

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO
FACULTAD DE QUIMICA

28



**GENERACION DE ELECTRICIDAD A
PARTIR DE ENERGIA EOLICA**

TESIS PROFESIONAL

ANA LETICIA FERNANDEZ OSORIO

INGENIERIA QUIMICA

Cd. Universitaria D. F.

1978





Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



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 esta 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.



RECIBO
FECHA

RECIBO
N.º ~~150~~ 150
7 ESI 5 19 28

JURADO ASIGNADO ORIGINALMENTE:

PRESIDENTE **Juán Lartigue Gordillo**

VOCAL **Tomás Fargas Iglesias**

SECRETARIO **Jorge Ludlow Landero**

1er SUPLENTE **Juán Fritz Corona**

2° SUPLENTE **Carlos Franco**

SITIO DONDE SE DESARROLLO EL TEMA:

Departamento de Física.

Escuela Nacional de Estudios Profesionales, Cuautitlán.

Universidad Nacional Autónoma de México.

NOMBRE DEL SUSTENTANTE:

Ana Leticia Fernández Osorio.

ASESOR DEL TEMA:

M.en.C. Juan Lartigue Gordillo.

A MI MADRE

Agradezco la asesoría prestada por el
M.en C. Juan Lartigue G.

INDICE

I	Introducción	1
II	Características y Distribución del Viento.	4
	Naturaleza y Ocurrencia del Viento.	5
	Su distribución en México.	11
	Instrumentos para medir la velocidad y la dirección del viento.	17
III	Estimación de la Energía Obtenible del Viento.	23
	Extracción de Potencia.	25
	Mecanismos de Transferencia.	27
	Máquinas que utilizan viento.	31
IV	Características de Aero-generadores.	37
	Propulsor ó hélice	38
	Acoplamiento al generador	48
	Variables de diseño	57
	Sistema de transmisión	60
	Sistema de almacenamiento	61
	Sistema de conversión de energía	63
	Producción y costos	65
V	Anteproyecto de una unidad aero-generadora de 1.5 Kw	68
VI	Conclusiones y Recomendaciones.	75
VII	Bibliografía.	78

I Introducción.

Nuevas Fuentes de Energía.

Las opiniones de los expertos varían considerablemente cuando se trata de contestar a la pregunta ¿ durante cuántos años podrán aún los combustibles fósiles suministrarnos una cantidad adecuada de calor y energía?

Esas diferencias de puntos de vista son bien naturales, ya que el problema que estamos examinando se relaciona con algunos conceptos todavía no bien definidos. Ninguno de nosotros puede profetizar en que medida cambiará el volúmen demográfico, ni determinar por lo tanto a que cantidad de seres se referirá ese "nosotros". Tampoco podemos preveer lo que dentro de algunos años se considerará como un suministro adecuado de calor y energía per cápita.

Y en cuanto al podrán, depende del precio (ya sea en dinero, en trabajo ó en sacrificio) que se esté dispuesto a pagar por una cantidad de calor ó de energía en forma de una tonelada de carbón ó de petróleo.

Por otra parte, ninguno de los expertos niega que llegará el momento en que la humanidad se verá privada de combustibles fósiles.

Es un hecho que mientras usamos esos combustibles estamos viviendo de un capital y no de una renta.

El capital puede ser mayor ó menor de lo que nosotros pensemos y hasta podemos adaptar nuestro consumo a su volúmen, pero llegará el día en que aquél se agote.

Al hacer uso de la energía hidráulica, utilizamos una fuerza producida por la energía solar en época reciente, tan reciente a veces que puede datar de muy pocos días (cuando la energía hidráulica se deriva de ríos alimentados por lluvias) ó bien de algunos años (como en el caso de ríos alimentados por glaciares, en cuya formación interviene energía solar evaporando agua que se depositó en la cima de la montaña). Por ello no debemos temer el agotamiento de esta fuente de energía, pero en cambio, no podemos transportarla a los lugares en donde nos sería más útil.

Las perspectivas para la utilización de la energía atómica, parecen ser favorables, aunque aún quedan por resolver muchos problemas, antes de alcanzar una solución que no implique riesgos.

La facilidad de transporte, debida a la alta concentración de material fisionable, es muy superior a la del carbón y la del petróleo

aunque quizá se halle en cierto modo contrastada por la necesidad de emplear equipos protectores en exceso.

Las cantidades de material fisiónable existente, parecen ser considerables, pero en principio su empleo todavía significa seguir viviendo de un capital.

No obstante en este caso, el capital es tan enorme que se puede esperar una solución satisfactoria de los muchos problemas prácticos pendientes.

Sin embargo existe otra forma de energía solar que puede sin duda considerarse como una renta, la energía eólica, producida por el calentamiento periódico de la atmósfera por el sol.

Sin embargo, la ventaja que resulta de su carácter de renta va acompañada por el serio inconveniente de que esta renta es muy irregular en la mayor parte del mundo, especialmente en donde soplan vientos definitivamente fuertes. Además como es natural no hay posibilidad de transportar esta fuente de energía.

Se ha debatido bastante la cuestión de si en nuestro tiempo podría utilizarse más a fondo la energía eólica, teniendo en cuenta debidamente la situación actual en otras esferas de la producción energética.

Se aprecia claramente que en el problema se plantean dos cuestiones separadas: el empleo de pequeñas plantas generadoras en los lugares en los que como fuente alternativa de energía, sólo se dispone de un tipo de fuerza motriz de poca potencia, en esos casos habría que confiar en la energía eólica como en la única fuente disponible.

El empleo de instalaciones de gran tamaño, al proyectarlas se plantea un problema técnico muy importante, el hecho de que el número de revoluciones por minuto del eje de la hélice es necesariamente reducido incluso cuando el trazado de las aspas se haya diseñado para una velocidad específica elevada.

En Inglaterra se han construido dos centrales de 1000 Kw cada una cuyos resultados aún no se han hecho públicos.

Además se trata de prototipos para centrales de 1000 Kw como mínimo en cuya clase ha despertado gran interés la central experimental de Smith-Putnam en Granpa's Knob en Vermont, E.U.

Ambas posibilidades de aplicación son objeto de serios estudios

actualmente. Respecto a las plantas pequeñas y medianas (1 - 80 Kw) destinadas a producir corriente eléctrica, el problema más importante es perfeccionar la regulación automática, simplificando la parte eléctrica de la instalación sin sacrificar su regularidad y además unificando sus partes componentes con el fin de reducir su costo de instalación.

Como en la práctica el factor determinante del costo de energía eléctrica producida por la fuerza del viento, es el capital invertido en la instalación, es de máxima importancia, que la producción total de energía sea lo más elevada posible en relación al capital inicial. De 1900 - 1910 se establecieron en Dinamarca varios centenares de instalaciones de aprovechamiento de la energía eólica, de 3 - 30 Kw que suministraban corriente continua a las grandes granjas y aldeas. En el empleo de pequeñas plantas, existe mucha más experiencia, como los antiguos molinos que existen en algunos países y de los que algunos ejemplares pintorescos prestan aún servicios útiles.

De cuanto se ha publicado se puede apreciar que donde se ha realizado menor progreso es en el estudio de las grandes centrales.

No obstante es muy posible que los fabricantes de este tipo de maquinaria hayan realizado trabajos importantes en sus departamentos de investigación, y no los hayan dado a conocer.

Existen varias razones para pensarlo así, pero es probable que en pocos años puedan establecerse presupuestos en firme para instalaciones completas de garantizada regularidad para producción de fuerza muy superior a los 1000 Kw de los dos prototipos que existen en el Reino Unido.

Dentro del campo de la Ingeniería Química, la generación de electricidad a partir del viento, resulta ser un tema importante, al efectuar el necesario análisis de flujo de fluidos, ya que se presenta la transferencia de energía en varias de sus formas (energía eólica → energía mecánica → eléctrica → química y finalmente energía eléctrica)

II Características y Distribución del Viento.

Naturaleza y Ocurrencia.

Su distribución en México.

Instrumentos para medir la velocidad y
dirección del viento.

Naturaleza y Ocurrencia del Viento.-

Diferencias en su densidad y variaciones en su temperatura, causan que el aire se mueva de una latitud a otra, además de que la dirección resultante del viento se ve grandemente influenciada por la velocidad de la superficie terrestre. A esta influencia se agrega que las diferencias en presión atmosférica producen el flujo de aire desde un punto de alta presión a otro de baja presión.

Para condiciones promedio y por todo el año, existen dos cinturones de alta presión que rodean la superficie terrestre, entre aproximadamente 30°N y 40°N ; y 30°S y 40°S , respectivamente.

Existen también dos cinturones de baja presión localizados entre el Ecuador y ellos, por lo tanto los vientos soplan en dirección nor-este entre 30°N y el Ecuador; y en dirección sur-este entre 30°S y el Ecuador. Estos cinturones de baja presión también producen vientos oeste entre 40° y 60° de latitud en ambos hemisferios. Entonces es posible predecir la dirección predominante del viento en muchas partes del mundo, a menos que la zona se vea afectada por negras tormentas de dirección predominante, ó bien depresiones ciclónicas, las cuales pueden moverse en cualquier dirección, aunque hay cierta tendencia establecida en su dirección, determinada por el sistema general de presión atmosférica.

Un conocimiento de la dirección predominante del viento, es importante cuando se trata de seleccionar un lugar, utilizando la energía que lleva consigo el viento, pero es en definitiva su velocidad quien está más relacionada con el factor económico.

Efectos friccionales causados por arboles rotos, partículas de tierra, y otras obstrucciones tienen gran influencia sobre vientos de bajas altitudes, pero su velocidad es por supuesto proporcional al gradiente de presión atmosférica.

Observaciones de esta presión, continuamente efectuadas en varias estaciones meteorológicas a través del mundo, muestran que existen líneas de la misma presión atmosférica, ejemplo, a nivel del mar, corregidas para temperatura y latitud. De estos datos, utilizando el gradiente de presiones, pueden calcularse valores de velocidades, pero sin tomar en cuenta la fricción de la superficie, los cuales difieren bastante de los valores prácticos.

Otra característica importante, es el incremento de la velocidad con

la altura sobre el nivel del suelo, ésta dependerá de la rugosidad del terreno, de si hay marcadas diferencias en el contorno de la zona, existencia de colinas ó zonas de transición, por ejemplo de mar abierto a terreno boscoso, tierras onduladas ó pueblos.

Las líneas de igual velocidad promedio son mayores a más grandes altitudes.

Características del Viento y Producción de Potencia.

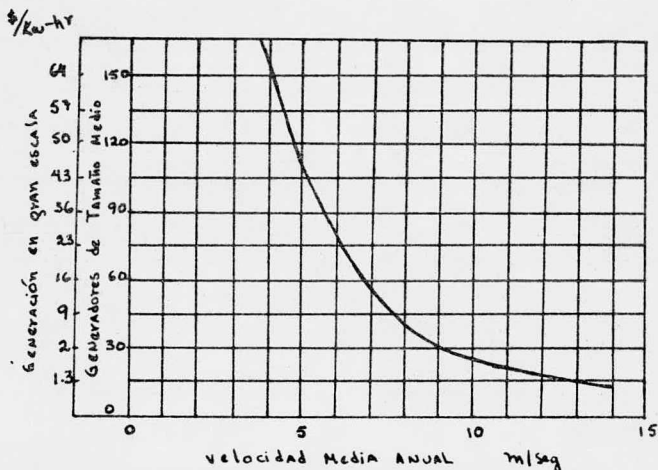
Cuando consideramos la utilización del viento para propósitos de potencia, surgen importantes preguntas, tales como:

- ¿en qué partes del mundo hay suficiente viento, como para ser económicamente útil?
- ¿qué cantidad anual de energía puede esperarse?
- ¿cómo está distribuido el viento, en función del tiempo?

Para la primera pregunta, hay que notar que dos factores importantes intervienen en la cuestión económica: la velocidad media anual y el costo de generación de potencia por métodos alternativos.

La siguiente gráfica nos muestra una curva de la variación probable de el costo de generación con la velocidad media anual.

Están dibujadas dos escalas, una para generación en grande y otra para tamaño medio; de la gráfica se deduce que el costo para unidades de tamaño medio es 2.5 veces más que el costo para grandes unidades.



Es necesario aclarar, que los datos para construir la gráfica anterior se llevaron a cabo en Gran Bretaña, en donde ya existen costos de pequeñas y grandes unidades aero-generadoras.

Sóloamente con estudios muy completos, es posible enunciar con precisión dónde y en qué escala, la generación de potencia es útil y económica. Una gran serie de medidas de la dirección y la velocidad del viento, han sido hechas, usualmente para alturas de 10 m, en todas las estaciones meteorológicas de cada país.

La estación meteorológica Británica tiene información que cubre el Atlántico; Pacífico O.N; Pacífico E.N; y Océano Indico.

P.C. Putnam da un mapa en donde señala las áreas de mayor velocidad de viento en todo el mundo.

Variaciones de la Velocidad Media con el Tiempo.

Estas variaciones pueden ser consideradas por día, por mes y por año.

Variaciones Diurnas.

Durante el día especialmente en verano, la disminución de temperatura con el incremento de altitud, causa convección termal, con el consecuente movimiento de aire a diferentes niveles.

Una parte del momentum del aire que va hacia arriba a muy alta velocidad es transmitido a las capas superficiales, causando un incremento en la velocidad de viento.

Generalmente existe la tendencia, a ser mucho mayor la velocidad de viento durante el día que durante la noche; aunque este efecto es muy marcado en lugares en donde la presión atmosférica puede cambiar a cualquier hora del día.

En lugares con velocidades de viento bajas, este efecto casi no es perceptible. Sin embargo hay lugares en donde si hay mucha variación como ejemplo, es el lugar llamado Madras (en el S.E. de India) las variaciones diurnas de velocidad, a través del año, se muestran en las curvas de la siguiente figura.

Mediciones de velocidad de viento registradas en 8 estaciones meteorológicas en Sud-Africa, muestran que hay un marcado incremento en la velocidad de viento, en el intervalo de las 10-18 horas.

En zonas próximas al mar, puede ocurrir un incremento más rápido en la temperatura de la tierra, durante el día, causando un flujo de aire del mar, que asciende como aire caliente; y un enfriamiento menos rápido del mar durante la noche, causa vientos de la tierra al mar.

Estos vientos generalmente ocurren en Israel, por ejemplo y lugares del este del Mediterráneo.

Variaciones Mensuales. Las variaciones en la velocidad y en la dirección del viento, en lugares como Inglaterra ó lugares con clima similar, son frecuentemente grandes, de día a día y en la mayoría de los casos no predecibles.

Aunque los 5 meses del año, de mayo a septiembre son los meses de menos viento, durante los cuales ocurren los vientos más fuertes, pero de muy corta duración. Sin embargo ningún período de calma ó de vientos fuertes depende de ninguna serie de datos.

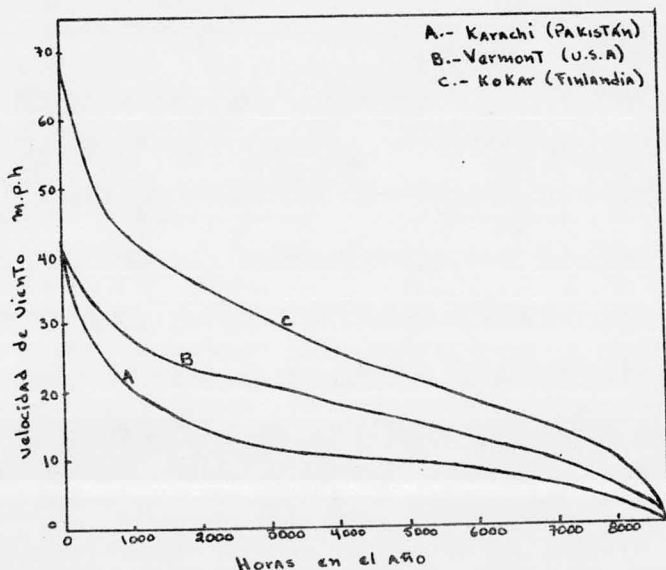
En lugares con temperaturas bajas hay mayor regularidad en los vientos diarios durante ciertas estaciones del año. Hay sin embargo una marcada tendencia en las velocidades medias mensuales. Esto se indica en la tabla siguiente, la cual nos da velocidades de viento para varios lugares en ambos hemisferios.

Lugar	velocidad mensual promedio. m.p.h.									
	En	Feb	Mar	Ab	May	Jun	Jul	Ag	Sept	Oct
hem.norte										
Inglaterra	14.4	13.8	12.5	12.3	10.8	10.7	10.6	9.9	10.8	12.8
Paris	22.8	22.0	20.8	19.6	18.7	17.0	16.6	17.9	18.4	20.8
Moscú	10.8	10.6	10.3	9.6	9.7	8.9	8.9	8.6	9.1	9.9
Linderberg	13.2	12.3	12.1	11.4	10.8	10.1	9.6	10.3	9.9	10.5
Praga	6.7	6.2	5.7	10.0	7.2	7.4	6.5	6.4	7.2	6.4
Trípoli	11.2	9.4	9.4	10.3	10.2	9.2	8.0	8.9	9.5	8.4
Seistan	4.2	5.2	5.7	7.5	9.6	11.7	14.2	13.7	11.9	6.9
Karachi	7.7	8.8	11.3	12.2	14.5	16.6	16.4	14.9	11.7	8.2
U.S.A.	11.0	11.2	11.0	11.4	9.8	9.0	8.6	8.4	8.8	9.6
hem.sur										
Wellington	9.3	9.7	8.9	8.2	7.5	8.2	9.3	10.2	10.1	8.0
Sydney	8.9	8.1	7.5	7.0	6.8	7.1	7.2	7.4	8.0	8.2
Adelaida	9.9	8.8	8.3	8.0	8.1	8.3	8.5	9.2	9.2	9.8
Asunción	2.9	3.0	3.0	3.2	3.6	4.0	4.6	4.7	5.0	5.6
Buenos Aires	10.1	10.5	8.9	9.9	8.4	8.8	9.8	10.0	11.0	10.1
Rio de Jan.	9.2	10.3	7.4	5.6	6.0	6.9	6.3	7.4	9.2	7.4
Recife	13.6	13.0	11.6	12.5	15.9	14.5	13.6	13.6	14.5	13.6

El porcentaje de variación más grande aparece en lugares cercanos a grandes montañas y climas calientes.

Variaciones Anuales.- Medidas para establecer un régimen anual en un lugar determinado incluye variaciones en la velocidad así como en la dirección del viento, ya que la dirección es un factor importante en el diseño de un aero-generador.

La velocidad del viento puede tomarse como horas anuales en las cuales la velocidad del viento se encuentra en un pequeño rango. La figura siguiente muestra curvas de velocidad-duración en un año.



Como podemos observar, las velocidades medias anuales de viento, varían para diferentes lugares y altitudes; el rango puede estar entre 1 m.p.h. hasta 40 m.p.h. ó más.

Así por ejemplo en Dibrugarh (Jordania) es uno de los lugares con más calma, tiene una velocidad media anual de 1 m.p.h., mientras que Putnam da un valor en un lugar en E.U. de 34 m.p.h. en un período de 5 años.

Sin embargo la mayoría de las velocidades medias anuales se encuentran entre 10 - 15 m.p.h.

La tabla siguiente nos muestra datos de velocidades de viento en m/seg; se da una velocidad media mensual, ó sea 12 datos de velocidades, una para cada mes del año.

Son datos proporcionados por el Observatorio Nacional, correspondientes al año de 1976, en la República Mexicana.

TABLA I

Aguascalientes, Ags.

En	Feb	Mar	Ab	Ma	Jun	Jul	Ag	Sep	Oct	Nov	Dic
2.9	3.8	2.0	1.7	2.9	2.4	1.8	2.0	2.5	2.5	2.0	1.8

Isla Guadalupe, B.C.

En	Feb	Mar	Ab	Ma	Jun	Jul	Ag	Sep	Oct	Nov	Dic
6.3	7.6	6.9	10.3	9.2	7.0	7.4	7.4	6.7	6.1	6.5	6.7

La Paz, B.C.

6.2	4.4	6.7	4.6	5.8	6.0	4.6	4.7	4.4	4.2	4.8	3.2
-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----

Puerto Cortés, B.C.

2.3	2.4	2.6	3.3	3.8	2.6	1.8	6.9	3.1	2.5	2.0	5.6
-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----

Campeche, Camp.

2.9	3.5	3.3	3.2	3.3	3.6	3.1	2.7	1.2	3.3	3.0	3.2
-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----

Saltillo, Coah.

4.8	6.1	5.4	5.3	4.7	5.5	5.1	5.5	5.0	5.1	4.3	4.3
-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----

Torreón, Coah.

3.3	3.1	3.3	3.4	2.4	3.2	2.2	2.6	1.4	2.0	1.7	1.4
-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----

Piedras Negras, Coah.

7.0	5.7	7.0	7.6	6.0	8.3	6.1	3.5	4.1	4.3	3.8	3.9
-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----

Colima, Col.

0.7 0.9 0.6 2.4 1.7 1.1 3.3 0.5 0.6 0.4 0.4 0.6

Isla Socorro, Col.

5.1 2.7 2.8 3.5 4.8 6.0 8.1 6.1 7.6 4.3 7.4 6.9

Tapachula, Chis.

1.2 4.3 5.1 1.5 2.9 1.7 2.3 1.5 1.9 3.2 2.9 3.0

Chihuahua, Chih.

4.3 6.0 7.5 6.3 4.7 4.2 3.5 3.9 3.2 2.6 2.0 3.1

Nuevo Casas Grandes, Chih.

2.7 3.4 9.4 5.0 4.1 5.7 2.5 5.1 4.7 4.2 5.7 4.0

Tacubaya, D.F.

2.5 1.8 2.3 2.5 1.6 1.4 1.7 1.7 1.7 1.7 1.6 1.8

Cd Lerdo, Durango.

2.5 3.0 2.3 2.3 2.3 3.0 2.3 2.2 1.8 2.3 1.6 2.4

Guanajuato, Gto.

2.1 3.2 4.0 3.4 3.9 3.3 3.6 2.7 4.3 4.3 2.9 2.9

León, Gto.

1.3 0.9 1.3 1.6 2.2 2.1 2.0 0.9 1.5 1.4 2.4 2.2

Acapulco, Gro.

2.9 3.7 3.1 4.4 4.5 3.0 3.2 2.4 2.2 2.4 2.8 2.3

Chilpancingo, Gro.

3.5 5.2 3.6 5.1 3.4 3.0 4.1 3.9 3.4 4.5 4.6 4.0

Pachuca, Hgo.

7.6 6.3 6.9 4.8 5.6 5.9 7.5 7.3 8.0 7.4 7.0 6.5

Tulancingo, Hgo.

3.4 2.8 3.6 4.4 4.6 4.8 3.9 3.3 3.6 3.3 4.1 2.7

Cd Guzmán, Jal.

1.6 1.2 1.8 1.5 1.7 1.6 1.0 1.2

Colotlán, Jal.

7.2 7.7 7.7 8.8 6.5 5.7 6.5 7.3 6.4 5.6 7.2 8.0

Guadalajara, Jal.

3.4 3.9 5.5 6.4 5.8 6.6 4.7 3.6 3.9 4.2 3.2 4.1

Huejucar, Jal.

8.0 7.3 7.8 7.7 7.4 7.2 6.8 6.3 7.2 6.7 6.9 6.6

Lagos de Moreno, Jal.

2.4 2.6 4.0 4.6 4.0 4.6 2.0 1.4 2.4 1.6 2.4 2.3

Toluca, Mex.

4.4 5.7 5.9 ---- 5.0 2.5 1.5 3.0 2.8 1.4 3.6 ----

Morelia, Mich.

2.0 2.0 2.2 2.2 2.0 1.5 2.0 2.3 2.3 2.0 2.0 1.0

Tepic, Nay.

1.1 1.3 1.3 1.2 1.4 1.0 1.0 1.0 1.2 1.0 1.0 1.0

Monterrey, N.L.

2.3 2.0 1.8 1.9 2.9 5.6 3.0 --- 3.3 2.5 2.0 2.0

Oaxaca, Oax.

2.8 3.0 3.8 4.7 2.9 2.5 2.4 2.6 2.2 -- -- --

Salina Cruz, Oax.

10.3 8.3 2.7 3.4 3.6 5.1 7.0 8.4 7.4 8.9 9.9 8.7

Cozumel, Q.R.

5.6 2.7 1.6 2.8 2.3 2.6 -- 2.4 4.1 2.0 6.2 --

Rio Verde, S.L.P.

2.7 1.8 4.5 4.3 4.9 2.2 2.3 3.3 3.9 2.6 2.6 3.3

Tamuín, S.L.P.

6.9 3.7 6.3 6.8 5.1 5.9 3.8 5.8 7.4 6.7 4.6 5.3

Mazatlán, Sin.

4.0 3.6 5.4 3.6 4.6 3.3 8.0 4.7 4.7 5.0 4.4 4.4

Cd Obregón, Son.

1.4 2.3 1.8 7.1 9.2 6.3 6.6 5.4 4.2 3.4 1.8 1.8

Guaymas, Son.

3.5 1.2 2.5 1.8 2.1 2.1 2.0 1.6 1.9 2.2 6.6

Querétaro, Qro.

2.2 2.2 2.1 2.0 1.6 1.7 1.9 2.9 1.5 1.1 1.9 1.7

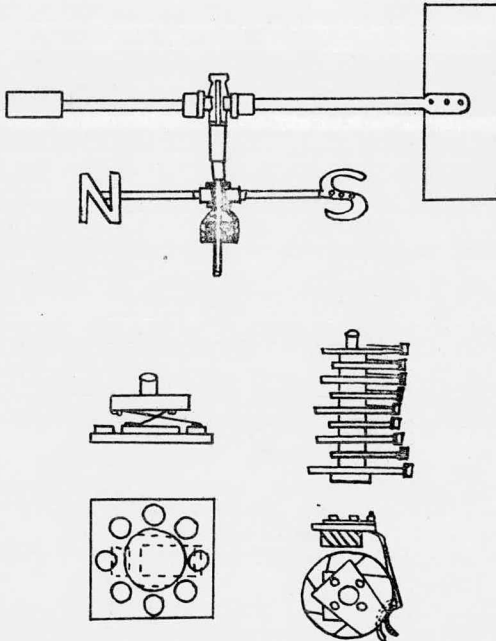
Indicadores de la Dirección del Viento.

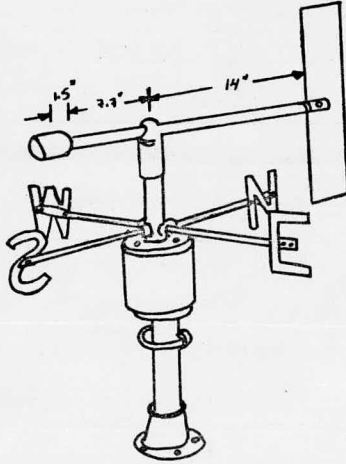
Una parte esencial del equipo utilizado para detectar la dirección del viento, es una veleta pivoteada por el viento, la cual rápidamente cambia su dirección casi simultáneamente con la del viento.

La dirección puede ser solamente observada de la posición de la veleta en relación con unos brazos fijos señalando los puntos principales de una brújula.

Estos indicadores pueden estar operados mecánicamente desde la veleta, bajo la cual están localizados, pero más convenientemente, ellos operan eléctricamente. El modelo más reciente requiere un transmisor manejado por la veleta, el cual es capaz de producir una torca necesaria y un receptor actúa como indicador.

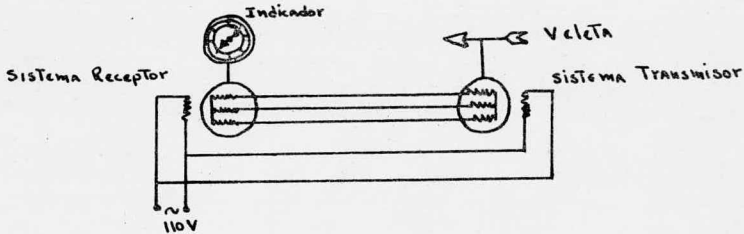
En el modelo de la mayoría de las estaciones meteorológicas, el eje de la veleta lleva consigo contactos eléctricos, los cuales al moverse sobre contactos fijos en un transmisor, causan una correspondiente rotación del indicador a través de un sistema Desynn de transmisión. Un dibujo de este completo instrumento se muestra a continuación.





El indicador Swedish utiliza un sistema de transmisión Selsyn, como se muestra en la próxima figura.

Ambos transmisor y receptor tienen un estator de dos polos, arrollamientos 3Y conectados, desplazados 120° ; sobre sus rotors están conectados los arrollamientos exteriormente, a través de anillos. Los rotors se mueven en sincronismo con cada otro y proveen un movimiento de transmisión, pero el sistema necesita una corriente alterna de abastecimiento. Parece ser que es el más eficiente pero también el más caro.



Analizadores de Dirección. Hay algunos métodos alternativos de grabar a través de transmisión mecánica desde la aguja de la veleta la cual lleva una pluma directora sobre una carta grabadora. Una dirección grabadora ó analizadora ha sido desarrollada, con el uso de un anemómetro y una veleta. La veleta mueve un brazo de contacto del anemómetro sobre un switch de 8 contactos correspondientes a los puntos principales de intervalos de 45° en una brújula. Conectados a los contactos, son 8 circuitos conteniendo registros que operan electro-magnéticamente.

Existen de hecho, una gran variedad de estos instrumentos, algunos demasiado sofisticados.

Instrumentos Para Medir la Velocidad del Viento.

Abbe, enuncia claramente los medios posibles de medición de velocidad de viento, por sus efectos, como sigue: una corriente de aire pone en movimiento un sistema susceptible a rotación alrededor de un eje; produce un aumento ó disminución de presión sobre diferentes cuerpos fijos y rígidos; enfría superficies de alta temperatura por convección; acelera la evaporación; evoca sonidos musicales de diferente tono e intensidad de aparatos susceptibles a vibración; el autor también describe métodos de medidas directas de velocidad de viento por observaciones sobre objetos flotantes, como globos y papalotes; también por efecto del viento sobre la velocidad de ondas sonoras.

Casi todos los instrumentos diseñados trabajan basándose en el primer enunciado, el efecto de rotación combinado con varias formas de registrar; a continuación se describen algunos de ellos.

Anemómetro Dines, tubo de presión.

Diseñado por W.H. Dines, es el primero en descripción, no porque sea adecuado para usarlo en lugares de alta potencia de viento, en donde el equipo de mediciones es sólo una instalación temporal, sino porque es más extensamente utilizado como anemómetro estándar en estaciones meteorológicas desde hace un buen tiempo.

En una línea de corriente de flujo, la ecuación de Bernoulli $\frac{1}{2} \rho v^2 + p = C$ expresa el hecho de que la cabeza total es una constante. El término izquierdo de la ecuación representa dos componentes de presión, ρ siendo la densidad del fluido moviéndose y v su

velocidad, p es la presión estática. Cuando el extremo de un tubo es colocado en la dirección de la corriente del viento, la constante C es la presión total actuando sobre el área seccional del tubo.

Claramente, si medimos la diferencia entre la cabeza total y la presión, el resultado es proporcional a v^2 .

Este es el principio en el cual se basa el tubo de presión del cual el instrumento Dines es una modificación.

Una corrección para densidad de aire es necesaria, en todos los tipos de anemómetros cuando estos son colocados a alturas a las cuales las condiciones son diferentes, a la altura de estandarización. W. Ferrell da una fórmula para la conversión de velocidad a presión la cual es teóricamente correcta, si la viscosidad del aire es despreciable, esta es:

$$p = \frac{0.002698}{1 - 0.004 t} v^2 \cdot \frac{P}{P_0}$$

p .- presión en lb/ft²

P_0 .- presión barométrica estándar (760 mm)

P .- presión barométrica en la estación de observación.

t .- temperatura en °C

v .- velocidad del viento en ft/seg

Para una temperatura de 15°C y $P = 760$ mm la fórmula nos queda:

$$p = 0.00492 v^2$$

Todos los valores cercanos a 0.003 son aceptados como de suficiente seguridad para todos los propósitos.

Tal formulación presión-velocidad se sostiene estrictamente para pequeñas superficies.

La parte superior del instrumento usualmente va montada sobre un mástil rígido a 13-15 m de altura; consiste de un tubo horizontal, abierto de un extremo y libre a rotar, el cual se pone de cara al viento por medio de una veleta. Este tubo es soportado dentro de otro tubo concéntrico, sujetado por 4 anillos y provisto de 4 agujeros. El viento sopla en el tubo horizontal y crea una presión, la cual es comunicada a través de un tubo de metal flexible al registrador, y de nuevo cuando el viento sopla a través de los pequeños agujeros en el tubo concéntrico crea una disminución de presión ó succión, la cual es transmitida al registrador por un segundo tubo flexible. En el registrador existe un flotador de cobre

dentro de un recipiente metálico y cilíndrico, parcialmente lleno de agua y sellado para aire.

La presión del viento desde la parte superior del instrumento, es transmitida al espacio dentro del cilindro, causando un levantamiento de agua, esto va acompañado por la succión la cual se aplica al espacio superior del flotador; conforme la velocidad del viento sube ó baja, el flotador también y sus movimientos son transferidos por medio de una varilla tubular que pasa a través de un collar de aire, a una pluma que lo registra sobre una carta.

Sin embargo por su instalación permanente, por necesitar un mástil muy rígido, y evitar en caso dado la congelación del agua dentro del cilindro, hacen de este instrumento que sea caro y no adecuado para estaciones temporales.

A pesar de ello, fue un instrumento que se utilizó por varias décadas en varias estaciones meteorológicas, reportando buenos resultados.

Anemómetros de Taza.— Es el instrumento más extensamente utilizado. Fue diseñado por T.R. Robinson en 1846. Su rotor consistía de un eje vertical que llevaba 4 brazos horizontales, ángulos rectos uno al otro, al extremo de los cuales estaban sostenidas tazas hemisféricas de láminas delgadas de metal; el margen circular de las tazas era en planos verticales que pasaban a través de ejes de rotación y sus lados convexos de cara a la dirección de rotación. La acción del instrumento dependía del hecho que la presión del viento sobre los lados cóncavos de las tazas es mayor que sobre sus lados convexos y rotaban independientemente de la dirección del viento.

Su diseño ha sido substituído por el uso de 3 tazas, lo cual da una torca más uniforme que con 4; se les da a las tazas un acabado que reduce el efecto de turbulencia en pequeña escala; se utilizan cónicas en lugar de esféricas porque reduce la sobre-estimación de flujo de viento en vientos fluctuantes y también se hizo un cambio en las dimensiones relativas de tazas y brazos .

Teoría y Funcionamiento en vientos Estacionarios.

A pesar de la aparente simplicidad del instrumento, su teoría aerodinámica es compleja y formulada para la relación entre su velocidad de rotación y velocidad del viento; bajo condiciones variantes

permanece empírica. Es claramente muy deseable que la velocidad rotacional debe ser proporcional a la velocidad del viento sobre un rango dado, y en este caso el factor anemómetro es $f = \frac{V}{v} = \text{cte}$ donde V es la velocidad del viento y v es la velocidad circunferencial de los centros de taza.

J. Patterson desarrolló la fórmula para f en la cual, 'si los brazos son muy cortos, las correcciones para su efecto sobre la torca son despreciables, el factor se reduce a $f = \frac{3.717}{(V \cdot r)^{0.113}}$

donde V es velocidad de viento;

r es radio de tazas en cm

Este factor no toma en cuenta fricción, ni la interferencia de una taza con otra. El factor f nunca es constante, sin embargo tiende a dar valores muy cercanos ó sea con muy poca variación en un rango dado, cuando la longitud de los brazos es reducida.

La tabla siguiente muestra variaciones de velocidad de viento y el factor f , son resultados obtenidos en un túnel de viento y con el más reciente modelo de anemómetro.

Los resultados muestran que en vientos estables y no mayores de 80 m.p.h. (millas por hora) (35.2 m/seg) el error del instrumento no excede a 0.6 m.p.h.

TABLA 2

vel. verdadera. m.p.h.	1.8	5	10	15	20	30	40	50	60	70
factor, $\frac{V}{v}$	4.5	3.2	3.1	3.0	3.0	2.9	2.9	2.9	2.9	2.9
vel. indicada.	1.2	4.5	9.6	14.7	19.8	30	40.2	50.4	60.4	70.5

Incidentalmente, C.E. Brazier encontró, de resultados en túneles de viento, que prácticamente no había ningún cambio en el factor f , para anemómetros de taza, cuando el plano de rotación de las tazas era inclinado al viento a 30° lo cual sugiere que arriba de esta inclinación, ellos miden la velocidad total más que meramente la componente horizontal.

Conducta en vientos fluctuantes.

Cuando se usan en la práctica anemómetros de taza en vientos fluc-

tuantes su comportamiento es diferente; Scrase y Sheppard han estudiado este tipo de conducta que se enuncia a continuación; la ecuación del movimiento del rotor del anemómetro es:

$$\frac{I}{R} \frac{dv}{dt} = M - F$$

donde :

- I.- momento de inercia
- R.- longitud del brazo
- v.- velocidad circunferencial de taza.
- t.- tiempo
- M.- acoplamiento aerodinámico.
- F.- momento de fricción.

M y R se dan en función de:

$$\frac{M}{\frac{1}{2} \rho v^2 r^2 \pi R^2} = \lambda \left(\frac{v}{V} \right)^2 + \mu \left(\frac{v}{V} \right) + \alpha$$

donde :

- ρ .-densidad del aire
- V.- velocidad media del viento
- r.- radio de taza(para tazas hemisféricas)
- λ, μ, α .-son constantes determinadas de mediciones de torca en flujo de aire estacionario.

Se hicieron variar las constantes,variando los parámetros del sistema de tazas.Los resultados obtenidos en el túnel de viento y con un anemómetro de tazas hemiesféricas mostro una sobre-estimación de velocidad de viento en vientos fluctuantes.

Entonces,se cambió el diseño de tazas,se cambió a tazas ligeramente cónicas y se obtuvieron errores mucho menores. Este diseño fue de Sheppard.

Más tarde se hizo una prueba comparativa de resultados de vientos fluctuantes,con el anemómetro Dines,anemómetro estándar de tazas cónicas y un anemómetro tipo molino de viento;los resultados se muestran en la tabla siguiente:

(los tres anemómetros situados a 27 m de altura)

TABLA 3

Tipo de anemómetro.	velocidades medias en m.p.h.												
Dines	32	31	29	36	43	41	46	47	46	45	49	47	46
de tazas cónicas	33	31	30	36	43	42	46	48	46	45	49	47	46
molino de viento.	33	32	29	37	42	42	46	48	47	45	49	48	45

III Estimación de la Energía Obtenible del Viento.

Máquinas que utilizan viento.

Extracción de potencia.

Mecanismos de transferencia.

Estimación de la energía obtenible del viento.

El viento es meramente aire en movimiento, el aire tiene masa y aunque su densidad es baja, cuando esta masa adquiere velocidad, la energía cinética resultante del viento es proporcional a $\frac{1}{2} m \cdot v^2$.

donde : ρ .- densidad del aire.

v .- velocidad del viento.

A .- área a través de la cual pasa el viento en dirección normal.

La masa de aire que pasa en la unidad de tiempo es ρAV y la energía cinética que pasa a través del área en la unidad de tiempo es P .

$$P = \frac{1}{2} A \cdot V \cdot V^2 = \frac{1}{2} \rho AV^3$$

Esta es la potencia total útil en el viento, pero al extraerla por medio de una máquina sólo una parte de ella puede ser extraída.

Las unidades de P son unidades de potencia que son Kw cuando la densidad se expresa en lb/ft^3 y V en millas por hora, y el área A en ft^2 .

Sin embargo P puede expresarse en diferentes unidades; sabiendo que la densidad del aire es de 0.08 lb/ft^3 ó de 1290 g/m^3 y utilizando la expresión general $P = K \cdot A \cdot V^3$ obtenemos diferentes valores de la constante K , dados en la tabla siguiente, para varias unidades de P , A y V .

Unidad de potencia. P	Unidad de área. A	Unidad de velocidad. V	Valor de K
Kilowatts	ft^2	m.p.h.	0.000053
Kilowatts	ft^2	Knots	0.000081
Caballo de Fuerza	ft^2	m.p.h.	0.000071
Watts	ft^2	fts/seg	0.00168
Kilowatts	m^2	m/seg	0.00064
Kilowatts	m^2	km/hr	0.000013

El peso específico del aire a 15°C y 760 mm de presión barométrica es de 0.00122. Entonces 1 m^3 de aire bajo las mismas condiciones pesará 1.22 kg.

Este peso varía de acuerdo a la siguiente expresión:

$$\text{Kg/m}^3 = \frac{1.3 \times P}{760 \left(1 + \frac{1}{273} \cdot t\right)}$$

donde P es la presión barométrica en mm; y t la temperatura en °C. La temperatura del aire puede variar desde -30°C a 40°C y la presión barométrica de 720 a 780 mm, teóricamente hay una posibilidad de que el peso del aire varíe cerca del 25%.

La densidad del aire varía con la altitud y con las condiciones atmosféricas. Para aire seco:

$$\text{densidad (g/m}^3\text{)} = \frac{\text{presión atmosférica en milibares}}{\text{temperatura en } ^\circ\text{C}} \cdot 348.8$$

La densidad disminuye con el incremento en contenido de agua, pero usualmente no se acostumbra hacer correcciones por ser demasiado pequeña la diferencia.

Potencia Extraída por una Máquina.

A. Betz mostró en 1927 que la máxima fracción de potencia que podía ser obtenida por un aero-motor ideal era de 0.593 de la potencia total que lleva consigo el viento. Si se aplica la expresión para la potencia máxima teórica tenemos: $0.593 KAV^3$

La potencia extraída es sólo una fracción de la potencia teórica, debido a las imperfecciones aerodinámicas y a que en cualquier tipo de máquina hay pérdidas eléctricas y mecánicas; la mayoría de las veces esa potencia resulta ser menor que la calculada con el factor de 0.593 pero nunca menor de 0.4.

Uno de los más importantes puntos a tratar en el diseño de un aero generador es el rango en el que se encuentra la velocidad del viento; desde la más baja a la cual puede registrarse cierta producción de energía hasta la más alta cuando la producción debe limitarse.

Velocidad de Viento y Datos de Potencia.

El hecho de que la potencia del viento es proporcional al cubo de su velocidad, hacen de esta la más importante variable de diseño de un aero-generador.

Su promedio ó distribución anual, ó frecuencia de ocurrencia es de gran importancia en el cálculo de potenciales de energía de un determinado lugar.

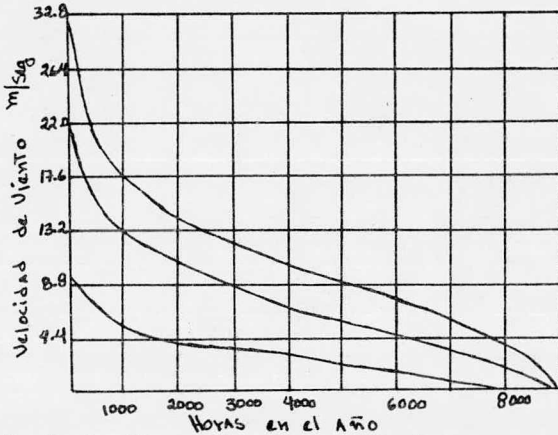
La información más esencial requerida cuando consideramos estos potenciales, es la relación de la velocidad anual de velocidades de viento de diferentes magnitudes.

Medidas de velocidad de viento determinarán velocidades medias durante el año.

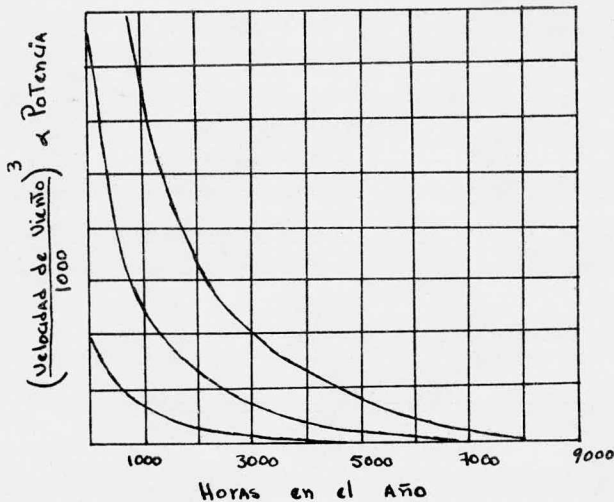
Estos datos pueden ser analizados en la siguiente forma:

- a).- Curva de velocidad-duración
- b).- Curva de velocidad-frecuencia

La curva a).- muestra en las ordenadas el rango de velocidades y en abscisas el número de horas para las cuales hay velocidades iguales como se muestra en la siguiente figura:



En la siguiente figura la curva anterior se convierte en una curva de potencia-duración, por el cubo de sus ordenadas las cuales son proporcionales a la potencia del viento para un área dada.



Transferencia de Potencia.- A. Betz del instituto Gottingen, en su estudio de molinos publicado en 1927, aplicó la simple teoría del momentum, establecida por W. J. Rankin y Froude para un propulsor de barco, a un molino. Las siguientes líneas cubren los puntos más importantes de esta teoría.

La retardación del viento pasando a través del propulsor de un molino ocurre en dos etapas, una antes y otra después de pasar a través del rotor (del propulsor del molino)

Sea: V_1 .- velocidad del viento a una distancia considerable.
 V .- velocidad del viento pasando por el rotor.
 V_2 .- velocidad del viento después del rotor.

Si M es la masa de aire pasando a través del rotor, en la unidad de tiempo, la razón de cambio de momentum es $M (V_1 - V_2)$ la cual es igual al empuje resultante.

La potencia obtenida es entonces $M (V_1 - V_2) V$

La razón de cambio de la energía cinética en el viento es:

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

estas dos expresiones son obviamente iguales y

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

donde
$$V = \frac{V_1 + V_2}{2}$$

Entonces la retardación del viento $V_1 - V$ antes del rotor es igual a la retardación $V - V_2$ detrás del rotor.

Aquí suponen que la dirección del viento a través del rotor es axial y que esta velocidad es uniforme sobre el área A .

La potencia extraída por rotor es $P = \rho A \cdot V (V_1 - V_2) V$

donde ρ es la densidad del aire.

A .-área total del rotor.

$$P = A \cdot V^2 (V_1 - V_2) = \rho A \left(\frac{V_1 + V_2}{2} \right)^2 (V_1 - V_2) = \rho \frac{A \cdot V_1^3}{4} [(1+d)(1-d)]$$

donde
$$d = \frac{V_2}{V_1}$$

Podemos fácilmente notar por diferenciación, que la potencia P es máxima cuando $d = \frac{1}{3}$, ó sea cuando la velocidad final V_2 es $1/3$

de la velocidad V_1

Entonces la potencia máxima que puede ser obtenida es $C A \cdot V_1^3 \cdot \frac{8}{27}$
 un molino ideal podría extraer el 59% de la potencia total del viento.

Coefficientes de Potencia.-

Esta simple teoría no toma en cuenta pérdidas aerodinámicas en el rotor y también supone que la velocidad del aire es uniforme sobre el área total y que la corriente de aire permanece separada de los alrededores. Se supone que una columna de aire de área seccional A se aproxima al rotor, es retardada y pasa sobre él pero con baja velocidad. Se hizo el experimento lógicamente en un túnel de viento en donde la columna de aire era mayor en área seccional que el área cubierta por el rotor del molino, de tal forma que la potencia extraída resultó mayor de $16/27 A \cdot V_1^3$.

De una forma más real, cualquier tipo de rotor, su efecto sobre el flujo de aire no es tan simple como supone la teoría del coeficiente de potencia, y las pérdidas de potencia ocurren y ciertamente reducen la fracción de potencia extraída.

El flujo de aire uniforme mencionada arriba podría obtenerse usando un número infinito de hojas sin fricción y de espesor mínimo, sin embargo hay un intercambio de flujo de aire alrededor de los extremos de cada hoja con una consecuente "pérdida extremo" la cual, sumada a pequeñas pérdidas friccionales reduce la extracción de potencia a sólo 70 - 80 % de la máxima.

La fracción de potencia extraída es lo que se conoce en esta teoría como coeficiente de potencia C_p .

De la expresión para la potencia, desarrollada de la teoría del momentum tenemos:

$$C_p = \frac{C \frac{A}{4} V_1^3 [(1+a)(1-a)]}{C \frac{A}{2} V_1^3} = \frac{(1+a)(1-a^2)}{2}$$

Una expresión alternativa la cual algunas veces es más conveniente es :

$$C_p = 4 a (1 - a)^2$$

donde a .- factor de interferencia. es la retardación fraccional de la velocidad del viento V_1 cuando se aproxima al rotor.

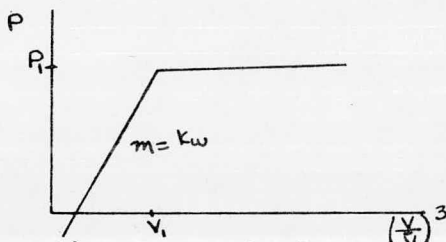
y $V = V_1 (1 - a)$ es retardación atrás del rotor y es igual a aV_1 . Es fácil mostrar que $a = -\frac{1}{2} - \frac{\alpha}{2}$

Utilizando la misma nomenclatura y razonamiento, el empuje axial que tiende a girar el molino es $\rho \frac{A}{2} V_1^2 - 4 a (1 - a)$

el cual es máximo cuando $a = -\frac{1}{2}$

Se encuentra en la literatura otra expresión para el coeficiente de potencia, obtenido de una serie de pruebas en un túnel de viento desarrolladas en el Centro para experimentos aerodinámicos en Bélgica, y llevadas a cabo por G. Fragoianis.

Sus datos se pueden graficar como se ve en la siguiente figura, variación de potencia extraída en ordenadas y el cubo de la velocidad del viento en abscisas.



y la expresión que presenta el autor para C_p es:

$$C_p = \frac{P}{\frac{\rho}{8} c n^3 D^5}$$

donde

- P.- producción de potencia en unidades eléctricas
- c.-factor requerido para convertir unidades mecánicas a unidades eléctricas.
- ρ .-densidad del aire
- n.- velocidad rotacional del rotor
- D.- diámetro del propulsor
- V.- velocidad del viento

Si la potencia es medida en unidades mecánicas, c_p está dado por

$$c_p = \frac{P}{\frac{\rho}{8} c n^3 D^5}$$

Para un cierto valor V_1 de V , dependiendo del diseño del molino y del número de Reynolds, se ve que C_p varía linealmente con $\frac{V}{nD}$. Para valores de velocidad de viento, V muy grandes, C_p varía considerablemente de prueba a prueba, dependiendo en este caso más del número de Reynolds.

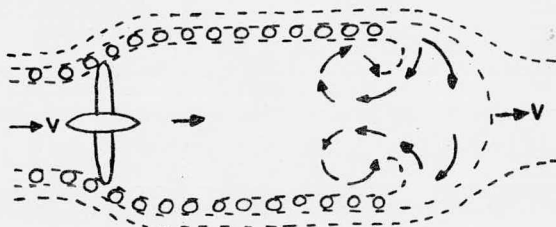
Se ha tratado de encontrar el arreglo ideal, tanto en diseño del molino como en el número de Reynolds, de tal forma que C_p se mantenga constante. ó sea $(C_p)_1$ es constante para $V \geq V_1$

El análisis dado aquí, supone que el arreglo anterior es correcto y las expresiones para C_p son:

$$C_p = K_w = \frac{V^3 - \lambda_w V_1^3}{n^3 D^5} \quad \text{para } 0 \leq V \leq V_1$$

$$C_p = (C_p)_1 = \frac{K_w (1 - \lambda_w) V_1^3}{n^3 D^5} \quad \text{para } V \geq V_1$$

Otra interesante teoría sobre la potencia que puede ser extraída por una máquina de un aero-motor es la del profesor G.K. Sabinin. Su teoría se basa en el remolino producido cuando el viento pasa a través de su disco ideal (sin pérdidas por fricción), donde la distorsión en el flujo de aire resulta de una velocidad inducida atrás del disco. Existe una depresión atrás del disco y una masa de aire es succionada dentro del remolino, con un consecuente aumento de momentum. El siguiente dibujo trata de explicarlo.



G.K. Sabinin, enuncia que el área efectiva total es la media aritmética del área seccional de la columna de aire antes y después del disco. El resultado final de esta teoría es que se incrementa el coeficiente de potencia de 0.593 a 0.687

Tipos de Máquinas.-

Existen dos tipos principales que pueden clasificarse como sigue:

- 1.- máquinas que tienen la superficie efectiva de sus rotores , moviéndose en la dirección del viento.
- 2.- máquinas que tienen la superficie activa moviéndose en uno ó varios planos perpendiculares a la dirección del viento.

Las primeras, generalmente tienen rotores que se mueven alrededor de un eje vertical el cual se orienta en todas las direcciones del viento.

Se caracterizan por su construcción simple y sus bajos coeficientes de potencia. El principio de su mecanismo es el siguiente: Cuando una superficie de área A es empujada perpendicularmente por una velocidad de viento V y densidad de aire ρ , la fuerza sobre la superficie es $C_F (\frac{1}{2} A \cdot V^2)$ donde C_F es un coeficiente de presión cuyos valores varían con la forma, naturaleza y tamaño de la superficie.

Si la superficie por si sólo se mueve con velocidad v, en la misma dirección del viento, la velocidad relativa es $(V - v)$ y la fuerza es entonces $C_F \cdot \frac{1}{2} \rho A (V - v)^2$

La potencia dada a la superficie moviéndose es entonces : $C_F \cdot \frac{1}{2} \rho A (V - v)^2 v$ la cual es máxima cuando $v = \frac{V}{3}$

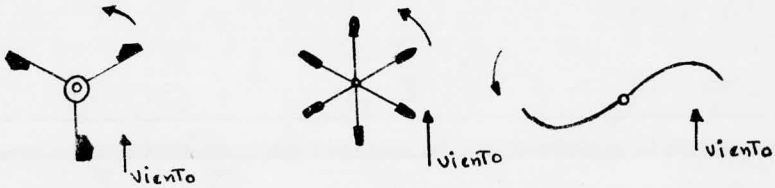
Cuando la velocidad de la superficie moviéndose es $\frac{1}{3}$ de la del viento.

La potencia es entonces $\frac{2}{27} C_F \cdot \rho A V^3$ la cual es sólo $\frac{1}{3}$ de la potencia ejercida por el viento; las otras dos terceras partes se pierden en forma de remolinos atrás de la superficie, ó son llevadas lejos por el viento.

Además de tener coeficientes de potencia bajos, otra desventaja de estas máquinas es que la superficie rotando siempre lo hace a una velocidad menor que la del viento.

La velocidad rotacional del rotor es entonces baja y esto implica la **necesidad** de utilizar engranejes costosos cuando se maneja un generador eléctrico de alta velocidad.

La siguiente figura nos muestra tres diferentes formas de estas hojas ó aspas utilizadas que desde luego están fijas al rotor, no variando su ángulo de ataque.

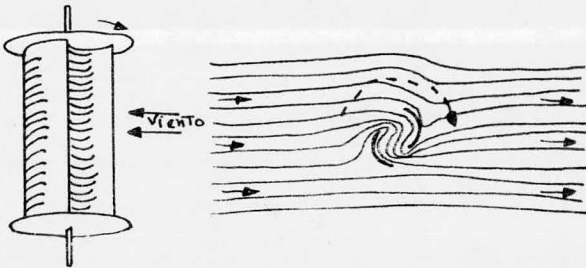


En la figura (a) se muestra un rotor con sus aspas en forma de taza del anemómetro. Una torca resultante es producida porque la presión del viento sobre las superficies cóncavas de las aspas es mayor que la presión sobre las superficies convexas presentadas al viento.

En la figura (c) una sólo lámina de metal es utilizada en lugar de aspas, pero el principio de operación es el mismo.

La figura (b) muestra un rotor con aspas que tienen superficies planas.

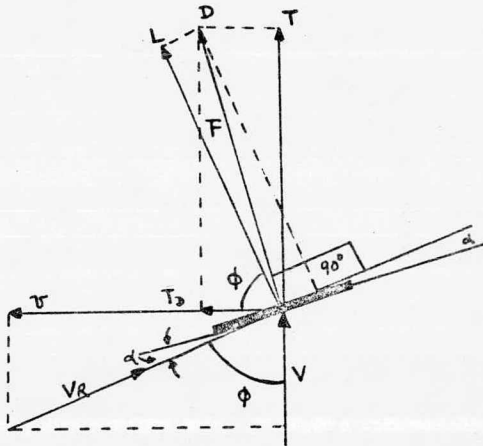
Existe otro tipo de rotor, en esta clasificación de máquinas, el diseñado por S.J. Savonius que es una modificación del rotor ya diseñado anteriormente en la figura (c)



Este rotor tiene dos partes iguales de lámina, curvadas aerodinámicamente, y desplazadas una muy pequeña distancia, de tal forma que el viento puede pasar entre ellas. Puede ser útil en producción a baja escala, pero no es aplicable en máquinas grandes; muestra coeficientes de potencia bajos y se necesita utilizar superficies muy grandes para obtener la potencia requerida, y no solo sería caro en material sino que su construcción es complicada con suficiente longitud.

En el segundo tipo de máquinas, las superficies activas de las aspas están colocadas a un muy pequeño ángulo a la dirección relativa del viento, y la fuerza directora, en lugar de estar desplazada en la dirección de la velocidad relativa, hace un ángulo con ella.

Hay algunas subdivisiones de esta clase de máquinas, sin embargo todas operan bajo el mismo principio que se da a continuación: refiriéndonos a la figura siguiente.



velocidades de viento en un elemento de hoja

Suponemos que la superficie activa, la cual usualmente es plana, tiene una sección que forma un ángulo grande ($\phi - \alpha$) con la dirección del viento.

V es la velocidad del viento cuando se aproxima a la superficie las fuerzas que actúan dentro del plano resultan en la superficie que se mueve con velocidad v en una dirección perpendicular a V . La velocidad relativa del viento es V_R la cual es el vector diferencia $V - v$.

La velocidad relativa hace un ángulo α (el ángulo de ataque) con la superficie.

Una fuerza F actúa sobre la superficie y ésta tiene dos componentes; una de elevación la fuerza L perpendicular a la velocidad relativa; y una fuerza de arrastre D paralela a esta velocidad.

El arrastre causa resistencia al movimiento de la superficie en el aire con una consecuente disipación de energía en forma de remolinos en la rotación.

La elevación tiene una componente que proporciona la fuerza directora sobre la superficie. Las superficies de las aspas se diseñan a tener relaciones de elevación/arrastre lo mas grande posible generalmente esos valores están entre 50 y 100

Introduciendo la presión $\frac{1}{2} \rho A V_R^2$ de la velocidad relativa del viento sobre la superficie de área A estas dos fuerzas (elevación y arrastre) pueden ser escritas de la siguiente forma:

$$L = C_L \cdot \frac{1}{2} \rho A \cdot V_R^2$$

$$D = C_D \cdot \frac{1}{2} \rho A \cdot V_R^2$$

Donde C_L y C_D son coeficientes de elevación y de arrastre, respectivamente. Estos coeficientes pueden determinarse experimentalmente para cualquier perfil aerodinámico; ellos varían con el ángulo de ataque.

La fuerza F puede proyectarse en dos componentes, T y T_D .

La primera en la dirección del viento V, y T_D en la dirección del movimiento de la superficie, es la componente directora.

Estas fuerzas componentes están relacionadas con las fuerzas de elevación y arrastre por las siguientes ecuaciones:

$$T = L \sin \phi - D \cos \phi$$

$$T_D = L \cos \phi - D \sin \phi$$

si k es la relación D/L podemos escribir:

$$T = L \sin \phi (1 - k \cot \phi)$$

$$T_D = L \cos \phi (1 - k \tan \phi)$$

La potencia útil dada a la máquina es $T_D \cdot v$ mientras que la potencia en el viento llegando a la máquina es T.V así que la eficiencia

cia de la máquina es η .

$$\eta = \frac{T_D \cdot v}{T \cdot V} = \frac{1 - k \tan \phi}{1 - k \cot \phi} = \frac{1 - k \frac{v}{V}}{1 + k \frac{v}{V}}$$

ya que $V \sin \phi = v \cos \phi$

La eficiencia entonces depende del valor de k y de la relación $\frac{v}{V}$.

Si no hay fuerza de arrastre, ó sea cuando k es cero, la eficiencia sería uno. Actualmente k puede adquirir valores mas pequeños.

La eficiencia es baja si la relación $\frac{v}{V}$ es muy grande.

En la práctica la velocidad de movimiento v de la superficie es grande comparada con la velocidad de viento V , así que sólo la primera de estas tres posibilidades es necesario considerar.

En la práctica la teoría desarrollada aquí es mucho más compleja, algunas suposiciones no se pueden sostener cuando ya está funcionando la máquina. Por ejemplo, supusimos que la totalidad de la superficie activa se movía lateralmente con velocidad v , en la práctica este movimiento es rotacional y esto introduce complicaciones que hacen cambiar la velocidad relativa del viento V_R y el ángulo de ataque.

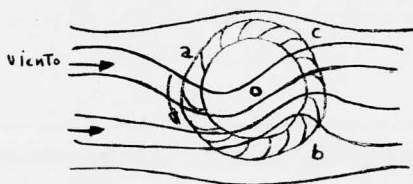
Cuando los rotores tienen hojas ó aspas montadas radialmente sobre ejes horizontales, la velocidad de la superficie v se incrementa con el radio a lo largo de la hoja, así que cada elemento radial debe ser considerado al calcular la torca directora total.

Cuando se encuentra un valor óptimo de la relación $\frac{v}{V}$ para obtener eficiencia máxima, implica que las dos velocidades v y V variarán juntas y en la práctica esto es muy difícil si no casi imposible de alcanzar.

Dentro de esta clasificación de máquinas, existe otro tipo, las que tienen ejes verticales, con rotores tipo turbina.

Tienen construcción simple, evitan mecanismos de control de velocidad y aceptan vientos en cualquier dirección y sin orientación, esto las hace superiores a las de propulsor con ejes horizontales. Lacroix, dice que la teoría precisa de su mecanismo no ha sido establecida, estas son manejadas por fuerzas del flujo de viento

como se muestra en la siguiente figura:



El considera que el flujo del viento se distorsiona por el efecto Magnus, el rotor se comporta como un cilindro.

El viento sopla el arco ab y produce sólo una pequeña torca directora; la torca principal es proporcionada por el viento que va y viene sobre el arco bc mientras las hojas sobre el arco ca dan una torca de frenado, así que ellas se mueven con el viento, aunque con sus superficies convexas encontradas.

Hay una obvia desventaja, su baja eficiencia debido a que la torca directora es doble sólo cuando hay diferencia entre las torcas opuestas.

El efecto Magnus se presenta cuando un cilindro gira a una muy alta velocidad en un viento transversal, el flujo de aire alrededor del cilindro no es simétrico y una presión es ejercida sobre el cilindro en una dirección perpendicular al viento y entonces el cilindro actúa como un diseño aerodinámico de aspa.

IV Características de Aero-generadores

Propulsor ó hélice.

Sistema de transmisión.

Acoplamiento al generador.

Sistema de almacenamiento.

Sistema de conversión de energía.

Producción y costos.

Virtualmente toda la energía eléctrica es producida por rotación de generadores eléctricos, los cuales producen electricidad por rotación de sus magnetos, colocados uno frente a otro.

Las compañías de electricidad utilizan grandes generadores accio por turbinas de vapor, ó en el caso de plantas hidroeléctricas, por turbinas de agua. El vapor que mueve las turbinas es producido por la ebullición de grandes cantidades de agua, el calor lo suministra cualquier combustible, en la mayoría de los casos carbón.

Las nuevas plantas de energía atómica producen energía eléctrica con turbinas de vapor, sólo que el vapor de agua lo producen utilizando la fisión radiactiva.

En un automóvil, el generador es accionado por la energía que inicialmente suministra la gasolina ó el diesel.

Todas las formas de producir electricidad tienen el mismo principio, un generador rotando accionado por una fuente externa de energía.

El generador accionado por viento no es la excepción, el generador aquí es accionado por una hélice la cual se ve obligada a girar cuando la fuerza del viento actúa sobre ella. Esta hélice utiliza como combustible el viento.

En si una unidad aero-generadora está constituida por :

- 1.- Un propulsor ó hélice
- 2.- Planta generadora
- 3.- Sistema de almacenamiento
- 4.- Sistema de conversión de energía.

Trataremos a continuación cada una de estas partes, describiendo sus funciones principales así como sus variables de diseño.

TIPOS DE PROPULSORES.-

Reducido a sus términos más simples el propulsor de un molino, consiste de un número de hojas dispuestas radialmente alrededor de una flecha a la cual están unidas, usualmente van colocadas paralelas a la dirección del viento, de forma que ellas rotan en un plano aproximadamente normal a esta dirección.

La flecha ó rotor siempre va colocado en la parte superior de una estructura soporte, de considerable altura.

Las hojas del rotor estan modeladas a seguir uno de los diseños convencionales cuyas características aerodinámicas son conocidas, pueden ser de varios materiales, pueden variar en número desde 2 hasta 12, pueden ser discontinuas ó del mismo ancho, también pueden estar en un sólo plano ó giradas.

Su inclinación puede ser fija ó variable; pueden estar rígidamente montadas ó un poco flexibles ó mas bien flojas de modo que les permita relevar esfuerzos por cambios rápidos de velocidad.

El material utilizado para estas hojas ó aspas debe ser fuerte y ligero y no debe estar sujeto a deterioros serios por condiciones climáticas malas.

La madera es usada para hojas de pequeños rotores, los materiales plásticos se usan también pero no en grandes propulsores .

Para rotores grandes, se utilizan aceros inoxidables ó aleaciones de aluminio; actualmente para tamaños medios se usa fibra de vidrio.

Características de hojas y velocidad rotacional.

Bajo la teoría de los remolinos la cual se discutió anteriormente se suponía que la totalidad de la superficie activa se movía con velocidad v cuando encontraba una velocidad de viento V .

La combinación de estas dos velocidades daba una velocidad resultante V_R formando un ángulo de ataque con la superficie, produciendo fuerzas de elevación y de arrastre perpendicular y paralela respectivamente a la dirección de V_R .

La velocidad relativa del viento tiene una tercera componente, la que produce el movimiento de aire local asociado con fuerzas aerodinámicas sobre las hojas ó aspas. Esto se mencionó anteriormente cuando se habló de pérdidas por golpe.

En un rotor tipo propulsor la totalidad de la superficie activa de la hoja no está por supuesto moviéndose con velocidad v uniforme. Para una velocidad de rotación dada, N (r.p.m.) del rotor, la velocidad v de una sección de hoja a radio r está dada por:

$$v = 2\pi r.N$$

Asi que v se incrementa con el radio a lo largo de la hoja y en su extremo donde el radio es R , $v = 2\pi R.N$

Entonces para una velocidad V uniformemente distribuída sobre la superficie del rotor, tanto la magnitud como la dirección de la ve-



locidad relativa del viento varían con el radio r .

Esto implica que la fuerza de elevación también variará con r .

Cálculos detallados de esfuerzos sobre hojas están basados en secciones elementales de hojas. De las mediciones de estos esfuerzos se ve que hay variaciones cíclicas de éstos y que se deben exclusivamente a la reducción en la velocidad del viento al llegar a la torre.

Fundamentalmente, existen dos esfuerzos máximos sobre las hojas; uno se debe a la fuerza centrífuga desarrollada por el propulsor, que trata de arrancar las hojas del eje del rotor; el otro esfuerzo máximo es causado por la fuerza del viento, que trata de doblar la hoja a un determinado radio, dependiendo de la dirección del viento.

Información sobre coeficientes de elevación para diseños convencionales tales como los que se usarían en hojas de molino, existen en la literatura; para coeficientes de pérdidas por golpe también; pero para coeficientes de arrastre los cuales dependen del terminado de la hoja están sujetos a cierta incertidumbre y no se encuentra información sobre ellos.

La fuerza de elevación para una velocidad relativa se incrementa con el ángulo de ataque α , hasta que alcanza el valor máximo, cerca de 15° ; después la elevación disminuye.

Para una alta eficiencia las secciones de hoja deben estar modeladas de modo que presenten la más grande elevación y el mínimo arrastre posible.

Para extraer la potencia óptima en cada sección de hoja es necesario que tanto la forma y el ángulo de hoja cuyo eje principal hace ángulo con el plano de rotación, sean variados para así acomodar los cambios de magnitud y dirección de la velocidad relativa del viento.

La mínima velocidad periférica $2\pi r.N$ para una velocidad de viento dada, se presenta cuando se forma el ángulo más grande, formado por la velocidad relativa del viento con el plano de rotación. Como se ve se trata de mantener el mejor ángulo de ataque, el ángulo de hoja variará continuamente a lo largo de ella y será más grande cerca del eje y mínimo en el extremo.

Con un coeficiente de elevación constante, la anchura de la hoja disminuirá de su valor más grande al mínimo en su extremo unido a la flecha.

Las implicaciones son entonces, que las hojas deben tener un giro, y su ancho debe ser discontinuo, en efecto las porciones internas de hoja contribuyen poco a la potencia extraída por el molino.

El alto costo de construcción de estas hojas comparado con el bajo costo de hojas rectangulares planas y sin giro, debe considerarse en la posible ganancia de energía utilizando las primeras.

Si el rotor corre a una velocidad rotacional constante; si maneja un alternador para suplir electricidad a frecuencia constante, una complicación más es introducida. El ángulo de hoja para eficiencia óptima sólo puede calcularse con la suposición de la relación

$\frac{2\pi r.N}{v}$ y así el ángulo de ataque permanece constante;

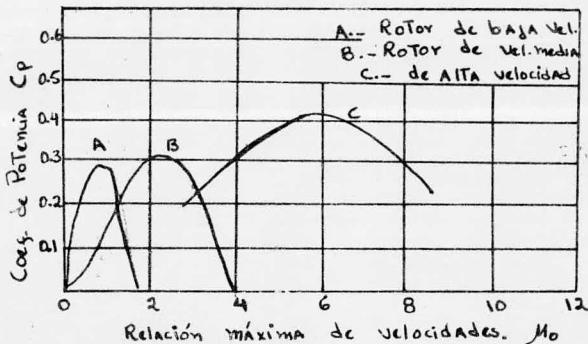
Sin embargo esto no puede ser ya que N no puede ser constante , debido a la variación de V .

Entonces sí V se incrementa, el ángulo de ataque α también, así como la fuerza de elevación.

El coeficiente de potencia del rotor varía con la relación que existe entre la velocidad rotacional y la velocidad del viento, y mas convenientemente expresado como relación máxima de velocidades

$$M_o = \frac{2 \pi R \cdot N}{V}$$

La figura siguiente da coeficientes de potencia para diferentes hojas usadas en rotores de alta y baja velocidad, estas curvas muestran valores óptimos de M_o ; los cuales van de 1 para rotores lentos ó de baja velocidad rotacional y de muchas hojas; 2.5 para molinos antiguos de 4 ó 6 hojas ; y de 6 ó mas para modernos rotores de alta velocidad con sólo 2 ó 3 hojas.



Sí la velocidad rotacional del rotor se pudiera mantener proporcional a la velocidad del viento, se obtendría producción máxima de energía; pero esto es imposible en la práctica, primero porque la inercia del rotor es alta y segundo por la velocidad variable del viento.

Betz mostró que la extracción de potencia máxima a cualquier radio r de hoja es :

$$\frac{1}{C_L} \cdot \frac{16}{9} \cdot \left(\frac{V_1}{\omega r} \right)^2 \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{4}{9} \left(\frac{V_1}{\omega r} \right)^2} \left(1 - \frac{3}{2} k \frac{\omega r}{V_1} \right)}$$

donde C_L .- coeficiente de elevación

V_1 .- velocidad de viento

ω .- velocidad angular del rotor

k .- arrastre/elevación.

El último término usualmente no difiere de la unidad.

La eficiencia del rotor nos queda:

$$\eta = \frac{1 - k \frac{V}{V}}{1 + k \frac{V}{V}} = \frac{1 - k \frac{\omega r}{V}}{1 + k \frac{V}{\omega r}}$$

En el reporte presentado por Betz (se discuten los molinos aerodinámicos de alta velocidad, y se llega a conclusiones basadas en el análisis de un cierto número de hojas; algunas de ellas se enuncian aquí:

- 1.- el mejor número de hojas es dos.
- 2.- hojas de bajo arrastre y óptima forma plana son de pequeña ventaja a radios menores de 1 m.
- 3.- la eficiencia máxima puede ser mantenida con una velocidad variable del rotor.

El costo de construcción de las hojas con coeficientes máximos de potencia debe ser comparado con el de una hoja barata con menor eficiencia.

La potencia está dada por $P = C_p \cdot \frac{\rho}{2} \cdot A \cdot V^3$

donde A es el área cubierta por las hojas.

El incremento de área cuando el radio R es aumentado por una pequeña cantidad es $2 R \cdot \Delta R$

Si por ejemplo C_p se reduce a $9/10$ de su valor, la misma potencia puede ser producida por un incremento de área A , de $10/9 A$; y se calcula la fracción de R que debe aumentarse.

La eficiencia de la unidad dependerá en gran parte del tipo de propulsor que se use ;casi todos los diseños modernos llevan de 2 a 3 hojas;estos eficientes propulsores operan a relaciones muy altas de velocidad máxima del propulsor a la velocidad del viento. Idealmente el propulsor tipo para molino ,debería mostrar características similares a los diseños de hojas para propulsores de helicópteros;sin embargo cabe aclarar que ellos están diseñados para mover aire,y en el caso de hojas para molino ,éstas serán movidas por el viento.

Los propulsores con dos hojas,son mas económicos sin embargo presentan dificultades en problemas de vibración y de orientación. Estas dificultades desaparecen para 3 hojas,operan más fácilmente y permiten un diseño mas elemental para el resto de la máquina. La orientación usualmente se lleva a cabo por medio de una veleta ó por comando automático.

A través de experimentos en un túnel de viento,se mostró que el perfil de la siguiente figura es el más ventajoso.

Se encontró que un molino con 3 hojas de esta forma y con una velocidad de 6m/seg ;el coeficiente de potencia adquiere un valor máximo cuando la velocidad máxima del rotor es 5 ó 6 veces más alta que la del viento.

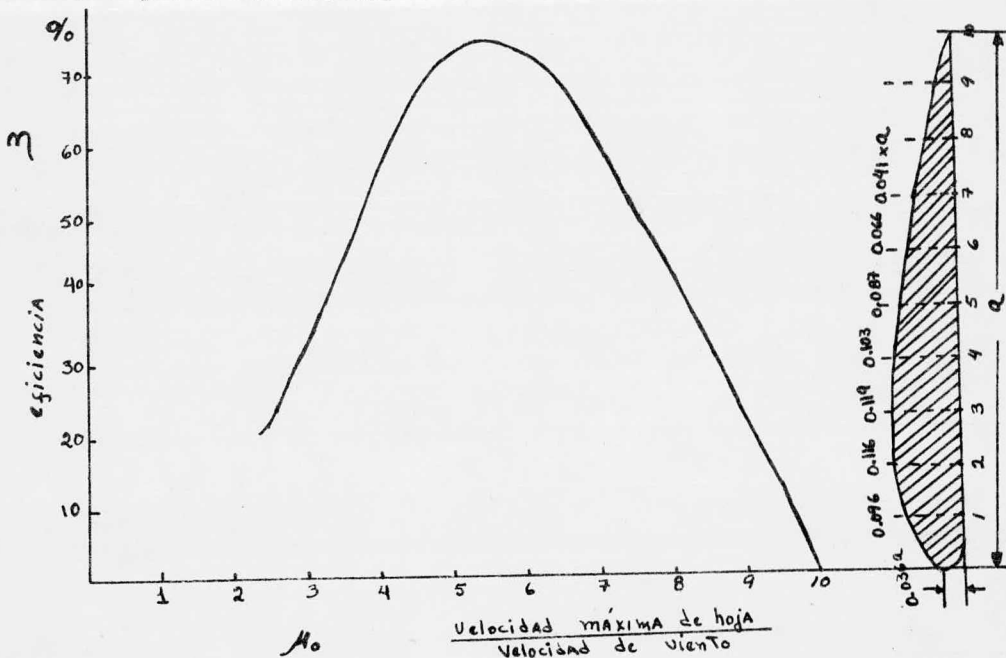
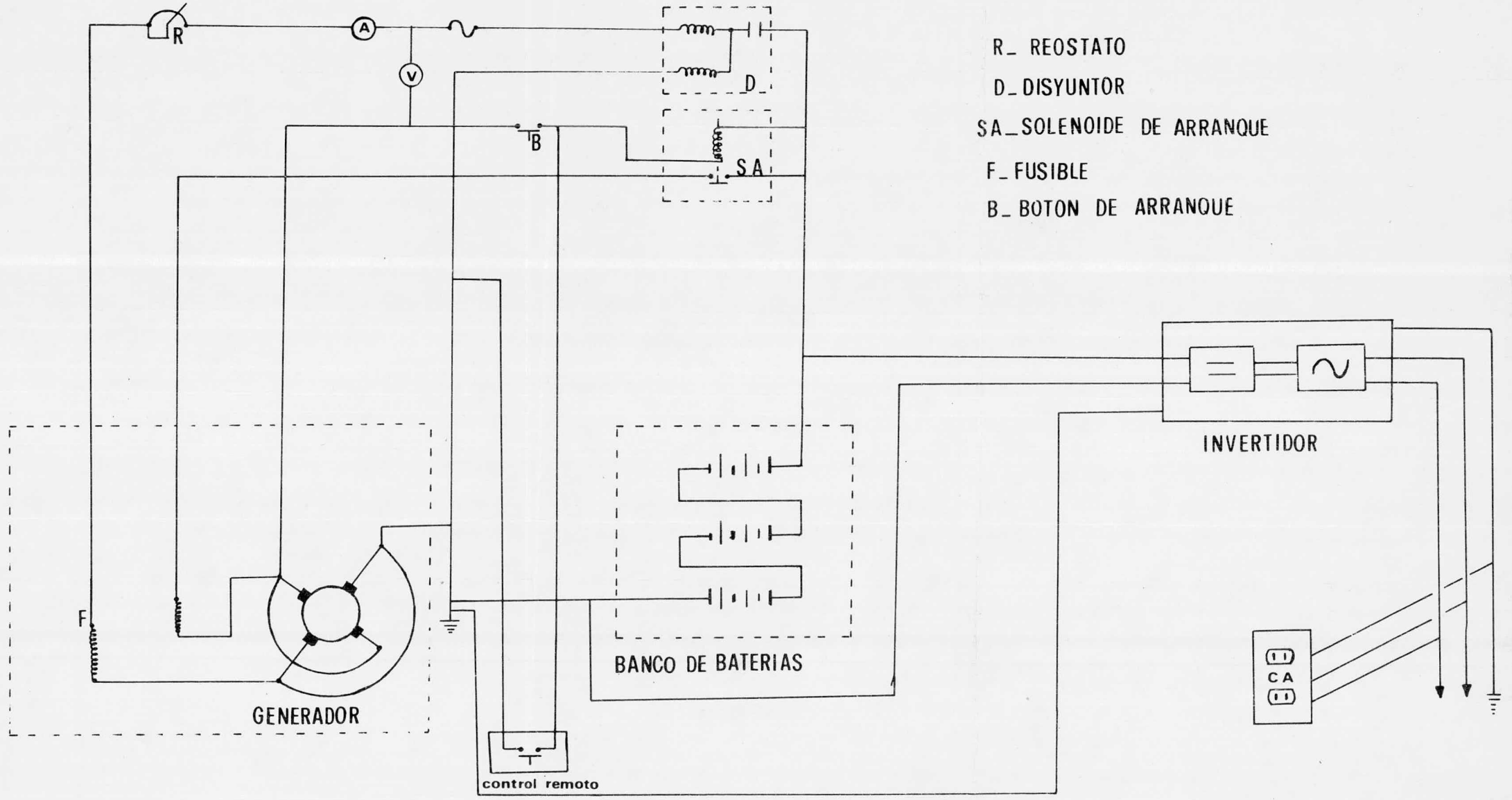


DIAGRAMA ELECTRICO



Control de Velocidad y de Producción.

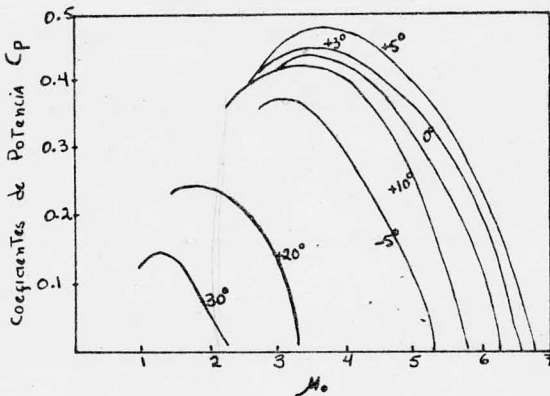
En máquinas de velocidad variable, tales como aquellas que abastecen lugares individuales, controlar la velocidad depende de las características del generador de c.d. y de la batería, así como del control de velocidad del rotor por sí solo.

Es sin embargo necesario limitar la producción de energía a velocidades de viento altas, a las potencias máximas del generador.

Un método de controlar la velocidad y por lo tanto la producción de pequeñas máquinas es el uso auxiliar de aspas freno rotando con el rotor pero con un sistema de frenado cuando la velocidad rotacional excede el valor dado.

En otras pequeñas máquinas se utiliza la fuerza centrífuga desarrollada sobre las hojas, de tal forma que se efectúa un cambio de espaciado entre ellas; las hojas pueden estar encajadas en el eje en forma de espiral ó de tornillo, de tal forma que cuando la hoja es empujada radialmente hacia afuera por la fuerza centrífuga ó alternativamente se encajan más cuando el centro de gravedad de la hoja descansa en el eje de rotación.

Ulrich Hutter considerando la influencia de la frecuencia de velocidades de viento ocurrentes en un lugar dado y relacionándola con la velocidad de rotación más económica para un molino dado, muestra curvas que presentan la variación de coeficientes de potencia con el ángulo de hoja; y con la relación máxima de velocidades, que como mencionamos anteriormente es la relación entre la velocidad máxima del rotor a la velocidad del viento.



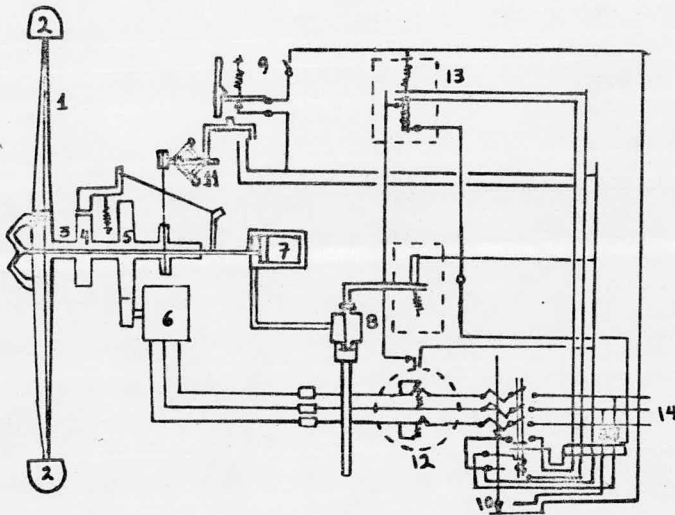
De la gráfica anterior se puede concluir que las hojas colocadas a 5° es la posición más favorable para ese régimen de velocidades .

Para arrancar y parar el molino un pequeño molino piloto es siempre sugerido y es el mejor método.

Los propulsores con espaciamento fijo y hojas delgadas no arrancan por si s6los,son arrancados con el uso del generador.

Este método no es muy exitoso para máquinas grandes de c.a. las cuales pueden ser arrancadas por un molino piloto,iniciando con ajuste de espaciamento.

Un ejemplo simple de arreglos de control,los cuales son hechos para un aero-generador de tamaño medio,con dos hojas,se pueden ver en la figura siguiente:



- Donde:
- | | |
|----------------------------------|----------------------------|
| 1.- propulsor del molino. | 10.- switch del generador. |
| 2.- aletas de frenado. | 11.-regulador centrífugo. |
| 3.- eje del rotor. | 12.- relays de corriente. |
| 4.- freno mecánico. | 13.- switch de corriente. |
| 5.- engranes. | 14.- a línea de corriente. |
| 6.- generador | |
| 7.-cilindro de presión de aire. | |
| 8.- válvula reguladora. | |
| 9.- switch de presión de viento. | |

En adición al freno mecánico (4) el frenado en caso de fracaso puede ser provisto de pequeñas aletas en los extremos de las hojas. (2). Estas pueden rotar en un plano perpendicular a las hojas por medio de una barra deslizante, cubriendo las hojas y un cable de acero unido a un sistema de palanca sobre el eje principal. Cuando el circuito principal se rompe se abre una válvula y permite que las aletas paralelas a las hojas rápidamente corran por el rotor. Un generador de inducción (6) es manejado desde el eje principal a través de la caja de transmisión (5) y entrega su potencia a través de un switch que opera electromagnéticamente. Un regulador que opera centrifugamente entra al generador cuando la velocidad de viento alcanza un punto abajo del cual no se cubre para producir potencia en ese generador.

Características del Controlador.- Se conocen 3 formas de controlar la velocidad para limitar la producción de potencia a una capacidad completa del generador, ellas son: "wind spilling"; freno de aire y cambios de espaciamento operados centrifugamente.

Idealmente el controlador debería venir dentro de operación, sólo a velocidades de viento de un rango dado y debería operar reduciendo la eficiencia del rotor, así que a altas velocidades de viento, la producción permaneciera constante a su capacidad total.

Ningún controlador opera repentinamente de esta forma, ellos empiezan a afectar la producción a velocidades de viento bajas al rango de producción y ejercen una influencia grande a velocidades de viento altas.

El controlador "wind spilling" vuelve el rotor y lo coloca fuera de acción del viento por rotación de un eje vertical, hasta un giro de 90°, hasta parar la máquina cuando la velocidad es peligrosamente alta. Puede operarse por un mango plegadizo en la base de la torre.

Acoplamiento al Generador.- El sistema generador de viento, implica un propulsor acoplado mecánicamente a través de un sistema de transmisión a un generador de corriente alterna ó directa.

Usualmente van estas tres partes de la unidad en una plataforma giratoria sobre la torre ó soporte.

El problema principal puede expresarse como sigue:

- a).- diámetro del molino
- b).- velocidad media del viento
- c).- relación de engranaje entre propulsor y generador
- d).- potencia producida por el generador

Si la velocidad del viento fuera constante estos parámetros serían muy simples, se encontraría una relación de engranaje tal que se obtendría eficiencia máxima siempre.

Si la potencia nominal del generador es suficientemente alta como para absorber la potencia útil a muy altas velocidades de viento, será indudablemente un generador muy costoso y pesado, y esto incrementa el costo de la torre. Si el generador es muy pequeño, ó de baja potencia nominal, resultaría el molino caro en relación con la producción de energía.

El generador óptimo descansa entre ambos extremos, pero ¿cuanta fracción del tiempo total trabaja a su potencia nominal?

Muchos factores entran en este problema, algunos pueden expresarse matemáticamente, otros no.

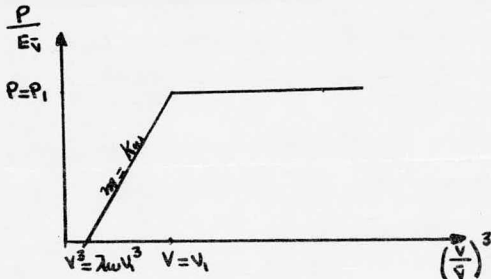
El problema se puede describir en función de características físicas y se puede enunciar como sigue:

- a).- la producción de potencia del molino como función de la velocidad del viento
- b).- la producción de potencia del generador como función de la potencia mecánica entregada
- c).- la producción del generador como función de la potencia mecánica y de la función velocidad-duración del viento.

Los resultados aquí presentados se llevaron a cabo en un túnel de viento para varios rotores y presentados por los estudios hechos por G. Sterne y G. Fragoianis.

La potencia mecánica P extraída del viento es preferible graficarla con el cubo de la velocidad del viento en lugar de la velocidad por sí sola, ya que como se vió la potencia es proporcional al

cubo de la velocidad. La figura siguiente muestra una gráfica idealizada de la variación de la potencia con el cubo de la velocidad de viento.



En detalle, los autores enuncian el coeficiente de potencia como:

$$C_p = \frac{P}{\frac{\rho}{8} c n^3 D^5}$$

- donde :
- P.- producción de potencia medida en unidades eléctricas.
 - c.- factor requerido para convertir unidades mecánicas en eléctricas.
 - ρ .- densidad del aire
 - n.- velocidad rotacional del rotor
 - D.- diámetro del molino
 - V.- velocidad del viento.

Si P es medida en unidades mecánicas, tenemos $c_p = \frac{P}{\frac{\rho}{8} n^3 D^5}$

Dependiendo del valor de V_1 de V ó sea un valor de la velocidad de viento dentro del rango de velocidades, y del número de Reynolds resulta que C_p varía linealmente con $\left(\frac{V}{n D}\right)^3$

Para valores grandes V, la forma de la curva de C_p contra V, varía considerablemente de prueba a prueba; dependiendo del diseño y del número de Reynolds.

Así que C_p es constante para $V > V_1$; esto es una suposición ideal para encontrar un arreglo entre el diseño y el Reynolds, y el tratamiento dado a continuación está basado en esta suposición.

Y podemos escribir los coeficientes en función de la producción de potencia, como sigue:

$$C_p = k_w = \frac{v^3 - \lambda_w v_1^3}{n^3 D^3} \quad \text{para } 0 \leq v \leq v_1$$

$$C_p = C_{pl} = \frac{K_w (1 - \lambda_w) v_1^3}{n^3 D^3} \quad \text{para } v \geq v_1$$

Utilizando los resultados de estas pruebas ,para calcular la producción del generador,es más útil reescribir las ecuaciones anteriores en la forma:-

$$\frac{P}{E_{\bar{v}}} = k_w \left(\frac{v^3}{\bar{v}^3} - \lambda_w \frac{v_1^3}{\bar{v}^3} \right) \quad \text{para } 0 \leq v \leq v_1$$

$$\frac{P}{E_{\bar{v}}} = \frac{P_1}{E_{\bar{v}}} = k_w (1 - \lambda_w) \left(\frac{v_1^3}{\bar{v}^3} \right) \quad \text{para } v \geq v_1$$

$$\text{donde } E_{\bar{v}} = \frac{\pi c}{8} \rho \bar{v}^3 D^2$$

y \bar{v} es la velocidad media anual del viento.

Entonces la producción de potencia se incrementa linealmente con v^3 hasta $v = v_1$;cuando esto sucede se alcanza el valor máximo de P_1 ; precisamente cero potencia es producida cuando $v^3 = \lambda_w v_1^3$

Acoplando un generador A.C. al propulsor.

La función del generador es convertir potencia mecánica P producida por el propulsor ,en potencia eléctrica E .

La eficiencia del proceso es menor que la unidad.

Si P y E son medidas en las mismas unidades , $E < P$

Algunas veces resulta cómodo suponer la producción del generador constante, en su valor medio de producción, y la eficiencia correspondiente a este valor es la que se considera, sobre el rango de operación; esto es E varía de cero a E_R . Una cierta potencia mecánica es requerida para correr el generador a producción de potencia eléctrica cero, y la potencia eléctrica se incrementa linealmente para altas producciones de potencia.

Podemos escribir: $E = k_G \rho - \lambda_G E_R$

donde $\lambda_G E_R$ es la potencia mecánica correspondiente a cero producción eléctrica.

Muy aproximadamente λ_G es una constante para un orden dado de magnitud de E_R ; su valor disminuye de 0.2 para 1 Kw; a 0.05 para 100 Kw.

Arrancar el propulsor y generador solamente requiere que:

$$P = P_1 \quad \text{cuando} \quad E = E_R$$

substituyendo esta relación en la ecuación anterior tenemos:

$$(1 + \lambda_G) E_R = k_G P_1$$

y combinando las ecuaciones anteriores nos queda:

$$\frac{E}{E_V} = k \left(\frac{V^3}{V_1^3} - \lambda \frac{V_1^3}{V^3} \right) \quad \text{para} \quad 0 \leq V \leq V_1$$

$$\frac{E}{E_V} = \frac{E_R}{E_V} = k (1 - \lambda) \frac{V_1^3}{V^3} \quad \text{para} \quad V > V_1$$

donde $k = k_w k_G$

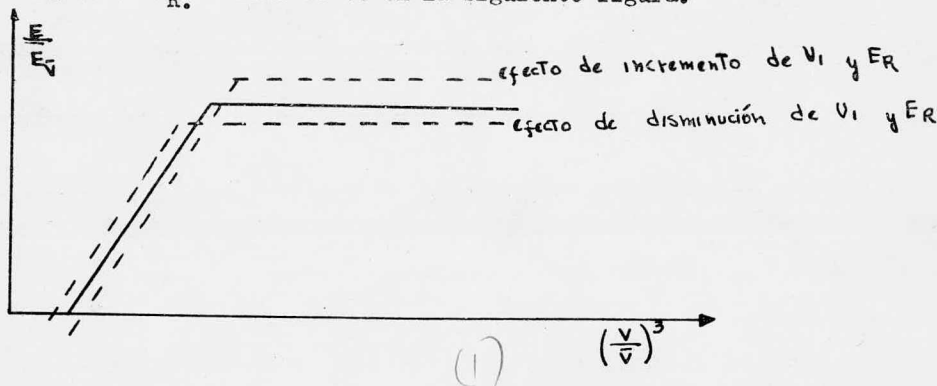
y

$$\lambda = \frac{\lambda_w + \lambda_G}{1 + \lambda_G}$$

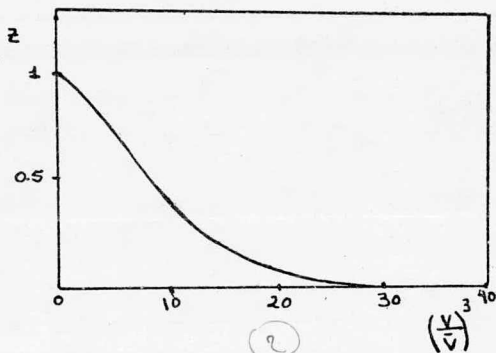
Entonces la producción eléctrica del generador es cero a velocidad de viento igual a $\sqrt[3]{\lambda} V_1$

abajo de esta velocidad la producción es negativa, y arriba la potencia eléctrica varía linealmente con V^3 .

Arriba de $V = V_1$ valor al cual se alcanza la potencia nominal E_R del generador; y a más alta velocidad que V_1 la potencia permanece igual a E_R . Como se ve en la siguiente figura.



Función velocidad de viento-duración.



Como se muestra en la figura anterior, el efecto de incremento de V_1 reduce la producción a baja velocidad y la incrementa a velocidades altas. La importancia relativa de estas pérdidas y ganancias dependen de la frecuencia relativa del viento, ó sea de la forma de la función duración-velocidad.

Esta función, $Z(V)$ está definida como la proporción de tiempo, (sobre un año) en el cual la velocidad de viento excede el valor V , entonces para pequeños valores de δV , la proporción de tiempo durante el cual la velocidad se encuentra entre V y $V + \delta V$

$$\text{es: } - \frac{dz}{dV} \delta V$$

Suponiendo que el generador es interrumpido a velocidades de viento para las cuales la producción del generador sería negativa, la producción media anual es:

$$\bar{E} = \int_{\frac{V_1}{\lambda}}^{\infty} E \left(- \frac{dz}{dV} \right) dV$$

y substituyendo el valor de E dado en la ecuación anterior, las ecuaciones de la hoja anterior nos quedan:

$$\frac{\bar{E}}{E_V} = k \left\{ \phi \left(\lambda \frac{V_1^3}{V^3} \right) - \phi \left(\frac{V_1^3}{V^3} \right) \right\}$$

$$\text{donde: } \phi \left(\frac{V^3}{V_1^3} \right) = \int_V^{\infty} \left(\frac{V^3}{V_1^3} - \frac{V^3}{V^3} \right) \left(- \frac{dz}{dV} \right) dV'$$

Esto aparece de datos estadísticos de curvas de velocidad-duración en varios lugares y donde Z es función de V/\bar{V}

El valor de \bar{E} puede expresarse de 2 formas, una como fracción de E_R y otra como función de $E_{\bar{V}}$

La producción específica es :

$$S = \frac{\bar{E}}{E_R} = \frac{1}{(1-\lambda)} \frac{\left\{ \phi\left(\lambda \frac{V_1^3}{V^3}\right) - \phi\left(\frac{V_1^3}{\bar{V}^3}\right) \right\}}{\frac{V_1^3}{V^3}}$$

y la eficiencia media es \bar{y}

$$\bar{y} = \frac{E}{E_{\bar{V}}} = k \left\{ \phi\left(\lambda \frac{V_1^3}{V^3}\right) - \phi\left(\frac{V_1^3}{\bar{V}^3}\right) \right\}$$

donde $E_{\bar{V}} = \frac{\pi c}{8} \rho \cdot V^3 D^2$

$$E_R = \frac{\pi c}{8} k (1-\lambda) \rho V_1^3 \cdot D^2$$

donde k y λ son parámetros que dependen del diseño del propulsor y del generador.

Las máquinas pequeñas normalmente utilizan generadores de c.c. las de tamaño mediano, para abastecer corriente alterna, pueden utilizar:

- a).- un generador de inducción
- b).- un alternador síncrono
- c).- un generador de corriente continua, usado con un invertidor de corriente.

Se ha mostrado que la energía máxima que puede ser extraída por un aero-generador, el cual corre a velocidad variable, se logra cuando se mantiene una relación de diseño fija entre esta velocidad y la del viento.

Se han considerado dos métodos para suplir corriente alterna :

- 1.- mantener una velocidad rotacional constante, con ó sin espaciamiento variable en las hojas.
- 2.- obtener velocidad rotacional variable con algún medio para obtener frecuencia constante.

El segundo método es el que interesa para obtener una producción anual de energía, ya que da mejores resultados a velocidades de viento bajas.

El generador de inducción se prefiere al síncrono, principalmente por su gran estabilidad y la facilidad con la que puede ser manejado automáticamente.

El generador síncrono se selecciona tomando en cuenta el factor de potencia. En si no hay mucha diferencia entre los costos de las dos máquinas. Aunque la de inducción puede ser ligeramente más cara que el generador síncrono además de que requiere una corrección por factor de potencia.

Sin embargo hay dudas acerca de la estabilidad eléctrica de un generador síncrono cuando está sujeto a rápidas variaciones de torcas directoras, las cuales ocurren en ráfagas de viento.

Un incremento repentino del 50 % en la velocidad del viento, aumenta la torca proporcionalmente a la velocidad del viento, al cubo; así que la máquina puede caer fuera de sincronismo.

Hay en existencia muchos generadores arriba ó cerca de 3 Kw de capacidad, los cuales han sido introducidos con bastante éxito. Esta capacidad está relacionada con unidades de tamaño medio y pequeño, las cuales tienen diferentes características, sobre todo en

el grado de energía almacenada en períodos de calma.

Velocidad variable de rotación para el generador es completamente usual, en lugar de una velocidad constante la cual es requerida por un alternador dando un abastecimiento a frecuencia constante.

Otra característica de estas pequeñas instalaciones es que el voltaje del generador es bajo, esto combinado con la baja capacidad de potencia implica que la unidad debe estar localizada en el lugar que va abastecer, así que la elección del lugar está más limitada. Hay un considerable interés en las posibilidades económicas de unidades de tamaño medio de capacidad entre 10 - 100 Kw las cuales podrían ser utilizadas en combinación con algunas fuentes de potencia para suplir a pequeñas comunidades ó lugares muy alejados para los cuales un sistema de distribución de energía eléctrica sería prohibitivamente caro.

Es por supuesto imposible imaginar todos los detalles en todos los diseños que han surgido en los diferentes países en los últimos años, sin embargo para propósitos de comparación la tabla siguiente da los más importantes que se han publicado.

Diseños de Aero-generadores.

Proyecto ó máquina.	Diámetro del rotor m	velocidad media de v viento. m/seg	Forma del rotor	Altura de torre m
Honner(1945)	175	-----	6 hojas	261
MAN-Kleinhenz (1947)	141	16	4 hojas	273
P.H.Thomas	66	15	2 hojas	158
War Production Board design.	66	13	2 hojas	50
Smith-Putnam	58	13	2 hojas	36
Diseño ruso	54	10.6	3 hojas	---
Balaclava	32	10.6	3 hojas	25
VIM°GUSMP	19	8	3 hojas	25
F.L.Smith	26	10.6	2 hojas	25
Lykkegard	20	10.6	4 hojas	22
Darrieus	22	6	3 hojas	22
Enfield	27	13	2 hojas	33
John Brown	17	15	3 hojas	26
SEAS (Dinamarca)	14	12	3 hojas	22

La cantidad de electricidad que puede ser generada depende de 4 cosas: de la cantidad de viento, diámetro de propulsor, tamaño del generador y de la eficiencia del sistema.

La potencia va ser proporcional al cubo de la velocidad del viento y al cuadrado del diámetro del propulsor.

Un cuidadoso estudio de las relaciones anteriores, permitió elaborar la tabla siguiente:

Diámetro de propulsor. m	Velocidad de Viento. m/seg					
	2.2	4.4	6.6	8.8	11	13.2
0.66	0.6	5	16	38	73	130
1.33	2	19	64	150	300	520
2.0	5	42	140	340	660	1150
2.66	10	75	260	610	1180	2020
3.33	15	120	400	950	1840	3180
4.0	21	170	540	1360	2660	4600
4.66	29	230	735	1850	3620	6250
5.33	40	300	1040	2440	4740	8150
6.0	51	375	1320	3060	6000	10350
7.0	60	475	1600	3600	7360	12760
7.5	73	580	1940	4350	8900	15420
8.0	86	685	2300	5180	10650	18380
	Producción en Watts. suponiendo el 70 % de eficiencia.					

Desafortunadamente la mayoría de los generadores que son adecuados, requieren ser manejados a muy altas velocidades, que la mayoría de las veces no las da el molino.

Lo que se hace es que se emplea un generador de regular velocidad y se une al propulsor por medio de una transmisión, desarrollando una relación de velocidades de 5 : 1 ; ó tal vez relaciones mayores.

El problema de cómo decidir el tamaño del generador en función del tamaño de propulsor, se basa en relaciones obtenidas de la práctica, sobre qué velocidad es requerida para que el generador de una produc-

ción total.

Si queremos producción total a bajas velocidades de viento, necesitaría un propulsor bastante grande; mientras que si nos satisface una producción total sólo cuando hay altas velocidades de viento, un propulsor pequeño es suficiente.

Se debe conocer la potencia producida a diferentes velocidades de viento y para esto debemos tener datos completos de estas velocidades, por lo menos de dos años, para así obtener gráficamente la producción anual. Al graficar los valores de la potencia en función de velocidades, parece que el área bajo la curva da la producción anual, sin embargo esto no es matemáticamente correcto por la dependencia cúbica de la potencia con la velocidad del viento.

Se necesita efectuar un análisis estadístico más completo.

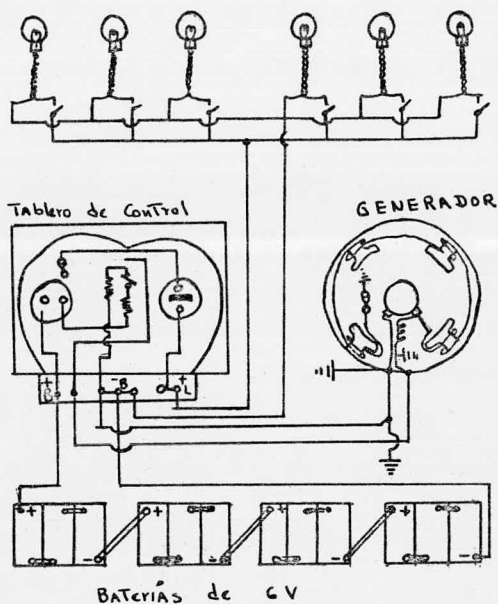
Se obtuvo una tabla basada en experiencias, para darnos idea de lo que podemos esperar de varios tamaños de generadores:

Potencia Nominal del generador. en Watts	Velocidad Media Mensual de Viento. m/seg.					
	2.6	3.5	4.4	5.2	6.1	7.0
50	1.5	3.0	5.0	7.0	9.0	10.0
100	3	5	8	11	13	15
250	6	12	18	24	29	32
500	12	24	35	46	55	62
1000	22	45	65	86	104	120
2000	40	80	120	160	200	235
4000	75	150	230	310	390	460
6000	115	230	350	470	590	710
8000	150	300	450	600	750	900
10 000	185	370	550	730	910	1090
12 000	215	430	650	870	1090	1310
	Producción Mensual Promedio. Kw-hr					

La eficiencia aerodinámica con rotores de hojas fijas puede tener un valor óptimo de 40 - 50 %. Para unidades de unos cientos de Watts de capacidad, su eficiencia total algunas veces excede el 30 %.

Un resultado del progreso hecho recientemente, es el uso de magnetos permanentes de acero, esto es una posibilidad para pequeñas máquinas. un mejor desarrollo es el uso de un pequeño alternador con un rotor; de magneto de 6 ó más polos, y un rectificador es entonces necesario. El circuito y la utilización de la energía.

En unidades de sólo 200-400 Watts de capacidad, teniendo baterías de bajo voltage, la función es meramente suplir alumbrado, por ejemplo, una máquina de este tipo se utiliza para 3 focos de 25 V, 40 W; y 3 de 25 V y 25W. El circuito se da en la siguiente figura:



En unidades mas grandes de los 6 - 8 Kw de capacidad y con alternador de 3 fases, 220 V de C.D. y un excitador, puede usarse para servicio de alumbrado y pequeños requerimientos de potencia.

El circuito se sugiere como sigue: el propulsor maneja el alternador y excitador a través de una transmisión con regulador de velocidad; el excitador es conectado a través de una corriente reversa y un interruptor de circuito, a la batería; abasteciendo un circuito que contiene lámparas, radio, plancha, lavadora y refrigerador.

Una guía manual para requerimientos de energía para propósitos domésticos se da a continuación:

Propósito	Consumo Anual (Kw-hr)
alumbrado	100 - 200
equipo doméstico	200 - 350
Cocina	1500 - 3000
Calentamiento de agua	500 - 1500
Refrigerador	250 - 750
Plancha	100
Bombeo de agua	200

Transmisión de Potencia.

Casi siempre un sistema de engranaje es necesario para proveer alta velocidad rotacional requerida por generadores eléctricos de diseño normal, cuando son manejados por rotores que corren lentamente.

Estos engranajes son caros y de complicado diseño, ya que se trata de diseñarlos lo más pequeños posible, y menos pesados.

Se ha tratado de eliminarlos, y se sabe de un diseño francés, el de J. Andreau, que ya no utiliza engranajes. Su diseño tiene hojas abiertas en un extremo y el viento pasa a través de ellas centrífugamente, la depresión creada empuja aire a un soporte tubular, que va por el centro de la estructura soporte, y conectado a una tubería manejada por aire ascendente, y este sistema maneja el generador que está colocado en la base de la torre.

Sin embargo, es poco lo que se publica de este diseño.

Los modelos más recientes (1960 a la fecha) de aero-generadores, presentan transmisiones a base de mecanismos por cadenas.

Sistema de Almacenamiento.

La capacidad de almacenamiento de energía es la llave del éxito en el sistema eléctrico del aero-generador.

Ciertamente la velocidad del viento, siempre está cambiando y realmente es la única razón por la cual la potencia de viento no es usada frecuentemente.

La solución obvia a este problema, es obtener la potencia y almacenarla para cuando se necesite. En teoría hay muchas formas de lograrlo y actualmente mucha gente está trabajando sobre problemas de almacenamiento de energía, porque saben que es la clave para el uso eficiente de muchas formas de energía natural, la cual va y viene en forma intermitente. Cuando se decide construir una planta generadora, el viejo tipo de batería ácida de plomo, utilizada desde hace mucho tiempo, es la que resulta más barata.

Podemos predecir como actúa bajo diferentes condiciones y cuanto tiempo de vida tiene; este es el método más barato de almacenamiento de energía. Las baterías de almacenamiento, utilizadas en sistemas de viento, son similares a las baterías ordinarias de automóviles, pero ellas tienen placas de plomo más delgadas y están específicamente diseñadas para ciclaje repetido por muchos años; esto significa que van de estados totalmente cargados a totalmente descargados una y otra vez sin dañarse.

Las baterías construidas para este propósito se llaman estacionarias, vienen en tamaños de 10 Amp-hr hasta 800 Amp-hr.

Los tamaños pequeños, usualmente tienen 3 celdas, son baterías de 6 volts. El número de celdas determina el voltage, pero la capacidad de almacenamiento está determinada por el tamaño de la batería, y por el número de placas en cada celda.

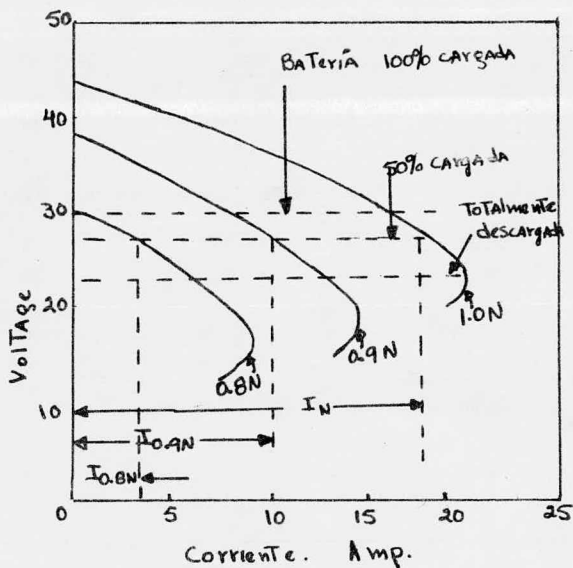
Una típica unidad de potencia con una batería de capacidad de almacenamiento normal, puede proveer de electricidad a una casa, cuando menos en un periodo de 3 días.

Las baterías alcalinas de níquel y fierro son más costosas que las de tipo ácido y presentan la desventaja de tener una resistencia interna alta, además de que son mecánicamente más robustas y están sujetas a daños de operación irregulares.

La capacidad de la batería instalada depende de la capacidad del generador y de su voltage, así como del número consecutivo de horas de calma, durante las cuales debe abastecer la batería.

El voltage del generador puede estar entre 6 - 12 V para unidades de 500 Watts de capacidad y de 24,32 ó 110 V para grandes generadores. La capacidad de la batería puede estar entre 130 - 450 Amp-hora.

Generador y Características de Batería.- Si un generador Shunt es usado, y conectado a la batería, un gran incremento en producción de corriente ocurre, para pequeños incrementos en velocidad rotacional. Esto puede verse en la figura siguiente, en la cual se muestran características de batería para tres estados de carga. Aunque la variación de corriente difiere poco con el estado de carga de la batería el efecto persiste.



Sistema de Conversión de Potencia.

Hay dos tipos básicos de generadores eléctricos: el alternador que genera corriente alterna; y el generador que genera corriente directa.

Casi todas las compañías de electricidad utilizan alternadores que generan 60 ciclos/seg de c.a. Esto significa que la electricidad va y viene cambiando su dirección en el alambre, 60 veces cada segundo. Esta forma de transmitir energía es la forma estándar, útil; y todas las aplicaciones eléctricas están hechas para operar con este tipo de pulsación eléctrica.

Así que si tenemos una fuente de potencia debemos utilizarla en forma de c.a. y de su voltaje estándar el cual es de 115 V.

En unidades aero-generadoras esto es un problema definitivamente, porque 60 ciclos de c.a. es producida sólo por un alternador que desarrolla una velocidad constante, usualmente 60 r.p.s. (revoluciones por segundo) y en unidades de este tipo nunca se obtiene esa velocidad.

Una solución a este problema es usar un alternador sin preocuparnos por sus frecuencia, pasar esta c.a. a un diódo rectificador y la convierte a corriente continua, la cual puede ser almacenada en la batería. Ahora podemos obtener corriente alterna de 60 ciclos usando otro alternador accionado por un motor eléctrico de corriente directa que se obtiene de la batería, esta corriente continua no fluctúa y su alternador corre a velocidad constante.

A esto se le llama un motor-generador ó invertidor rotatorio.

El invertidor rotatorio mecánico es sólo otra forma de estos invertidores. Existen nuevos modelos basados en el mismo principio no tienen partes móviles y todos ellos producen una buena aproximación de onda sinusoidal lo cual es bueno para todos los propósitos prácticos.

El único problema es que tienden a ser costosos.

Sin embargo mucha potencia puede ser utilizada sin que sea necesariamente pasada por el invertidor, puede usarse directamente ya sea del generador ó de la batería como corriente continua, en focos elementos simples de calentamiento y motores que funcionan tanto para c.a. como para c.c.

Sin embargo se debe colocar invertidor para cuando se utiliza en

radio, estéreo, T.V y grabadora.

Soportes ó Torres del Molíno.

Para pequeñas unidades pueden ser de madera, para tamaños medios torres de acero son las mas conocidas.

El concreto fue usado en Dinamarca y Holanda por el déficit de acero que hubo en ese tiempo. Las torres de concreto tienen apariencia de ser elegantes y bien protegidas, pero son ciertamente más costosas y más expuestas a daños por vibración.

Actualmente en Australia están fabricando torres de plástico galvanizado, que según publicaciones eliminan problemas de vibración, y parecen ser las mas ventajosas.

Producción y Costos.

Es difícil enunciar con precisión comparable, costos por Kw de capacidad, para pequeñas unidades de varios diseños hechos en diferentes lugares. Una comparación falsa puede hacerse, considerando el costo de estas unidades funcionando a la misma capacidad; una puede tener su producción total a velocidades de viento de 6.7 m/seg y otra a 9 m/seg .

La segunda tendrá un pequeño rotor que puede ser barato pero tal vez de menos producción anual.

Sería muy útil que el diámetro del rotor, velocidad de viento y capacidad del generador se enunciaran claramente, además del costo en las publicaciones, para poder establecer una comparación de costos de un país a otro.

De recientes cotizaciones el costo capital varía desde \$ 650.00 por Kw para unidades de unos cuantos cientos de Watts de capacidad incluyendo baterías y transmisión.

Entre \$450.00 y \$900.00 por Kw para unidades arriba de 10 Kw incluyendo torre y control de transmisión pero no baterías; pero también incluye transporte, erección y alambrado.

A continuación se mencionan algunas unidades con sus producciones y costos.

La producción mínima obtenida de una pequeña unidad, provee 20 Kw-hr de potencia por mes; con velocidades promedio de viento de 4.4 m/seg Incluye una batería de 56 Amp-hr por mes, capaz de almacenar energía para 4 días con vientos menores a 4.4 m/seg; incluye una torre de 4 m; invertidor de corriente de 12 V. c.d. a 115 V. c.a. un generador de 500 Watts.

Su costo total es de \$17 600.00 (M.N.)

-----°-----
Dentro de las pequeñas, pero más completa, la cual provee 20 Kw-hr de potencia por mes, con velocidades de viento de 4.4 m/seg. Esta potencia es suficiente para 4 focos de 75 Watts, estéreo, T.V y pequeñas aplicaciones arriba de 500 Wtts. La producción de esta unidad está limitada en vientos fuertes por el frenado automático de las hojas del propulsor.

Incluye un generador de 1200 Watts. Control de frenado; torre de

de 10 m; batería de 660 Amp-hr; invertidor de corriente de 12V.c.d. a 115 V. c.a.

Su costo total es de \$77 770.00

-----°-----

Existe un modelo australiano, donde su generador es simple y requiere un mantenimiento mínimo, es sistema es completamente automático y adecuado para lugares en los que la velocidad de viento nunca excede de 35 m/seg. Puede producir 100 Kw-hr de potencia por mes con velocidades promedio de 5m/seg. Es adecuado para bombear agua y todos los propósitos de uso doméstico.

Incluye un generador de 2000 Watts, 115 V; una torre de 14 m; 3 aspas; batería de 120 Amp-hr con indicadores de carga y descarga un invertidor rotatorio de 300 Watts.

Su costo total es de \$126 100.00

-----°-----

Existe un modelo grande, con capacidad de almacenamiento hasta de 7 días y una producción mensual de 325 Kw-hr en vientos promedio de 5 m/seg.

El sistema incluye: controles automáticos y regulador de voltaje adecuado para operar a velocidades de viento de 52m/seg, torre de 15 m; baterías de almacenamiento de 360 Amp-hr con indicadores de carga y descarga; generador de 6000 Watts y un invertidor automático.

Su costo es de \$ 304 040.00

-----°-----

Precios Actuales de Componentes Individuales.

La compañía Elektro de Inglaterra, fabrica en una sola parte, generador y propulsor, a continuación se dan especificaciones y costos.

Modelo N ^o	Producción en Watts	Producción mensual Kw-hr	Voltajes	Propulsor		Precio
				díam.	N ^o hojas	
WV 15 G	1200	75	12 V	3.3	2	53 900
WV 15G	1200	75	115 V	3.3	2	51 700
WV15 G	1200	75	115 V	3.3	3	75 900
WV 15 G	4000	230	115 V	5.0	3	107800
Wv 15 G	6000	325	115 V	5.8	3	119900

Baterías.- Se fabrican especialmente para este tipo de unidades, vienen garantizadas por 5 años.

Voltage	Amp-hr	Precio (\$ M.N)
12 V	220	3 300.
12V	440	6 380
12 V	660	9 570
12 V	885	12 650
115 V	260	43 780
115 V	120	18 700
115 V	450	73 304

Torres de Acero galvanizado. Los precios incluyen los alambres sujetadores y costo de instalación.

Torre de 3 m ----- \$ 11 000.

Torre de 13 m -----\$ 14 520

" " " 19 m -----\$ 18 035.

" " " 20 m -----\$ 20 335

" " " 26 m----- \$ 29 000

Se fabrican también torres de plástico galvanizado (dunlite) ellas tienen una base de fierro y se montan sobre concreto.

Torre de 4 m ----- \$ 4850.

" " " 13 m ----- \$ 20 830

" " " 20 m ----- \$34 850.

Precios de invertidores de Corriente.

115 V. C.D. a 115 V C.A. 60 % de eficiencia; 60 Watts .---- \$ 1700.

115 V C.D. a 115 V C.A. 60 % de eficiencia;300 Watts.---\$ 5 250.

12 V C.D. a 115 V C.A. 60 ciclos;300 Watts.---- \$ 2950.

12 V C.D. a 115 V C.A. 60 ciclos;500 Watts.--- \$ 3 800.

V Anteproyecto de una Unidad Aero-generadora
de 1.5 Kw

De la información anterior que hay sobre molinos de viento, se deduce que el propulsor con eje horizontal, es el más ventajoso.

La flecha ó eje del rotor va conectado a un sistema de transmisión, y éste acoplado al generador. Todo lo anterior va colocado sobre una plataforma en el tope de la torre ó estructura soporte.

La estructura de la torre es de acero galvanizado, y se diseña en función del esfuerzo axial producido por el viento, y en función del peso que soporta. La altura de la torre es de 20 m de base rectangular como se ve en los dibujos.

El diámetro del propulsor, de acuerdo a las ecuaciones de diseño, resultó de 3 m (2.929 m) correspondiendo una longitud de 1.5 m para cada hoja ó aspa. El diseño aquí presentado, tiene 3 hojas de diseño aero-dinámico. Los dibujos muestran 3 formas de hojas, se recomienda en la construcción práctica probar las 3.

Estas hojas pueden quitarse y colocarse separadamente, ya instalada la unidad. Su espaciamiento es fijo y no llevan control de velocidad. Ya que en el lugar la velocidad de viento raras veces excede el valor de 10 m/seg; además de que el circuito eléctrico posee un control automático con el que se puede parar ó arrancar el molino.

El material utilizado para las hojas es fibra de vidrio, ya que evita problemas de corrosión, además de ser un material ligero y resistente.

La relación máxima de velocidades es de 5.

El sistema de transmisión es a base de cadenas, y nos proporciona un incremento de velocidades de 137 r.p.m. a 1700 r.p.m.

La plataforma sobre la cual va el propulsor, transmisión y generador es rotatable, de tal forma que el propulsor siempre va orientado de cara al viento, por medio de un diseño de control automático.

Para dimensionar la unidad, se calcula primero la capacidad Q en Kw-hr/m² por año, del lugar.

La eficiencia anual promedio, η , dependerá de la relación máxima de velocidades, λ ; se obtienen los siguientes resultados de q para diferentes valores de λ .

$\lambda = 5$: $\eta = 0.266$ y un factor de utilización $q = 0.172$

$\lambda = 6$: $\eta = 0.244$ " " " " " " " " $q = 0.158$

El factor de utilización q es una relación de la energía que produce el generador si trabajara a su capacidad total durante todo el año, ó sea 8760 q horas.

La capacidad e del generador por m² de propulsor, es :

$$e = \frac{Q \eta}{8760 q} \quad \leftarrow \text{--- (1)}$$

La capacidad E del generador sobre estas bases es:

$$E = \frac{D^2 \pi}{4} \cdot e \quad \text{-----} \textcircled{2}$$

Una cadena puede ser usada para una tensión máxima de 14 000 Kg en la transmisión primaria de velocidad, con una velocidad de rotación de flecha de n r.p.m. Las dimensiones de diente, están limitadas, sin embargo podemos suponer un brazo máximo de 120 cm así que la torca que puede ser transmitida por una cadena es:

$$M = 120 (14\ 000) = 1\ 680\ 000 \text{ cm-Kg} \quad \text{-----} \textcircled{3}$$

La torca que puede ser transmitida por z cadenas es igual a zM.

$$\text{De lo anterior nos queda } E = 11.5 z n. \quad \text{-----} \textcircled{4}$$

$$\text{y } n = 0.087 E / z \quad \text{-----} \textcircled{5}$$

suponiendo un 50% de sobrecarga en el generador.

Por otra parte, tenemos que la velocidad circunferencial de la flecha es $u = \lambda v_a$ donde v_a es la velocidad del viento para la cual la relación máxima de velocidades es igual a λ .

Entonces :

$$u = \frac{n D \pi}{60} = \lambda v_a$$

y así:

$$n = \frac{60 \lambda v_a}{\pi D} = \frac{19.1 \lambda v_a}{D} \quad \text{-----} \textcircled{6}$$

De las ecuaciones $\textcircled{5}$ y $\textcircled{6}$ encontramos que:

$$\frac{0.087 E}{z} = \frac{60 \lambda v_a}{\pi D}$$

Substituyendo para E de la ecuación $\textcircled{2}$ nos queda:

$$\frac{0.087 \eta q}{8760 q \cdot z} \cdot \frac{D^2 \pi}{4} = \frac{60 \lambda v_a}{\pi D}$$

donde:

$$D^3 = \frac{60 \cdot 8760 \cdot 4 \lambda v_a q z}{0.087 \pi^2 \eta q} = 2\ 450\ 000 \frac{\lambda v_a q z}{\eta q}$$

y entonces:

$$D = \sqrt[3]{\frac{2\ 450\ 000 \lambda v_a q z}{q}} = 135 \sqrt[3]{\frac{\lambda v_a q z}{q}} \quad \textcircled{7}$$

Por medio de esta ecuación podemos calcular el diámetro del propulsor.

De la ecuación (1) tenemos una $Q = 1200 \text{ Kw-hr/m}^2$ por año

$$e = \frac{\eta Q}{8760 q} = \frac{0.266 (1200)}{8760 (0.172)} = 0.211$$

donde e es la capacidad del generador por m^2

La capacidad del generador en Kw es :

$$E = \frac{\pi D^2}{4} \cdot e = \frac{(2.92)^2 \cdot 3.141}{4} \cdot 0.211 = 1.479 \text{ Kw}$$

El diámetro D del propulsor se obtuvo de la ecuación (7).

$$D = 135 \sqrt[3]{\frac{\lambda V_a q \cdot z}{Q}} = 135 \sqrt[3]{\frac{5 (4.2) 0.172 (0.009)}{0.266 (1200)}}$$

$$D = 135 \sqrt[3]{10.56 \times 10^{-6}} = \underline{\underline{2.929 \text{ m}}}$$

ahora podemos calcular n (r.p.m.)

$$n = \frac{19.1 (5) 4.2}{2.929} = 137 \text{ r.p.m.}$$

donde V_a es la velocidad del viento y en el lugar es de 4.2 m/seg

La producción anual es igual a $8760 q E = 1506.7 (1.479)$

$$= 2214 \text{ Kw-hr/por año}$$

Esta producción sirve para abastecer los siguientes requerimientos eléctricos de una casa, que es para lo que se hace el diseño.

Requerimiento	Potencia en Watts	Amp. a 115 V	tiempo por mes. hrs	Total de Kw hr por mes
5 focos de 75 watts	375	5.2	120	45
Bomba de agua $\frac{1}{2} \text{ Hp}$	420	3.6	30	12.5
Estéreo	50	0.4	50	2.5
Refrigerador	326	2.8	290	95
Plancha	1088	9.5	11	12

167. Kw-hr/mes

Se obtiene un consumo anual de 2 004 Kw-hr /por año.

La batería se diseña en función de la energía total que va almacenar.

Se tiene un consumo mensual de 167 Kw-hr; el consumo diario, será de 5.5 Kw-hr ó 5 500 Watts-hr.

Tenemos que:

$$\text{Amp-hr} = \frac{\text{Watts-hr}}{\text{volts}} = \frac{5\,500 \text{ Watts-hr}}{115 \text{ volts}} = 47.8 \text{ Amp-hr}$$

El consumo diario será de 47.8 Amp-hr a 115 V.

Si se quiere proveer energía para 4 días, será $4(47.8) = 190 \text{ Amp-hr}$ por lo que la batería se diseña a tener una capacidad de 200 Amp-hr.

Seleccioné acumuladores ácidos de plomo de 12 V y 10 Amp-hr.

El arreglo consiste de 10 acumuladores conectados en serie, y estos conectados en paralelo con los otros 10 conectados en serie; para obtener un voltage de 120 V y 200 amp-hr.

Para iniciar la carga de la batería, se hace sólo con el 10 % del valor de la carga total ó sea con 20 Amp hasta la mitad de la carga total ó sea 100 Amp; después se continúa con el 50 % de la carga restante hasta su totalidad.

Para efectuar la carga de la batería, se requiere un sistema de carga combinado; requiere también un reóstato, voltímetro y amperímetro que nos indiquen las condiciones de carga de la batería.

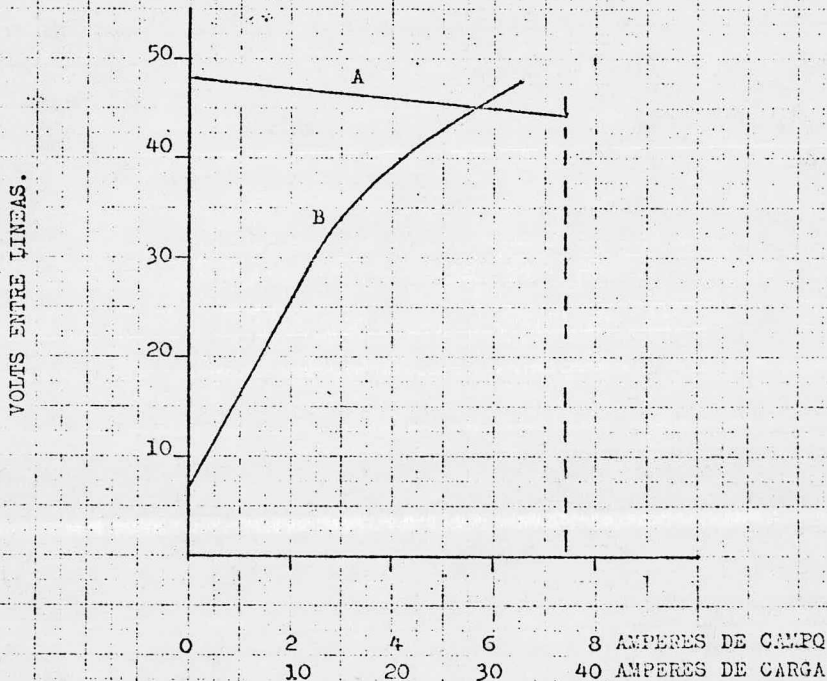
El diagrama eléctrico nos muestra con más detalle los instrumentos de que va provisto el equipo..

El sistema de transmisión va acoplado a un generador de C.C. el cual puede moverse también por medio de poleas; su capacidad es de 1.5 Kw y su voltage es de 32/40 V con velocidad variable de 1750 -1850 R.P.M.

Después de la batería hay que invertir la corriente, por medio de un rectificador de estado sólido, cuya eficiencia es de un 95% y no de un 60% en el caso de seleccionar un invertidor rotatorio.

En los dibujos siguientes se muestran: 3 diseños aero-dinámicos de aspa; una vista lateral del aero-generador; una vista de frente; y el diagrama del circuito eléctrico. Correspondientes al diseño presentado en este anteproyecto.

MANUFACTURERA FAIRBANKS MOESE, S.A
DIVISION ELECTRICA.



CURVA A: COMPORTAMIENTO
CURVA B: SATURACION EN VACIO.

ENSAYO DE UN GENERADOR DE CORRIENTE CONTINUA DE 1.5 K.W., 32-40 VOLTS, MODELO A-760, CON EL CAMPO CONECTADO EN DERIVACION.

EN LA PRACTICA SE CONECTA UN REOSTATO EN SERIE CON EL CAMPO PARA AJUSTAR LA CORRIENTE DE CARGA DE LAS BATERIAS.

MEXICO D.F., JULIO / 1977.

COSTO DEL EQUIPO.

Tres aspas de fibra de vidrio.- \$ 900.00
 Flecha del propulsor, incluye
 accesorios para variación de ángulo de ataque.- \$ 850.00
 Sistema de transmisión.- \$ 5000.00
 Generador de C.C. (1500 watts) .- 15 550.00
 (incluye regulador de V)
 Reóstato.- \$ 3 100.00
 Amperímetro y Voltímetro.- \$ 1750.00
 Rectificador de estado sólido.- \$ 12 500.00
 Torre de acero, galvanizada.- \$ 11 000.00
 20 acumuladores ácidos de plomo,
 12 V .- \$ 12 000.00
 Partes mecánicas y eléctricas.- \$ 2 000.00
 Erección del equipo.- \$800.00

 Costo Total.- \$ 65 450.00

La C.F.E. vende el Kw-hr como sigue: (uso habitacional)
 Los primeros 100 Kw-hr a \$ 0.484
 hasta 200 Kw-hr a \$ 0.825
 arriba de 200 Kw-hr \$1.485 .--En forma bimestral.

El diseño del aero-generador nos da para un consumo mensual de
 167 Kw-hr. Por dos meses, serían 334 Kw-hr por lo que corresponde
 a \$1.485 el Kw-hr. al costo de la C.F.E.

Esto implica un costo anual de \$2970.00

El equipo del aero-generador, puede durar hasta 15 años, con un ade-
 cuado mantenimiento. En 15 años, se consumirán 30 060 Kw-hr, por
 lo que el costo por Kw -hr será: 65 450.00 / 30 060

de \$2.17 por Kw-hr.

VI Conclusiones y Recomendaciones.

Cuando se piensa en la energía de viento, como en una fuente alternativa de energía, se cree que su utilización es algo muy remoto, tal vez porque no se tiene conciencia del problema que implica en un momento dado no tener mas reservas de petróleo ó de gas natural.

Se consumen cantidades bastante grandes de combustible, para generar electricidad, como lo muestran los datos siguientes, proporcionados por la C.F.E. es el consumo anual, correspondiente a 1976.

Petróleo	Diesel	Gas
Lts	Lts	m ³
5 394 238 651	1 156 700 433	2 029 243 753
Mezcla	Carbón.	
Lts	Ton	
32 201 294	121 575	

Además del consumo privado que se efectúa en industrias, y del consumo en motores de combustión interna (automóviles, camiones, etc) La energía de viento presenta una sólo desventaja, su frecuencia de ocurrencia, sin embargo se puede eliminar el problema con un buen sistema de almacenamiento de energía.

Parece ser que los lugares que presentan velocidades medias anuales superiores a los 5 m/seg (ver Tabla I) son buenos lugares económicamente para instalar molinos de viento.

Tratar de acoplar un aero-generador sin la importación de ninguna de sus partes, resulta un modelo caro y no eficiente.

Actualmente en México no se conoce la tecnología para fabricar este tipo de equipos, sin embargo se puede iniciar un estudio detallado de cada una de sus partes que lo constituyen, se pueden diseñar, construir y probar.

Actualmente están en operación 3 unidades, en el estado de Morelos de importación australiana (Dunlite), que pueden servir de base de estudio.

Cabe aclarar, que no existe el modelo ideal de aero-generador,

sino que hay un modelo ideal, para cada lugar, dependiendo de las condiciones atmosféricas del lugar.

El diseño dependerá exclusivamente del propósito para el cual se instala el equipo.

Respecto a las hojas ó hélices el material más recomendado es la fibra de vidrio, por ser un material ligero y resistente, además de que evita problemas de corrosión.

Existen una gran variedad de arreglos, en cuanto a la parte eléctrica; normalmente se acostumbra utilizar un generador de inducción, y almacenar energía en un banco de baterías; de aquí se puede trabajar exclusivamente con corriente continua; ó bien invertir la corriente y trabajar con alterna. Algunos aparatos eléctricos trabajan sólo con alterna por lo que es necesaria la inversión de corriente.

Otra alternativa, es la de utilizar un alternador, y tomar corriente directamente de aquí, sólo que si se quiere almacenar hay que invertir la corriente, y si se quiere después corriente alterna, hay que cambiar de nuevo la corriente y desafortunadamente se pierde energía en el proceso de invertir la corriente.

La aplicación actual de los molinos de viento, en México se limita casi al bombeo de agua, principalmente en zonas áridas.

El sistema de transmisión está muy relacionado, con el tipo de generador ó alternador que se utilice.

Normalmente, los generadores que se consiguen, tienen una velocidad rotacional de 1800 R.P.M. (mínima) y el propulsor del molino, raras veces excede el valor de 300 R.P.M. por lo que se requiere de una transmisión robusta y costosa.

Se puede diseñar un generador de un rango bastante grande de velocidades (desde 700 R.P.M. - 1800 R.P.M.) ; el generador de multipolos podría ser una solución, sin embargo sus dimensiones resultan prohibitivas.

En lugares, en donde la velocidad media anual de viento es superior a los 15 m/seg es necesario que las hojas del propulsor lleven un control de velocidad, se describieron algunos métodos en el capítulo IV .

El sistema de almacenamiento, requiere acumuladores alcalinos de cadmio-niquel son los más adecuados ya que se descargan menos

rápido que los acumuladores ácidos de plomo. Pero resultan mucho más caros que éstos.

Respecto al anteproyecto presentado en el capítulo anterior, se puede ver como un avance de lo que se necesitará en un futuro no lejano, cabe mencionar que su costo resulta elevado por haber realizado el diseño con material que se consigue en México, actualmente. Es decir sin haber diseñado ninguna de sus partes eléctricas; pero es en definitiva su construcción práctica, la que nos manifestaría los problemas que se presentan en su funcionamiento.

Este tipo de diseño (C.A.) se podría aplicar en edificios de gran altura, muy frecuentes en la Ciudad de México, en cuyas partes superiores, soplan vientos muy considerables, para abastecerlos de electricidad.

Tiene también aplicación, en lugares apartados, como son granjas, ó pequeñas aldeas.

VII Bibliografía.

P.C. Putnam.- Power from the wind
Van Nostrand Co.
1958

E.W. Golding.- The generation of electricity by wind power.
E.&F.N. Spon Ltd.
1955

Cameron Brown, C.A.- Windmills for the generation of electricity.
Institute for Research in Agricultural Engineering
Oxford, 1960

Theodore Baumeister.- Mark's Standard Handbook for Mechanical Eng.
1956

Proceedings of Conference on New Sources of Energy.
Volume 7, Wind Power.
United Nations Publication.
1964

Electric Power from the Wind.
Henry Clews.
Solar Wind Co.

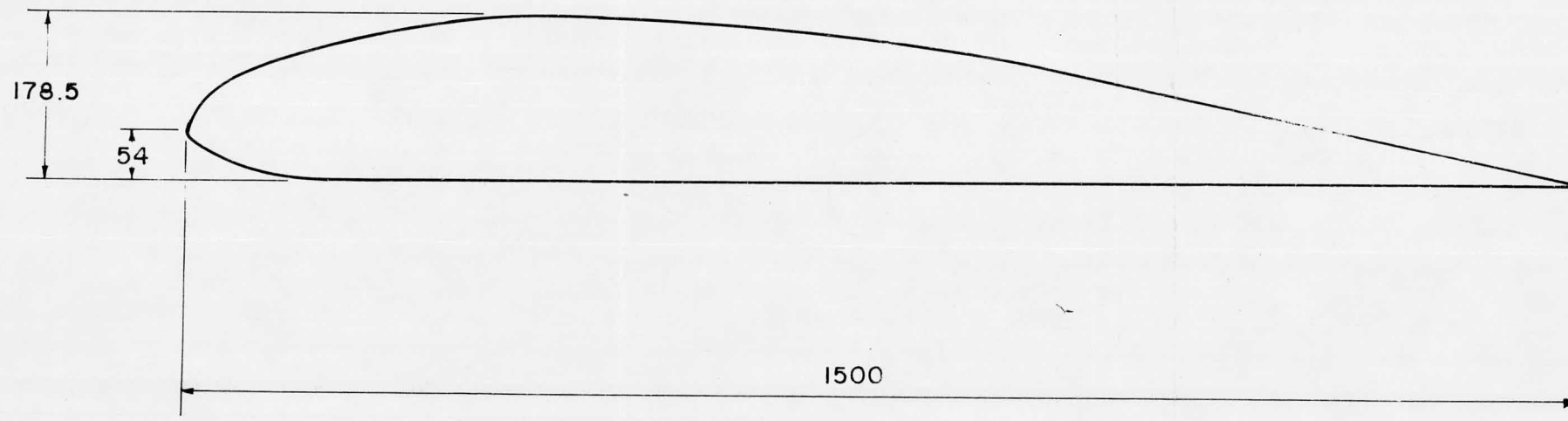
Instituto de Investigaciones Eléctricas.
Palmira, Morelos.
México.

Brace Research Institute.
MacDonald College of McGill University.
Quebec, Canada.

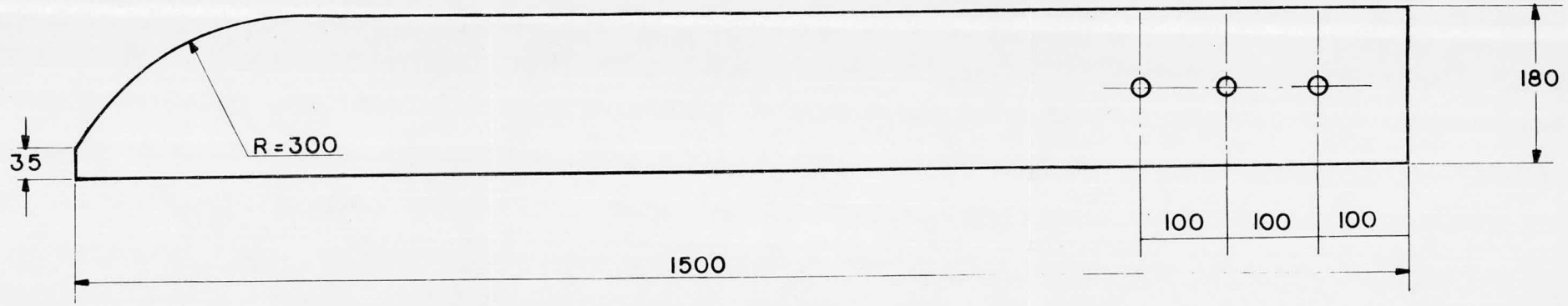
Dunlite Electrical Co.
Division of Pye Industries. Australia.

Popular Science.
November, 1972

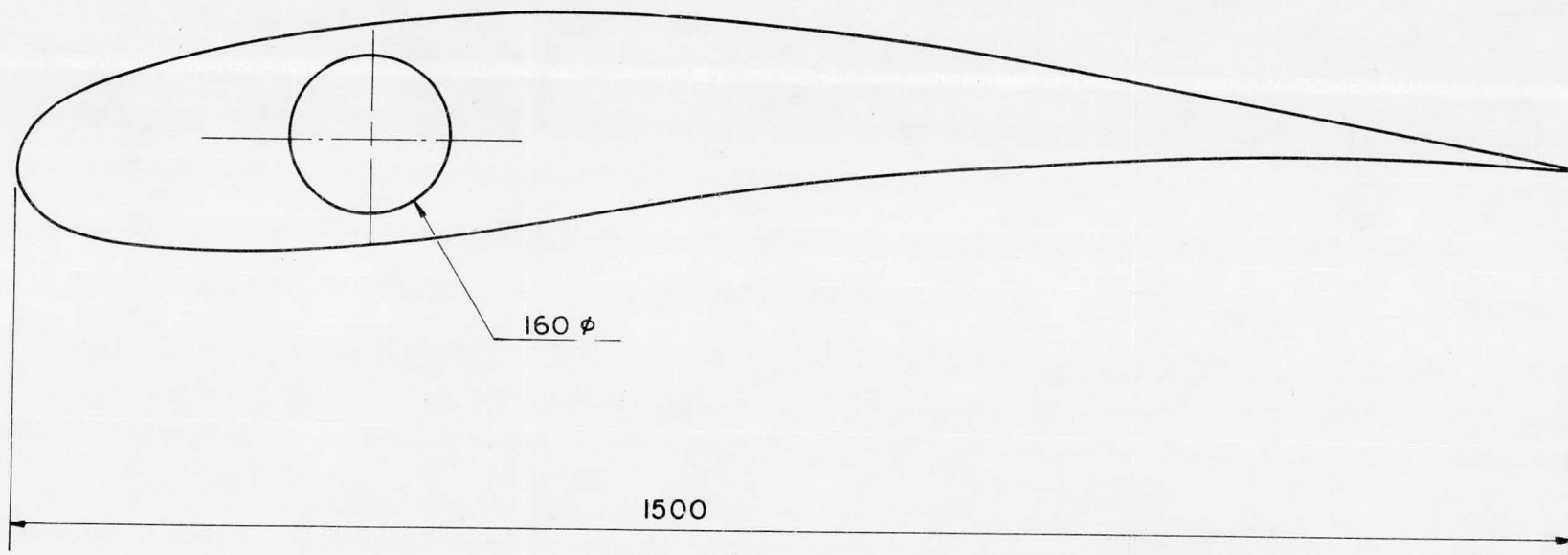
DISEÑO AERODINAMICO DE HOJA



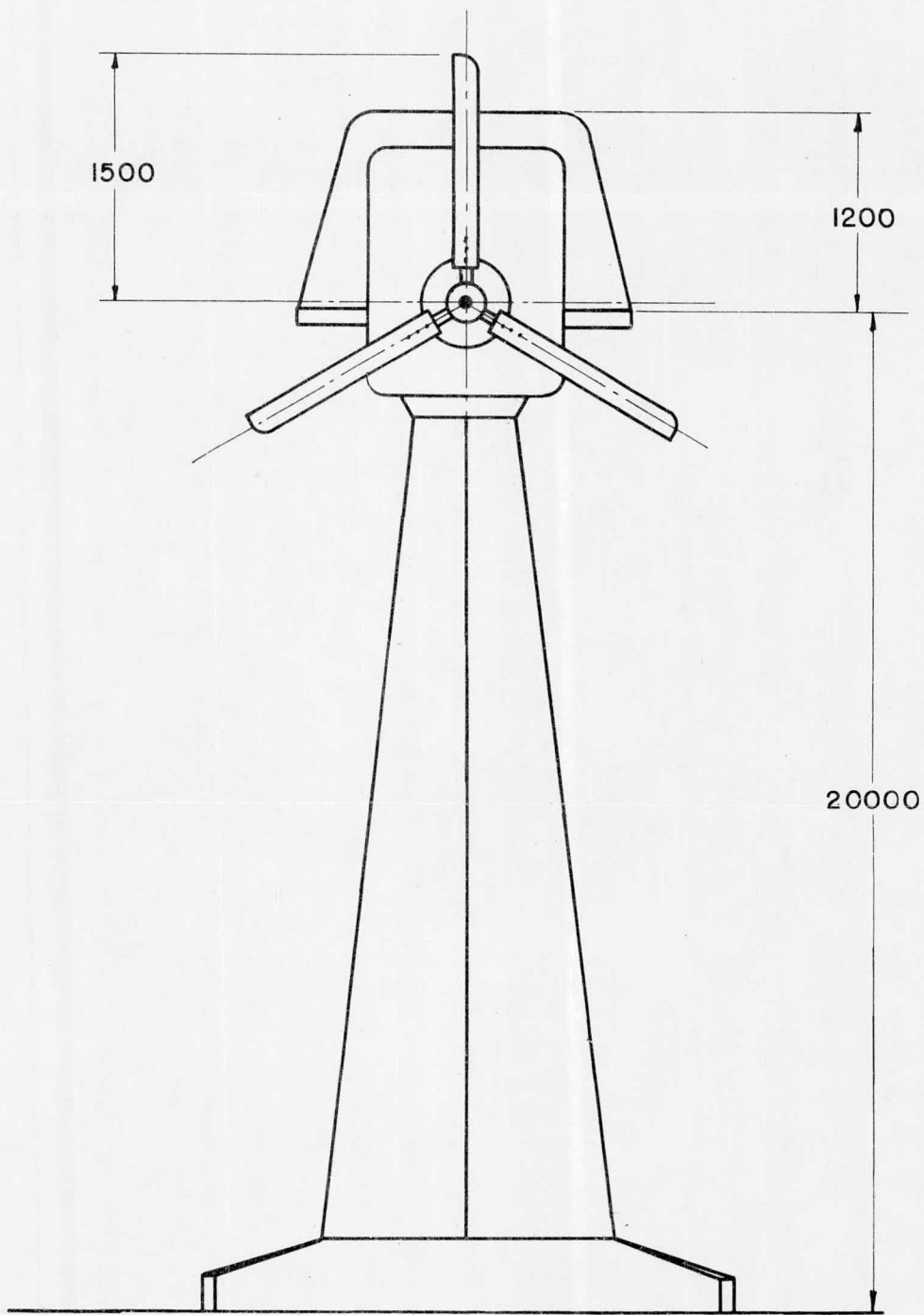
DISEÑO AERODINAMICO DE HOJA



DISEÑO AERODINAMICO DE HOJA

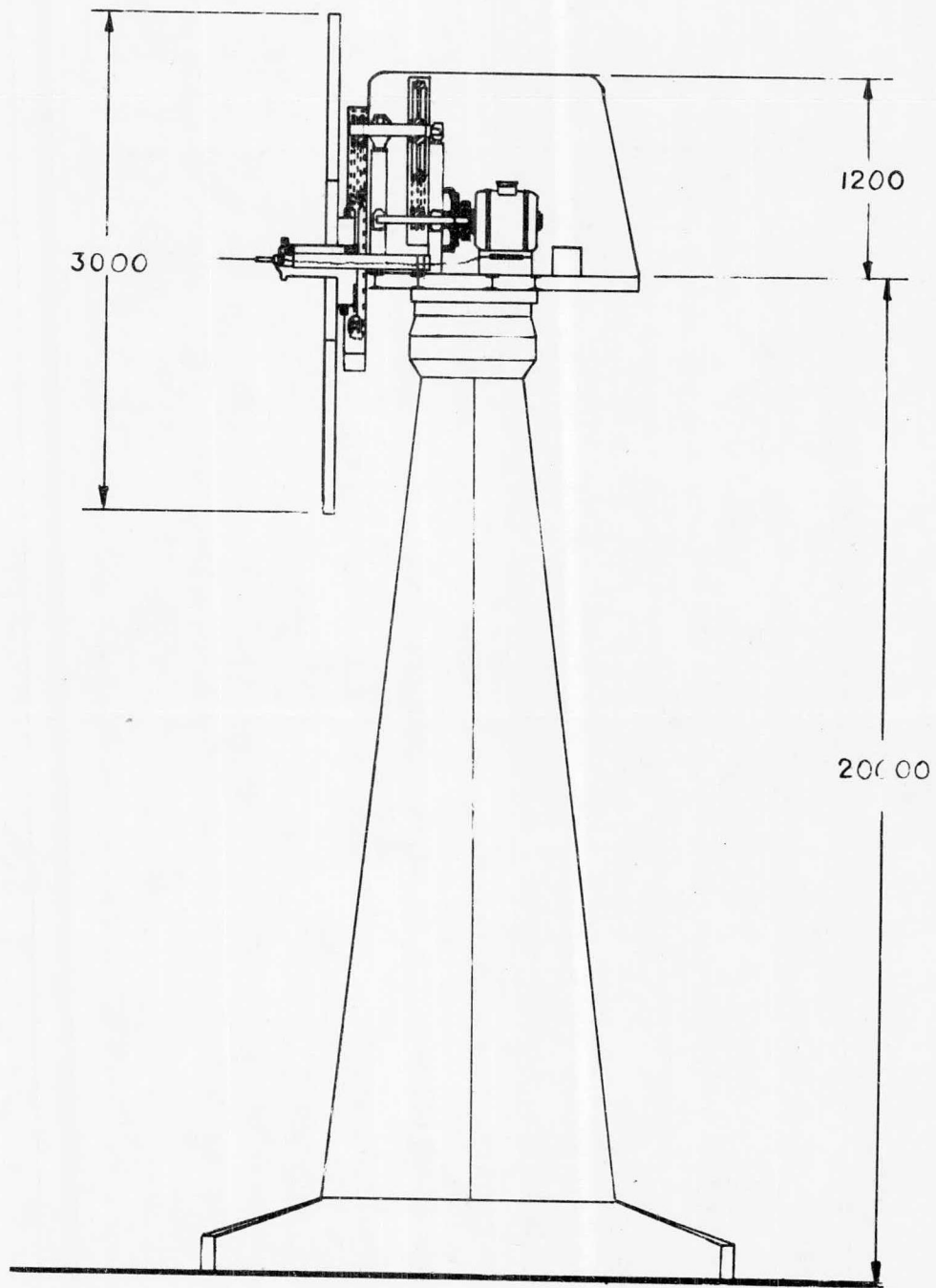


ACOT.MM ESC.



MOLINO DE VIENTO

ACOT.MM



MOLINO DE VIENTO

ACOT.MM