

300 617
2
24



UNIVERSIDAD LA SALLE A. C.
ESCUELA DE INGENIERIA
Incorporada a la U.N.A.M.

**“AEROGENERADORES: UNA ALTERNATIVA VIABLE
PARA LA GENERACION DE ELECTRICIDAD”**

T E S I S P R O F E S I O N A L

Que para obtener el Titulo de

**INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA
CON AREA PRINCIPAL EN INGENIERIA MECANICA**

p r e s e n t a

MAURICIO ALVAREZ MACKAY

Asesor de Tesis: Ing. Jorge Salcedo González

México, D. F.

1993

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**



Universidad Nacional
Autónoma de México

UNAM



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

INDICE

INTRODUCCION

CAPITULO No. 1.- "MÉTODOS CONVENCIONALES PARA LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA"

1.1 Plantas Hidroeléctricas	3
1.1.1 Ventajas de las plantas hidroeléctricas.	3
1.1.2 Desventajas de las plantas hidroeléctricas.	4
1.1.3 Principio básico de funcionamiento.	4
1.2 Plantas Nucleoeléctricas.	5
1.2.1 Energía de fisión y de fusión.	5
1.2.2 Ciclos de potencia.	5
1.2.3 Ventajas y desventajas de una planta nucleoelectrica.	7
1.3 Combustibles fósiles.	9
1.3.1 Plantas generadoras de electricidad en base a combustibles fósiles.	10
1.3.2 Ventajas y desventajas de las plantas de generación en	11
1.4 Necesidades de fuentes alternas de generación.	11
1.5 Aplicaciones de la energía eólica.	12
1.5.1 Estaciones de comunicación.	12
1.5.2 Radio receptores.	13
1.5.3 Protección catódica.	13
1.5.4 Faros de navegación.	13
1.5.5 Cargadores de baterías.	14
1.5.6 Clínicas y centros de salud.	14
1.5.7 Escuelas	14

CAPITULO No. 2.-"CARACTERÍSTICAS DEL VIENTO Y SELECCIÓN DE LUGARES ÓPTIMOS PARA LA INSTALACIÓN DE AEROGENERADORES"

2.1 Velocidad del viento.	17
2.1.1 Variaciones en lugares abiertos.	18
2.1.2 Variaciones rápidas.	18
2.1.3 Variaciones diurnas.	19
2.1.4 Variaciones por estación del año.	19
2.1.5 Variaciones a través de los años.	19
2.2 La importancia de las variaciones del viento.	20
2.3 Mediciones del viento para determinar las características del lugar.	21
2.3.1 El incremento de la velocidad del viento con la altura.	23
2.3.2 Estructura del viento.	25
2.3.3 Características ideales para la instalación de un aerogenerador.	26

CAPITULO No. 3.- "DISEÑO BÁSICO DE AEROGENERADORES"

3.1 Clasificación de las máquinas de viento.	29
3.1.1 Clasificación de acuerdo a su capacidad.	29
3.1.2 Clasificación de acuerdo a su configuración.	30
3.2 Teoría sobre la potencia del viento.	30
3.3 Diseño de aerogeneradores.	31
3.3.1 Generadores eléctricos.	31
3.3.1.1 Características de salida del generador.	32
3.3.1.2 Características de utilización.	32
3.3.1.3 Elección de la relación de multiplicación.	34
3.3.1.4 Cálculo de la producción de energía eléctrica.	36
3.3.2 Almacenamiento de la energía.	37
3.3.2.1 Almacenamiento térmico.	37
3.3.2.2 Bombeo de agua.	37
3.3.2.3 Volante de inercia.	37

3.3.2.4 Depósito de aire comprimido.	38
3.3.2.5 Hidrógeno y pila de combustible.	38
3.3.2.6 Baterías.	38
a) Determinación de la capacidad de la batería	38
3.3.3 Elementos de arrastre.	39
3.3.3.1 Aerodinámica de la hélice. Características geométricas.	39
3.3.3.2 Estudio de las acciones aerodinámicas sobre una pala.	41
3.3.3.3 Aerogeneradores de eje perpendicular al viento.	43
3.3.3.4 Aerogeneradores de eje coaxial al viento.	45
a) Rotores lentos.	45
b) Rotores rápidos.	48
c) Perfiles utilizados.	51
d) Variación de la superficie relativa de las palas en función de la velocidad específica.	52
e) Número de palas y cálculo del diámetro.	54
f) Materiales utilizados en la construcción de las palas.	55
3.3.4 Elementos de control.	56
3.3.4.1 Dispositivos de orientación.	57
a) Aleta estabilizadora.	58
b) Rotores auxiliares.	59
c) Rotor auto-orientable.	60
d) Orientación por servomotor.	60
3.3.4.2 Dispositivos de regulación.	62
a) Regulación por palas fijas.	62
a.1 Dispositivos de aleta estabilizadora articulada.	62
a.2 Dispositivo de aleta estabilizadora fija y eje de rotación inclinable.	63
a.3 Dispositivo de aleta estabilizadora fija y freno aerodinámico.	64
b) Regulación mediante palas orientables.	65
3.3.5 Transmisión de potencia.	66
3.3.5.1 Configuraciones básicas .	66
a) Colocación en la cima de la torre.	67

b) Colocación en la base de la torre.	67
3.3.6 Torres de soporte.	68

CAPITULO No. 4.- "ANÁLISIS ECONÓMICO"

4.1 Costos de la energía alrededor del mundo.	70
4.2 Costo de la energía generada por el viento.	71
4.2.1 Obtención del valor "T".	72
4.3 Consideraciones económicas.	75
4.3.1 Costo del equipo.	75
4.3.2 Costos anuales de operación y mantenimiento.	75
4.3.3 Vida útil del equipo.	78
4.3.4 Costo anual del combustible.	78
4.3.5 Costo de las baterías.	79
4.3.6 Tasas de interés aplicables.	80
4.4 Comparación del costo de la energía eólica con sistemas de generación en base a combustibles fósiles.	81

CAPITULO No. 5.- "DISEÑO DE UNA INSTALACION AEROGENERADORA PARA UNA CLINICA RURAL MEXICANA"

5.1 Selección del sitio adecuado en la República Mexicana para la instalación de un aerogenerador para una clínica rural.	83
5.2 Cálculo de la demanda eléctrica de una clínica rural típica en México.	86
5.3 Potencia del viento disponible en el lugar de instalación seleccionado y cálculo del diámetro del rotor.	87
5.4 Selección del generador eléctrico y de la relación de multiplicación.	89
5.4.1 Cálculo de la velocidad específica y del número de palas del rotor.	90
5.5 Cálculo de la capacidad de las baterías para el almacenamiento de la energía.	91
5.6 Elementos de control y soporte.	92
5.6.1 Torre de soporte.	92
5.6.2 Elementos de control	93
5.7 Factibilidad económica del proyecto.	95

CONCLUSIONES

97

BIBLIOGRAFIA

99

INTRODUCCION

Desde que el ser humano descubrió en el fuego un elemento de confort, de ayuda para cocinar sus alimentos y de protección contra sus enemigos, la dependencia de la humanidad hacia las fuentes energéticas se ha ido incrementando a lo largo de su permanencia en este planeta. Así pues, en la historia de la humanidad, los sistemas de conversión del viento en energía fueron los primeros que se emplearon para moler granos y bombear agua. Estas labores eran idealmente apropiadas para las fuentes de potencia originadas en el viento, ya que la naturaleza intermitente del viento no perjudicaba la operación.

El viento es una de las fuentes de energía más antiguas y más usadas. Aun cuando su empleo se remonta a muchos siglos, no ha sido un factor dominante en el consumo de energía para el desarrollo de los países en los últimos 50 años, debido a la abundancia de combustibles fósiles. En años recientes, en que se está realizando un suministro limitado de éstos, ha surgido la necesidad de desarrollar la energía del viento como moderna tecnología en gran escala. En consecuencia, en los últimos años han habido grandes esfuerzos para aprovechar la potencia del viento.

El objeto de este trabajo, es el mostrar la viabilidad operacional y económica de los aerogeneradores o máquinas de viento para generar electricidad, como una fuente alterna de producción del fluido eléctrico. Esta investigación no está enfocada en un diseño particular de aerogenerador, sino en sus bases generales de diseño; localización de sitios adecuados para su instalación y la viabilidad económica de esta fuente alterna de generación eléctrica.

La urgencia de comenzar a utilizar nuevas formas de generación de electricidad, en el caso específico de México, responde a que la dependencia de los combustibles fósiles para este fin ha venido aumentando año con año, particularmente el uso de combustible para la generación eléctrica; la Comisión Federal de Electricidad en 1982

utilizaba el 47.8 % de la producción total nacional incrementándose esta cantidad para 1986 al 55.9 % del total nacional. Esto responde también a la creciente demanda de generación del fluido eléctrico debido al apresurado despunte industrial de México, por ejemplo en 1982 la generación bruta nacional del sector Eléctrico alcanzó los 87,929 Gigawatt-hora y para 1986 esta cifra alcanzó los 112,743 Gigawatt-hora, reportándose un incremento del 28.2 % en tan solo cuatro años.

En el capítulo número uno de este trabajo se tratará sobre los actuales métodos utilizados para la generación de electricidad, en donde se discutirán sus ventajas y desventajas así como sus principales características. En el segundo capítulo, se presentarán las condiciones de un lugar óptimo para la instalación de un aerogenerador y se hablará del viento y sus cualidades. En el tercer capítulo se tratará el tema sobre los conceptos básicos para el diseño de una unidad aerogeneradora. En el capítulo número cuatro se realizó un estudio económico sobre la viabilidad de los sistemas de generación de electricidad eólicos comparados con sistemas de generación en base a combustibles fósiles, y por último, en el capítulo quinto se presentará el diseño de un aerogenerador para su aplicación en una clínica rural mexicana.

Al final de este trabajo se muestran las conclusiones a las que se llegaron, entre las cuales se destaca la economía de operación, la nula contaminación y el bajo costo de mantenimiento que tienen los aerogeneradores, demostrando esto que realmente son una alternativa viable para la generación de electricidad.

CAPITULO 1: " METODOS CONVENCIONALES PARA LA GENERACION DE ENERGIA ELECTRICA "

1.1 PLANTAS HIDROELÉCTRICAS.

La energía gravitacional del agua fluyendo de un lugar alto a un lugar de menor altura para la generación de electricidad se manifiesta en la Tierra en dos formas esencialmente: (1) Descensos en cursos naturales de agua, creados por precipitaciones como lluvias y nieve, que fluyen desde las montañas, colinas y planicies hacia el nivel del mar; y (2) cambios de niveles en estuarios y otros cuerpos de agua como resultado de la acción de las mareas. La más utilizada para la generación eléctrica es la primera.

La utilización de la energía disponible del agua en movimiento, contribuye significativamente al total de la cantidad de energía eléctrica producida en el mundo. Así por ejemplo, el 16 % del total de energía eléctrica generada en los Estados Unidos es derivada de instalaciones hidroeléctricas. Canadá es el líder mundial en este aspecto ya que el 74.5 % del total de energía eléctrica generada proviene de plantas hidroeléctricas. En México, el porcentaje que las plantas hidroeléctricas representan en el total de energía eléctrica producida por el sector energético nacional es del 19.7 %, según datos de 1992.

1.1.1 VENTAJAS DE LAS PLANTAS HIDROELÉCTRICAS.

Las ventajas que representan las plantas hidroeléctricas con respecto a otros medios de generación de energía eléctrica son:

- a) Bajo costo de generación de energía eléctrica (operación barata).
- b) Bajo costo de mantenimiento.
- c) No consumen combustibles fósiles.

d) No existe contaminación de aire.

e) Los vasos o reservorios creados por las cortinas de las presas pueden ser usados para recreación en ciertos casos.

f) Incremento en las reservas de agua terrestres ocasionadas por los reservorios.

1.1.2 DESVENTAJAS DE LAS PLANTAS HIDROELÉCTRICAS.

Las instalaciones de las plantas hidroeléctricas presentan ciertas desventajas o limitaciones como las mostradas a continuación:

a) Costo inicial de construcción muy alto.

b) Pérdidas en tierras adecuadas para la agricultura.

c) Valles inundados.

d) Bajas en la producción de electricidad cuando se presentan descensos del nivel de agua en los reservorios o vasos en tiempos de secas.

1.1.3 PRINCIPIO BÁSICO DE FUNCIONAMIENTO.

El principio básico de operación de una planta hidroeléctrica es el siguiente. El agua embalsada a través de una cortina de concreto en un valle o cañada, a través de una esclusa o compuerta abierta, se precipita por la galería o conductos de tubería y hace girar las paletas o álabes de una o varias turbinas hidráulicas, las cuales están acopladas mediante flechas a una serie de alternadores o dinamos. Estos a su vez al girar producen o generan corriente eléctrica a una tensión de 2,200 volts, por ejemplo, más para transportarla o transmitirla a los centros de consumo, por lo general muy distantes de los centros de producción, es necesario elevar el potencial hasta 220,000 volts, esto con el fin de compensar las caídas de potencial durante la transmisión, este trabajo lo realiza un primer transformador. Debido a que tal voltaje no puede ser utilizado para usos domésticos, al llegar a una población determinada otro transformador reduce la tensión a 22,000 volts y un tercero permite reducirla a un potencial de 220 ó 127 volts de acuerdo

a la zona en donde se utilizará. La fig. (1.1) muestra un esquema de funcionamiento de una planta hidroeléctrica típica.

1.2 PLANTAS NUCLEOELÉCTRICAS.

1.2.1 ENERGÍA DE FISIÓN Y DE FUSIÓN.

La potencia nuclear es la energía derivada de la fisión (o división) de los núcleos de los elementos pesados, como el uranio o el torio, o bien, de la fusión (o combinación) de los núcleos de los elementos ligeros, con el deuterio o el tritio. Las partículas en movimiento por estos procesos obtienen energía calorífica en forma casi instantánea. La cantidad de energía liberada por cada átomo excede en varios millones la cantidad de energía que puede obtenerse por átomo en una reacción química, como es la combustión de combustibles orgánicos. Aun cuando todavía no se llega al control en el proceso de fusión, debido a grandes problemas técnicos, se han logrado importantes logros en el empleo de la energía calorífica producida por la fisión, ya sea en la generación de potencia, en la propulsión, en la producción industrial, o bien, en experimentos científicos.

1.2.2 CICLOS DE POTENCIA.

Aun cuando la energía de la fisión aparece como energía cinética (85 %) o calor y energía de fotones de rayos γ , no existe un método práctico para convertir esta energía en forma directa en trabajo útil a gran escala. Por esto, un reactor nuclear se debe tratar como una fuente de calor que, a diferencia de una del tipo químico, no requiere de oxígeno y en el cual el calor no tiene que ser separado de los productos gaseosos de la combustión que tienen propiedades para la transmisión de calor muy pobres.

En las instalaciones de gran capacidad asociadas con plantas nucleares, el ciclo de vapor Rankine es el que más se utiliza. Este ciclo es el más apropiado para las plantas nucleares, debido a: 1) que la máxima temperatura de operación factible para un reactor, corresponde a ó es menor que la temperatura usada en el ciclo de vapor Rankine convencional, 2) el problema de contaminación debido a la radiactividad está

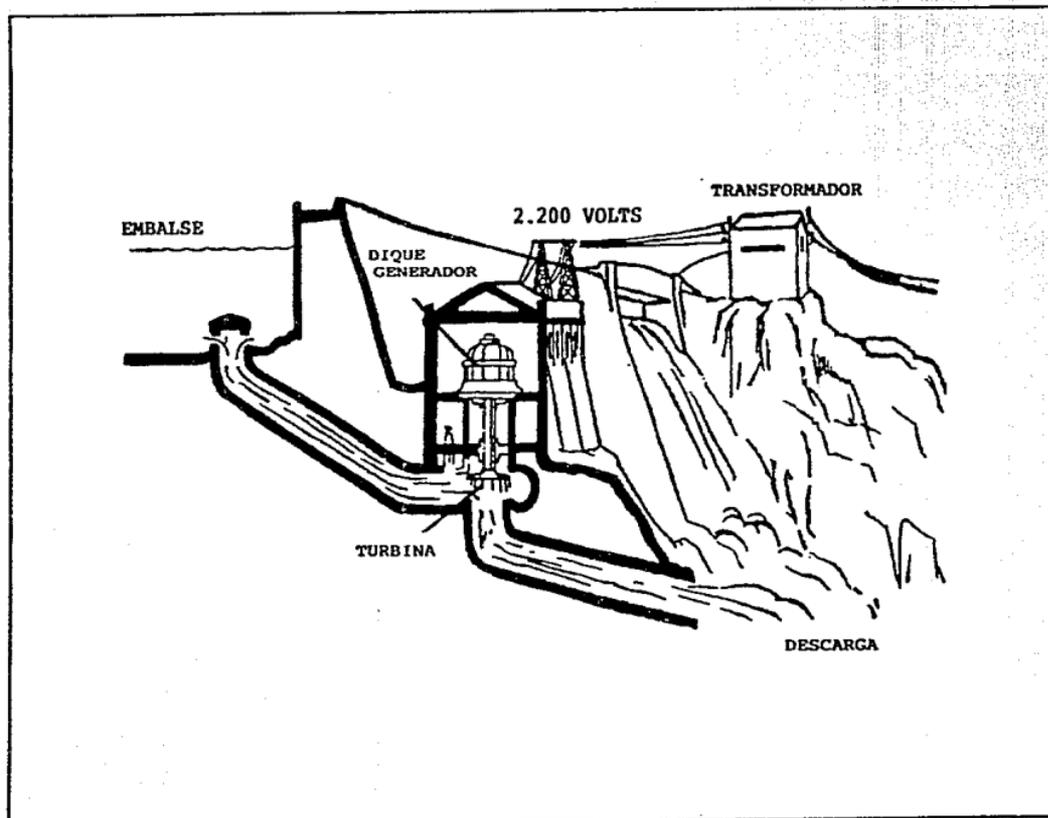


Fig. 1.1 Esquema de funcionamiento de una planta hidroeléctrica.

resuelto de mejor manera en este ciclo que en cualquier otro y 3) Los reactores son más económicos en grandes medidas, como sucede en las máquinas Rankine.

Se han empleado tres variaciones del ciclo Rankine (Fig. 1.2). De ellos, el menos complicado es el ciclo directo y también es el más deseable; sin embargo, presenta las desventajas siguientes: durante el proceso de ebullición no permite grandes densidades de potencia, las cuales son accesibles con enfriamiento líquido y el vapor radiactivo es transportado dentro de la turbina y del condensador. En el ciclo indirecto, se obtiene mayor densidad de potencia y se elimina la radiactividad en la turbina; además, también se produce vapor a más baja presión y temperatura que las consideradas más eficientes dentro de las turbinas modernas. Ambos conceptos están muy desarrollados en la actualidad y se encuentran disponibles en el comercio. En las plantas en las que se utiliza el sodio u otro metal líquido como medio cambiador de calor, también se utiliza un sistema de eslabón intermedio para aislar el agua del sodio radiactivo, pero la capacidad para operar a altas temperaturas con líquidos refrigerantes permite la generación de vapor a alta temperatura, para utilizar la situación actual de la tecnología de turbinas de vapor.

La capacidad de un reactor nuclear para producir elevadas temperaturas no se encuentra limitada por las reacciones químicas en equilibrio, lo cual ha generado el interés en el desarrollo de conceptos avanzados, como los generadores magneto hidrodinámicos y también los termoiónicos. Estos sistemas se encuentran limitados en la actualidad por falta de materiales convenientes de construcción y parece que permanecerán en la fase de investigación hasta que se hayan desarrollado materiales seguros.

La fig. (1.3) muestra el diagrama básico del ciclo de funcionamiento de una planta nucleoelectrónica.

1.2.3 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE UNA PLANTA NUCLEOELECTRÓNICA.

Las principales ventajas de una planta nucleoelectrónica son:

- a) Bajo costo de generación por unidad de energía (operación).

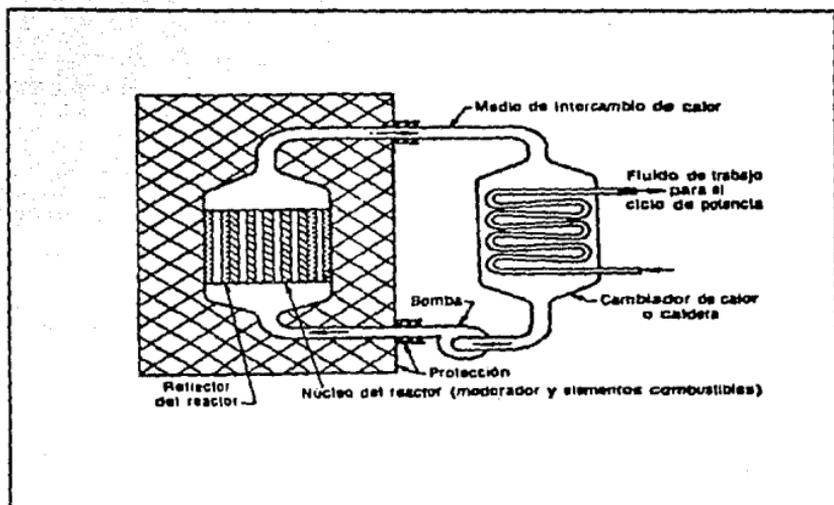


Fig. 1.2 Ciclo Rankine

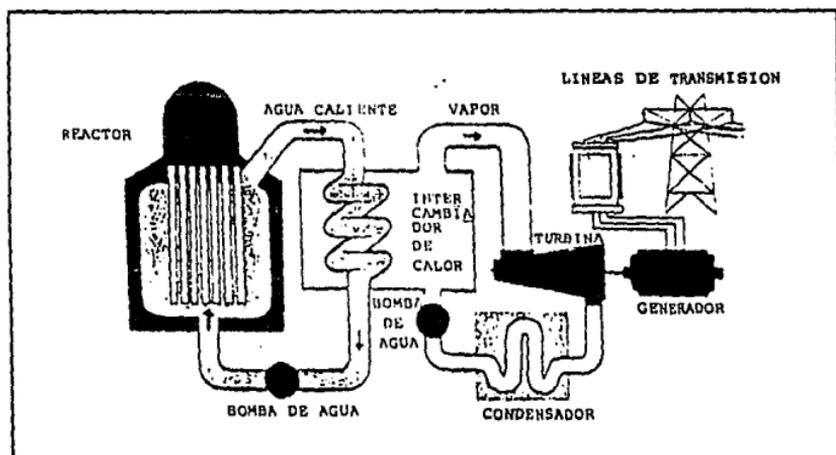


Fig. 1.3 Planta Nucleoeléctrica

- b) No utilizan combustibles fósiles no renovables.
- c) Bajo impacto ecológico en el lugar de construcción.
- d) No existe contaminación ambiental.

Las principales desventajas de este tipo de plantas generadoras son:

- a) Altísimo costo de instalación.
- b) Alto peligro ecológico si existe algún tipo de fuga de radioactividad.
- c) Alto costo de mantenimiento y operación.

1.3 COMBUSTIBLES FÓSILES.

Las demandas de energía se satisfacen fundamentalmente con combustibles fósiles y nucleares, energía hidroeléctrica y con otras fuentes. Alrededor de un 93 % de las necesidades energéticas mundiales durante el año de 1974 fueron cubiertas con combustibles de origen fósil, menos de 2 % por combustibles nucleares y cerca del 5 % se cubrió con energía hidroeléctrica, con mínimas cantidades de energía a partir de otras fuentes cerca del 97 % de la demanda mundial de energía es cubierta por combustibles de origen fósil y el restante 3 % se cubre con energía hidroeléctrica y fuentes nucleares.

Desde la década de los 50's hasta el momento, los hidrocarburos se han consolidado como los energéticos de mayor uso debido a su oferta abundante, barata y accesible, así como por sus ventajas de limpieza y gran versatilidad. Por ello, aunque la energía nuclear y la hidroelectricidad registraron avances relevantes en la época de la post-guerra, el balance energético mundial evolucionó hacia la creciente dependencia de una fuente de energía, el petróleo. cuyo bajo precio y excesiva oferta ocasionaron el desarrollo de altos patrones de consumo que a su vez propiciaron un uso excesivo de dicho recurso.

Sin embargo, cuando los precios del petróleo casi se cuadruplicaron durante la primera crisis petrolera de 1973-1974 y luego con los aumentos subsecuentes de precios

registrados en 1979 y 1980, el cambio más importante provino del lado de la demanda cuando los países industrializados implantaron políticas de ahorro energético, que ocasionaron la caída de tal demanda justo con el desplome correspondiente de los precios, a consecuencia de una reducción drástica en el consumo mundial del petróleo.

Se estima que para el año 2000 el balance energético de los países industrializados estará constituido básicamente mediante carbón (30-34 %) y petróleo (31-36 %), con una importante participación complementaria del gas (20-22 %).

1.3.1 PLANTAS GENERADORAS DE ELECTRICIDAD EN BASE A COMBUSTIBLES FÓSILES.

Las principales plantas de generación de electricidad que utilizan algún tipo de combustible fósil son los siguientes:

- a) Termoeléctricas.
- b) Carboeléctricas.
- c) Gasoeeléctricas.

Todas éstas funcionan de la siguiente manera. El combustible fósil es quemado en una caldera cuyo fin es el de proveer vapor a alta presión. Este vapor es conducido mediante tuberías hasta hacer que éste incida sobre los álabes de una turbina la cual comienza a girar hasta alcanzar una velocidad de 3600 rpm (60 ciclos por segundo). Esta turbina de vapor está conectada a un generador eléctrico el cual, al girar comienza a proporcionar fluido eléctrico a la red de distribución. El vapor de baja presión que sale de la turbina es conducido a un condensador en donde el vapor regresa a su fase líquida y es bombeado de nuevo a la caldera para repetirse el ciclo. Como se aprecia, los combustibles fósiles proporcionan la energía química necesaria que a su vez es convertida a energía de presión y de allí a energía cinética y por último a la deseable energía eléctrica

1.3.2 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LAS PLANTAS DE GENERACIÓN EN BASE A COMBUSTIBLES FÓSILES.

Las principales ventajas que presentan este tipo de plantas generadoras son:

- a) Bajo costo de producción por unidad energética (generación).
- b) Facilidad de instalación.
- c) Ciclo cerrado de operación

Las desventajas de estas plantas son:

- a) Contaminación atmosférica.
- b) Alto costo de instalación.
- c) Alto costo de mantenimiento.
- d) Dependencia de combustibles fósiles.

1.4 NECESIDADES DE FUENTES ALTERNAS DE GENERACIÓN.

De lo anterior y en vista de que el 90 % de la producción de energía eléctrica se basa en el consumo de combustibles fósiles irrenovables, los investigadores han comenzado a desarrollar fuentes alternas de generación energética, las cuales por definición no deben de contaminar el medio ambiente y no son dependientes de combustibles fósiles. Una de estas fuentes alternas es el aprovechamiento de la potencia del viento para la generación de energía eléctrica. A continuación se ilustrarán aplicaciones prácticas en las que la energía eólica compite con medios que utilizan combustibles fósiles, en especial en regiones aisladas en donde la transmisión y distribución de energía eléctrica es muy costosa y en donde se utilizan pequeñas plantas de generación que utilizan motores de combustión interna para impulsar a un generador de baja capacidad.

1.5 APLICACIONES DE LA ENERGÍA EÓLICA.

Algunas de las aplicaciones en donde la energía eléctrica ha provocado ser competitiva con respecto a otros tipos se muestran a continuación:

- Apoyo para la navegación.
- Estaciones de telecomunicaciones.
- Protección catódica.
- Bombeo de agua.
- Instalaciones rurales.
- Clínicas y escuelas.

En algunas aplicaciones remotas los sistemas eólicos correctamente diseñados para un correcto funcionamiento y larga vida pueden proveer la energía necesaria a menor costo que los sistemas convencionales. A continuación se discutirán algunas de estas aplicaciones que han sido identificadas como especiales y remotas.

1.5.1 ESTACIONES DE COMUNICACIÓN.

Dentro de este tipo de aplicación se encuentran incluidas repetidoras de microondas, estaciones terrenas de satélites; así como estaciones de encadenamiento radiotelefónico. Estas aplicaciones se encuentran generalmente localizadas en áreas remotas donde el costo para proveerles energía eléctrica de fuentes convencionales es extremadamente alto. Los requerimientos energéticos varían ampliamente debido al tamaño de la instalación. Un sistema de comunicación de gran tamaño puede requerir de 25 KW. Los requerimientos energéticos pueden variar desde un rango de 2.5 KWh/año hasta 100 MWh/año.

1.5.2 RADIO RECEPTORES.

Pequeños transmisores de 100 a 200 watts en remotas granjas, campos de trabajo, ranchos, estaciones policíacas y militares son utilizadas en todo el mundo. Los requerimientos energéticos anuales son aproximadamente de 500 KWh/año y se usan de 2 a 3 horas diarias para la transmisión y de 3 a 12 para la recepción. Estos radio-receptores son comúnmente utilizados en conjunción con generadores de gasolina o baterías. Esto es costoso debido a que hay que transportar combustibles y baterías a los remotos sitios de aplicación. Por lo tanto, éste es un buen caso de aplicación para sistemas eólicos de generación eléctrica.

1.5.3 PROTECCIÓN CATÓDICA.

Un pequeño generador de corriente directa impulsado por una máquina de viento puede prevenir la corrosión de estructuras metálicas que estén en contacto con la humedad del suelo, aguas marinas o agua dulce, haciendo pasar una corriente eléctrica entre el metal de la estructura y un electrodo pasivo. La corriente eléctrica previene la oxidación en la superficie de la estructura logrando así prolongar la vida de la instalación. Su aplicación incluye tuberías, tanques, puentes, plataformas, etc.

La energía necesaria para la protección del equipo varía en función de las condiciones prevalecientes y tamaño del sistema. Por ejemplo la energía requerida para proteger 25 millas de tubería de diámetro de 1 pie es aproximadamente 250 KWh/año.

1.5.4 FAROS DE NAVEGACIÓN.

A lo largo de todas las áreas costeras del mundo en donde existe navegación marítima se requiere el uso de faros, situados generalmente en áreas aisladas los cuales tienen sus propias plantas generadoras. Debido a que estas áreas cuentan con excelentes y constantes vientos marítimos son buenos sitios de instalación de sistemas eólicos.

Un típico faro requiere 10 MWh/año para todas sus necesidades energéticas. Esto incluye la operación del bulbo, sistema seguidor del faro, claxon de niebla y radio transmisor. Su tradicional fuente energética han sido generadores diesel. Existe

siempre un generador de reserva para apoyar al primario. La mayoría de faros están deshabitados y solo requieren una visita cada tres meses para limpiar el sistema y darle servicio. Debido a que son lugares aislados, el costo de transportación de combustibles y servicio técnico es muy alto.

Para reducir costos de combustible, los aerogeneradores podrían ahorrar combustible satisfaciendo gran parte de los requerimientos energéticos de la instalación.

1.5.5 CARGADORES DE BATERÍAS.

Las baterías son usadas en áreas remotas para proveer una fuente portátil de energía para aplicaciones que requieren pequeñas cantidades de energía. Estas baterías son usualmente transportadas después de haber sido cargadas por un generador de gasolina o diesel. La energía requerida para cargar una batería de 12 volts diariamente es cerca de 600 KWh/año. Esta cantidad de energía es relativamente pequeña y puede ser proporcionada fácilmente por un sistema eólico aún en vientos moderados. Este sistema puede proveer grandes ahorros evitando el uso de combustibles.

1.5.6 CLÍNICAS Y CENTROS DE SALUD.

Se considera que la electricidad producida mediante el viento es competitiva para el uso en clínicas y centros de salud rurales en países en desarrollo.

Este tipo de instalaciones requieren electricidad para iluminación, bombeo y filtración de agua, destilación y esterilización. Otros consumos de menor cantidad son refrigeradores y radio transmisores. Los requerimientos energéticos son de alrededor de 4,000 KWh/año. El aerogenerador deberá de estar correctamente localizado con el fin de poder cumplir totalmente con los requerimientos de la instalación, pero conservando el costo de generación al mínimo.

1.5.7 ESCUELAS.

Las situaciones de una escuela son muy semejantes a las de un centro de salud. En muchos países se encuentran juntos. Para una pequeña escuela de 100 estudiantes el

consumo de energía es aproximadamente 100 KWh/año por estudiante. Esta será utilizada para alumbrado, bombeo de agua y posiblemente para una televisión y equipo audiovisual.

Los sistemas energéticos eólicos pueden proveer una fuente de poder para escuelas en muchas áreas. En países en desarrollo, muchas áreas no tienen acceso a la electricidad, por lo que los aerogeneradores pueden constituir una opción viable en estos casos.

CAPITULO 2 : "CARACTERISTICAS DEL VIENTO Y SELECCION DE LUGARES OPTIMOS PARA LA INSTALACION DE AEROGENERADORES"

Los vientos naturales son movimientos de aire ocasionados por diferencias de presión atmosférica causados por variaciones en la temperatura del aire. El flujo de aire de una zona de alta presión a una de baja presión, así como la velocidad del viento, dependen de la magnitud de la diferencia de presiones entre ambas zonas. La velocidad del viento, tanto en magnitud como en dirección, proviene de la velocidad inducida por la diferencia de presiones, así como la velocidad originada por el efecto del arrastre de las capas de aire en la superficie debido a la rotación del planeta. La velocidad de giro de la superficie del planeta varía desde 1,600 Km/hr aproximadamente en el ecuador hasta prácticamente cero en los polos, es por esto que la velocidad del viento varía tanto con la latitud.

La velocidad del viento y su dirección varían en un lugar determinado a lo largo del tiempo, siendo el cambio en la dirección de éste lo que conserva un patrón de comportamiento más estable. En condiciones estables, existen continuamente dos cinturones de alta presión alrededor del planeta, uno entre los 30 grados Norte y los 40 grados Norte y el otro entre los 30 y los 40 y además existe un cinturón de baja presión en la zona del ecuador, entre los cinturones de alta presión, lo cual origina un continuo flujo de aire de los hemisferios norte y sur hacia el ecuador. Debido al efecto de rotación de la Tierra, en las zonas tropicales las corrientes de aire provenientes de ambos hemisferios hacia el ecuador se convierten, en el caso del hemisferio norte en vientos del noreste y en el caso del hemisferio sur en vientos del sureste. Asociados con este sistema de vientos existen persistentemente vientos del oeste en latitudes entre los 40 grados y los 60 grados de latitud en ambos hemisferios.

Despreciando los disturbios ocasionados por tormentas sobre las corrientes normales de aire, existen ciertas tendencias bien definidas en la dirección del viento en los cinturones mencionados. Los servicios meteorológicos alrededor de todo el mundo realizan continuas mediciones de la presión atmosférica con el fin de poder construir cartas de presión atmosférica o isobáricas en cualquier momento. Las isobáricas son líneas que unen puntos o lugares cuya presión atmosférica es la misma al nivel del mar y se corrigen de acuerdo a la temperatura y a la latitud. A partir de las isobáricas, el "gradiente de viento", es decir, la velocidad del viento debido a la diferencia de presión, puede ser calculado, pero debido a la fricción y a efectos de la temperatura local a bajas altitudes, este cálculo de la velocidad no es en general actualmente obtenido por abajo de alturas de 500 m.

Cuando se considera al viento como fuente energética, no se consideran por supuesto los vientos en grandes altitudes, sino aquellos que se encuentran entre los 0 y 60 metros sobre el nivel del suelo. Estos vientos superficiales, con los cuales las máquinas de viento operan, son fuertemente afectados por la topografía del lugar en el cual son instalados los equipos, así como por construcciones, árboles, rocas o de hecho, cualquier cosa que obstruya o disturbe el flujo de aire.

El poder del viento depende principalmente de su velocidad; si existen factores afectando la velocidad del viento en el lugar de colocación del aerogenerador, la eficiencia del mismo será muy variable. La dirección del viento no es tan importante en la localización de la máquina a excepción de que existan serias obstrucciones en la dirección general del viento prevaleciente en el lugar, por lo que será mejor relocalizar su sitio de colocación.

2.1 VELOCIDAD DEL VIENTO.

Antes de discutir la distribución geográfica de los vientos es importante definir el concepto de viento desde el punto de vista de potencial energético.

La característica más importante del viento es su variabilidad de velocidad. En cualquier punto de la superficie de la Tierra, la velocidad del viento puede variar desde

cero hasta 56 m/seg o más. Aun en los lugares de "calma", las tormentas pueden traer fuertes vientos. Por lo tanto, no se puede asegurar la potencia del viento en un momento determinado aún cuando el lugar escogido para la colocación se caracterice por fuertes vientos y por otro lado, no se puede disminuir la resistencia mecánica de un aerogenerador destinado para una zona de relativa calma asegurando así su desempeño bajo fuertes vientos.

Si en lugar de tomar en cuenta las variaciones instantáneas en la velocidad del viento se considera su valor en varias escalas de tiempo, es posible determinar algunos y generalmente aplicables hechos:

2.1.1 VARIACIONES EN LUGARES ABIERTOS.

En un viento natural, la velocidad nunca es estrictamente constante, aun en escalas de segundos su variación es constante, sin embargo estas variaciones no son tan grandes para constituir un problema de operación para un aerogenerador. El concepto de estabilidad de la velocidad del viento es cierto hasta ciertos límites. Mucho depende de los instrumentos usados para la medición de la velocidad: si la respuesta del instrumento es muy lenta, aparentará una completa estabilidad, sin embargo si se usara un instrumento de rápida respuesta, éste indicaría rápidas variaciones en la velocidad. La magnitud de estas variaciones así como su frecuencia, dependerán de lo "borrascoso" del viento en el momento de la medición bajo condiciones de clima estable y en un sitio libre de cualquier obstrucción capaz de interferir con el flujo del aire, la velocidad de las fluctuaciones será usualmente de baja frecuencia y de pequeña magnitud, pero durante una tormenta, éstas variaciones serán frecuentemente violentas.

2.1.2 VARIACIONES RÁPIDAS.

Las variaciones rápidas en la velocidad del viento referidas en el párrafo anterior (2.1.1) son más importantes desde el punto de vista de diseño mecánico del aerogenerador que en su influencia para su operación en sí (potencia de salida). La velocidad del viento promedio no varía usualmente rápidamente. Sin embargo, existen ciertas posibilidades

de que este promedio de velocidad se incremente o caiga hasta un 50 % en pocos minutos. Las experiencias generales indican que este tiempo es más largo, por lo tanto, la velocidad del viento promedio por hora puede ser usado con cierta confianza en la evaluación de las potencialidades energéticas de un determinado lugar.

2.1.3 VARIACIONES DIURNAS.

Considerando ahora una escala de horas, en muchas zonas tropicales y subtropicales, las variaciones diurnas por hora en la velocidad del viento son claramente marcadas, durante determinadas estaciones del año es a menudo posible predecir el régimen diario de viento con algunos grados de certeza. Así por ejemplo, en el área de la costa, la velocidad del viento durante la noche será casi cero, en el amanecer la velocidad del viento comenzará a incrementarse hasta llegar a su máximo valor poco después del medio día con la consecuente caída hasta cero al anochecer. En zonas cálidas especialmente aquellas que se encuentran en áreas de tormenta, las variaciones diurnas están usualmente influenciadas por disturbios de tormentas y las predicciones del régimen de viento diario no son de mucha utilidad.

2.1.4 VARIACIONES POR ESTACIÓN DEL AÑO.

Las variaciones por estación del año, como por ejemplo en una escala de meses, son por lo general claramente definibles. Tomando un promedio mensual de velocidad de viento, éstos llegan a su valor más alto en la estación del año en la cual, por supuesto, varía de acuerdo a la parte del planeta considerada, se alcanzan los promedios más altos. En el caso de Norteamérica, en la cual, se incluye parte de México, los valores más altos se alcanzan en invierno, los meses de diciembre, enero y febrero son por lo general, los que alcanzan un mayor promedio de velocidades.

2.1.5 VARIACIONES A TRAVÉS DE LOS AÑOS.

Casi todos los lugares en donde se mantienen registros de variaciones a largo plazo de la velocidad del viento se encuentra que el promedio de velocidad anual cambia poco año con año. El promedio de velocidad anual del viento en determinado lugar de la costa de los E.E.U.U. no varió mas del 18 % en un período de medición de 31 años.

2.2 LA IMPORTANCIA DE LAS VARIACIONES DEL VIENTO.

Será muy útil aquí, remarcar el significado general de los hechos determinados anteriormente (2.1).

Primeramente, el promedio de velocidad del viento tomado en períodos cortos de tiempo del orden de segundos o minutos, es de gran importancia para el diseñador del aerogenerador debido a la influencia de los valores extremos de la velocidad en el cálculo de la resistencia mecánica de la máquina o en las características requeridas en el control de la transmisión.

Para estimaciones de la cantidad de energía que puede ser obtenida a través de aerogeneradores en un lugar determinado, los promedios de velocidad del viento en horas hasta en largos períodos de tiempo en dichos sitios son más útiles. Si esta información es recabada continuamente, ésta permitirá al investigador determinar lo siguiente:

- a) Los valores máximos y mínimos del promedio por hora de la velocidad del viento así como el total de número de horas durante el año, en las cuales la velocidad del viento se sale del rango de operación para el cual el aerogenerador fue diseñado.
- b) Las variaciones diurnas en la velocidad del viento y las posibilidades de tener potencia disponible del viento durante cualquier hora del día.
- c) El máximo de horas de continua calma con el fin de poder prever las necesidades de provisión de almacenamiento de energía o plantas de generación alterna.
- d) Las variaciones del viento con las estaciones, así como las relaciones entre el viento y otros factores climáticos como precipitaciones.
- e) La energía total probablemente obtenida en un año con un aerogenerador en un determinado lugar y conociendo sus condiciones de operación.

Algunos o todos estos datos deberán de ser determinados tomando en cuenta las posibilidades económicas de una máquina de viento en el lugar en el cual las mediciones fueron realizadas.

2.3 MEDICIONES DEL VIENTO PARA DETERMINAR LAS CARACTERÍSTICAS DEL LUGAR.

Los servicios meteorológicos del mundo poseen una red de estaciones de observación donde son hechas mediciones de viento conjuntamente con mediciones de precipitaciones, radiaciones solares y otros factores climáticos. La Organización Mundial Meteorológica, además de realizar este tipo de mediciones, trabaja en normas internacionales para métodos de medición. Así, por ejemplo la altura estándar por encima del suelo para medición de viento es de 10 metros. Sin embargo, por varias razones otras alturas son frecuentemente usadas para colocar anemómetros y los valores de las mediciones son posteriormente corregidas a la medición conforme al estándar de 10 metros. Estas correcciones tienen que ser realizadas usando fórmulas para el incremento de la velocidad del viento con la altura sobre el suelo, las cuales tienen bases estáticas, pero no son estrictamente aplicables bajo todas las condiciones, por lo que puede haber errores en el dato del viento mostrado por dichas mediciones.

Frecuentemente, los anemómetros que dan lecturas instantáneas de la velocidad del viento son usados. Estos son instrumentos, no registradores y sus lecturas son anotadas en cierto tiempo especificado del día. El valor de la velocidad del viento, así como su medición, son útiles como una guía general, pero no forman una base precisa para asentar la velocidad del viento promedio por hora.

Se considerarán ahora los métodos que deben ser seguidos para la selección del sitio o lugar de instalación, así como para la determinación de los regímenes de viento en los lugares seleccionados. En primer lugar, se debe entender claramente que el objeto de tal trabajo es el de descubrir sitios especialmente aerosos los cuales pueden ser adecuados para la instalación de una máquina movida por viento.

Supóngase que se estudiarán las posibilidades energéticas del viento de un área muy grande. El primer paso es obtener información de velocidades de viento y direcciones prevaletientes en la estación meteorológica más cercana. Registros de largo tiempo dan una guía muy confiable de cuales son las zonas de mayor viento, así como en la elección del lugar desde el punto de vista de la mayor exposición a los vientos prevaletientes: No se debe escoger un lugar escudado al viento por montículos de tierra, árboles u otro tipo de obstrucción, particularmente aquellos que se encuentran en la dirección prevaletiente del viento.

El siguiente paso es el estudio de la topografía del lugar. En general, la velocidad del viento aumenta con la altitud por lo que las tierras altas son recomendadas. Existe otro fenómeno por el cual la velocidad del viento aumenta en ciertas colinas. Cuando el viento fluye hacia arriba de la colina su velocidad, en las copas más próximas al suelo, sufre un considerable cambio, y si la forma de la colina es favorable con una pendiente firme pero con suaves contornos, las capas inferiores de aire son aceleradas debido a la presión de las capas superiores de aire, que generan un efecto Venturi.

Un estudio de las alturas de las colinas y de las ganancias en el promedio de la velocidad del viento muestra que estas ganancias no son solamente resultado de la altitud: las formas de la colina tienen una gran influencia en éstas.

Después de seleccionar el lugar en el cual se harán las mediciones, la siguiente consideración es la forma en que se instalarán los equipos de medición. Se puede suponer que un elaborado equipo de continuo registro de la velocidad del viento debe ser instalado, pero esto no es necesario. Únicamente el promedio de velocidad del viento por hora es necesario cuando las direcciones del viento no son muy diferentes de aquellas prevaletientes en el lugar. Dispositivos complicados, además de ser muy caros, necesitan de una instalación y un mantenimiento muy especializado. Además, un continuo registro de datos necesita de mucho tiempo y un gran esfuerzo en el análisis de éstos, para poder proveer la velocidad del viento por hora como es requerido.

Un mejor procedimiento es instalar en la cima de la colina, o en el sitio escogido, anemómetros del tipo copa de contacto con alguna forma de registrador para poder

proporcionar información de la cual se pueda obtener fácilmente el promedio de velocidad del viento por hora. Es deseable que el cambio del papel registrador, así como el mantenimiento del equipo, sean un proceso relativamente sencillo con el fin de que cualquier persona con poca capacitación pueda realizar estas tareas. Es recomendable que el anemómetro esté localizado encima de una ligera torre a una altura de 10 metros sobre el nivel del suelo con el fin de adecuarse a la norma o estándar utilizada por los servicios meteorológicos y así poder comparar los datos obtenidos sin tener que introducir ningún factor de corrección. La altura del anemómetro puede ser cambiada dependiendo del contorno de la cima de colocación del dispositivo, ya que la forma de la colina afecta la corriente de aire y por lo tanto a las mediciones de la misma. El equipo estará sometido a fuertes vientos y generalmente a condiciones climáticas adversas, por lo tanto, se deberán de tomar ciertas precauciones para asegurar que todas las partes del equipo y de la instalación sean robustas y estén protegidas del medio ambiente lo máximo posible. Especialmente si los sitios de instalación están distantes de caminos utilizables o de difícil acceso, se deberá de utilizar equipo portátil y de bajo peso. La torre de soporte del anemómetro puede ser del tipo seleccionada para su fácil transportación y se deben utilizar sistemas de anclaje que no impliquen el uso de equipo complicado y muy pesado.

De los registros de la velocidad del viento obtenidos, es posible graficar la curva de velocidad del viento contra duración en el sitio de medición. Es a partir de esta información que se puede determinar la viabilidad económica de construcción e instalación de un aerogenerador en ese sitio.

2.3.1 EL INCREMENTO DE LA VELOCIDAD DEL VIENTO CON LA ALTURA.

Las condiciones climáticas varían mucho de un sitio a otro y de un tiempo a otro, es por esto que es imposible determinar una ley para el gradiente vertical del viento. Sin embargo, una ley estadística para precisar la velocidad del viento sobre el nivel del suelo ha sido formulada como resultado del trabajo de muchos investigadores. La variación de la velocidad del viento con la altura es usualmente expresada por la siguiente relación:

$$V_A/V_B = (h_A/h_B)^{\dot{Y}}$$

donde V_A es la velocidad del viento a la altura h_A

V_B es la velocidad del viento a la altura h_B

\dot{Y} es un valor experimental que depende de las condiciones del terreno, así para terrenos planos es igual a 0.14 y \dot{Y} para cimas de colinas el valor de \dot{Y} puede variar desde 0.10 hasta 0.07.

Si esta ley es aceptada se puede encontrar que en terrenos planos el incremento de la velocidad del viento de una altura de 15 m a una de 45 m, por ejemplo, se puede calcular como sigue:

$$V_A = ? \quad V_B = V_A/(h_A/h_B)^{\dot{Y}} = V_A/(15/45)^{0.14}$$

$$V_B = ?$$

$$h_A = 15 \text{ m} \quad V_B = 1.16 V_A$$

$$h_B = 45 \text{ m}$$

$$\dot{Y} = 0.14$$

De aquí se ve que el incremento de la velocidad en un gradiente de alturas de 30 m es del 16 % en un mismo sitio.

Esta información es muy útil en el momento de determinar la altura a la que deberá de ser colocado el aerogenerador; por supuesto esta decisión deberá tomar en cuenta el régimen anual del viento en el sitio de instalación con el fin de evitar daños al equipo por cambios bruscos en la velocidad del viento, especialmente cuando la instalación se realice en climas de colinas o montañas en los cuales las variaciones en velocidad y dirección del viento son frecuentes.

2.3.2 ESTRUCTURA DEL VIENTO.

En el análisis del viento y en su consecuente estimación de la energía obtenible de éste en un determinado sitio, el aspecto más importante debe ser el promedio de velocidad por hora, sin embargo para algunos propósitos la estructura del viento es de interés. El término estructura se refiere al comportamiento mismo del viento, incluyendo sus rápidos cambios de velocidad y dirección, tanto horizontales como verticales.

El flujo de un fluido, que incluye el flujo de aire, puede ser laminar o turbulento. En el flujo laminar, el aire puede ser considerado como fluyendo a lo largo de líneas de corriente sin movimientos de giro ni mezcla entre las distintas capas; en flujo turbulento, la mezcla entre las distintas capas tiene lugar debido a movimientos de giro o de remolinos en el flujo principal. En general, el viento natural en espacios abiertos, es turbulento aun cuando el aire fluya por encima de colinas las cuales posean una buena forma aerodinámica, algunas de las cuales permiten cálculos de aceleración del fluido como si este fuera un flujo laminar.

Se piensa que los torbellinos son en un menor o mayor grado disturbios circulares que viajan con el viento y de acuerdo a su dirección relativa al flujo principal, estos crean remolinos o calmas. Los ejes de estos remolinos están orientados en todas direcciones por lo que en vientos borrascosos, cambios rápidos tanto en velocidad como en dirección del viento pueden suceder en cualquier lugar.

La importancia de las ráfagas de viento, desde el punto de vista de potencial energético del viento, está principalmente en los esfuerzos que causan en las aspas de los aerogeneradores. No existe información suficiente para determinar el diámetro de los remolinos que producen vientos de ráfaga, pero existe cierta evidencia de que este diámetro debe ser menor al diámetro descrito por las aspas del aerogenerador, de esta forma se evitan grandes esfuerzos en las aspas cuando se presentan incrementos en la velocidad del viento.

Un diseñador de aerogeneradores debe tener en cuenta en el diseño de la máquina la posibilidad de estos cambios bruscos, tanto en velocidad como en dirección, del

viento con el fin de poder prevenir daños en el equipo por las súbitas concentraciones de esfuerzos que se presentan bajo estas condiciones. Estas situaciones empeoran durante las tormentas cuando el promedio de velocidad del viento aumenta y los cambios en ésta son muy grandes. Durante estos fenómenos la orientación de la máquina será un punto muy crítico ya que el equipo no puede reaccionar tan rápido a los cambios de dirección para ponerse de cara al viento, y si además el cambio de dirección es muy brusco existe la posibilidad de que la presión sobre las aspas se reverse y tienda a hacer que éstas giren en sentido contrario produciéndose así una muy alta concentración de esfuerzos en el equipo.

2.3.3 CARACTERÍSTICAS IDEALES PARA LA INSTALACIÓN DE UN AEROGENERADOR.

De la información analizada anteriormente, se puede decir que las características ideales de un terreno para la instalación de un aerogenerador son las siguientes:

- a) El sitio deberá de tener un elevado promedio anual de velocidad del viento.
- b) No deberán de existir obstáculos altos que impidan el flujo del viento por lo menos un Kilómetro corriente arriba.
- c) La cima de una colina sin muchas irregularidades localizada en una planicie, isla o lago es un buen sitio de colocación.
- d) Una planicie o una rivera abierta pueden ser buenos lugares.
- e) Una brecha en una montaña que produzca efecto de tunel de viento es un lugar ideal.

Existen además algunos signos ecológicos o naturales que pueden indicar señales de vientos persistentes en un determinado lugar que puede ser un buen sitio de instalación. Algunas de estas señales ecológicas son:

- a) Árboles cuyas ramas esten orientadas en la dirección de la corriente de aire.

b) Árboles cuyos troncos estén doblados permanentemente en la dirección del viento predominante.

c) Viento modelador que produce árboles anormalmente bajos.

d) Lugares en los cuales la vegetación nunca crece más alta que un arbusto.

Las montañas costeras proveen uno de los mejores lugares para la instalación de máquinas movidas por viento.

Por supuesto, todos los sitios aquí recomendados deberán de ser analizados por separado y en particular con las técnicas ya vistas, con el fin de poder determinar con cierto grado de certeza si el lugar es o no apropiado para la instalación de un equipo de generación de potencia utilizando al viento como fuente motora.

Un proceso sistemático para la selección de un sitio apropiado para la instalación de aerogeneradores es el siguiente:

a) Buscar preferentemente sitios en lugares costeros, cimas de colinas y pasajes entre montañas.

b) Buscar alguna o algunas de las señales ecológicas que denoten vientos persistentes.

c) Obtener información sobre la velocidad promedio anual, sus cambios de dirección y la variación de la velocidad del viento con la altura en el lugar preseleccionado. En base a esta información se podrá determinar si el sitio escogido es o no apropiado para este propósito.

d) De preferencia, el sitio escogido deberá ser lo más accesible posible, con el fin de facilitar el transporte e instalación del equipo y no deberán de existir obstáculos altos que desvien el flujo de aire directo al aerogenerador.

En México se cuentan con lugares de gran potencial eólico, como son el Istmo de Tehuantepec, la Sierra de la Rumorosa en Baja California y la Península de Yucatán,

en donde entre otros sitios, la instalación de aerogeneradores es viable tanto técnica como económicamente para la producción de energía eléctrica.

CAPITULO 3: "DISEÑO BASICO DE AEROGENERADORES"

El viento es una de las fuentes de energía más antiguas y más usadas. Aun cuando su empleo se remonta a muchos siglos, no ha sido un factor dominante en el consumo de energía para el desarrollo de los países en los últimos 50 años, debido a la abundancia de combustibles orgánicos. En años recientes, en que se está realizando un suministro limitado de éstos, ha surgido la necesidad de desarrollar la energía del viento con moderna tecnología en gran escala. En consecuencia, en los últimos años han habido grandes esfuerzos para aprovechar la potencia del viento. Un aerogenerador es un dispositivo que convierte la energía del viento, energía cinética, en energía eléctrica mediante una serie de mecanismos, los cuales se estudiarán a continuación.

3.1 CLASIFICACIÓN DE LAS MÁQUINAS DE VIENTO.

Los aerogeneradores pueden ser clasificados de acuerdo a su capacidad o a su configuración.

3.1.1 CLASIFICACIÓN DE ACUERDO A SU CAPACIDAD.

La clasificación de los aerogeneradores de acuerdo a su capacidad de generación tiende a ser arbitraria. Una clasificación conveniente es:

- a) Pequeños: Capacidad de generación de 0 a 9.9 KW
- b) Intermedios: Capacidad de generación de 10 a 99 KW
- c) Grandes: Capacidad de generación de 100 a 3,000 KW (0.1a3 MW)

Las unidades pequeñas son manufacturadas para proveer electricidad en granjas y hogares. Estos pequeños aerogeneradores no están siendo utilizados únicamente en

regiones apartadas, sino también para reducir la dependencia de combustibles fósiles o nucleares en áreas urbanas.

3.1.2 CLASIFICACIÓN DE ACUERDO A SU CONFIGURACIÓN.

Los aerogeneradores pueden ser clasificados también de acuerdo a la configuración de sus componentes. Hoy en día se utilizan y están en estudio en todo el mundo dos tipos de configuraciones de acuerdo a los elementos de arrastre, y estas son: de eje en el sentido del viento (Fig. 3.9) y de eje perpendicular al sentido del viento (Fig.3.8).

3.2 TEORÍA SOBRE LA POTENCIA DEL VIENTO.

El hecho más importante sobre el análisis de los vientos como fuente de producción de energía eléctrica es que la potencia del viento es proporcional al cubo de la velocidad del viento. Esto es un resultado derivado de la energía cinética del viento. La masa del aire "m" con velocidad "V" y con una densidad "f" fluyendo por unidad de tiempo a través de un área "A" barrida por las aspas de una turbina de viento con eje coaxial al viento es $m = fAV$. Así pues, la energía cinética de esta masa de aire viene dada por:

$$\text{Energía cinética} = mV^2/2 = fAV^3/2 \quad (1)$$

Según un estudio teórico realizado por Betz en 1919, la máxima fracción de energía cinética que puede ser extraída del viento es 0.593 de la energía cinética teóricamente disponible; por lo tanto la máxima energía que puede entregar un generador es:

$$\text{Máxima potencia de salida teórica} = 0.297 fAV^3 \quad (2)$$

En el proceso de conversión de energía existen una serie de pérdidas energéticas que varían de acuerdo al tipo de aerogenerador utilizado y que por lo general representan una tercera parte de la potencia teórica de salida. Por lo tanto, la potencia de salida disponible en un aerogenerador viene dada por:

$$\text{Potencia de salida disponible} = (2/3)0.297fAV^3 = 0.2pAV^3 \quad (3)$$

Si el diámetro de las aspas del rotor del sistema es D, la ecuación (3) se convierte en:

$$\text{Potencia de salida disponible} = 0.05fD^2V^3 \quad (4)$$

Así pues, la potencia disponible dada una determinada velocidad de viento es proporcional al cuadrado del diámetro del rotor.

En el estudio de las máquinas de viento, es necesario determinar ciertos parámetros adicionales como son el coeficiente de potencia del sistema Cop, cuyas fórmulas se muestran a continuación:

$$C_p = \text{Potencia de salida de la turbina}/pAV^3/2 \quad (5)$$

$$C_{op} = \text{Potencia de salida del generador}/pAV^3/2 \quad (6)$$

El coeficiente Cop incluye las pérdidas propias de la transmisión y del generador.

3.3 DISEÑO DE AEROGENERADORES.

Un diseño económico requiere un análisis de los distintos componentes de un aerogenerador, incluyendo el rotor, la transmisión, los controles, el generador y la torre con respecto a las características eólicas del lugar de instalación. A continuación se describirán las características de diseño de los elementos anteriores.

3.3.1 GENERADORES ELÉCTRICOS.

En las instalaciones pequeñas, los generadores eléctricos utilizados son esencialmente dínamos de corriente continua tipo Shunt y sobre todo, alternadores. Estos últimos, que pueden utilizarse para la producción de corriente alterna, pueden igualmente suministrar corriente continua después de la rectificación. La producción de corriente continua es interesante porque permite el almacenamiento de energía en baterías de acumuladores. El alternador con respecto al dínamo presenta la ventaja de propor-

cionar mayor rendimiento, suministrar a una velocidad menor y aportar también energía a una velocidad superior.

La relación entre la velocidad máxima tolerable y la velocidad de conjunción (velocidad de arranque en la que la máquina comienza a suministrar) es mayor para un alternador que para un dínamo. Resulta de esto que una instalación dotada de un alternador podrá utilizar una gama de vientos más amplia. En las grandes instalaciones, se utilizan o bien los alternadores o los generadores asíncronos.

La facilidad de acoplamiento del generador asíncrono a la red, su robustez, la ausencia de contacto giratorio, sin el peligro del bombeo eléctrico le otorgan ventajas apreciables. Se puede acoplar la máquina con una variación importante en relación a la velocidad del sincronismo. El dispositivo de control es simple, además de relays de protección clásicos y del relay taquimétrico para el acoplamiento de la máquina en caso de reducción de la intensidad del viento.

El inconveniente del generador asíncrono reside en el hecho de que absorbe potencia reactiva. Si la potencia gastada por el aerogenerador es importante, es necesario mejorar el factor de potencia de la instalación por el empleo de bancos de condensadores.

3.3.1.1 CARACTERÍSTICAS DE SALIDA DEL GENERADOR.

Se denomina así a los valores de salida (Voltaje e Intensidad) del generador trabajando a una cierta velocidad de rotación constante. La figura 3.1 muestra estas características de salida y de utilización de un generador para distintas velocidades de operación.

3.3.1.2 CARACTERÍSTICAS DE UTILIZACIÓN.

Esta característica es una función del voltaje con respecto a la intensidad ($V = f(I)$) proporcionada por el generador. Esta característica corta las características de salida del generador en un cierto número de puntos cuyas coordenadas permiten determinar mínimas intensidades, tensiones y potencias suministradas en función de la velocidad de operación del generador, como se ilustra en la figura 4.1.

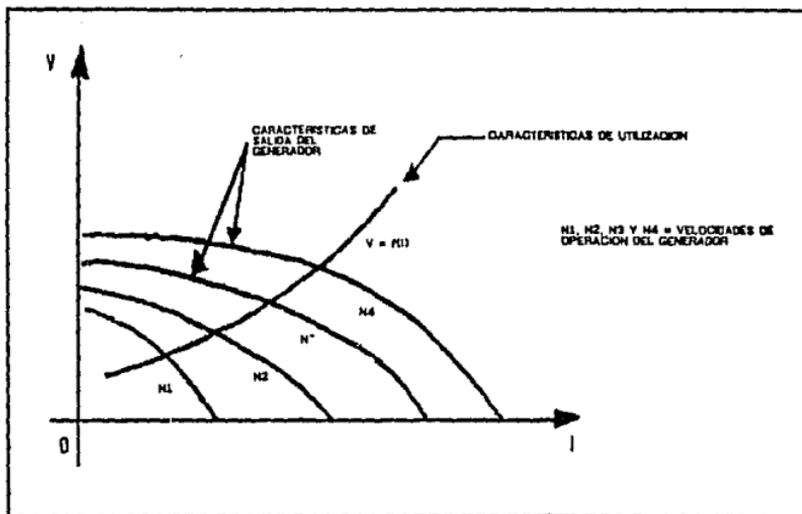


Fig. 3.1.- Características de salida y de utilización.

Se puede trazar después, la curva de variación $P(N)$ de la potencia suministrada por el generador en función de la velocidad de rotación N , como se ve en la fig. 3.2.

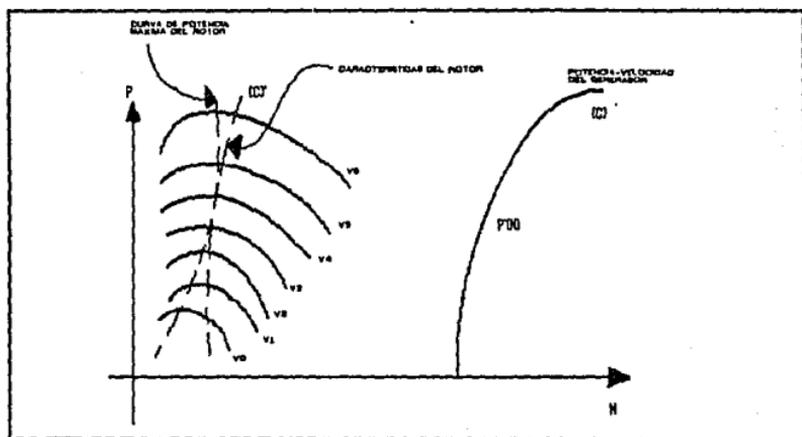


Fig. 3.2.- Curvas de variación potencia-velocidad de rotación.

La potencia mecánica $P'(N)$ aportada por el rotor para el arrastre del generador puede obtenerse a partir de la curva precedente añadiendo a sus ordenadas las pérdidas correspondientes del alternador (Pérdidas por Efecto Joule, pérdidas mecánicas y pérdidas magnéticas) y las pérdidas mecánicas en el sistema de transmisión.

3.3.1.3 ELECCIÓN DE LA RELACIÓN DE MULTIPLICACIÓN.

La determinación de las relaciones de multiplicación se hace de la siguiente forma: Se llevan sobre una misma gráfica (fig 3.3) las características potencia-velocidad del rotor y la característica $P'(N)$ precedente.

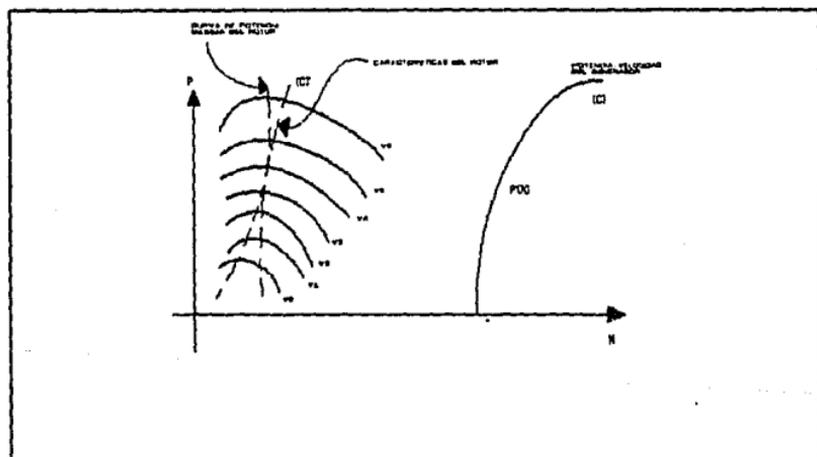


Fig. 3.3.- Relación de multiplicación.

Si se conectara directamente el rotor con el generador, el primero giraría en forma de molinillo y el generador no produciría nada de caudal eléctrico.

Para evitar esta situación, es necesario aumentar la velocidad de arrastre del generador.

Llamemos K a la relación de multiplicación:

$$K = \text{Velocidad de rotación del generador} / \text{Velocidad de rotación del rotor}$$

Para obtener los diferentes regimenes de funcionamiento del generador y del rotor basta con multiplicar por $1/K$ las abscisas de los diferentes puntos de la curva $P'(N)$ precedente, conservando las mismas ordenadas.

Se determina así una curva C' que representa la potencia mecánica aportada por el rotor al generador en función de la velocidad de rotación de éste. En la práctica, conviene escoger la relación K de manera que la curva C' esté lo más cerca posible de la curva de potencias máximas para que la instalación funcione en condiciones óptimas.

Las coordenadas de los puntos de intersección de la curva C' con las características potencia-velocidad del rotor permiten obtener la potencia P' aportada por el rotor y su velocidad de rotación para los diferentes regimenes del viento. Se puede trazar así una curva $P'(V)$ y, a partir de ésta, la curva $P(V)$, que da la potencia aportada por el generador en función de la velocidad del viento. (Fig. 3.4)

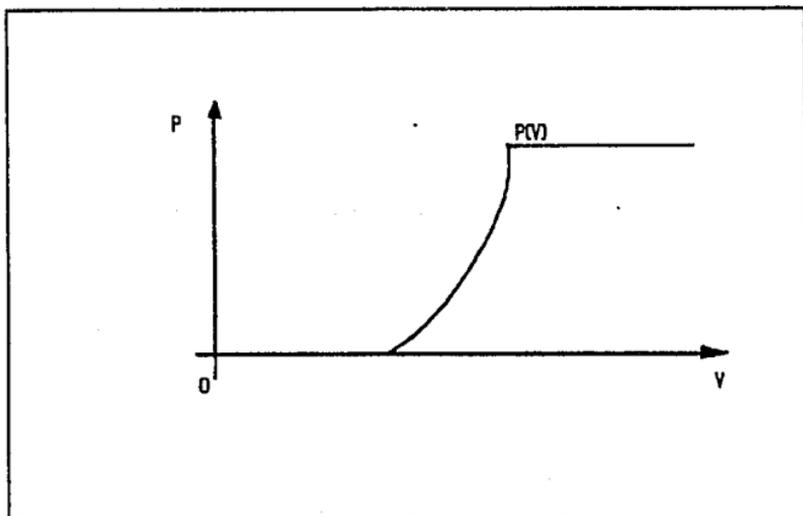


Fig. 3.4.- Potencia aportada por el generador en función de la velocidad del viento.

3.3.1.4 CÁLCULO DE LA PRODUCCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA.

El cálculo de la energía producida a partir de la curva $P(V)$ no presenta ninguna dificultad.

Se lleva a cabo dicho cálculo sobre una gráfica (Fig. 3.5).

-En el primer cuadrante se traza la curva de variación de la potencia aportada por el generador en función de la velocidad del viento, teniendo en cuenta la limitación de la velocidad impuesta por los órganos de regularización.

-En el cuarto cuadrante se traza la curva de velocidades del viento predominantes en el lugar escogido para la instalación.

-En el segundo cuadrante con ayuda de las curvas precedentes, se construye la curva clasificada de la potencia, la superficie rayada situada por debajo de esta curva, en el cuadrante número dos, es proporcional a la energía producida.

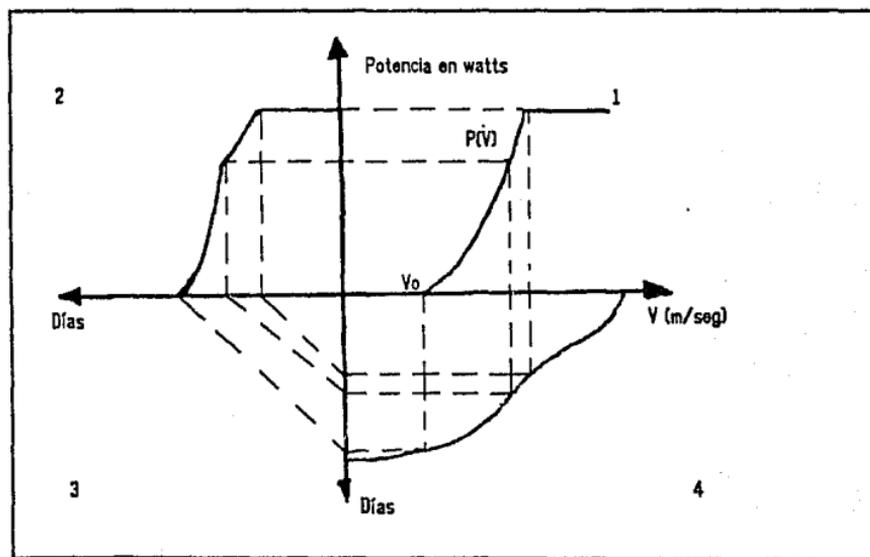


Fig. 3.5 Cálculo de la energía eléctrica producida.

3.3.2 ALMACENAMIENTO DE LA ENERGÍA.

La irregularidad como fuente de energía que presenta el viento, plantea el problema del almacenamiento de la energía. Algunas de las formas de almacenamiento más comúnmente usadas se exponen a continuación:

3.3.2.1 ALMACENAMIENTO TÉRMICO.

Se puede almacenar la energía bajo forma calorífica en depósito de agua o de gravilla, empleándose el calor acumulado en la calefacción de viviendas.

3.3.2.2 BOMBEO DE AGUA.

Este sistema, que se emplea en algunas centrales hidroeléctricas, no se ha utilizado nunca para la energía eólica. Consiste en utilizar la energía desarrollada para impeler el agua hasta un depósito colocado en lo alto, con el fin de convertir la energía cinética en energía potencial; tiene una eficiencia del 60 al 80%.

3.3.2.3 VOLANTE DE INERCIA.

La idea de utilizar un volante de inercia para almacenar energía no es reciente. Suiza poseía en 1950 autobuses Oerlikon propulsados por la energía almacenada en volantes (girobús).

Recientemente una universidad americana ha propuesto la construcción de volantes de material compuesto de resina, poliéster y metal. Las posibilidades del sistema son, a pesar de todo, muy limitadas. Más allá de una cierta velocidad, existe el peligro de la rotura del volante. Con un volante girando a 15,000 rev/min sobre paliers magnéticos se podría teóricamente almacenar 400 Wh por Kg durante 24 horas.

En la actualidad según la revista "Ecologie" se ha realizado con éxito la operación de almacenar 0.07 KWh/Kg de rotor, es decir, cerca del 20 % de la capacidad máxima.

3.3.2.4 DEPÓSITO DE AIRE COMPRIMIDO.

Se comprime el aire en un depósito artificial o natural. El volumen de éste crece, evidentemente, con la potencia de la instalación. El aire puede ser utilizado de dos maneras: por expansión directa a través de un motor de aire comprimido o bien como carburante en una turbina de gas.

3.3.2.5 HIDRÓGENO Y PILA COMBUSTIBLE.

La electricidad aportada por el aerogenerador electroliza el agua. El hidrógeno producido se dirige después a una pila de combustible que puede producir energía según las necesidades. Esta solución parece ser la del futuro y la mejor adaptada a los grandes almacenamientos.

El rendimiento, energía eléctrica producida por la pila de combustible y la energía aportada por el aerogenerador, sería del orden del 60 al 70 %. También se puede utilizar el hidrógeno como combustible.

3.3.2.6 BATERÍAS

En el medio de almacenamiento actual más empleado. Las baterías más interesantes son las que utilizan el par Pb-PbO₂. En cantidad de electricidad, el rendimiento oscila entre el 0.75 y 0.90. Se utilizan baterías de placas espesas para las instalaciones más importantes. En las instalaciones pequeñas, puede ser interesante emplear baterías de camiones. Las baterías Cd-Ni; no son aconsejables ya que su rendimiento es nulo para cargas pequeñas.

a) Determinación de la capacidad de la batería del acumulador.

Cuando la intensidad del viento es grande, el acumulador se carga. La energía almacenada es restituida después durante las horas en las que el suministro del aerogenerador es nulo e insuficiente.

En la práctica se determina la capacidad de la batería del acumulador como sigue:

Sea P_m la potencia media absorbida por la por la instalación en Watts, n el número máximo de días consecutivos de viento no aprovechable, C la capacidad de la batería en amperes-hora y E la tensión en volts de la batería.

Si se quiere evitar toda interrupción en el abastecimiento de corriente eléctrica, es necesario que:

$$0.8CE > 24nP_m$$

admitiendo que la batería no se descargue completamente; lo que supone que:

$$C > 24nP_m/0.8E \quad \text{sea} \quad C > 30nP_m/E$$

Ejemplo: Sea $E = 30V$, $P_m = 20W$ y $n = 10$

$$C > 30 (10 \times 20)/30 = 200 \text{ Ahr}$$

La capacidad de la batería C , por otra parte, debe ser tal que la corriente máxima $I(M)$ susceptible de ser abastecida por el generador no sobre pase $C/10$ para que el acumulador no se estropee durante la carga.

$$I(M) < C/10$$

3.3.3 ELEMENTOS DE ARRASTRE.

3.3.3.1 AERODINÁMICA DE LA HÉLICE: CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS.

La hélice, ya sea que se trate de un aerogenerador, de un rotor moderno o de un avión, se compone de un cierto número de palas.

Definiciones.

- Eje de la hélice: Es el eje de rotación de la hélice.
- Diámetro de la hélice: Es el diámetro del círculo barrido por las palas.

- Eje de una pala: En las hélices modernas, es el eje longitudinal alrededor del cual se puede hacer variar la inclinación de la pala respecto al plano de rotación de la hélice.

- Perfil de una pala: Es la intersección de la pala con un cilindro cuyo eje es el de la hélice.

- Angulo de asiento de un perfil: Es el ángulo que forma la cuerda del perfil con el plano de rotación de la hélice.

- Paso de una hélice: El paso de una sección o de un perfil situado a la distancia r del eje es igual a la distancia H que avanzaría para una rotación de una vuelta de hélice de paso corriente, enroscándose exactamente en el aire, suponiéndose como sección de esta hélice la distancia r de la sección considerada.

El paso H de una sección está relacionada con el ángulo de asiento por la expresión:

$$H = 2\pi r \tan \alpha$$

El ángulo de asiento de una hélice de paso constante cumple la condición:

$$\tan \alpha = k/r$$

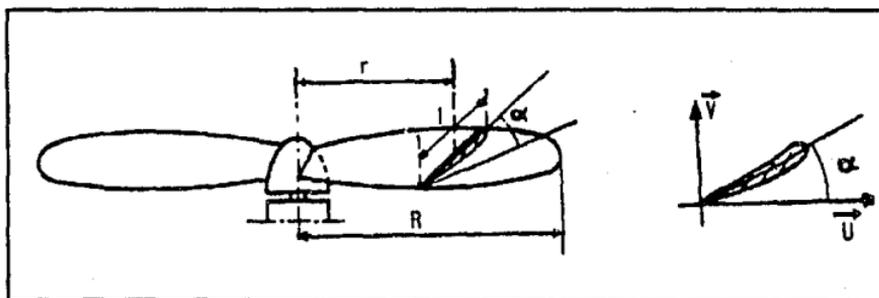


Fig. 3.6.- Aerodinámica de la hélice.

3.3.3.2 ESTUDIO DE LAS ACCIONES AERODINÁMICAS SOBRE UNA PALA.

Sea la sección de una pala situada a la distancia r del eje de rotación cuyo ángulo de asiento es α .

Bajo el punto de vista aerodinámico, todo sucede como si el aire llegase al perfil siguiendo la dirección W , siendo W la resultante de la velocidad V del viento y de un vector de velocidad opuesto a la velocidad $U = 2\pi rN$, debida a la rotación de la hélice alrededor de su eje.

El ángulo de incidencia es $i = I$ - donde I es el ángulo que forma W con el plano de rotación de la hélice.

Se considerará ahora el elemento de la pala de anchura dr , situado a la distancia r del eje de hélice y cuyo perfil es el de la figura 3.7.

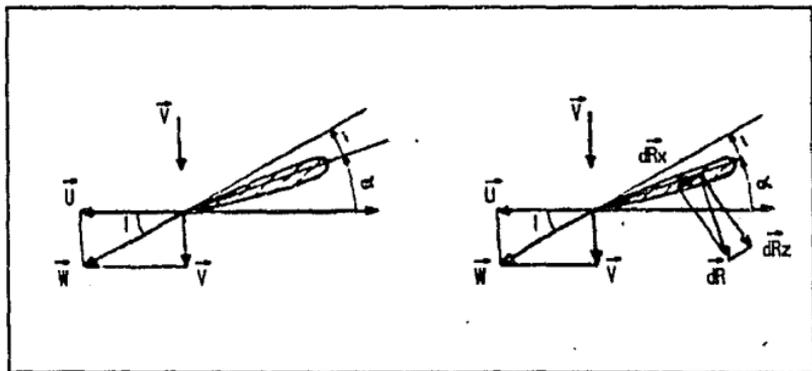


Fig. 3.7.- Sección de una pala.

Se llamarán dR_x y dR_z a las componentes de la fuerza aerodinámica dR que se ejerce sobre este elemento según la dirección W y según la dirección perpendicular. Estas componentes son precisamente la resistencia y la sustentación del perfil considerado, con un viento de intensidad W .

Calculando la influencia de la fuerza dR en el empuje axial ejercido por el viento sobre el aerogenerador. Para ello se proyectará dR sobre V , velocidad del viento dirigida en principio sobre el eje de la hélice. Llamando dF a la proyección de dR según esta dirección se obtiene la fórmula.

$$dF = dRz \cos I + dRx \sin I$$

Calculando el momento dM de la fuerza dR respecto al eje. Este momento es igual al producto del brazo de palanca r por la proyección de la fuerza dR sobre el plano de rotación de la hélice.

$$dM = r(dRz \sin I - dRx \cos I)$$

Reemplazando en las fórmulas anteriores dRx y dRz por sus valores y llamando dS a la superficie de referencia del elemento de pala:

$$dRx = C_x \rho W dS \quad \text{y} \quad dRz = C_z \rho W dS$$

Se obtiene:

$$dF = \rho W dS (C_z \cos I + C_x \sin I)$$

y

$$dM = \rho W r dS (C_z \cos I - C_x \sin I)$$

Calculando la potencia elemental producida por la figura aerodinámica dF que actúa sobre el elemento de pala de superficie dS situado a la distancia r .

Se obtiene la expresión:

$$dP = \omega dM = \rho W \omega r dS (C_z \sin I - C_x \cos I)$$

y teniendo en cuenta las relaciones:

$$W = V + \omega r \quad \text{y} \quad \omega r = V \cot I$$

Las expresiones anteriores pueden escribirse así:

$$dF = \rho V dS (1 + \cot I)(C_z \cos I + C_x \sin I)$$

$$dM = \rho V r dS (1 + \cot I)(C_z \sin I - C_x \cos I)$$

$$dP = \rho V^3 dS \cot I (1 + \cot I)(C_z \sin I - C_x \cos I)$$

Los valores de C_x y C_z que intervienen en estas expresiones corresponden a la incidencia $i = I$. Estos valores son determinados sobre la polar relativa al perfil utilizado.

Se observa también que, en las expresiones anteriores, V es la velocidad axial del viento al atravesar la hélice.

El empuje axial total F ejercido por el viento sobre el aerogenerador y el par motor producido se obtiene sumando por una parte todas las fuerzas de F y por otra todos los momentos elementales que actúan sobre las palas.

El conocimiento del empuje axial y del par motor producido permite calcular la potencia suministrada por el viento a la hélice.

$$P = S dF V = F V$$

y la potencia recogida por la flecha $P_u = M \omega$

La determinación de rendimiento de la hélice, es por tanto:

$$\eta = P_u / P = M \omega / F V$$

3.3.3.3 AEROGENERADORES DE EJE PERPENDICULAR AL VIENTO.

Existen tres tipos básicos de aerogeneradores de eje perpendicular al viento. En general la ventaja aceptada de esto es la eliminación de la necesidad de impulsar al eje del rotor dentro del viento. De los tres que se tratarán, el rotor Savonius es el de más pobre funcionamiento, el cual está formado por dos capas semicilíndricas equilibradas

que giran alrededor de un eje vertical. Es una turbina de baja velocidad con una cantidad de movimiento elevado característico para el arranque, acompañado de su baja eficiencia total aerodinámica. Quizá su futuro más importante sea su empleo en forma conjunta con el rotor Darrieus para suministrarle la cantidad de movimiento de arranque necesario.

El rotor Darrieus tiene una forma semejante a un batidor de huevos (Fig. 3.8a). Los álabes tienen un perfil aerodinámico simétrico a alta capacidad y se construyen con una ligera curva llamada "Troposkien". Se ha seleccionado esta forma de los álabes, para minimizar los esfuerzos de flexión en los mismos. Por lo general en cada turbina existen dos o tres álabes o palas.

La tercera turbina perpendicular al viento que aquí trataremos será el ciclogiro (Fig. 3.8b), que es similar al rotor Darrieus, pero con dos importantes diferencias. Primero, los perfiles aerodinámicos, son rectos y en segundo lugar, la orientación (paso) de las palas cambia continuamente durante la rotación para aprovechar al máximo la fuerza del viento. Los coeficientes de potencia más altos predichos para estas turbinas son más grandes que los de cualquier otra turbina. Se ha observado que la curva de funcionamiento del ciclogiro excede ligeramente el máximo teórico de las turbinas coaxiales al viento, debido a que el ciclogiro desacelera una mayor parte del viento que la que desacelera una turbina coaxial de disco rotor de la misma área proyectada.

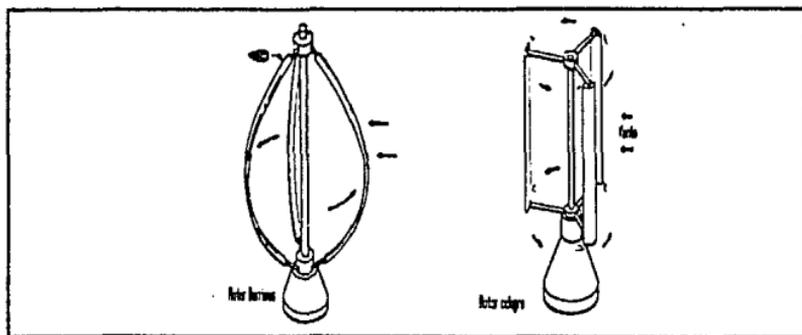


Fig. 3.8 a. Rotor Darrieus y 3.8 b. Rotor ciclogiro.

La máxima ventaja del rotor Darrieus, insensibilidad a la dirección del viento, no es una propiedad inherente al ciclo giro. Para lograr un máximo rendimiento al mecanismo de la leva que controla el paso de los álabes, debe estar orientado dentro del viento en forma continua.

Debido a que las instalaciones eólicas más potentes que se han construido son del tipo eje horizontal o coaxial al viento, a partir de este punto, este trabajo se enfocará únicamente en el estudio de este tipo de aerogeneradores.

3.3.3.4 AEROGENERADORES DE EJE COAXIAL AL VIENTO.

a) Rotores lentos.

A partir de 1870, el rotor lento de palas múltiples hace su aparición en América y después en Europa. Las palas cuyo número varía de 12 a 24 cubren toda la superficie de la rueda o casi su totalidad.

La figura 3.9 muestra un rotor de este tipo. Adviértase en la figura el timón que mantiene la rueda frente al viento y está situada detrás del rotor.

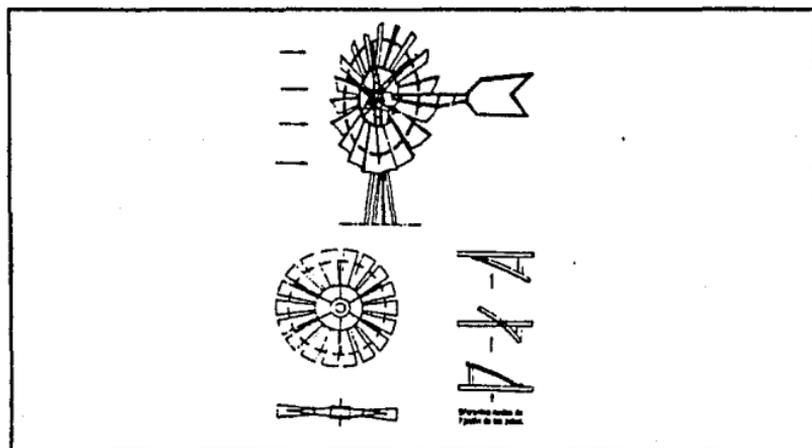


Fig. 3.9.- Rotor lento con palas múltiples.

Características.

El diámetro de los mayores rotores de este tipo es aproximadamente de 5 a 8 metros. El par de arranque es relativamente elevado. Las curvas de variación (Figuras 3.10a y 3.10b) representan los resultados de las experiencias realizadas en el laboratorio Eiffel. Para el modelo considerado, el rendimiento energético es máximo con valores próximos a $h_o = 1$.

Estas condiciones corresponden a una velocidad de rotación óptima cuyo valor en revoluciones por minuto es igual a:

$N = 60V/D = 19V/D$ y un valor de C_p igual a 0.3, es decir, a una captación efectiva de energía igual al 50 % del límite de Betz.

Adoptando para la densidad del aire el valor $\rho = 1.27 \text{ Kg/m}^3$, resulta, que la potencia máxima capaz de obtenerse en este tipo de máquinas se puede calcular en función del diámetro con la siguiente fórmula:

$$P = 0.15D^2V^3$$

donde la potencia está expresada en Watts y el diámetro y la velocidad en metros y metros/segundo respectivamente.

Aplicando las expresiones anteriores a máquinas de diferentes diámetros se obtienen para vientos de 5 a 7 m/s, los valores de velocidad y potencia indicados en la tabla 3.1.

Para velocidades específicas h_o , diferentes de la unidad, es preciso multiplicar la velocidad de rotación indicada en el cuadro por el valor h_o correspondiente a la máquina considerada.

Las potencias desarrolladas por los rotores lentos son relativamente pequeñas por dos motivos:

DIAMETRO DEL ROTOR EN METROS	VELOCIDAD DE ROTACION EN RPM/MIN		POTENCIA EN KW	
	V = 5 M/SEG	V = 7 M/SEG	V = 5 M/SEG	V = 7 M/SEG
1	95	133	0.018	0.05
2	47.5	66.5	0.073	0.40
3	31.9	44.5	0.165	0.45
4	23.8	33.2	0.295	0.81
5	19	26.6	0.46	1.26
6	16	22.2	0.67	1.8
7	13.6	19	0.92	2.5
8	11.9	16.6	1.20	3.3
9	10.5	14.8	1.52	4.2
10	9.5	13.3	1.87	5.15

Tabla 3.1.- Características de aerogeneradores lentos.

- El primero es que estas máquinas utilizan principalmente vientos de velocidades comprendidas entre 3 y 7 m/s.

-Por otra parte, el peso de las ruedas es tal que casi no se construyen en diámetros mayores de 7 a 8 metros.

Este tipo de máquina presta sin embargo servicios importantes en las regiones en las que la intensidad del viento es del orden de 4 a 5 m/s, sobre todo en el bombeo de agua.

b) Rotores rápidos.

El número de palas es mucho menor, variando entre dos y cuatro. El interés de los rotores rápidos reside en que a igual potencia son mucho más ligeros que los rotores lentos. Sin embargo presentan el inconveniente de arrancar con dificultad.

Salvo contar con dispositivos especiales, es necesario un viento mínimo de 5 m/s para que comiencen a funcionar.

En la Fig. (3.11) se presentan dos rotores rápidos de dos y tres palas dotados de sistemas de orientación diferentes.

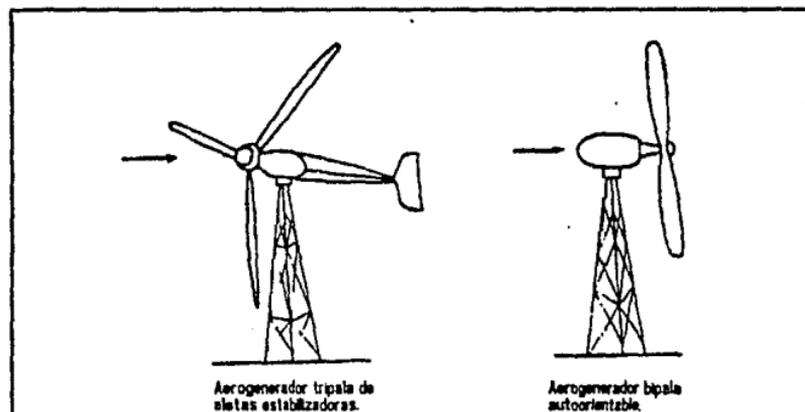


Fig. 3.11.- Eólicas con rotores rápidos.

Características.

Las velocidades de rotación son mucho más elevadas que para las máquinas anteriores y tanto más elevadas a medida que es menor el número de palas.

Las figuras 3.12a y 3.12b representan las curvas de variación de los coeficientes del momento y de la potencia en función de la velocidad específica h_0 .

El rotor alcanza su rendimiento máximo para:

$$h_0 = DN/60V = 6$$

que corresponde a una velocidad de rotación $N = 115V/D$ y a un valor de C_p igual a 0.4.

Según las pruebas realizadas, la potencia máxima del rotor estudiado y de tipos similares puede calcularse aplicando la relación:

$$P = 0.20D^2V^3$$

donde P está expresado en Watts, D y V en metros y metros/seg respectivamente.

Esta expresión es la que se utiliza en la práctica para determinar aproximación, de las potencias máximas que pueden suministrar los rotores rápidos ya sean dos, tres o cuatro palas.

Aplicando las expresiones anteriores a las máquinas de diámetros comprendidos entre 2 y 30 m, se obtienen los resultados mostrados en la tabla 3.2 para vientos de 7 y 10 m/s.

Hay que señalar que una velocidad de 12.6 m/seg elevaría la potencia suministrada al doble del valor calculado para $V = 10$ m/s.

Ventajas.

Debido a su gran velocidad de rotación, los rotores rápidos llevan pocas palas: dos, tres

DIAMETRO DEL ROTOR EN METROS	VELOCIDAD DE ROTACION EN RPM/MIN		POTENCIA EN KW	
	V = 7 M/SEG	V = 10 M/SEG	V = 7 M/SEG	V = 10 M/SEG
1	935	1340	0.07	0.2
2	470	670	0.27	0.8
3	310	450	0.60	1.8
4	235	335	1.07	3.2
5	190	270	1.7	5
6	155	220	2.4	7.2
8	120	168	4.4	12.8
10	95	134	6.7	20
15	62	90	15	45
20	47	67	26.8	80
30	31	45	60	180
40	23	33	107	320
50	19	27	168	500

Tabla 3.2.- Características de aerogeneradores rápidos.

o cuatro como máximo. Por esto un rotor rápido resulta mucho más ligero y barato que un lento de igual diámetro.

Además, los efectos de las ráfagas de viento actúan originando variaciones relativas de esfuerzos menos importantes, ya que se han calculado para soportar esfuerzos centrífugos mucho más elevados que los rotores lentos.

Inconvenientes.

Estas ventajas se ven disminuidas para un inconveniente: el par de arranque es pequeño. Un rotor rápido tiene que arrancar sin tener que realizar casi esfuerzo.

Se puede disminuir este inconveniente dando una anchura suficiente y el mejor ángulo de asiento posible a las palas en las proximidades del eje, o también utilizando palas de paso variable dotadas de un regulador del tipo Aerowatt. El ángulo de asiento es máximo al comienzo y disminuye a medida que aumenta la velocidad de la máquina.

C) Perfiles utilizados.

Los perfiles utilizados varían según las características de máquinas.

En los molinos de viento, las aspas estas formadas por una estructura de madera cubierta de tela. Las cualidades aerodinámicas de un sistema motor así construido son bastante dudosas (Fig. 3.13).

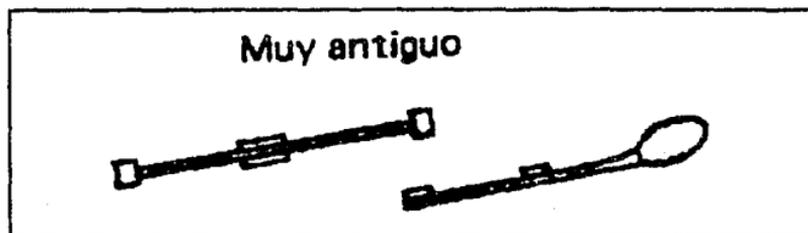


Fig. 3.13 Aspa de rotor lento de deficiente diseño.

Este aspecto no se ha descuidado en la realización de aerogeneradores modernos. Los rotores lentos utilizan perfiles delgados ligeramente cóncavos. Debido a su escasa rigidez, estos perfiles se fijan sobre una membrana metálica circular que constituye el esqueleto de la rueda móvil (Fig. 3.14).

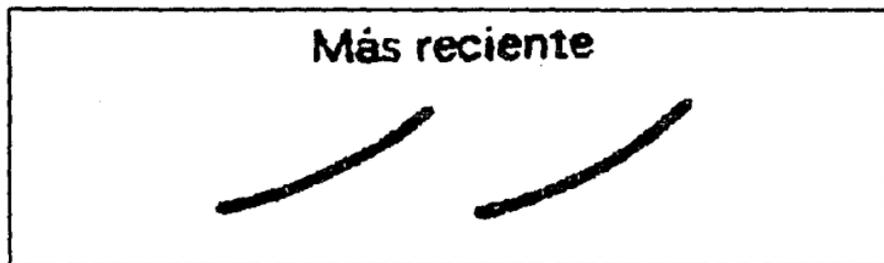


Fig. 3.14 *Aspas delgadas ligeramente cóncavas.*

Los perfiles que normalmente se destinan a la construcción de las palas de los rotores rápidos, son plano, convexo y biconvexos, pero no simétricos (Fig. 3.15).

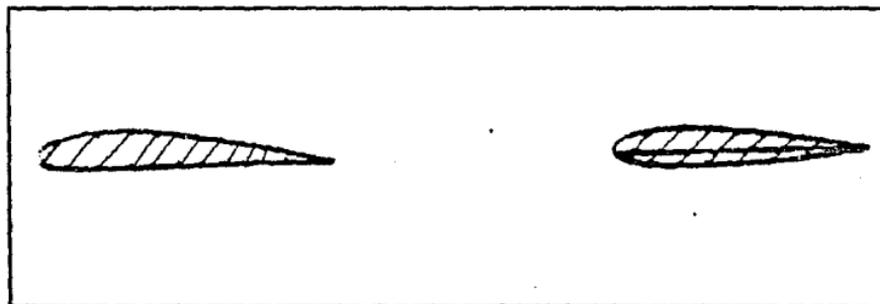


Fig. 3.15 *Perfiles más utilizados actualmente.*

Estos perfiles, a causa de su forma, presentan resistencia reducida y por lo tanto son adecuados aerodinámicamente para la función que desempeñan.

d) Variación de la superficie relativa de las palas en función de la velocidad específica.

La relación de la superficie total de las palas respecto a la superficie barrida disminuye cuando la velocidad específica, que representa la variación de la potencia del rotor:

$$h_o = V_o/V$$

aumenta, como se observa en la fig. 3.16, extraída de un estudio de Hutter presentado al Congreso de Nuevo Delhi en Octubre de 1954.

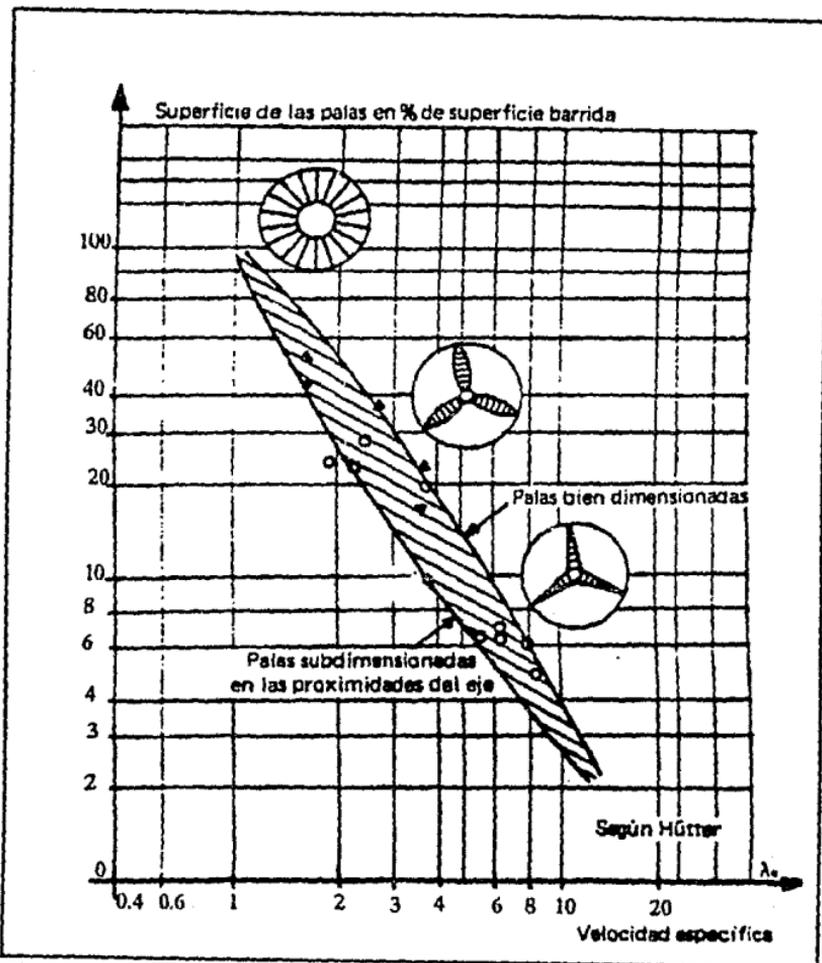


Fig. 3.16 . Relación de la superficie barrida de las palas y la velocidad específica.

La figura 3.17 muestra las curvas de funcionamiento para turbinas de viento, comparando el coeficiente de potencia C_p contra la velocidad específica λ .

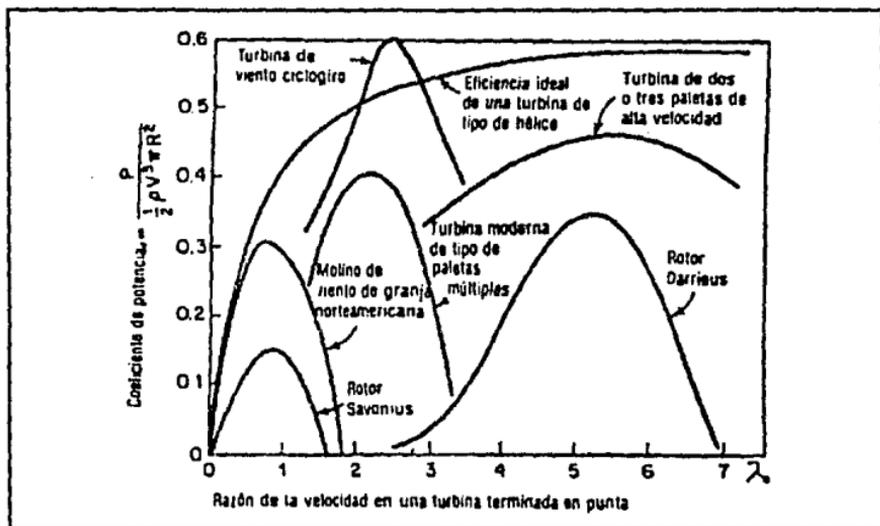


Fig. 3.17 Curvas de funcionamiento para turbinas de viento.

e) Número de palas y cálculo del diámetro

Gran parte de los elementos de la construcción dependen de la finalidad del aerogenerador y de los vientos en el lugar.

Por ello, si lo que se desea es construir un aerogenerador, se escogerá preferentemente un rotor rápido de velocidad específica λ elevada de valor comprendido entre 5 y 8 por ejemplo, para reducir al máximo la relación de multiplicación de la velocidad de rotación para el arrastre del generador, el rotor deberá ser, en este caso, bipala o tripala.

En la práctica, el número de palas es función de la velocidad específica.

Para	Se adoptarán
ho = 1	8 a 24 palas
ho = 2	6 a 12 palas
ho = 3	3 a 6 palas
ho = 4	2 a 4 palas
ho = 5 o mayor	2 a 3 palas

A continuación determinaremos el diámetro de la máquina, mediante alguna de las fórmulas vistas anteriormente para el cálculo de la potencia del aerogenerador.

$$D = (P/0.15 V^3)^{1/2} \text{ para el caso de un rotor lento o molino de viento.}$$

$$D = (P/0.2 V^3)^{1/2} \text{ para un rotor rápido.}$$

f) Materiales utilizados en la construcción de las palas.

Las palas de un rotor están sometidas muy frecuentemente a condiciones muy duras. deben soportar la erosión de las polvaderas, de la lluvia y de las precipitaciones sólidas, de los ataques químicos y sobre todo de los esfuerzos muy grandes debidos a las ráfagas de viento.

Por otra parte, los materiales deben presentar una relación resistencia-peso elevada para reducir al máximo los esfuerzos debidos a la inercia.

En la práctica, se emplea la madera, las aleaciones de aluminio, los plásticos armados, el acero en los aerogeneradores y la chapa galvanizada en los molinos de viento para bombeo.

Madera.

Se elige una madera homogénea poco susceptible a deformarse en el sentido de la fibra lo más derecha posible. El nogal, la haya, el olmo, el roble, y algunas especies de caoba son las maderas adecuadas. Las palas se cortan de tablones bien secos, a continuación se equilibran estática y dinámicamente y, para evitar el deterioro, se cubren con un barniz de poliéster. De esta manera la estructura propia de la madera queda preservada de las variaciones higrométricas del exterior.

Aleaciones de aluminio.

Los materiales de duraluminio deben desaconsejarse a causa de su alta sensibilidad a la corrosión. En cambio, en los aerogeneradores se utilizan mucho las aleaciones de magnesio y silicio.

Plástico armado.

Se emplea cada vez más en la construcción de las palas. Permite construir hélice barrenadas de buenos rendimientos sin demasiadas dificultades. Se adopta muy bien a la construcción en serie y es además muy resistente. Entre los productos utilizados se citan las resinas de poliéster y epóxidos armados de fibras de vidrio y los compuestos de elastómero-carbono. Las palas pueden ser compactas, huecas y llevar un núcleo de poliestireno expandido.

Acero

Se emplea principalmente en la construcción de las palas de los altos aerogeneradores.

3.3.4 ELEMENTOS DE CONTROL

Los modernos aerogeneradores requieren sistemas de control muy versátiles para desempeñar las siguientes funciones:

(1) Orientación del rotor en la dirección del viento.

- (2) Sistema de encendido y conexión del equipo.
- (3) Variación del ángulo de paso de las aspas o palas del rotor (en ciertos casos).
- (4) Monitoreo de los valores de salida del generador.
- (5) Sistema de desconexión del equipo por mal funcionamiento de éste o vientos muy fuertes.
- (6) Sistemas de generación auxiliar.
- (7) Sistemas de mantenimiento.

Muchas combinaciones son posibles en términos de sistemas de control e involucran los siguientes componentes:

- (1) Sensores.- mecánicos, eléctricos o neumáticos.
- (2) Elementos de decisión.- relays, módulos lógicos, circuitos analógicos, microprocesadores, etc.
- (3) Actuadores.- hidráulicos, eléctricos y neumáticos.

Un sistema de control recomendado de bajo costo es aquel que involucra la combinación de transductores electrónicos los cuales alimentan a un microprocesador que a su vez provee señales eléctricas a actuadores encargados de las acciones directas de control.

3.3.4.1 DISPOSITIVOS DE ORIENTACIÓN.

Los dispositivos de orientación más utilizados son:

- a) La aleta estabilizadora.
- b) El rotor auxiliar.

- c) El rotor situado detrás del soporte.
- d) Los dispositivos de los servomotores.
- e) Los dispositivos manuales.
- a) Aleta estabilizadora.

Esta solución (Fig. 3.18) se emplea principalmente para la orientación de los rotores lentos hasta diámetros de 6m.

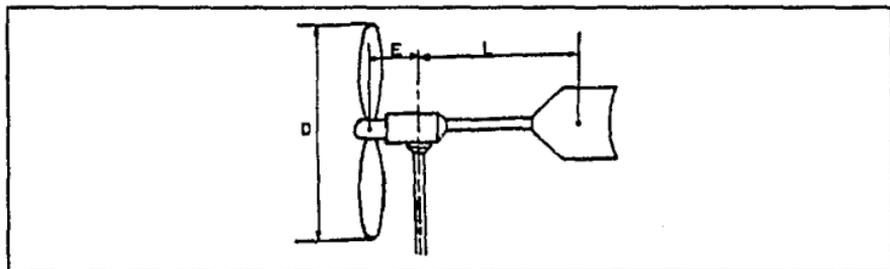


Fig. 3.18 Aleta estabilizadora.

Para que el funcionamiento sea satisfactorio deben cumplirse ciertas condiciones:

Si se trata para la distancia L (eje de orientación-centro de la aleta) un valor igual a $4E$, siendo E la distancia eje de orientación-plano de rotación de la hélice, la superficie de la aleta debe tener, en función de S área barrida por la hélice, los valores siguientes:

-Para un rotor multipala $s = 0.10 S$

-Para un rotor bipala o tripala $s = 0.04 S$

Si L no es igual a $4E$, las superficies de las aletas estabilizadoras que garantizan la estabilidad se calcularán por las fórmulas siguientes:

$$s = 0.40 SE/L \text{ Para un rotor multipala}$$

$s = 0.16 SE/L$ Para un rotor rápido

En la práctica, se toma para L un valor próximo a $0.6 D$.

b) Rotores auxiliares.

El principio del sistema de orientación es el que sigue: Se disponen en el costado del eje rotor principal uno o dos pequeños rotores (Fig. 3.19) cuyo eje o ejes de rotación son perpendiculares al de rotor principal.

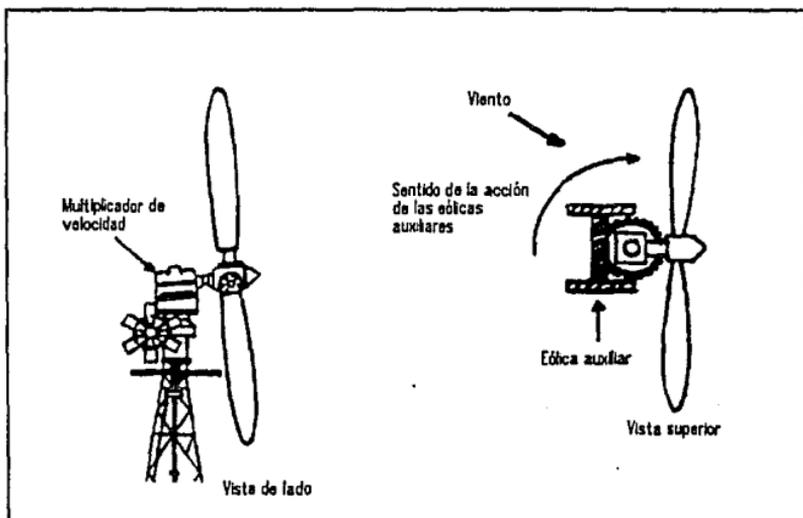


Fig. 3.19 Rotores auxiliares.

Si el rotor principal no está orientado en la dirección del viento, el rotor auxiliar se pone en marcha arrastrando un tornillo sin fin que se engrana sobre una corona dentada concéntrica con el eje del soporte y que está sujetado a éste.

El rotor auxiliar se detiene cuando recibe el viento perpendicularmente a su eje. En ese momento el eje del rotor principal está exactamente dirigido en la dirección del viento. Por supuesto, la inclinación de las palas del rotor auxiliar debe ser tal que la rotación alrededor del eje del soporte se realice en el sentido adecuado.

Hay que señalar que la orientación por medio de un rotor auxiliar se emplea con el rotor principal en la parte anterior o posterior del soporte. Respecto al sistema de orientación con aleta estabilizadora, tiene la ventaja de ser más suave y sin movimientos bruscos.

c) Rotor autoorientable

El rotor principal se coloca detrás del soporte y se orienta automáticamente en la dirección del viento como una veleta. El profesor Cambilargiu, de las universidades de Buenos Aires y Montevideo ha estudiado instalaciones de ésta clase.

Sus experiencias han demostrado que con un soporte de diámetro $d = 0.22 D$, siendo D el diámetro del rotor, se observa vibraciones si el plano de la hélice está a una distancia x inferior a $0.25-0.30 D$ del eje del soporte. Para una hélice de dos palas, ésta distancia se reduce a $0.13 D$, estimando el profesor Cambilargiu que con una hélice de tres palas se disminuirán más las vibraciones.

d) Orientación por servomotor

La fig. 3.20 representa el esquema del funcionamiento de un dispositivo que utiliza un servomotor.

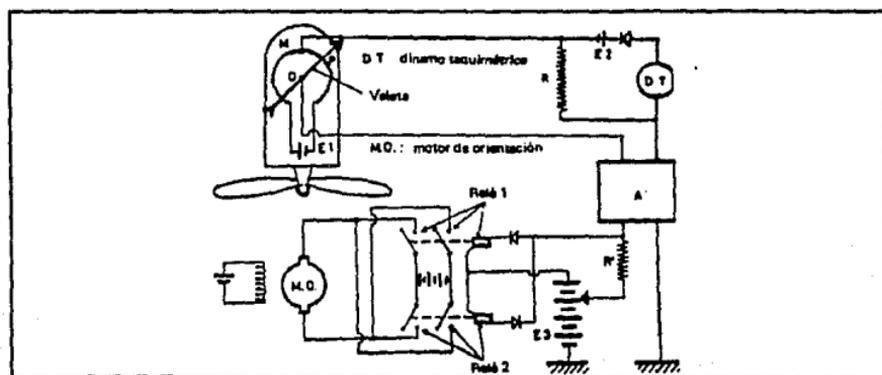


Fig. 3.20 Orientación por servomotor.

El motor de orientación, que puede girar en los dos sentidos, está dirigido por una veleta y por un dínamo taquimétrico accionado por el rotor.

La veleta sujeta al cuerpo de la máquina en la parte anterior de la hélice, lleva un brazo conductor que se desplaza sobre un reóstato horizontal unido al cuerpo de la máquina. La diferencia de potencial entre el punto medio M de este reóstato y el brazo conductor se aplica a través de una resistencia R, a un amplificador.

El dínamo taquimétrico DT que produce una tensión proporcional a la velocidad de rotación, alimenta un circuito que contiene además de la resistencia R, un rectificador y una batería E2 colocada en serie.

Mientras que la velocidad de la hélice es inferior a la velocidad nominal, la tensión en los bornes del dínamo taquimétrico es menor que la tensión en los bornes de la batería E2. El dínamo no produce corriente, la tensión aplicada a la entrada del amplificador es, por lo tanto, la que existe entre el punto M y el punto P. El motor de orientación se pone en marcha y se retiene cuando el rotor está exactamente en la dirección del viento.

Si la velocidad del rotor es excesivamente alta, el dínamo genera una corriente que provoca una caída de potencial en R, entrando en ese instante en acción el motor de orientación. El eje de la máquina se separa de la dirección del viento hasta que la suma de las diferencias de potencial en los bornes de R y de MP se anula. Se produce una limitación de la velocidad de rotación del rotor, como consecuencia de la disminución de la superficie expuesta al viento.

Para evitar que el motor de orientación esté continuamente en funcionamiento, la veleta no está unida rigidamente al brazo conductor, sino que puede variar su dirección algunos grados en uno u otro sentidos sin cambiar la del motor de orientación, mediante un sistema de topes, actuando la veleta sobre el brazo conductor solamente cuando la separación entre la dirección del arco de la máquina y la del viento supera los 10 aproximadamente.

3.3.4.2 DISPOSITIVOS DE REGULACIÓN.

Es muy importante para muchas aplicaciones, que la velocidad del rotor permanezca casi constante a pesar de la variación del viento. Con esta finalidad se emplean los reguladores de velocidad. Estos dispositivos sirven también de limitadores de la potencia y de los esfuerzos sobre las palas en caso de fuerte viento.

Las soluciones adoptadas se pueden clasificar en dos grupos: Regulación por palas fijas y regulación por palas orientables.

a) Regulación por palas fijas.

Se han construido varios modelos entre los que se tratarán:

- Dispositivos de aleta estabilizadora articulada.
- Dispositivos de aleta estabilizadora fija y de eje de inclinación variable.
- Dispositivos de aleta estabilizadora rígida y freno aerodinámico

a.1) Dispositivos de aleta estabilizadora articulada.

Con el fin de evitar el embalamiento de la máquina, se provoca, a medida que va aumentando la velocidad del viento, una reducción de la superficie expuesta al viento por la hélice variando la inclinación del eje respecto a la corriente del aire. La superficie expuesta al viento vale $S \cos \alpha$, siendo S la superficie barrida y α el ángulo que forman la normal al plano de la hélice con la dirección del viento.

Cuando la velocidad alcanza un cierto límite, el conjunto de la hélice se repliega. Esta reducción de superficie y el plegado se pueden obtener por medio de los dispositivos cuyos esquemas se muestran en la fig. 3.21.

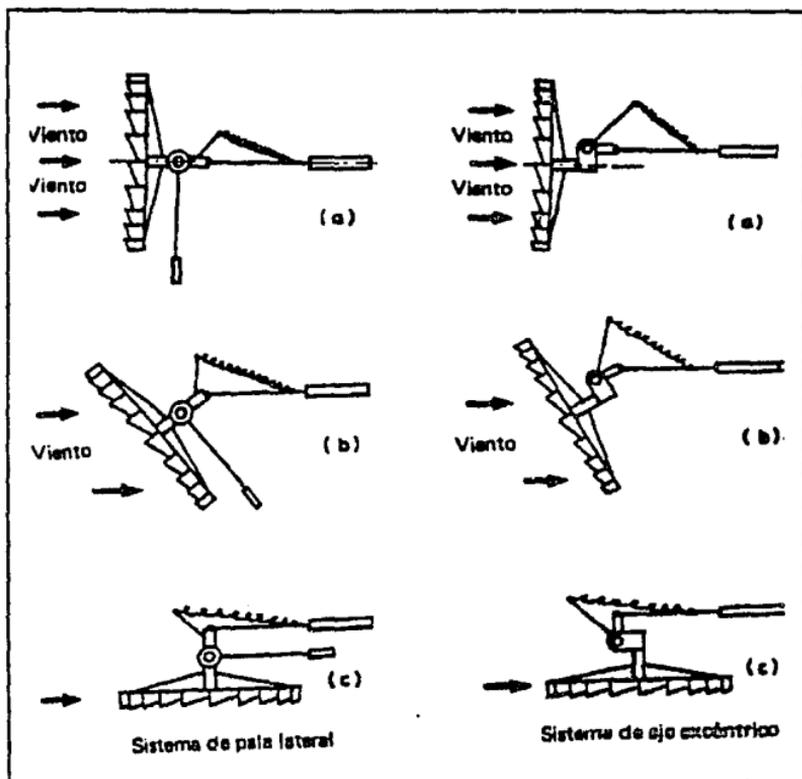


Fig. 3.21 Aleta estabilizadora articulada.

a.2) Dispositivo de aleta estabilizadora fija y eje de rotación inclinable.

Este dispositivo (fig. 3.22), el eje de rotación del rotor y el generador eléctrico se fijan sobre una pieza metálica articulada alrededor de un eje horizontal perpendicular al plano de simetría de la instalación.

En régimen normal, el eje de rotación del rotor y el generador se mantienen horizontales. Pero cuando la intensidad del viento aumenta el eje del rotor se inclina hasta que el momento de empuje axial, que no es nulo respecto al eje de basculación, equilibra la acción del resorte y la del peso del sistema hélice-generador.

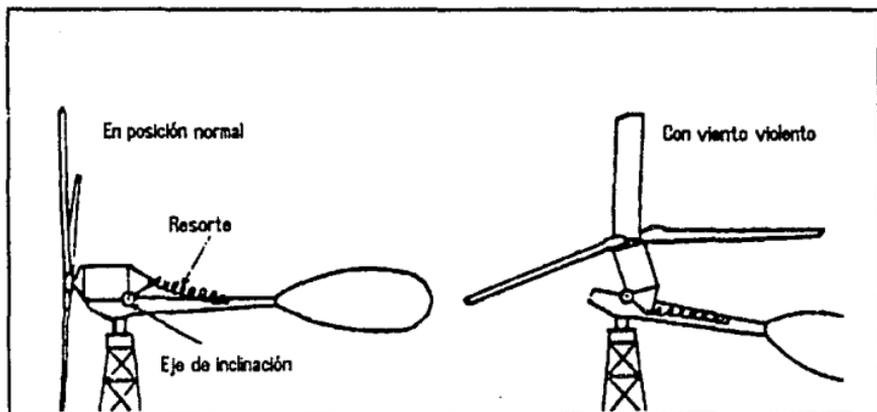


Fig. 3.22 Aleta estabilizadora fija y eje de rotación inclinable.

A consecuencia de la reducción de la superficie expuesta al viento que se acentúa con el aumento de la intensidad de éste, el rotor tiene una velocidad de rotación limitada.

a.3) Dispositivo de aleta estabilizadora fija y freno aerodinámico.

El sistema "Windcharger", es un sistema que funciona bajo la acción de la fuerza centrífuga. Va instalado sobre el eje de la hélice.

Está formado por dos placas alabeadas articuladas mediante brazos diametralmente opuestos, situados en un plano normal a la hélice, en este caso bipala. La parte delantera de las placas es más pesada y más larga que la trasera y está unida a un resorte.

Si la velocidad es inferior a 8.50 m/s, no actúa el regulador y las paletas se mantienen en posición concéntrica por los resortes.

Cuando la velocidad del viento es superior a 8.50 m/s, los alerones del regulador se abren automáticamente bajo la acción de la fuerza centrífuga. La presión del aire que llega, refuerza el efecto de esta última. El conjunto actúa como un freno aerodinámico y mantiene constante la velocidad. Al disminuir la velocidad de rotación, decrece

también la presión del viento sobre las palas de frenado. Este sistema se muestra en la figura 3.23.

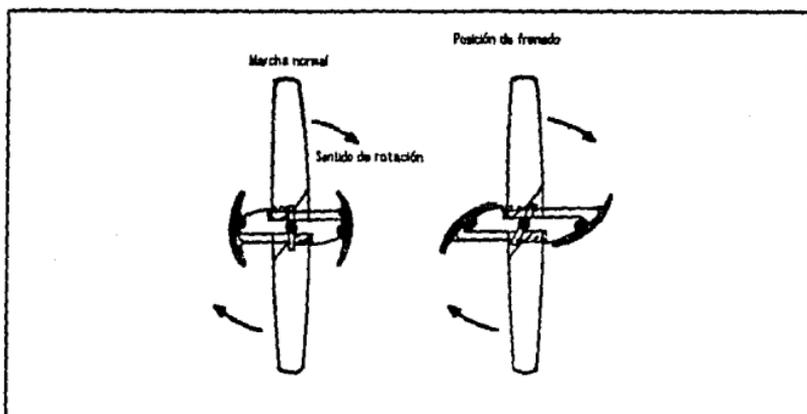


Fig. 3.23 Freno aerodinámico.

b) Regulación mediante palas orientables.

Las hélices de paso variable se utilizan en aviación para la propulsión de los aviones y en Hidráulica, en las centrales de salto pequeño.

También se utilizan en la construcción de los aerogeneradores. Esta solución permite la adaptación del rotor a diferentes condiciones de viento hasta el repliegue en caso de viento muy fuerte. En este último caso, los esfuerzos que se ejercen sobre las palas se reducen a sus valores mínimos.

Los dispositivos que se emplean en la práctica son muy variados. Pueden estar constituidos por resortes, por "flettners" o por reguladores de servomotores.

Las modificaciones de paso tienen lugar por el efecto de la presión aerodinámica o por fuerzas centrífugas.

Los reguladores centrífugos son muy empleados. Entre las firmas que lo utilizan, podemos citar Quirk's, Enag, Aerowatt, Elektro, Gendrier y Jacobs. La figura 3.24

muestra el funcionamiento de un sistema de variación de paso en base a la presión aerodinámica.

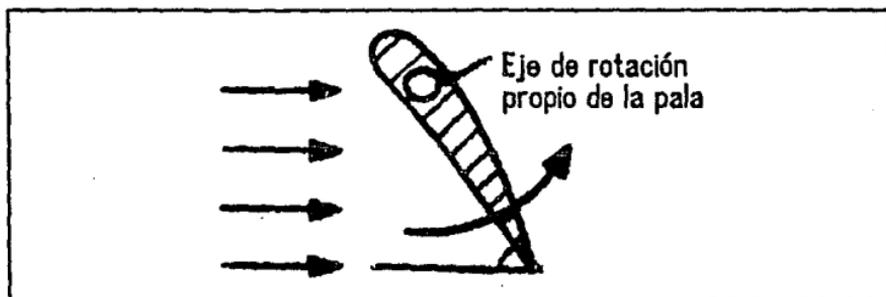


Fig. 3.24 Pala orientable.

3.3.5 TRANSMISIÓN DE POTENCIA.

El rango de rotación de los grandes aerogeneradores es controlado a través de la variación del paso de las aspas, pero éste es muy bajo, alrededor de 40 a 50 revoluciones por minuto (rpm). Debido a que para que el generador trabaje optimamente requiere de un rango de rotación mucho más grande, alrededor de las 1,800 rpm; es necesario incrementar este rango mediante el uso de cajas de transmisión.

Dentro de los sistemas de transmisión existen diferentes opciones como sistemas mecánicos que involucran relaciones con engranes, bandas y cadenas, por separado o en combinación, además existen sistemas hidráulicos con el correspondiente uso de bombas y motores para flúidos. Se recomienda el uso de sistemas múltiples de relaciones utilizando engranes para equipos montados en la cima de la torre de instalación, debido a su alta eficiencia.

3.3.5.1 CONFIGURACIONES BÁSICAS.

Existen dos configuraciones básicas en la transmisión de potencia en los aerogeneradores, basada en la localización de elementos básicos que constituyen a máquina.

a) Colocación en la cima de la torre.

En este tipo de configuración los tres elementos básicos, además del rotor, que forman a un aerogenerador, (generador, controles y cajas de transmisión), se encuentran localizados como lo muestra la figura 3.25a, en la parte superior de la torre de instalación. La transmisión de la potencia se realiza en forma horizontal, sin cambios de dirección.

Este sistema es muy eficiente debido a que se minimizan las pérdidas en el sistema de transmisión al evitar juntas universales. El problema que presentan, es la dificultad de dar mantenimiento al sistema debido a su localización.

b) Colocación en la base de la torre.

Esta configuración se ilustra en la figura 3.25b. En este sistema los 3 elementos básicos se encuentran en la base de la torre de instalación del aerogenerador y la potencia del rotor es transmitida al generador mediante un eje horizontal, el cual transmite la potencia a un eje vertical mediante un sistema de piñón-corona que se encuentra localizado junto al rotor.

Este sistema, presenta la gran ventaja de un fácil acceso al generador, controles y caja de transmisión para darles mantenimiento, siendo un poco menos eficiente que la

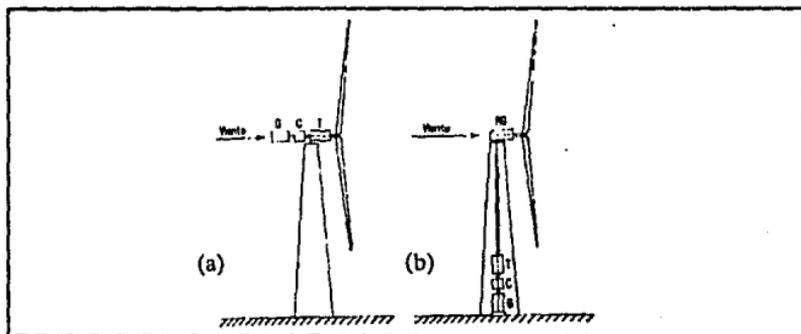


Fig. 3.25 a y b. Configuraciones básicas para transmisión de potencia.

anterior debido a pérdidas en la transmisión ocasionadas por el sistema flecha-piñón-corona-flecha.

3.3.6 TORRES DE SOPORTE.

Existen 4 tipos de torres para el soporte de aerogeneradores que serán mencionados. Estas son:

- a) Torre de concreto.
- b) Torre autogirable.
- c) Torre de tubo.
- d) Torre para ensamble en campo.

De estas torres, las que han tenido mayor aceptación son las torres de ensamble en campo ya que son ampliamente adaptables a un gran número de condiciones de viento, a que su costo es bajo, sus partes son fácilmente transportadas así como se pueden encontrar en muchos lugares y son muy rígidas. Las torres de tubo son también muy atractivas en cuanto a sus características y compiten exitosamente con las de ensamble de campo.

La elección de la torre y su diseño se basarán primordialmente en el tipo y tamaño de aerogenerador que soportarán. Así pues, los grandes aerogeneradores utilizan por lo general torres de concreto reforzado para soportar el gran peso del equipo y los múltiples esfuerzos ocasionados por el funcionamiento de equipo y los continuos y muy variables vientos del lugar de instalación. La torre deberá de estar diseñada en forma tal, que interfiera lo mínimo con el flujo de aire que llega al rotor así como con el que se aleja de éste.

Es necesario que cualquier torre utilizada para el soporte de máquinas de viento, estén perfectamente protegidas contra el intemperismo para así poder garantizar un soporte firme y seguro al aerogenerador. De igual forma, el mantenimiento de la torre deberá

de ser sencillo y fácil de realizar con el fin de evitar al mínimo costos asociados con éste.

El anclaje o cimentación de la torre dependerá del tipo de torre y del aerogenerador a ser montado, así como del sistema de orientación al viento con el que cuente la máquina. Por lo general se utilizan 2 sistemas de anclaje básicos, por bloques de concreto y por cuerdas o cables de tensión.

Los aerogeneradores de eje vertical utilizan torres de soporte que por lo general están apoyadas sobre bases de acero y sobre baleros, para permitir así el giro y orientación de éstos.

Los sistemas de conversión de energía eólica tienen sin lugar a duda ciertas características intrínsecas, como que no requieren de combustibles y su facilidad de operación sin atención por parte del personal, que los hace superiores a los sistemas convencionales de generación energética. Sin embargo, si los sistemas de conversión de energía eólica desean ganar amplia aceptación, éstos deben mostrar su competitividad económica con respecto a otras fuentes de generación energética convencionales. El propósito de este capítulo es el de comparar los costos totales para la producción de energía eléctrica de máquinas que utilizan combustibles fósiles (gasolina y diesel) contra las máquinas que utilizan al viento como fuente motora, para la generación de electricidad.

4.1 COSTOS DE LA ENERGÍA ALREDEDOR DEL MUNDO

Los sistemas eólicos compiten principalmente con sistemas convencionales que utilizan combustibles fósiles en especial gasolina y diesel. De esta forma los precios de los combustibles son la principal variable en este análisis de costos. Los precios de los combustibles varían de país a país y de región a región y dependen si el país es o no productor, de las facilidades de refinación del sistema de distribución con el que cuenta la nación y de las políticas de subsidio al precio de combustible en cada gobierno en particular. Como resultado de esto, así por ejemplo en México el precio por galón de diesel en zonas metropolitanas es de 73 centavos de dólar mientras que en Camerún fluctúa alrededor de los 3 ó 4 dólares. Aún dentro de un mismo país existen grandes diferencias en el costo del combustible, así por ejemplo, en Nigeria el precio oficial por galón de diesel es de 90 centavos de dólar, pero debido a la falta de capacidad de refinación como de una red apropiada de distribución, el precio en regiones rurales alcanza el precio de 3.50 dólares por galón.

4.2 COSTO DE LA ENERGÍA GENERADA POR EL VIENTO.

Para estimar con cierta precisión el costo de la energía producida por el viento, se deben de conocer o asumir tres conceptos, estos son el costo del equipo, unidad de energía producida, porcentaje del costo anual de depreciamiento y mantenimiento del equipo y la cantidad anual de energía producida por unidad de energía eólica disponible en ese lugar expresada en Kilowatt-hora por Kilowatt y se conoce comunmente como "Salida Específica".

Se hará referencia a estos tres conceptos utilizando las siguientes literales:

C= Costo inicial del equipo por unidad de energía producida.

P= Porcentaje de los gastos anuales de mantenimiento en base al costo inicial del equipo.

T= Salida específica.

El cálculo del costo de la energía es simple: El costo anual de la máquina viene dado por:

$$\text{costo anual por unidad de energía} = PC/100$$

Para este costo, la energía anual producida es T unidades de energía. Por lo tanto el costo por unidad de energía es:

$$\text{costo por unidad de energía} = PC/100T$$

Las posibilidades del poder del viento, como un método de producción de energía en comparación con otros métodos, son muy juzgadas a través de la comparación del costo de producción y de la energía, calculadas a través de esta metodología.

Los valores "C" y "P" dependerán del fabricante del equipo así como de la persona u organización responsable del financiamiento de la instalación. El costo inicial "C" es responsabilidad directa del productor de la máquina así como la vida útil de la misma,

como por ejemplo, el número de años en los cuales el costo del equipo puede ser depreciado. Influye para tomar esta decisión la calidad de la planta y particularmente su resistencia al intemperismo bajo las condiciones climatológicas del lugar de instalación. El porcentaje "P" está regido por las tasas de interés y por los métodos de amortización utilizados.

El tercer valor "T" puede ser determinado únicamente de la información obtenida del viento en el lugar de instalación y debe ser proporcionado por el usuario potencial del sistema de generación o por alguna organización que trabaje a su lado.

4.2.1 OBTENCIÓN DEL VALOR "T"

Para entender como el valor "T" es obtenido, supóngase que la información del promedio de la velocidad del viento por hora para el sitio de instalación se tiene disponible por el todo el período de un año de observación. Esta información ha sido primeramente clasificada y trazada en una gráfica denominada "Curva de velocidad sostenida", como se muestra en la figura 4.1. Esta proporciona el número de horas, en el año, en los cuales la velocidad del viento fue igual o mayor que cualquier valor dado.

Debido a que la potencia del viento es proporcional al cubo de su velocidad, si se elevan al cubo las ordenadas de la "curva de velocidad sostenida" se puede obtener la curva de "potencia sostenida" como se muestra en la fig. 4.1.

El siguiente procedimiento es introducir las principales características de operación del aerogenerador particularmente el rango de velocidades de viento en el cual opera, como por ejemplo, la velocidad de viento en la cual el equipo esta generando su máxima potencia nominal. Cabe aclarar en este punto que no todos los aerogeneradores pueden operar económicamente en todo el rango de velocidades de viento que pueden presentarse en el lugar de colocación.

Es verdad que existe una gran cantidad de energía disponible en vientos de alta velocidad, pero su corta duración durante un año hacen de un aerogenerador diseñado para funcionar en estos vientos una máquina inproductiva para la mayoría del año. Al punto en el cual la velocidad del viento es tan alta que puede llegar a dañar el equipo

se le conoce como "Punto de Plegado" y en este la máquina por diversos mecanismos como frenos, se desconecta y deja de generar electricidad. Además, debido a las pérdidas propias del equipo, se necesita de una velocidad mínima del viento para que la máquina comience a generar electricidad, a este punto se le conoce como "Punto de Corte". Es de esta forma como el rango de operación es escogido por el diseñador y en el cual se considera que la máquina genera un flujo efectivo de electricidad. Este rango de operaciones se ejemplifica en la figura 4.2.

En la fig. 4.2 el área sombreada "bcfgh" por debajo de la curva de potencia sostenida, representa la energía anual entregada por la máquina con las características de operación ya mencionados, mientras que el rectángulo "adeo" representa la energía anual que entregaría la planta si pudiera funcionar a su máxima capacidad durante todo el año.

La "salida específica", T, viene dada de multiplicar por 8,760 (el total de número de horas en el año) por la relación entre las dos áreas anteriormente mencionadas.

$$T = (\text{Area sombreada (bcfgh)} / \text{Area rectangular (adeo)}) \times 8,760$$

El factor T es de hecho, el número de horas equivalentes en el año en las cuales, si la máquina funcionara a su máxima capacidad, produciría la misma energía que produce en un régimen variable de viento a lo largo del año.

El costo de la energía producida por el viento determinado hasta ahora, es un factor importante cuando se considera la economía de la energía eólica, pero este criterio no puede tomarse como único. El hecho de que la energía proveniente del viento es aleatoria y por lo tanto no siempre se tiene disponible, introduce otras consideraciones como el grado en que la energía aleatoria puede ser aceptada por el usuario y su valor. Así, si el usuario necesita disponer siempre de energía eléctrica se tendrán que prever fuentes de almacenamiento o generación alterna cuando se presentan "calmas" o ausencias de vientos. Los dispositivos para el almacenamiento de energía son siempre costosas por lo que es más conveniente utilizar pequeñas plantas de generación. Cuando dichas plantas son utilizadas, el aerogenerador funciona como economizador

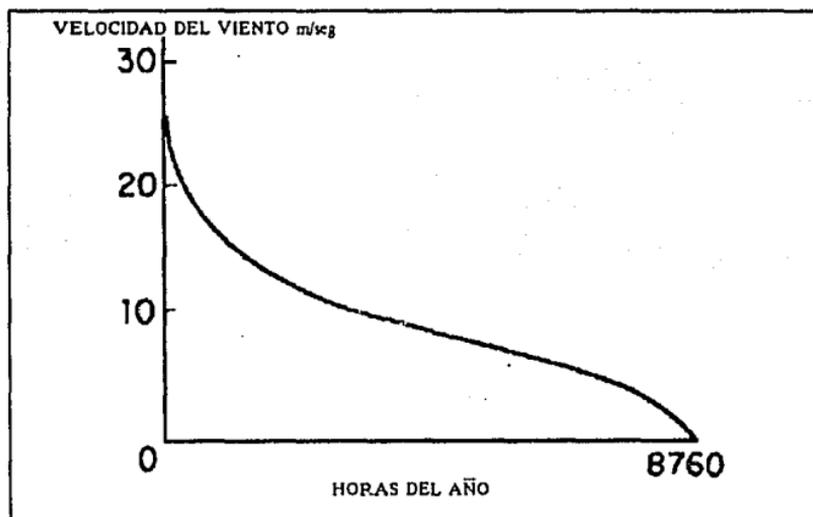


Fig. 4.1. Curva de velocidad sostenida.

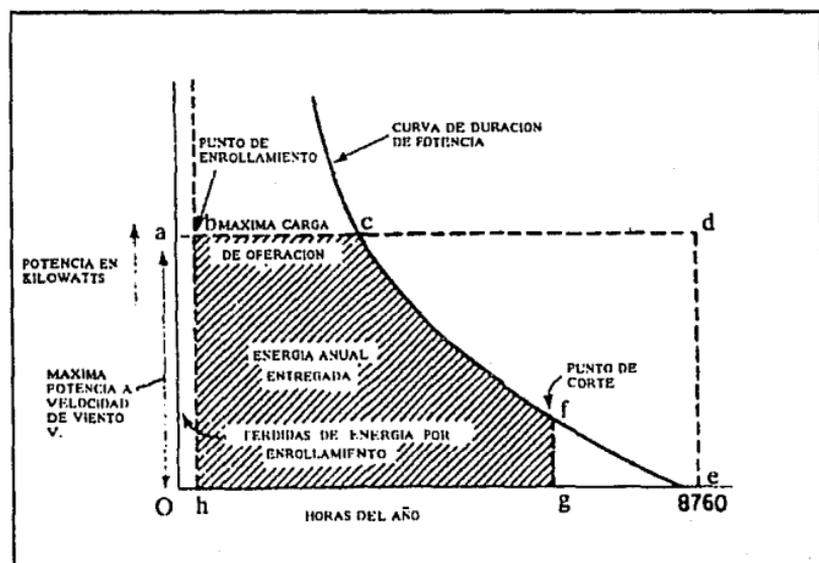


Fig. 4.2.- Curva de duración de potencia para un sitio de generación eólica adecuado.

de combustible ya que cada unidad de energía producida por el aerogenerador ahorrará una cantidad equivalente de combustible que de otra forma sería consumida por el motor de la planta generadora.

Cabe notar que la necesidad de almacenamiento de energía o plantas de generación eléctrica alternas se presenta únicamente cuando la necesidad del fluido eléctrico es siempre indispensable, si es posible, éstas deben de evitarse al máximo ya que elevan el costo de la energía eólica a niveles no muy competitivos en la actualidad.

4.3 CONSIDERACIONES ECONOMICAS.

4.3.1 COSTO DEL EQUIPO.

El costo del equipo puede variar desde 1500 dolares para una máquina de 1 KW hasta 125,000 dolares para una de 95 KW. La gran parte de este costo (42 %) lo representan el rotor, la torre y el equipo de transmisión. El costo de la instalación representa aproximadamente el 20 % del costo total. Estos altos precios se deben principalmente al bajo volumen de producción de estos equipos. Estos bajos lotes de fabricación forzan al productor a usar partes que no estan específicamente diseñadas para este propósito, lo que hace que la máquina pierda eficiencia y funcionalidad. Cabe aclarar que los aerogeneradores aqui mencionados son lo que se encontraban comercialmente en el mercado de Estados Unidos hasta 1984, por lo que los precios y capacidades señaladas pueden haber variado, ya que los avances tecnológicos han ayudado a disminuir el costo de estos equipos significativamente.

La tabla 4.1 muestra las características convencionales pequeños sistemas de generación de energía eléctrica, entre estas características se incluye el costo del equipo, para de esta forma poder realizar una comparación entre el precio de estos equipos y es de los aerogeneradores mostrado en la tabla 4.2.

4.3.2 COSTOS ANUALES DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO.

En base a la información recabada, los costos de operación y mantenimiento para aerogenerador y generadores que utilizan combustible, son los siguientes:

POTENCIA DE SALIDA (kW)	COSTO (DLLS)	CONSUMO DE COMBUSTIBLE		TIPO DE COMBUSTIBLE	OPERACION/MANTENIMIENTO	
		CARGA TOTAL GAL/HR	CARGA PARCIAL GAL/HR		HR. MANTTO./ HR OPERACION	COSTO REFACCIONES/ HR OPERACION
0.3	352	0.13	0.09	GAS	0.02	0.20
0.4	407	0.13	0.09	GAS	0.02	0.20
0.8	515	0.26	0.18	GAS	0.02	0.20
1.2	580	0.31	0.20	GAS	0.02	0.20
4.0	4400	0.43	0.25	DIESEL	0.03	0.30
6.0	4950	0.64	0.43	DIESEL	0.03	0.30
8.5	7405	0.80	0.55	DIESEL	0.03	0.30
10	8347	0.93	0.60	DIESEL	0.03	0.30
12	8377	1.20	0.70	DIESEL	0.035	0.40
15	8503	1.50	0.90	DIESEL	0.035	0.45
20	9554	1.65	1.15	DIESEL	0.040	0.50

FUENTE: REPRESENTANTES TECNICOS DE HONDA Y ONAN & KOHLER (1990)

Tabla 4.1.- Características de sistemas convencionales de generación.

POTENCIA DE SALIDA(kW)	COSTO (DLLS)	COSTO DE OPERACION Y MANTENIMIENTO ANUAL (DLLS)
0.1	950	19
0.5	1200	24
1	1500	30
2	2800	56
5	5100	102
10	9200	184
15	16800	336
25	30700	614
40	50000	1000

Tabla 4.2.- Costo estimado de aerogeneradores en 1990.

Aerogeneradores: Este costo se considerará como igual al 2% del costo del equipo, esto debido al bajo mantenimiento requerido por estos dispositivos.

Generadores convencionales (Gasolina/Diesel): El costo se calculará de acuerdo a la siguiente fórmula:

$$[(\text{Costo de mano de obra en } \$/\text{hr}) \times (\text{Horas de mantenimiento/Horas de operación}) + (\text{Costo de refacciones/Horas de operación})] \times (\text{Horas de operación anuales})$$

Se ha estimado que el costo de la mano de obra es de 10 dolares por hora. Los valores de mano de obra requerida y de costo de las partes están basadas de acuerdo a la potencia del generador y están indicados en la tabla (4.1).

4.3.3 VIDA ÚTIL DEL EQUIPO.

Se considerarán los siguientes valores de vida útil de los equipos de generación:

Aerogeneradores: Se asumira un período de 20 años de vida útil del equipo.

Generadores convencionales (Gasolina/Diesel) Se tomará un período de vida útil de 5 años, bajo condiciones normales de operación.

4.3.4 COSTO ANUAL DEL COMBUSTIBLE.

Para los generadores convencionales de diesel y gasolina, el costo anual del combustible será calculado en base al costo por galón por combustible, consumo de combustible por hora y horas de operación anual. El consumo de combustible por hora viene dado por la siguiente fórmula:

$$[(F_{100} - F_{50})/0.5] \times [(L/R)-0.5] + F_{50}$$

Donde:

F_{50} = Consumo de combustible con un potencial del 50% (gal/hr).

F_{100} = Consumo de combustible con un potencial total (gal/hr).

L = Potencia de operación (KW).

R = Potencia nominal (KW).

Se asume que el costo de combustible por galón será de 1.50 dolares. De esta forma el costo de combustible anual será:

$$C_c \times Q \times H$$

Donde:

C_c = Costo del combustible (\$/gal).

Q = Consumo del combustible por hora (gal/hr).

H = Horas de operación al año.

4.3.5 COSTO DE LAS BATERÍAS.

Como en algunas partes el uso constante de la electricidad es indispensable, es necesario almacenar fluido eléctrico para los momentos en los cuales el aerogenerador no pueda producir suficiente energía debido a periodos de "calma" del viento. En este estudio se considerarán tres días de almacenamiento. Algunas características de las baterías se expresan a continuación:

Costo por cada batería (1991) 230 dolares

Capacidad de almacenamiento 2.65 KWh

Costo de mantenimiento 2% del costo de la batería

Vida útil de la batería 5 años

De lo anterior el costo por unidad de energía eléctrica para un aerogenerador será:

$$p(C+B)/100 \times T$$

Donde:

C= Costo del equipo por unidad de energía producida (\$/KW)

B= Costo de las baterías por unidad de energía producida (\$/KW)

P= Porcentaje de los gastos anuales en base al costo (%)

T= Salida específica (KWH/KW)

4.3.6 TASAS DE INTERÉS APLICABLES.

De acuerdo a las políticas económicas de cada país, se ha incluido dentro del factor de costo "P" analizado en párrafos anteriores, un porcentaje de interés anual sobre el costo del equipo, el cual repercute directamente en el costo de la energía generada por el viento.

Se han escogido tres tasas de interés anual:

- a) 5%.- Usado por instituciones que fomentan el desarrollo tecnológico.
- b) 12%.- Usado comúnmente por el Banco Mundial.
- c) 20%.- Usado por el Banco Privado.

Se ha incluido en este estudio un interés sobre el costo del equipo, ya que la mayoría de estos proyectos son financiados a largo plazo por instituciones gubernamentales o de crédito privadas.

4.4 COMPARACIÓN DEL COSTO DE LA ENERGÍA EÓLICA CON SISTEMAS DE GENERACIÓN EN BASE A COMBUSTIBLES FÓSILES.

La tabla 4.3 muestra el resultado sumariado de comparación del costo de producción de energía eléctrica utilizando la fuerza matriz del viento contra el costo de generación eléctrica utilizando generadores que utilizan motores de gasolina o diesel.

Como se puede apreciar, la energía eólica compite exitosamente contra los generadores con motores de gasolina o diesel en la mayoría de aplicaciones denominadas "remotas", es decir, que se encuentran en lugares aislados y no están interconectadas con alguna red de alimentación eléctrica.

Cabe aclarar que en este estudio no se contempló escaladas en el costo del combustible, por lo que el número de aplicaciones en las cuales los sistemas que utilizan la energía eólica pueden competir contra sistemas convencionales puede incrementarse, demostrándose así la viabilidad económica de estos equipos eólicos.

VIENTO												COMBUSTIBLE(*)				
APLICACION	PERIODO DE TIEMPO	TASA DE INTERESES	CLASE 1			CLASE 2			CLASE 3			CLASE 4			POTENCIA (kW)	COSTO DLS\$/kW
			POTENCIA (kW)	% ENERGIA USADA	COSTO DLS\$/kW	POTENCIA (kW)	% ENERGIA USADA	COSTO DLS\$/kW	POTENCIA (kW)	% ENERGIA USADA	COSTO DLS\$/kW	POTENCIA (kW)	% ENERGIA USADA	COSTO DLS\$/kW		
ESTACION REPETIDORA 22,400 kWh/año	1966-1990	5%	25	81	0.31	15	94	0.28	15	75	0.28	10	93	0.28	4	0.60
		12%			0.41			0.37			0.37			0.36		0.61
		20%			0.56			0.48			0.48			0.47		0.63
RADIO TRANSMISOR 500 kWh/año	1966-1990	5%	1	64	1.28	1	37	1.28	1	26	1.28	1	24	1.28	0.3	3.71
		12%			1.89			1.89			1.89			1.89		3.75
		20%			2.70			2.70			2.70			2.70		3.81
DESALINISACION DE AGUA PO OSMOSIS INVERSA - 12 m3/DIA 33,000 kWh/año	1966-1990	5%	25	81	0.32	15	71	0.31	10	85	0.31	10	71	0.31	4	0.57
		12%			0.48			0.42			0.41			0.41		0.58
		20%			0.64			0.56			0.54			0.54		0.60
DESALINISACION DE AGUA PO OSMOSIS INVERSA - 10 m3/DIA 17,000 kWh/año	1966-1990	5%	40	75	0.32	25	80	0.27	25	62	0.27	15	92	0.25	4	0.31
		12%			0.42			0.35			0.35			0.32		0.31
		20%			0.56			0.45			0.45			0.41		0.32
CARGADOR DE BATERIAS 800 kWh/año	1966-1990	5%	1	70	1.07	1	44	1.07	1	34	1.07	1	29	1.07	0.3	2.93
		12%			1.58			1.58			1.58			1.58		2.96
		20%			2.25			2.25			2.25			2.25		3.01
CENTRO DE SALUD 4,000 kWh/año	1966-1990	5%	5	78	0.55	5	50	0.55	5	40	0.55	2	96	0.40	1.2	1.15
		12%			0.78			0.78			0.78			0.64		1.18
		20%			1.08			1.08			1.08			0.75		1.17
AREA DE DESCANSO EN AUTOPISTA 2,000 kWh/año	1966-1990	5%	6	38	0.83	2	74	0.83	2	57	0.83	1	97	0.47	1.2	0.89
		12%			1.28			0.90			0.84			0.64		0.91
		20%			1.82			1.28			1.26			0.88		0.93
PROTECCION CATORICA 25 MILLAS CON TUBO DE 1" DIA 250 kWh/año	1966-1990	5%	1	28	2.34	1	18	2.34	1	14	2.34	1	12	2.34	0.3	6.77
		12%			3.51			3.51			3.51			3.51		6.68
		20%			5.07			5.07			5.07			5.07		7.18
FARO O PEQUEÑA ESCUELA 10,000 kWh/año	1966-1990	5%	10	84	0.36	10	62	0.36	10	50	0.36	5	83	0.32	4	0.67
		12%			0.74			0.74			0.74			0.58		0.73
		20%														
REFRIGERACION 35,040 kWh/año	1966-1990	5%	40	79	0.31	25	85	0.28	25	88	0.28	15	97	0.24	4	0.36
		12%			0.41			0.34			0.34			0.31		0.36
		20%			0.54			0.44			0.44			0.40		0.37

VIENTOS CLASE 1: VELOCIDAD MEDIA ANUAL = 4.4 m/s
 VIENTOS CLASE 2: VELOCIDAD MEDIA ANUAL = 5.1 m/s
 VIENTOS CLASE 3: VELOCIDAD MEDIA ANUAL = 5.8 m/s
 VIENTOS CLASE 4: VELOCIDAD MEDIA ANUAL = 6.0 m/s

(*) GENERADORES DE MENOS DE 1.2 kW SON IMPULSADOS POR MOTORES DE GASOLINA. SISTEMAS DE MAYOR CAPACIDAD SON IMPULSADOS POR MOTORES DIESEL.

Tabla 4.3.- Comparación de costos entre aerogeneradores y generadores en base a combustibles en aplicaciones remotas.

CAPITULO 5. "DISEÑO DE UNA INSTALACION AEROGENERADORA

PARA UNA CLINICA RURAL MEXICANA"

5.1 SELECCION DEL SITIO ADECUADO EN LA REPUBLICA MEXICANA PARA LA INSTALACION DE UN AEROGENERADOR PARA UNA CLINICA RURAL.

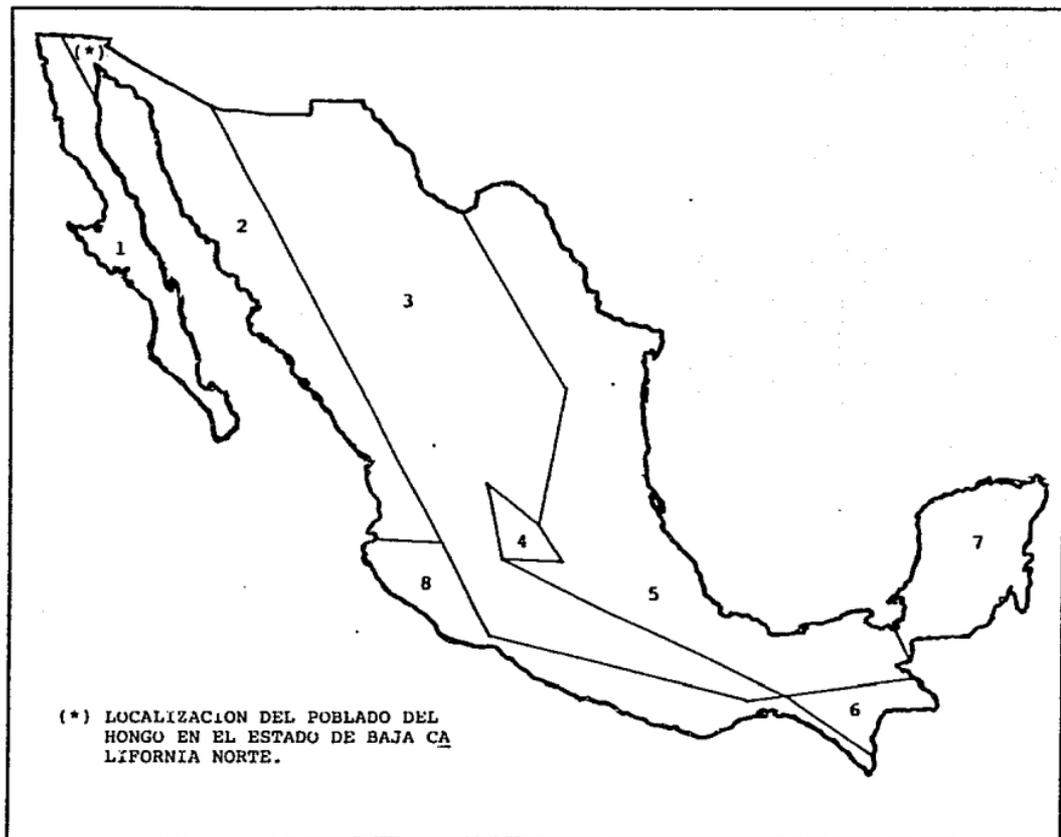
Debido a las grandes regiones montañosas con las que cuenta la República Mexicana, existen sitios a los cuales el llevar electricidad por torres o postes de conducción de una planta generadora convencional (hidroeléctrica, nucleolétrica, termoeléctrica, etc.) resulta excesivamente cara. Es en este tipo de lugares en donde las fuentes alternas de generación de energía eléctrica resultan una opción viable, tanto desde el punto de vista económico como técnico.

En la fig. 5.1 se muestra un plano de distribución de zonas climáticas del territorio mexicano. En este plano se ha dividido al país en ocho zonas climáticas y en la tabla 5.1 se muestran los promedios de la velocidad del viento anuales en cada una de las regiones.

Es en base a esta información que se ha elegido a la zona montañosas de la Rumorosa en la parte norte de la península de Baja California, debido a los altos promedios de velocidad del viento y a su estabilidad durante todo el año. En esta cordillera el promedio de velocidad del viento anual fluctua entre 18.4 y los 20 km/hr.

Para la elección del sitio exacto de instalación se deberán de tomar en cuenta los parámetros expuestos en el capítulo dos de este trabajo y entre los cuales se destacan que en el sitio no deberán de existir obstáculos altos que impidan el flujo del viento por lo menos un kilómetro corriente arriba, una planicie o una rivera pueden ser buenos

Fig. 5.1 Distribución de zonas climáticas en México.



**RANGO ESTIMADO DE VELOCIDAD PROMEDIO ANUAL DEL VIENTO EN PORCENTAJE
DE AREA EN MEXICO EN M/SEG (MPH)**

REGION CLIMATICA	<4.4(9.8)	4.4-5.1(11.5)	5.1-5.6(12.5)	5.6-6.0(13.4)	>6.0(13.4)
1 BAJA CALIFORNIA	60	30	10		
2 COSTA NOROESTE	90	10			
3 ALTIPLANO	30	55	15		
4 MONTAÑAS CENTRALES		100			
5 COSTA DEL GOLFO	60	40			
6 MONTAÑAS DEL ITSMO	25	75			
7 PENINSULA DE YUCATAN		100			
8 COSTA SUROESTE	60	35	05		

Tabla 5.2.- Promedio de velocidad anual del viento en México.

lugares o preferentemente escoger una brecha en una montaña que produzca efecto de tunel de viento, éste será el lugar ideal.

El lugar escogido para ésta instalación es el poblado del Hongo en la Sierra antes mencionada por contar con las características necesarias para la implementación de un sistema de generación eléctrica en base a la energía del viento.

5.2 CALCULO DE LA DEMANDA ELECTRICA DE UNA CLINICA RURAL TIPICA EN MEXICO.

Para proceder al cálculo de la demanda eléctrica de una clínica rural, primeramente se procederá por identificar cuales son los consumos tanto por iluminación como por la utilización tanto de aparatos clínicos como aparatos electrodomésticos y en algunos casos de radio comunicación.

<u>APARATO</u>	<u>CONSUMO ELECTRICO</u>
Refrigerador (1/4 HP)	190 Watts
Iluminación (6 x 60)	360 Watts
Radio comunicación	60 Watts
Esterilizador	100 Watts
Ventilador	100 Watts
Parrilla eléctrica	200 Watts
Lámparas de pie (3 x 60)	180 Watts
Bomba de agua (1/2 HP)	380 Watts
Aparato de T.V.	60 Watts
<hr/>	
Consumo total	1630 Watts

Para tener una reserva eléctrica en caso de algún crecimiento en las necesidades de la clínica, calcularemos al aerogenerador para una capacidad de 2000 Watts ó 2 kW. Sin embargo, es muy poco probable que todos los aparatos eléctricos estén funcionando al mismo tiempo por lo que el factor de diseño con el cual se trabajará será muy holgado.

5.3 POTENCIA DEL VIENTO DISPONIBLE EN EL LUGAR DE INSTALACION SELECCIONADO Y CALCULO DEL DIAMETRO DEL ROTOR.

Como se mencionó anteriormente, en el poblado del Hongo en B.C.N., el promedio anual de velocidad del viento fluctúa entre los 18.4 y los 20 km/hr, sin embargo se han llegado a presentar velocidades superiores a los 50km/hr en este lugar debido al flujo de aire proveniente del Océano Pacífico hacia el continente.

Para el cálculo de la potencia del viento disponible en el lugar de instalación se utilizará el rango inferior de la velocidad promedio del viento, a fin de asegurar que bajo estas condiciones se contará con suficiente fluido eléctrico para cubrir las necesidades de la clínica.

Como se trató en el capítulo tres, se procederá a calcular la potencia de salida disponible de la turbina en base a la velocidad del viento y al diámetro de las aspas del rotor del aerogenerador. Como en este caso no se conoce el diámetro de las aspas, pero si se sabe la potencia eléctrica requerida, realizando un despeje de la siguiente ecuación podremos determinar el diámetro de las aspas requerido.

Como la velocidad promedio anual del viento esta arriba de los 5 m/seg (18 km/hr), se puede utilizar un aerogenerador de rotor rápido. Para este caso, la máxima potencia que se puede extraer del rotor es:

$$P = 0.20D^2V^3 \text{ ----- } 1$$

y del generador

$$P = 0.20nD^2V^3 \text{ ----- } 2$$

de donde

$$D = (P / 0.20V^3n)^{1/2} \text{ ----- } 3$$

Para la solución de la ecuación 3 se cuenta con los siguientes datos:

P = Potencia eléctrica requerida en la clínica = 2000 Watts

n = Eficiencia del conjunto transmisión-generator = 90 % considerando una transmisión mecánica ya sea de engranes o bandas dentadas y tomando en cuenta las pérdidas por calor del generator.

V = Límite inferior del promedio anual de la velocidad del viento en el lugar de instalación = 18.4 km/hr = 5.11 m/seg.

Cabe aclarar que el factor de 0.20 utilizado en la ecuación 3 es válido únicamente para rotores rápidos y el mismo considera una densidad del aire de 1.27 kg/m3.

Por lo tanto se tiene:

$$D = (2000 / (0.20)(5.11)^3(0.9))^{1/2} = 9.12 \text{ m}$$

Si se redondea este número al entero más cercano se obtendrá que el diámetro de las aspas del rotor será de 9 metros. Considerando este diámetro se recalculará la potencia que será capaz de producir el aerogenerador

$$P = 0.20nD^2V^3$$

$$= 0.20(0.9)(9)^2(5.11)^3$$

$$= 1945.45 \text{ Watts} = 1945 \text{ Watts}$$

Con esta capacidad de generación, se tendrá un factor de diseño de:

$$\text{FACTOR DE DISEÑO} = 1945 \text{ Watts} / 1630 \text{ Watts} = 1.19$$

es decir un 19 % de sobrecapacidad, factor que se considera apropiado para futuros incrementos en la demanda eléctrica de la clínica.

Algunas de las ventajas de utilizar rotores rápidos es que son de pocas palas, cuatro como máximo; debido a lo anterior resulta mucho más ligero y barato que un aerogenerador lento de igual diámetro. Además los efectos de las ráfagas de viento actúan originando variaciones de esfuerzos menos importantes, ya que se han calculado para soportar esfuerzos mucho más elevados que los rotores lentos.

La velocidad de rotación N de este tipo de rotores viene dada por la formula:

$$N = 115 V/D$$

y para este caso en particular

$$N = 115 (5.11/9)$$

$$= 65.29 \text{ RPM}$$

cabe mencionar que el factor 115 es experimental e incluye la conversión de rad/seg a RPM.

5.4 SELECCION DEL GENERADOR ELECTRICO Y DE LA RELACION DE MULTIPLICACION.

Debido a la aplicación en la cual se utilizará el aerogenerador y a la capacidad requerida, más de un kilowatt, se elegirá un generador tipo asincrono de 127 volts a 60 ciclos de corriente alterna por segundo. Esto basicamente debido a que la mayoría de aparatos electrodomésticos y clínicos que se utilizan en este tipo de hospitales rurales trabajan con estas características eléctricas.

La velocidad de rotación de este tipo de generadores es de 3600 RPM a fin de poder sostener las 60 ciclos por segundo requeridos.

Conociendo la velocidad de giro del rotor a la velocidad promedio anual del viento en el lugar de instalación y la velocidad de giro requerida por el generador, se puede calcular la relación de multiplicación K requerida en la transmisión del aerogenerador,

$$K = \text{VELOCIDAD DE ROTACION DEL GENERADOR} / \text{VELOCIDAD DE ROTACION}$$

$$K = 3600 \text{ RPM} / 65.29 \text{ RPM} = 55.13 \text{ RPM}$$

El tipo de rotor seleccionado para esta aplicación es del tipo eje horizontal o coaxial al viento, por ser los de más fácil construcción, instalación, alto rendimiento y más económicos.

5.4.1 CALCULO DE LA VELOCIDAD ESPECIFICA Y DEL NUMERO DE PALAS DEL ROTOR.

Para el tipo de rotor seleccionado, rotor rápido coaxial al viento, la velocidad específica h_o que representa la variación de la potencia, el empuje axial y del torque del rotor viene dada por el cociente de la velocidad del viento V a una distancia equivalente a cuatro o cinco diámetros antes del rotor y de la velocidad periférica de las palas V_o . Este valor determinará el número de palas requeridas.

Se conoce que la velocidad a 45 metros de distancia del rotor corriente arriba, es decir, cinco veces el diámetro de barrido de las palas, es de 18.4 km/hr, como promedio, se sabe que el diámetro del rotor es de nueve metros y que su velocidad de giro es de 65.29 RPM. Con estos datos se puede calcular la velocidad periférica de las palas

$$V_o = N r$$

donde V_o = Velocidad periférica de las palas

$$N = \text{Velocidad de rotación} = 65.29 \text{ RPM}$$

$$r = \text{Radio de barrido de las palas} = 4.5 \text{ m}$$

por lo tanto

$$V_o = 110.76 \text{ km/hr}$$

De lo anterior se calcula la velocidad específica h_o para este diseño específico,

$$h_o = V_o/V = 110.76/18.4 = 6.01 = 6$$

valor que es el óptimo para rotores de tipo rápido.

En base a tablas experimentales y conociendo el valor de h_o igual a 6 se adoptará un número de tres palas para este diseño en particular.

Por facilidad de formación, disponibilidad y economía, se ha elegido a la madera como material de construcción de las palas del rotor. El nogal, la haya, el olmo, el roble y algunas especies de caoba son las maderas adecuadas para este tipo de aplicaciones y se deben de recubrir con barniz de poliéster para protegerlas del medio ambiente.

5.5 CALCULO DE LA CAPACIDAD DE LAS BATERIAS PARA EL ALMACENAMIENTO DE LA ENERGIA.

Cuando la intensidad del viento es alta, el exceso de electricidad generada se acumula en baterías. La energía almacenada se utiliza durante las horas en las que el suministro del aerogenerador es nulo o insuficiente.

Para calcular la capacidad de las baterías, contemplando que las mismas no se descarguen totalmente, se utilizará la siguiente fórmula,

$$C = 30n P_m / E$$

donde C = Capacidad de la batería en amper/hora

n = Número máximo de días consecutivos de viento no aprovechable.

Pm = Potencia media absorbida por la instalación en Watts.

E = Tensión en volts de la batería.

El número máximo de días consecutivos de viento no aprovechable es un dato histórico que se determinará en base al lugar de instalación y a la recopilación histórica del comportamiento del viento en ese sitio. En este cálculo se considerará un máximo de cinco días.

El voltaje de las baterías será de 24 volts por ser comunes y de fácil adquisición en el mercado mexicano. Pm será de 1630 Watts multiplicado por un factor de consumo del 60 %, por lo tanto su valor será de 978 Watts, para cuestiones del cálculo se tomará 1000 Watts.

$$C = (30)(5)(1000)/24 = 6,250 \text{ Amp/hr}$$

Debido a que el generador proveerá de 120 volts en corriente alterna y las baterías serán de 24 volts en corriente directa, será necesario incorporar un transformador de corriente alterna a corriente directa a fin de poder realizar la carga de las mismas.

5.6 ELEMENTOS DE CONTROL Y SOPORTE

5.6.1 TORRE DE SOPORTE

La elegida para ésta instalación es la del tipo de ensamble en campo de tubo galvanizado, a fin de poder garantizar un soporte firme y seguro al aerogenerador a la vez que económico.

El aerogenerador se colocará en la cima de la torre de acuerdo a la configuración mostrada en la fig. 5.2.

Este arreglo es muy eficiente debido a que se minimizan las pérdidas en el sistema de transmisión al evitar juntas universales. El problema que se presenta, es la dificultad de dar mantenimiento al sistema debido a su localización.

La forma de anclaje será a través de bloques de concreto en cada una de las bases de la torre y en el ensamble de la misma se utilizarán tornillos y tuercas de seguridad galvanizadas.

5.6.2 ELEMENTOS DE CONTROL

Por ser ésta una instalación pequeña en cuanto a capacidad de generación y con objeto de no encarecer el costo de la misma, únicamente se emplearán los elementos de control estrictamente indispensables, los cuales son:

A) Sistema de orientación del rotor en la dirección del viento.

La solución seleccionada será la de rotor autoorientable en la cual el rotor se colocará detrás del soporte, como se muestra en la figura 5.3 y se orienta automáticamente en la dirección del viento como una veleta.

Para que el sistema de orientación funcione adecuadamente, la distancia a la cual el rotor debe de estar colocado con respecto al centro de giro del soporte, como se ilustra en la figura 5.3, debe de cumplir con la siguiente relación,

$$d = 0.13 D$$

donde d = Distancia del rotor al centro de giro del soporte.

D = Diámetro del rotor.

para este caso en particular

$$d = 0.13(9\text{m}) = 1.17 \text{ m}$$

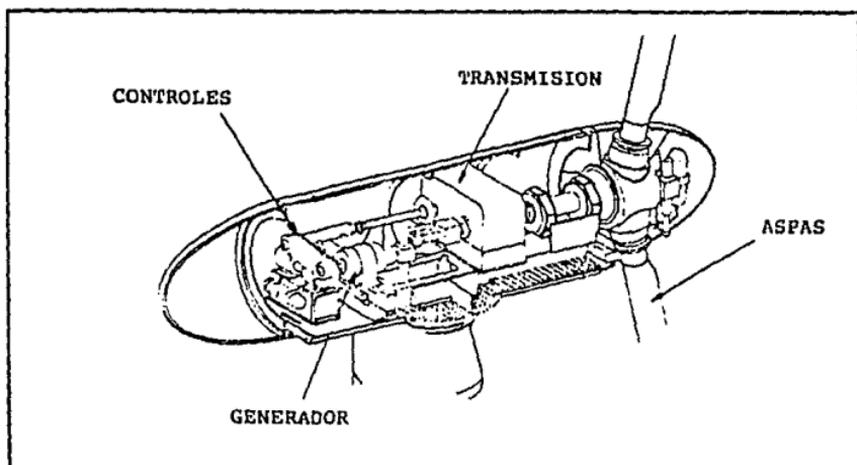


Fig. 5.2 Arreglo y elementos constitutivos del aerogenerador.

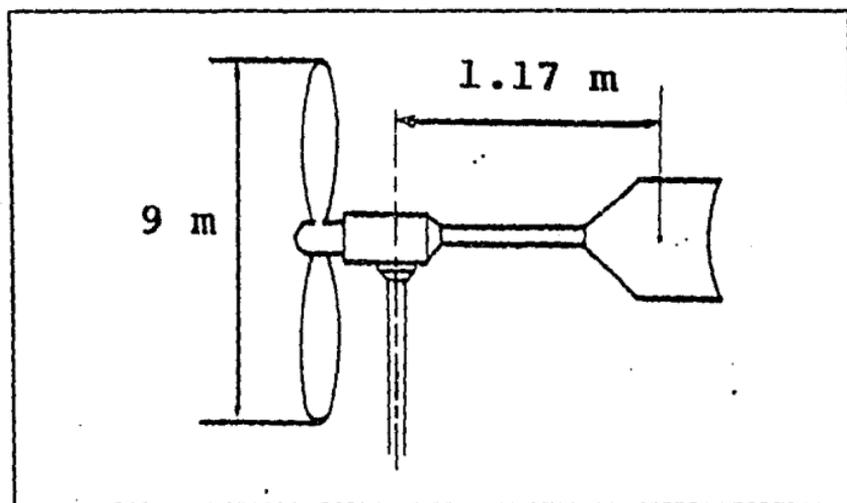


Fig. 5.3 Sistema de rotor auto - orientable.

B) Sistema de desconexión del equipo por vientos de alta velocidad.

Es muy importante que la velocidad del rotor permanezca casi constante a pesar de la variación del viento. Con esta finalidad se emplean reguladores de velocidad, que a su vez son limitadores de los esfuerzos sobre las palas en caso de vientos de alta velocidad.

El sistema utilizado para este diseño en particular es el de palas del rotor orientables. Esta solución permite la adaptación del rotor a diferentes condiciones de viento, como las encontradas en el punto de instalación seleccionado, hasta el repliegue en caso de vientos muy fuertes.

Las modificaciones de paso tienen lugar por el efecto de la presión aerodinámica ejercida por el viento sobre la superficie de cada una de las palas del rotor.

La velocidad de repliegue de las palas viene determinada por la fuerza ejercida por resortes colocados en el eje de cada uno de los ejes de las palas. Conforme aumente la velocidad y por consiguiente la presión del viento sobre las palas, los resortes se elongarán reduciendo de esta forma la superficie de las palas expuestas al viento, controlándose así la velocidad de rotación del aerogenerador.

5.7 FACTIBILIDAD ECONOMICA DEL PROYECTO

En esta parte se estudiará la viabilidad económica de una instalación eólica como la que se ha calculado en este capítulo.

Se conoce de la información mostrada en el capítulo número cuatro de este trabajo que el costo de un aerogenerador de 2 kW es de alrededor de 2,800 dólares americanos, con un costo de mantenimiento anual de 56 dólares. En comparación, un generador eléctrico con motor a gasolina de esta misma capacidad cuesta alrededor de 600 dólares, mientras que uno a diesel alcanza un valor de 2,500 dólares. Los costos de operación anual en estos generadores están en base al número de horas en operación, tanto para el costo de mantenimiento como para el de refacciones y combustibles. En el caso del generador a gasolina si se toma en cuenta un costo de 50 centavos de dólar

la hora, incluyendo costos de gasolina, y estimando 2,000 horas de operación al año como mínimo, se tiene un costo de operación anual de 1,000 dólares.

De estos datos se concluye que la recuperación de la inversión de un aerogenerador en comparación con un generador a gasolina es de 2.5 años, lo que lo hace una alternativa muy viable para la generación de electricidad.

CONCLUSIONES.

Las conclusiones a las que se llegaron al finalizar este trabajo se muestran en los siguientes párrafos.

1. Las instalaciones eólicas, en particular los aerogeneradores, son recomendados para instalaciones en lugares remotos en donde el costo de los combustibles fósiles es elevado debido a su transportación, y se encuentran alejados de redes de distribución del fluido eléctrico.

2. Existen tres consideraciones importantes que se emplean en la evaluación del potencial de un sitio para instalación de aerogeneradores: 1) La velocidad promedio anual en la localidad, 2) La variabilidad del viento y 3) La variación de la velocidad con la altura.

3. Se consideran buenos sitios de instalación los lugares costeros, las cimas de las colinas y los pasajes entre montañas.

4. Los elementos básicos que componen a un aerogenerador son: rotor, transmisión, generador, controles y torre de instalación.

5. Los rotores rápidos de dos o tres aspas, son los más recomendados para el uso en aerogeneradores y por lo tanto, para la generación de electricidad.

6. La cantidad de energía máxima que puede ser extraída del viento es proporcional al 29 por ciento del cubo de la velocidad del viento. La constante de proporcionalidad viene dada por el producto de la densidad del aire por el área barrida por las aspas del rotor del aerogenerador.

7. Debido a la limpieza de operación de los aerogeneradores, es decir, su nula contaminación ambiental, además de sus muy bajos costos de operación pueden ser

una fuente alterna de energías que cubra en un futuro no muy lejano, un significativo porcentaje en las necesidades energéticas mundiales.

Considero que el desarrollo y la aplicación de los aerogeneradores permitirá día a día hacer de ellos una fuente de generación eléctrica más utilizada debido a su bajo o nulo impacto ambiental, a sus reducidos costos de mantenimiento y al elevado número de lugares en donde este tipo de instalaciones son factibles, tanto en México como en el resto del mundo. Cabe mencionar también que la tendencia mundial es hacia el desarrollo de sistemas más limpios y de menor riesgo, esto implica la muy probable desaparición de sistemas de generación eléctrica ampliamente utilizados hoy en día como es el caso específico de las plantas nucleo eléctricas, y a los cuales habrá de sustituir por sistemas como el aquí tratado.

Es necesario recordar la crítica situación ambiental que sufre actualmente nuestro planeta, y que en un futuro tal vez no muy lejano, los efectos de la contaminación serán irreversibles. Todavía estamos en el momento de actuar en favor de un mundo sano, tanto para el ser humano como para sus demás habitantes. La tecnología existe, esta en nuestras manos el aplicarla racionalmente.

BIBLIOGRAFIA

1) Considine Douglas M.

"Energy Technology Handbook"

Editorial Mc. Graw-Hill

Impreso en E.U. 1977

1857 páginas

2) Griffith S.K. , Cabraal A.

"Wind Energy Systems; Export Market Potential"

Wind Books

Impreso en E.U. Enero 1984

184 páginas

3) Hackleman Michael

"The homebuilt, wind-generated electricity Handbook"

Peace Press. Tercera Impresión

Noviembre 1976

194 páginas

4) Commission of the European Communities

"1988 European Community Wind Energy Conference"

H. S. Stephens & Associates

Impreso en Inglaterra - 1988

674 páginas

5) Golding E. W.

"Wind mills for water lifting and generation of electricity on the farm"

Food and agriculture organization of the United Nations (FAO)

FAO informal working bulletin 17

60 páginas

6) Curtice David, Patton James

"Operation of Small Wind Turbines on a Utility Distribution System"

Wind Books

Impreso en E.U. Marzo 1981

158 páginas

7) Chilcote R.E.

"The design, development and testing of a low-cost 10 HP windmill prime mover"

Brace Research Institute Publication No. MT.7

Segunda Edición Junio de 1970, Impreso en Canada

75 páginas

8) **BHRA Fluid Engineering**

"Proceeding of the international September 7-9, 1976 Symposium on wind energy systems"

BHRA (The British Hydomechanics Research Association)

Impreso en Inglaterra

480 páginas

9) **Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática**

"El sector eléctrico en México, 1987"

INEGI

Impreso en México, Noviembre 1989

173 páginas