figura 2.11. Flujo sobre un plano aerodinámico.

La Fuerza aerodinámica es la resultante de dos fuerzas que desempeñan un papel importantísimo, estas son, la sustentación y la resistencia al avance, la descomposición de la fuerza aerodinámica se muestra en la Figura 2.12.

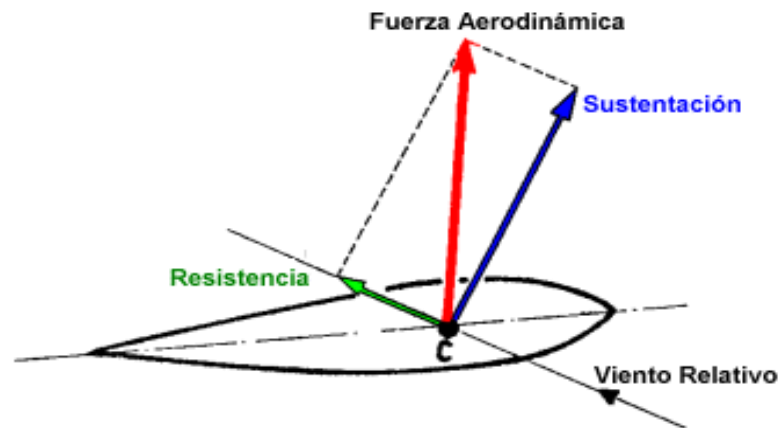


Figura 2.12. Descomposición de la fuerza aerodinámica.

Una presión muy alta se genera en el punto de impacto. Normalmente, el área de alta presión se localiza en la porción más baja del perfil, dependiendo del ángulo de ataque. Esta área de alta presión contribuye a las fuerzas producidas por la pala.

La Figura 2.12 muestra también, líneas que ilustran como el flujo de aire se desplaza por arriba y por abajo del perfil. Note que el flujo de aire es deflectado hacia abajo, la tercera Ley de Newton dice, "cada acción tiene una reacción opuesta", por lo tanto se generará una fuerza hacia arriba también. Esta fuerza se suma a la fuerza total aerodinámica. A muy bajos ángulos de ataque esta fuerza puede ser muy baja o nula.

La **fuerza total aerodinámica**, algunas veces llamada **fuerza resultante**, como ya dijimos, puede ser dividida en dos componentes, como se ilustra en la Figura 2.13, que son la sustentación y la resistencia. La sustentación actúa en forma perpendicular al viento relativo. La resistencia es la fuerza que se opone al movimiento de un cuerpo (perfil) en el aire.

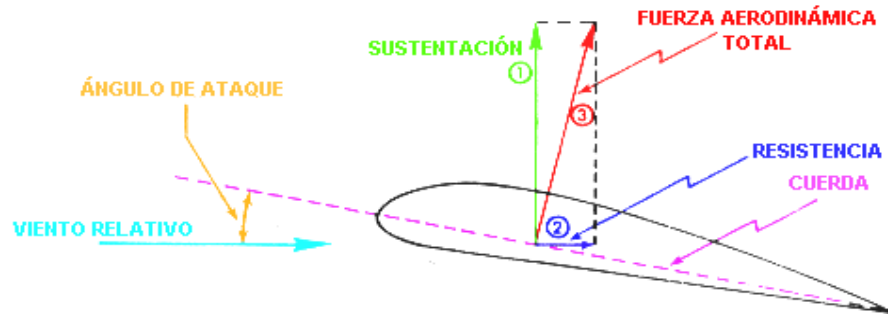


Figura 2.13. Fuerzas actuantes sobre un plano aerodinámico.

2.8 Diseño de turbinas eólicas

Las turbinas eólicas pueden tener en el rotor diferentes número de palas. La regla general, en principio, es: un menor número de palas en el rotor permite mayor velocidad de giro en el eje del mismo. Por tal razón, en este tipo de turbinas el número de palas es bajo, encontrándose modelos de 1, 2, 3 o 4 palas, denominadas turbinas rápidas.

Solamente los rotores multipalas, conocidos como molino americano, poseen entre 12 y 24 palas. Esta configuración posee un alto par de arranque y giran a bajas rpm (turbinas lentas), encuentran gran aplicación en el bombeo de agua.

Por otra parte, entre las turbinas rápidas, si bien el rendimiento aerodinámico aumenta con el número de palas, este aumento se hace poco significativo para hélices con más de dos o tres palas, tal como se ve en la Figura 2.14.

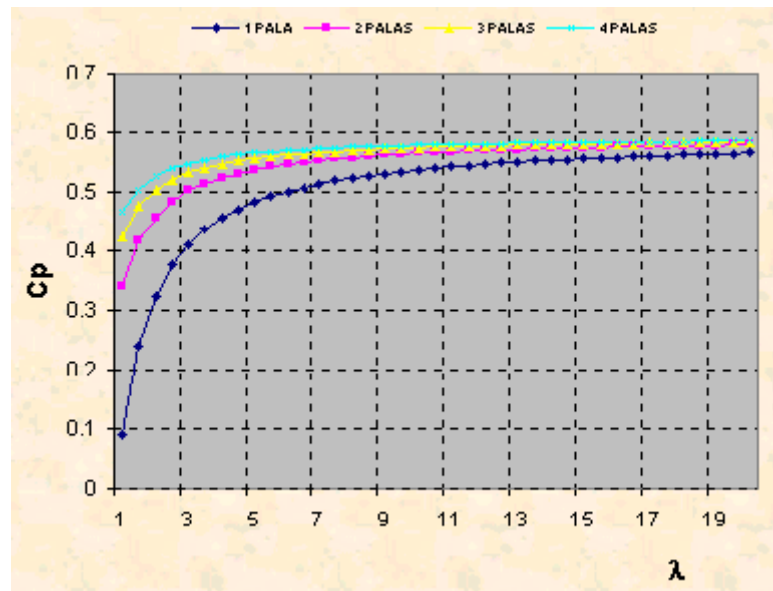


Figura 2.14. Gráfico de Rendimiento Aerodinámico (C_p) vs Velocidad Específica (λ), para diferente número de palas.

2.8.1 Hélices de una pala

Al utilizar una turbina eólica monopala o monóptero aumenta la velocidad de rotación del rotor, sin embargo, estas hélices requieren un contrapeso como se ilustra en la Figura 2.15, que compense a la pala, y el balanceo de la misma debe realizarse con mucha precisión. Un rotor de este tipo tiene un desequilibrio aerodinámico muy acentuado, lo que causa complejos esfuerzos de fatiga en el eje.

La desventaja principal para su uso comercial es el elevado nivel de ruido aerodinámico que producen, causado por una altísima velocidad en punta de pala. Comparado con rotores tripalas esta velocidad es dos veces mayor, lo que provoca un nivel sonoro bastante elevado.

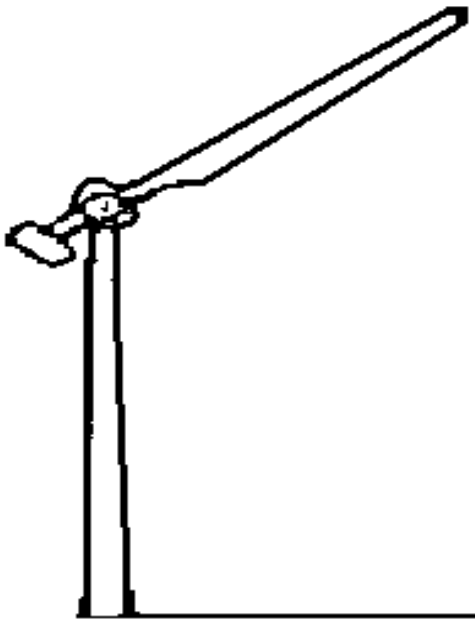


Figura 2.15. Hélice monopala.

2.8.2 Hélices de dos palas

Los diseños de bipalas, como se muestra en la Figura 2.16, tienen la ventaja de ahorro en cuanto a coste y peso, pero por el contrario necesitan una velocidad de giro más alta para producir la misma cantidad de energía.



Figura 2.16. Hélice de dos palas.

2.8.3 Hélices de tres palas

La mayoría de los aerogeneradores de hoy día son tripala, como se observa en la Figura 2.17, con el rotor a barlovento, usando motores eléctricos para sus mecanismos de orientación. El motivo es la fricción con el aire, con tres palas es un 4% más rendible que con dos palas, y con 2 palas es un 10% más rendible que con una pala.

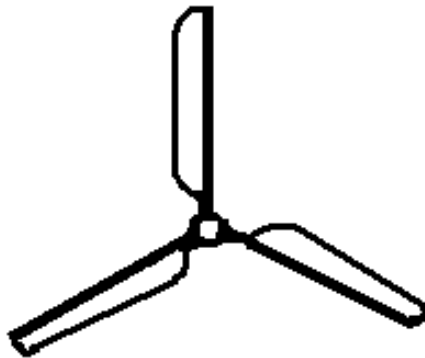


Figura 2.17. Hélice de tres palas

2.8.4 Hélices multipalas

También conocido como el modelo americano, contiene multitud de palas, como se ilustra en la figura 2.18, y sobre todo es utilizado para la extracción de agua en pozos.

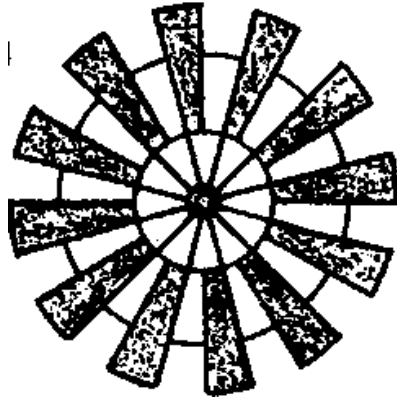


Figura 2.18. Hélice multipalas

2.9 Generadores de turbinas eólicas

El aerogenerador convierte la energía mecánica en energía eléctrica. Los aerogeneradores son algo inusuales, si se les compara con los otros equipos generadores que suelen encontrarse conectados a la red eléctrica. Una de las razones es que el generador debe trabajar con una fuente de potencia (el rotor de la turbina eólica) que suministra una potencia mecánica muy variable (momento torsor).

2.9.1 Máquina síncrona

Una máquina síncrona es una máquina eléctrica rotativa de corriente alterna cuya velocidad de giro en régimen permanente está ligada con la frecuencia de la tensión de alimentación y el número de pares de polos.

$$n = \frac{60 \cdot f}{P} = \frac{120 \cdot f}{p} \quad (2.1)$$

donde:

- f: Frecuencia de la red a la que está conectada la máquina (Hz)
- P: Número de pares de polos que tiene la máquina
- p: Número de polos que tiene la máquina
- n: Velocidad de sincronismo de la máquina (revoluciones por minuto)

Estas máquinas convierten energía eléctrica en energía mecánica, siendo en este caso utilizadas como motores, como se observa en la Figura 2.19, o convierten energía mecánica en energía eléctrica, siendo en este caso utilizadas como generadores.

Las **máquinas síncronas** se utilizan en mayor medida como generadores de corriente alterna que como motores de corriente alterna, ya que no presentan par de arranque y hay que emplear diferentes métodos de arranque y aceleración hasta la velocidad de sincronismo.

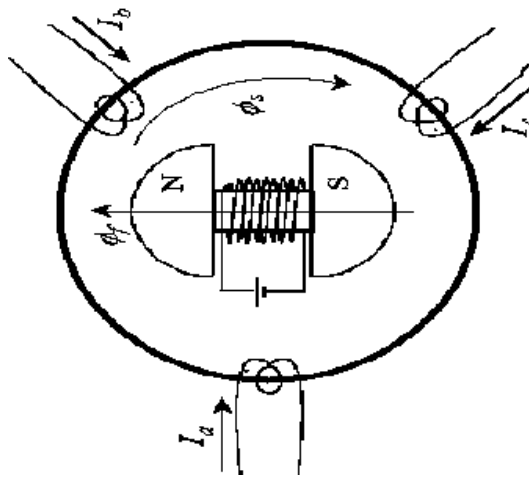


Figura 2.19. Motor síncrono

2.9.2 Generador síncrono

El generador síncrono es un tipo de máquina eléctrica rotativa capaz de transformar energía mecánica (en forma de rotación) en energía eléctrica.

El generador síncrono está compuesto principalmente de una parte móvil o rotor y de una parte fija o estator como se ilustra en la Figura 2.20. El rotor gira recibiendo un empuje externo desde (normalmente) una turbina. Este rotor tiene acoplada una fuente de "corriente continua" de excitación independiente variable que genera un flujo constante, pero que al estar acoplado al rotor, crea un campo magnético giratorio que genera un sistema trifásico de fuerzas electromotrices en los devanados estatóricos.

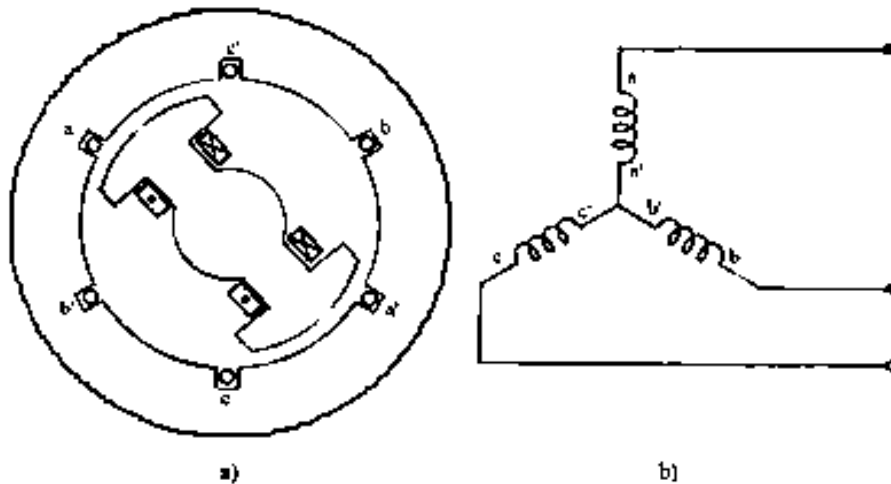


Figura 2.20. Generador síncrono.

El rotor también conocido como inductor, pues es la parte que induce el voltaje en el estator, el núcleo del rotor es construido de lámina troquelada de acero al silicio, material de excelentes características magnéticas, con la finalidad de evitar pérdidas por histéresis y corrientes parásitas.

El rotor de polos salientes como se observa en la Figura 2.21, se utiliza en generadores hidroeléctricos, debido a que las velocidades de las turbinas hidráulicas son bajas y se requiere un número de polos relativamente alto para conseguir la frecuencia normalmente usada en los sistemas de potencia (60 Hz).

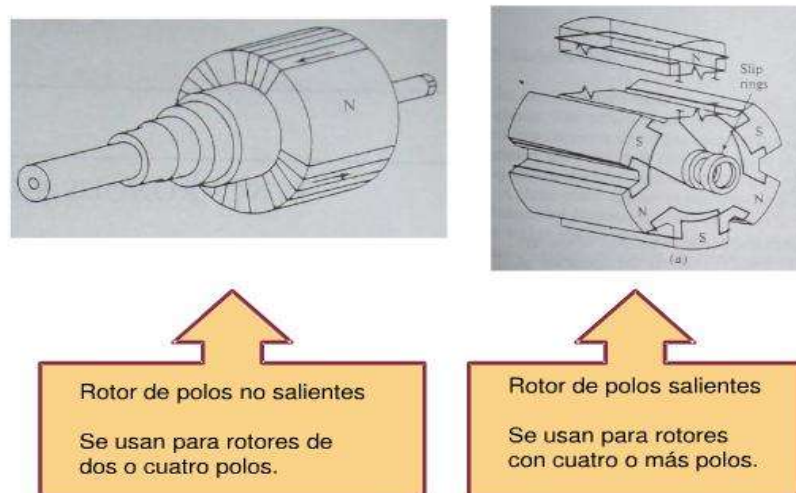


Figura 2.21. Rotor cilíndrico y rotor de polos salientes.

En cambio, los turboalternadores (movidos por turbinas a vapor o gas) funcionan a gran velocidad, por lo que acostumbran a tener 2 ó 4 polos siendo el rotor cilíndrico (polos no salientes). Como se ilustra en la Figura 2.21,

2.9.3 Turbinas eólicas con generadores síncronos

Las turbinas eólicas que utilizan generadores síncronos suelen usar electroimanes en el rotor alimentados por corriente continua de la red eléctrica. Dado que la red suministra corriente alterna, hay que convertir la corriente alterna en corriente continua antes de enviarla a las bobinas arrolladas a los electroimanes del rotor.

Los electroimanes del rotor están conectados a la corriente mediante escobillas y anillos rozantes en el árbol (eje) del generador.

2.9.4 Generadores asíncronos (o de inducción)

La mayoría de turbinas eólicas del mundo utilizan un generador asíncrono trifásico (de jaula bobinada), también llamado generador de inducción, para generar corriente alterna. Fuera de la industria eólica y de las pequeñas unidades hidroeléctricas, este tipo de generadores no está muy extendido; aunque de todas formas, el mundo tiene una gran experiencia en tratar con ellos: Lo curioso de este tipo de generador es que fue inicialmente diseñado como motor eléctrico. ¿Cuál es la cualidad que ha hecho imponerse a las máquinas asíncronas en el segmento de las aplicaciones industriales de media y gran potencia? La respuesta a esta pregunta está en la constitución de las máquinas de inducción que las hace: **robustas, compactas**, y sin apenas **mantenimiento**.

Efectivamente, un motor de inducción como se observa en la Figura 2.22, no tiene ningún contacto móvil (ni escobillas, ni anillos rozantes); el rotor viene a ser un simple pedazo de hierro con algunas incrustaciones de aluminio o cobre. Y en cuanto al estator, se parece más al primario de un transformador que a cualquier otra cosa.

Esta sencillez constitutiva tiene, además, una repercusión vicaria: el bajo precio de este tipo de máquinas. Lo que las hace aún más apreciadas. Ha sido precisamente por su reducido costo por lo que las máquinas asíncronas han salido de su *coto privado*, y han intentado con desigual éxito, hacerse con el espacio técnico que otras máquinas ocupaban.

Así, ha ocurrido por ejemplo, que se han utilizado máquinas asíncronas para funcionar como generadores en los generadores eólicos, o en mini-centrales hidráulicas. Se trata en ambos casos de reducir en lo posible la inversión a realizar para que la instalación pudiera ser económicamente rentable; utilizando máquinas de menor calidad técnica pero de menor costo.

Otra de las razones para la elección de este tipo de generador es que es muy fiable, y comparativamente no suele resultar caro. Este generador también tiene propiedades mecánicas que lo hace especialmente útil en turbinas eólicas (el deslizamiento del generador, y una cierta capacidad de sobrecarga).

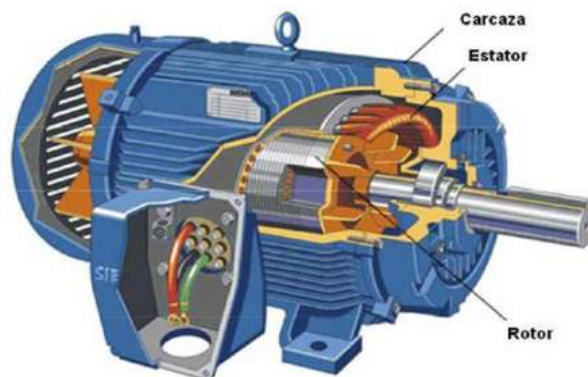


Figura 2.22. Motor trifásico de inducción.

2.9.4.1 El rotor de jaula

Este es el rotor que hace que el generador asíncrono sea diferente del generador síncrono. El rotor consta de un cierto número de barras de cobre o de aluminio, cortocircuitadas por anillos en sus extremos, como se ilustra en la figura 2.23.

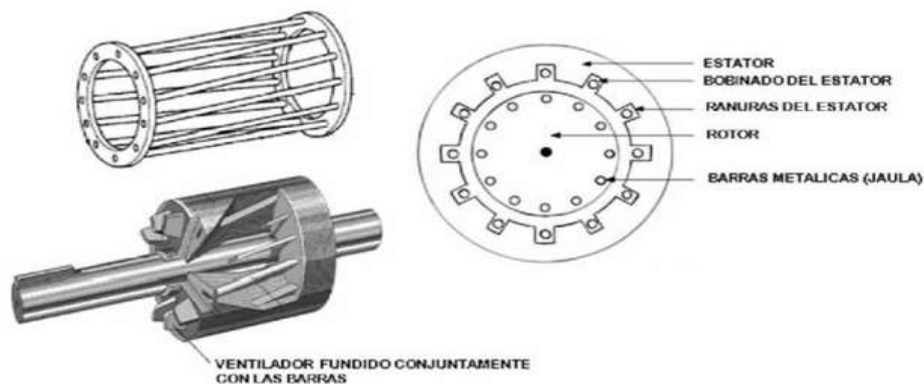


Figura 2.23. Rotor jaula de ardilla.

2.9.4.2 Funcionamiento como motor

Cuando se conecte a la corriente, la máquina empezará a funcionar como motor, girando a una velocidad ligeramente inferior a la velocidad síncrona del campo magnético del estator. ¿Qué es lo que ocurre? Si miramos las barras del rotor desde arriba como se ilustra en la figura 2.24, tenemos un campo magnético moviéndose respecto al rotor. Esto induce una corriente muy elevada en las barras del rotor, que apenas ofrecen resistencia, pues están cortocircuitadas por los anillos finales.

El rotor desarrolla entonces sus propios polos magnéticos, que interactúan con el campo magnético giratorio del estator.

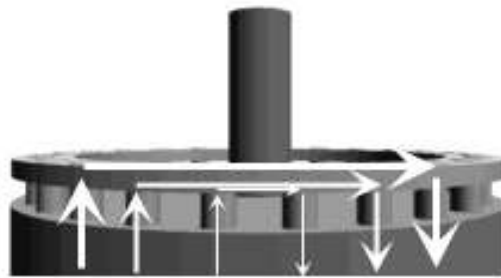


Figura 2.24. Corriente inducida en las barras del rotor.

2.9.4.3 Funcionamiento como generador

Ahora bien, ¿qué es lo que ocurre si hacemos girar el rotor de forma manual a, exactamente, la velocidad síncrona del generador? La respuesta es: nada. Dado que el campo magnético gira exactamente a la misma velocidad que el rotor, no se produce ningún fenómeno de inducción en el rotor, por lo que no interaccionará con el estator.

Por otra parte si aumentamos la velocidad de giro del rotor por encima de la velocidad síncrona del generador. En ese caso el rotor se mueve más rápidamente que el campo magnético giratorio del estator, lo que significa que, una vez más, el estator inducirá una gran corriente en el rotor. Cuanto más rápidamente hagamos girar el rotor, mayor será la potencia transferida al estator en forma de fuerza electromagnética, y posteriormente convertida en electricidad suministrada a la red eléctrica.

La curva característica par-velocidad de la Figura 2.25, muestra que si un motor primario externo acciona un motor de inducción a una velocidad mayor a n_{sinc} , se invertirá la dirección de su par inducido y comenzará a operar como generador. Conforme se incrementa el par que aplica el motor, primario a su eje, se incrementa la cantidad de

potencia producida por el generador de inducción. Como se ilustra en la Figura 2.25, hay un par inducido máximo posible en el modo de operación como generador. Este par se conoce como par máximo del generador. Si un motor primario aplica al eje de un generador de inducción un par mayor que el par máximo del generador éste adquirirá una velocidad excesiva.

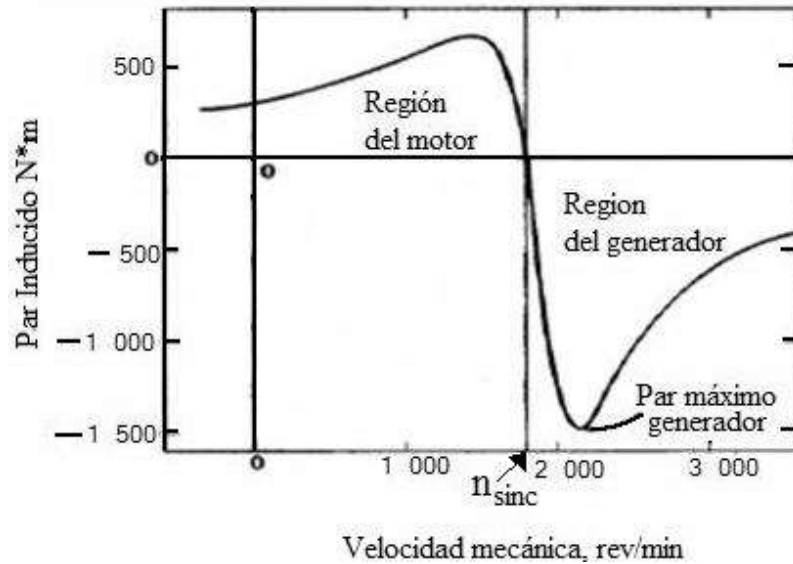


Figura 2.25. Curva característica par-velocidad.

2.9.4.4 Deslizamiento del generador

La velocidad de un generador asíncrono variará con la fuerza de giro (momento, o par torsor) que se le aplique. En la práctica, la diferencia entre la velocidad de rotación a potencia máxima y en vacío es muy pequeña, alrededor de un 1 por ciento. Esta diferencia en porcentaje de la velocidad síncrona es el llamado **deslizamiento del generador**, y se expresa como un porcentaje de la velocidad síncrona

$$S = (n_{\text{sinc}} - n_m) / n_{\text{sinc}} \times 100 \quad (2.2)$$

donde,

S es el deslizamiento.

n_{sinc} es la velocidad de los campos magnéticos (rpm).

n_m es la velocidad mecánica del eje del motor (rpm).

Podemos deducir de la ecuación (2.2) que si el rotor gira a la velocidad síncrona $S = 0$, y si el rotor está bloqueado $S = 1$, todas las velocidades normales caen dentro de este conjunto $[0,1]$.

El hecho de que el generador aumente o disminuya ligeramente su velocidad si el par torsional varía es una propiedad mecánica muy útil. Esto significa que habrá menor rotura y desgaste en la caja multiplicadora (menor par torsional máximo). Esta es una de las razones más importantes para la utilización de generadores asíncronos, en lugar de generadores síncronos, en aerogeneradores directamente conectados a la red eléctrica.

2.9.4.5 Generador de inducción aislado

Es posible que una máquina de inducción funcione como generador aislado de cualquier sistema de potencia si se le provee de condensadores que le suministren la corriente magnetizante necesaria. También es preciso que haya algo de remanencia en el hierro del rotor, es decir, algo de magnetismo residual. Si no hay flujo residual presente en el rotor del generador de inducción, su voltaje no aumentará y, por tanto, debe ser magnetizado girándolo momentáneamente como motor (en caso contrario, necesitará una batería y electrónica de potencia, o un pequeño generador diesel, para arrancar el sistema).

2.9.4.6 Generador de número de polos variable, dos velocidades

Algunos fabricantes equipan sus turbinas con dos generadores, uno pequeño para periodos de vientos suaves, y otro grande para periodos de vientos fuertes.

Un diseño más común en las máquinas más nuevas es un generador de número de polos variable, es decir, generadores en los que (dependiendo de cómo están conectados los imanes del estator) puede funcionar con diferente número de polos y, por tanto, a distinta velocidad de rotación.

Algunos generadores se fabrican por encargo como dos-en-uno, es decir, que son capaces de funcionar como, por ejemplo, un generador de 400 KW o uno de 2000 KW, y a dos velocidades diferentes. Este diseño se está extendiendo cada vez más en toda la industria.

Si vale o no la pena de utilizar un generador doble o un mayor número de polos para los vientos suaves dependerá de la distribución de velocidades del viento local, y los costos de

los polos adicionales comparado con el precio que el propietario de la turbina obtiene por la electricidad (deberá tener presente que el contenido energético de los vientos suaves es muy bajo). Sin embargo, una buena razón para utilizar un sistema de generador doble es que puede hacer funcionar su turbina a más baja velocidad de rotación a bajas velocidades de viento. Esto supone a la vez una mayor eficiencia (aerodinámicamente), y un menor ruido de las palas del rotor.

2.9.4.7 Generadores de deslizamiento variable para turbinas eólicas

Durante muchos años, los fabricantes de motores eléctricos se han enfrentado al problema de que sus motores sólo podían girar a velocidades casi fijas, determinadas por el número de polos del motor.

Tal y como mencionamos anteriormente, el deslizamiento del motor (o generador) en una máquina asíncrona (de inducción) suele ser muy pequeño por cuestiones de eficiencia, por lo que la velocidad de giro variará alrededor de un uno por ciento entre el régimen en vacío y a plena carga.

Sin embargo, el deslizamiento es función de la resistencia (medida en ohmios) de los devanados del rotor del generador. A mayor resistencia, mayor deslizamiento. Por lo que una de las formas de variar el deslizamiento es variar la resistencia del rotor. De esta forma puede aumentarse el deslizamiento del rotor hasta, por ejemplo, un 10 por ciento.

En motores, esto suele hacerse mediante un rotor bobinado, es decir, un rotor con cables de cobre arrollados conectados en estrella, y conectados a resistencias variables externas, además de un sistema de control electrónico para operar las resistencias. La conexión suele hacerse con escobillas y anillos rozantes, lo que supone un claro inconveniente respecto al diseño técnico elegante y simple de una máquina de rotor de jaula bobinada. También introduce partes que se desgastan en el generador, por lo que requiere un mantenimiento adicional.

Una variación interesante del generador de inducción de deslizamiento variable evita los problemas que introducen los anillos rozantes, las escobillas, las resistencias externas y, a su vez, el mantenimiento.

Montando las resistencias externas en el propio rotor, así como el sistema electrónico, todavía le queda el problema de cómo comunicarle al rotor la cantidad de

deslizamiento que necesita. Sin embargo, esta comunicación puede hacerse de forma muy elegante, usando comunicaciones de fibra óptica, y enviando la señal a través de la electrónica del rotor cada vez que pasa por una fibra óptica fija.

2.9.4.8 Funcionamiento a velocidad variable de una turbina de regulación por cambio del ángulo de paso ("pitch controlled")

Una de las razones por las que se pretende querer hacer funcionar la turbina a velocidad variable es que el control del ángulo de paso (control del par torsor para evitar sobrecargas en la caja multiplicadora y en el generador, variando el ángulo de paso de las palas) es un proceso mecánico. Lo cual significa que el tiempo de reacción del mecanismo de cambio del ángulo de paso viene a ser un factor crítico en el diseño de turbinas.

Sin embargo, si se tiene un generador de deslizamiento variable, se puede empezar a aumentar el deslizamiento una vez se esté cerca de la potencia nominal de la turbina. La estrategia de control aplicada en un diseño ampliamente utilizado en turbinas danesas es la de hacer funcionar el generador a la mitad de su deslizamiento máximo cuando la turbina está funcionando cerca de su potencia nominal. Cuando sopla una ráfaga de viento, las señales del mecanismo de control hacen que el deslizamiento aumente para permitir que el rotor gire un poco más rápidamente, hasta que el mecanismo de cambio del ángulo de paso puede hacer frente a la situación, girando las palas más hacia afuera del viento. Una vez que el mecanismo de cambio del paso ha hecho su trabajo, el deslizamiento disminuye de nuevo. En el caso de que el viento caiga de repente, el mecanismo aplicado es el inverso. Aunque estos conceptos puedan parecer simples, asegurar que los dos mecanismos de control cooperen de forma eficiente es todo un reto técnico.

2.9.4.9 Mejora de la calidad de potencia

Puede objetar que hacer funcionar un generador con un alto deslizamiento produce más calor, lo hace que el generador trabaje menos eficientemente. Sin embargo, esto no constituye un problema en sí mismo, ya que la única alternativa es gastar el exceso de energía orientando las palas del rotor fuera del viento, al cambiar el ángulo de paso.

Uno de los beneficios reales de utilizar la estrategia de control que aquí se menciona es la obtención de una mejor calidad de potencia, dado que las fluctuaciones en

la potencia de salida son absorbidas o compensadas variando el deslizamiento del generador, y almacenando o liberando parte de la energía en forma de energía rotacional en el rotor de la turbina eólica.

2.9.5 Conexión indirecta a red de aerogeneradores

La mayoría de los aerogeneradores funcionan a una velocidad casi constante con conexión directa a red. Sin embargo, con conexión indirecta a red, el generador de la turbina eólica funciona en su propia mini-red separada de corriente alterna

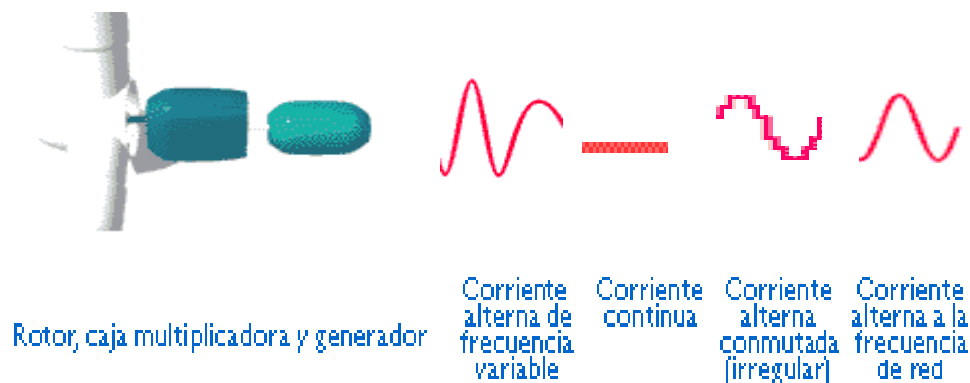


Figura 2.26. Aerogenerador con conexión indirecta a la red.

2.9.5.1 Generación de corriente alterna (CA) a frecuencia variable

Como se ilustra en la Figura 2.26, esta red está controlada electrónicamente (utilizando un inversor), por lo que puede variarse la frecuencia de la corriente alterna en el estator del generador. De esta forma se puede hacer funcionar la turbina a una velocidad de giro variable. Así pues, la turbina generará corriente alterna exactamente a la frecuencia variable aplicada al estator. El generador puede ser bien un generador síncrono o un generador asíncrono, y la turbina puede tener una caja multiplicadora, o no tenerla, si el generador tiene muchos polos.

2.9.5.2 Conversión a corriente continua (CC)

La corriente alterna de frecuencia variable no puede ser tratada en la red eléctrica pública. Deberemos, por tanto, rectificarla, es decir, convertirla en corriente continua (CC).

La conversión de corriente alterna de frecuencia variable a corriente continua puede hacerse utilizando tiristores o grandes transistores de potencia.

2.9.5.3 Conversión a corriente alterna de frecuencia fija

Posteriormente convertimos la corriente continua (fluctuante) a corriente alterna (utilizando un inversor) de exactamente la misma frecuencia que la de la red eléctrica pública. Esta conversión de corriente alterna en el inversor también puede hacerse utilizando tiristores o transistores.

Los tiristores o transistores de potencia son grandes interruptores de material semiconductor que funcionan sin partes mecánicas. A primera vista, la clase de corriente alterna que se obtiene de un inversor tiene un aspecto bastante feo (nada que ver con la suave curva sinusoidal que aprendimos cuando estudiábamos corriente alterna). En lugar de eso, lo que se tiene es una serie de saltos bruscos en la tensión y en la corriente, como puede verse en la Figura 2.26.

2.9.5.4 Filtrado de la corriente alterna

Sin embargo, las formas de onda rectangulares pueden ser suavizadas utilizando las inductancias y condensadores apropiados, en lo que se da en llamar filtro. Sin embargo, la apariencia más o menos dentada de la tensión no desaparece completamente.

2.9.5.5 Ventajas de la conexión indirecta a red: velocidad variable

La ventaja de la conexión indirecta a red es que permite hacer funcionar la turbina eólica a velocidad variable.

La principal ventaja es que permite que el rotor gire más rápidamente durante ráfagas de viento, y almacenar así parte del exceso de energía en forma de energía rotacional hasta que la ráfaga haya terminado. Obviamente, esto requiere de una estrategia de control muy inteligente, pues debemos ser capaces de distinguir entre ráfaga y altas velocidades de viento en general. De esta forma es posible reducir el par torsor máximo (reduciendo así deterioro del multiplicador y del generador), así como las cargas de fatiga en la torre y en las palas del rotor.

La ventaja secundaria es que con la electrónica de potencia se puede controlar la potencia reactiva (es decir, el desfase de la corriente respecto a la tensión en la red de corriente alterna), y así mejorar la calidad de potencia de la red eléctrica. Esto puede ser particularmente útil en turbinas funcionando en una red eléctrica débil.

Teóricamente, la velocidad variable también supone una ligera ventaja en términos de producción anual, puesto que permite hacer funcionar una máquina a la velocidad óptima de giro, dependiendo de la velocidad del viento. Sin embargo, desde el punto de vista económico la ventaja es tan pequeña que apenas merece la pena mencionarlo.

2.9.5.6 Desventajas de la conexión indirecta a red

La desventaja básica de la conexión indirecta a red es el costo. Como acabamos de ver, la turbina necesitará un rectificador y dos inversores, uno para controlar la corriente del estator, y el otro para generar la corriente de salida. Actualmente, parece ser que el costo de la electrónica de potencia excede a los beneficios que reporta el hecho de construir turbinas más ligeras, aunque esto puede cambiar cuando el costo de la electrónica de potencia disminuya. Observando las estadísticas de operación de aerogeneradores con electrónica de potencia (publicadas por el instituto alemán ISET), parece también que las tasas de disponibilidad de estas máquinas están por debajo de las máquinas convencionales, debido a fallos en la electrónica de potencia.

Otras desventajas son la pérdida de energía en el proceso de conversión CA-CC-CA, y el hecho de que la electrónica de potencia puede introducir distorsión armónica de la corriente alterna en la red eléctrica y, por tanto, reducir la calidad de potencia.

La distorsión armónica se produce porque el proceso de filtrado mencionado en el apartado 2.9.5.4, no es perfecto, y puede dejar algunos "tonos agudos" (múltiplos de la frecuencia de la red) en la corriente de salida.

2.9.6 Cajas multiplicadoras para aerogeneradores

Si usásemos un generador ordinario, directamente conectado a una red trifásica de CA (corriente alterna) a 50 Hz, con dos, cuatro o seis polos, deberíamos tener una turbina de velocidad extremadamente alta, de entre 1000 y 3000 revoluciones por minuto (r.p.m.), con un rotor de 43 metros de diámetro, esto implicaría una velocidad en el extremo del

rotor de bastante más de dos veces la velocidad del sonido, así es que deberíamos abandonar esta opción. Otra posibilidad es construir un generador de CA lento con muchos polos. Pero si quisiera conectar el generador directamente a la red, acabaría con un generador de 200 polos (es decir, 300 imanes) para conseguir una velocidad de rotación razonable de 30 r.p.m. Otro problema es que la masa del rotor del generador tiene que ser aproximadamente proporcional a la cantidad de par torsional (momento, o fuerza de giro) que tiene que manejar. Así que, en cualquier caso, un generador accionado directamente será muy pesado (y caro). La solución práctica, utilizada en dirección contraria en muchas máquinas industriales, y que está relacionada con los motores de automóviles, es la de utilizar un multiplicador como se observa en la figura 2.27.

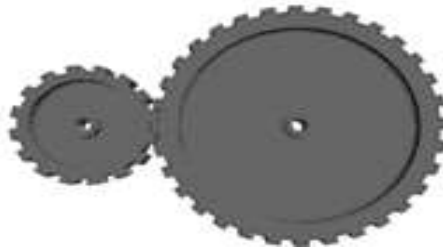


Figura 2.27. Multiplicador

Con un multiplicador hace la conversión entre la potencia de alto par torsional, que se obtiene del rotor de la turbina eólica girando lentamente, y la potencia de bajo par torsional, a alta velocidad, que se utiliza en el generador. La Figura 2.28 muestra una caja multiplicadora para un aerogenerador de 1,5 MW.



Figura 2.28. Caja multiplicadora. Copyright 1997-2003 Asociación danesa de la industria eólica
Actualizado el 10 de mayo 2003

2.10 Potencia desarrollada por un aerogenerador

La cantidad de energía transferida al rotor por el viento depende como hemos visto, de la densidad del aire, " d ", del área de barrido del rotor, " A ", y de la velocidad del viento, " v ". La energía cinética de una masa de aire, " m ", moviéndose a una velocidad, " v ", responde a la expresión:

$$E = 1/2 m v^2 \quad (2.3)$$

Si el volumen de aire que se mueve es " V " y tiene una densidad " d " su masa será; $m = V \cdot d$, con lo que su energía cinética será:

$$E_c = 1/2 d V v^2 \quad (2.4)$$

La cantidad de aire que llegará al rotor de un aerogenerador en un tiempo " t " dependerá de: El área de barrido del rotor " A " y de la velocidad del viento, como se puede observar en la Figura 2.29.

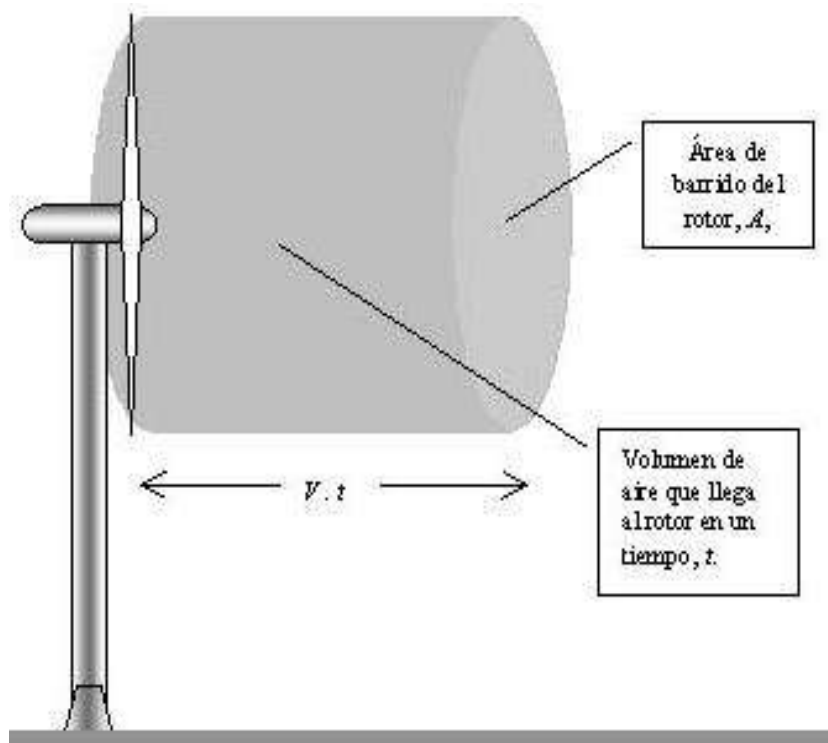


Figura 2.29. Área de barrido del rotor y volumen de aire.

El volumen del aire que llega al rotor será:

$$V=Avt \quad (2.5)$$

La energía cinética que aporta el aire al rotor en un tiempo "t" será:

$$Ec=1/2dAvtv^2 \quad (2.6)$$

$$Ec=1/2dAtv^3 \quad (2.7)$$

y la potencia aportada al rotor será:

$$P=1/2dAv^3 \quad (2.8)$$

Como se observa, *La potencia del viento es proporcional al cubo de la velocidad del viento*. Como también hemos visto anteriormente el aerogenerador ralentiza el viento al pasar por el rotor, hasta 2/3 de su velocidad inicial.

Lo que significa que no se aprovecha toda la energía cinética que el viento aporta al rotor, existiendo una ley, llamada *Ley de Benz* que nos dice:

"Sólo puede convertirse menos de 16/27 (el 59%) de la energía cinética en energía mecánica usando un aerogenerador".

2.11 Control de potencia

En general, los aerogeneradores modernos de eje horizontal se diseñan para trabajar con velocidades del viento que varían entre 3 y 24 m/s de promedio. La primera es la llamada velocidad de conexión y la segunda la velocidad de corte. Básicamente, el aerogenerador comienza produciendo energía eléctrica cuando la velocidad del viento supera la velocidad de conexión y, a medida que la velocidad del viento aumenta, la potencia generada es mayor, siguiendo la llamada curva de potencia, que se ilustra en la Figura 2.30. La curva de potencia de un aerogenerador es un gráfico que indica la potencia eléctrica que es capaz de generar para cada velocidad del viento.

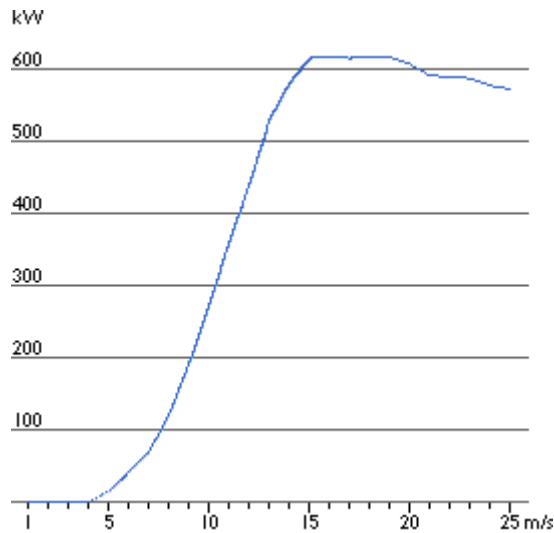


Figura 2.30. Curva de potencia

La Figura 2.30, muestra una curva de potencia de un típico aerogenerador de 600 KW. Las curvas de potencia se obtienen a partir de medidas en campo, donde un anemómetro situado en un mástil toma velocidades del viento y la potencia eléctrica se lee directamente de los aparatos de control del aerogenerador.

Así mismo, es necesario un sistema de control de las velocidades de rotación para que, en caso de vientos excesivamente fuertes, que podrían poner en peligro la instalación, haga girar a las palas de la hélice de tal forma que éstas presenten la mínima oposición al viento, con lo que la hélice se detendría.

Para aerogeneradores de gran potencia, algunos tipos de sistemas pasivos, utilizan características aerodinámicas de las palas que hacen que aún en condiciones de vientos muy fuertes el rotor se detenga. Esto se debe a que él mismo entra en un régimen llamado "pérdida aerodinámica".

Capítulo 3

Diseño de un sistema de generación eólico

3.1 Introducción

Lo primero que se debe conocer para el dimensionamiento de un sistema eólico es el potencial del recurso, ya sea conociendo la velocidad de viento media anual y su distribución estadística, método de Weibull o la densidad de potencia en W/m^2 .

Los factores que determinan el comportamiento de los vientos a nivel micro (vientos locales) son la topografía del lugar, altura, fricción sobre la superficie, montañas, diferencias de temperaturas entre el día y la noche.

Para cada lugar, la velocidad del viento es una variable aleatoria que corresponde a una serie en el tiempo con variaciones estacionales, variaciones cíclicas diarias e importantes variaciones debidas a turbulencias atmosféricas. Por lo anterior al predecir al 100% el comportamiento del viento es prácticamente imposible, aunque sí posible asumir ciertos valores, pero esto sólo será cuando su base ha adquirido experiencia y sensibilidad al respecto y la información obtenida será meramente cualitativa.

En México ha habido muy poca recolección sistemática y ordenada de información del recurso eólico, por lo que la información se refiere a observaciones puntuales que sólo dan una idea del potencial eólico pero es sumamente relativo.

La otra parte que se debe conocer es la demanda de energía y las características de la máquina que se pretende utilizar.

3.2 Medición del Recurso

Existen herramientas (anemómetros) y procedimientos para medir con relativa precisión los vientos, los cuales con ayuda de sensores de velocidad y dirección se llevan en registros en tabletas electrónicas de almacenamiento de datos, los cuales se procesan con ayuda de una computadora. Por este medio se puede obtener: el patrón diario de velocidad, que muestra si el viento obedece a gradientes locales de temperatura del ciclo

día-noche o a procesos termodinámicos de más baja frecuencia como el movimiento de las masas continentales y oceánicas.

El histograma mensual de velocidad que al asociar tiempos de duración acumulados a las velocidades observadas describe la forma como se disipa la energía a través del viento, dentro de un sistema climático-geográfico definido. La uniformidad en el contenido energético del viento ha permitido emplear con éxito la función de Distribución de Weibull aunque también es aplicable la distribución de Rayleigh.

Estas mediciones se deberán llevar a cabo por periodos relativamente largos (hasta dos años) si el proyecto es de una magnitud grande de capital, o con simples exploraciones o mediciones a mano cuando el sistema a instalar sea pequeño.

Para proyectos de más de 5 KW, vale la pena llevar a cabo mediciones aunque sea por periodos muy cortos (4-6 meses), pero para más de 20 KW es recomendable medir al menos un año. Entre los parámetros que son necesarios conocer están: velocidad, dirección, temperatura ambiente, humedad y presión atmosférica.

La cuantificación del potencial energético de un lugar dado se indica en términos de energía disponible, la cual puede ser traducida a valores de velocidad media con sus respectivas reservas. El término más adecuado es el que se da en KW/m^2 como un dato de densidad de potencia, o KWh/m^2 como un dato de densidad de energía.

La altura recomendada para llevar a cabo estas mediciones es a 20 m como mínimo, algunos autores recomiendan 10 m, sin embargo la experiencia dice que a esta altura existen un sinnúmero de factores que alteran los valores reales por lo que resultan o insuficientes o sumamente imprecisos los datos obtenidos. Cuando ya se tiene un proyecto en mente, lo mejor es medir a la altura a la que se instalaría el generador eólico.

3.3 Zonas con potencial eólico en México

En la Figura 3.1 se muestran las zonas con potencial eólico de México, así como las zonas con vientos técnicamente aprovechables y económicamente viables en las regiones siguientes:

a) Sur del Istmo de Tehuantepec. Comprende un área de 1000 km^2 y podría asimilar una capacidad instalada del orden de 2,000 a 3000 MW, con un factor de planta medio de 0.45.

Las zonas más propicias para generar electricidad son zonas aledañas a La Venta, Oaxaca, donde en 1994 se instaló una planta eoloelectrica con una capacidad 1575KW, conformada por siete aerogeneradores de 225KW y denominada La Venta. Otra área con gran potencial eólico ubicada en este mismo estado es la denominada como La Ventosa, que en los últimos años ha tenido un desarrollo económico y promoción gubernamental.

b) Península de Baja California. Es una zona con una barrera eólica natural perpendicular a los vientos occidentales. Tal es el caso de las áreas cercanas a los poblados de La Rumorosa y zonas aledañas, así como el paso entre la Sierra de Juárez y la Sierra de San Pedro Mártir. Estudios realizados en Baja California Sur indican que en la estación denominada El Cardón presenta condiciones favorables de producción de energía eólica rural con un factor de capacidad cercano al 25%. El nivel de costos de producción estimado fue entre 4.5 y 6.2 centavos de USD/KWh y un costo de inversión de entre 1000 y 1100 USD/KWh, lo que indica que esta zona es una de las más adecuadas para el desarrollo de proyectos eólicos. Otras zonas que también se han considerado con gran potencial eólico son Laguna de San Ignacio, San Juanico y Punta Eugenia, donde se han realizado estudios preliminares de su potencial.

c) Península de Yucatán. Es un área de vientos alisios de primavera y verano, lo que hace que zonas como Cabo Catoche, la costa de Quintana Roo y el oriente de Cozumel hayan sido consideradas áreas con un gran potencial eólico.

d) Región Central. En ella prevalecen vientos alisios de verano, desde Tlaxcala a Guanajuato. Los vientos complementan estacionalmente a los del altiplano norte y en el sur del Istmo de Tehuantepec. La complejidad orográfica de esta zona da por consecuencia que ciertos pasos y mesetas sean apropiados para su explotación energética. En esta región ya se han establecido con éxito pequeños proyectos eólicos e híbridos para electrificar comunidades rurales remotas.

Las costas del país. El extenso litoral mexicano y sus islas presentan, por lo menos, condiciones para generación eléctrica en pequeña escala y almacenamiento en baterías.



Figura 3.1. Plantas eólicas en la República Mexicana /Fuente CFE

La generación de energía eléctrica en México por medios eólicos representa actualmente alrededor del 2% de la producción total, lo cual parecería una producción incipiente, y quizás un área estéril para la inversión. Sin embargo, acorde con el potencial eólico estimado para México y los avances tecnológicos e investigaciones en energía renovable realizadas por la Comisión Federal de Electricidad (CFE) y el Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE) el recurso tiene un potencial de generación entre 3000 y 5000MW. Esta potencialidad representa alrededor del 14% de la capacidad total de generación eléctrica instalada actualmente en todo México. Las zonas con el mayor potencial eólico se ubican en la región del Istmo de Tehuantepec, en Oaxaca, en la parte correspondiente a la costa del Pacífico, así como en sitios en los estados de Baja California Sur, Coahuila, Hidalgo, Quintana Roo, Chiapas y Zacatecas (CONAE, 2004).

3.4 Potencial de Producción

En México se han realizado prospecciones del recurso energético eólico a un nivel exploratorio y de reconocimiento puntual, y pequeñas redes anemométricas realizadas por parte de instituciones federales mexicanas han servido para confirmar la factibilidad de áreas para establecer un parque o central eólica.

Con respecto al litoral mexicano y sus islas, se trata de áreas con grandes posibilidades para producir energía eólica a pequeña escala. En la Figura 3.2 muestran áreas detectadas con potencial eólico como son Laguna Verde en Veracruz y la Isla del Carmen ubicada en Laguna de Términos, en Campeche, entre otras. La CFE y el IIE, junto con varios gobiernos estatales, han llevado a cabo estudios y mediciones de las velocidades del viento en distintos puntos del territorio.

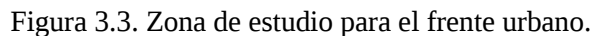


Figura 3.2 Principal potencial eólico en México 3, 000 – 5,000 MW

3.5 Localización geográfica

La zona de estudio en la que nos enfocaremos se ubica en el Estado de Michoacán, en el municipio de Lázaro Cárdenas como se observa en la Figura 3.3, el Frente Urbano se refiere específicamente a la zona aledaña a Lázaro Cárdenas, localizada alrededor del boulevard que vincula esta ciudad con Playa Azul, delimitada por el Estero del Caimán. La ciudad y puerto de **Lázaro Cárdenas**, es la cabecera de uno de los 113 municipios que

Tiene comunicación por carretera pavimentada a Morelia en sus tramos Morelia-Uruapan, Uruapan-Playa Azul, entroncando en La Mira con La Mira-Lázaro Cárdenas y la carretera costera lo comunica con Colima y Guerrero.



El clima predominante en la zona de estudio es el Cálido Subhúmedo ó Aw que se extiende a lo largo de la costa hasta una altitud de 1200 msnm, presenta una temperatura media anual de 26.6° C y una precipitación media anual de 1,200 mm en promedio.

En relación a los vientos dominantes, estos provienen en un 35% del suroeste y en un 10% del noroeste con 54% de calmas. Se trata principalmente de un flujo superficial de mar a tierra como se observa en la Figura 3.4, el que con mayor frecuencia e intensidad se

presenta diariamente, adicionalmente la velocidad promedio se ha caracterizado en 4.2 m/seg. Lo anterior propicia que las partes bajas de la sierras con orientación al litoral sean las más húmedas.

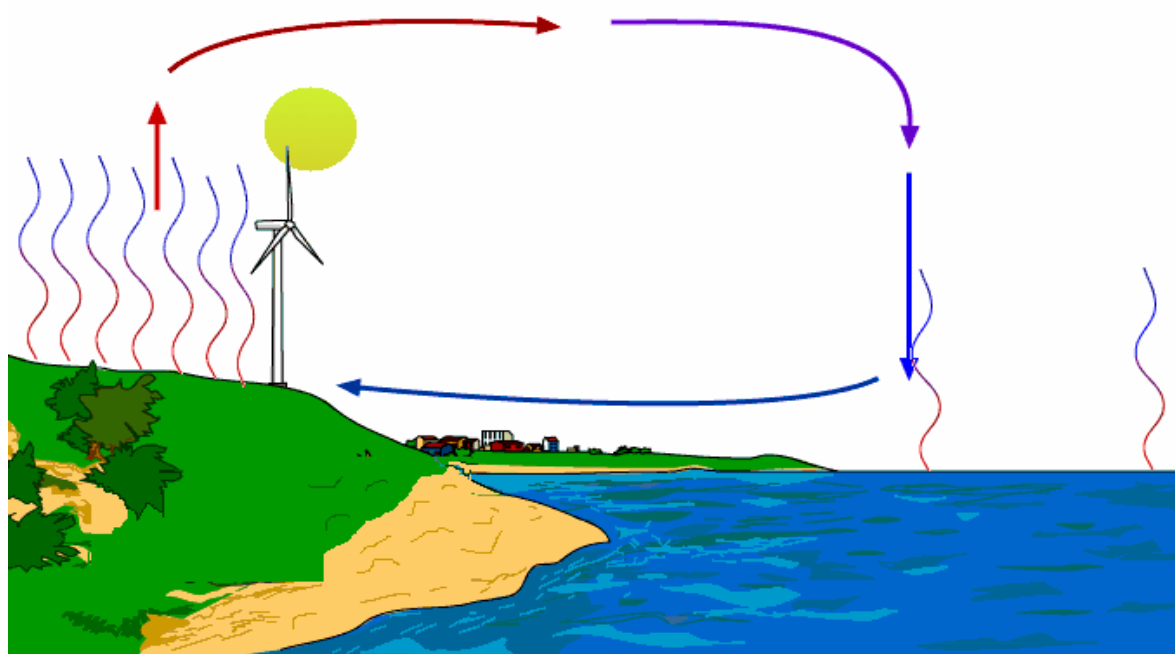


Figura 3.4. Circulación general del viento a nivel del suelo

3.5.3 Topografía

El área de estudio se conforma desde una sección de lomerío llegando a la cota 250 msnm y una sección plana (planicie fluvial y costera) que se extiende de norte a sur hasta la línea del litoral. Se localiza entre las regiones fisiográficas de la Planicie Costera del Pacífico y de la Depresión del Balsas.

Aprovechando el potencial eólico que hay en esta zona podemos diseñar un sistema de generación eólico para alimentar un fraccionamiento típico,

3.6 Vivienda

El conjunto habitacional denominado “Costa de Oro” cuenta con 216 viviendas como se observa en el plano de lotificación de la Figura 3.5, cada vivienda cuenta con 2 habitaciones, sala, comedor, baño, cocina y patio de servicios, como se observa en la planta arquitectónica en la Figura 3.6.

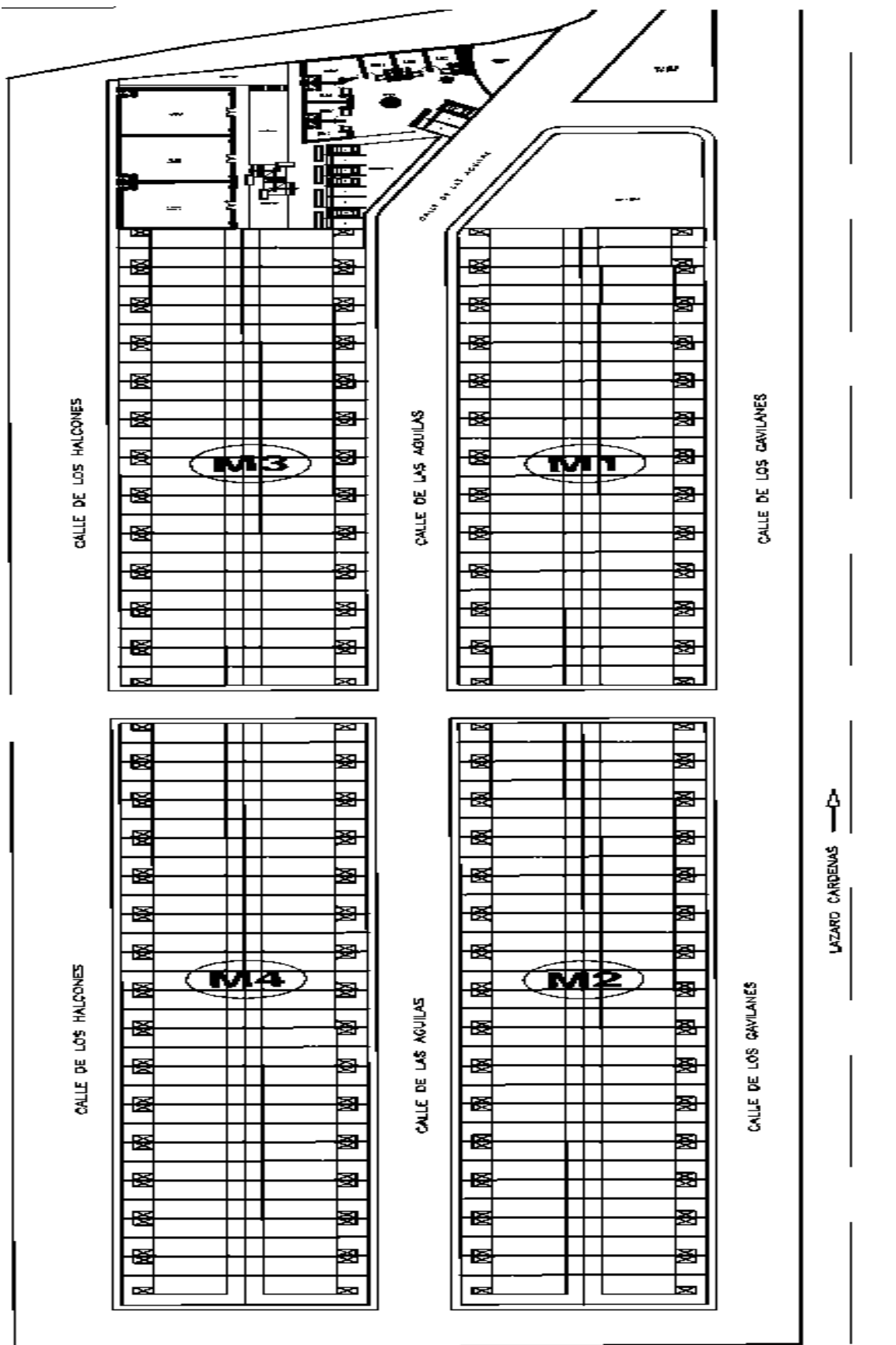


Figura 3.6. Plano de Lotificación.

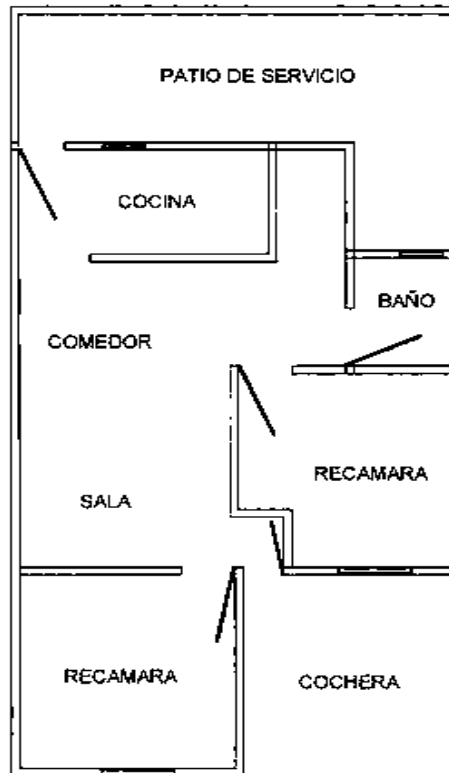


Figura 3.6. Planta Arquitectónica.

3.6.1 Cálculos de electrificación y alumbrado a casas habitación

Para poder dimensionar el sistema de generación eólico tenemos que conocer la carga instalada, para ello nos basaremos en los cálculos de una casa habitación y el resultado lo multiplicaremos por el número total de viviendas.

Formulario para cálculo de los alimentadores 1F, 2H, 127V.

$$\text{---} \quad (3.1)$$

donde: I_{pc} = Corriente a plena carga en Amperes.

W = carga del alimentador en Watts.

F_p = Factor de potencia.

E_n = Voltaje de fase a neutro en Volts.

CALCULO DE LA CORRIENTE PARA CASA HABITACION CON DOS HABITACIONES

a) Lámparas ahorradoras

Para la casa con dos habitaciones consideramos un total de 6 lámparas ahorradoras de 15 Watts cada uno, utilizando la ecuación (3.1) para calcular la corriente tenemos:

b) Contactos

Para la casa con dos habitaciones consideramos un total de 6 contactos de 180 Watts cada uno, utilizando la ecuación (3.1) para calcular la corriente tenemos.

En la Figura 3.7, se observa el diagrama unifilar y el cuadro de cargas de una vivienda, para calcular la carga total de todas las viviendas multiplicamos la carga individual por el número total de viviendas.

Tabla 3.1. Cuadro de cargas

CUADRO DE CARGAS				
CIRCUITO No			TOTAL WATTS	CORRIENTE EN AMPERES
	15 WATTS	180 WATTS		
C-1	6	3	630	5.833
C-2		3	540	5
TOTAL	6	6	1170	10.833

DIAGRAMA UNIFILAR

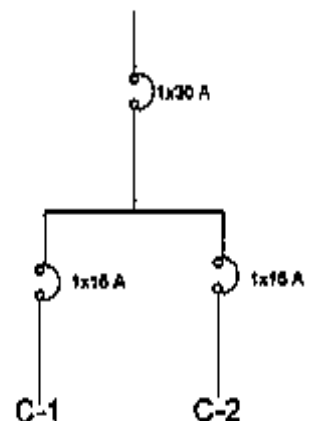


Figura 3.7. Cuadro de cargas y diagrama unifilar de una vivienda.

La tabla 3.2 nos muestra la carga total instalada del fraccionamiento a electrificar.

Tabla 3.2 Cuadro de cargas para todas las viviendas

CARGA TOTAL INSTALADA		
TOTAL DE VIVIENDAS	WATTS TOTALES POR VIVIENDA	KW TOTALES
216	1170	252.720

3.6.2 Factores relacionados con la carga instalada

En el análisis de un sistema de distribución, es útil conocer la curva de carga diaria, para poder interpretar sus efectos en el sistema de distribución. Generalmente se utilizan diferentes factores, que son representativos de las curvas de carga, de tal manera que a falta de la curva de carga, se puedan interpretar sus características principales. A continuación se analizan diferentes factores, que son usados en diferentes estudios de los sistemas eléctricos.

3.6.2.1 Demanda máxima

Las cargas eléctricas por lo general se miden en amperes, kilowatts o kilovolt-amperes; para que un sistema de distribución o parte de éste se planee eficientemente se debe conocer la "Demanda Máxima" del mismo. En general las cargas eléctricas rara vez son constantes durante un tiempo apreciable, o sea que fluctúan de manera continua, en una curva de carga de 24 horas de un transformador de distribución, la carga varía entre un máximo a las 19:30 horas y un mínimo a las 3:30 horas, aunque los valores cambien, este tipo de curva se repetirá constantemente, así se presentarán variaciones similares de máximo y mínimo en todas las partes del sistema de distribución, el valor más elevado se denomina pico o demanda máxima. El valor de la demanda anual es el más utilizado para la planeación de la expansión del sistema de distribución, el término de demanda a menudo se usa en el sentido de máxima demanda para el período que se especifique.

El conocimiento de la demanda máxima de un grupo de cargas y su efecto en el sistema de distribución es también de gran importancia, dado que la demanda máxima del grupo determinará la capacidad que requiera el mismo sistema, de igual modo, la demanda máxima combinada de un grupo pequeño de consumidores determinará la capacidad del

transformador que se requiere; así las cargas que alimenta un grupo de transformadores dan por resultado una demanda máxima, la cual determina el calibre del conductor y la capacidad del interruptor o del regulador que formen parte de un alimentador primario.

3.6.2.2 Factor de demanda

El factor de demanda en un intervalo de tiempo de un sistema de distribución o de una carga, es la relación entre su demanda máxima en el intervalo considerado y la carga total instalada. Obviamente el factor de demanda es un número adimensional; por tanto la demanda máxima y la carga instalada se deberán considerar en las mismas unidades, el factor de demanda generalmente es menor que 1 y será unitario cuando durante el intervalo de tiempo todas las cargas instaladas absorban sus potencias nominales.

Por lo tanto, el factor de demanda se expresa:

$$\text{Factor de demanda} = \frac{D_{ms}}{P_{ins}} \quad (3.2)$$

donde:

Fd = Factor de demanda del sistema de distribución.

D ms = Demanda máxima del sistema de distribución.

P ins = Carga total instalada en el sistema de distribución.

3.6.2.3 Factor de utilización

El factor de utilización de un sistema de distribución es la relación entre demanda máxima y la capacidad nominal del sistema de distribución que lo suministra.

El factor de utilización es adimensional, por tanto la demanda máxima y la capacidad del sistema de distribución se deberán expresar en las mismas unidades. Se puede decir entonces que mientras el factor de demanda expresa el porcentaje de potencia instalada que está siendo alimentada, el de utilización establece qué porcentaje de la capacidad del sistema de distribución está siendo utilizando durante el pico de carga.

Esto se puede expresar de la siguiente manera:

$$\text{Factor de utilización} = \frac{D_{ms}}{C_{nom}} \quad (3.3)$$

donde:

F_u = Factor de utilización del sistema.

D_{ms} = Demanda máxima del sistema de distribución.

C_s = Capacidad del sistema de distribución.

3.6.2.4 Factor de diversidad

Cuando se proyecta un alimentador de distribución para determinado consumidor se debe tomar en cuenta su demanda máxima debido a que ésta es la que impondrá las condiciones más severas de carga y caída de tensión, sin embargo, surge inmediatamente la pregunta ¿ Será la demanda máxima de un grupo de consumidores igual a la suma de las demandas máximas individuales ?, la respuesta a esta pregunta es no, pues en todo el sistema de distribución existe diversidad entre los consumidores, es lo que hace por regla general que la demanda máxima de un conjunto de cargas sea menor que la suma de las demandas máximas individuales.

La diversidad entre las demandas se mide por el factor de diversidad, que se puede definir como la relación entre la suma de las demandas máximas individuales entre la demanda máxima del grupo de cargas.

El factor de diversidad se puede referir a dos o más cargas separadas o se pueden incluir todas las cargas de cualquier parte de un sistema eléctrico o de un sistema de distribución, esto se puede expresar matemáticamente como sigue:

$$\text{Factor de diversidad} = \frac{\sum D_{i\text{ grupo}}}{D_{\text{ grupo}}} \quad (3.4)$$

donde:

F_{div} = Factor de diversidad.

$\sum D_{i\text{ grupo}}$ = sumatoria de las demandas máximas individuales del grupo de usuarios.

$D_{\text{ grupo}}$ = Demanda máxima del grupo de usuarios.

En la mayoría de los casos el factor de diversidad es mayor que la unidad ($F_{div} > 1$). Si se conocen las demandas máximas individuales de cualquier grupo de cargas y el factor de diversidad, la demanda del grupo será igual a la suma de las demandas individuales divididas entre el factor de diversidad, éste se usa para determinar la máxima

demanda resultante de la combinación de un grupo individual de cargas, o de la combinación de dos o más grupos. Estas combinaciones podrán representar un grupo de consumidores alimentados por un transformador o un grupo de transformadores cuyo suministro proviene de un alimentador primario o un grupo de alimentadores primarios dependientes de una subestación.

3.6.2.5 Factor de simultaneidad

Al proyectar un alimentador de distribución para un consumidor deberá tomarse en cuenta siempre su demanda máxima, ya que ésta impondrá las condiciones más severas de carga y caída de tensión. Cuando más de un consumidor de características similares es alimentado por un mismo conductor, es necesario considerar la simultaneidad existente en el uso de la energía eléctrica para los distintos tipos de consumidores. El factor de coincidencia es inverso al factor de diversidad, siendo por lo tanto siempre menor de uno. Esto se puede expresar matemáticamente de la siguiente manera.

$$\text{Factor de coincidencia} = \frac{\text{Demanda máxima del grupo}}{\text{Sumatoria de las demandas máximas individuales}} \quad (3.5)$$

Donde:

F_c = Factor de coincidencia.

$D_{m\text{grupo usuarios}}$ = Demanda Máxima del grupo de usuarios.

= sumatoria de las demandas máximas individuales del grupo de usuarios.

En la tabla 3.3, se muestran los distintos valores de factores de coincidencia en función del número de usuarios.

Tabla 3.3 Factores de coincidencia Normativos

Servicio	1-4	5-9	10-14	15-19	20-24
F_c	1	0.78	0.63	0.53	0.49

Utilizando la tabla 3.3, de valores-factores de coincidencia normativos para casa habitación en la carga total instalada del fraccionamiento obtenemos la distribución de la tabla 3.4.

Tabla 3.4 Demandas máximas

N° y Carga de demanda	Carga Instalada KW	F _D %	F _C	Demanda Maxima KW
24 casas 1170 Watts c/u	28.080	60	0.49	11.232
24 casas 1170 Watts c/u	28.080	60	0.49	11.232
24 casas 1170 Watts c/u	28.080	60	0.49	11.232
24 casas 1170 Watts c/u	28.080	60	0.49	11.232
24 casas 1170 Watts c/u	28.080	60	0.49	11.232
24 casas 1170 Watts c/u	28.080	60	0.49	11.232
24 casas 1170 Watts c/u	28.080	60	0.49	11.232
24 casas 1170 Watts c/u	28.080	60	0.49	11.232
24 casas 1170 Watts c/u	28.080	60	0.49	11.232
24 casas 1170 Watts c/u	28.080	60	0.49	11.232
TOTAL DE SERVICIOS	252.720	-----	-----	101.088

La capacidad del trasformador se calcula de la siguiente forma:

Por lo tanto se requiere un transformador con la capacidad comercial de 300 KVA, por lo cual se recomienda utilizar 4 transformadores de 75 KVA cada uno, ubicados estratégicamente para alimentar la carga total del fraccionamiento.

Factor de utilización

$$\frac{\text{Potencia nominal}}{\text{Potencia instalada}} \quad (3.6)$$

3.7 Aerogenerador seleccionado

La elección del aerogenerador para el desarrollo de este trabajo se apoyó principalmente en el hecho de que no fuera de gran tamaño y de bajo costo, por lo tanto, se seleccionó un aerogenerador del tipo “**AERO NUEVA ENERGIA 10 KW**”, el cual se observa en la Figura 3.8, como su nombre lo dice, es una turbina capaz de generar una potencia de 10 KW. Se utilizarán 26 aerogeneradores para producir una potencia nominal de 260 KW de acuerdo con la eficiencia del aerogenerador, ya que en esta zona se cuenta con una velocidad promedio de 4.2 m/s.

3.7.1 Descripción del aerogenerador

Este aerogenerador es un compendio de potencia y tecnología que aprovecha la energía gratuita del viento para proporcionar energía eléctrica a pequeñas instalaciones aisladas de las redes de suministro convencionales.

Este sistema se basa en un aerogenerador de 387 Kilogramos de peso de avanzado diseño en fibra de carbono. La configuración en 3 aspas permite minimizar las vibraciones y arrancar el giro con vientos tan suaves como 2 metros por segundo. .

El corazón de la máquina consiste en un magneto alternador trifásico directamente conectado a la hélice y con nivel de aislamiento B y cuyo control automático está integrado en el propio alternador.



Figura 3.8. Aero Nueva Energía 10 KW.

3.7.2 CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS

a) Generador

- Dinamo magnética de tres fases.
- Modo de funcionamiento: directo por rueda.
- Material receptáculo: acero.
- Peso neto: 387 Kg.

b) Aspas

- Cantidad: 3.
- Material: fibra de vidrio.
- Diámetro: 8 metros.
- Peso neto: 96 Kg.

c) Trabajo

- Velocidad de arranque: 2 m/s.
- Velocidad inicial de trabajo: 3 m/s.
- Velocidad nominal: 10 m/s.
- Velocidad final de trabajo: 25 m/s.
- Velocidad máxima de supervivencia: 45 m/s.
- Rotación nominal: 180 rpm.
- Ajuste de velocidad: automático.
- Protección velocidad: efecto aerodinámico sobre las aspas y freno electromagnético.
- Orientación al viento: timón eléctrico automático.
- Temperatura: -40 ~ + 60° C.

d) Eléctrica

- Potencia nominal: 10.000 W.
- Máxima salida: 12.500 W.
- Tensión nominal: 240/360 V/DC.
- Corriente: 21 A.
- Protección de bajo voltaje y sobrecarga: freno electromagnético.
- Controlador de carga: automático.

e) Mástil

- Grosor: 6 mm.
- Diámetro: Ø 325 mm.
- Altura: 12 metros.
- Secciones: 3.
- Peso neto: 574,2 Kg.

3.7.3 USO RECOMENDADO

Este generador es uno de los más pequeños del mercado y por su ligereza está indicado para usarse individualmente a fin de proporcionar energía eléctrica a pequeñas instalaciones aisladas como cuartos de aperos, cabañas, casetas, almacenes agrícolas, etc.,

produciendo energía eléctrica suficiente para iluminación e incluso mover pequeña maquinaria como bombas de agua, etc. O bien pueden combinarse varios generadores que incrementarán la potencia disponible a modo de pequeño campo eólico.

3.7.4 CARACTERÍSTICAS GENERALES:

a) Alternador:

El alternador está fabricado con imanes permanentes de neodimio (NdFeB) de alta calidad y rendimiento. Es ligero y compacto, con gran capacidad de producción de energía. Se ha desarrollado una técnica única en el diseño electromagnético que tiene muy poca resistencia directa, para así garantizar el arranque incluso con ligeras brisas. El alternador está diseñado para proveer eficientemente corriente continua con su mecanismo de control. La capacidad de producción de energía y su fácil arranque hacen de este generador uno de los mejores en el mundo.

b) Turbina:

El cuerpo principal de la turbina está fabricado con acero de alta calidad procedente de un riguroso proceso de selección. Pese a su ligero peso, es increíblemente resistente y con un gran rendimiento. Debido al riguroso proceso de selección, la turbina no solo queda perfecta de aspecto, sino que también actúa de refrigerador para el sistema, para transferir el calor al viento que pasa.

c) Aspas:

Las aspas del generador están fabricadas de material plástico de alta tecnología y resistencia. Materiales que se usan hoy en la industria aeronáutica. La ventaja de estos materiales es una mayor estabilidad y operación más silenciosa. El perfil de viento de las aspa de la turbina ha sido diseñado meticulosamente por expertos en aerodinámica para que tengan un arranque a vientos muy lentos y un mayor rango de aprovechamiento a vientos muy fuertes. Debido a los efectos aerodinámicos en las aspas, el exceso de velocidad del generador se evita bajo cualquier circunstancia. El rotor está provisto de freno para evitar que la excesiva velocidad provoque daños en el sistema

3.8 Instalaciones

Existen básicamente dos formas de aprovechar la energía eléctrica producida por los aerogeneradores:

3.8.1 Instalación aislada

Los montajes individuales y aislados como de ilustra en la Figura 3.9, suelen ser llamados aislados y permiten recargar un banco de baterías que proporciona 12/24 Volts o 220 Volts a través de un inversor. El inversor transforma la corriente continua de las baterías en corriente alterna adecuada para alimentar la mayoría de consumibles domésticos como iluminación y otros aparatos, teniendo en cuenta las limitaciones de tamaño y potencia de este aerogenerador compacto. En la práctica esta modalidad de montaje es la más adecuada para garantizar un suministro doméstico de electricidad en pequeñas instalaciones aisladas y totalmente independientes.

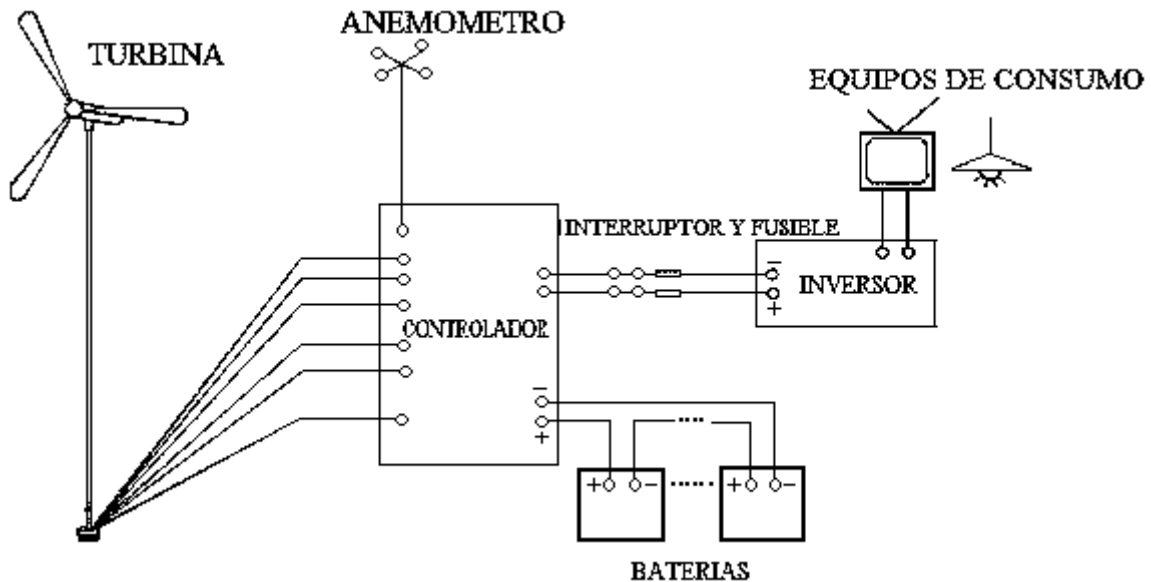


Figura 3.9. Instalación aislada

Nota:

- 1) La configuración propuesta para este generador es de 20 baterías de 12 V / 400 A.
- 2) El valor del voltaje de entrada del inversor debe ser igual que el voltaje de la serie de baterías.

3.8.2 Conexión a red

Otra posibilidad de montaje consiste en aprovechar los aerogeneradores para suministrar una parte o el total del consumo eléctrico de una instalación doméstica y eventualmente inyectar la energía sobrante en la red. En este caso la energía producida por los aerogeneradores no se almacena sino que alimentan un inversor para obtener los 220 volts de consumo domestico como se observa en la Figura 3.10. Esto puede permitir reducir significativamente la factura eléctrica e incluso llegar a vender la electricidad sobrante a la propia red de suministro. En la práctica esta modalidad de instalación es menos frecuente y suele implicar requerimientos especiales tanto a nivel técnico como administrativo.

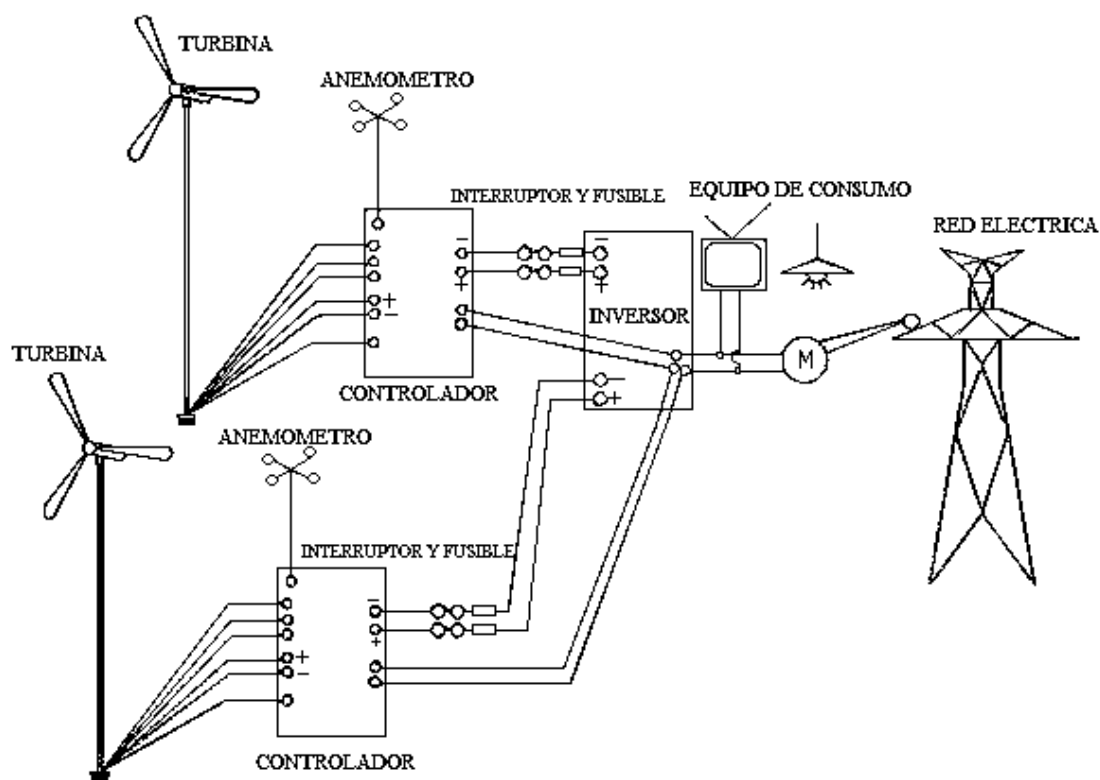


Figura 3.10. Conexión a red.

Capítulo 4

Aplicación del sistema de generación al fraccionamiento típico

4.1 Introducción

Existen dos aplicaciones generales de utilizar la energía eléctrica generada a partir de los aerogeneradores de baja potencia: instalaciones aisladas e instalaciones conectadas a la red eléctrica. Si la legislación del sector eléctrico lo permite, existe la oportunidad de suministrar energía a la red con pequeños sistemas eólicos. Esto es aplicable en los casos que exista una red en las proximidades del centro de consumo. En este caso, la energía requerida por el usuario sería suministrada por el sistema eólico y por la red eléctrica. Si el aerogenerador produce energía en exceso, se entrega el excedente a la red eléctrica y, si se produce menos energía de la requerida, se toma de la red. El almacenamiento de la electricidad en baterías es opcional, pero su inclusión exige dispositivos rectificadores de corriente alterna para la carga de las baterías e inversores de corriente continua.

4.2 Instalaciones conectadas a la red eléctrica

En este caso, un usuario de la red eléctrica instala algunos aerogeneradores en su propiedad como se observa en la Figura 4.1. El objetivo principal es satisfacer su demanda, y en segundo lugar, cuando se produce electricidad en exceso con respecto a las necesidades del propietario, éste suministra la energía a la red eléctrica, por lo que se instalan metrocontadores que miden la energía en ambos sentidos. Esta forma de producción de electricidad con energía eólica ha sido muy empleada en Dinamarca, estimulada por leyes establecidas al respecto, lo que ha permitido el alto desarrollo de esta fuente energética en ese país. No obstante, como norma esta solución no excede la potencia de 1 MW.

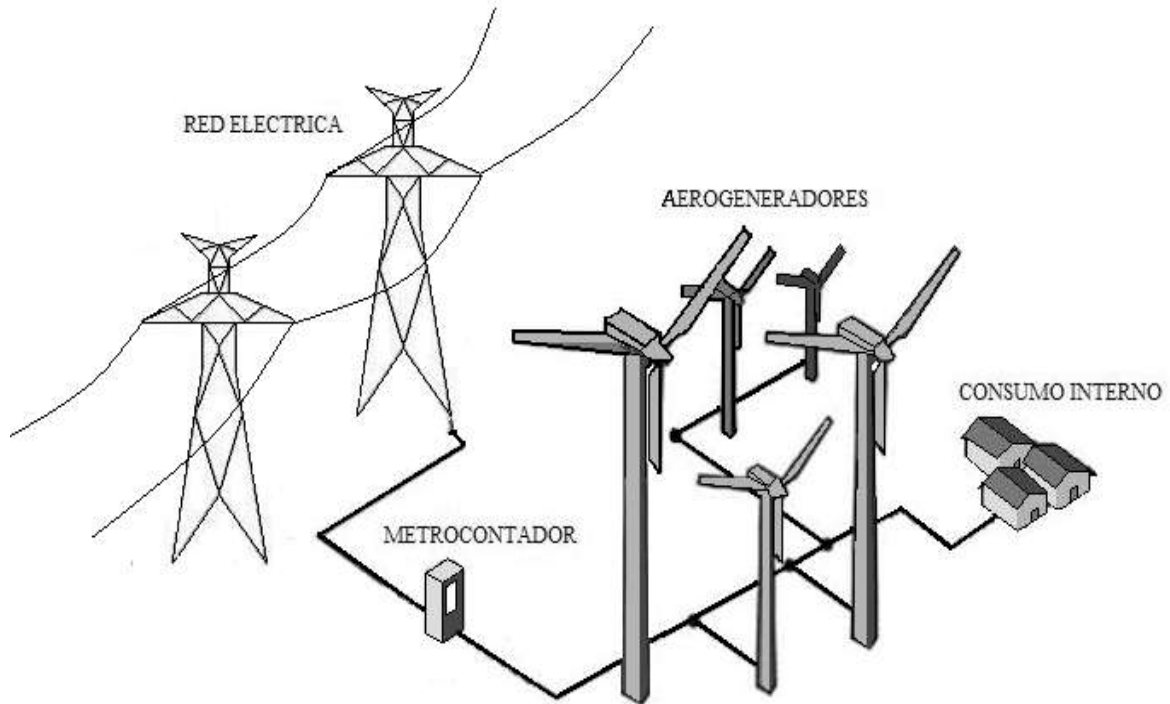


Figura 4.1. Esquema de instalaciones conectadas a la red.

4.3 Propuesta del Sistema de Generación Eólico con Aerogeneradores de 10 KW

En esta sección, se presenta una primera propuesta del diseño del sistema de generación eólico con aerogeneradores chicos de 10 KW de potencia nominal.

4.3.1 Aerogenerador de 10 KW

Como ya se describió en el capítulo 3, el diseño del sistema de generación eólico contempla el emplazamiento de 26 pequeños aerogeneradores de 10 KW. de potencia nominal cada uno, para alimentar la carga instalada del fraccionamiento.

4.3.2 Suministro de energía

Una pregunta que muchas personas se hacen, y al mismo tiempo un argumento de las personas que están en contra de las turbinas eólicas, es “**el ruido**”. En áreas residenciales, las turbinas no se colocan a menos de 300 metros según la Figura 4.2, con lo que obtendríamos un ruido, alrededor de 43 decibeles, mucho menor que el de un aire acondicionado pequeño. Según estudios que se han realizado, el ruido ambiental en una

ciudad es de entre 40 y 45 decibeles, con lo que hace prácticamente imperceptible el ruido de una turbina. Claro que si te paras junto a ella si se va a escuchar ruido.

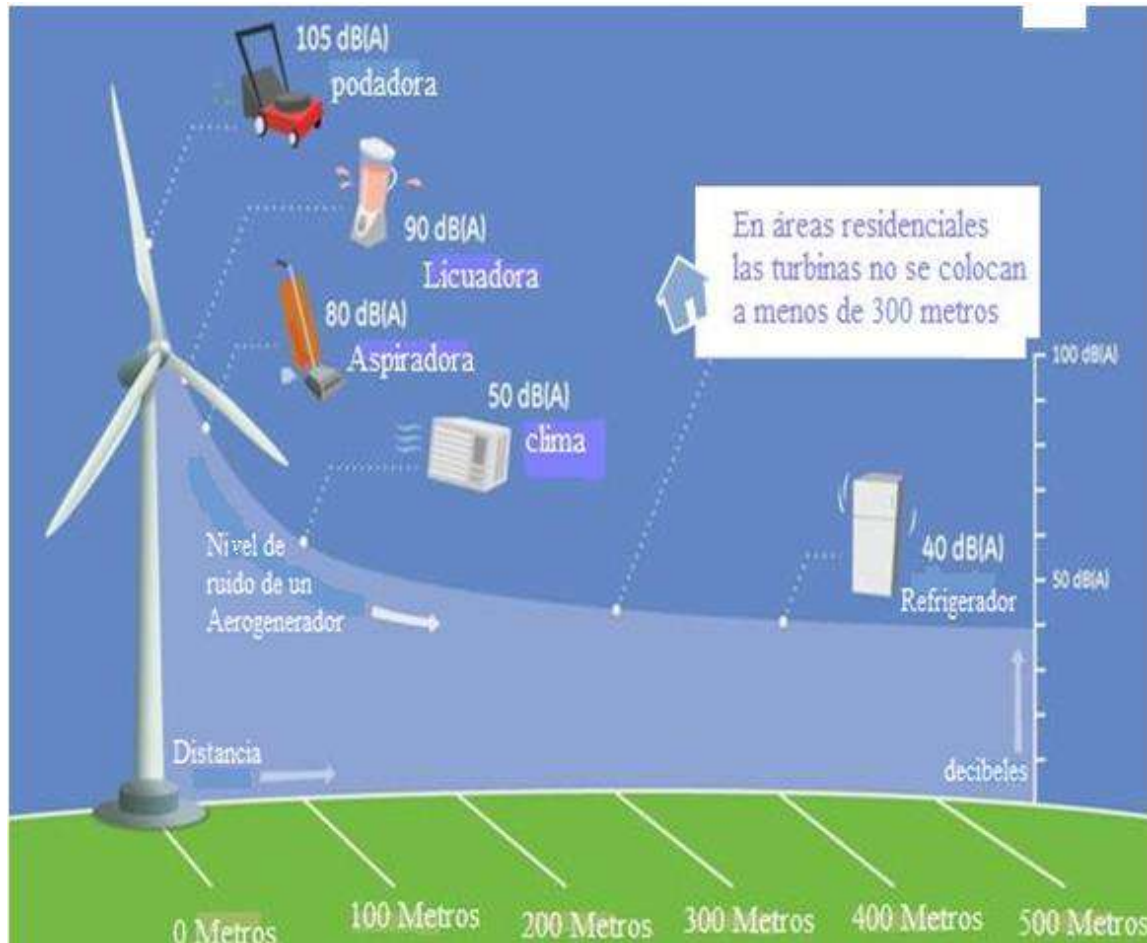


Figura 4.2. Gráfica del nivel de ruido de las turbinas eólicas.

En la Figura 4.3, se ilustra **la zona** donde se ubicarán los 26 aerogeneradores suministradores de energía, los cuales estarán orientados hacia el océano pacífico al poniente del fraccionamiento.

4.3.3 Distribución de energía eléctrica

A continuación se indican las bases de diseño para la distribución de la energía eléctrica en el fraccionamiento, el cual consta de 216 casas habitación, a las cuales hay que suministrarles servicio de energía eléctrica.

Bases de diseño

Tipo de red:	Híbrida.
Tipo de red por el número de fases:	Monofásica.
Demanda Máxima Coincidente por usuario:	0.8 KVA.
Factor de Potencia de los usuarios:	0.9 atrasado.

Red de media tensión

Tipo de red por su construcción:	Aérea.
Tipo de alimentación al desarrollo en Media tensión:	Radial 2F-3H, 13.2 KV.
Tipo de cable para la alimentación:	Aluminio 3/0 desnudo.
Tipo de aislamiento para la media tensión:	Alfiler PD o PC y Asus 15 KV.
Equipo de protección:	Corta-circuito fusible en estructura de entronque.
Tipo de poste:	Concreto de 12 metros (12-750)
Empotramiento del poste:	Dos metros en terreno normal.
Lugar de instalación:	Junto al machuelo en la división de propiedades.
Transformadores de distribución:	Monofásico, tipo poste YT, Auto-protegido, de 7.69KV-120/240 volts, de 75 KVA.
Factor de utilización de TROS:	90%.

Red de Baja tensión

Tipo de red por su construcción:	Subterránea.
Tensión en baja tensión:	120/240 volts.
Regulación en baja tensión:	3% máximo con carga máxima coincidente balanceada.
Pérdidas de potencia en la red:	2% máximo con carga máxima coincidente balanceada.
Tipo de red por el número de fases:	Monofásica.

Tipo de cable (calibre uniforme) y sin Empalmes:	Triplex de aluminio 2 X 3/0 + 1 X 1/0. Aislamiento XLP a 600 volts.
Forma de alimentación:	Radial.
Longitud máxima de la red de baja tensión:	Definida por los cálculos de regulación y Pérdidas.
Puntos de conexión a tierra del neutro:	En el transformador y extremos de la red, Soldables o a compresión.
Resistencia de conexión a tierra del neutro:	5 y 10 ohms con terreno húmedo o seco.
Cable para acometidas:	Aluminio N° 6, 600 volts con aislamiento PAD, longitud máxima 40 m.
Conexión de acometidas:	Usar conector múltiple de 4, 6, u 8 terminales con conexión CM-600.

Obra civil para la baja tensión

Red de baja tensión:	Instalar un circuito por ducto.
Ducto para la baja tensión:	Polietileno de alta densidad, instalado sin encofrar y con pendiente entre registros.
Profundidad de los ductos:	60 centímetros.
Dimensión del ducto:	Considerar un factor de relleno del 53%, mínimo de 2 pulgadas.
Terminación de ductos:	Con boquillas abocinadas en registros.
Registro de baja tensión:	Concreto, o material polímero de 50 x 80 x 70 centímetros.
Medición de servicios:	Construcción de murete para dos servicios de 60 centímetros de altura.
Trayectoria de ductos:	A lo largo de aceras, camellones, zonas verdes o andadores
Localización de registros:	Se instalan en el centro de banquetas, en la división de propiedades.

La Figura 4.4 muestra la red secundaria que se analizó, ya que es la de mayor longitud, y la Tabla 4.1 presenta los cálculos de regulación de voltaje y pérdidas de potencia.

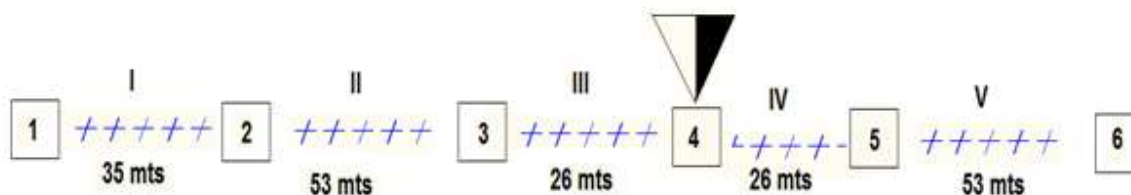


Figura 4.4. Red secundaria.

Tabla 4.1. Cálculos de regulación de voltaje y pérdidas de potencia.

		Rama N°	Distancia en (m)	Usuarios por rama
USUARIOS DEL TRO	54	1	35	5
CARGA EN VA. POR USUARIO	800	2	53	10
FACTOR DE POTENCIA	0.9	3	26	16
MAGNITUD DE LA CORRIENTE	6.66	4	26	12
R del cond. 3/0 Ω/Km	0.435	5	53	6
X del cond. 3/0 Ω/Km	0.0995			
Z del cond. 3/0 Ω/Km	0.446234524			
ANGULO DEL Fp.	25.8418518			
ANGULO DE Z para el cond. 3/0	12.88390192			
CARGA TOTAL EN KVA.	43.2			
CARGA TOTAL EN KW.	38.88			

I/Rama	Ang. de I	Mag. de Z/rama (Ω)	Angulo de Z	Mag. de ZI (volts)
33.3	25.8418518	0.015618208	12.8839019	0.520086337
66.6	25.8418518	0.02365043	12.8839019	1.575118621
106.56	25.8418518	0.011602098	12.8839019	1.236319522
79.92	25.8418518	0.011602098	12.8839019	0.927239641
39.96	25.8418518	0.02365043	12.8839019	0.945071173

Ang. de ZI	Comp. ZI eje X	Comp. ZI eje Y	Resistencia Ω/rama	Perdidas/rama
38.7257537	0.269246019	0.444967841	0.015225	16.88285025
38.7257537	0.8154308	1.34761689	0.023055	102.2618358
38.7257537	0.64003625	1.057752125	0.01131	128.42543
38.7257537	0.480027188	0.793314094	0.01131	72.23930438
38.7257537	0.48925848	0.808570134	0.023055	36.81426089
				356.6236813
			Perdidas Totales	713.2473627

Usuaris/Registro	N° Registro	Comp. V (eje X)	Comp. V (eje Y)	Mag. V (volts)	Ang. V
11	3	119.3599637	-1.057752125	119.3646505	-0.5077327
10	2	118.544533	-2.405369015	118.5689339	-1.16241676
9	1	118.2752869	-2.850336856	118.3096273	-1.38050949
12	5	119.5199728	-0.808570134	119.5227078	-0.38760722
11	6	119.0307143	-1.617140268	119.041699	-0.77836483
1	4	120	0	120	0
	% Reg.	1.428770176			
	% Perdidas	1.834483958			

Como se puede observar en el resultado, el diseño cumple con las especificaciones de regulación de voltaje y pérdidas de potencia, el plano de la distribución de la energía eléctrica se presenta en la Figura 4.5.

4.3.4 Costos del sistema de generación

De acuerdo con CFE, los montos de la inversión para estos sistemas son de 1,400 USD/KW, con un costo de generación de 4.34 centavos de dólar por KWh (¢USD/KWh) y se estima que para el 2020 sean menores a los 3¢ de USD por KWh.

4.4 Propuesta del Sistema de Generación Eólico con Aerogeneradores de 20 KW

Una segunda propuesta para el diseño del sistema de generación eólico, es la utilización del aerogenerador “INNOVA” de 20KW. El cual es más eficiente ya que su diseño permite a la turbina producir energía a velocidades de viento muy bajas.

4.4.1 Aerogenerador de 20KW

La turbina ha sido diseñada y fabricada para resistir las condiciones más severas, la cual se observa en la Figura 4.6. La mayoría de los componentes están hechos de aleaciones de alta resistencia y todos los elementos críticos, como los rodamientos, ejes y el chasis están diseñados para soportar vientos de más de 160 kilómetros por hora.

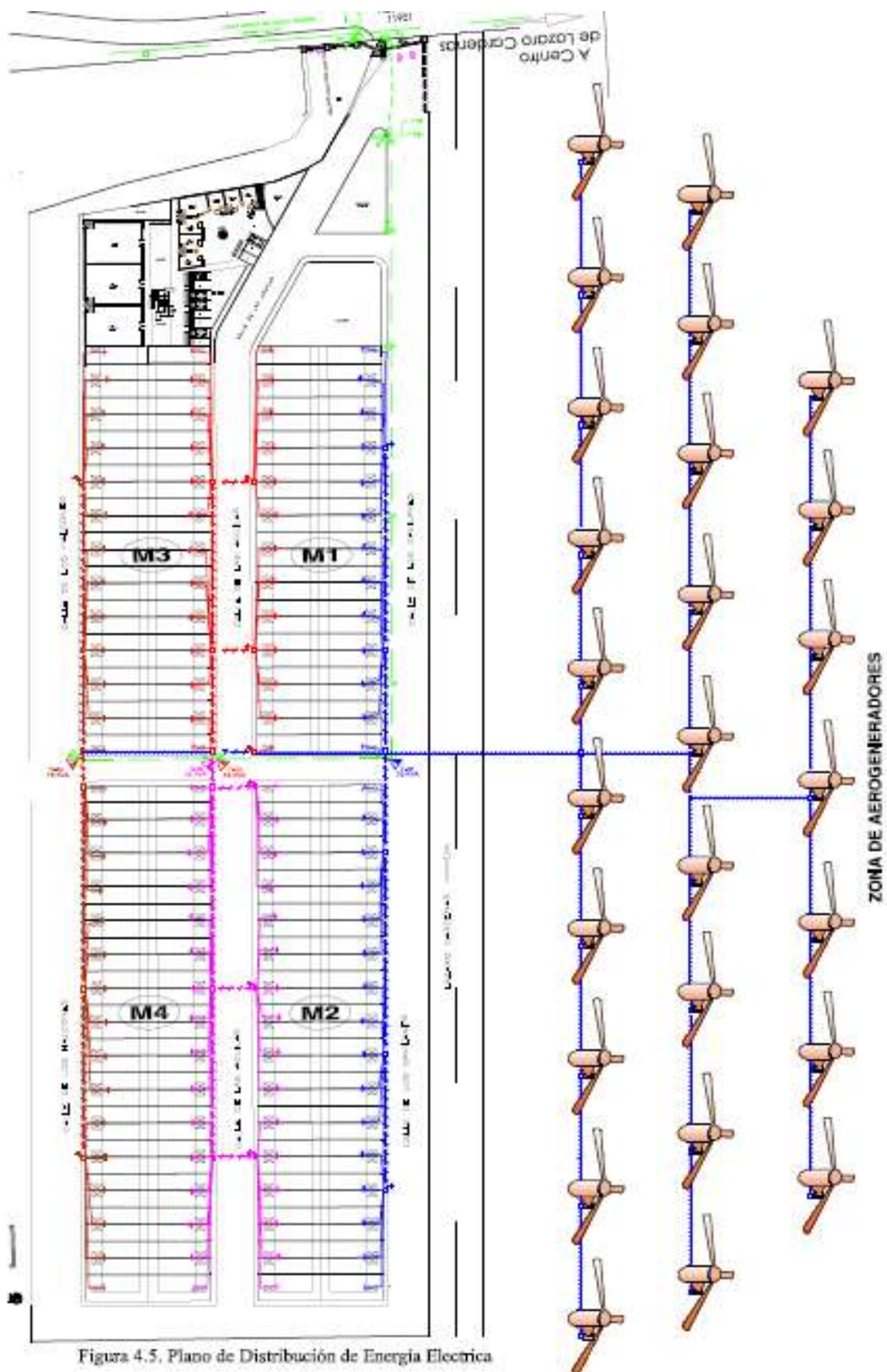


Figura 4.5. Plano de Distribución de Energía Eléctrica

Además, el galvanizado, el recubrimiento y el revestimiento de pintura en polvo se utilizan para soportar las duras condiciones ambientales que se encuentran con frecuencia.



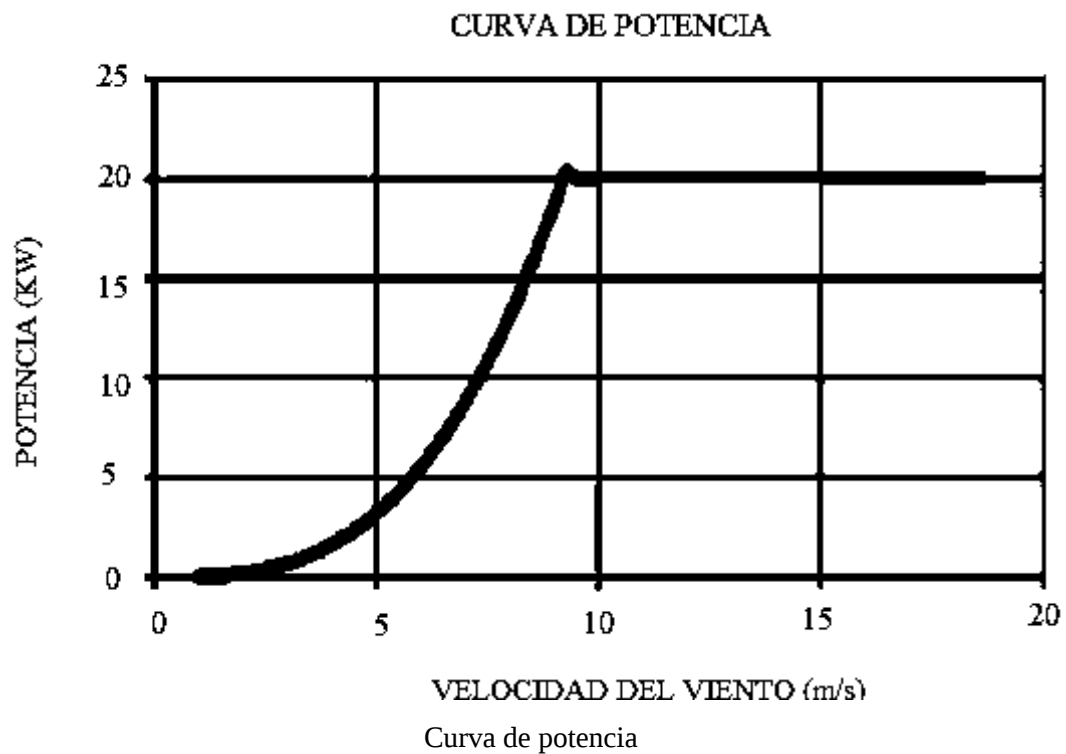
Figura 4.6. Aerogenerador INNOVA de 20KW.

4.4.2 Especificaciones técnicas

IPOWER 20KW

Potencia	20kW @ 9 m/s
Producción anual	Aproximadamente 38.460kW @ Velocidad media de 4,5 m/s
	Aproximadamente 48.700kW @ Velocidad media de 5 m/s
	Aproximadamente 58.700kW @ Velocidad media de 5,5 m/s
	Aproximadamente 67.942kW @ Velocidad media de 6 m/s
	Aproximadamente 76.049kW @ Velocidad media de 6,5 m/s
	Aproximadamente 82.760kW @ Velocidad media de 7 m/s
	Aproximadamente 91.993kW @ Velocidad media de 8 m/s

Velocidad para arranque	1,7 m/s
Velocidad para corte	25 m/s
Velocidad nominal	9 m/s
Diámetro Rotor	13 m
Altura torre	15-20 m
Anual ahorro de Co2	26-30 ton



La propuesta que aquí se plantea es la de utilizar 13 pequeños aerogeneradores “INNOVA” de 20 KW de potencia nominal cada uno, como se observa en la Figura 4.7. Para producir una potencia nominal de 260 KW de acuerdo con la eficiencia del aerogenerador y de esta forma, satisfacer la carga instalada del fraccionamiento.

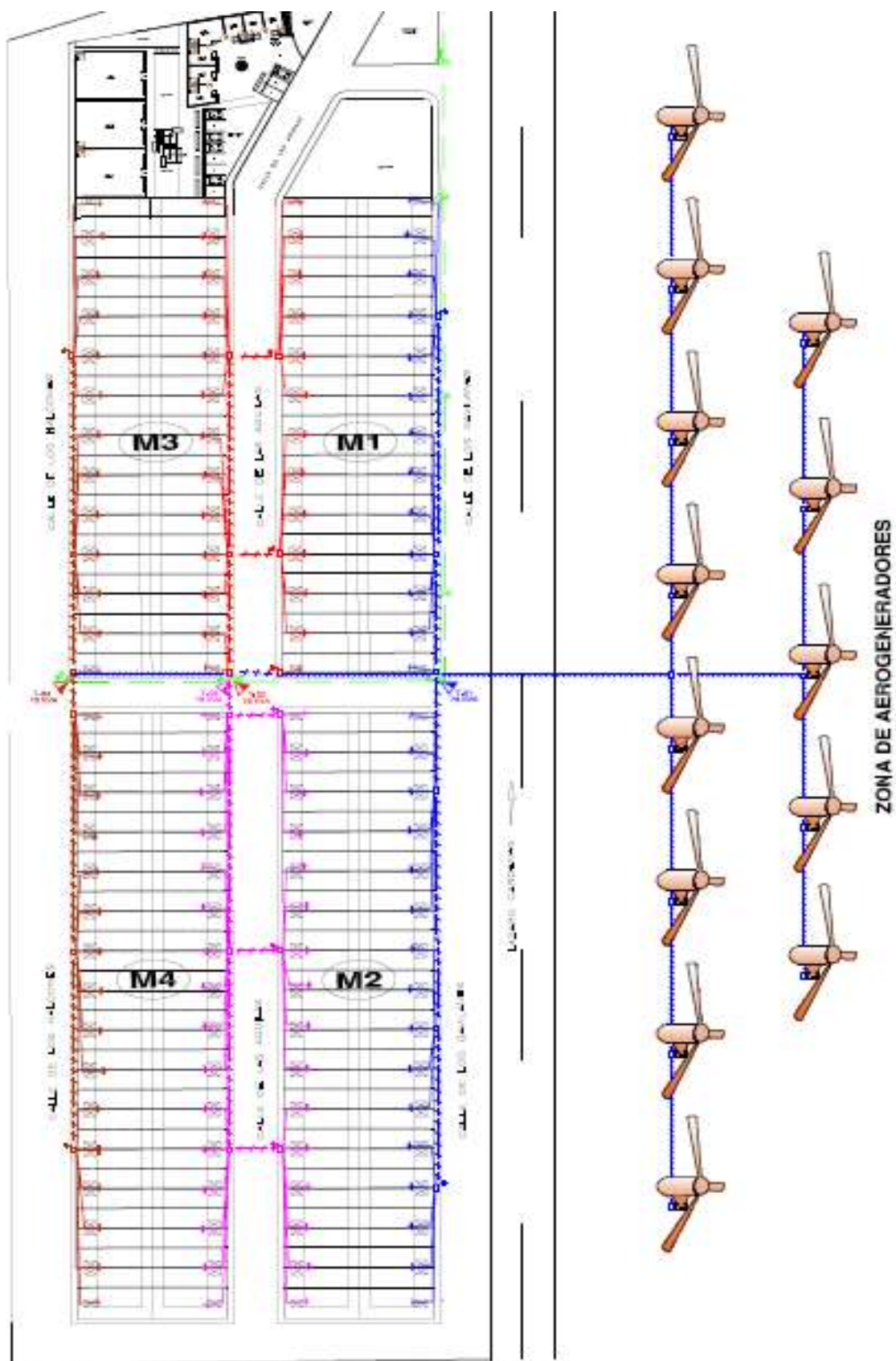


Figura 4.7. Plano de Distribución de Energía Eléctrica

Capítulo 5

Conclusiones y Recomendaciones

5.1 Conclusiones

Actualmente, las fuentes alternas de energía han tenido una gran aceptación en las diversas aplicaciones que se pueden tener de ellas, como la fabricación de colectores solares en casas habitación, fabricación de autos híbridos o solares y se puede esperar que todavía se tengan en la vida diaria un gran alcance la aplicación de fuentes alternas de energía. Por lo tanto, en esta tesis se presentó cómo la energía eólica a través de turbinas de viento puede ser utilizada para proporcionar la energía eléctrica a un fraccionamiento típico.

Este sistema se ha diseñado y proyectado para satisfacer la energía eléctrica necesaria del fraccionamiento o bien en temporadas en donde la energía del viento no sea suficiente para suministrar energía al fraccionamiento durante las 24 horas del día, este sistema puede reducir sensiblemente la factura de energía eléctrica.

Las tecnologías de energía eólica, son tecnologías maduras y conocidas, especialmente en los países más desarrollados donde el mercado ha alcanzado una cierta madurez. Pero en el caso de México, este es un mercado incipiente en el que se han detectado problemas de carácter tecnológico que impiden su crecimiento. Sin embargo, es posible con aplicaciones de generación de energía eléctrica con sistemas eólicos, desarrollar en un futuro tecnologías propias del país.

Así mismo, en la conexión de sistemas de generación privados se deben tener los marcos regulatorios que permitan que ésta generación no viole las disposiciones legales vigentes en el país y se pueda tener una viabilidad económica de los proyectos.

Tanto en el campo de las pequeñas potencias como en el de los sistemas conectados a las grandes redes de distribución, la energía eólica puede competir, si las condiciones son adecuadas, con los sistemas convencionales de generación. Sus limitantes más importantes son, quizás, el desconocimiento que muchos tienen de esta realidad y la falta de incentivos para la realización de inversiones en el sector.

5.2 Recomendaciones

Para un proyecto real de generación de energía eléctrica utilizando este trabajo de tesis, se propone la inversión del costo del sistema completo dentro del costo del fraccionamiento. Así, cada casa habitación tendrá una participación en el costo del sistema eólico. Sabemos que el costo individual por casa aumentará pero en créditos financiados la carga económica no será tan elevada y posiblemente no se tendrá factura de costo de energía en cada casa habitación.

Finalmente, se requiere un estudio del mantenimiento del sistema para conocer los periodos y costos que los tendrían que asumir los habitantes del fraccionamiento en su conjunto.

Apéndices

A. Catálogo de Aerogeneradores.

Un Nuevo Standard Para Aerogeneradores Domésticos e Industriales



Diseñados para producir
más energía

Repowering
Solutions 

Diseñamos un nuevo standard en aerogeneradores pequeños y medianos.

Hemos diseñado una familia de turbinas desde 1,5kW hasta 150kW con un simple objetivo . conseguir el mejor retorno económico.

Aprovechar el poder que está a nuestro alrededor, nuestras turbinas proporcionan electricidad sostenible, eficiente para los usuarios domésticos, agrícolas e industriales.

ECONÓMICO

Instalación de una turbina le permite reducir o eliminar su factura de la electricidad. En caso de producir exceso de electricidad, será capaz de vender su electricidad excedente a la red eléctrica nacional. La energía eólica ha dejado de ser una "nueva" fuente de energía y gracias a la investigación en curso y los avances tecnológicos, le puede ofrecer un producto que compite con fuentes de energía más convencionales, como el petróleo y el gas.

VERDE

Las turbinas son fuente energía limpia, le permite generar energía verde para su casa, granja o negocio. A diferencia de otras fuentes de energía, la energía eólica no produce emisiones nocivas de CO2 o gases de efecto invernadero. Produce energía eficiente, limpia y poderosa que se ha tomado directamente de la naturaleza.

EFICIENTE

Las turbinas son alimentados por un generador EFICIENTE, que permite a la turbina producir energía a velocidades de viento muy bajas. Así, incluso en el clima más suave, conseguirás resultados fiables, eficientes de la energía eólica.

FIABLE

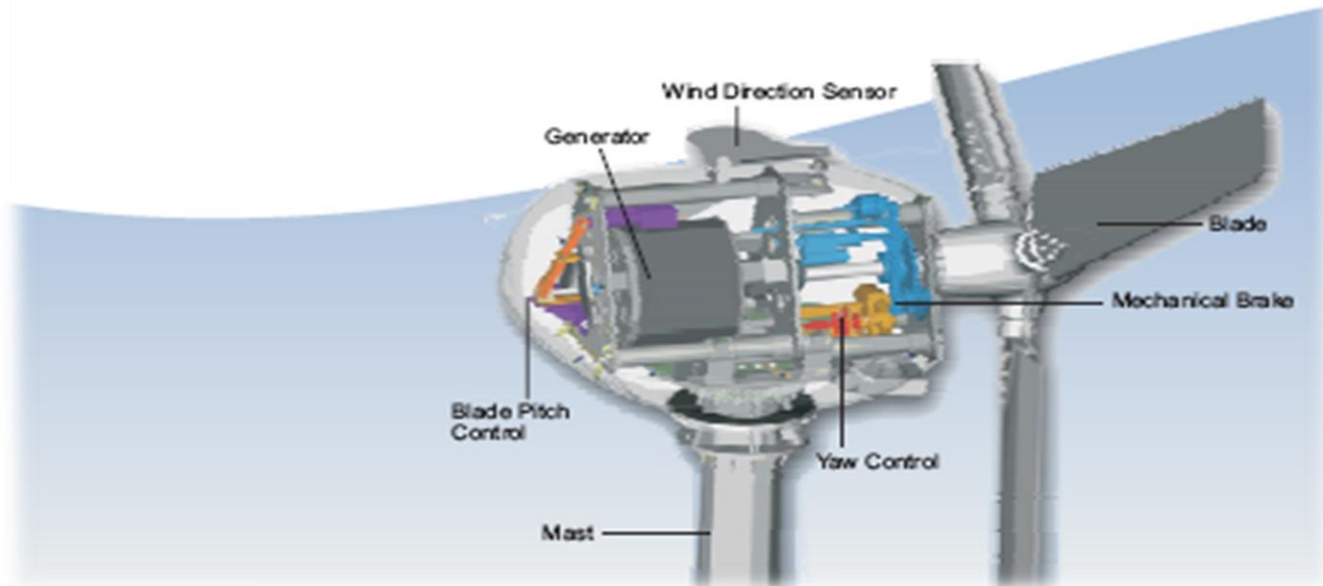
Construcción robusta y probada, todos nuestros modelos han sido sometidos a pruebas exhaustivas para asegurarse de que puede contar con nuestro turbinas con una vida útil de 20 años.

Bajos niveles de ruido

Las turbinas INNOVA combinan a la perfección en su vida cotidiana. Incluso a altas velocidades de viento, son tan silenciosas que no van a ahogar una conversación de fondo entre dos personas.

ESTÉTICA

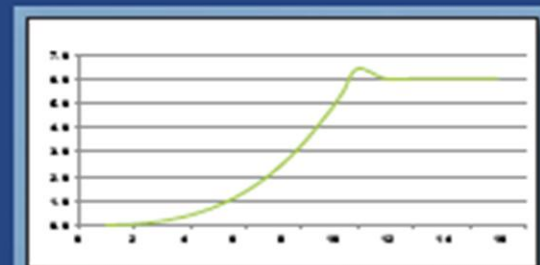
Un diseño agradable, gracias a un diseño de cubierta único que combina a la perfección con el ambiente.



Especificaciones técnicas

Potencia	6kW @ 9,5 m/s
Producción anual	Aproximadamente 8.670kW @ Velocidad media de 4,5 m/s Aproximadamente 11.290kW @ Velocidad media de 5 m/s Aproximadamente 13.978kW @ Velocidad media de 5,5 m/s Aproximadamente 16.570kW @ Velocidad media de 6 m/s Aproximadamente 18.932kW @ Velocidad media de 6,5 m/s Aproximadamente 20.969kW @ Velocidad media de 7 m/s Aproximadamente 23.915kW @ Velocidad media de 8 m/s
Velocidad para arranque	1,2 m/s
Velocidad para corte	25 m/s
Velocidad nominal	9,5 m/s
Diámetro Rotor	6 m
Altura torre	10 m
Anual ahorro de Co2	8-14 ton

Power Curve



Especificaciones técnicas

Potencia 6kW @ 8 m/s

Producción anual
 Aproximadamente 13.761kW @ Velocidad media de 4,5 m/s
 Aproximadamente 17.965kW @ Velocidad media de 5 m/s
 Aproximadamente 20.188kW @ Velocidad media de 5,5 m/s
 Aproximadamente 23.000kW @ Velocidad media de 6 m/s
 Aproximadamente 25.400kW @ Velocidad media de 6,5 m/s
 Aproximadamente 27.356kW @ Velocidad media de 7 m/s
 Aproximadamente 29.905kW @ Velocidad media de 8 m/s

Velocidad para arranque 1,2 m/s

Velocidad para corte 25 m/s

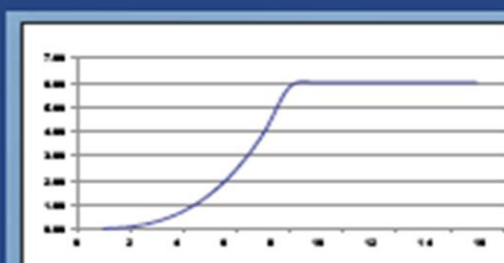
Velocidad nominal 8 m/s

Diámetro Rotor 8 m

Altura torre 15 m

Anual ahorro de Co2 8-14 ton

Power Curve



Especificaciones técnicas

Potencia 11kW @ 10 m/s

Producción anual
Aproximadamente 15.247kW @ Velocidad media de 4,5 m/s
Aproximadamente 19.743kW @ Velocidad media de 5 m/s
Aproximadamente 24.314kW @ Velocidad media de 5,5 m/s
Aproximadamente 28.690kW @ Velocidad media de 6 m/s
Aproximadamente 32.649kW @ Velocidad media de 6,5 m/s
Aproximadamente 36.043kW @ Velocidad media de 7 m/s
Aproximadamente 40.904kW @ Velocidad media de 8 m/s

Velocidad para arranque 1,2 m/s

Velocidad para corte 25 m/s

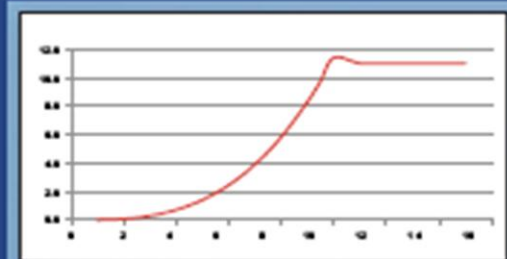
Velocidad nominal 10 m/s

Diámetro Rotor 8 m

Altura torre 15 m

Anual ahorro de Co2 14-19 ton

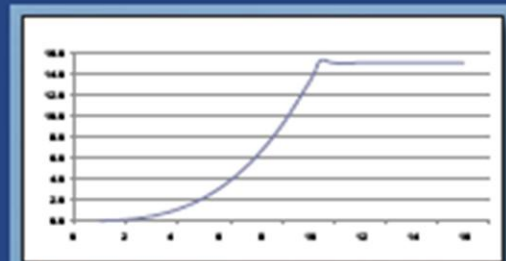
Power Curve



Especificaciones técnicas

Potencia	15kW @ 10 m/s
Producción anual	Aproximadamente 28.870kW @ Velocidad media de 4,5 m/s Aproximadamente 36.423kW @ Velocidad media de 5 m/s Aproximadamente 43.657kW @ Velocidad media de 5,5 m/s Aproximadamente 50.144kW @ Velocidad media de 6 m/s Aproximadamente 55.608kW @ Velocidad media de 6,5 m/s Aproximadamente 59.919kW @ Velocidad media de 7 m/s Aproximadamente 65.158kW @ Velocidad media de 8 m/s
Velocidad para arranque	1,7 m/s
Velocidad para corte	25 m/s
Velocidad nominal	10 m/s
Diámetro Rotor	10 m
Altura torre	15 m
Anual ahorro de Co2	19-23 ton

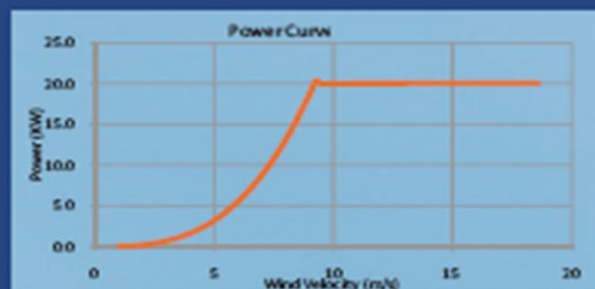
Power Curve



Especificaciones técnicas

Potencia	20kW @ 9 m/s
Producción anual	Aproximadamente 38.460kW @ Velocidad media de 4,5 m/s Aproximadamente 48.700kW @ Velocidad media de 5 m/s Aproximadamente 58.700kW @ Velocidad media de 5,5 m/s Aproximadamente 67.942kW @ Velocidad media de 6 m/s Aproximadamente 76.049kW @ Velocidad media de 6,5 m/s Aproximadamente 82.760kW @ Velocidad media de 7 m/s Aproximadamente 91.993kW @ Velocidad media de 8 m/s
Velocidad para arranque	1,7 m/s
Velocidad para corte	25 m/s
Velocidad nominal	9 m/s
Diámetro Rotor	13 m
Altura torre	15-20 m
Anual ahorro de Co2	26-30 ton

Power Curve



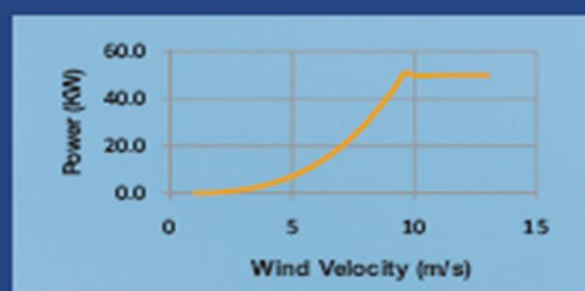
Especificaciones técnicas

Potencia 50kW @ 9,5 m/s

Producción anual
Aproximadamente 77.029kW @ Velocidad media de 4,5 m/s
Aproximadamente 99.641kW @ Velocidad media de 5 m/s
Aproximadamente 122.591kW @ Velocidad media de 5,5 m/s
Aproximadamente 144.521kW @ Velocidad media de 6 m/s
Aproximadamente 164.339kW @ Velocidad media de 6,5 m/s
Aproximadamente 181.311kW @ Velocidad media de 7 m/s
Aproximadamente 198.579kW @ Velocidad media de 8 m/s

Velocidad para arranque 1,7 m/s
Velocidad para corte 25 m/s
Velocidad nominal 9 m/s
Diámetro Rotor 18 m
Altura torre 30 m
Anual ahorro de Co2 70-80 ton

Power Curve



Especificaciones técnicas

IPOWER 150KW

Aerogenerador Media Potencia | Medium Power Wind Turbine

Sincrono / Imanes Permanentes | Synchronous / Permanent Magnet

Control de Paso | Pitch Control

Convertidor Full Power | Full Power Converter

Conexión directa a Redes de distribución | Directly Connected to Distribution Grids

Diseño acorde a IEC / Germanischer Lloyd | Design according to IEC / Germanischer Lloyd

Estabilidad frente a Huecos de Tensión (REE, EON) | Voltage Dip stability (REE, EON)

Control de activa / reactiva | Active - Reactive power control

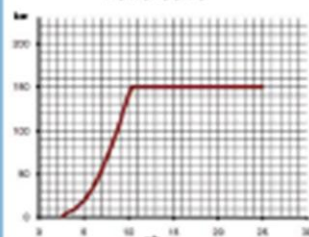
Filtros de eliminación de armónicos (IEC) | Harmonic Filters according to IEC

Protección contra rayos | Lightning system protection

Capacidad de Control Remoto | Remote control available

Bajo nivel de ruido | Low noise emission

Curva de Potencia
Power curve



Valores curva de potencia
Power curve data

m/s	kW	m/s	kW
2,5	0	7,5	68
3	5	8	80
3,5	7	8,5	94
4	10	9	108
4,5	15	9,5	124
5	19	10	140
5,5	27	10,4	150
6	34	11	150
6,5	44	20	150
7	55		

DATOS GENERALES GENERAL DATA

Potencia a Red Grid power	150 kW
Clase de viento Wind class	IEC IIIA
Diámetro de rotor Rotor diameter	28 m
Altura de Buje Hub height	35 m
Vel. viento arranque Cut-in wind speed	2.5 m/s
Vel. viento nominal Rated wind speed	10.4 m/s
Vel. viento corte Cut-off windspeed	20.0 m/s

ROTOR ROTOR

Nº de palas Number of blades	3
Posición Position	Barlovento Upwind
Mod. Pala Blade model	WN135 (diseño propio) (own design)
Longitud Length	13.5 m
Velocidad giro Rotor velocity	6-41 r.p.m.
Control: Pitch colectivo con accionamiento hidráulico Collective pitch with hydraulic cylinder	

GÓNDOLA NACELLE

Basidor en acero Steel main structure	
Peso Weight	11,500 kg (incluido buje) (hub included)
Orientación activa mediante 3 motorreductores Active yaw by 3 motorreductores	

GENERADOR GENERATOR

Sincrono / Imanes Permanentes Synchronous / Permanent Magnet	
Voltaje Voltage	400 V
Velocidad de giro Generator rated veloc.	350 r.p.m.
Frec. de generación Frequency	5-47 Hz
Fabricante Manufacturer	ABB

CONVERTIDOR CONVERTER

Full Power Full Power	
Cuatro Cuadrantes Four parts	
Modulos IGBT IGBT Modules	
Salida Output	400 V / 50 Hz
Control Directo de Par Torque direct control	
Fabricante Manufacturer	ABB

TORRE TOWER

Altura Height	34.3 m
Diseño Design	Cilíndrica, 3 partes 3 cylindrical sections
Diámetro Diameter:	1.200 mm
Peso Weight	16,600-20,800 kg

MULTIPLICADOR GEARBOX

Etapas Stages	2 paralelas parallel ones
Relación Ratio	8.53
Sin circuito de refrigeración No cooling circuit	

Especificaciones técnicas

IPOWER 200KW

Aerogenerador Media Potencia | Medium Power Wind Turbine

Sincrono / Imanes Permanentes | Synchronous / Permanent Magnet

Control de Paso | Pitch Control

Convertidor Full Power | Full Power Converter

Conexión directa a Redes de distribución | Directly Connected to Distribution Grids

Diseño acorde a IEC / Germanischer Lloyd | Design according to IEC / Germanischer Lloyd

Estabilidad frente a Huecos de Tensión (REE, EON) | Voltage Dip stability (REE, EON)

Control de activa / reactiva | Active - Reactive power control

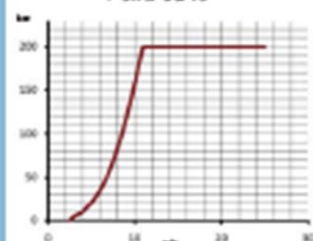
Filtros de eliminación de armónicos (IEC) | Harmonic Filters according to IEC

Protección contra rayos | Lightning system protection

Capacidad de Control Remoto | Remote control available

Bajo nivel de ruido | Low noise emission

Curva de Potencia
Power curve



Valores curva de potencia
Power curve data

m/s	kW	m/s	kW
2,5	0	7,5	68
3	5	8	82
3,5	7,5	8,5	97,5
4	10	9	116
4,5	15	9,5	136
5	20	10	157
5,5	27	10,5	179
6	35	11	200
6,5	44	20	200
7	55		

DATOS GENERALES GENERAL DATA

Potencia a Red Grid power	200 kW
Clase de viento Wind class	IEC IIIA / IIA
Diámetro de rotor Rotor diameter	28 m
Altura de Buje Hub height	35-40 m
Vd. viento arranque Cut-in wind speed	2.5 m/s
Vd. viento nominal Rated wind speed	11 m/s
Vd. viento corte Cut-off wind speed	20.0 m/s

ROTOR ROTOR

Nº de palas Number of blades	3
Posición Position	Barlovento Upwind
Mod. Pala Blade model	WN135 (diseño propio) (own design)
Longitud Length	13.5 m
Velocidad giro Rotor velocity	6-47 r.p.m.
Control: Pitch colectivo con accionamiento hidráulico Collective pitch with hydraulic cylinder	

GÓNDOLA NACELLE

Bastidor en acero Steel main structure	
Peso Weight	11,650 kg (incluido buje) (hub included)
Orientación activa mediante 3 motores reductores Active yaw by 3 motor gears	

GENERADOR GENERATOR

Sincrono / Imanes Permanentes Synchronous / Permanent Magnet	
Voltaje Voltage	400 V
Velocidad de giro Generator rated vel.c.	470 r.p.m.
Frec. de generación Frequency	5-47 Hz
Fabricante Manufacturer	ABB

CONVERTIDOR CONVERTER

Full Power Full Power	
Cuatro Cuadrantes Four parts	
Modulos IGBT IGBT Modules	
Salida Output	400 V / 50 Hz
Control Directo de Par Torque direct control	
Fabricante Manufacturer	ABB

TORRE TOWER

Altura Height	34.3 - 39.3 m
Diseño Design	Cilíndrica, 3 partes 3 cylindrical sections
Diámetro Diameter:	1,200 mm
Peso Weight	16,600-20,800 kg

MULTIPLICADOR GEARBOX

Etapas Stages	2 paralelas parallel ones
Relación Ratio	10.0
Sin circuito de refrigeración No cooling circuit	

Repowering
Solutions



Francisco Aritio, 162 Ed. 1º oficina 116
Campus Empresarial Alcarreño
19004 Guadalajara
Spain
Email: comercial@repoweringsolutions.com
Tel.: 00 34 949 20 31 76
Fax: 00 34 949 20 36 51
Internet: www.repoweringsolutions.com



Referencias

[Carless 1995]

Jennifer Carless, ENERGÍA RENOVABLE: Tecnología de punta para utilizar otras fuentes de energía, EDAMEX, 1995.

[Ortega 2000]

Mario Ortega Rodríguez, ENERGÍAS RENOVABLES, PARANINFO, 2000.

[Guillen 2004]

Omar Guillén Solís, ENERGÍAS RENOVABLES: Una perspectiva ingenieril, Trillas, 2004.

[Hernández 2005]

Ing. Francisco Hernández Cortes, El Arte de Distribuir Energía Eléctrica, Diciembre de 2005.

[Becerril L. 2010]

Ing. Becerril L. Diego Onésimo, INSTALACIONES ELECTRICAS PRÁCTICAS, 12ª EDICION (corregida y aumentada) 2010.

[CFE 2010]

CFE. Página principal. México. 14 de septiembre de 2010.

<http://www.cfe.gob.mx/negocio/informacionclientenegocio/Paginas/Normasdedistribuci%3b3n.aspx>.

[SENER 2010]

Secretaría de energía. Página principal. México. 18 de septiembre de 2010.

http://www.sener.gob.mx/webSener/res/Acerca_de/NOM001-SEDE-2005.pdf

[amdee 2010]

Asociación Mexicana de Energía Eólica. Página principal. México. 18 de octubre de 2010. <http://www.amdee.org/Inicio.html>

[CONUEE 2011]

Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía. Página Principal. México. 24 de Enero de 2011. http://www.conae.gob.mx/wb/CONAE/CONA_612_energia_eolica

[Repowering Solutions 2011]

REPOWERING suministro y venta de aerogeneradores nuevos, de segunda mano y reacondicionados. Página principal. España. 28 Enero 2011.
<http://www.repoweringsolutions.com/>

[CONAGUA 2010]

CONAGUA. Centro meteorológico. Lázaro Cárdenas Michoacán. 2010.

NORMA Oficial Mexicana NOM-001-SEDE-2005, Instalaciones Eléctricas (utilización).