

ESCUELA POLITECNICA NACIONAL
FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA

CENTRAL ELECTRICA DE BAJA POTENCIA ACCIONADA POR MOLINO DE
VIENTO

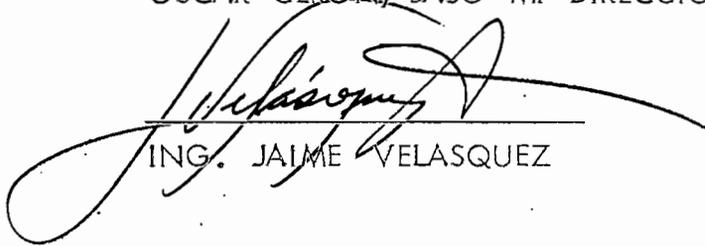
POR
OSCAR CERON AGUIRRE

TESIS PREVIA A LA OBTENCION DEL TITULO DE INGENIERO ELECTRICO
EN LA ESPECIALIZACION DE POTENCIA EN LA ESCUELA POLITECNICA
NACIONAL

QUITO
MARZO DE 1978

CERTIFICACION :

CERTIFICO QUE, EL PRESENTE TRABAJO
HA SIDO REALIZADO POR EL SEÑOR
OSCAR CERON, BAJO MI DIRECCION.



ING. JAIME VELASQUEZ

AGRADECIMIENTO

Una vez terminado con el trabajo, es necesario reconocer los esfuerzos, paciencia y buena voluntad de todos quienes han sido los directos colaboradores para que mi carrera haya culminado con todos los éxitos deseados.

A mi Madre, quien con su abnegado esfuerzo y sacrificio, supo encaminarme por el sendero del estudio y del trabajo conciente .

A mi Esposa, quien con su paciencia, comprendió e impulsó a que siga adelante .

A todos mis Profesores ,que supieron dar todo de lo suyo para mi formación científica.

Al Ing. Jaime Velásquez, quien inició y culminó con este trabajo, poniendo a mi disposición todos sus conocimientos valiosos.

1-33
60-81

INDICE

Página No.

1.	<u>CAPITULO PRIMERO</u> .- GENERALIDADES	1
1.1.	Introducción	1
1.2.	Propósito y Justificación	2
1.3.	Alcance	4
1.3.1.	Factores en estudio	5
1.3.2.	Unidades de observación	6
1.3.3.	Datos a tomarse	6
1.3.4.	Diseño experimental	6
2.	<u>CAPITULO SEGUNDO</u> .- CARACTERISTICAS FISICAS Y MECANICAS	7
2.1.	Velocidad del Viento	7
2.2.	Dirección y Turbulencia del Viento	15
2.3.	Efectos de la Altura sobre la Velocidad del Viento	21
2.4.	La Presión debida a la Velocidad del Viento	21
2.5.	Presión Real del Viento sobre una Superficie	26
2.6.	La Energía del Viento	27
2.6.1.	Aplicaciones	32
	a. Producción Eléctrica	32
	b. Producción de Calor	32
	c. Producción de Hidrógeno	33
	d. Otros usos	33
2.7.	Tipos de Molinos de Viento	37
2.7.1.	Máquinas del eje con el viento	38

a. Rotor Savonius	38
b. Rotor Madaras	40
c. Rotor Darrius	41
2.7.2. Máquinas de eje que atravieza el viento	42
a. Rotor acanalado	42
b. Diseño de Smith - Putnam	44
c. Rotor de Circulación Controlada	45
2.7.3. Tipos Generales	46
2.8. Componentes Mecánicas Principales	60
2.8.1. Tipos de orientación	64
a. Orientación por veleta	64
b. Orientación por medio de una rosa de los vientos .	65
c. Orientación por la hélice misma	65
2.8.2. Regulación	66
a. Regulación abriendo o cerrando la hélice	66
b. Regulación por directrices automáticas	67
c. Regulación por giro de toda la hélice	67
2.8.3. Transmisión y Acumulación	68
2.8.4. Descripción de un sistema	71
2.8.4.1. Rotor de hélice	72
a. Hélice	72
b. Elemento Céntrico	73
c. Mecanismo de cambio del ángulo de elevación.	73
d. Estructura del tren de manejo y sistema de rotación, Plato de soporte y Control de rotación .	73
e. Tren de transmisión	75
f. Alternador	75
2.8.4.2. Torre .	75
2.8.4.3. Controles	76

2.9.	Esquematación del Sistema Mecánico	80
3.	<u>CAPITULO TERCERO: CARACTERISTICAS ELECTRICAS</u>	82
3.1.	Potencia Eléctrica del Generador	82
3.2.	Características de los Generadores de los Molinos de Viento .	91
3.2.1.	Sistemas VSCF y CSCF	95
3.2.2.	Sistema CSCF para máquinas de Inducción y Síncronas.	97
3.2.3.	Sistema VSCF	99
3.3.	Mecanismos de Control	100
3.3.1.	Circuitos de control	101
	a. Circuito de control ADLER	101
	b. Circuito de control de " LA COUR "	103
	c. Circuito de Control polarizado	104
3.3.2.	Regulador para generador Shunt	106
3.3.3.	Control de carga para generador Shunt	108
	a. Interruptor principal	108
	b. Limitador de carga	109
	c. Limitador de descarga	109
	d. Limitador de voltaje	110
3.3.4.	Control Electrónico	110
3.4.	Sistemas de Conversión y Reconversión	112
3.4.1.	Técnicas de conversión y reconversión	114
3.4.2.	Salvamiento de la frecuencia de deslizamiento del rotor jaula de ardilla (SCR)	118
3.4.3.	Invertidores de potencia de DC a AC	120
3.5.	Sistemas de Acumulación	123

3.5.1.	Acumuladores de Plomo - Acido	123
3.5.2.	Acumuladores de Niquel - Cadmio	127
3.5.3.	Otros tipos de acumuladores	134
3.5.4.	Determinación de la capacidad de almacenamiento de baterías.	136
3.6.	Esquematzación del Sistema Eléctrico	139
	a. Sistema simple de baja potencia	139
	b. Sistema simple con almacenaje mecánico	140
	c. Sistema de conversión de la energía intermedia, compleja: Rangos de potencia medios	140
	d. Sistema directo para alimentación a barra (rango de alta potencia)	141
4.	<u>CAPITULO CUARTO</u> : DISEÑO DE UN MODELO DE BAJA POTENCIA	142
4.1.	Comportamiento del Viento en un sitio determinado	142
4.2.	Elección del Molino de Viento	148
4.2.1.	Breve descripción del sistema	152
4.3.	Variaciones en el Molino de Viento	153
4.4.	Características del Generador	155
4.5.	Sistema de Control y Acumulación	158
4.6.	Esquematzación del Modelo	167
	a. Esquema básico	167
	b. Esquema eléctrico general	167

INDICE DE TABLAS

	<u>Página No.</u>	
TABLA No. 1	Escala de BECAUFORT	8
TABLA No. 2	Registro del Ministerio de Defensa de las velocidades medias del viento, y de las velocidades máximas, en estaciones seleccionadas. El período de registros corresponde de 6 a 17 años, terminando en 1976 .	10
TABLA No. 3	(a, b, c) Registro de Boletines Meteorológicos de velocidades medias y frecuencias de estaciones a cuyo cargo está el Instituto de Meteorología e Hidrología, para horas prefijadas por dicho Instituto. El período de registros corresponde a 10 años consecutivos .	12
TABLA No. 4	Velocidades y presiones del viento	22
TABLA No. 5	Unidades de presión en pulgadas de Hg y Millibares .	25
TABLA No. 6	Comparación de generación de potencia eléctrica por diferentes métodos .	36
TABLA No. 7	Especificaciones de la hélice (LeRC)	72
TABLA No. 8	Potencia de salida en watios	83

Página No.

TABLA No. 9	Eficiencia en HP y en kW	89
TABLA No. 10	Características para la conversión de viento en electricidad, preparada por ADLER .	90
TABLA No. 11	Capacidad relativa de elementos en función de la duración de la descarga.	126
TABLA No. 12	Características del almacenamiento presentado por ADLER .	137
TABLA No. 13	Tabla de comparación entre baterías de Plomo - ácido y Ni - Cd.	138
TABLA No. 14	Cuadro estadístico de velocidades de viento	144
TABLA No. 15	Energía mensual a distintas velocidades	155
TABLA No. 16	Caídas de voltaje y pérdidas en Cobre y Aluminio entre el generador y las baterías .	164

INDICE DE FIGURAS

	<u>Página No.</u>
FIGURA No. 1 Variación de la velocidad media del viento con la altura .	17
FIGURA No. 2 Dirección del viento en el Hemisferio Norte entre una gradiente elevada .	18
FIGURA No. 3 Este diagrama demuestra como la fuerza de <u>Co</u> riolis deflexiona al viento .	18
FIGURA No. 4 Dirección del viento en el Hemisferio Norte cerca al nivel de la tierra .	20
FIGURA No. 5 Este diagrama representa aproximadamente densidades de capas de igual peso de atmósfera en aumento de altitudes .	24
FIGURA No. 6 Variación de la Potencia del Viento con la elevación (Vatios por metro cuadrado) .	28
FIGURA No. 7 Rotor Savonius y flujo de aire a su alrededor	39
FIGURA No. 8 Efecto Magnus	40
FIGURA No. 9 Rotor Darrius : a) \emptyset , b) Δ	41
FIGURA No. 10 Rotor Acanalado de Enfield - Andreau	43

Página No.

FIGURA No. 11	Turbina de Viento de Smith - Putnam	45
FIGURA No. 12	a) Molino de Viento de Múltiples paletas	48
	b) Molino de Viento Holandés	48
	c) Dos y Tres paletas propulsoras	48
FIGURA No. 13	Flujo uni-dimensional a través de una tubería de viento .	49
FIGURA No. 14	Comportamiento típico de Máquinas de Viento	53
FIGURA No. 15	Turbina de viento tipo tornado	55
FIGURA No. 16	Flujo de viento alrededor de la torre	58
FIGURA No. 17	Estructura sometida a deformaciones elásticas	64
FIGURA No. 18	Orientación por veleta de la hélice en la dirección del viento.	65
FIGURA No. 19	Sistema KUMME	67
FIGURA No. 20	Regulación por giro de toda la hélice	67
FIGURA No. 21	Regulador de velocidad de la hélice	70
FIGURA No. 22	Turbina de viento de 100 kW con tren de manejo y sistema de rotación .	74

FIGURA No. 23	Turbo - generadores de viento de 1.5 MW construídos por la ERDA .	78
FIGURA No. 24	Esquema general del sistema mecánico a viento	80
FIGURA No. 25	Relación de la potencia de salida de varias velocidades de viento y varios diámetros de hélices donde se asume una eficiencia del 50 % de la máxima teórica. También está incluido un rotor SAVONIUS de 27 pies ² de una eficiencia del 20 %.	84
FIGURA No. 26	Incremento en velocidad del viento y potencia con el aumento de altura (para llanuras planas y referida a 5 pies de altura)	86
FIGURA No. 27	Generador SHUNT	92
FIGURA No. 28	Características del generador SHUNT	92
FIGURA No. 29	Potencia en la hélice como función de la velocidad del viento .	95
FIGURA No. 30	Características de la potencia en función del tiempo para sistemas de CSCF y VSCF .	96
FIGURA No. 31	Diagrama de control de ADLER .	102

FIGURA No. 32	Diagrama de control diseñado por el profesor " LA. COUR "	104
FIGURA No. 33	Circuito de control polarizado operando bajo un rango variable de voltaje de 25 a 110 Voltios.	105
FIGURA No. 34	Diagrama de conexión del regulador automático producido por la Compañía " ELECTRO - MECANIQUE ".	107
FIGURA No. 35	Diagrama de control de velocidad por armadura .	111
FIGURA No. 36	Diagrama de control de voltaje y corriente .	112
FIGURA No. 37	Esquema básico de conversión de energía	112
FIGURA No. 38	Esquema de un sistema VSCF con un generador monofásico.	115
FIGURA No. 39	Esquema VSCF con generador monofásico. (tres bobinadas)	116
FIGURA No.40	Sistema VSCF con generador conmutador AC (ACCG)	117
FIGURA No. 41	Esquema VSCF con generador de inducción de doble salida.	119

FIGURA No. 42	Diagrama de un alternador trifásico con <u>rectificación</u> .	122
FIGURA No. 43	a.- Curva de tensión (descarga)	125
43	b.- Curva de tensión (carga)	125
FIGURA No. 44	Esquemas básicos de reacción de una celda de Ni Cd.	129
FIGURA No. 45	Acumulador de Ni - Cd con tres electrodos	131
FIGURA No. 46	Curvas características de carga y descarga de un acumulador alcalino .	133
FIGURA No. 47	Acumulador de Sodio - Azufre	135
FIGURA No. 48	Curva de duración de velocidad del viento (10 años)	145
FIGURA No. 49	Variación de la velocidad del viento en 10 años	147
FIGURA No. 50	Modelo de Molino de Viento	150
FIGURA No. 51	Variaciones en el modelo mecánico	154
FIGURA No. 52	Generador Shunt - 120 Voltios	157
FIGURA No. 53	Esquema del sistema de control eléctrico	158

1. CAPITULO PRIMERO .- GENERALIDADES :

1.1 INTRODUCCION .-

La humanidad ha venido utilizando la energía del viento por miles de años para impulsar una barca, moler granos, extraer agua; y sorpresivamente se lo ha usado e intermitentemente para la generación de pequeñas cantidades de electricidad.

El reciente interés de máquinas para viento ha resultado de la reinversión y análisis de muchas de las máquinas de potencia por viento desarrolladas sobre las pasadas centurias .

Desde 1920 han existido numerosos intentos de diseñar molinos de viento factibles para la generación de potencia a gran escala de acuerdo con las teorías modernas.

El acontecimiento de la potencia por viento como una fuente alternativa de potencia es obviamente una función directa de las economías de producción de las máquinas de potencia por viento. En este sentido, el rol de la potencia de salida suministrada a través del desarrollo del comportamiento aerodinámico mejorado, ofrece algunos regresos potenciales, no obstante, el " foco " está en el costo del sistema entero del cual, el transductor de aire a energía mecánica es solamente una parte .

La energía del viento no es usado ampliamente hoy en día por razón del flujo del viento que es solo intermitente.

Hoy nuestra fuente de energía es predominantemente compuesta por fuentes en las cuales su rendimiento puede ser controlado fácilmente

con la variación de la demanda, pero, los precios de esta energía son elevados y hay considerable interés en alternativas como combustibles nucleares y de fósiles. Es así como la potencia del viento resalta como una tecnología solar que requiere relativamente poco desarrollo antes que ésta pueda producir económicamente.

En fin, no hay lugar en la superficie de la tierra donde el viento no fluya algo, en el tiempo. Pero hay multitud de lugares donde el viento fluye lo suficiente, con fuerza y lo suficientemente frecuente para hacer de éste una fuente potencial de potencia para llenar las necesidades energéticas crecientes del mundo.

La clave es capturar esa basta potencia del viento de un modo que sea eficiente, económico y práctico, lo suficiente para competir con otras fuentes de energía, especialmente aquellas provenientes del petróleo carbón y otros combustibles fósiles.

1.2. PROPOSITO Y JUSTIFICACION .-

El propósito fundamental de este trabajo es el de conseguir las utilidades o beneficios de la energía del viento disponible en nuestro país, de forma que sean expansibles para las necesidades urgentes de nuestro medio rural en especial.

Además se pretende revisar también en forma general la aerodinámica de varios tipos de máquinas de potencia por viento, e indicar las ventajas y desventajas de varios esquemas para la obtención de la energía del viento. En general, las cantidades relativamente pequeñas de energía eléctrica que se necesitan para el hogar, granjas, dehesas o medio rural,

podrían ser obtenidas a menor precio de una central individual y que según las circunstancias podría instalarse un pequeño generador accionado ya sea por un motor de combustión interna, turbina hidráulica o un molino de viento.

En verdad las dos primeras posibilidades de obtención de potencia, para nuestro medio hasta cierto punto resultarían prohibitivas en vista de que éstos necesitarían combustibles o sistemas de aprovechamiento de riberas de agua, lo que el sistema o central en sí resultaría antieconómico. La utilización de una energía no convencional como es el caso de la energía del viento resultaría para nuestras condiciones económicas la más favorable, puesto que se cuenta con la materia prima (viento) que no cuesta nada y que siempre es generada en el ambiente.

En todo caso un sistema de acumulación de energía sería necesario para cuando el viento no sea lo suficientemente fuerte o no entregue su energía adecuada para que el sistema opere en condiciones normales. Para nuestro medio rural ecuatoriano, la electrificación es una esperanza y un derecho. Su ejecución depende en gran medida de nuestra actitud frente a esa esperanza.

Debido a razones estructurales, históricas y socio - culturales los niveles de vida son bajos, por lo que se hace necesario una intervención urgente en el cuadro de utilización prioritaria de los recursos disponibles.

En las condiciones actuales el gobierno subenciona en un alto porcentaje el precio de los combustibles y a través de INECEL lo hace en medio de la generación, transmisión y distribución de energía eléctrica.

Pues es cierto que si esto no ocurriera, el usuario especialmente situado en puntos estratégicos debería pagar exageradas cantidades de dinero por kWh, lo que no sería posible desde ningún punto de vista en cualquier parte del mundo y no digamos en nuestras condiciones precarias .

Es cierto también que con la idea rápida de electrificar al país se ha perdido de vista otras formas de aliviar la economía del país . Pues se podría asegurar que un sistema bien estudiado para la utilización de la energía del viento, sería más factible y más barato que la instalación de extensas líneas de transmisión en los cuales existen pocas derivaciones de cargas que no justificarían económicamente .

Las condiciones geográficas, de transporte y comunicaciones no permiten además concentrar líneas de transmisión en lugares donde verdaderamente pueden necesitar para su desarrollo .

Por estas razones, se podría decir que la utilización de centrales de baja potencia accionadas por molinos de viento son posibles de utilizar en nuestro país, ya sea para dar mayor atención a los lugares aislados o para aliviar la economía de proyectos grandes que no justifiquen.

1.3 ALCANCE .-

" La aceleración del proceso de desarrollo económico y la superación de las precarias condiciones de vida de un país, no dependen exclusivamente de la disponibilidad de recursos económicos y financieros y del dominio de técnicas avanzadas de planificación y administración; existe otro factor fundamental que es la actitud de los hombres frente a la justicia y el progreso social, en virtud de lo cual los esfuerzos de una población se suman a los de su gobierno para mejorar las condiciones económi -

cas , sociales y culturales de las comunidades, integrarlas a la vida del país y permitirles contribuir plenamente al progreso nacional " .

Como alcances específicos que se trata de conseguir son los siguientes :

- a.- Hacer de la energía del viento disponible en nuestro medio una fuente directa de utilización.
- b.- Conseguir un modelo de baja potencia aplicable a las condiciones de viento y necesidades de nuestro medio .
- c.- Concretar el análisis a determinados sitios del país, dependiendo de los resultados de potencia del viento favorables.

Se considerará necesariamente además los siguientes aspectos :

1.3.1 Factores de estudio

Los mismos que destaquen el comportamiento del viento frente a otros, como físicos y mecánicos con el consiguiente análisis eléctrico.

El estudio de los tipos de molinos de viento a un nivel general para alcanzar las características adecuadas de un modelo.

El aspecto eléctrico que nos dé el índice de Potencias eléctricas a obtenerse y a su vez el medio de acumulación de las mismas para su mejor aprovechamiento y aplicación.

1.3.2 Unidades de observación :

El material fundamental para un estudio acertado será el ya obtenido por las distintas entidades encargadas del recopilamiento estadístico del comportamiento del viento.

El estudio electromecánico determinará el material adecuado del diseño de un modelo de central.

1.3.3 Datos a tomarse :

Las estadísticas del comportamiento del viento frente a otros factores determinarán las condiciones reales para el estudio de la energía del mismo y su mejor aprovechamiento.

Las diferentes nomenclaturas de los molinos más utilizados darán las condiciones del comportamiento mecánico en el estudio mismo.

Las características eléctricas obtenidas del estudio podrán determinar los elementos adecuados para una posible construcción del modelo de la pequeña central eléctrica accionada por un molino de viento.

1.3.4 Diseño experimental .-

Para el diseño del modelo de central será necesario que se considere los siguientes aspectos :

- a.- Las características del sitio o sitios donde se podrían aplicar el modelo de modo de obtener la mayor eficiencia.

- b.- La elección de un sistema de acumulación definirá prácticamente la economía de la pequeña central eléctrica.
- c.- El modelo definitivo y su esquemización será muy fundamental, esencialmente si se piensa en una futura construcción.

2. CAPITULO SEGUNDO : CARACTERISTICAS FISICAS Y MECANICAS

2.1 VELOCIDAD DEL VIENTO :

Las unidades prácticas de velocidad de viento fácilmente valorables de la Oficina Meteorológica son la velocidad media frecuente y la " velocidad de ráfaga máxima ", la cual, por razón de características del instrumento por medio del cual ésta es medida, representa la velocidad del viento media promediada por los 3 segundos.

La velocidad del viento básica puede ser considerado como, la máxima velocidad de ráfaga a una altura determinada en campo abierto, estimando que va a ser excedido en el promedio solamente una vez en un período dado.

A partir de la superficie del suelo y hacia arriba, la velocidad del viento aumenta de un modo rápido e irregular; de ahí que las observaciones dependen mucho de la situación de los instrumentos y no tengan, generalmente, más que un valor relativo.

Por ello, se aprecia muchas veces su valor a estima, con arreglo a determinados efectos; así se puede considerar la siguiente escala de la fuerza del viento llamada ESCALA DE BECAUFORT, la que nos dá los siguientes números para las diferentes velocidades del viento. /..

TABLA No. 1 - ESCALA DE BECAUFORT

Número Beaufort	Velocidad m / seg	Efectos del Viento que se observan sobre la Tierra	Nombre del Viento
0	0 a 0.5	Calma; el humo se eleva verticalmente.	Calma
1	0.6 a 1.7	La dirección del viento es mostrada por la desviación de la vertical del humo ; pero no lo indican las veletas .	Brisa
2	1.8 a 3.3	Se siente el viento en la cara; hace susurrar las hojas; de ordinario, las veletas son movidas por el viento .	Flojito
3	3.4 a 5.2	Pone en constante movimiento las hojas y ramitas; el viento hace flotar extendidas las banderas ligeras .	Flojo
4	5.3 a 7.4	Levanta polvo y papeles sueltos; mueve las pequeñas ramas de los árboles .	Bonacible
5	7.5 a 9.8	Los pequeños árboles con hojas empiezan a cimbrarse, en las aguas del interior se forman pequeñas olas encrestadas.	Fresquito
6	9.9 a 12.4	Mueve las grandes ramas de los árboles; silba en los alambres telegráficos; es difícil usar los paraguas .	Fresco
7	12.5 a 15.2	Mueve árboles enteros; es molesto marchar contra el viento .	Muy Fresco
8	15.3 a 18.2	Arranca ramitas de los árboles; generalmente impide avanzar contra él.	Frescachón
9	18.3 a 21.5	Produce daños en las construcciones ligeras (arranca las caperuzas de chimeneas, y tejas)	Duro
10	21.6 a 25.1	Raras veces se produce en el interior; arranca de raíz los árboles; causa considerables daños a las estructuras o construcciones .	Muy Duro
11	25.2 a 29	Se produce muy raramente; ocasiona muchos daños .	Huracanado
12	> 29	Se produce muy raramente; ocasiona muchos daños	Huracán

El punto de arranque, en cualquier proyecto importante de aprovechamiento de la energía del viento es el de la determinación de las velocidades del viento en la localidad seleccionada.

Para tener una idea general sobre la velocidad del viento en nuestro medio, a continuación se tiene un cuadro de las distintas estaciones a cuyo cargo está el Ministerio de Defensa.

Ciudades	Frecuencias que prevalecen	Velocidades Max. (km/h)	Velocidades Medias (km/h)	Períodos de registro (años)	Altura S.N.M. (m)
1 Tulcán	SE	24	18	12	2950
2 Ibarra	N	16	10	12	2228
3 Quito (Aereopuerto)	N	20	18	10	2812
4 Latacunga	S	20	14	10	2784
5 Ambato	S	16	14	10	1530
6 Riobamba	E	25	18	17	1795
7 Cuenca	NE	16	10	15	2531
8 Loja - La Toma - Valle Catamayo	N	25	8	6	1238
9 Macara	W	18	16	12	430
10 Guayaquil (Aereopuerto)	SW	25	18	18	4
11 Salinas	SW	20	16	19	4
12 Galápagos - Isla Baltra	S	18	16	6	16
13 Pastaza - Shell Mera	N	15	12	10	1043
14 Sucúa	S	18	12	11	950
15 Tiputini	N	12	12	12	220
16 Machala	NW	10	8	9	4

TABLA No. 2.- Registro del Ministerio de Defensa de las velocidades medias del viento, y de las velocidades máximas, en estaciones seleccionadas. El período de los registros comprende de 6 a 17 años, terminando en 1976.

Según esto la velocidad en nuestro medio es de 14 km / h ($\simeq 4$ m/seg), pero los valores medios en cada punto oscilan entre valores más amplios:

Según Boletines Meteorológicos se ha logrado recopilar los datos necesarios de velocidad y frecuencia a tres horas prefiijadas en un lapso de 10 años, comprendidos entre 1964 y 1973 .

Las estaciones de las cuales se ha extraído los datos corresponden aproximadamente al 80 % del total extendidas a lo largo de todo el país y a cuyo cargo está el Instituto de Meteorología e Hidrología .

TABLA No. 3

Provincias	Estaciones	Velocidades Medias			Frecuencias			Altura s.n.m. (m)
		07 h (m/seg)	13 h ^{ah}	19 h	07 h	13 h	19 h	
Esmeraldas	Borbón	0.18	1.14	0.32	W	N	S	20
	San Lorenzo	1.18	2.16	1.55	N	E	SE	5
	Lita	0.08	4.05	2.35	N	W	SE	571
	Muisne	2.82	4.03	3.73	SW	W	S	2
Manabí	Jama	0.91	4.69	2.45	NW	NE	SE	5
	Portoviejo	1.10	2.37	2.09	SE	E	NW	44
	La Naranja - Jipijapa -	0.46	0.70	0.98	SW	SE	NE	528
	Chone	0.05	1.47	0.93	SW	SE	NW	20
Los Ríos	Vinces	0.55	1.10	0.68	N	E	E	41
	La Clementina	0.94	1.59	0.62	SE	S	E	20
	Isabel María	1.02	1.38	0.97	SE	E	S	7
	Pichilingue	0.82	1.36	0.73	SW	SE	S	73
Guayas	Tenguel	0.47	1.48	1.26	SE	SW	W	15
	Naranjal	0.23	0.93	1.71	N	N	SW	30
	Milagro	0.87	1.46	1.15	SW	NW	W	13
	Daule	1.73	2.21	2.86	SW	S	S	20
El Oro	Marcabelli	0.56	1.80	1.18	N	SW	W	600
	Zaruma	0.78	1.28	1.18	N	S	NE	1.150
	Arenillas	0.25	2.33	0.37	N	E	NE	15
	Pasaje	0.61	1.42	0.80	W	W	SE	15

a.- REGION LITORAL

Provincias	Estaciones	Velocidades Medias (m / seg)			Frecuencias			Altura SNM. (m)
		07 h	13 h	19 h	07 h	13 h	19 h	
Carchi	Tulcan	0.60	5.18	1.18	E	SE	NE	2950
	El Angel	2.95	4.78	3.56	E	S	N	3.055
	San Gabriel	1.52	2.56	2.01	SE	S	SW	2.860
Imbabura	Atuntaqui	0.30	4.51	1.68	NE	N	E	2.350
	Ibarra	0.03	3.81	0.79	N	NE	NE	2.228
	Otavalo	0.60	2.94	1.26	NE	SE	N	2.556
	San Pablo del Lago	0.10	2.72	0.63	NW	E	N	2.680
Pichincha	Q - Observatorio	0.56	0.94	0.64	W	E	SE	2.818
	Tabacundo	1.66	6.71	3.79	NE	SE	SW	2.876
	Tumbaco	0.76	3.41	1.70	S	S	N	2.348
	Machachi	4.69	7.70	4.04	SW	NE	SE	2.950
Cotopaxi	Cotopaxi	4.98	7.25	6.97	S	N	NE	3.560
	Latacunga	0.59	3.44	2.79	S	N	SE	2.809
	Pilalo	1.04	1.69	1.05	SW	NE	NE	2.500
	El Corazón	1.11	1.49	0.96	E	NE	W	1.500
Tungurahua	Píllaro	1.50	3.53	2.43	NE	N	NE	2.805
	Ambato	0.44	4.47	2.39	SE	E	S	2.540
	Patate	0.40	9.52	4.71	S	SW	SE	2.360
	Baños	0.74	3.75	1.53	W	NW	SW	1.843
Chimborazo	Guaslan	0.27	1.81	1.25	NE	N	NW	2.750
	Guamote	3.51	9.03	6.49	N	E	W	3.020
	Riobamba	0.13	4.38	2.34	NE	E	N	2.796
	Pachamama - Tixan -	3.07	3.55	2.87	E	S	NE	3.600
Bolívar	San Simón	0.18	4.04	0.96	S	SW	W	2.600
	Chillanes	0.85	3.98	0.88	W	SW	S	2.300
	San Pablo de Atenas	0.30	2.99	0.49	SE	NE	SW	2.750
Cañar	Cañar	3.15	5.51	2.85	SE	E	N	3.104
Azúay	El Labrado	1.95	5.10	2.61	NE	W	N	3.260
	Paute	0.14	2.32	1.33	S	W	N	2.289
	Cuenca - Ricaurte	0.22	3.88	1.58	NE	SW	N	2.562
	Santa Isabel	1.27	3.31	1.59	NE	SE	SE	1.598
Loja	Saraguro	4.54	6.91	3.97	SE	NE	SW	2.520
	Cotacocha	1.65	3.29	1.51	NE	N	NW	1.860
	Malacatos	0.27	2.03	1.35	NW	NE	NE	1.600
	Cariamanga	0.75	2.22	1.43	NE	NW	N	1.900

Provincias	Estaciones	Velocidades Medias (m / seg)			Frecuencias			Altura SNM (m)
		07 h	13 h	19 h	07 h	13 h	19 h	
Napo	Putumayo	0.17	1.59	0.63	S	S	SW	230
	Tiputini	0.27	1.79	0.72	W	N	S	220
	Tena	1.09	1.02	0.70	NE	N	SE	527
	Papallacta	2.08	3.80	1.81	SE	NE	NW	3160
Pastaza	Puyo	0.16	1.39	0.23	NE	NE	SE	950
	Pastaza	2.05	2.31	1.30	NW	E	E	1043
	Curaray	0.73	2.27	1.12	N	W	NW	300
Morona - Santiago	Sucua	0.20	2.30	0.53	N	E	SE	910
	Zamora	0.05	1.65	0.53	E	NE	NE	970
	Taisha	0.89	2.58	1.13	S	S	E	511

c .-. REGION ORIENTAL .

TABLA No. 3 (a, b y c) .-

Registro de Boletines Meteorológicos de velocidades medias y frecuencias de estaciones a cuyo cargo está el Instituto de Meteorología e Hidrología, para horas prefijadas por dicho instituto. El período de registros corresponde a 10 años consecutivos, terminando en 1973 .

./..

2.2 DIRECCION Y TURBULENCIA DEL VIENTO .-

A suficiente altura, como cualquier viajero aéreo conoce que el viento fluye duro y firmemente. A nivel de tierra, debido a la fricción y dureza del terreno, el viento fluye algo menos fuerte pero mucho menos constante, luego éste es turbulento. Es de común experiencia que sobre el mar, el cual representa lo más lizo de las superficies de la tierra lejos de la influencia del continente, la velocidad a nivel del mar es mayor y la turbulencia menor que sobre tierra, mientras que en áreas con construcciones, dentro de las ciudades las cuales son de lo más aspero de la superficie del globo terrestre, la velocidad a nivel del suelo es menor y la turbulencia mayor que sobre el mar.

La proporción de cualquier obstrucción localizada en un flujo dado de viento, afecta las fuerzas que ese viento ejerce en sus varias partes.

El viento es producido por una gradiente de presión a gran escala en la atmósfera sobre la superficie terrestre.

Cerca del terreno el viento es retardado por la fricción de la superficie y el esfuerzo virtual de Reynolds, que resulta de la cantidad de movimiento, cambia entre las capas cortantes debido a la turbulencia. A una altura suficiente del terreno, el viento se mueve libremente en una dirección paralela a los " isobars " y no está afectado por efectos de fricción con la superficie. La mínima altura a la cual esto ocurre, está determinado por la gradiente de altura : Hg_r y está usualmente entre 250 m y 600 m. La correspondiente velocidad del viento, está referida a la gradiente del viento.

DEVENPORT ha mostrado que la variación de la velocidad media con la altura puede ser expresada aproximadamente en forma de una simple ley de capacidad :

$$\bar{V} = \bar{V}_g \left(H / H_g \right)^\alpha \quad (1)$$

donde :

\bar{V}_g es la gradiente media de la velocidad del viento

H_g es la gradiente de altura

\bar{V} es la velocidad media a una altura H

α es un índice que depende de la rugosidad superficial y generalmente varía de 0,15 para terreno despejado con pocos obstáculos a 0,4 en los centros de grandes ciudades.

Los valores de gradientes de altura correspondiente a esos valores de α son respectivamente 275 y 500 m.

La ecuación (1), es dibujada en la figura No. 1 y conforma aproximadamente a los resultados experimentales obtenidos en vientos fuertes a alturas bien bajas y a una gradiente de altura.

La dirección del viento también varía con la altura. Debido a la influencia disturbadora de la superficie terrestre, la dirección del aire está determinada por la gradiente de presión y por las fuerzas de CORIOLIS crecientes, por razón de que el viento está fluyendo sobre una tierra rotativa. Cuando una parte de aire viene a estar bajo la influencia de una gradiente de presión, tiene una tendencia a moverse bajo la gradiente de una región de alta presión a una región de baja presión .

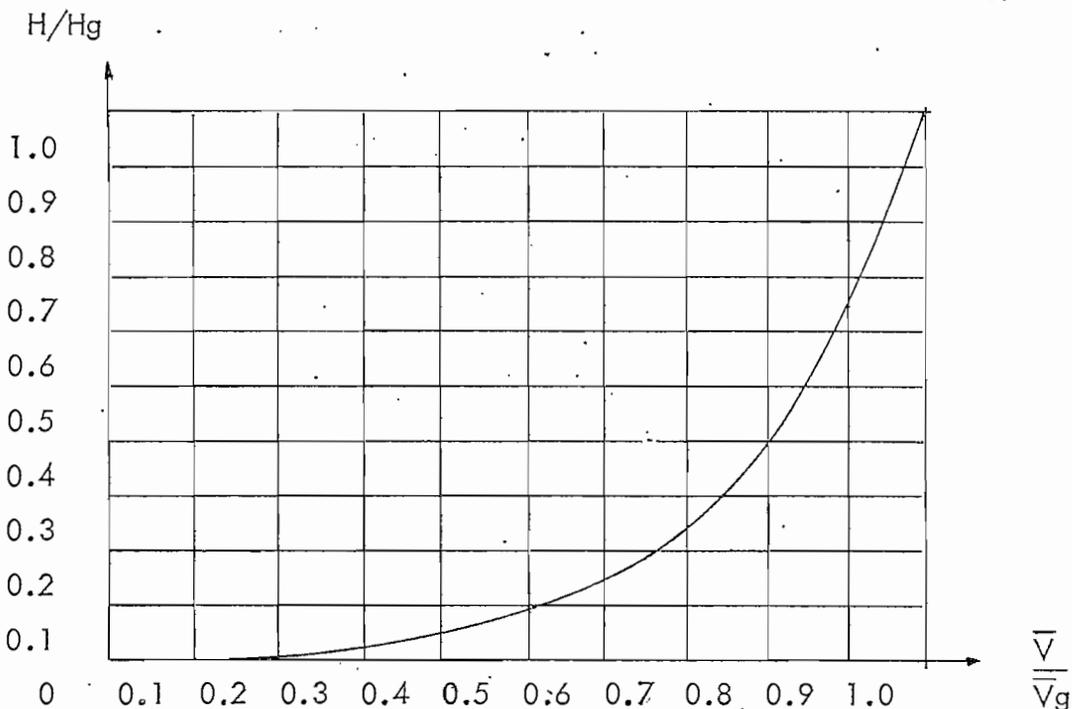


FIGURA No. 1 .- Variación de la velocidad media del viento con la altura .

Sin embargo, el efecto de la fuerza de Coriolis, es de deflectar la parte de aire a la derecha de su dirección de movimiento en el hemisferio Norte e izquierda en el hemisferio Sur.

Eventualmente las dos fuerzas en la partícula de aire vendrán a equilibrarse, con la fuerza de Coriolis igual en magnitud y opuesta en dirección a la de la presión. La dirección resultante del viento estando paralela a los ISOBARS y en sentido antihorario en una región de baja presión en el hemisferio Norte y se ilustra en la Figura No. 2.

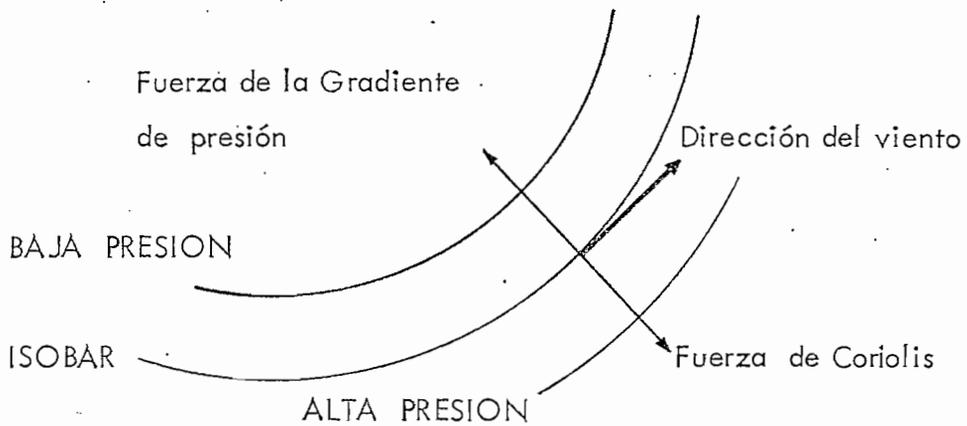


FIGURA No. 2 .- Dirección del viento en el Hemisferio Norte entre una gradiente elevada .

Si la tierra no rotara sobre su propio eje, los vientos se moverían desde altas a bajas presiones en una dirección perpendicular a los ISOBARS (dirección de la gradiente de presión). Pero la rotación de la tierra produce un efecto llamado la FUERZA DE CORIOLIS lo que está en los ángulos normales a la dirección del movimiento de los cauces de ríos, corrientes oceánicas, corrientes de aire y hasta los proyectiles.

El efecto Coriolis es grande en los Polos y disminuye a cero en el Ecuador. Esta también varía directamente con la velocidad del viento. La fuerza de Coriolis afecta la dirección de todos los vientos de la superficie de la tierra, excepto aquellas a lo largo del Ecuador.

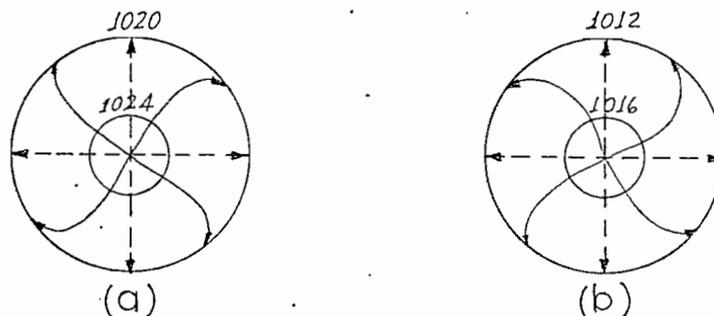


FIGURA No. 3.- Este diagrama demuestra como la fuerza de Coriolis

deflexiona al viento desde la gradiente de presión en la dirección de ambos hemisferios (mostrados por las líneas segmentadas)

- a) Hemisferio Norte, deflexión a la derecha
- b) Hemisferio Sur, deflexión a la izquierda .

La fuerza Coriolis está dada por :

$$F_c = 2 P w \bar{V}_g \text{ Sen } \varnothing , \text{ donde :}$$

P = densidad de la masa del aire

w = velocidad angular de la tierra, y

\varnothing = latitud del lugar considerado

Iguando la fuerza de Coriolis y la gradiente de presión nos da :

$$\bar{V}_g = \frac{\text{Gradiente de presión}}{2 P w \text{ Sen } \varnothing} \quad (2)$$

Más cerca al terreno, otra fuerza se pone en juego : la fuerza de fricción inducida por la superficie rugosa de la tierra, la cual actua en dirección opuesta a la velocidad del viento.

El efecto neto del balance de fuerzas es una tendencia a virar la dirección del viento hacia un centro de baja presión, como se ilustra en la Figura No. 4.

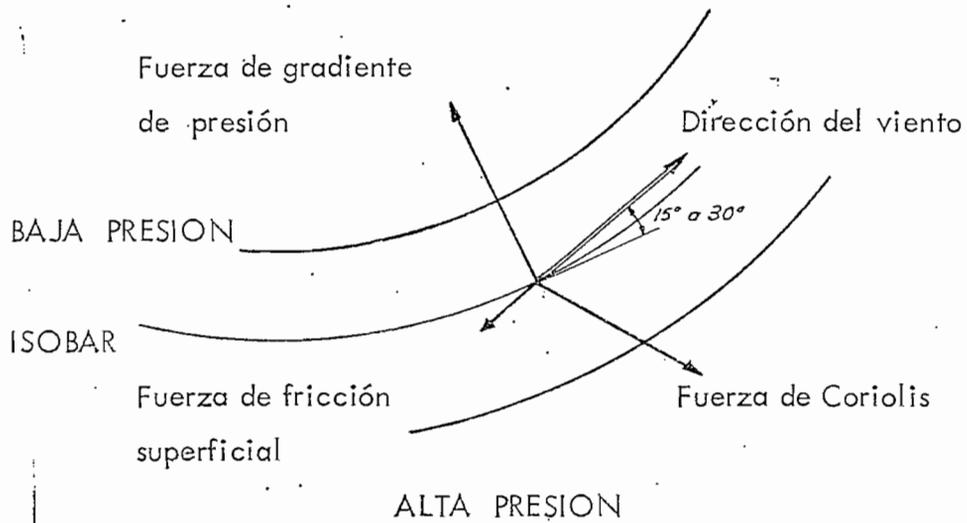


FIGURA No. 4 .- Dirección del viento en el Hemisferio Norte cerca al nivel de la tierra.

El ángulo entre la dirección de la gradiente del viento y la dirección del viento cerca al nivel de tierra está generalmente entre 15° y 30° . Este ángulo es dependiente principalmente de la rugosidad de la superficie; y es más bien sorprendentemente independiente de la superficie.

La turbulencia del viento superpuesta es producida por las irregularidades de la superficie de la tierra y también por convención termal de corrientes de aire. La turbulencia es una cantidad vectorial con variaciones casuales en tiempo y espacio.

Mucho queda todavía por hacer. Ninguna atención ha sido dada para tratar con las oscilaciones de viento exitado y más conocimiento se requiere en condiciones de flujo turbulento que se presentan en las cercanías de ciudades.

2.3 EFFECTOS DE LA ALTURA SOBRE LA VELOCIDAD DEL VIENTO

El rozamiento superficial terrestre disminuye la velocidad de las capas de viento inferiores, y por tanto las velocidades son mayores en las grandes alturas de la atmósfera. A 150 m. de altura las velocidades son en general 1/3 mayores que a 30 m de altura.

Sobre un plano no destruido se puede estimar la velocidad del viento V a la altura H a partir de la velocidad V_0 medida a la altura H_0 por medio de la relación

$$\frac{V}{V_0} = \left(\frac{H}{H_0} \right)^n \quad (3)$$

en la cual $n = 1/2$ para vientos de menos de 8 Km/h; $n = 1/5$ de 8 a 56 km/h; y $n = 1/7$ para más de 56 Km/h. Sobre terreno irregular con obstrucciones, sólo aquellas velocidades registradas en el lugar son válidas para las predicciones de energía.

2.4 LA PRESION DEBIDA A LA VELOCIDAD DEL VIENTO

Puede expresarse con suficiente aproximación por la siguiente fórmula :

$$P = \frac{V^2}{16,1} \quad (4)$$

donde P' está dado en kilogramos por metro cuadrado y V es la velocidad real en metros por segundo.

La velocidad real del viento puede obtenerse de :

$$\log v = 0,099 + 0,9012 \log V \quad (5)$$

donde v es la velocidad real del viento en kilómetros por hora y V es la velocidad indicada por un instrumento de medida de cuatro hemisferios de Robinson.

La tabla que sigue expone las velocidades indicadas, velocidades reales y presiones del viento correspondientes sobre superficies planas (o proyectadas) en ángulo recto con la dirección del viento.

Velocidades del Viento Km / h		Presión Kg / m ² .	Velocidades del Viento Km / h		Presión kg / m ² .	Velocidades del Viento Km / h		Presión kg / m ² .
Indicadas	Reales		Indicadas	Reales		Indicadas	Reales	
0	1.1	- - -	80.5	84.0	20.0	161	123.0	72.3
16.1	16.2	1.26	96.5	75.8	27.1	177	134.0	87.0
32.2	28.4	3.95	112.6	87.5	36.1	193	146.0	102.5
48.3	40.3	8.20	128.7	99.3	46.6	209	158.0	120.1
64.4	52.2	13.10	144.8	111.0	59.3	225	170.0	138.7

TABLE No. 4.- Velocidades y presiones del viento .

La presión del aire disminuye a medida que la altitud aumenta, ya que la presión del aire se debe al peso excesivo de la atmósfera .

Desde el nivel del mar a una altura de 1000 pies la presión del aire se ve reducida cerca de un treintavo, un barómetro de mercurio lee solamente 29 pulgadas en lugar de 30. Si la atmósfera tuviese una densidad uniforme y ésta continuara, la presión del aire llegaría a cero a 3.000 pies de altitud (cerca de 6 millones), sobre lo cual ya no habría aire para todos.

Sabemos, sin embargo, que la compresibilidad del aire hace la atmósfera densa en el fondo, excepto rara vez a medida que la altitud aumenta. La atmósfera está por tanto lejos de una densidad uniforme, y la presión del aire no puede continuar cayendo a una razón de 1 pulgada por cada 1000 pies de altura en altitud.

Como la altitud aumenta y el aire llega a ser cada vez menos denso, grandes profundidades de aire deberán verse inferiores a la marca de un treintavo del peso de la atmósfera .

Una figura que puede ser usada en cálculos aproximados, con un cambio ordinario en la presión de una pulgada por casi 1000 pies para los primeros 500 pies es lo que se muestra a continuación :

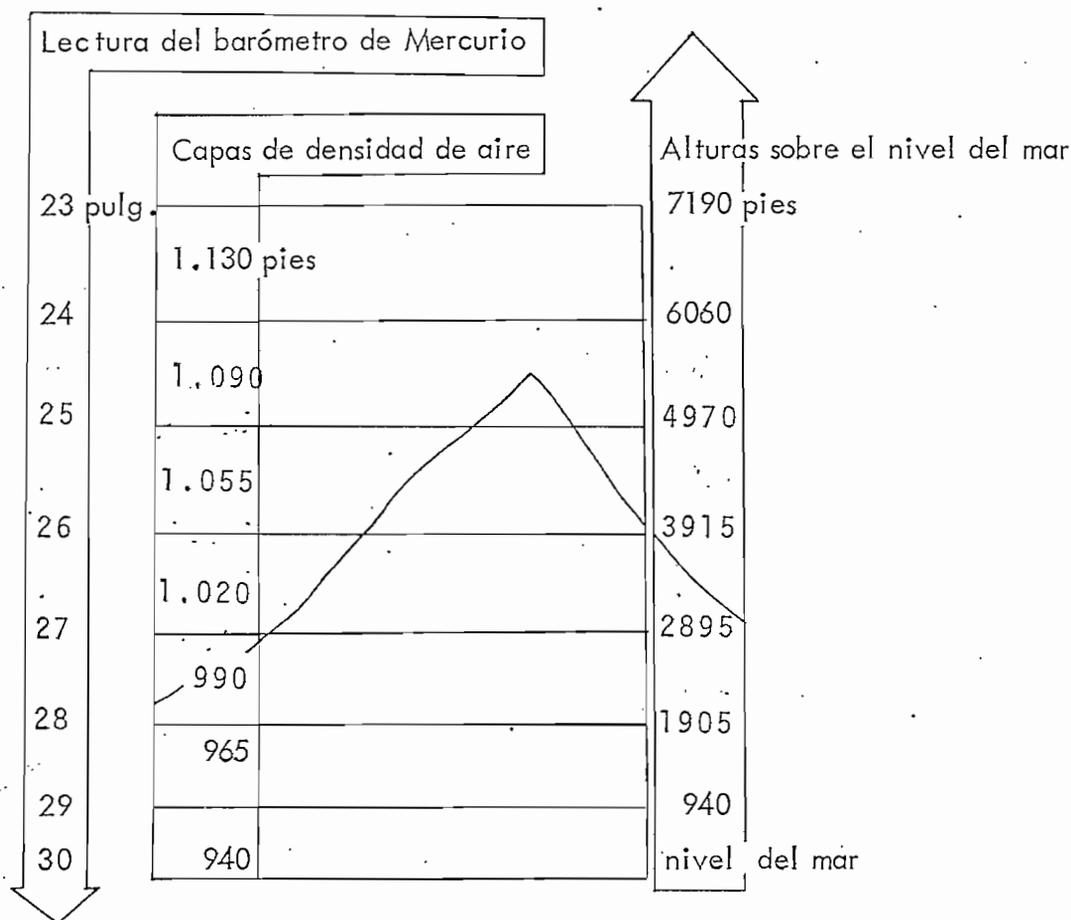


FIGURA No. 5 .- Este diagrama representa aproximadamente densidades de capas de igual peso de atmósfera en aumento de altitudes .

Ya que la presión del aire se mide por el barómetro de Mercurio, se acostumbra a expresar la presión en términos de largo de columna de mercurio, cuando la medición es cómoda, más bien en libras por pulgada cuadrada. El nivel normal de presión del aire al nivel del mar es usualmente dado como casi 30 pulgadas. Lo cual es una pequeña guía para decir, que la presión del aire es sustentada como 30 pulgadas de columna de mercurio.

El nivel normal de la presión del aire al nivel del mar es cercanamente 15 libras por pulgada cuadrada, como explicación previa.

Dividiendo 30 para 15, vemos que cada 2 pulgadas de la columna de mercurio representa aproximadamente una libra de presión.

En años recientes se han adoptado en el mundo entero una cantidad métrica de presión llamada MILLIBAR (mb). Esto es igual a casi un milésimo de la presión del aire al nivel del mar.

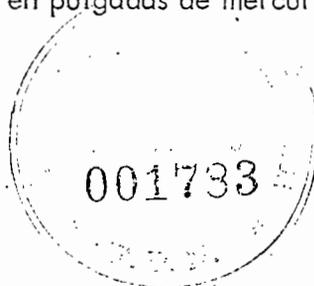
La siguiente tabla muestra unidades como : pulgadas y millibares relacionadas.

Pulgadas de Hg	Millibares de Presión
31.00	1050.0 (aproximadamente)
30.00	1015.9
29.92	1013.2
29.53	1000.0
29.00	982.1
1.00 *	34.0 (aprox.)
0.10	3.4 (aprox.)
0.03	1.0**(aprox.)

TABLA No. 5 .- Unidades de presión en pulgadas de Hg y Millibares .

* Valor usado para la conversión de pulgadas de mercurio a millibares.

** Valor usado para convertir millibares en pulgadas de mercurio .



El número 29.92 pulgadas de mercurio se da porque esta es la presión atmosférica estandar al nivel del mar para el mundo entero; 31.0 es casi tan alto como la lectura ordinaria del barómetro en el nivel del mar; 29.0 es casi tan bajo como la lectura ordinaria.

2.5

PRESION REAL DEL VIENTO SOBRE UNA SUPERFICIE

En un objeto, tal como un molino o como la hélice de un motor de viento, la presión real del viento es la presión debido a la velocidad del mismo sobre la cara que da al viento más el efecto debido al vacío parcial que reine en el lado opuesto. El aumento de presión debido a este vacío depende de la forma y superficie de las paletas, pero según HUMPHERYS, puede aceptarse por término medio un factor de multiplicación de 1.5. Una forma aerodinámica reduce el valor del factor al disminuir los remolinos alrededor de los bordes posteriores.

La proporción de cualquier obstrucción localizada en un flujo dado de viento, afecta las fuerzas que ese viento ejerce en sus varias partes.

La presión del viento sobre construcciones, distintas fachadas, cubiertas, etc., depende de la forma del conjunto y también de los edificios que pueda haber en su proximidad. Con una misma forma exterior e igual dirección del viento, la presión puede ser muy distinta, según la forma como la parte interior comunica con el aire de fuera. Los tejados pueden estar sujetos a violentas aspiraciones, de abajo hacia arriba.

Respecto a los molinos de viento, si estos se encuentran dentro de un arreglo y están situados muy cerca uno del otro, ellos ocasionarían efectos de interferencia.

Por razón de la reducción de la velocidad del viento que pasa a través de los planos de cada molino de viento, el contenido de la energía promedio del viento disminuirá al cruzar el arreglo desde la dirección de ataque hasta el término opuesto .

Dentro del arreglo las estelas de los molinos de viento individuales, pueden ser regiones de turbulencia incrementada donde habría variaciones de la intensidad del viento. Esta intensidad podría llegar a ser substancialmente más baja en algunos lugares e igualmente más alto en otros lugares que la intensidad del campo de viento original.

Tras cercas, edificios o bosques, por ejemplo, el viento contornea sufriendo una distorsión, lo cual, bajo la mayoría de condiciones atmosféricas, desaparece después de una distancia de por lo menos 20 veces la altura del obstáculo. La restauración del flujo del viento tras un molino de viento requiere una distancia similar, aunque ligeramente menor en razón de la reducción en potencia que será más pequeña que para un objeto sólido. Se ha hecho una estimación de la distancia que debe haber entre molinos de viento, siendo esta de 10 a 30 veces el diámetro del rotor.

2.6 LA ENERGIA DEL VIENTO

Los sistemas de presión atmosférica que mantienen la circulación en toda la atmósfera y los océanos, los cuales conducen los vientos y en cambio crean las olas, son generados por solamente el 1 % de la energía radiante proveniente del sol interceptada por la tierra, con un monto de 1.800 millones de vatios..

En promedio, esto corresponde a 3.5 vatios por metro cuadrado de la superficie de la tierra .

./..

El flujo del viento a través de un metro cuadrado vertical, digamos a una altura de 25 m., sin embargo, puede alcanzar un promedio anual de 500 vatios por metro cuadrado en muchas localidades con viento, comparados con los 3.5 vatios mencionados anteriormente.

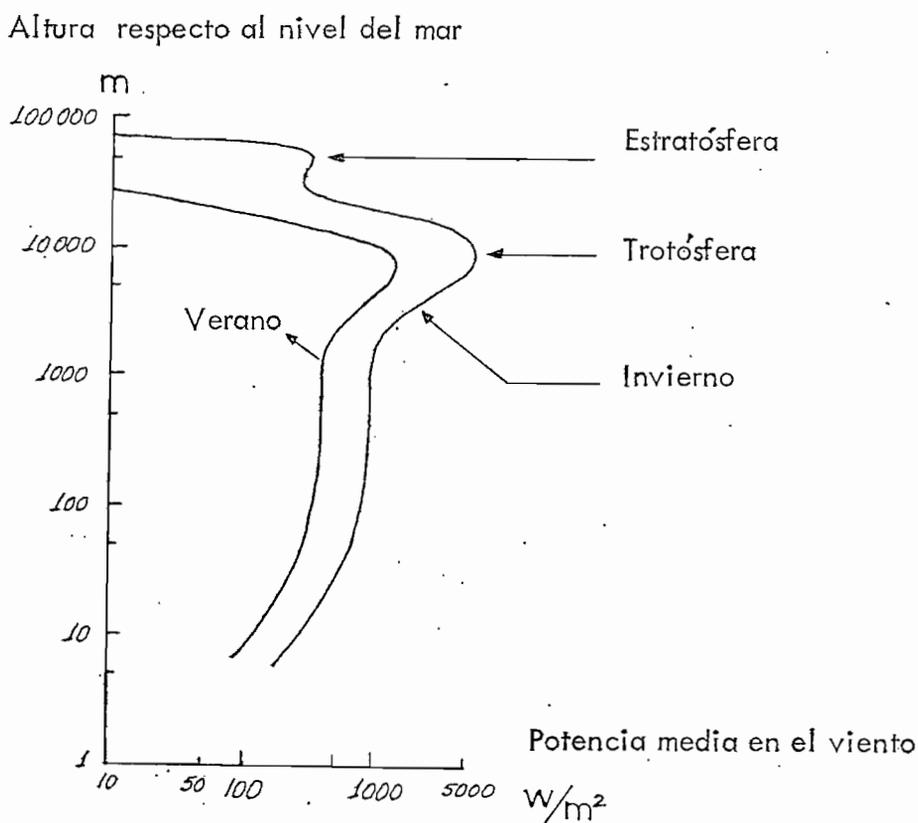


FIGURA No. 6 .- Variación de la Potencia del Viento con la elevación
(Vatios por metro cuadrado)

La potencia en el viento se incrementa con la altura, tal que puede ser factible aún donde la velocidad del viento a raz de la tierra es baja, para utilizar potencia del viento si la potencia es extraída a una altura suficiente.

Los datos de las alturas más bajas en la figura corresponden a condiciones típicas en el Oeste de Europa y el Noreste de América; los datos de altitudes superiores son comunes para áreas de latitud nórdica por los 55 grados.

A alturas más altas las fluctuaciones en la velocidad del viento son despreciables para la evaluación de potencia.

El incremento general de potencia con la altura pueden hacer factible la utilización de la potencia del viento en forma igual en áreas con velocidades del viento medianamente bajas si la energía es extraída a suficiente altura.

La energía cinética (E_c) contenida en una masa (m) de un movimiento de aire con una velocidad particular (v) es simplemente :

$$E_c = \frac{1}{2} m v^2 \quad (6)$$

Si consideramos la masa de aire que pasa a través de un molino de viento (A) en un tiempo (t), entonces se tendrá :

$$m = \rho A v t$$

donde : ρ es la densidad de la masa del aire .

Partiendo del concepto de potencia : $P = E_c / t_r$, se tiene una expresión final para la potencia (P) igual a :

$$P = \frac{1}{2} \rho A v^3 \quad (7)$$

La energía del viento se obtiene mediante la obstrucción del camino del aire, pero en el caso de un molino de viento, éste no puede extraer toda la energía que contiene el viento. Si así fuera, el aire que viene detrás del viento tendría que estar completamente en reposo. Se puede demostrar por la teoría del Momentum, que al molino de viento se le puede sacar la mayor cantidad de fuerza cuando el viento está a una tercera parte de la velocidad inicial. En estas condiciones la fuerza de salida será del 59.3 % de la fuerza inicial del viento.

Por lo tanto se tendrá que la potencia máxima será :

$$P_{\max} = 0.593 \frac{\rho A v^3}{2} \quad (8)$$

Como la potencia máxima teórica obtenible de un viento dado es aproximadamente 6 / 10 de la energía cinética total del mismo, parece que, con un molino de viento de 70 % de rendimiento aerodinámico y 90 % de rendimiento de engranaje, 37 % de la energía cinética del aire es el límite superior que puede esperarse para cualquier aplicación práctica.

En cada mes hay un grupo bien definido de velocidades del viento que predominan y hay también un grupo bien definido de vientos que contienen la mayor parte de la energía de cada mes y se los llama vientos de energía .

Los vientos de energía o energéticos producen alrededor de 3/4 de la energía total de un mes dado. El viento energético sopla a velocidades de alrededor de 2.3 veces de los vientos predominantes.

El viento de más alta energía tiene una velocidad de unos 16 kms/h más que lo del viento más frecuente.

Cualquier dispositivo regulado que tenga por objeto mantener constante la potencia producida durante el transcurso del año debe ser capaz de desperdiciar tres veces tanta energía que lo que se consume normalmente.

Por ejemplo la potencia teórica del viento, que pasa a través de un círculo de 3.05 m (10 pies) de diámetro es 3.1 HP con una velocidad del viento de 32 km/h y 10.4 HP con una velocidad de 48.3 km/h.

Si bien es cierto, la potencia del viento es con todo atractiva, por razón de que ésta es continuamente regenerada en la atmósfera bajo la influencia de la energía radiante del sol, y así es una fuente autorrenovable de potencia. Esto tiene además la ventaja de ser una fuente limpia, mientras que la potencia nuclear y por combustible fósil produce polluciones peligrosas.

Derivada en una gran escala, la potencia por viento teóricamente podría producir cantidades asombrosas de electricidad.

Cientos de generadores de molinos de viento aerodinámicos, nominalmente a 1 kW ó menos c/u, han sido usados en la parte rural de Norte

América para alumbrar haciendas o cargar baterías en áreas sin utilidades eléctricas.

Estas muy modestas aplicaciones de la potencia del viento han inspirado un número de proyectos más ambiciosos para usar máquinas grandes accionadas por viento, o turbinas de viento para generar grandes cantidades sustanciales de electricidad para uso público.

2.6.1 APLICACIONES :

A continuación podemos mencionar algunas aplicaciones de la energía del viento :

a. Producción Eléctrica :

La energía del viento tiene una alta calidad de la forma de energía mecánica que puede ser convertida en eléctrica, con un mínimo de pérdidas de energía. Esto es significativo porque con la mayoría de los otros sistemas para la conversión de la energía solar a energía eléctrica; la mayoría de pérdidas de energía ocurren en el paso cuando el calor es convertido en energía mecánica.

b. Producción de Calor :

Una alternativa es combinar directamente lo solar y fuentes de viento productores de calefacción a través del uso de viento conducido por bombas de calor que extraen calor solar a bajo grado de las cercanías de un colector solar y bombas y calentando a temperatura utilizable. Cuando una bomba de calor es usada con un colector solar como fuente de calor, un colector eficientemente alto es posible ya que él puede ser operado

a baja temperatura donde las pérdidas de calor son bajas.

c. Producción de Hidrógeno :

Un molino de viento de generación eléctrica puede ser usado para producir hidrógeno por electrolisis, cuando el generador eléctrico excede la demanda. La eficiencia del proceso de electrolisis es actualmente alrededor del 65 %, pero se espera que pueda llegar a incrementarse substancialmente con esfuerzos que harían a ésta parte de la conversión muy barata.

El hidrógeno que se produce puede ser almacenado o transportado como un gas por medio de una tubería o ducto, como un líquido o puede ser atrapado en rejillas de metal, con un decrecimiento en volumen y en costo.

El hidrógeno puede ser usado para propulsión del calor (codificaciones y procesos industriales) y para regeneración de electricidad (por ejemplo por medio de celdas de combustible - recombinación de hidrógeno y oxígeno) .

d. Otros usos :

En gran cantidad , por razón de que los molinos de viento están bien adaptados para aplicaciones descentralizadas, pueden ser usados para un número de propósitos especiales en localizaciones lejos de cualquier sistema de distribución de energía. Tales aplicaciones incluyen bombeo, irrigación, producción de aire comprimido para usos posteriores, oxidación de lagos y así por el estilo.

Tan lejano como el uso histórico más antiguo, la energía del viento ha sido utilizada para propulsión, particularmente de navíos.

En la evaluación de la factibilidad de utilizar la energía del viento en dos casos distintos podría ser considerada así :

PRIMERA :

El caso dónde la energía del viento estuviese contemplada como de provisionamiento sin almacenar más que una pequeña cantidad que suplementara a la conversión en energía de abastecimiento (digamos del 1 al 10 %) .

SEGUNDA :

El caso donde una introducción masiva de la energía del viento es contemplada, requiriendo una capacidad de almacenamiento de energía substancial.

Si la energía del viento es considerada solamente como suplemento a la fuente que provee la energía convencional, una evaluación puede ser hecha basada en la comparación del capital y de los costos de operación de los sistemas con energía del viento, sobre su período de depreciación, con aquel costo de producción marginal de alternativas de corriente, esto es, costos de combustible y de todo lo relacionado con combustibles. Si la energía del viento va a ser usada en una escala mucho más grande, no obstante, también se debe averiguar cuanta cantidad de capacidad de potencia generada dará el sistema de energía del viento (incluyendo su almacenamiento de energía que facilmente podría reemplazar); y en este caso la comparación sería hecha entre ambos capitales y ambos costos promedios

de operación de las alternativas .

A continuación se presenta un ejemplo de tales comparaciones para molinos de viento que producen electricidad los cuales alimentan a un circuito grandemente utilizado en los Estados Unidos.

El costo de la electricidad (en dólares no variables de 1974) está presentado en la siguiente tabla para cuatro sistemas de energía alternativos, con los parámetros que entran en los cálculos.

Por supuesto en la práctica el costo variará durante el período de 25 años, de acuerdo a los métodos de financiamiento y contabilidad.

Los resultados del costo de producción de electricidad basada en el viento es de 1.3 centavos por kWh comparado con 2.0 centavos por kWh de combustibles fósiles.

En este caso la diferencia es sustancial. Así, pues hay una pequeña duda de que la instalación de potencia de viento suplementaria en localidad con viento favorable es económicamente factible, y de que este pueda ayudar la demanda de recursos de combustibles fósiles.

En las dos últimas columnas de la tabla, se compara un sistema por energía del viento, incluyendo un almacenamiento de energía facilitada, con la potencia obtenida por fisión nuclear. La capacidad de la facilidad de almacenamiento es tal que el almacenamiento combinado de los molinos de viento genera una potencia promedio más del 80 % del tiempo, si se erige en un sitio favorable. De esta manera la potencia valorable será mucho mejor que para una única planta de potencia nuclear, de acuerdo con la

TABLA No. 6 .- COMPARACION DE GENERACION DE POTENCIA ELEC-
TRICA POR DIFERENTES METODOS .

Parámetros de Referencia	Molino de Viento	Petróleo (solamente combustible)	Molinos de Viento con Almacenaje	Fisión (Reactor de agua liviana)
- Costo de capital de operación	200 \$ / m ²	0.0	300 \$ / m ²	702 \$ / kW (e)
- Mantenimiento	0.3 ¢ / kWh (e)	0.05 ¢ / kWh (e)	0.3 ¢ / kWh (e)	0.14 ¢ / kWh (e)
- Producción mínima de potencia	150 w / m ²	---	150 w / m ²	0.6 de instalado kW (e)
- Eficiencia de la conversión de petróleo	---	0.316	---	0.288
- Costo del petróleo	---	0.60 ¢ / kWh (t)	---	0.09 ¢ / kWh (t)
- Incremento anual del costo de petróleo	---	0.0 %	---	0.0 %
- Relación anual de interés.	3.0 %	---	3.0 %	3.0 %
- Período de construcción	1 año	---	1 año	8 años
- Período de depreciación	25 años	---	25 años	25 años
- Incremento anual de salarios y materiales	2.0 %	2.0 %	2.0 %	2.0 %
- Costo promedio calculado de electricidad	1.3 ¢ / kWh (e)	2.0 ¢ / kWh (e)	1.7 ¢ / kWh (e)	1.4 ¢ / kWh (e)

\$ / kW (e) = dólares por kW de energía eléctrica ; ¢ / kWh (t) = centavos por kWh de energía termal; ¢ / kWh (e) = centavos por kWh de energía eléctrica.

presente experiencia y comparable con el comportamiento combinado de 2 a 5 plantas nucleares.

En la comparación de energía de viento y nuclear, la mayor incertidumbre adicional involucra costo de operación. ¿ Es verdad que los molinos de viento demandarán más reparaciones y más hombres de operaciones que los reactores nucleares ? .

2.7 TIPOS DE MOLINOS DE VIENTO

El medio ambiente concerniente a los sistemas de molinos de viento envuelve a factores tales como el gran espacio físico requerido para sistemas de energía del viento, comparadas con los sistemas basados en la conversión del combustible, el riesgo de accidentes, ruido, y la posibilidad de alteraciones climáticas .

Ya que los requerimientos de área de suelo son pequeños y que el terreno alrededor de los molinos de viento pueden ser usados con pocas restricciones, el problema de espacio es principalmente estético. Los riesgos de accidente principalmente involucran partes que pueden ser expeditas, por ejemplo, una paleta rota durante una tormenta. Otros riesgos pueden ser asociados con los sistemas de almacenamiento.

El ruido se presenta de dos maneras : Uno es el ruido generado por la caja de velocidades y el generador. Este ruido puede ser reducido muy por debajo de las normalizaciones requeridas, aún en las zonas de más conservación de quietud. Otro es el ruido creado por el flujo de aire en las paletas del rotor.

La interferencia con la T.V. y con la recepción de radio - frecuencia en las proximidades a los molinos de viento puede ser causado en parte por las torres (como cualquier otra estructura de construcción) y en parte por los rotores, dependiendo de los materiales usados; ya que, los sitios convenientes para una gran producción de electricidad por medio de molinos de viento no se espera sean aquellos sitios que están alrededor de los sitios habitacionales, entonces la aplicación es favorable.

Los molinos de viento con hélices de dos, tres o cuatro paletas han desplazado casi completamente a los molinos de viento holandeses y hélices de múltiples paletas tipo turbina en el accionamiento de generadores eléctricos. La alta velocidad que les es inherente tiene como consecuencias que el rotor y el generador tengan bajo costo y peso. Sin embargo, poseen un par de arranque relativamente bajo con respecto al tipo turbina, en caso de bajas velocidades de viento.

Es conveniente clasificar las máquinas accionadas por viento de acuerdo a la rotación relativa de sus ejes o la dirección del viento .

2.7.1 Máquinas del eje con el viento :

Máquinas cuyo eje de rotación es paralelo a la dirección del viento.

a. ROTOR SAVONIUS :

El rotor Savonius es la forma más simplificada, aparece como un cilindro vertical " rebanado " en la mitad desde la parte superior a la inferior, las dos partes se desplazan como se muestra en la figura No. 7.

Este parece que trabaja en el mismo principio del de una taza de anemómetro con el aumento de que el viento puede pasar entre las placas curvadas. De esta manera el torque se produce por la diferencia de presión entre la superficie cóncava y convexa de la mitad que está de frente al viento y también por los efectos de recirculación en la superficie convexa que viene atrasada al viento.

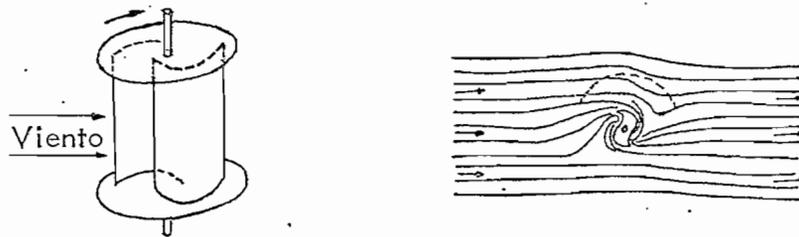


FIGURA No. 7.- Rotor Savonius y flujo de aire a su alrededor.

El diseño del Savonius fue eficiente, alcanzando un máximo de alrededor del 31 %, pero fue muy ineficiente con respecto al peso por unidad de salida de potencia ya que su construcción resulta en toda el área que está " barrida " y que está ocupada por un material de metal. Un rotor Savonius requiere 30 veces más superficie para la misma potencia que la de la turbina de viento de rotor con hélices convencional. Por eso es solamente exitoso y económico para requerimientos de pequeña potencia .

b. ROTOR MADARAS :

El rotor de Madaras trabaja en el principio del efecto de Magnus. En esencia este involucra una técnica del control del "bordeo" el cual intenta suprimir la formación de "superficies de borde" por reducción de la velocidad relativa entre el fluido y el contorno sólido. El camino más simple para ejecutar el efecto de Magnus involucra la rotación de un cilindro. La figura No. 8 muestra el modelo de flujo que existe alrededor de un cilindro que rota localizado en un fuselado en ángulo recto al flujo. En la media parte superior de la superficie del cilindro, cuando el flujo y el cilindro se están moviendo en la misma dirección, la separación es completamente eliminada. En la parte inferior la separación es solamente en parte realizada. Así una circulación se induce causando que una fuerza que se mueve perpendicularmente al flujo y al eje del cilindro sea producida.

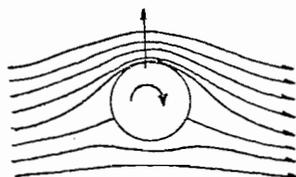


FIGURA No. 8 .- Efecto Magnus .

Madaras propone construir una pista circular alrededor de la cual roten cilindros, montados verticalmente en móviles de plataforma, que se moverían .

Cada cilindro debía ser de 90 pies de alto, 18 pies de diámetro y guiados por un motor eléctrico.

El efecto de Magnus empujaría los carros alrededor de la pista y generadores que accionen se conectarían a los "árboles" de los carros. Sin embargo, el diseño del sistema es pobre aerodinámicamente hablando, pérdidas mecánicas y pérdidas eléctricas, acopladas con su inaptitud de uso en localidades montañosas, resulta en muy poco de hecho con respecto a su diseño. Un único cilindro de tamaño real fue construido en Burlington, New Jersey para pruebas pero desde ahí ningún desarrollo ha sido realizado.

c. ROTOR DARRIUS :

George Darrius de París llenó una patente en los U.S.A. en 1926 para un rotor de eje vertical esquematizado en la figura No. 9 que sigue .

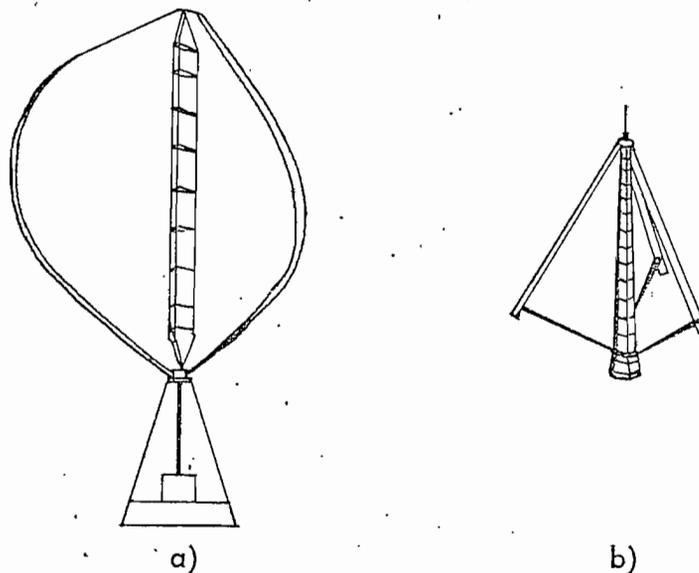


FIGURA No. 9 .- Rotor Darrius : a) \emptyset , b) Δ

El rotor Darrius ha estado siendo recientemente investigado por South y Rangi del Consejo de recursos naturales del Canadá en Ottawa . El rotor Darrius tiene comportamiento cercano al del rotor del tipo propulsor y requiere potencia de entrada para el arranque. La simplicidad del diseño y lo potencial asociado por el bajo costo de producción hace a éste un candidato prominente para la producción de potencia económica. La habilidad para graduar o regular el rotor tipo Darrius para niveles más altos de producción de potencia, 100 kW o más, permanece incierto. Como dato diremos que los rotores Darrius más grandes construidos tienen menos de 20 pies en diámetro .

2.7.2 Máquinas de eje que atravieza el viento .-

Máquinas cuyo eje de rotación es perpendicular a la dirección del viento .

a. ROTOR ACANALADO :

En 1954 los británicos construyeron un molino de viento experimental con 2 paletas de tipo plano, huecas como se muestra en la figura No. 10. Diferentemente a las máquinas convencionales, este no tiene acoplamiento entre el propulsor y el generador. Mientras las paletas son giradas por el viento, la fuerza centrífuga impulsa aire desde la torre hueca hasta los topes de las paletas. Al mismo tiempo la diferencia de presión entre la cima del valor y el asiento de la paleta también arrastra aire a través del semivacio creado en la torre de 100 pies de alto. Así como el aire fluye a través de la torre , este pasa a través de una turbina que acciona a un generador. La hélice tiene 80 pies de diámetro y es capaz de producir 100 kW con un viento de 56 km/h y girando a 95 rpm.

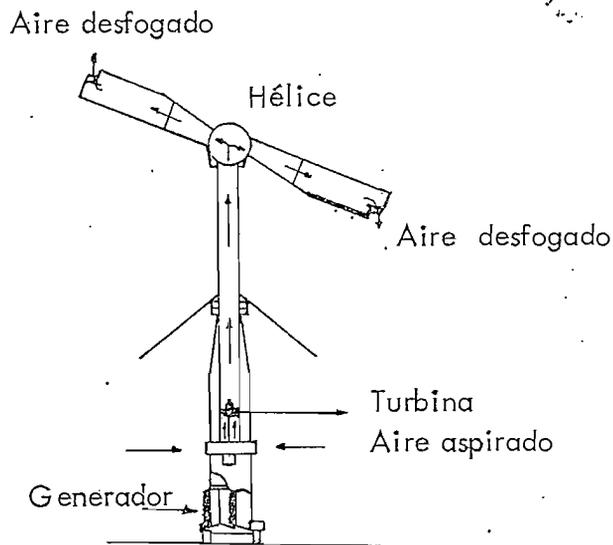


FIGURA No. 10 .- Rotor Acanalado de Enfield - Andreau

En orden a mantener una velocidad del rotor constante, motores hidráulicos fueron usados para la pendiente de la hélice y fueron efectivos a velocidades de viento de 45 a 90 km/h. La hélice fue diseñada de tal manera que pueda agitarse bajo la presión del viento de ráfagas fuertes.

El movimiento del rotor para encerrar el viento es auxiliado y controlado por un sistema operado con potencia. La principal ventaja de este sistema es de que un equipo de generación de potencia no es sustentado en lo alto.

b. DISEÑO DE SMITH - PUTNAM :

El molino de viento construido por Smith - Putnam en la "Colina del Abuelo" en Vermont fue el más grande que se haya construido.

El diámetro de la hélice fue de 175 pies y consistía de dos aletas de acero inoxidable usada en las secciones de láminas NACA 4418. La hélice y el generador pesaban cerca de 20 toneladas y estuvieron soportadas por una torre de 100 pies.

El control de la pendiente fue automático conservando las paletas a una velocidad constante de 28.7 rpm a velocidad del viento de 30 km/h y superiores. Como la velocidad del viento aumenta, las paletas comienzan a ponerse en marcha por la rotación sesga. Las paletas fueron diseñadas con una habilidad para un cono de fricción por encima de los 20 ° para preservar contra ráfagas repentinas y todavía mantener una velocidad razonablemente constante.

El "enconamiento" fue por sí mismo amainado por medio de cilindros llenos de aceite. La planta de potencia fue diseñada para permanecer expuesta a vientos superiores de 190 km/h y para 150 km/h con 6 pulgadas de hielo en el canto delantero. La turbina por viento fue preparada para generar 1 MW.

La turbina mostrada en la figura No. 11 fue erigida en 1941 y operada como unidad de prueba hasta 1943 cuando ocurrió una falla de soporte principal de 24 pulgadas y el reemplazo no pudo ser asegurado por 2 años.

En 1945 una de las paletas voló lejos y se terminó la experimentación con este diseño.

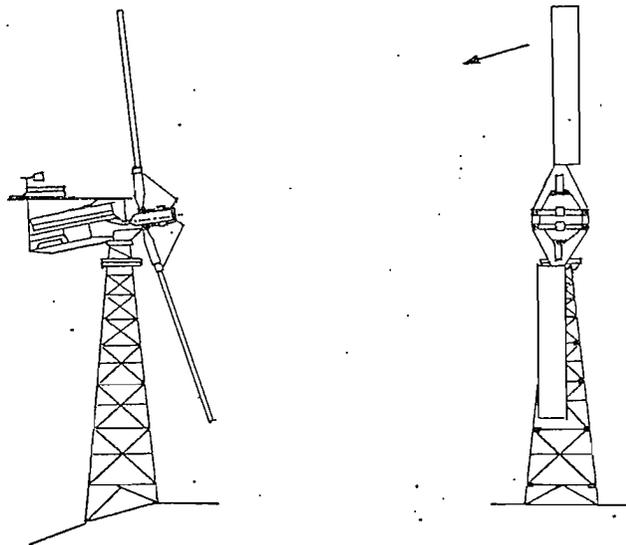


FIGURA No. 11: Turbina de Viento de Smith - Putnam .

A despecho de la falla estructural de la hélice, el diseño de Smith - Putnam ilustra las posibilidades de generación de potencia eléctrica por turbinas de viento de gran escala.

c. ROTOR DE CIRCULACION CONTROLADA :

El concepto de la turbina de viento de rotor de circulación controlada es todavía similar al del rotor de Madaras y al rotor FLETTNER

de los años 20. En lugar de las paletas cilíndricas del rotor, el incremento de presión es generado por láminas de aire que soplan tangencialmente alrededor de las superficies superiores de las paletas desde pequeñas ranuras. Este principio, brevemente, es una técnica de control del "contorneo" para diferir la superación del flujo.

El "soplido" re-energiza la baja energía del "contorneo" de la superficie superior del cilindro moviendo o desplazando por eso el punto de separación aún más lejos atrás del cilindro. Consecuentemente, el arrastre de presión es reducido pero hay un incremento acompañante en el arrastre "viscoso". Al mismo tiempo la circulación es inducida por el "soplido" y existe un incremento en la succión en la parte superior y un decrecimiento de succión en la parte inferior, todo lo cual genera presión.

El gran momento de inercia de una sección de corte de un cilindro de este tipo de paletas ocasiona que este sea muy tieso. El coeficiente de presión constante en ese momento, es perfeccionado ajustando la localización de la ranura, por lo tanto lo precedente complica el control del balance.

2.7.3 TIPOS GENERALES :

Podemos además mencionar el tipo AMERICANO DE MULTIPLES ALAS, se emplea para bombear en granjas, utiliza alrededor del 30 % de la energía cinética del viento, tiene buen momento o par de arranque, cualidad a la que debe popularidad para el accionamiento de bombas de movimiento alternativo. Gira a velocidades de puntas aproximadamente iguales a la velocidad del viento.

El tipo HOLANDES DE CUATRO BRAZOS, utiliza alrededor del 16 % de la energía cinética del viento, se construye generalmente en tamaños grandes; gira a velocidades de puntas o extremos de las aspas dos o tres veces mayores que la del viento y tiene un momento bajo de arranque. Una ventaja es que sus velas de tela pueden recargarse para evitar peligros con vientos fuertes.

El molino STUART de tipo de HELICE DE DOS ALAS, es un molino de alta potencia. A $3/4$ del radio del ala es un perfil moderadamente delgado, a un ángulo de 4° y con un ancho de cuerda de $1/6$ del radio.

Toma más energía del aire que los otros dos ilustrados y gira a una velocidad de punto seis a ocho veces mayor que la del viento. Es ligero y se le utiliza mucho para impulsar generadores eléctricos acoplados directamente por medio de engranajes. Para más de 3 m de diámetro, se pueden usar tres o cuatro alas. Estas son de menos potencia, pero evitan la vibración cuando vira el molino al cambiar la dirección del viento. Tanto los de una, dos, tres, como los de cuatro alas tienen mucho menor momento de arranque que el tipo de múltiples alas de baja velocidad y requieren un mecanismo de desembrague cuando se aplican para impulsar una bomba de movimiento alternativo. Los molinos de viento muy grandes ponen peligro cuando se paran durante una tempestad porque el viento crea en las raíces de las aspas momentos flexionantes que aumentan con el cubo del diámetro. Un propulsor o hélice de una sola ala vence esta dificultad cuando se para por orientarse en la dirección del viento como una veleta.

Estos últimos tipos de rotores se demuestran a continuación en la Figura No. 12.

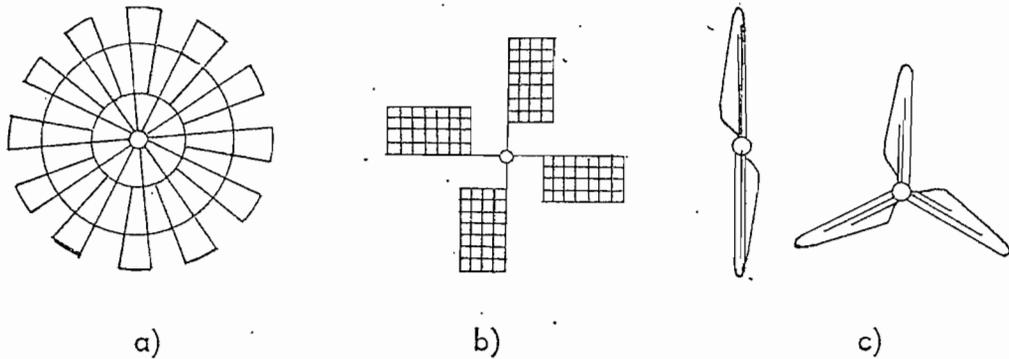


FIGURA No. 12 : a) Molino de Viento de Múltiples paletas
 b) Molino de viento Holandés
 c) Dos y Tres paletas propulsoras

Se puede investigar teóricamente el funcionamiento del molino de viento bajo la teoría del Momentum, cantidad de movimiento o impulso y teoría del chorro simple. Además puede investigarse empíricamente por medio de modelo en un túnel de viento o en un vehículo móvil.

La columna de aire que llega al molino de viento con una velocidad V_0 es retardado; su superficie limitante es una envolvente que se expande, como se ilustra en la figura No. 13.

La masa de aire que produce trabajo por segundo, según esta misma figura es :

$$\rho A_0 V_0 = \rho A_1 V_1 = \rho A_2 V_2 \quad (9)$$

donde :

./..

ρ = masa específica mecánica o densidad mecánica .

A_0, A_1, A_2 = áreas de las secciones antes, en y después del disco .

V_0, V_1, V_2 = Velocidades de las secciones antes, en y después del disco .

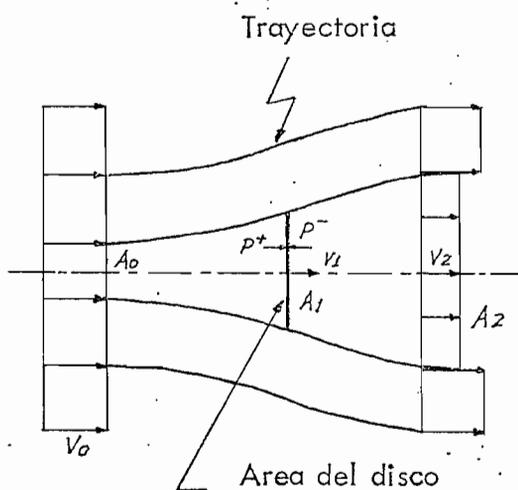


FIGURA No. 13 : Flujo uni-dimensional a través de una tubería de viento.

A causa del remanso del viento en el área del disco se verifica que :

$$V_1 < V_0 \text{ y } A_1 > A_0$$

Todos los sistemas de propulsión que aspiran aire, incluyendo los de hélices impulsoras, consiguen el empuje tomando aire a la velocidad V_0 , y expeliéndolo a otra velocidad más elevada V_2 , la velocidad de la corriente impulsada o viento de la hélice, en el caso de ésta. En todos

Los casos, el empuje resultante se determina por las simples leyes de la mecánica, como :

Empuje = T = presión axial de la variación de la cantidad de movimiento .

$$T = m (V_0 - V_2) = \rho A_1 V_1 (V_0 - V_2) \quad (10)$$

También, por consideraciones de la caída de presión causada por la hélice:

$$T = A_1 \Delta p, \text{ donde : } \Delta p = p^+ - p^- \quad (11)$$

La potencia debida a esta presión del aire sobre el área A_1 , suponiendo un disco sin pérdidas está dado por :

$$T V_1 = \rho A_1 V_1^2 (V_0 - V_2) \quad (12)$$

En la teoría simple de la cantidad de movimiento, se supone que la hélice equivale a un disco actuante que proporciona puras aceleraciones axiales a la corriente, es decir, en relación con una hélice real, se desprecian las desuniformidades de la velocidad y la rotación del viento impelido. A base de estas hipótesis simplificadoras, el consumo de potencia de la corriente es dado por :

$$\begin{aligned} \text{Consumo de potencia} &= \text{Intensidad de la variación de la energía cinética} \\ &= \frac{1}{2} \rho A_1 V_1 (V_0^2 - V_2^2) \quad (13) \end{aligned}$$

Se puede además establecer la relación :

$$V_1 = \frac{V_0 + V_2}{2} \quad (14)$$

$$\text{Definiendo como : } V_0 - V_1 \equiv a V_0 \quad (15)$$

$$\text{se obtiene la siguiente relación : } V_0 - V_2 = 2 a V_0 \quad (16)$$

donde a = factor de interferencia causado por la disminución de velocidad en el disco del molino de viento.

Tomando la ecuación (13) y sustituyendo en ella las relaciones (14) y (16) se obtiene la energía del viento por retardación de la velocidad del aire. Dejando de considerar las pérdidas por rotación y arrastre, el trabajo que se puede obtener del viento por unidad de tiempo, o potencia P , es :

$$P = 2 \pi R^2 \rho V_0^3 a (1 - a)^2 \quad (17)$$

donde : R es el radio del disco del molino de viento .

La potencia originalmente contenida en un cilindro de aire de radio R está expresada en kgm/seg , por :

$$P = \frac{1}{2} \pi R^2 \rho V_0^3 \quad (18)$$

Para obtener la potencia máxima tomamos la ecuación (17) y la derivamos con respecto al factor de interferencia, para lo cual se tiene :

$$\frac{\partial P}{\partial a} = 2 \pi R^2 \rho V_0^3 (1 - 4a + 3a^2) = 0$$

donde : $1 - 4a + 3a^2 = 0$, cuyas soluciones son : $a_1 = 1$, no nos interesa

$$a_2 = \frac{1}{3}$$

./..

por lo tanto : $P_{max} = \frac{16}{27} P = 0.593 P$

El empuje axial, que representa la fuerza que tiende a voltear un molino de viento fijo, o el arrastre sobre un generador está expresado en función del factor de interferencia. Sustituyendo en la creación (10) las relaciones (14) y (16), se tiene :

$$T = 2 \pi R^2 \rho V_o^2 a (1 - a) \quad (19)$$

para lo cual se obtiene un máximo cuando : $a = \frac{1}{2}$ y se hace más pequeño para valores menores de a . El empuje puede conservarse bajo usando un factor a pequeño y un diámetro grande, tomando así un porcentaje más pequeño de la energía del aire.

El coeficiente de potencia C_p dado por la relación de la potencia y la energía cinética del aire contenida en una área equivalente a aquella arrastrada por medio del rotor hacia el exterior, esta expresado así:

$$C_p = \frac{P}{\frac{1}{2} \rho A V_o^3} = 4 a (1 - a)^2 \quad (20)$$

El rendimiento ó coeficiente de impulso está dado por la relación de la potencia propulsora ($T V_1$) y el consumo de potencia ($\frac{1}{2} \rho A_1 V_1 V_o^2$) y es $\eta = C_T = \frac{T V_1}{\frac{1}{2} \rho A_1 V_1 V_o^2} = 4 a (1 - a)$ (21)

La máxima eficiencia es el 100 % para $a = \frac{1}{2}$, el cual admite un coeficiente de potencia de 0.5. La eficiencia para el coeficiente de máxima potencia ($a = 1/3$) es del 88,8 % .

Los coeficientes de potencia para los distintos tipos de molinos de viento están representados en la figura No. 14, a continuación :

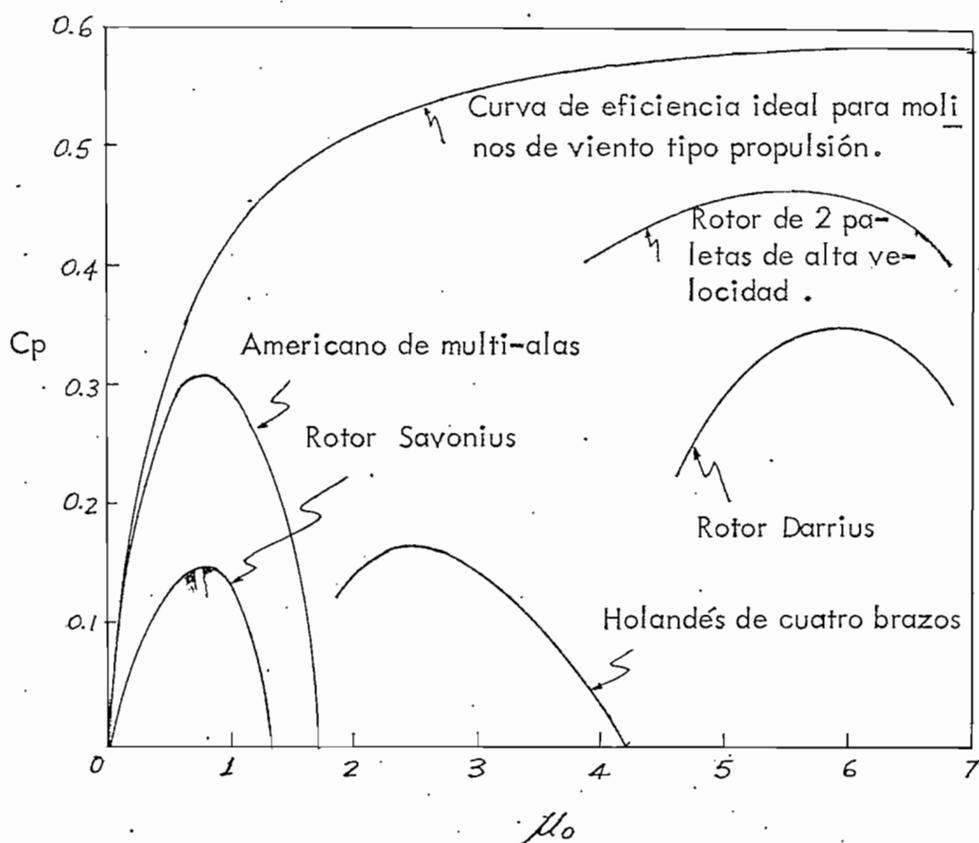


FIGURA No. 14 : Comportamiento típico de Máquinas de viento .

donde : u_0 es la relación de velocidad y es la relación entre la velocidad de pico de la paleta con respecto a la velocidad inicial del viento.

El modelo unidimensional puede ser dejado de analizar con la consideración adicional de la rotación inicial. Como la corriente inicial no es rotacional, la interacción con una máquina de viento rotacional podrá causar la rotación inicial. En el caso de un propulsor, la rotación

será en la dirección de él y en el caso de un aparato de extracción de energía (molino de viento), la rotación será en el sentido contrario.

Si hay energía cinética rotacional inicialmente en adición con la energía cinética de traslación, entonces de consideraciones termodinámicas se puede obtener una ley para la extracción de potencia como en el caso de tener solamente un movimiento de traslación.

La consideración siguiente relaciona la energía cinética rotacional para un rotor de velocidad angular .

$$\text{Energía cinética inicial} = E_{T1}$$

$$\text{Potencia extraída} = P$$

$$\text{Energía cinética final} = E_{T2} + E_{R2}$$

\swarrow
TRASLACION

\searrow
ROTACION

Por termodinámica : $P = E_{T1} - E_{T2} - E_{R2}$

Como además : $P = (\text{torque}) \times (\text{Velocidad angular})$, se nota que al incrementar el torque se produce un mayor momentum angular y con ello una mayor energía cinética rotacional; así, para una cantidad dada de energía cinética inicial E_{T1} , la más grande extracción de potencia puede ocurrir cuando E_{R2} sea baja, lo que daría un promedio de alta velocidad angular y bajo torque.

Los molinos de viento familiares son simplemente propulsores gigantes con un mecanismo para conservar las paletas orientadas hacia el viento. Cuando más largos ellos son, más tienden a vibrar y por ende

tienen más problemas.

Un nuevo concepto de molino de viento basado en la teoría del TORBELLINO o VORTICE aparece como un elemento prometedor para conseguir la mayor eficiencia y este es el molino de viento tipo TORNADO el mismo que se lo ilustra en la figura No. 15.

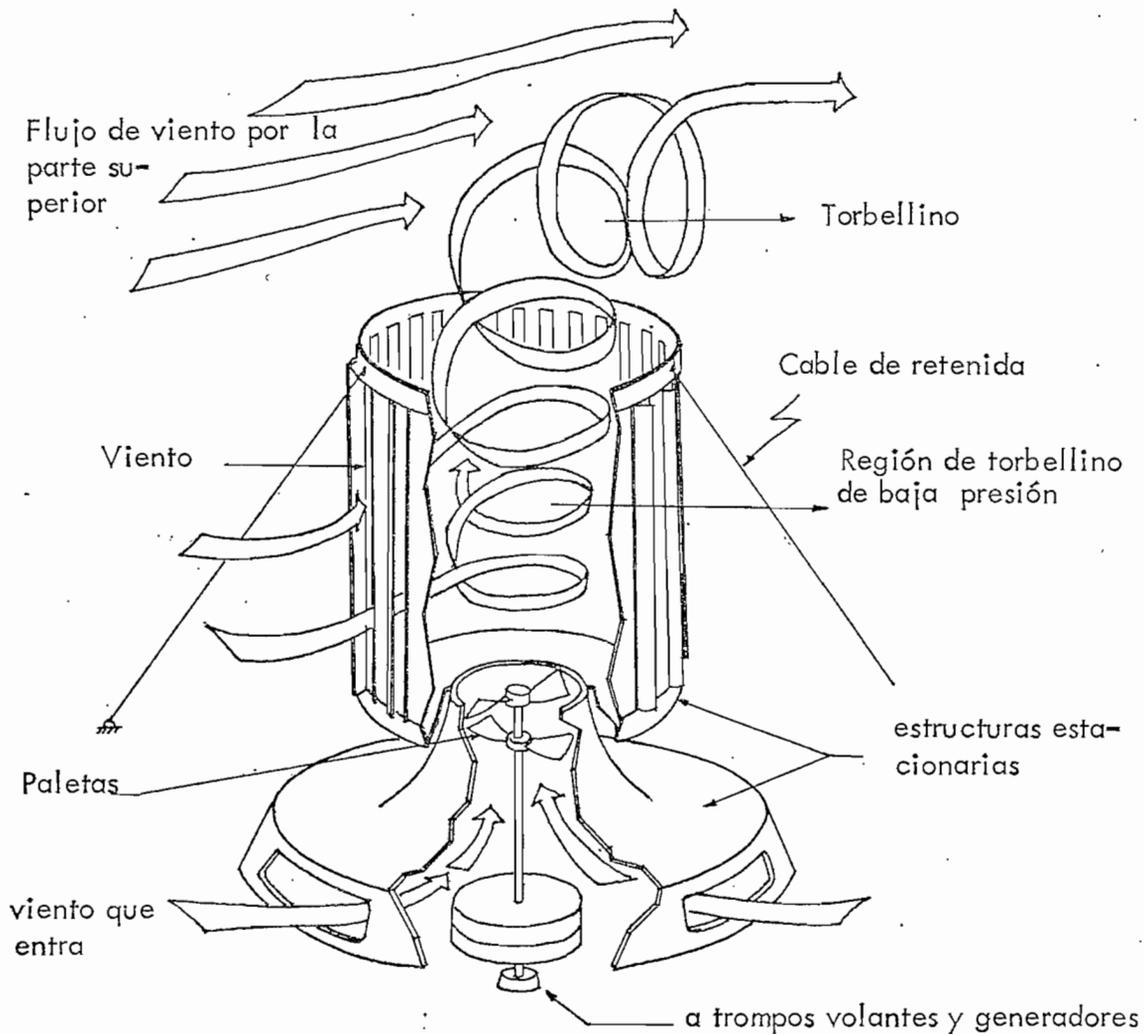


FIGURA No. 15 : Turbina de viento tipo tornado .

En las teorías del impulso o cantidad de movimiento se supone que las velocidades axiales son uniformes en todas partes, que hay rotación de cuerpo sólido y que las velocidades radiales son despreciables. Ninguna de estas hipótesis es correcta, pero, afortunadamente, los errores tienden a anularse en el intervalo de máximo interés. Para alcanzar mayor exactitud, es decir, para hallar la distribución real de las velocidades en la corriente impelida o viento de la hélice, ha de representarse la carga sobre las paletas reales de la misma. Esto se consigue con la teoría del torbellino o vórtice, desarrollado en este modelo de molino tipo Tornado.

La energía del viento es colectada por una torre estacionaria de cumbre abierta, el viento entra a través de ranuras verticales o sitios de entrada que son abiertos en el lado opuesto al viento y cerrados por el otro lado por medio de veletas móviles. El aire flota entre los espirales de la torre a través del centro para formar un torbellino el mismo que se desplaza hacia arriba.

Como el aire se introduce en la torre, este gana velocidad en el seno de la torre; mediante la conservación del momento angular y como el torbellino se vuelve más intenso, la presión atmosférica en su corazón decrece rápidamente, finalmente el flujo sale de la torre como una masa de aire girando rápido en forma de torbellino.

La presión atmosférica sobre la cima de la torre es restituida debido al flujo retardado, esto hace notar el hecho de que la energía está siendo extraída de una región larga.

En efecto la torre convierte la baja velocidad del viento en un torbellino en el cual se consigue altas velocidades y presiones bajas.

Para obtener la energía del torbellino, una turbina es colocada en la base de la torre del corazón de baja presión. La diferencia de presión entre el aire del ambiente debajo del piso de la torre y la baja presión del corazón dentro del torbellino conduce un flujo de aire a través de la turbina y hacia arriba del corazón del torbellino. Este flujo de aire como es echado fuera, aumenta el valor de la estabilidad del torbellino.

La potencia generada por una turbina en condiciones de temperatura constante depende tanto de la presión a través de esta como de la energía cinética del fluido, cantidad que depende del cuadrado de la velocidad del viento.

La turbina de viento tiene aletones verticales ajustables, abiertos del lado que da el viento, cerrados al lado contrario. Los aletones abiertos directamente al viento, hacen que éste entre a la torre tangencialmente y se arremoline alrededor del lado contrario cerrado.

Así como los espirales de aire suben, trazando círculos más y más pequeños, como se ve en la figura No. 16, su velocidad aumenta (justamente como aumenta la velocidad de un patinador que hace piruetas cuando él recoge sus brazos), por razón de que su momento angular es conservado. Un torbellino con un centro de baja presión se forma por una espiral de aire ascendente.

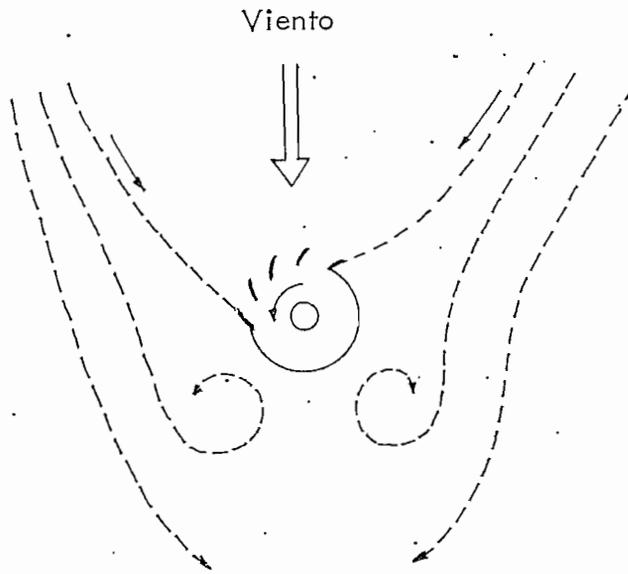


FIGURA No. 16 .- Flujo de viento alrededor de la torre .

La turbulencia del aire exterior, crea áreas de baja presión adicionales que aumenta el torbellino. Cerca de la base de la torre en el cuello estrecho, está la turbina de viento de eje vertical con aire que penetra por la parte debajo de ésta .

La diferencia de presión entre el aire ambiental que entra a la turbina y el centro de baja presión del torbellino ocasiona un fuerte aumento del flujo de aire a través de la turbina. Este hace girar a la turbina para que genere electricidad.

El volumen de aire para un tipo de molino como este es mucho más grande que para un tipo de molino convencional .

El área frontal (altura por diámetro) de la torre por si sola es el área de recolección y que podría ser de 35 veces más grande que el área frontal de las turbinas convencionales. Por lo tanto una turbina tipo tomado a una misma velocidad de viento podría también generar 35 veces

más potencia que una turbina a descubierto similar.

Las ventajas de la turbina tipo tornado son claras y se las puede detallar a continuación :

- a) Ya que la torre es estacionaria y todo está a una sola dirección, ésta puede ser fabricada en piezas grandes de materiales livianos pero resistentes a vientos fuertes .

Cuando los vientos vienen a ser muy altos o violentos, todos los aletones podrían ser abiertos para aliviar las cargas de viento sobre la estructura.

- b) Las torres grandes significaría una capacidad grande por cada unidad y esto también respecto a la reducción del costo de potencia.
- c) Para almacenamiento de energía, el eje vertical puede ser acoplado a un sistema de trompos giratorios que guardarían una potencia a proporcionar cuando el viento disminuye o desaparece.
- d) Los trompos volantes podrían trabajar en conjunto con los aletones para observar variaciones en la velocidad del viento y del embravecimiento de tormentas fuertes. La turbina puede también operar a una velocidad de rotación mucho más alta ya que esto está a un nivel gravitacional constante.
- e) Ya que la turbina estaría cercana o aproximada a tierra y en una cubierta protectora, esto no crearía riesgos de seguridad.

2.8 COMPONENTES MECANICAS PRINCIPALES

Las componentes esenciales son :

- a.- Torre o mástil
- b.- Cabezal o mesa de giro para facilitar la orientación de la hélice frente al viento .
- c.- Rueda de viento o propiamente dicho hélice
- d.- Veleta o cola (o su equivalente)
- e.- Reguladores
- f.- Sistema de engranajes

En términos de seguridad, para la selección de cualquier modelo particular de estructura se debe tener en cuenta los siguientes aspectos :

- 1.- Una estructura o parte de ella no deberá sucumbir bajo el efecto de la carga de un viento excesivo .
- 2.- Una estructura no debe estar sujeta a una excesiva deflexión bajo el efecto de la carga de viento.

A más de estas consideraciones generales se debe tomar en cuenta dos clases de coeficientes, siendo éstos :

- Coeficiente de presión, y
- Coeficiente de fuerza

El coeficiente de presión es la relación de la presión en un punto de la estructura con la avanzada de presión del viento. Esto es, de cualquier modo, algo de cálculo laborioso y para ciertas estructuras, coeficien

tes de fuerza están dados. Un coeficiente de fuerza multiplicado por el área dará la fuerza total en esa área en una dirección especificada.

Las torres también están sujetas a cargas no estacionarias, y las interacciones dinámicas entre las componentes del sistema máquina - torre pueden causar serios daños. Si, por ejemplo, los modos vibracionales del rotor suceden para acoplar con uno de los modos naturales de vibración de la torre, el sistema puede desbaratarse en piezas. Podemos a continuación anotar un ejemplo del sistema completo del molino de viento para dar una idea general de todos sus componentes.

Un rotor de eje horizontal conduce un generador a través de una caja de engranajes. Estas componentes están montadas en un platillo y todo esto va en la cúspide de la torre. El mecanismo entero puede ser rotado para guardar al rotor ajustado con el viento. El rotor está usualmente diseñado para ser orientado viento abajo de la torre en determinados casos.

Cuando el sistema está operando, las paletas están continuamente flexionados por cargas no estacionarias aerodinámicas, gravitacionales e inerciales. Si las paletas son de metal, la flexión reduce su resistencia a la fatiga.

Debido a que en un viento rápido hay abundancia de energía, las paletas deben barrer grandes áreas para producir una cantidad apreciable de potencia. El área barrida se lo llama disco del rotor.

Por razones aerodinámicas, el rotor no puede extraer toda la energía valorable del viento. Teóricamente como se anotó ya, el máximo coeficiente de potencia conseguible es de 0.593.

El enfrentar relaciones de altas velocidades de punto a velocidad de viento normal requiere que grandes volúmenes de aire sean libres de fluir a través del disco del rotor. Si un disco tiene una alta firmeza (una relación alta de área de hélice al área del disco), el aire tenderá a acumularse en frente del rotor, reduciendo su eficiencia.

Todos los turbo-generadores por viento modernos tienen solo 2 paletas. Las hélices con 3 ó 4 paletas tendrían coeficientes de potencia ligeramente más altos.

El camino más directo para conseguir más torque de salida de un disco es simplemente alargando sus paletas, pues el área del disco se incrementa con el cuadrado de su diámetro, así que un relativamente pequeño incremento en la longitud de la paleta puede resultar en un gran incremento de torque.

Hay un defecto puesto que el peso de la paleta se incrementaría con el cubo de su longitud.

Hélices de inclinación variable pueden ser deseables desde el punto de vista de la protección de la máquina, en todo caso cuando la velocidad del viento se torne peligrosa. Operando a velocidad constante tendrían otra ventaja significativa, pues los esfuerzos podrán ser generados bajo control y las frecuencias de resonancia naturales del sistema pueden ser controladas.

Por otro lado, cuando la torre hace sombra, apreciablemente no reduciría la eficiencia de la conversión del viento, pero haría que la hélice se someta a esfuerzos cíclicos cuando las paletas viajen entrando y sa-

liendo del área de sombra. Esto podría acortar la vida de las hélices. Además por razón de la cercanía a tierra, los efectos del bordeo retardarían el viento. Guardando a la hélice por encima del bordeo de tierra también se eliminaría una fuente de esfuerzos cíclicos de las hélices, aunque esto incrementaría la altura de la torre.

Cuando las velocidades del viento o la dirección cambia, los controles toman la acción apropiada, cambiando el giro de las paletas o reorientando a la máquina hacia el viento. Las hélices pueden ser automáticamente reforzadas cuando la velocidad del viento es excesiva.

Los controles además podrían poner fuera de servicio dependiendo de las velocidades del viento sin disruptir el circuito o red de servicio. Una instrumentación adicional podría utilizarse para el monitor de temperatura, para niveles de vibración, salidas del generador y para parar la máquina cuando una condición de inseguridad aumente.

Si hélices extremadamente largas están montadas en un eje rígido, momentos de deflexión en el origen de las paletas grandes pueden ocurrir debido a la sombra de la torre, gravedad y movimientos súbitos en la dirección del viento. En una hélice de 150 pies a 200 pies de diámetro, la carga de fatiga puede ser suficientemente alta que cause rotura en el origen de las paletas, especialmente si las hélices son un diseño ligero, necesitadas a lo mejor para un comportamiento óptimo.

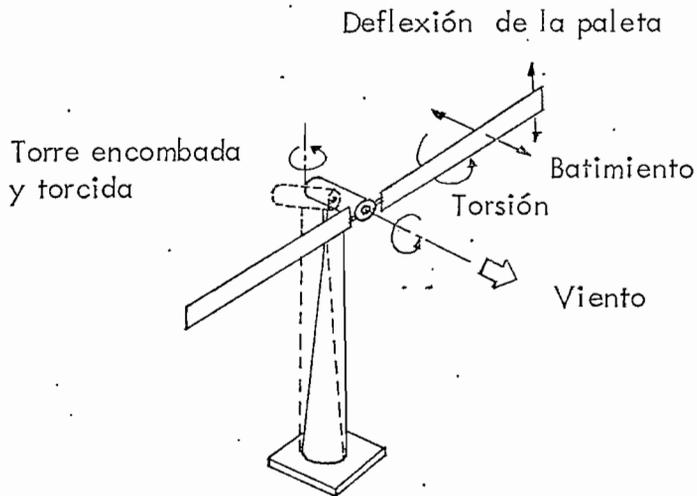


FIGURA No. 17 .- Estructura sometida a deformaciones elásticas .

2.8.1. TIPOS DE ORIENTACION :

La orientación automática de las hélices en la dirección del viento se puede dar también según los siguientes criterios :

a. ORIENTACION POR VELETA :

La veleta principal I (figura No. 18) se coloca automáticamente en la dirección del viento, hace girar el bastidor móvil situado en la parte alta de la torre y coloca la rueda contra el viento. Disposición sencilla, orientación rápida.

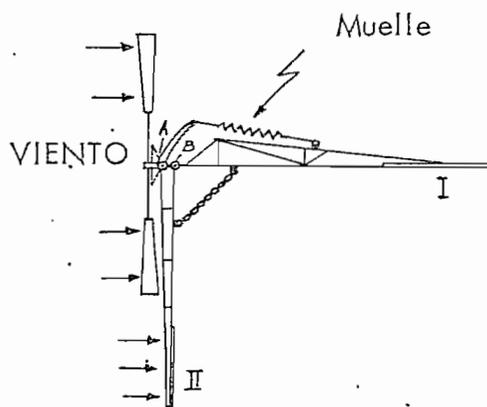


FIGURA No. 18 .- Orientación por veleta de la hélice en la dirección del viento .

b. ORIENTACION POR MEDIO DE UNA ROSA DE LOS VIENTOS :

Que hace girar la hélice o la parte superior de la torre alrededor de una corona dentada unida a ésta, o sobre un carril anular. Gran multiplicación. Orientación lenta.

c. ORIENTACION POR LA HELICE MISMA :

La hélice trabaja por su cara vuelta hacia la torre. Sistema de construcción ventimotor. Orientación sencilla. El viento, sin embargo, es recogido en parte por la torre que se encuentra delante de la hélice.

2.8.2 REGULACION :

La regulación de los molinos de viento por seguridad de la unidad contra los malos temporales, puede ser considerada en forma general desde los siguientes puntos de vista :

a. REGULACION ABRIENDO O CERRÁNDO LA HELICE :

Las alas o paletas se colocan oblicuamente con respecto a la dirección del viento cuando ésta es fuerte. Es un sistema anticuado a causa de los muchos puntos de giro, difíciles de conservar en buen estado cuando el número de paletas es grande.

Las turbinas de viento KUMME (figura No. 19) se regulan por el giro de las distintas alas alrededor de un eje longitudinal situado a un lado de cada una de ellas, un juego de varillas cargado oprime al ala contra el viento. Al aumentar la fuerza de este el ala gira hacia atrás y levanta el contrapeso. Para desembragar la rueda se colocan las alas paralelas a la dirección del viento. Los extremos exteriores de los ejes de las alas van unidos por un varillaje, reforzado por su unión en forma de paraguas con la prolongación delantera del eje de la hélice.

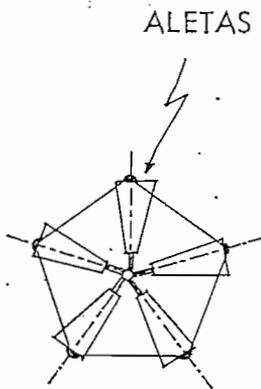


FIGURA No. 19 .- Sistema KUMME

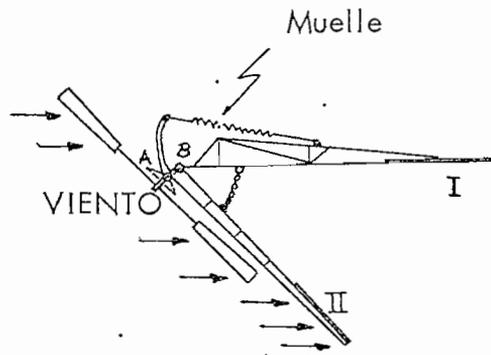


FIGURA No. 20 .- Regulación por giro de toda la hélice.

b. REGULACION POR DIRECTRICES AUTOMATICAS :

Quando el número de vueltas de la hélice es el normal, las directrices respectivas están situadas tangencialmente y ofrecen poca resistencia al aire. Al aumentar el número de vueltas dichas directrices se colocan radialmente, por la acción de la fuerza centrífuga, de manera que las componentes tangenciales de la resistencia del aire obran sobre toda la superficie de las compuertas.

c. REGULACION POR GIRO DE TODA LA HELICE :

Alrededor de un eje vertical (figura No. 20). Una veleta

auxiliar II va unida al cuerpo del motor que puede girar en un cojinete de bolas sobre la parte alta de la torre. El momento de la presión del viento que obra sobre dicha veleta tiende a situar la rueda paralelamente a la dirección del viento alrededor del eje de la torre (A). La regulación se inicia con una velocidad del viento de 7 m / seg. aproximadamente.

Para $V \geq 8$ m/seg ya no aumenta la potencia, porque entonces la rueda ha girado y se ha colocado oblicua respecto a la dirección del viento. La veleta principal I, que puede girar alrededor del muñón (B), se conserva en la dirección del viento. Al desembragar la hélice a mano, ésta, juntamente con la veleta auxiliar, se pliega hacia la veleta principal por medio de unos tirantes de alambre.

El número de revoluciones de la rueda varía, a igualdad de carga, con la velocidad del viento. A toda velocidad de éste corresponde un determinado número de revoluciones más favorable.

2.8.3 TRANSMISION Y ACUMULACION :

La transmisión y acumulación del trabajo puede ser también considerado respecto a los siguientes aspectos :

- a. Mecanismo vertical de manubrio accionado por el eje horizontal de la hélice . Entre la biela y la varilla de transmisión es necesario un acoplamiento que permita el giro del plano de la rueda alrededor del eje de la torre. El peso de la varilla, guiada sobre el armazón cada 2 ó 3 m, debe equilibrarse.

- b. El eje vertical accionado por engranaje cónico. La rueda aérea se orienta entonces por giro alrededor de un eje inclinado loco, sobre un muñón fijo del cuerpo del motor.
- c. La transmisión por correa desde el eje de la hélice, sólo es posible cuando la parte alta de la torre puede girar con la rueda según el viento.

La acumulación del trabajo mecánico obtenido se ha intentado por elevación de pesos llenando de agua depósitos situados a cierta altura por acumulación de agua a presión o de aire comprimido, sin que hasta ahora se haya llegado a una solución satisfactoria.

El ruido como ya se lo había anotado anteriormente resulta primordialmente de la rotación de campos de presión relacionados con las distribuciones aerodinámicas de presión sobre las paletas. El ruido puede reducirse aumentando el número de paletas, reduciendo la velocidad de sus puntas o disminuyendo la carga de potencia, o cambiando varias de estas modificaciones.

Respecto a las paletas, las cargas principales son : 1) Tracción constante, debida a las fuerzas centrífugas; 2) flexión constante, debido al empuje aerodinámico y a las fuerzas del par de rotación; 3) flexión vibratoria, debido a las variaciones cíclicas de las cargas del aire y a otras excitaciones que se originan en el motor. Los esfuerzos más graves y limitadores resultan corrientemente de las cargas vibratorias. La carga vibratoria principal procede de las variaciones cíclicas del ángulo de ataque de las paletas cuando el eje de rotación baila o hace guiñadas con relación a la corriente de aire.

En la mayoría de los casos, el control de la hélice regula el ángulo de las paletas de modo de mantener un número predeterminado de r.p.m. Los elementos básicos de este sistema (regulador) comprenden normalmente un peso volante impulsado por el motor de la hélice y equilibrado con resortes que comunica una señal del error que gobierna el servomotor o motor de variación del peso para incrementar o disminuir el ángulo de las paletas (figura No. 21 .)

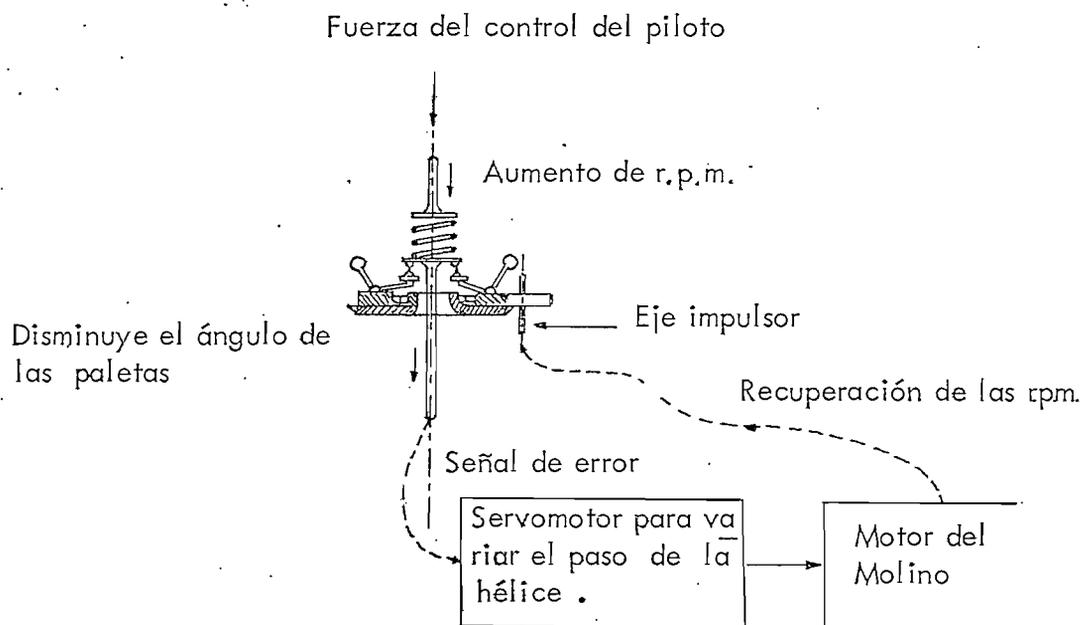


FIGURA No. 21 .- Regulador de velocidad de la hélice .

El bucle o ciclo de control se cierra, volviendo a recuperar las rpm. por medio del motor principal. Este sistema básico se mejora con dispositivos anticipadores y retardadores para mantener la velocidad du-

rante los rápidos movimientos del acelerador, con sincronizadores para coordinar dos o más motores y con características superditadas a la activación de las sucesivas inversiones y puestas en bandera .

La función de los engranajes es la de incrementar lasrpm de la hélice para poder acoplarla al generador eléctrico. Se puede dar el caso de un aumento de 24 a 600 rpm y de 34 a 1800 rpm .

El tren de engranajes, con un eje intermedio, consiste de dos equipos de engranajes con dientes de uña recta (no punteaguda), carburados y templados por el Método MAAG. En cada uno de estos "SETS", la rueda tiene 58 dientes y el piñon 13 dientes, con el resultado de que la relación de multiplicación es muy cercano a 20. El eje principal, en cuyo extremo las paletas del molino de viento van montadas, está en línea con el eje secundario el cual acciona al generador a través de un acople de 4 pasadores de enganche . El eje intermedio está colocado a un lado. Todos los ejes están montados en cojinetes esféricos.

Los engranajes y cojinetes están contenidos en una caja de velocidades llena de aceite e impermeable al agua, a través del cual solamente los dos ejes están capacitados para parar. La lubricación por aspersión no requiere supervisión . El aceite necesita solamente ser cambiado de tiempo en tiempo, una vez al año, por ejemplo. Un indicador del nivel de aceite fácilmente accesible revelará una avería accidental.

2.8.4 DESCRIPCION DE UN SISTEMA :

A continuación se describe un sistema completo, de modo de acoplar todas las ideas generalizadas. Pese a ser de gran potencia, se detallará el sistema mecánico fundamental.

Este sistema ha sido preparado por el Centro de Investigación de la NASA (LeRC), el cual está conformado de los siguientes elementos :

2.8.4.1 ROTOR DE HELICE :

a. Hélice :

La hélice tiene 2 paletas totalmente metálicas; cada paleta es de 62.5 pies de largo y pesa aproximadamente 2000 libras. La tabla No. 7 resume las especificaciones de la hélice. La hélice está diseñada para proveer 100 kW de potencia a 18 mph de velocidad del viento cuando está rotando a 40 rpm.

Número de paletas	2
Diámetro	37.5 m (125 pies)
Diámetro efectivo del círculo barrido por las paletas .	37.2 m (124 pies)
Inclinación del eje de rotación respecto a la horizontal .	0 °
Area circular efectiva barrida por las paletas	1071.9 m ² (11910 pies ²)
Relación de grosor respecto al radio de la hélice	22
r.p.m . de la hélice	3
Máximo empuje del viento (dos paletas)	44482 Nwt (10000 lb)

TABLA No. 7 .- Especificaciones de la hélice (LeRC)

b. Elemento Céntrico :

Conecta la hélice al eje de baja velocidad, éste es fijado rígidamente sobre el eje principal admitiendo solo el cambio del grado de libertad del ángulo de elevación. Este también contiene los engranajes mecánicos, cadenas de transmisión, etc., necesarios para cambiar el ángulo de elevación de la hélice.

Cargas de viento, tanto perennes como transitorias y cargas centrífugas son absorbidas por la masa de la hélice y transmitidas al eje de baja velocidad.

c. Mecanismo de cambio del ángulo de elevación :

Consiste de una bomba hidráulica, una válvula de control de presión, excitador y engranajes para el movimiento rotacional de las paletas. El tipo de mecanismo de cambio del ángulo de elevación es similar al usado en la industria aeronáutica sobre algunos propulsores avanzados. Este es un excitador de engranajes de tanque (en este tipo excitador de engranaje de cremallera y piñón), este gira a un engranaje principal el cual a su vez gira la hélice a través de engranajes cónicos montados sobre las raíces de las paletas. La bomba hidráulica está montada separadamente sobre la estructura y el fluido hidráulico fluye dentro del eje por medio de sellos rotativos.

d. Estructura del tren de manejo y sistema de rotación, Plato de soporte y Control de rotación :

El sistema de 100 kW es soportado en una extensa estructura de

cojinetes de engranajes y en un plato de soporte, el cual es capaz de rotar la maquinaria completa en el tope de la torre. La relación es de 1/6 de rpm y está operando aún cuando la máquina no esté generando potencia. El plato de soporte, soporta la hélice, el tren de transmisión, alternador y todos los ejes y cojinetes. La figura No. 22 muestra un diseño del control de rotación y del plato de soporte con todos los componentes montados sobre éste.

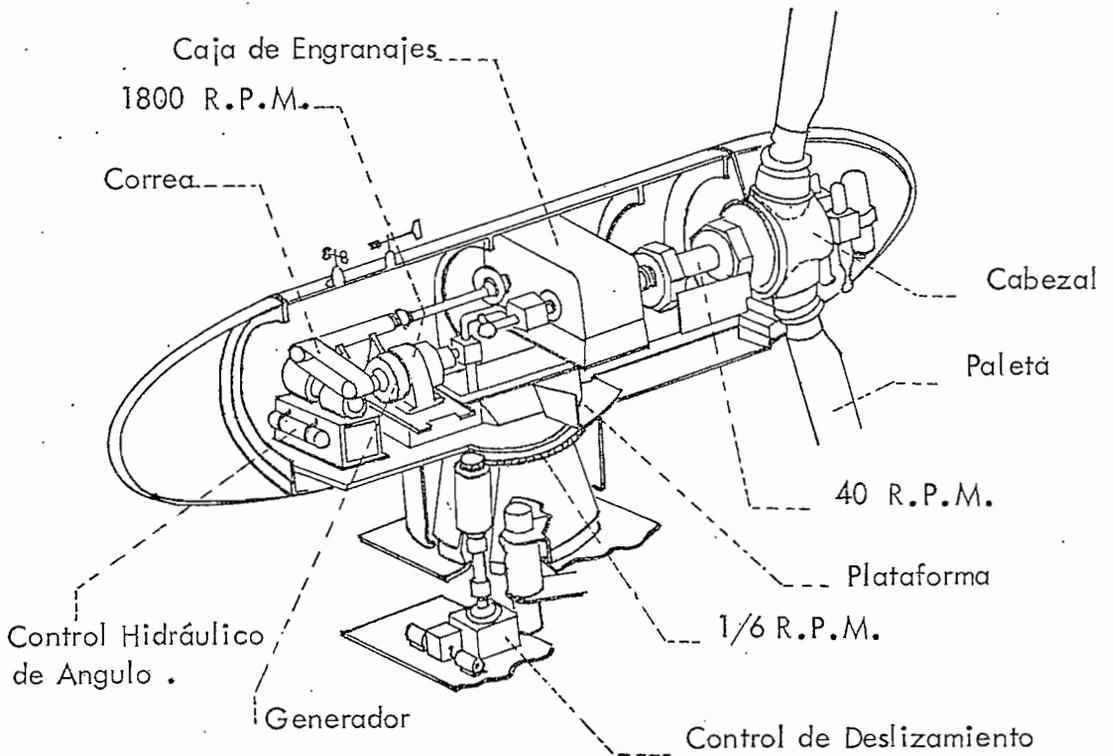


FIGURA No. 22 .- Turbina de viento de 100 kW con tren de manejo y sistema de rotación.

e. Tren de transmisión :

Desde el elemento central, el tanque es transmitido al alternador a través de un sistema de engranajes con una relación de 45 / 1. Fuera del sistema de engranajes un eje de alta velocidad (1800 rpm) transmite el bajo tanque con altas rpm al alternador a través de un sistema de correa de transmisión. La estructura completa está soportada sobre el plato de soporte. Esta está dentro de un cilindro de fibra de vidrio para protección del medio ambiente.

f. Alternador :

El alternador es sincrónico de 1800 rpm con dos cojinetes de enfriamiento propio con un excitador y regulador de escobillas, conectado directo; el regulador incluye como características : Potencia, Voltaje y tiene además transformadores de corriente . El alternador es de 125 kVA, 0.8 de factor de potencia y 480 voltios. Este es de 3 fases y 60 Hz conectadas en Y .

2.8.4.2 TORRE :

La torre es de 100 pies de altura, construida de acero, con diseño a prueba de quebraduras, descansando sobre una base de concreto. Esta debe resistir el alto viento y el empuje de las cargas de la hélice durante la operación del sistema. El peso de la torre es de 40.000 libras sin las escaleras y plataformas, y 60100 libras con todos los accesorios.

2.8.4.3. CONTROLES :

La turbina de viento generará aproximadamente 100 kW de electricidad a velocidades de viento de 18 mph y más altas. Entre 8 y 18 mph la potencia eléctrica será generada como una función de la velocidad del viento. De 18 a 40 mph de velocidad del viento, la máquina generará 100 kW de potencia eléctrica, esto es, el ángulo de elevación variable de la hélice rota alrededor de la línea horizontal perdiendo el exceso de potencia. Bajo 8 mph y sobre 40 mph, la hélice será localizada en posición horizontal. Inicialmente el alternador será operado asincrónicamente con un banco de carga. Luego, la turbina de viento será conectada a la red de utilidad local y operada sincrónicamente con la red local de potencia.

Por otro lado, ya que se ha analizado un sistema de gran potencia, podemos dar otro ejemplo también de un sistema de gran potencia creado por la ERDA (Administración de Investigación y Desarrollo de Energía), con capacidad nominal de 1.5 MW a velocidades de viento de 18 mph.

La ERDA pidió a dos compañías (KAMAN AEROSPACE CORP. y GENERAL ELECTRIC Co.) que estudien todo lo concerniente a turbo-generadores de viento grandes. Ambas compañías han desarrollado diseños preliminares para este tipo de generadores y son muy parecidos a los diseños del sistema analizado anteriormente.

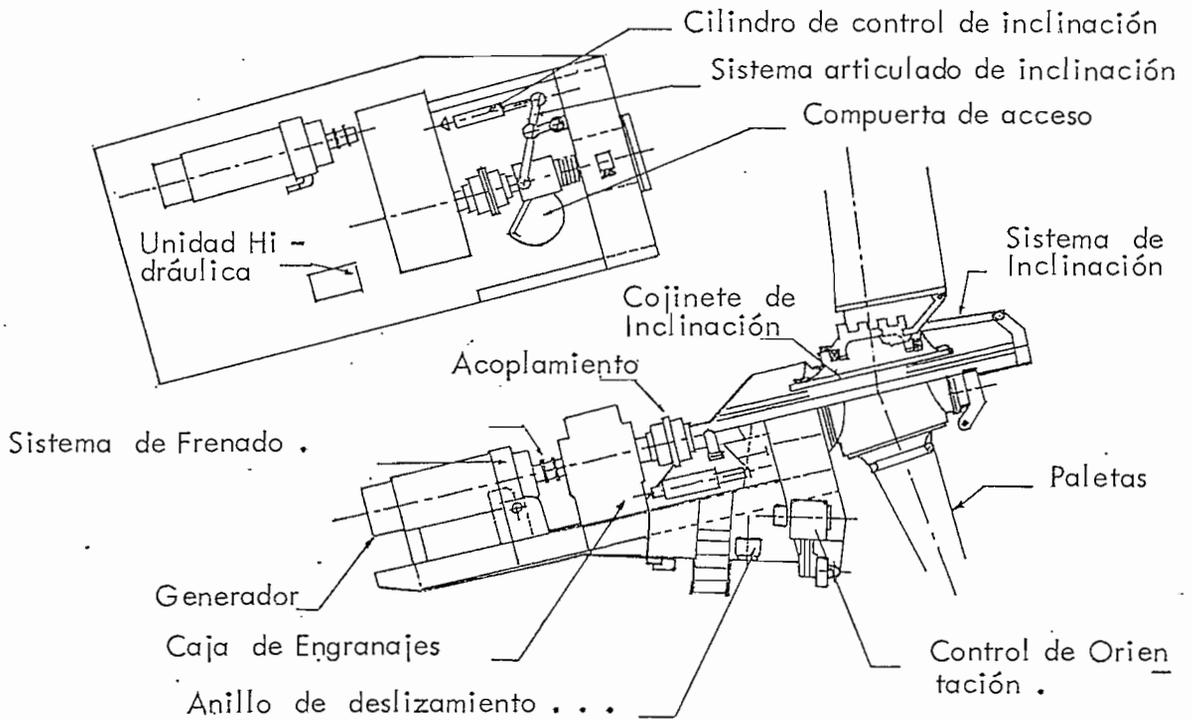
La hélice de Kaman es de 180 pies de diámetro y la de la "General Electric de 190 pies. Ambos diseños de hélices tienen 2 paletas rígidamente montadas al centro del rotor. Las paletas son anguladas en la dirección abajo del viento para balancear la carga aerodinámica con la

fuerza centrífuga .

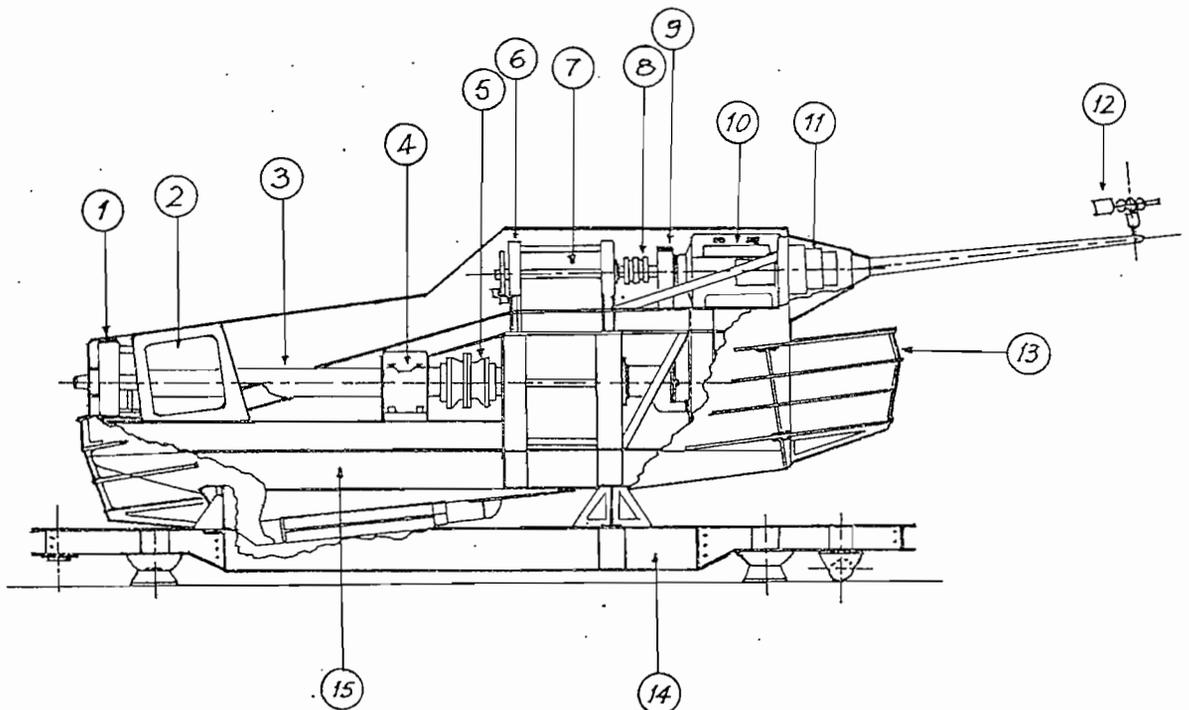
Trabajando independientemente Kaman y la G.E. decidieron que el camino más práctico para generar potencia a frecuencia constante (60 Hz), deseada por sus utilidades, es que la hélice gire a velocidad constante. Esto es posible solamente con la variación del grado de inclinación de las paletas.

En la máquina de Kaman (figura No. 23 a), la hélice gira a una constante de 34.4 rpm a una velocidad de viento de 12 a 45 mph. Una caja de transmisión triple cambia la velocidad del eje de salida a las 1800 rpm requeridas por el generador.

Las desventajas en variar el grado de inclinación de las hélices para modular, son el costo y la complejidad del mecanismo para el cambio de giro. Hélices de inclinación variable son deseables desde el punto de vista de la protección de la máquina en todo caso.



a) Turbo - generador de 1.5 MW diseñado por KAMAN AEROSPACE CORP .



b) Turbo - generador de 1.5 kW diseñado por la GENERAL ELECTRIC CO .

FIGURA No. 23.- Turbo - generadores de viento de 1.5 MW construídos por la ERDA .

Según la figura No. 23 b .- se tiene :

- 1.- Apoyo del eje del rotor
- 2.- Acceso para el mantenimiento
- 3.- Eje principal (rotor transmisión)
- 4.- Eje principal de empuje giratorio
- 5.- Acople flexible (transmisión / eje principal - baja velocidad)
- 6.- Conjunto de freno
- 7.- Conjunto de transmisión
- 8.- Acople flexible (transmisión / generador - alta velocidad)
- 9.- Aparato sensitivo del torque y las r.p.m.
- 10.- Generador
- 11.- Excitatriz
- 12.- Indicador de la velocidad y frecuencia del viento
- 13.- Armazón general
- 14.- Conjunto de maniobra y guía
- 15.- Soporte estructural principal de celocía .

DESCRIPCION

1. Eje principal (hélice / transmisión) de bajas rpm.
2. Sistema de engranajes
3. Eje secundario de altas rpm.
4. Sistema de freno
5. Sistema de detección de rpm y torque
6. Generador eléctrico
7. Conjunto de acoplamiento entre el sistema de freno y sistema de control de ángulo de hélice.
8. Sistema de control de ángulo de hélice .
9. Conductor del control de rpm y torque
10. Conductor de potencia eléctrica
11. Anillo de deslizamiento del conjunto
12. Sistema de control de deslizamiento del conjunto
13. Sistema de acumulación de datos de : frecuencias y velocidades del viento.
14. Soporte o base del conjunto y tope de la torre .

3. CAPITULO TERCERO .- CARACTERISTICAS ELÉCTRICAS

3.1 POTENCIA ELECTRICA DEL GENERADOR

La potencia eléctrica del generador debe ser suficiente para absorber la máxima potencia engendrada por el motor a cualquier velocidad que el regulador le permita girar.

En vista de que la potencia del generador depende de las características de las hélices, es necesario considerar los aspectos ya enunciados en ecuaciones anteriores, así, tomando como referencia la ecuación de Potencia máxima tendremos :

$$P_{\max} = 0.593 \left(\frac{1}{2} \rho A V^3 \right)$$

y usando para : $\rho = 0.08 \text{ lb / pie}^3$, como un valor razonable .

$A =$ área barrida por la hélice del molino de viento
(pies²).

$V =$ velocidad del viento (mph)

podemos tener :

$$P_{\max} = 0.0031 A V^3 \quad (22)$$

Como casi todos los molinos de viento en los cuales estamos interesados, corresponden al tipo de rotores con hélices, es conveniente expresar la ecuación (22) en términos del diámetro de las hélices, por lo que se tiene :

$$P_{\max} = 0.0024 D^2 V^3 \quad (23)$$

./..

donde : D = diámetro de la hélice expresado en pies .

Según esta última ecuación podremos tener los siguientes valores de potencia, para los diversos diámetros y velocidades de viento.

TABLA No. 8 .- Potencia de Salida en Watios

Diámetro de Hélice (pies)	Velocidad del viento (mph)					
	5	10	15	20	25	30
6	5	45	145	345	670	1160
8	10	77	260	615	1190	2070
10	15	120	400	960	1860	3240
12	22	175	580	1380	2680	4650
14	30	235	790	1880	3650	6360
16	39	310	1030	2460	4750	8300
18	50	390	1300	3110	6050	10500
Savonius 27 pies ²	2	27	55	135	260	450

Se puede ver que la potencia de salida asciende con el cuadrado de la proporción del diámetro, entonces si se dobla el diámetro, la potencia debe ser multiplicada por 4. Además la potencia asciende con el cubo de la velocidad del viento, por lo que si se duplica la velocidad, la potencia debe ser multiplicada por 8.

Así, si una área seccional contiene 10 watios, a una velocidad

./..

de 5 mph, entonces ésta contendría 80 watos a una velocidad de 10 mph; 640 watos a 20 mph y 5 120 watos a 40 mph .

La tabla No. 8, puede ser descrita por el siguiente gráfico (figura No. 25)

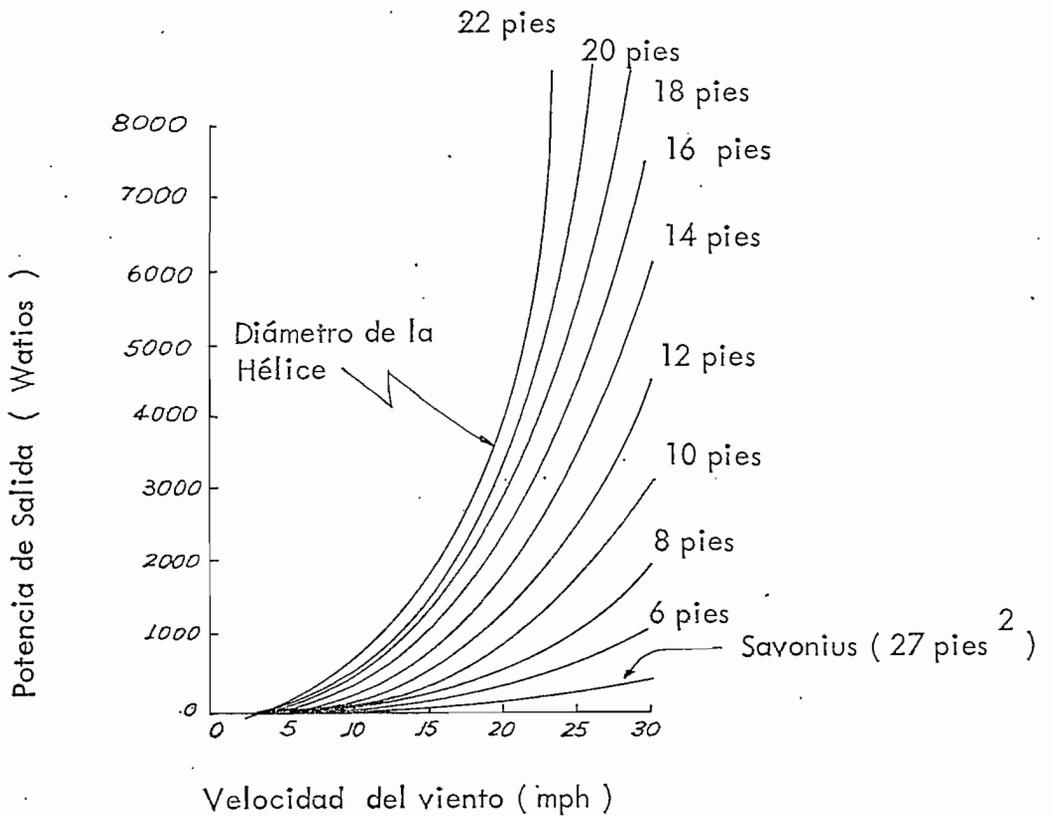


FIGURA No. 25 .- Relación de la potencia de salida de varias velocidades de viento y varios diámetros de hélices donde se asume una eficiencia del 50 % de la máxima teórica. También está incluido un rotor SAVONIUS de 27 pies² de una eficiencia del 20 %.

La potencia que está contenida en el viento es una cosa, además la potencia teórica máxima que puede ser extraída (59.3 %) es otra, y lo que un generador eléctrico puede producir es también otra cosa.

Una hélice bien diseñada podría extraer cerca del 70 % del máximo teórico de la potencia del viento, además algo de la potencia perdemos en el engranaje siempre y cuando éste sea cerca del 90 % eficiente. En estas circunstancias el propio generador podrá ser solamente 80 % eficiente (entendiéndose esto como un rendimiento bueno). Como las eficiencias son multiplicativas podemos decir que una estimación razonable de los generadores a viento son solamente un 30 % de eficiencia ($0.593 \times 0.7 \times 0.9 \times 0.8 = 0.3$) convirtiendo la potencia de viento a potencia eléctrica, o también presentados en otra forma, plantas de viento tienen eficiencias de cerca del 50 % de su máxima teórica ($0.7 \times 0.9 \times 0.8 = 0.5$); estas dos maneras de expresar las eficiencias son usadas comunmente, entonces es importante conocer dónde está el porcentaje total de la potencia del viento o el máximo teórico al cual nosotros nos hemos estado refiriendo .

Por lo tanto, si se asume un sistema con una eficiencia del 50 % de su máxima teórica, entonces la expresión para la potencia de salida de un generador en vatios viene dada por :

$$P_{gen.} = 0.0012 D^2 V^3 \quad (24)$$

Cuando esta última ecuación es trazada para varias proporciones de diámetro (figura No. 25), el rápido incremento en la potencia de salida a altas velocidades del viento es claramente evidente.

Ahora considerando la ecuación (4), en lo que se tiene la velocidad como función de la altura y como la potencia varía con el cubo de la velocidad, podemos tener la siguiente relación :

$$\frac{P}{P_o} = \left(\frac{H}{H_o} \right)^{3n} \quad (25)$$

donde : P es la potencia de una altura H y P_o es la potencia a una altura H_o.

Como es un poco dudoso trabajar con exponentes fraccionarios, se traza a continuación la última ecuación, dada por la figura No. 26, usando como referencia 5 pies de altura .

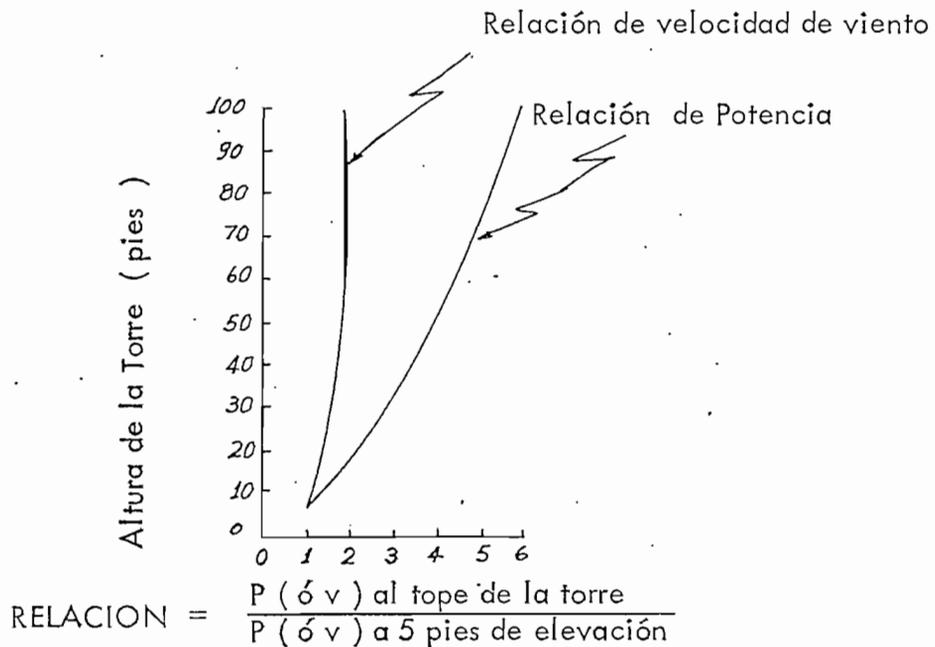


FIGURA No. 26 .- Incremento en velocidad del viento y potencia con el aumento de altura (para llanuras planas y referida a 5 pies de altura) ./. .

La figura indica por ejemplo que hay tres veces la potencia del viento a 30 pies de lo que hay a 5 pies, aunque la velocidad del viento es solamente 1.4 veces más grande. Note que podemos usar este gráfico para ayudarnos a estimar la ganancia marginal que se puede obtener yendo de una altura a otra.

A 80 pies hay cerca de 5.3 veces la potencia que a 5 pies y a 30 pies hay 3 veces la potencia. Yendo de 30 a 80 pies se ha ganado un factor o relación de $5.3 / 3$ ó cerca de 1.8 .

Pero la fórmula es válida solamente para áreas despejadas y nuestro sitio en estudio puede ser montañoso, puede tener hierbas, árboles y edificios a su alrededor, por lo que es necesario verificar la velocidad del viento, realizando varias medidas a varias alturas en el sitio mismo.

Tratemos de introducir dos hechos breves en este punto:

Primero :

Los generadores de viento no producen una potencia de salida hasta que el viento llegue a un valor mínimo, llamado VELOCIDAD DE CORTE. Si el generador trabaja bajo esta velocidad no estará produciendo la suficiente corriente de carga.

Segundo :

Los generadores no son capaces de producir más potencia para lo cual han sido calculados, pues si sucedería esto, se dañarían. La velocidad a la cual el generador produce una potencia calculada es llamada la VELOCIDAD CALCULADA DEL VIENTO, o para vientos que generalmente exceden la velocidad calculada del viento, sistemas comerciales

son usualmente diseñados para que el rotor vote el exceso de este viento.

La VEREINIGTE WINDTURBINEN - WERKE considera la siguiente tabla de eficiencias para distintos diámetros de hélice a diferentes velocidades del viento.

Diámetro de la Hélice (m)	VELOCIDADES DEL VIENTO (m /seg)						
		4	5	6	7	8	9
5.5	HP	0.7	1.4	2.4	3.85	5.7	8.1
	KW	0.36	0.73	1.25	2.0	2.96	4.23
6.5	HP	1.0	2.0	3.4	5.35	8.0	11.4
	KW	0.52	1.04	1.76	8.0	4.2	6.0
7.5	HP	1.33	2.6	4.5	7.15	10.6	15.1
	KW	0.69	1.35	2.4	3.7	5.5	7.8
8.5	HP	1.7	3.33	5.75	9.10	13.6	19.4
	KW	0.88	1.7	3.0	4.75	7.1	10.1
10	HP	2.36	4.64	8.0	12.7	19.0	27.0
	KW	1.22	2.4	4.15	6.6	9.9	14.1
12	HP	3.4	6.7	11.5	18.3	27.3	39.0
	KW	1.76	3.5	6.0	9.7	14.1	20.0
15	HP	5.34	10.5	18.0	28.6	42.6	60.0
	KW	2.8	5.5	9.4	15.0	22.0	31.4

TABLA No. 9 .- Eficiencia en HP y en KW.

Además recomienda las siguientes relaciones entre el diámetro de la hélice accionada por el viento y la salida del generador para voltajes de 65, 110 y 220 voltios.

<u>Diámetro de la Hélice (m)</u>	<u>Salida del Generador (kW)</u>
4 y 4.5 m	1.5 kW
5 a 6 m	3 kW
6.5 a 7.5 m	4.5 kW
8 a 9 m	6 kW
10 a 11 m	9 kW

Diámetro de la Hélice (m) Salida del Generador (kW)

12 m	12.5 kW
13.5 m	17 kW
15 m	21 kW

Por último podemos mencionar unas características generales de los generadores eléctricos de ADLER usados para generar electricidad.

GENERADOR			Diámetro de la Hélice (m)	Producción de la Turbina de Viento (kWh)	
Volt.	Amp.	kW		Por día	Por Año
110-150	7	1.0	4.5	5-6	1500 - 1800
110-150	18	2.7	5.5	7-10	2100 - 3000
110-150	27	4.0	6.5	10-14	3000 - 4200
110-150	36	5.4	6.5	10-14	3000 - 4200
110-150	45	6.7	7.5	14-18	4200 - 5400
110-150	60	9.0	8.5	18-24	5400 - 7200
110-150	80	12	10	25-33	7500 - 10000
110-150	100	15	10	25-33	7500 - 10000
220-300	30	9.0	8.5	18-22	5400 - 7200
220-300	40	12	10	25-33	7500 - 10000
220-300	50	15	10	25-33	7500 - 10000
220-300	60	18	12	33-48	10000 - 15000
220-300	75	23	12	33-48	10000 - 15000

TABLA No. 10 .- Características para la conversión de viento en electricidad, preparada por ADLER .

En general sabemos que un generador se caracteriza por la potencia que puede producir a la velocidad de viento calculada, entonces podemos escoger el generador correcto, calculándolo para las necesidades de energía. Sabemos además que dos generadores diferentes pueden sacar la

misma cantidad de potencia a cierta velocidad del viento, pero uno podría estar girando a más o menos un par de cientos de rpm y el otro estará girando a algunos miles de rpm.

3.2 CARACTERISTICAS DE LOS GENERADORES DE LOS MOLINOS DE VIENTO :

Un generador eléctrico, que puede estar localizado al tope de la torre y accionado directamente por el eje de la hélice de viento por medio de engranajes multiplicadores, o que puede estar localizado en tierra firme y accionado por un eje rotativo vertical y por una caja de velocidades que también estaría en tierra, podría ser analizado por las características de conexión eléctrica y mecánica.

Un generador SHUNT ordinario o un generador COMPOUND pueden ser utilizados con la hélice de viento, dado que el primero está equipado con un aparato de regulación de excitación y se obtienen excelentes resultados tales como la regularidad de la carga de batería.

También son usados los generadores de AUTOREGULACION los que se utilizan para cargar baterías de automóvil. En el caso del tipo americano de hélices accionadas por viento con multi-aspas opera a bajas velocidades del viento (4 a 10 m/seg) y gira oblicuamente al viento cuando la velocidad aumenta.

Las variaciones de velocidad del generador son mucho más pequeñas que en un automóvil, donde la máquina opera entre las 300 y 3000 rpm.

Así ha sido posible encontrar resultados satisfactorios con generadores autoregulables.

La Figura No. 27 es un diagrama esquemático de un generador Shunt con autoregulación debido a la distorsión del campo magnético, por medio de una escobilla de excitación adicional.

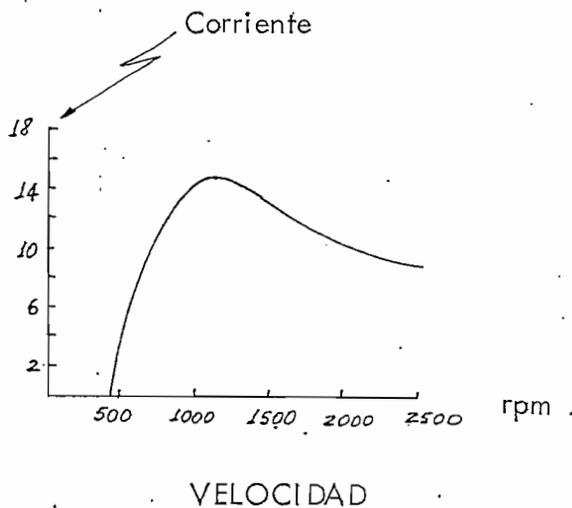
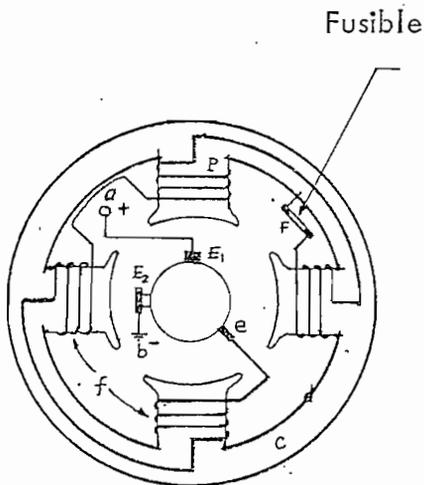


FIGURA No. 27 .- Generador Shunt

FIGURA No. 28 .- Características del Generador Shunt .

Este consiste de un yugo magnético C con polos de inducción P alrededor de los cuales se envuelve un circuito de excitación constituida por una bobina de sección fina.

Una armadura D que sirve de apoyo a una bobina cuyos conductores están soldados a las láminas del colector, en el cual están montadas dos escobillas E_1 y E_2 , las cuales colectan la corriente inducida en la bobina. La escobilla auxiliar en la cual el circuito de excitación comienza está en e. Esta escobilla puede ser atrasada para ajustarse a

condiciones de operación.

La regulación automática es obtenida por medio de la escobilla auxiliar e, la cual energiza el devanado de excitación y el cual a su vez afecta o actúa sobre el campo magnético.

La figura No. 28 muestra la curva de la corriente producida por este generador a varias velocidades (Generador GS 1E - 12 Voltios de PARÍS - RHONE).

Para los rotores Darrius el generador es ordinariamente uno de D.C. con polos desconectables, cuya potencia y voltaje pueden ser determinados en cada caso específico como una función de la velocidad del viento promedio en el área geográfica involucrada y del tipo de servicio para el cual la instalación está diseñada.

Por ejemplo, cuando éste va a ser usado meramente para la iluminación de una cierta construcción o área, particularmente una construcción húmeda tal como una ganadería, sería ventajoso usar voltaje razonablemente bajo como 24, 48 o 65 Voltios. No obstante, dado el alto costo de generadores de bajo voltaje, será necesario escoger el voltaje más alto de al menos 110 Volts., cuando la instalación sea también decidida a producir potencia motriz.

El generador de este tipo está diseñado a operar a plena capacidad comenzando a 500 rpm. A esta velocidad, no obstante, la potencia proporcionada por el molino de viento es inadecuada para excitar el generador, aún sin carga (8 Amp. a 24 Volt., que es, aproximadamente 200 W) Como resultado, en la práctica el generador se usa solamente a velocidad

des de 700 rpm o más, siendo la máxima velocidad de 3000 rpm.

La salida nominal del generador es de 1200 W, correspondiendo a una corriente de 50 Amp., a un voltaje de 24 Voltios, ó 11 Amp. a 110 Voltios.

No obstante, los tipos de generadores usados tienen un amplio rango de operación, y es operación normal entre 1500 y 200 rpm, son capaces de entregar 1850 W (70 Amp. a 25.6 Voltios ó 15 Amp. a 125 Volt.).

El centro de investigación de la NASA, LEWIS (LERC) ha diseñado y ha construido una turbina generador de 110 kW. Esta turbina de prueba consiste de una turbina rotor, transmisión, eje, alternador y torre.

La hélice consiste de dos paletas de 125 pies de diámetro operando a 40 rpm y generando 133 kW de potencia (100 kW en el generador) con velocidad de viento de 18 mph. La hélice conectada a un eje de baja velocidad (40 rpm) el cual maneja un sistema de engranajes. En el sistema de engranajes las rpm del eje son aumentadas de 40 a 1800 rpm. Un eje de alta velocidad es conectado del alternador de 100 kW al sistema de engranajes. La estructura entera es conectada en la parte superior de la torre, 100 pies sobre el nivel de tierra. La característica de Potencia en función de la velocidad es representada por la Figura No. 29.

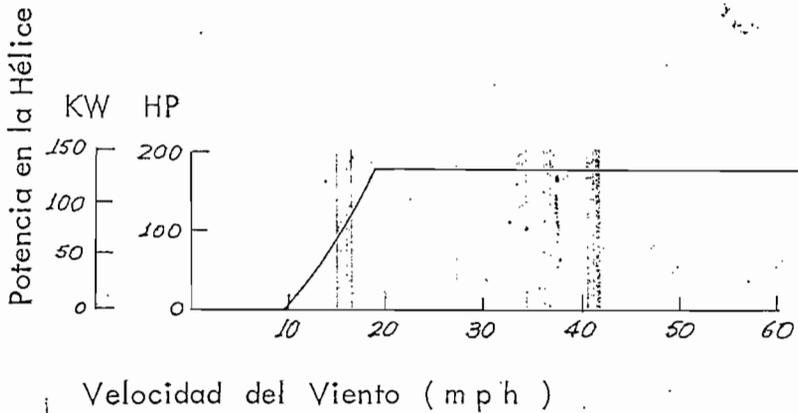


FIGURA No. 29 :- Potencia en la Hélice como función de la velocidad del viento.

El generador eléctrico tiene las siguientes características :

Generador sincrónico : 100 kW

Peso : 646 Kg (1425 lbs)

dimensiones aprox : Diámetro 0.61 m (2 pies)

Longitud 0.91 m (3 pies)

3.2.1 SISTEMAS VSCF y CSCF:

Por otro lado las frecuencias resonantes son más problemáticas en sistemas de frecuencia constante y velocidad variable (VSCF), que en un sistema de frecuencia constante y velocidad constante (CSCF), pero la excitación en velocidad variable no necesita atravesar las frecuencias de resonancia. Por ejemplo, con una variación de la velocidad en el orden del 20 % al 30 %, un generador de inducción a doble salida provee 90 % de la energía que podría ser colectada de un esquema ideal de (VSCF).

Una comparación a groso modo entre los sistemas CSCF y el VSCF puede ser realizado en base a las curvas de la figura No. 30, la que nos da la duración de la potencia de salida, donde el área rayada representa del 10 al 20 % de potencia adicional de salida, producida por un sistema con velocidad variable, comparada así con el sistema de velocidad constante dependiendo de las características del viento y de la velocidad nominal del sistema.

Energía no valorable debido al plegamiento de las paletas .

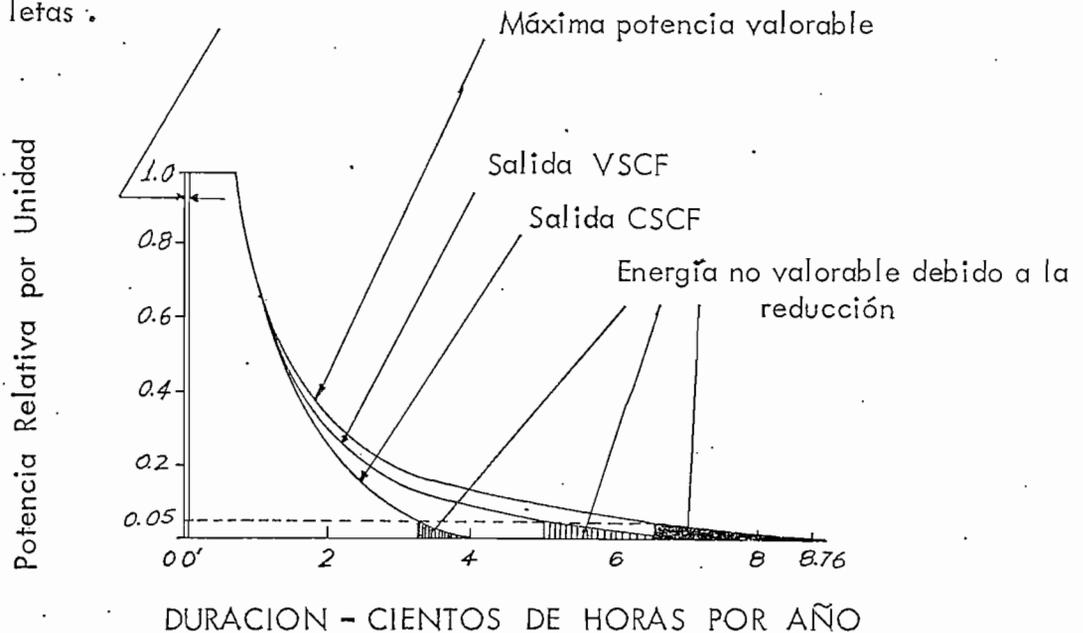


FIGURA No. 30 .- Características de la Potencia en función del tiempo para sistemas de CSCF y VSCF .

Estas curvas describen las limitaciones básicas que afectan la recuperación electromecánica de la energía del viento. Tal energía puede ser perdida por ineficiencias del sistema, por velocidades del viento bajas, que no pueden hacer girar la hélice y ráfagas en las que las paletas

deban a propósito ser sacadas de la corriente del viento.

Nótese la ventaja del sistema VSCF sobre el sistema CSCF.

3.2.2 SISTEMA CSCF PARA MAQUINAS DE INDUCCION Y SINCRONICAS

Si no hay limitaciones mecánicas o eléctricas, el eje principal del generador puede rotar a velocidades variables, siguiendo la velocidad del viento. Acoplando a un generador A.C. una excitatriz D.C., el resultado es una salida a frecuencia variable, así comparado con la frecuencia constante de la red de potencia. Afortunadamente, cuando el generador de potencia por viento está interconectado con el circuito de potencia, las limitaciones eléctricas provistas por la red mantienen la frecuencia constante.

Por razón de que el voltaje de la red de potencia y la frecuencia tienen que ser reguladas dentro de límites estrechos de acuerdo a normalizaciones del sistema, un generador AC., conducido por viento sincronizado a la barra infinita, giraría a velocidad sincrónica determinada por la frecuencia de la barra.

Las máquinas de inducción con pequeños deslizamientos, pueden ser consideradas como sistemas con velocidad constante (NOTA : Porcentaje de deslizamiento es la diferencia entre la velocidad sincrónica y la velocidad de operación, expresado como un porcentaje de la velocidad sincrónica.)

Así, para una máquina de inducción a 60 Hz de 4 polos, la velocidad sincrónica es de 1800 rpm. Usando como un motor a 1620 rpm, el deslizamiento " positivo " será : $\frac{1800 - 1620}{1800} \times 100 = 1\%$.

Usando como un generador y forzando a girar a 1980 rpm. el deslizamiento "negativo" será : $\frac{1800 - 1980}{1800} \times 100 = 1\%$).

Un generador de inducción puede operar en una barra infinita a velocidades deslizadas del 1 al 5 % de la velocidad sincrónica .

Así, pues, sistemas de inducción y sincrónicos, que mantienen la velocidad constante debida a las limitaciones eléctricas impuestas por la red independiente de la velocidad del viento, son clasificados como sistemas CSCF.

Los generadores sincrónicos de potencia por viento operando en paralelo con una red de potencia, son similares a los generadores de hidroestaciones. En todo caso, ya que la entrada de viento fluctúa, un mecanismo de control puede ser necesario para variar la salida del rotor, tal que la potencia derivada de la energía del viento, sea encontrada razonablemente constante. El sistema de control debe ser lo suficientemente sensitivo para amortiguar estas salidas transcientes tal que las salidas de las máquinas no lleguen a ser inestables.

Una máquina de inducción operando sobre la velocidad sincrónica se comporta como un generador. La hélice de viento es engrenada al generador de inducción de tal forma que, en la región de operación normal, el generador esté girando sobre la velocidad sincrónica correspondiente a su potencia de entrada. Un control de velocidad constante no es necesario, pero habrá un mecanismo que descargue el exceso de la potencia del viento cuando la velocidad del rotor llegue a ser de otro modo excesiva.

Por otro lado, si la potencia eléctrica derivada del viento es significativa comparada con la capacidad de la red del sistema, la estabilidad de la máquina síncrona llega a ser un problema serio, y aquí el generador de inducción tiene una ventaja distintiva.

Un generador síncrono, no obstante tiene un valor reactivo, porque este puede suplir potencia reactiva al sistema y si es necesario opera como un condensador síncrono, mientras un generador de inducción carece de esta capacidad, y también necesita equipo que mejore el factor de potencia.

3.2.3 SISTEMA VSCF :

Los sistemas de generación de frecuencia constante y velocidad variable, son caracterizados por una hélice que permite el movimiento libre con el viento. La velocidad de rotación, sin embargo, está determinada por las características velocidad - carga, tanto de la hélice como del generador. La eficiencia de la hélice de viento en la conversión de energía del viento a energía mecánica (C_p) es óptima en solo una relación:

$$\frac{\text{Velocidad de la hélice}}{\text{Velocidad del viento}}$$

Así, es deseable preparar la velocidad de rotación en una proporción constante de la velocidad del viento ambiental. Los esquemas de generación que involucran rotores con velocidad variable son naturalmente más complicados que los sistemas a velocidad constante. La potencia a frecuencia variable debe ser convertida en potencia a frecuencia constante, y esto ahora puede ser realizado usando TIRISTORES.

3.3 MECANISMOS DE CONTROL

El divisor que controla la operación del generador y regula las transacciones entre el generador y sistema de acumulación, es el llamado REGULADOR DE VOLTAJE. El regulador de voltaje regula la potencia de salida del generador cambiando rápidamente la corriente del campo. Cuando el campo está activado, el generador saca la mayor cantidad posible de corriente, mientras que cuando está apagado, la potencia de salida baja a cero.

El promedio de potencia de salida es determinada por el tiempo que el regulador permite que el campo esté activado; este regulador cuida de que la potencia de salida del generador no sea nunca tan grande, que pueda dañar el sistema de acumulación o el generador mismo.

Existen elementos de regulación desde los más primitivos, constituidos por reóstatos, hasta los nuevos y modernos sistemas electrónicos.

La regulación de voltaje rara vez se efectúa variando el número de revoluciones; generalmente se hace variar la corriente de excitación intercalando en el circuito excitador una resistencia regulable por grados muy pequeños (regulador de campo). En general es accionado directamente a mano; a veces también por medio de un engranaje o de un sistema de palancas. Es frecuente la maniobra a distancia cerrando el interruptor de un motorcito de mando.

Al cortar la excitación, el devanado de los polos debe quedar en cortocircuito, a fin de que la extracorrente de selfinducción pueda extinguirse sin producir una avería del aislamiento; ello es necesario sobre

todo para tensiones de excitación que pasen de 50 voltios.

Los reguladores automáticos tienen un relevador que, al variar la tensión, pone en marcha un electromotorcito, el cual hace girar en un sentido u otro la palanca del reóstato de excitación. Son adecuados para centrales cuya carga varíe mucho, aunque no con intervalos demasiado cortos. También se usan a veces reguladores rápidos, en particular si el número de revoluciones es variable.

La autoregulación mediante el devanado, se consigue con generadores compound, que para centrales de alumbrado ya apenas se emplean, puesto que las variaciones de tensión, provocadas por el calentamiento del generador, obligan de todos modos a una regulación de mano (con un reóstato intercalado en el circuito de la excitación Shunt.)

3.3.1 CIRCUITOS DE CONTROL :

Para nuestro propósito consideraremos los tipos de circuitos de control usados en Centrales Eléctricas por Molinos de Viento, los cuales son detallados a continuación :

a. CIRCUITO DE CONTROL ADLER :

Que conecta el generador con el sistema de acumulación, cuando su velocidad indica un voltaje superior que el del sistema de acumulación y desconecta este circuito cuando la velocidad del generador produce un voltaje inferior al del sistema de acumulación .

La figura No. 31 nos muestra la estructura básica de uno de estos

aparatos: Un electromagneto, un soporte, una bobina de conductor delgado (1) la cual es constantemente atravezada por la corriente del generador, y una segunda bobina (2), con solamente unas pocas vueltas, para la cual la corriente de carga al sistema de acumulación pasa cuando el swich de mercurio (o cualquier sistema) "g" se cierra.

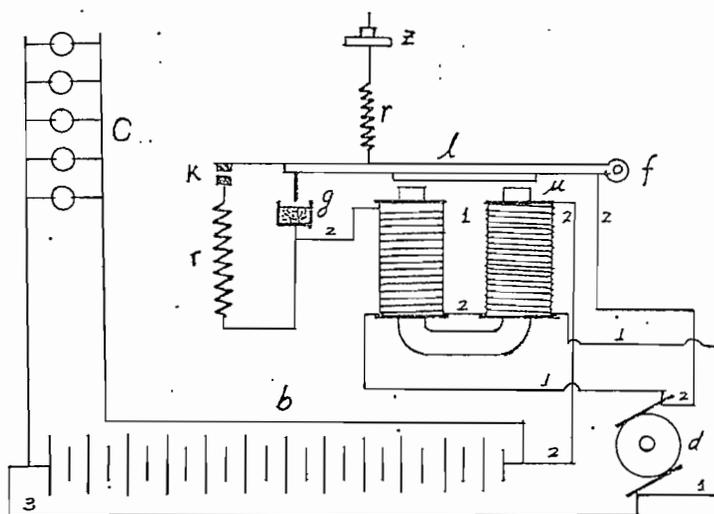


FIGURA No. 31 .- Diagrama de control de ADLER .

Cuando el generador alcanza una suficiente velocidad para producir un voltaje deseable para la carga de acumulación, el electromagneto atrae el vano de tierra flexible "l" con una articulación en "f" y regulado por un resorte reforzado "r".

En este punto el contacto "g" se cierra, el circuito (2) carga el sistema de acumulación y su enrollado en las bobinas del electromagneto

./..

incrementa la atracción del vano "l". cuando el voltaje del sistema de acumulación "b" viene a ser más alto que el del generador, la corriente cambia de dirección en el circuito (2), la cual coloca a los dos devanados del electromagneto en oposición. El vano "l", el cual ya no es por más tiempo atraído regresa a su posición inicial por medio del resorte "r" y desconecta el contacto "g". Un contacto "k" controlado por un resorte "r", sirve para eliminar el chispazo de interrupción de corriente en el interruptor.

b. CIRCUITO DE CONTROL DE " LA COUR "

Un diagrama esquemático de un circuito diseñado por el profesor " LA COUR " se dá en la figura No. 32. Donde "mn" es un magneto tipo herradura capacitado para rotar en un eje y cuyo polo "n" puede ser atraído, ya sea hacia la derecha por el electromagneto " l₂" o hacia la izquierda por el electromagneto " l₁". "k₁ k₂" es una varilla de cobre horizontal con puntos de hierro en sus extremos; una de estas puntas "k₁", constantemente se inclina hacia la válvula "g₁", y la otra "k₂" se inclina hacia la válvula "g₂" solamente cuando el polo "n" del magneto es atraído al lado " l₁".

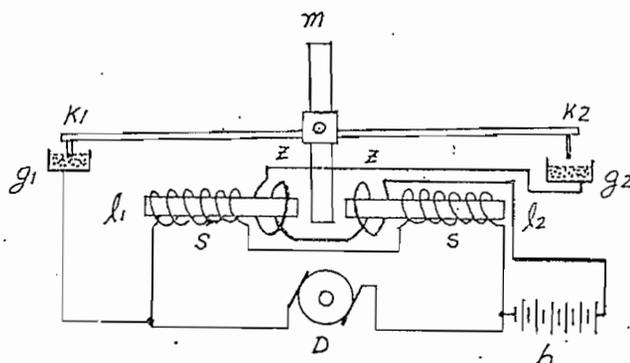


FIGURA No. 32 .- Diagrama de control diseñado por el profesor " LA COUR ".

La corriente viaja en todo momento de "a" hacia "b", los terminales del aparato a través del devanado de conductor fino "ss", y, cuando la punta "k2" se inclina hacia la válvula "g2", la corriente es transmitida para almacenar el sistema de acumulación a través del devanado del conductor grueso "zz". Esto ocurre solamente cuando el voltaje de la corriente del generador es mayor que aquel del sistema de almacenaje.

c. CIRCUITO DE CONTROL POLARIZADO :

Este aparato mostrado en la figura No. 33, contiene un solenoide cuyo núcleo "E" tiene una armadura con dos "B, B" que se desplazan entre los polos de dos magnetos permanentes "A, A". El solenoide tiene dos bobinas : La una de conductor fino "D", cuyo circuito incluye el almacena-

miento del sistema de acumulación y la armadura del generador, y la otra, de conductor grueso "C", la cual se coloca en conexión serie entre el generador y el sistema de acumulación cuando el circuito interruptor está cerrado en "H1".

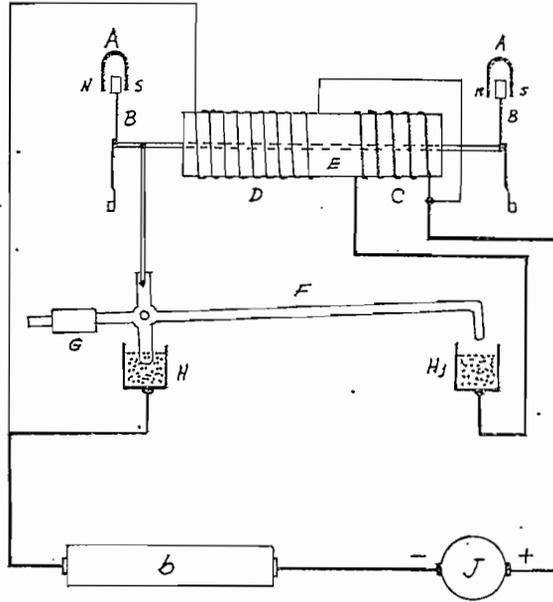


FIGURA No. 33.- Circuito de control polarizado operando bajo un rango variable de voltaje de 25 a 110 voltios.

Cuando el generador es parado, la corriente de la batería se transmite a la bobina del conductor fino "D" en una razón de unas pocas centésimas de un amperio; el efecto de la bobina "D" es conservar el circuito de control abierto en "H1", en la posición indicada en el diagrama. Tan pronto como el generador arranca y comienza a surtir potencia en el orden de unos pocos voltios, su corriente está en proporción inversa a la corriente que entra a la bobina "D", donde el voltaje comienza a disminuir y finalmente es conectado. La palanca "F" se desliza y produce contacto en "H1" entre el generador y la acumulación; pero la corriente del generador,

la cual comienza a acumular, se transmite a la bobina "C" de conductor grueso, la cual tiene el efecto de mantener la palanca "F" en la posición en la cual, el contacto "H1" permanece cerrado.

Si el generador empieza a pararse y su voltaje cae a un nivel inferior al del sistema de acumulación, la dirección de la corriente cambia en la bobina "C" y la palanca "F" se inclina hacia la parte posterior e interrumpe la corriente en "H1", con lo cual regresa el circuito interruptor a su estado inicial.

La considerable ventaja de este aparato es de que no consume corriente durante la condición de operación y que éste opera independientemente del voltaje del sistema de acumulación o del generador dentro de límites extremadamente amplios, 24-110 voltios, por ejemplo. Este es solamente sensitivo y completamente satisfactorio para generadores accionados por viento. Su desventaja es de que éste consume corriente cuando el generador está parado, debido al devanado "D" de conductor fino. Este defecto puede ser prevenido, no obstante, por la colocación de un interruptor automático en "Z", con sus ramas conectadas a los polos del generador, lo cual permitirá que la corriente pase a través del devanado "D" solamente cuando el generador arranque.

3.3.2 REGULADOR PARA GENERADOR SHUNT :

El regulador por la " COMPAGNIE ELECTRO - MECANIQUE" se muestra en la figura No. 34. Este aparato sirve para un propósito triple:

1. Este automáticamente regula la excitación del generador como una función de la potencia proporcionada.

2. Este permite que el sistema de acumulación sea cargado bajo condiciones óptimas para el mantenimiento de este sistema.
3. Este protege la instalación contra ciertos falsos disparos.

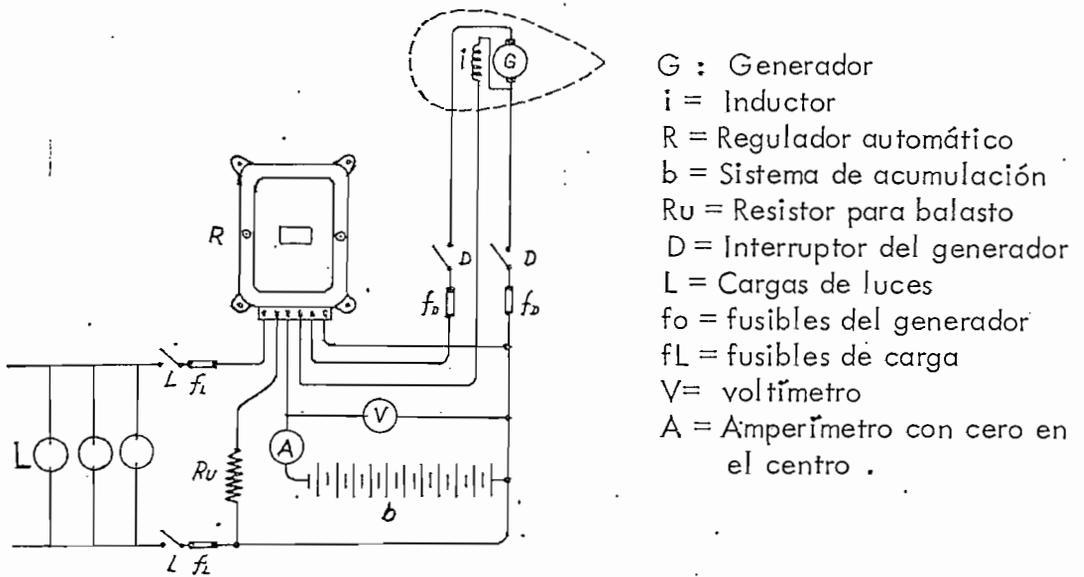


FIGURA No. 34 .- Diagrama de conexión del regulador automático producido por la Compañía " ELECTRO - MECANIQUE"

El propósito de la regulación automática de la excitación no es conservar el voltaje del generador constante para cualquier velocidad del viento. La regulación de este tipo sería ilusorio en el caso de operación en paralelo del generador con un sistema de acumulación, ya que el voltaje en los terminales de "b" está en el rango de 1.8 a 2.5 Voltios por celda, dependiendo del estado de carga.

Conocemos que la potencia proporcionada por un molino de viento, operando a su máxima eficiencia, varía con la tercera potencia de su velocidad de rotación. Esto por lo tanto sería una ventaja el tener el generador que también produce potencia proporcional a la tercera potencia de su velocidad de rotación, sin tomar en cuenta la eficiencia. Ahora, si la excitación fuese conservada constante, la potencia proporcionada al generador y transmitida al sistema de acumulación aumentaría mucho más rápido que la tercera potencia de la velocidad de rotación.

Para obtener la variación correcta en potencia, es necesario disminuir la excitación cuando la velocidad aumenta.

Los inductores "i" del generador están conectados directamente al polo negativo por un lado y al polo positivo por el otro lado a través de un reóstato automático conectado a los terminales "B" y "E" del regulador. Las diferentes secciones de este reóstato terminan en contactos tachonados y arreglados en un área de círculo en el platillo del regulador.

3:3.3 CONTROL DE CARGA PARA GENERADOR SHUNT :

Los aparatos que aseguran una carga correcta del sistema de acumulación pueden ser separados así :

a. Interruptor principal :

Este es un interruptor automático, el cual conecta el generador y el sistema de acumulación en paralelo. Este se cierra tan pronto como el voltaje del generador es igual al de los terminales de "b", y se abre cuando hay un muy ligero regreso de la corriente de "b" al generador. Este

interruptor, el cual sirve para abrir o cerrar el circuito solamente cuando la corriente es baja o nula; contiene solamente contactos de metal ordinario con la adición de un contacto de carbón para el apagado de arcos.

b. Limitador de carga :

Ya que la intensidad de la corriente disminuye mucho más rápido que lo que aumenta el voltaje, la potencia proporcionada por el generador disminuirá constantemente durante la carga.

El método de carga que se conoce y que es óptimo para el mantenimiento del sistema de acumulación, es el de cargar con el incremento de voltaje y con el decremento de la intensidad de corriente.

Para obtener cargar con decremento de corriente, parte de la corriente proporcionada por el generador debe ser derivada hacia una parte externa con respecto de la batería, por ejemplo, hacia un resistor " R_u ". Un relé especial conecta el resistor " R_u " en paralelo con la batería cuando la corriente de carga excede un nivel dado, el cual varía con el estado de carga, esto es, con el voltaje a los terminales de la batería.

c. Limitador de descarga :

Este previene la excesiva descarga del sistema de acumulación. Consiste de un relé de voltaje mínimo, el cual abre cuando el voltaje en los terminales "b" alcanza 1.8 voltios por celda. Ya que este relé está localizado dentro de la cubierta no puede ser cerrado a mano una vez que este ha sido abierto, lo cual da completa seguridad de que el sistema de acumulación no se descargue.

Este relé se cierra automáticamente cuando el sistema de acumulación ha sido recargado, y permanece cerrado tanto como el voltaje de cada celda sea mayor que los 1.8 voltios.

d. Limitador de Voltaje :

Cuando el circuito de carga es interrumpido por alguna causa accidental dada la velocidad del motor de viento se incrementa mientras un anillo cortocircuita al resistor de excitación. Por estas razones, el voltaje del generador se incrementa en proporciones considerables (3 a 4 veces el voltaje normal). Los devanados y resistores del regulador, los cuales están establecidos para voltaje normal, serían rápidamente puestos fuera de operación si un relé " limitador de voltaje " colocado dentro del regulador bajo el platillo o disco no fuese capacitado para cortocircuitar los inductores "i" y así rápidamente cancelar el voltaje del generador.

Una vez que el relé ha operado, este permanece bloqueado por una traba mecánica. La operación normal puede ser resumida solamente después que la causa del mal funcionamiento ha sido despejada y el relé ha sido destrabado a mano por medio de una perilla especial en la parte baja del regulador.

3.3.4 CONTROL ELECTRONICO :

En vista de que la tecnología ha avanzado mucho en sistemas de control, es necesario indicar que existen dispositivos de control electrónico, los mismos que día a día han sido perfeccionados, teniendo en la actualidad elementos de control de estado sólido.

Así podemos mencionar como ejemplo el control automático de velocidad de una máquina DC por armadura .

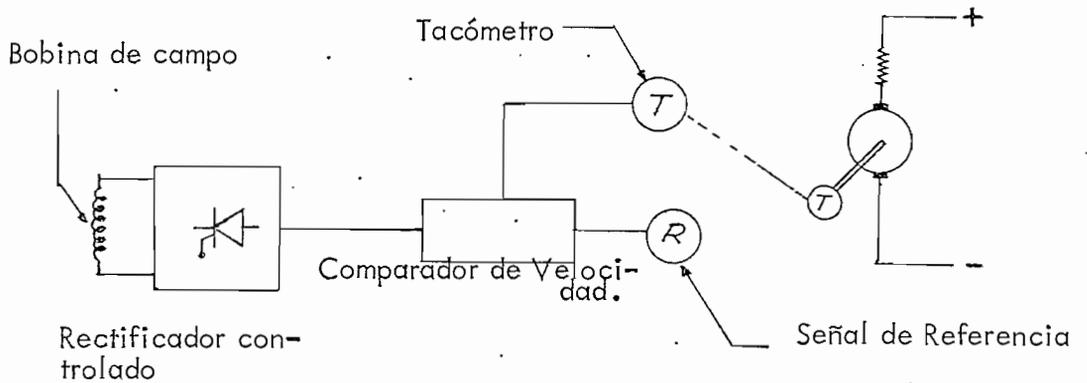


FIGURA No. 35 .- Diagrama de control de velocidad por armaduras.

Pero es necesario indicar que el control de velocidad de hélice es más complejo de modo que no podemos detallar sino en forma de bloques, puesto que además no estamos interesados en análisis electrónicos, sino más bien el de dar criterios sobre métodos de control.

De esta misma forma se puede dar un control de voltaje y corriente en forma esquemática.

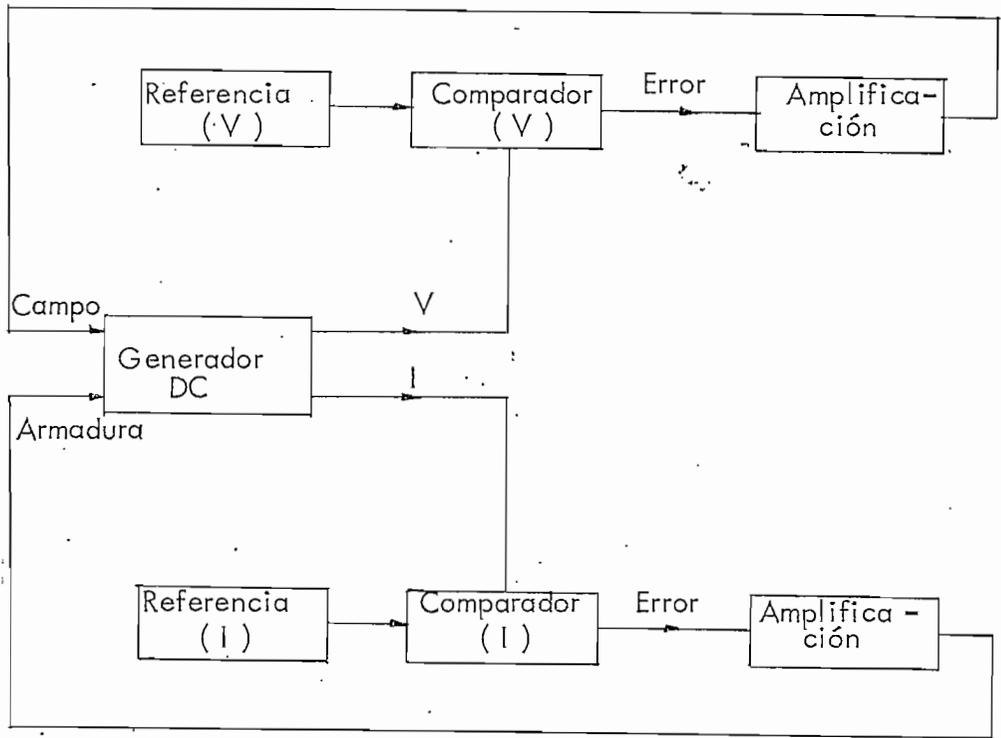


FIGURA No. 36 .- Diagrama de control de voltaje y corriente.

3.4 SISTEMAS DE CONVERSION Y RECONVERSION :

Un sistema con energía del viento, consiste de 3 subsistemas : aerodinámico, mecánico y eléctrico, que interactúan e influyen mutuamente en el comportamiento.



FIGURA No. 37 .- Esquema básico de conversión de energía .

Básicamente, en la operación de un generador de potencia por viento, la potencia en el viento (P_w) es convertida en potencia mecánica (P_m) por medio del sistema aerodinámico. Para generadores grandes, esto usualmente consiste de un rotor de 2 ó 3 paletas que giran en un eje horizontal por medio del viento. Refiriéndose al mismo esquema, la potencia mecánica desarrollada P_m , está dada por : $P_m = C_p \cdot P_w$; donde C_p es el coeficiente de potencia que representa la eficiencia de la conversión de potencia del viento P_w a potencia mecánica P_m .

Este coeficiente, que depende del tipo y de la forma de las hélices, es también muy sensible a la velocidad del viento.

Si la velocidad nominal de la hélice corresponde al máximo valor de C_p , entonces un incremento o decremento de la velocidad del viento, resultará en un decremento del coeficiente C_p si la velocidad del eje es sujeta a ser constante. Por otro lado, si la velocidad de la hélice se le permite que varíe con la velocidad del viento (relación de la velocidad pico de la paleta a la velocidad del viento supuesta constante), el máximo coeficiente C_p podría tenerse para todas las velocidades del viento operacionales.

Esto resultará en dos esquemas básicos de generación (analizados anteriormente): Sistemas de frecuencia constante y velocidad constante (CSCF), donde la velocidad de la hélice permanece constante por un ajuste continuo del paso de paleta y/o características eléctricas del generador; y los sistemas de frecuencia constante y velocidad variable (VSCF), donde la velocidad de la hélice, se permite que varíe en proporción a la velocidad del viento, resultando en un coeficiente C_{pmax} para la mayoría de la región de operación.

La producción total de potencia eléctrica puede ser calculada por multiplicación de P_w por los coeficientes aplicables (C_p , η_M y η_G) a cada velocidad del viento prevaeciente y luego integrándolo para un determinado intervalo .

3.4.1 TECNICAS DE CONVERSION Y RECONVERSION :

Varias técnicas alternativas han sido propuestas para extraer potencia a 60 Hz de generadores AC que son movidos por una máquina de viento a velocidad variable que por razón de esta aproximación VSCF que tiene una inherente más alta eficiencia que la de CSCF. Aparatos de estado sólido mejorados prometen hacer a los métodos económicos.

Un reciente diseño modificado, llamado generador de inducción de doble salida (DOIG), con equipo electrónico de estado sólido y manejando solamente potencia deslizante, parece ser un compromiso interesante entre los sistemas VSCF y CSCF, y también aparece competitiva en costo.

El DOIG es justamente una de las 4 técnicas VSCF importantes que merecen una consideración cuidadosa.

El primero entre las opciones VSCF es un generador AC con una excitación de campo DC acoplado a un rotor a velocidad variable (figura No. 38). La salida del generador de frecuencia variable es rectificad para conseguir corriente directa, la cual es convertida en AC por un inver sor .

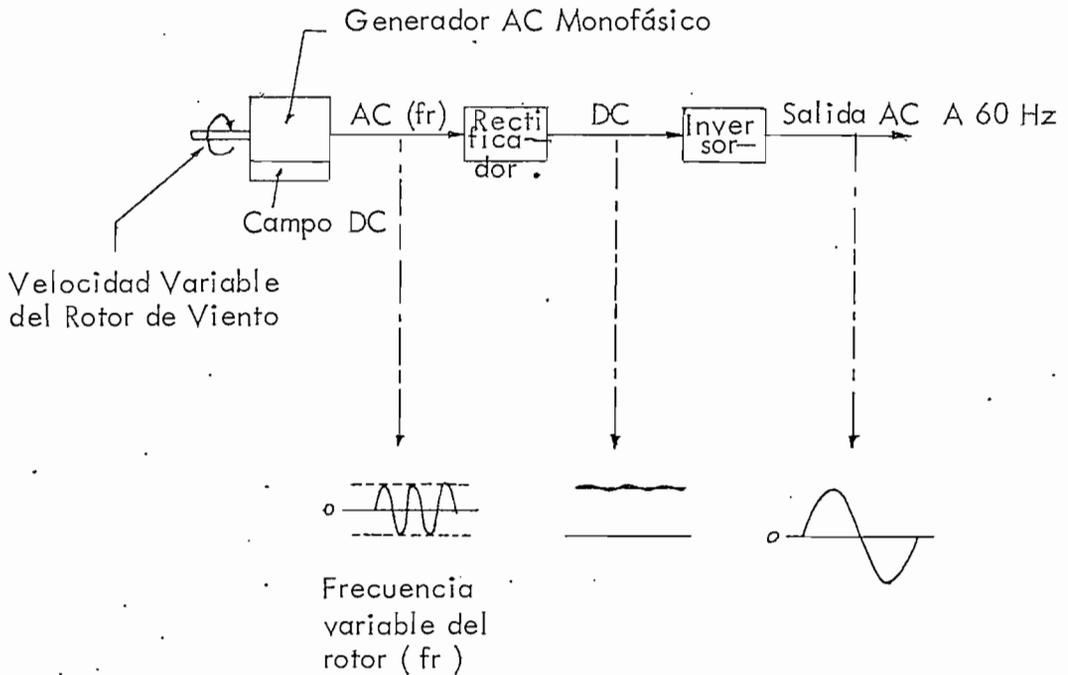


FIGURA No. 38 .- Esquema de un sistema VSCF con un generador monofásico.

La conversión AC-DC-AC es una tecnología establecida en transmisión de alto voltaje DC, y la operación del inversor técnicamente en una red de potencia AC es bien entendido dentro de ciertos parámetros, incluyendo el sistema de servicio de cortocircuito en el punto de interconexión y de estabilidad de voltaje.

La aplicación de este esquema a la potencia por viento es limitada solamente por el costo del equipo que genera potencia.

Otra de las opciones de un sistema VSCF es el de conversión a baja frecuencia, el cual genera potencia en una frecuencia modulada mucho más alta que los 60 Hz, luego electrónicamente procesa bajándola para obtener 60 Hz (Figura No. 39). El sistema usa un generador AC con su bobinado de campo rotativo excitado a 60 Hz, proporcionando una salida modulada.

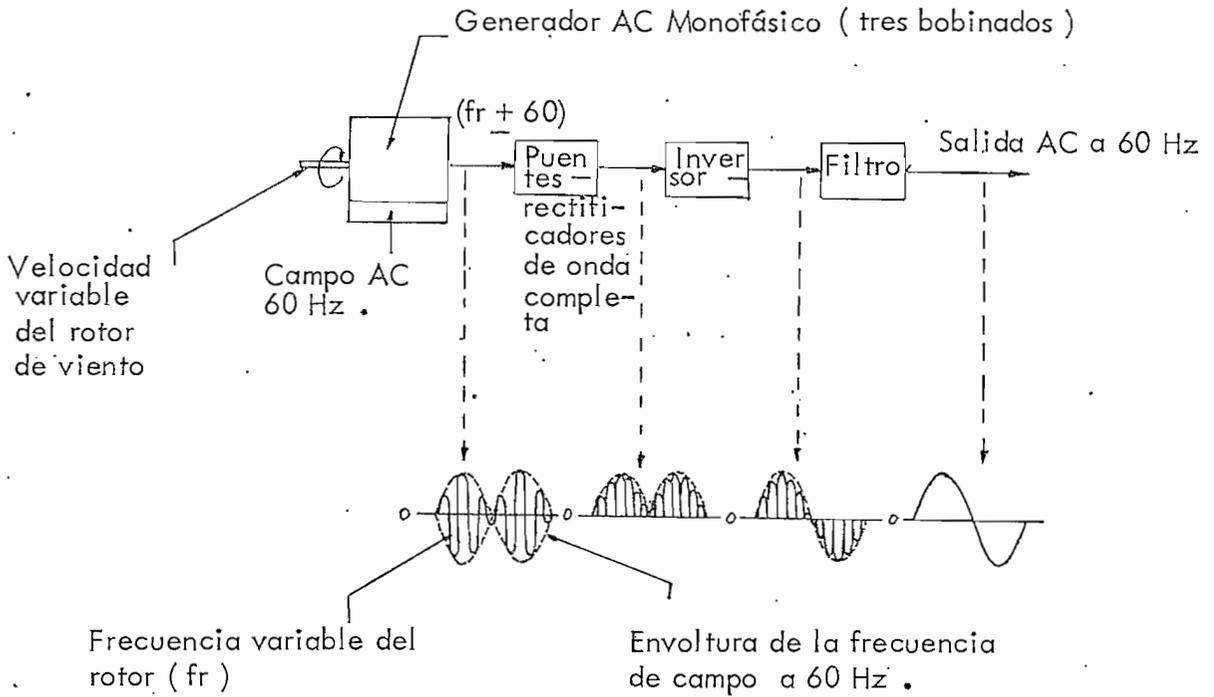


FIGURA No. 39 .- Esquema VSCF con generador monofásico (tres bobinados)

La máquina por si misma tiene una frecuencia de rotación (fr), que varía con la velocidad variable del primer movimiento. La salida es una onda de amplitud modulada, consistente de componentes de $(fr + 60)$ y $(fr - 60)$ Hz. Esta salida es demodulada en un rectificador tipo puente, invertida por un inversor SCR, y filtrado para conseguir una salida a 60 Hz.

El esquema de característica única es el de devanados de 3 fases separadas en el generador usado para producir una salida monofásica. Los voltajes de fase de la salida son rectificadas y sumados puntos, lo cual ocasiona que las componentes de rizado sean dramáticamente reducidas (un efecto similar al incrementar la proporción de pulsos en circuitos convertidores). Para producir una salida trifásica, tres equipos de tal tipo de equipamiento deben ser usados, además manteniendo la apropiada afinidad entre

salidas monofásicas correspondientes.

Usando un generador conmutador AC (ACCG) para la energía del viento, es quizá el medio más simple de derivar una salida de frecuencia constante a una máquina de frecuencia variable (figura No. 40).

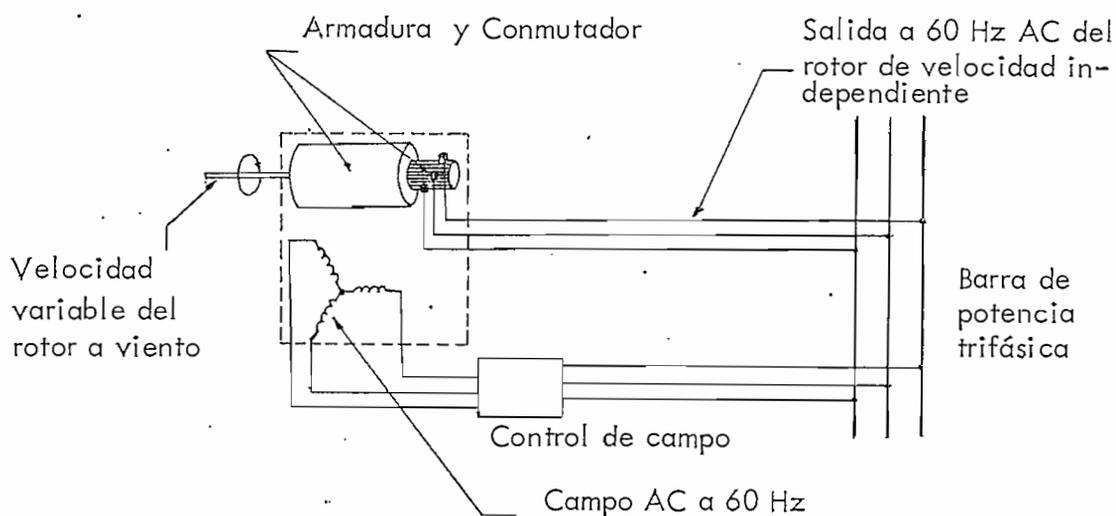


FIGURA No. 40 .- Sistema VSCF con generador conmutador AC (ACCG)

La excitación de campo de (ACCG) puede ser obtenida de la red. La frecuencia de salida de la máquina es igual a la frecuencia de excitación y puede ser retroconectado directamente a la red. El ACCG provee una salida de frecuencia lineal por razón del conmutador.

Es interesante comparar la operación de ACCG con el esquema de la modulación de campo. Ambos toman la frecuencia lineal de excitación, pero con la modulación de campo, la salida (una onda modulada), debe ser procesada por un rectificador, inversor y un filtro. El procesar a través

de todos estos 3 subsistemas es necesario para producir salida a la frecuencia de la red de potencia.

En un ACCG, el conmutador por si solo cumple esta labor. No obstante, al problema de una conmutación segura en máquinas AC es seria. Varias técnicas probadas son válidas para perfeccionar la conmutación, incluyendo escobillas de alta resistencia o conmutadores con muchos segmentos.

3.4.2 SALVAMIENTO DE LA FRECUENCIA DE DESLIZAMIENTO DEL ROTOR JAULA DE ARDILLA (SCR)

La máquina de inducción con un rotor jaula de ardilla (SCR) tiene resistencia constante, y así hay solamente una característica óptima (velocidad - carga) y la máquina opera con un pequeño deslizamiento. Esto es una desventaja en sistema de potencia por viento por razón de que un rotor de viento forzado a operar en una velocidad constante, o cercanamente constante, resulta con una eficiencia (C_p) aerodinámica reducida. Para permitir a las máquinas de inducción operar a diferentes velocidades (para seguir las velocidades del viento) su resistencia de rotor debe ser variada. Esto es posible con una máquina de inducción de rotor devanado, donde los terminales en el rotor son capaces de conectarse a una resistencia externa. Variando la resistencia del rotor externamente se cambiaría las características (velocidad - carga) de la máquina de inducción.

Sin embargo, la tecnología moderna puede reemplazar la resistencia externa de deslizamiento, por circuitos electrónicos que parecen resistivos al rotor cuando se convierte la potencia de frecuencia de deslizamiento a potencia de frecuencia de línea y la impulsa a ésta de regreso a la red.

La salida de potencia es efectivamente de doble terminal, viniendo del estator (como un generador normal de inducción) y también del rotor a través del circuito electrónico de potencia (figura No. 41). Así, tal generador es llamado un generador de inducción de doble salida.

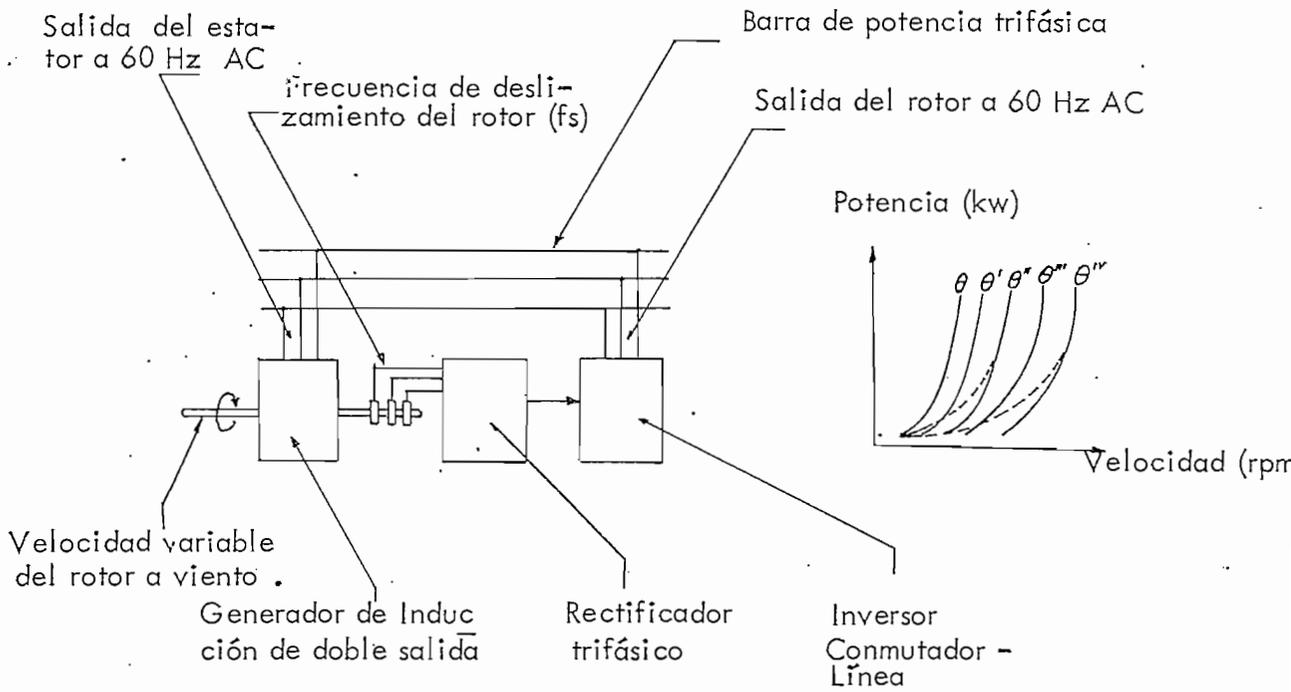


FIGURA No. 41 .- Esquema VSCF con generador de Inducción de doble salida.

Un control por microprocesador puede ajustar el frenado del SCR para la velocidad del viento prevaeciente, permitiendo la operación más eficiente en la curva Potencia - Velocidad.

En suma, el DOIG tiene todas las ventajas de los generadores de inducción clásicos.

Aparatos de estado sólido mejorados, prometen hacer a los esque-

mas analizados económicos; si bien los costos de construcción y los problemas de conmutación, todavía importan al tercer esquema, tener lo más directo y menos complejo.

La trayectoria segmentada que cruza las curvas potencia - velocidad del último esquema muestran el efecto del continuo movimiento del ángulo de excitación (θ) del rotor jaula de ardilla.

3.4.3 INVERTIDORES DE POTENCIA DE DC a AC :

Si todos los aparatos trabajarían a DC sabiendo que el sistema de acumulación solo podría proporcionar este tipo de voltaje, no existiría ningún problema, por lo tanto no habría necesidad de un convertidor o inversor de DC a AC.

Sorprendentemente un alto número de cargas pueden trabajar de 110 a 120 voltios DC. Aparatos que proveen carga resistiva, como : planchas, tostadoras, frascas eléctricas, sartenes eléctricos, reverberos, pequeños artefactos con motores universal teniendo escobillas y trabajando con AC ó DC (aspiradoras, máquinas de coser, licuadoras, afeitadoras y algunas herramientas de mano portátiles).

Algunas cargas pueden ser modificadas para usar DC, en: luces fluorescentes (que ponen 3 veces más luz por watio como las incandescentes) o cargas trabajadas por motores que pueden ser reemplazados por un motor DC.

Cualquier cosa que necesita un transformador, como : tocadiscos, TV, etc., necesitan AC. Motores sincronizados usados en tocadiscos, relojes, motores de inducción, motores de jaula de ardilla, motores con un

condensador de encendido usados en cargas más fuertes como : refrigeradoras y lavadoras, deben usar AC. Para mantener estas cargas un inversor es necesario.

Se pueden mencionar dos tipos de inversores; el más viejo y menos eficiente se llama inversor rotatorio y consiste de un motor a DC y un alternador AC, y otro inversor nuevo electrónico.

El problema más grande con el primero es su baja eficiencia (60 %), siendo aún más baja en cargas pequeñas.

Los inversores electrónicos son mucho más eficientes y no requieren casi mantenimiento; usualmente la eficiencia varía entre el 80 y 90 %.

El sistema menos eficiente pero más conveniente es de un inversor grande que sea suficiente para abastecer la carga solamente con AC.

En un alternador la corriente generada por el campo estacionario es alterna y su frecuencia varía de acuerdo a la velocidad del viento, como esta frecuencia es variable, no se puede usar en artefactos que requieren una frecuencia de 60 Hz.

Si nosotros pusieramos AC directamente a una batería, por ejemplo, ésta se cargaría en la mitad de período y se descargaría en la otra mitad; para evitar este problema la corriente es rectificada por medio de diodos de silicón, obteniéndose DC; estos están montados interiormente dentro de la conexión del alternador para que cuando salga tengamos ya DC.

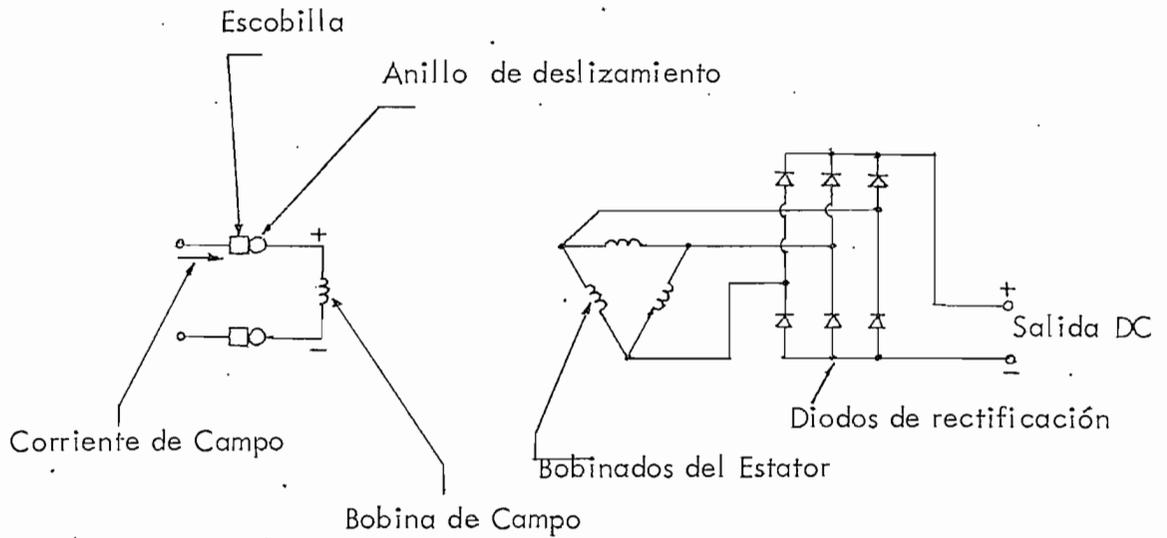


FIGURA. No. 42 .- Diagrama de un alternador trifásico con rectificación.

Como las tres fases de AC son convertidas a DC; esto resuelve uno de los principales problemas, especialmente si se escoge un inducido de un rango de corriente más amplio.

Un generador DC tiene el suficiente magnetismo en los polos de su campo, entonces una pequeña corriente es generada aunque no haya corriente en el campo; esto hace posible derivar un campo de corriente para la potencia de salida del generador (una conexión en Shunt del generador).

Entonces algunos generadores o alternadores de DC encuentran su fuente de alimentación en el campo magnético.

3.5 SISTEMAS DE ACUMULACION :

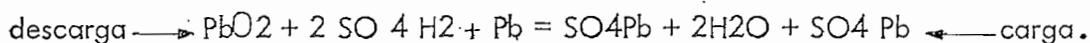
Como no se puede depender en forma constante de la velocidad del viento, cuando se necesita utilizar electricidad, y como, el generador no abastece 60 ciclos de corriente en el voltaje propio, el sistema debe incluir una manera de almacenar energía. Mientras un gran número de técnicas de almacenamiento son posibles teórica y prácticamente: por medio de volantes; electrolisis de agua para crear hidrógeno, almacenamiento succional y almacenamiento de aire comprimido; nosotros dedicaremos nuestro análisis a un sistema de acumulación por baterías.

Hay esperanzas de que habrá un mecanismo de almacenamiento mejor, puesto que las baterías no son ideales, hacen mucho bulo y requieren mucha atención. Ninguna duda permanece de que los mejores sistemas de baterías secundarias deben ser desarrolladas si el automovilista está aún lejos de separarse de los motores de combustión interna. Las utilidades eléctricas, interesadas en el almacenamiento de energía como un potencialmente mejor método de enfrentar las demandas, ocupan un alto sitio.

Para nuestro propósito es necesario entonces, mencionar algunos tipos de almacenamiento más utilizados y de fácil adquisición en el mercado, estando éstos esencialmente constituidos por acumuladores.

3.5.1 ACUMULADORES DE PLOMO - ACIDO :

Se basan en la descomposición química de ciertas combinaciones de plomo, dispuestas sobre placas o parrillas de plomo y sumergidas en ácido sulfúrico diluido. Al cargar la batería, se forma en las placas positivas peróxido de plomo (PbO_2), y plomo esponjoso en las negativas; durante la descarga, ambos se transforman en sulfato; el fenómeno puede representarse así :



Como placas positivas se usan, con preferencia, PLACAS PLANTE de gran superficie, es decir, placas de Pb colado puro, provistas de nervios verticales profundos que aumentan 8 ó 9 veces la superficie eficaz. La capa activa de plomo esponjoso se forma con auxilio de reacciones que aceleran el ataque electrolítico del metal.

Este genero de placas, en baterías que trabajan algo forzadas, resultan menos sensibles que las de pasta (aunque éstas ofrezcan ciertas ventajas en el caso contrario).

Como placas negativas se usan : o bien rejillas de plomo (de malla estrecha), rellenas de pasta (litargirio, mezclado con ciertas materias inherentes, que mantengan la porosidad del óxido); o placas de caja, es decir, parrillas de malla ancha, rellenas de pasta y cubiertas por ambas caras con chapa de plomo perforada (agujeros pequeños) .

El ácido debe ser muy puro, no contener ningún metal precipitable por el ácido sulfhídrico (salvo plomo), con muy poca proporción de metales precipitables por el sulfuro amónico, sin compuestos clorados o nitrógenados y enteramente libre de combinaciones orgánicas. La densidad de 1.18 sube durante la primera carga a 1.20, descendiendo en 0.02 a 0.05 unidades al descargar.

Las variaciones de la densidad constituyen un dato excelente y empleado, casi de modo absoluto, para juzgar del estado de carga de la batería, en particular si la descarga es irregular y poco intensa, pues la densidad viene a ser proporcional al número de amperios - hora descargados.

Para acumuladores fijos y cargados vale, según sea la superficie de placas por amperio - hora de capacidad (referida ésta a la carga normal, en tres horas), de 0.1 a 0.2 Ω de resistencia interna, y está en razón inversa de la capacidad. La descarga aumenta dicha resistencia en 50 % .

La tensión varía con la densidad del ácido y con el régimen de la descarga, siendo casi independiente de la temperatura. Con ácido de peso específico 1.2 Kg / dm³, la tensión es de unos 2.05 Voltios en circuito abierto .

Para descarga en tres horas, la tensión varía según muestra la figura No. 43 a; durante la carga (con la máxima intensidad admisible) sigue la curva de la figura No. 43 b. . Cuando mayor es la intensidad, más difieren la tensión alcanzada y la tensión en circuito abierto (tensión de equilibrio). Así, pues, el voltímetro no permite juzgar del estado de carga.

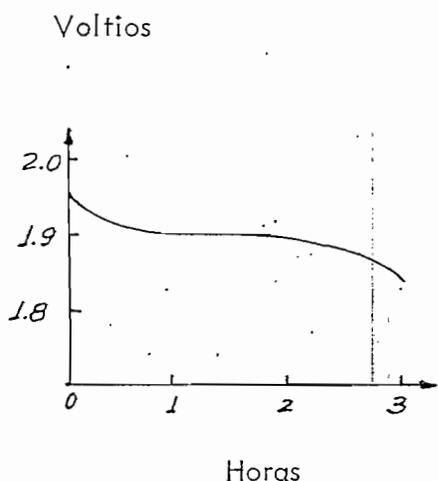


FIGURA No. 43 , a.-
Curva de tensión (descarga)

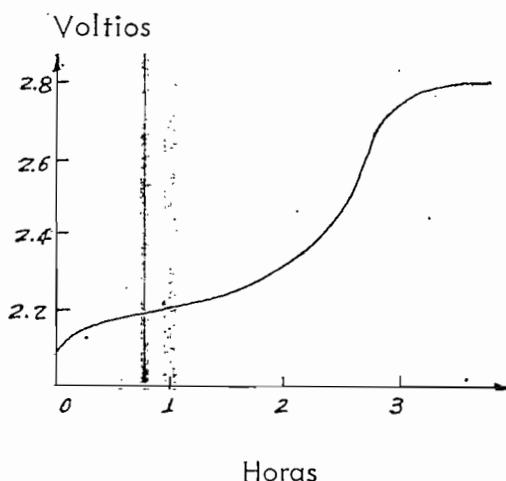


FIGURA No. 43 b .- Curva de tensión
(carga)

La intensidad depende, tanto al cargar como al descargar, del tipo,

tamaño y destino de los acumuladores. Se admite que la corriente de carga no debe pasar de la intensidad que produce la descarga en tres horas; en los acumuladores de descarga rápida (1 a 2 horas) puede tolerarse una corriente de carga 25 % mayor. Al final de la carga conviene reducir algo la intensidad, lo cual evita además forzar la dínamo. De ordinario, la batería se carga a intensidad constante; raras veces a tensión constante (intensidad decreciente).

La capacidad se mide por el número de amperios - hora que puede dar un elemento, al descargarse, cuando la tensión baja una cantidad dada (10 % en promedio). Es tanto mayor cuanto más lenta la descarga.

La tabla No. 11 demuestra como la capacidad crece algo, al aumentar el tiempo de descarga.

Duración de la descarga (Horas)		1	2	3	5	7 1/2	10	
Capacidad Relativa (%)		69	83	109	111	123	133	
Tensión final para	Baterías	Hasta 4000 Amp-h.	1,75	1.75	1.83	1.83	1.83	1.83
		Hasta 7500 Amp-h.	1.70	1.75	1.80	1.83	1.83	1.83
		Hasta 15000 Amp-h.	1.67	1.72	1.78	1.80	1.83	1.83
(Volt.)								

TABLA No. 11.- Capacidad relativa de elementos en función de la duración de la descarga.

Respecto al rendimiento, los buenos acumuladores devuelven 90 ó 95 % del número de Amperios - hora cargados. Los elementos que no pasan de 4000 Amp.-h rinden hasta 75 % de la energía absorbida, descargando

en 3 a 10 horas (70 % descargando en una hora). Los elementos mayores rinden algo menos. El reposo prolongado descarga gradualmente la batería.

El área ocupada (A) y el peso (M) de un elemento de batería fijo de capacidad (C) a punto de funcionar, montada en tarimas sobre el suelo, incluyendo los pasillos de servicio y suponiendo descarga en tres horas, es :

C · (Amp - h)	-- 50 -- 100 - 500 - 1000 -- 2000 - 5000 - 10000 - 15000 .
M (Kg)	-- 22 -- 37 -- 145 -- 295 - 560 -- 1350 -- 2600 - 3800
A (m ²)	-- 0.12 - 0.20 - 0.36 -- 0.46 -- 0.83 -- 1.25 -- 1.90 -2.40

Las baterías de ácido y plomo usadas en automóviles, han sido diseñadas para proveer una pequeña explosión de alta corriente sujeta a la descarga frecuentemente común en un sistema a viento. Estas baterías tendrán un tiempo de duración de aproximadamente 10 años bajo el uso normal de una planta de viento.

3.5.2 ACUMULADORES DE Ni - Cd . -

Por razón de su alta capacidad de potencia y su recargabilidad, las baterías de Ni - Cd están usándose para desarrollar cualquier cosa, desde luces instantáneas para fotos, hasta submarinos.

Las baterías Ni - Cd son comprimidas de combinaciones serie / paralelo de celdas recargables selladas. Si las celdas en serie no tienen exactamente la misma capacidad, bajo condiciones de descargas agudas (alta corriente), una celda puede llegar a plena descarga antes que las otras. En efecto, esta condición es como conectar la celda descargada a un cargador de batería, en dirección de regreso. El resultado puede fluctuar

desde daño de celda a explosión de celda.

Las celdas recargables de Ni - Cd conectadas en serie, idealmente tendrían una cercanamente igual capacidad de energía. De otro modo, bajo agudas descargas en una batería multicelda, la primera celda para completar la descarga podría generar gas, y a menos que estuviese equipada con un respiradero de seguridad, podría reventar. Este fenómeno es el llamado " TRASTROCAMIENTO DE CELDA ".

La resistencia de la celda a completa descarga depende de cuán fácilmente la celda pueda aceptar electrones en su placa positiva, los expulse a través del electrolito (como iones) y se desprenda de ellos desde la placa negativa. Esta es su actividad interna dentro de la celda.

Las principales reacciones químicas en las placas de la celda pueden verse en la figura No. 44 (a, b, c y d).

Estos son los modos posibles de operación de una única celda de Ni-Cd. Durante los modos de carga y descarga normales, la migración de iones internos entre las placas positivas y negativas, el electrolito causa una conversión química de los materiales activos sin formación de gas.

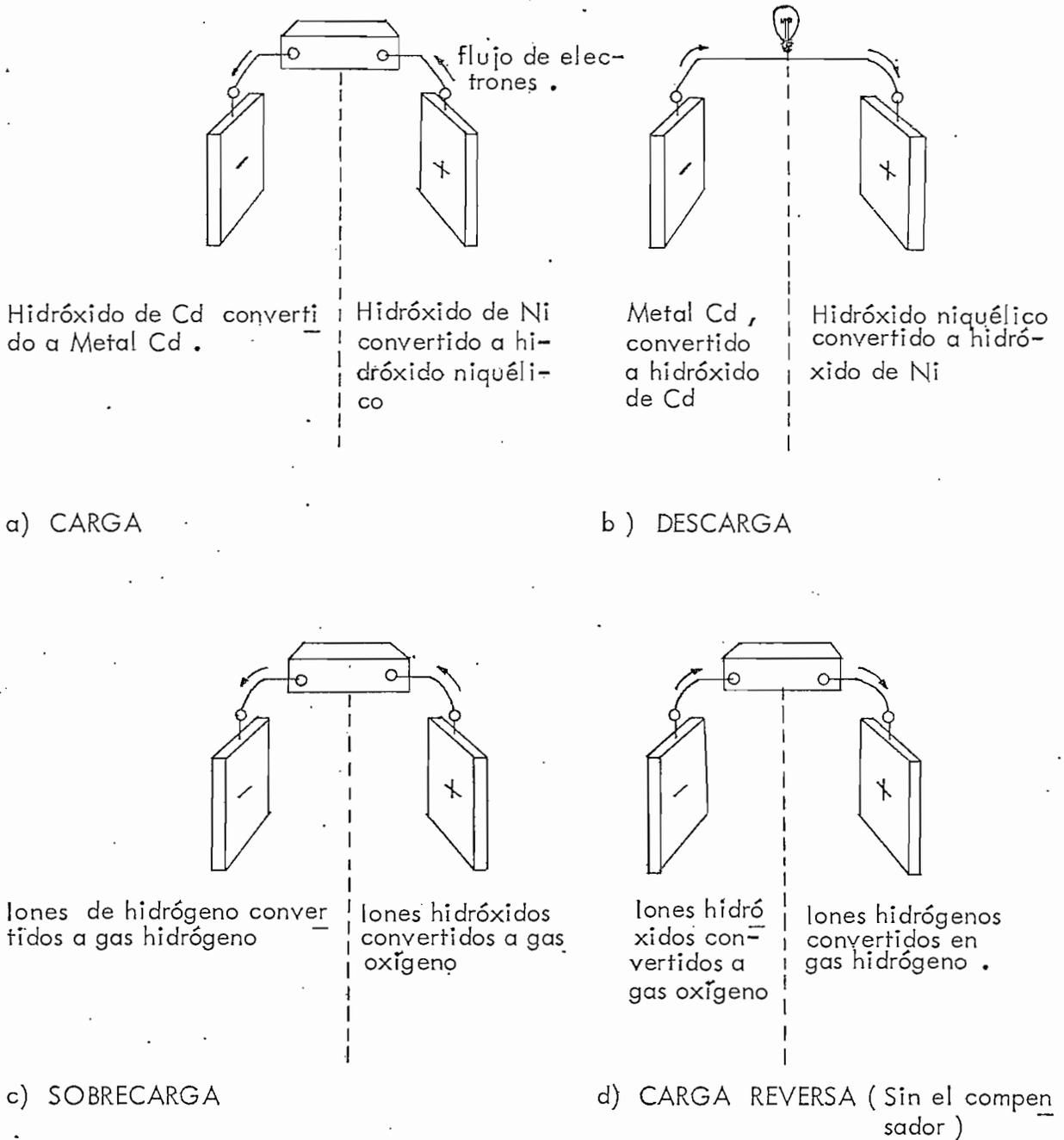


FIGURA No. 44.- Esquemas básicos de reacción de una celda de Ni-Cd.

Pero cuando la celda está sobrecargada o cargada en reverso, se forma gas en ambas placas. Nuevos diseños de celdas previenen la aparición de presión por gas.

Las láminas de una celda de Ni - Cd típica, ambas positivas y negativas, están hechas de Niquel pulverizado de toba. Este proceso produce una estructura porosa que es del 80 % de poros abiertos con una superficie de área de cerca de $0.2 \text{ m}^2/\text{gr}$. Los poros están parcialmente impregnados con un material activo, con algo del espacio remanente que está siendo cedido para el electrolito.

El material activo en una placa positiva no cargada es Hidróxido de Ni. Bajo carga, este material viene a ser Hidróxido níquelico. Una placa negativa no cargada contiene Hidróxido de Cd., que se convierte a Cd. metálico por la carga. La polaridad de una placa es así determinada por la química que se usa para la impregnación.

En una celda de Niquel - Cadmio, las reacciones químicas para la descarga son justamente el reverso de las reacciones de carga, y cuando una celda es ya sea sobre cargada, ó es cargada en forma reversa, los productos de reacción principales son gases Hidrógeno y Oxígeno.

La química de la celda es tal que los cambios químicos deben ocurrir a exactamente la misma relación en cada placa. Cuando se carga, por lo tanto, la placa que está cargada, con el mínimo monto de material activo comenzará a producir gas primero y la energía eléctrica se gasta en generar gas y no es almacenada para uso futuro. Por lo tanto, esta energía no puede ser reconvertida a energía eléctrica cuando el ciclo de descarga comienza.

Los nuevos acumuladores de Ni - Cd con un tercer electrodo especial (figura No. 45) pueden tomar una carga fresca en menos de una hora, después de lo cual la corriente de carga se desconecta automáticamente. La sección en corte de una sola celdilla tiene el electrodo de

control en su parte izquierda.

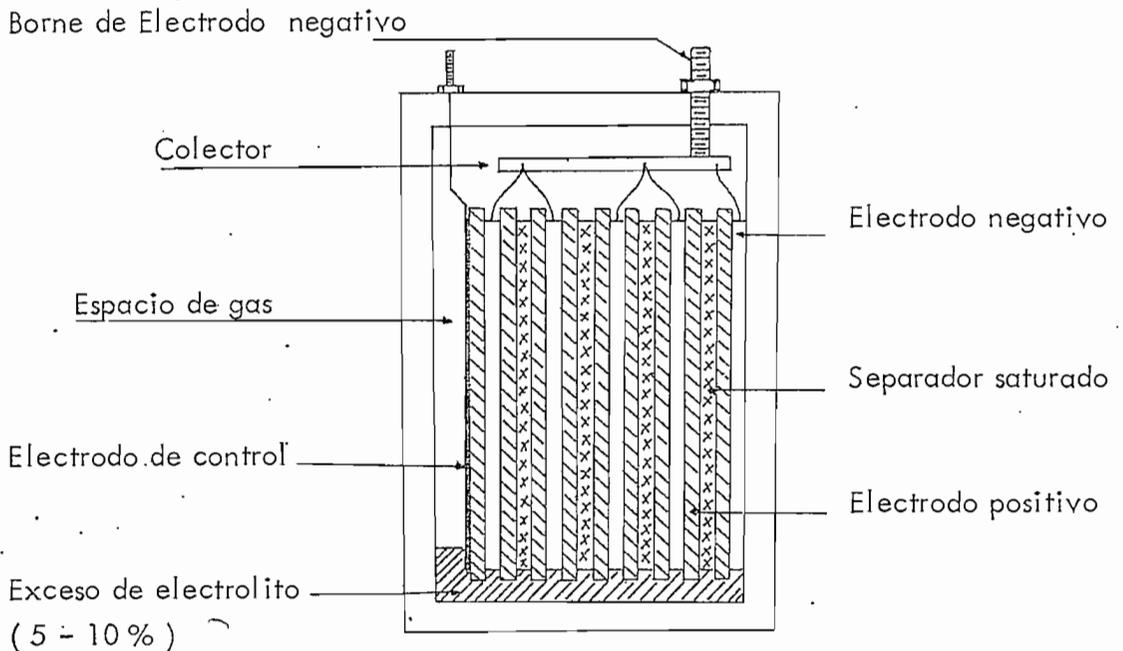


FIGURA No. 45.- Acumulador de Ni - Cd con tres electrodos .

La clave del desarrollo es un electrodo auxiliar o de control, que hace las veces de detector, señalando la terminación de la carga y que permite la carga rápida de una celdilla completamente sellada.

La señal indicadora del término de la carga es producida por la recombinación electro - química del oxígeno generado durante la carga con el material del electrodo. Controla la corriente de carga y permite terminarla antes que sea engendrado un exceso de oxígeno. Esto evita las riesgosas presiones que antes impedirían la carga rápida de baterías del tipo de celdilla sellada.

La presión interior más baja igualmente elimina la necesidad

de usar el recipiente de paredes gruesas que suele emplearse para contener presiones gaseosas .

El electrodo auxiliar ha sido diseñado específicamente para reaccionar con el oxígeno, y proporciona una recombinación mucho más rápida del oxígeno de lo que es posible lograr en celdillas corrientes de Ni - Cd del tipo sellado .

Se considera como corriente normal, a la correspondiente a un régimen de descarga de 5 horas, por lo tanto, en relación con la capacidad nominal de la batería, la corriente normal vale.

$$I = 0.2 C$$

Para la carga, es preferible adoptar el valor de la corriente normal, lo que equivale, en la práctica, a una duración de carga de 7 horas, partiendo de un acumulador totalmente descargado.

Las curvas de carga y descarga se muestran en la figura No. 46 a continuación :

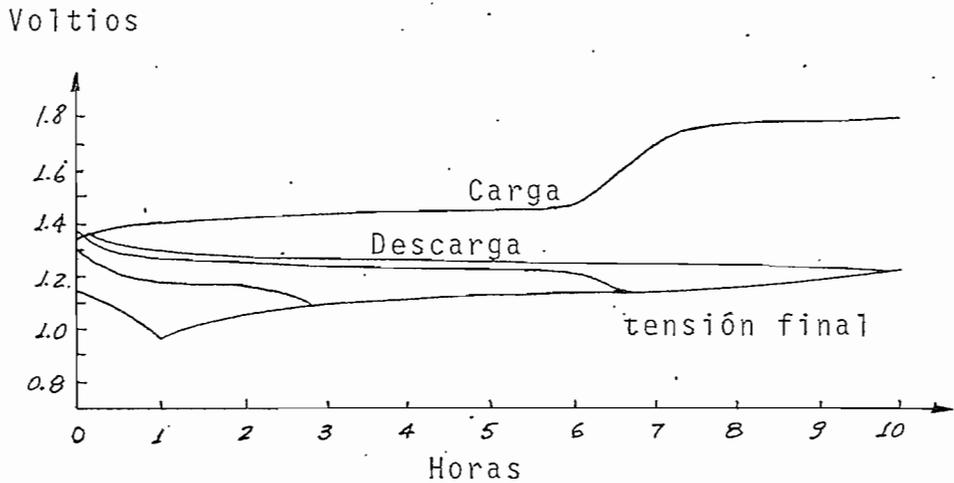


FIGURA No. 46 .- Curvas características de carga y descarga de un acumulador alcalino de níquel - cadmio .

La carga puede realizarse tanto por el sistema de intensidad de corriente constante como por el de tensión constante, si bien es más recomendable el primero .

La tensión se mantiene constante y aproximadamente entre 1.4 y 1.5 Voltios hasta las proximidades del final de carga, y entonces asciende rápidamente hasta unos 1.8 voltios. La batería debe cargarse de modo continuo. En la descarga, la tensión es constante y aproximadamente igual a 1.2 voltios y desciende después al valor final de 1 a 1.1 voltios, según el régimen de descarga .

3.5.3 OTROS TIPOS DE ACUMULADORES :

Las baterías Alcalinas comunes en variedades que contienen dióxido de Mn y óxido de Hg (separadamente o en combinación) son un ejemplo.

Por otro lado la extremadamente alta densidad de energía de la batería de Litio; justamente ahora, está comenzando a ser valorada.

Realmente un espectacular mejoramiento en la densidad de energía para las celdas primarias está siendo proyectado y en algunos casos demostrado por los investigadores de la batería de Litio y de Zinc - aire .

Uno de los mayores sistemas secundarios para el servicio, se está viendo en la batería de sodio - azufre (figura No. 47). Una de las baterías tipo " alta temperatura ", opera cerca de los 300 ° c. Como ventajas importantes se incluyen materiales en bruto de bajo costo y electrodos líquidos que son capaces de reconstruir sin necesidad de cambiar de recubrimiento. Los problemas todavía a ser plenamente resueltos involucran el reciclaje del electrolito sólido y el electrodo positivo de azufre fundido , el sellado, y el desarrollo de un recipiente a prueba de corrosión que contiene el electrodo positivo .

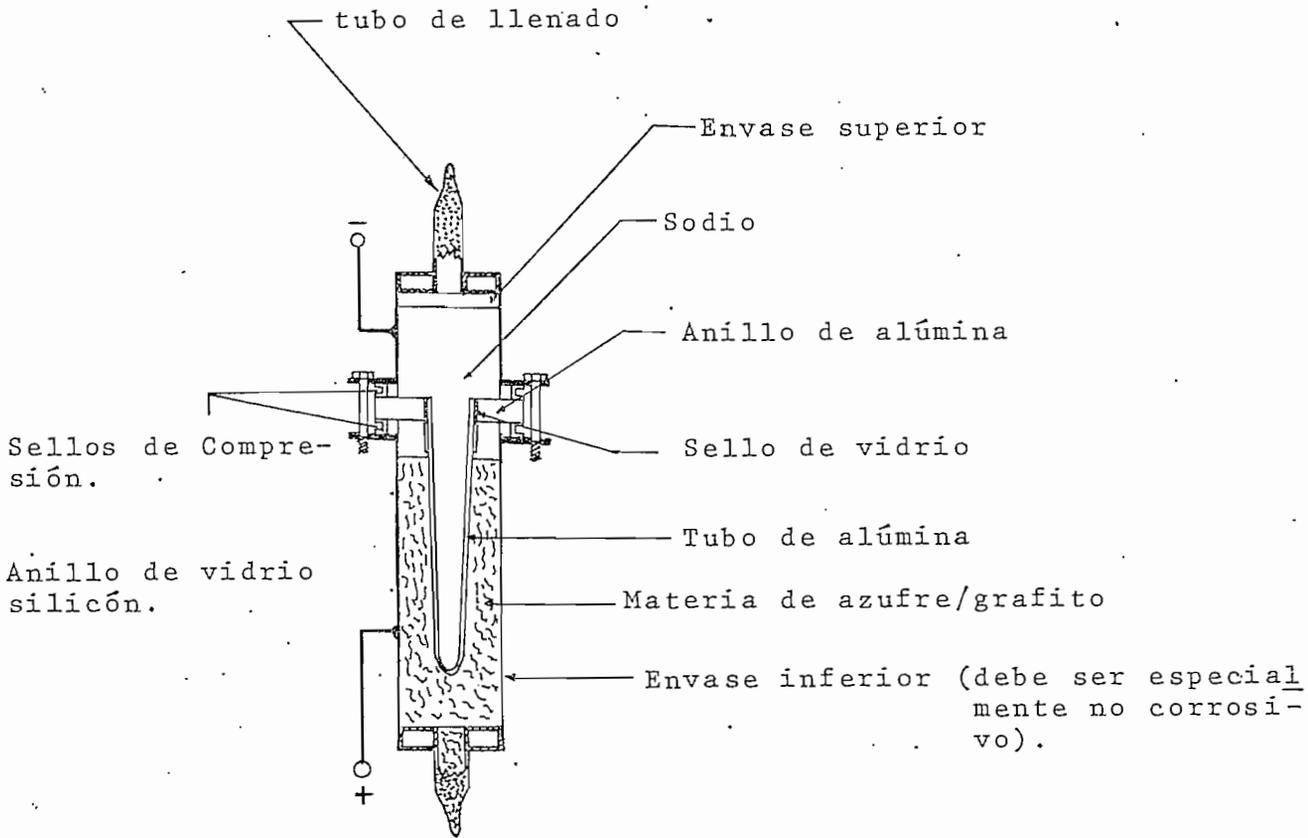


FIGURA No. 47.- Acumulador de Sodio - Azufre .

Otro fuerte candidato entre los secundarios a alta temperatura está basada en una composición de Litio - Metal Sulfuro. El Litio líquido o una aleación de Litio con aluminio o silicio está siendo usada como el electrodo negativo, mientras que sulfuro de hierro (FeS ó FeS_2) sirve como electrodo positivo .

Los problemas que todavía encaran los investigadores del Litio - Metal Sulfuro incluyen el construir un recipiente mejor para el electrodo positivo y el aprovisionamiento del separador de cerámica entre electrodos.

El voltaje de celda interior y el costo del Litio son las desventajas

•/...

económicas, comparadas con las celdas de Sodio - Azufre.

3.5.4 DETERMINACION DE LA CAPACIDAD DE ALMACENAMIENTO DE LA BATERIA :

La capacidad de almacenamiento de la batería debería ser adecuada para asegurar un aprovisionamiento lo suficientemente grande de electricidad a propósito, para las necesidades de la instalación para 3 o 4 días durante un período de calma.

La VEREINIGTE . WINDTURBINEN - presenta las siguientes capacidades de almacenamiento :

<u>Salida del Generador (kW)</u>	<u>Almacenamiento (Amp - hora)</u>
1.5 - 2.5	73
3.0	109
4.5	145
6.0	181 - 218
9.0	290
12.5	363
17.0	435
21.0	508

También la ADLER, considera los siguientes valores de capacidad de almacenamiento en función del número de celdas y voltaje del generador, dependiendo lógicamente del diámetro de la hélice.

ALMACENAMIENTO			GENERADOR			Hélice
No. Celdas	Amp - hora	Kwh	Volt	Amp.	kW	Diámetro (m)
55	36	4	110-150	7	1.0	4.5
55	73	8	110-150	18	2.7	5.5
55	109	12	110-150	27	4.0	6.5
55	145	16	110-150	36	5.4	6.5
55	181	20	110-150	45	6.7	7.5
55	218	24	110-150	60	9.0	8.5
110	109	24	220-300	30	9.0	8.5
55	290	32	110-150	60	9.0	8.5
110	145	32	220-300	30	9.0	8.5
55	363	40	110-150	80	12.0	10.0
110	181	40	220-300	40	12.0	10.0
55	435	48	110-150	100	15.0	10.0
110	218	48	220-300	50	15.0	10.0
110	290	64	220-300	60	18.0	12.0
110	363	80	220-300	75	23.0	12.0

TABLA No. 12 .- Características de Almacenamiento presentado por ADLER.

En general en la práctica una amplia valorización se da a las baterías de PLOMO - ACIDO y de Ni - Cd.

Dentro de estas dos categorías, no obstante, existen varias importantes variaciones. Dependiendo del método usado para reducir (ó en algunos

./..

casos eliminar) la gasificación en la sobrecarga. Las celdas secundarias de ácido - plomo están ahora produciéndose en paquetes sellados en adición al diseño húmedo, tipo auto - estímulo, que requiere un periódico destape con agua destilada .

Las celdas de Ni - Cd, por supuesto, comprende la otra mayor categoría de batería secundaria. Estas son más caras que las de ácido - plomo , pero ofrecen un ciclo de vida más grande como compensación, especialmente bajo condiciones de descargas agudas.

Por último, tenemos una comparación de los dos tipos de baterías más utilizadas, siendo estas las de Plomo - ácido y las de Ni - Cd .

Acumuladores	Constitución	Peso	Costo	Vida Media	Mantenimiento	Efecto de la Temp.	Nivel de Vol.
Acido-Plomo	Menos compacta	Pesadas	Bajo	Menor	Mayor	Mayor.	May
Ni - Cd	Mas compacta	Livianas	Elevado	Mayor	Menor	Menor	Men

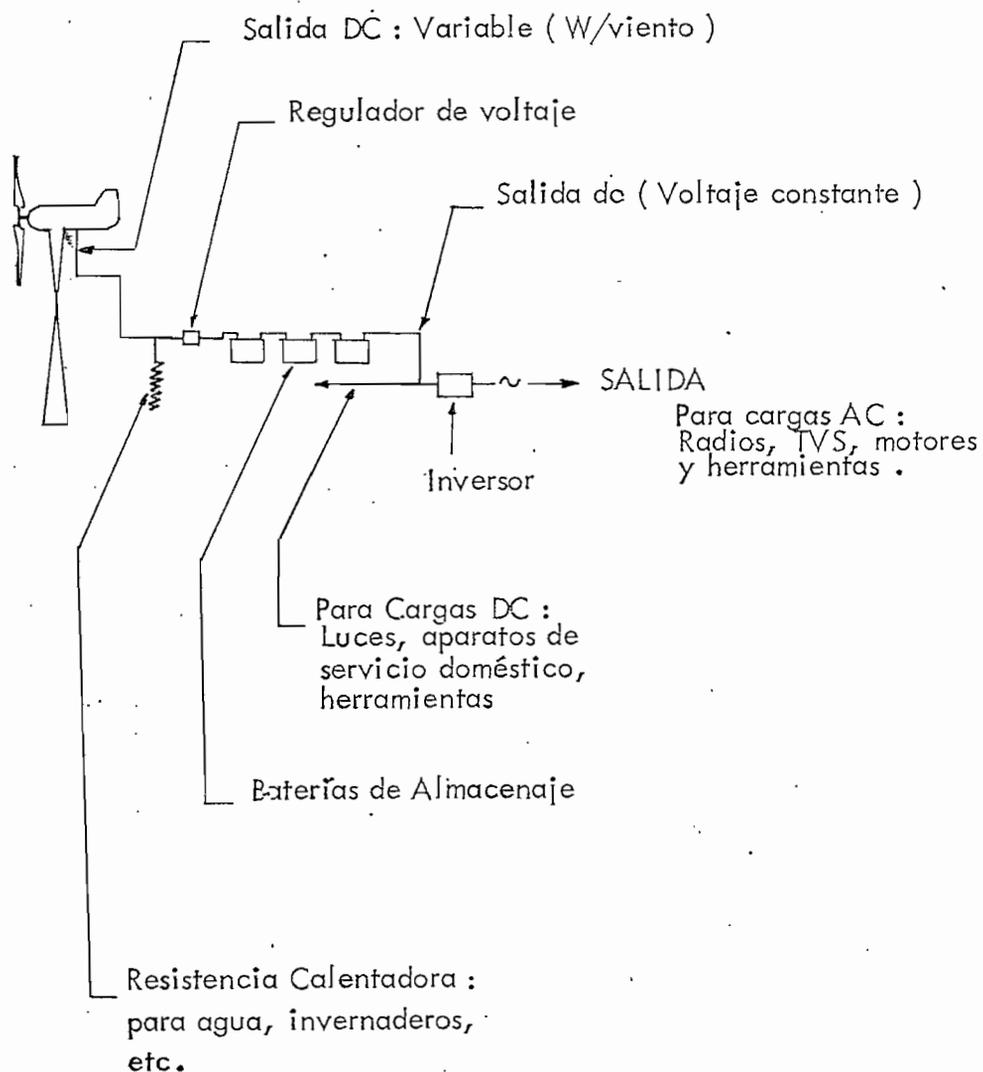
TABLA No. 13 .- Tabla de comparación entre baterías de Pb - ácido y Ni - Cd .

Respecto a las aplicaciones, se puede considerar una aplicación semejante para ambos tipos .

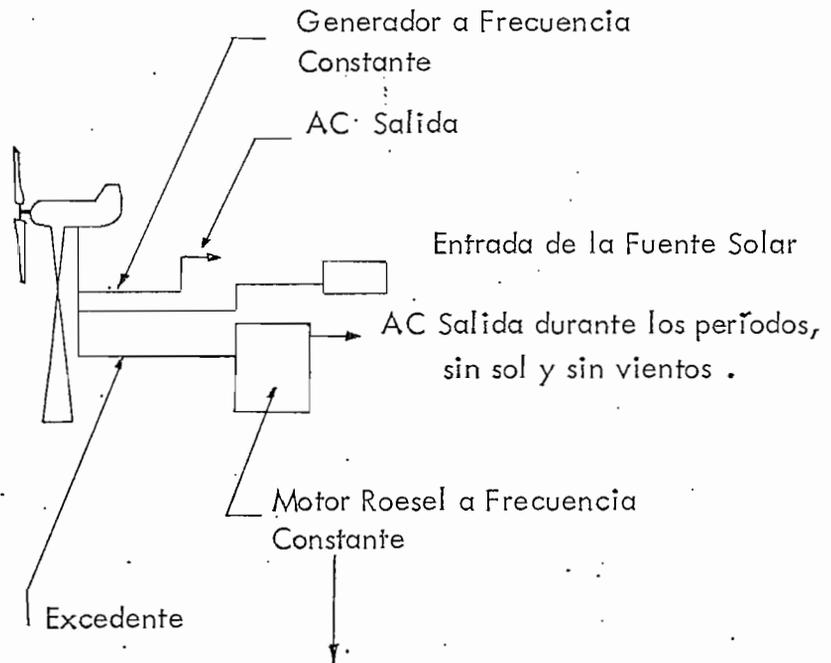
3.6 ESQUEMATIZACION DEL SISTEMA ELECTRICO:

Se presenta a continuación, la esquematización general de cuatro alternativas de generación de electricidad.

a.- Sistema Simple de Baja potencia :

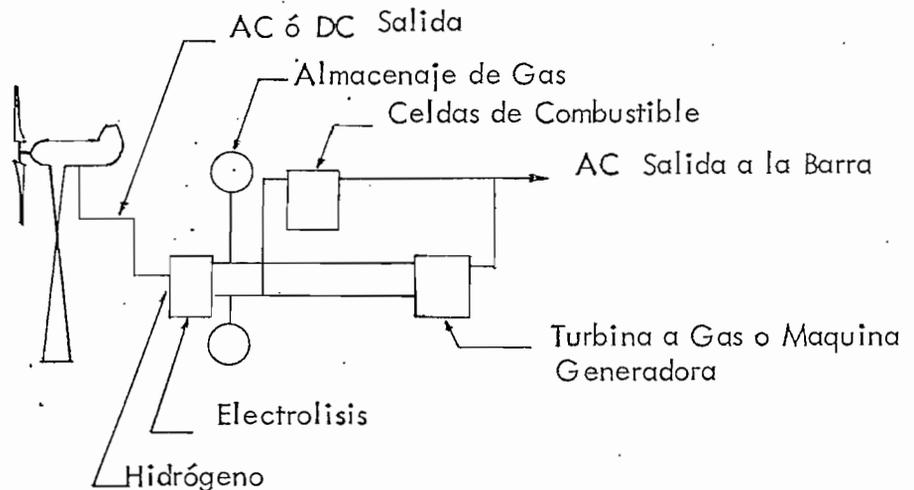


b.- Sistema Simple con almacenaje mecánico (puede acoplarse con sistema solar) :

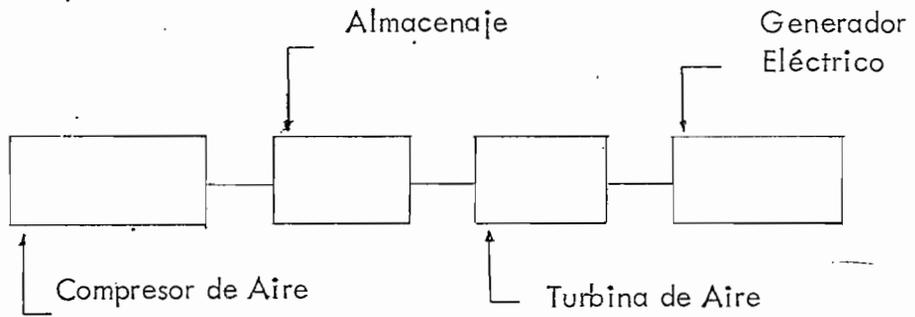


Motor acelerado por trompos giratorios (modo que produce potencia)

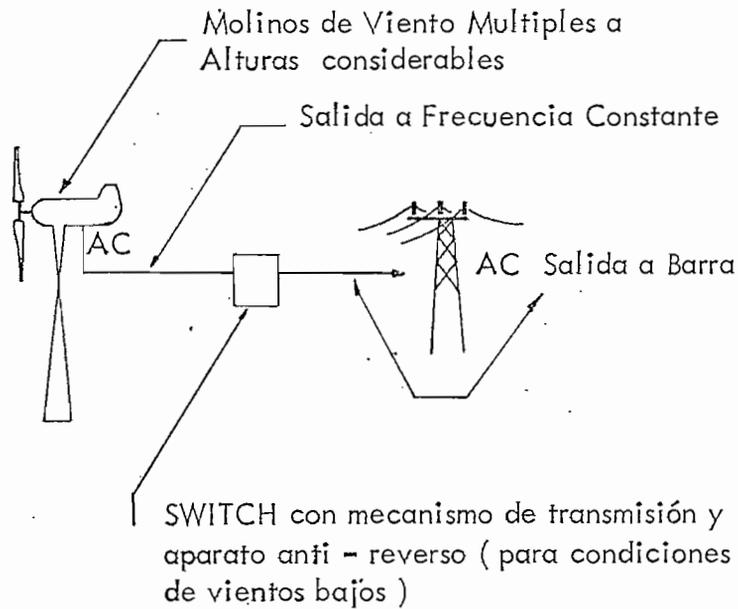
c.- Sistema de conversión de la energía intermedia, compleja : Rangos de potencia medios .



Dentro de este sistema se presentan los siguientes conceptos alternativos, como : Accionamiento de bombas al descubierto para elevación de agua o compresión de aire para usos posteriores en turbinas de agua, y de otros usos primarios .



d.- Sistema directo para alimentación a barra (rango de alta potencia)



4. CAPITULO CUARTO : DISEÑO DE UN MODELO DE BAJA POTENCIA :

4.1 COMPORTAMIENTO DEL VIENTO EN UN SITIO DETERMINADO :

Es necesario, antes de pasar a analizar un sitio específico, enumerar otros lugares de los cuales se puede aprovechar la energía del viento .

Según la Tabla No. 3, se puede deducir que los sitios probables serían :

Región Litoral :

Esmeraldas .- Granja Experimental de " Lita "

Manabí .- Hacienda " Don Juan " de Jama .

Los Ríos .- Ingenio " Isabel María "

Guayas .- Escuela Técnica de Agricultura Tropical de Daule .

El Oro .- Colegio " San Juan Bosco " de Zaruma .

Región Interandina :

Carchi .- Colegio " Alfonso Herrera " de El Angel .

Imbabura .- Escuela " 2 de Mayo " de Atuntaqui .

Pichincha .- Centro Agrícola de Machachi .

Cotopaxi .- Dirección General de Bosques de Cotopaxi .

Tungurahua .- Quinta Experimental " Benjamín Araujo " de Patate .

Chimborazo .- Hacienda " San Vicente " de Guamote

Bolívar .- Hacienda la " Liria " de San Simón

Cañar .- Escuela " Simón Bolívar " de Cañar .

Azuay .- Represa " E.E. Cuenca " de El Labrador .

Loja .- Propiedad particular de Saraguro .

Región Oriental :

Napo .- Planta Eléctrica (HCJB) de Papallacta

Pastaza .- Aereopuerto " Río Amazonas " del Pastaza

Morona Santiago .- Aereopuerto de Taisha .

El sitio que mejores condiciones de viento presenta, según el análisis estadístico, está en la Provincia del Chimborazo en la Hacienda " San Vicente " de Guamote .

Los sitios con segunda y tercera prioridad son correspondientemente :

Machachi en la Provincia del Pichincha.

Patate en la Provincia de Tungurahua .

Para el análisis nos concretaremos específicamente al Sector de Guamote, el mismo que nos presenta las siguientes características :

	7 h	13 h	19 h
Velocidades promediales : (m/seg) .-	3.51	9.03	6.49
(mph) .-	8	20	15
Frecuencias Comunes :	N	E	W

Por otro lado, es necesario desglosar las velocidades del viento durante el período de estadística realizado (10 años) y a las horas pre fijadas de observación .

TABLA No. 14.- Cuadro estadístico de velocidades de viento .

Hora	1964	1965	1966	1967	1968	1969	1970	1971	1972	1973
7 H	2.9	2.1	2.6	3.3	3.5	3.3	4.2	4.7	4.5	4.0
13 H	6.5	7.1	8.1	9.8	10.1	9.6	9.2	10.7	9.5	9.7
19 H	4.3	4.8	6.1	6.6	7.6	6.3	7.0	7.9	7.5	6.8

Como se puede ver la velocidad se va incrementando con el avance de las horas del día .

NOTA: Las cifras que constan han sido obtenidas de promedios diarios y mensuales. Por tanto, anualmente se toman de cada hora prefijada 354 mediciones .

Considerando como una hora de observación cada medida, tendremos por hora prefijada 365 horas anuales y por ende 3650 horas durante los 10 años .

En estas condiciones, los porcentajes de observación a distintos niveles de velocidad del viento, serían :

0 - 2 m/seg	0 %
2.1 - 5 m/seg	40 %
5.1 - 8 m/seg	33 %
8.1 - 11 m/seg	27 %

A continuación se tiene la grafización de estos porcentajes de observación y velocidades del viento .

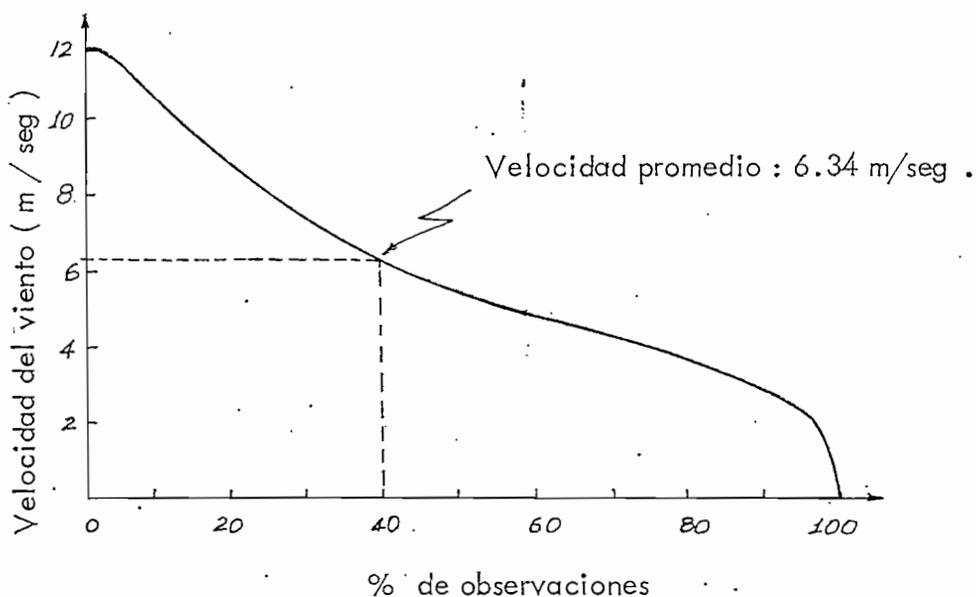


FIGURA No. 48 .- Curva de duración de velocidad del viento (10 años)

La velocidad promedio, entonces se podría decir que representa aproximadamente el 40 % de las observaciones realizadas a lo largo de los 10 años.

Por otro lado, si consideramos el sitio de medición a una altura de 5 m. sobre la superficie y a la torre con una altura de 40 metros sobre la tierra, se tendrá una ganancia en velocidad dada por :

$$\frac{V}{V_0} = \left(\frac{H}{H_0} \right)^{0.2}$$

donde : $V_0 \simeq 6.5$ m/seg entonces $V \simeq 9$ m/seg $\simeq 20$ mph

$$H_0 = 5 \text{ m}$$

$$H = 10 \text{ m}$$

Esta velocidad representa una ganancia del 40 % aproximadamente en relación a la velocidad promedial.

Ahora, como la potencia varía con el cubo de la velocidad, entonces se tendrá :

$$\frac{P}{P_0} = \left(\frac{H}{H_0} \right)^{0.6}$$

donde : $P \approx 1.5 P_0$, por lo que prácticamente se incrementa la potencia en un 50 % para las condiciones de altura propuestas .

Cabe anotar que el lugar escogido, servirá nada más como un ejemplo aplicativo para las condiciones de viento; por otro lado no necesariamente esto involucra que el sistema no pueda utilizarse en otros sitios que puedan tener las mismas condiciones de viento. Puntos característicos de la utilización de los sistemas a viento serían todas las zonas rurales; puesto que estas están en sitios de gran altitud o en sitios donde no existen obstáculos considerables, que impedirían el provechamiento cabal de la energía del viento.

Antes de pasar a la elección del modelo es necesario hacer el análisis de lo que se dispone en potencia.

La curva característica de la estadística realizada a las horas prefijadas durante el lapso de 10 años se presenta así :

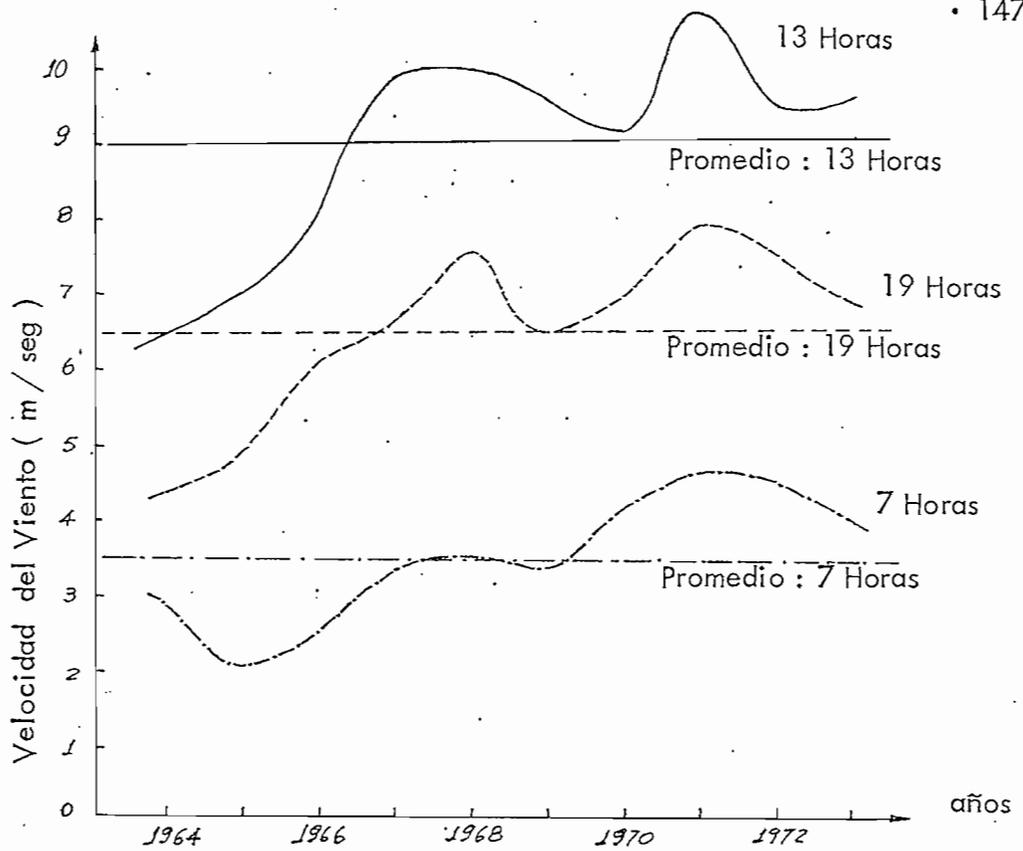


FIGURA No. 49 .- Variación de la velocidad del viento en 10 años .

Ahora considerando una área unitaria de impacto del viento, la potencia puede estar dada por el mismo gráfico afectado por el factor: $0.0031 V^3$ que corresponde a la potencia máxima teórica dada por :

$$P_{max} = 0.0031 \cdot A \cdot V^3$$

La similitud de las curvas nos permite sacar un promedio general de potencia, siendo :

$$P_{max} = 0.0031 (20)^3 \approx 25 \text{ W / pie}^2$$

$$P_{media} = 0.0031 (15)^3 \approx 10 \text{ W / pie}^2$$

$$P_{mínima} = 0.0031 (8)^3 \approx 2 \text{ W / pie}^2$$

Podemos así, asumir la potencia promedio para un abastecimiento normal y la potencia máxima para la acumulación eléctrica :

4.2 ELECCION DEL MOLINO DE VIENTO :

De acuerdo a las condiciones de eficiencia, se puede elegir un modelo de Molino tipo propulsión, es decir cuyas hélices tienen 2 o 3 paletas .

Este tipo de modelo considera la más alta eficiencia o el más alto coeficiente de potencia a una relación de velocidad de pico de la paleta con respecto a la velocidad inicial del viento .

Como se analizó anteriormente, la ventaja adicional que tienen estas hélices de bajo número de paletas, es la alta energía del viento que toman .

La desventaja clásica es la de tener un bajo torque de arranque comparado con un tipo de múltiples paletas.

Las condiciones de potencia descritas en el punto anterior nos da la partida, de qué potencia podemos elegir para las condiciones de viento.

Así, si nuestro propósito es conseguir una potencia útil máxima, debemos ver cual es la relación de potencia a diámetro de hélice.

Con una velocidad de 20 mph, podemos conseguir, según la figura No.-25, las siguientes relaciones :

1 kW	Hélice de 10 pies de diámetro
2 kW	14
3 kW	18
4 kW	20
5 kW	22
6 kW	24
7 kW	26

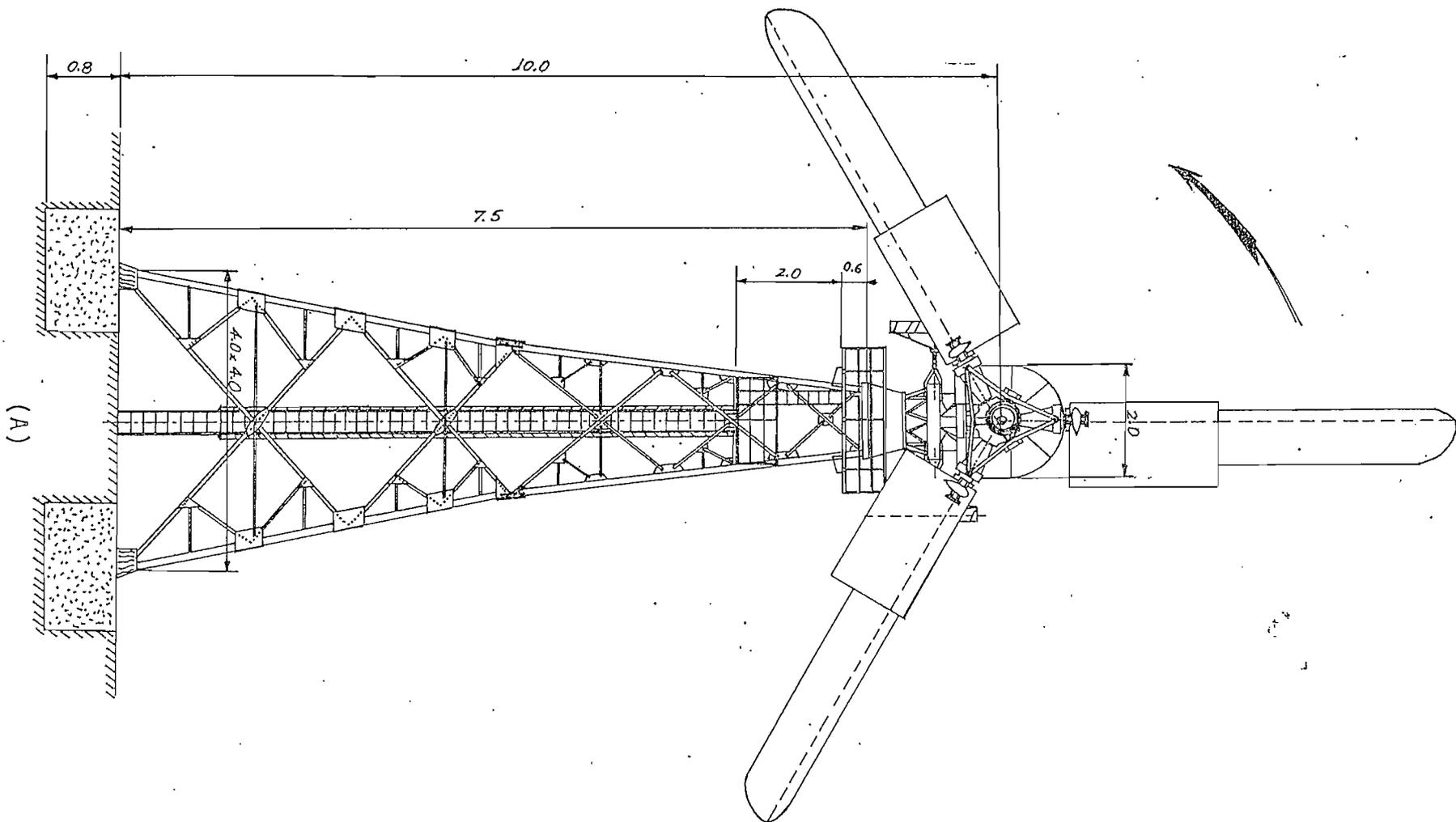
20 mph representa en realidad la velocidad ganada por la altura de la torre, la misma que fue asumida para tener una ganancia del 40 %.

Por lo tanto nosotros podemos elegir un sistema a viento de 6 kW, Sistema que podría ser normal para intereses rurales y particulares de aplicación inmediata.

Además con la ganancia en altura, se compensaría la deficiencia del sistema mecánico en general.

En estas condiciones se tendrá una hélice de aproximadamente 8 m. de diámetro, con una altura de torre de 10 metros y una velocidad promedio de viento de 20 mph (9 m/seg) .

Por lo tanto, nuestro modelo de molino puede estar constituido de 3 paletas, el mismo que se grafiza a continuación sin lujo de detalles, puesto que no se trata de un diseño mecánico detallado.



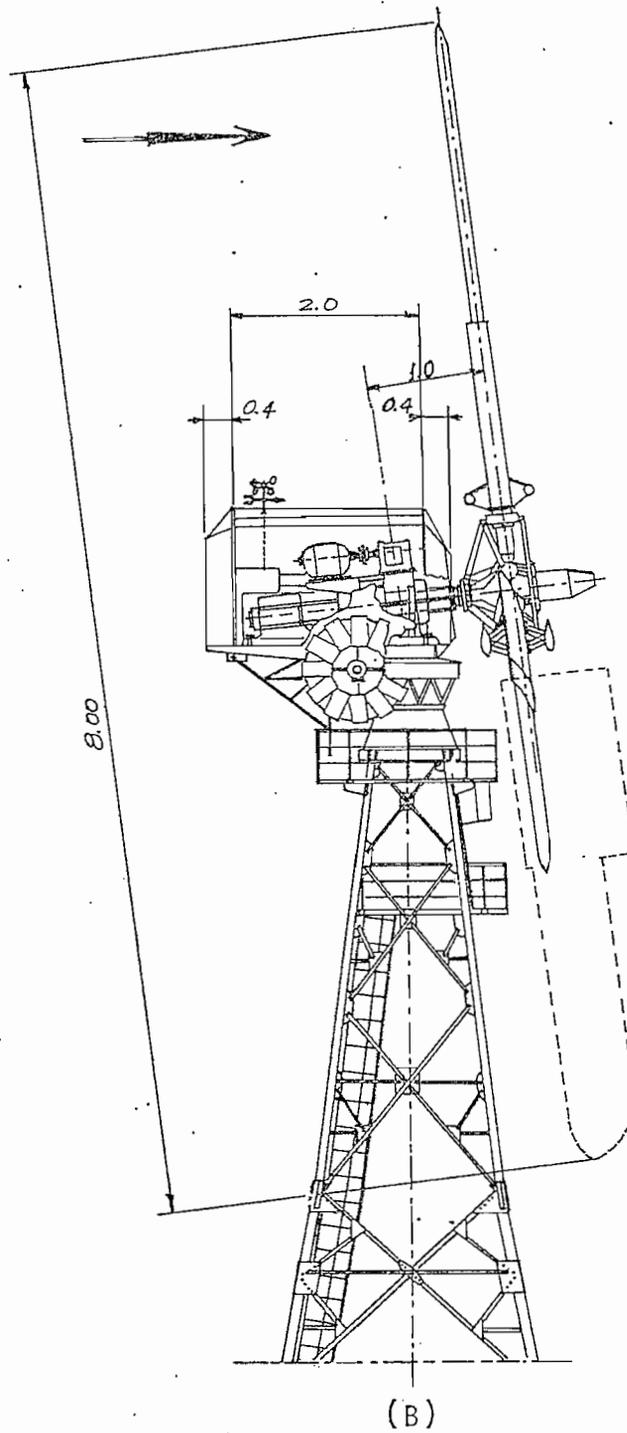


FIGURA Nº 50.- Modelo de Molino de Viento.
(A) Vista frontal
(B) Vista lateral

4.2.1 Breve descripción del Sistema :

La torre será de acero, a prueba de quebraduras y que descansa sobre una base de concreto.

En la cumbre de esta torre se ubicará una cabina, la misma que aloje al eje principal de la hélice, caja de engranajes, generador y cojinetes para el giro adecuado.

Las paletas pueden ser metálicas o de cualquier otro material resistente.

Para proseguir con los cálculos y demás detalles del sistema, podemos trazar un listado de las condiciones tomadas para el análisis, así:

Número de paletas	3
Diámetro de la hélice	8 m \approx 24 pies
Altura de la torre	10 m \approx 30 pies
Velocidad promedio	9 m/seg \approx 20 mph
Relación de velocidad	6

La relación de velocidad es asumida de la figura No. 14 y de las condiciones aerodinámicas de los propulsores.

Para la determinación de la velocidad de la hélice (rpm) debemos considerar la relación de velocidades dada por :

$$\mu_0 = \frac{2 \pi R N}{V} , \text{ donde :}$$

R = radio de la hélice

N = velocidad rotacional en rpm

V = velocidad del viento no perturbado, es decir una velocidad estable o promedio

Según esto y acomodándole la relación a las unidades adecuadas se tiene :

$$N = \frac{20 \text{ mph} \times 5280 \text{ pies / milla} \times 6}{2 \pi \times 60 \text{ minutos/hora} \times 10 \text{ pies/ revol}} \approx 170 \text{ rpm}$$

Asumiendo un generador eléctrico de 1200 rpm, tendremos que la relación de engranajes será :

$$\frac{1200}{170} \approx \frac{7}{1}$$

4.3 VARIACIONES EN EL MOLINO DE VIENTO :

Por razones de vibraciones y consistencia misma de la estructura, el modelo de hélice debería utilizar tensores que fijen adecuadamente las paletas entre sí y con el eje principal, de este modo se conseguirá un modelo variado.

La previsión que se toma comunmente en los modelos, es la de utilizar un mecanismo tal que saque a la hélice del flujo excesivo de viento; pero que para nuestras condiciones físicas y ambientales hasta cierto punto no se justificaría y el sistema sería más caro. Por tanto, el modelo puede también eliminar este mecanismo de control y a su vez se debe hacer un arreglo mecánico de forma que la hélice trate de orientarse con la frecuencia del viento, para lo cual es necesario colocar

una veleta.

Pero es necesario dar un margen de giro de orientación, de modo que el sistema no se vuelva inestable, por tal motivo se puede considerar un ángulo de aproximadamente 90° de variación para la adecuada orientación y mejor aprovechamiento de la energía del viento. Además esto estaría justificado por las frecuencias dadas en el sitio escogido como referencia.

La configuración de la hélice y de la cabina quedaría así :

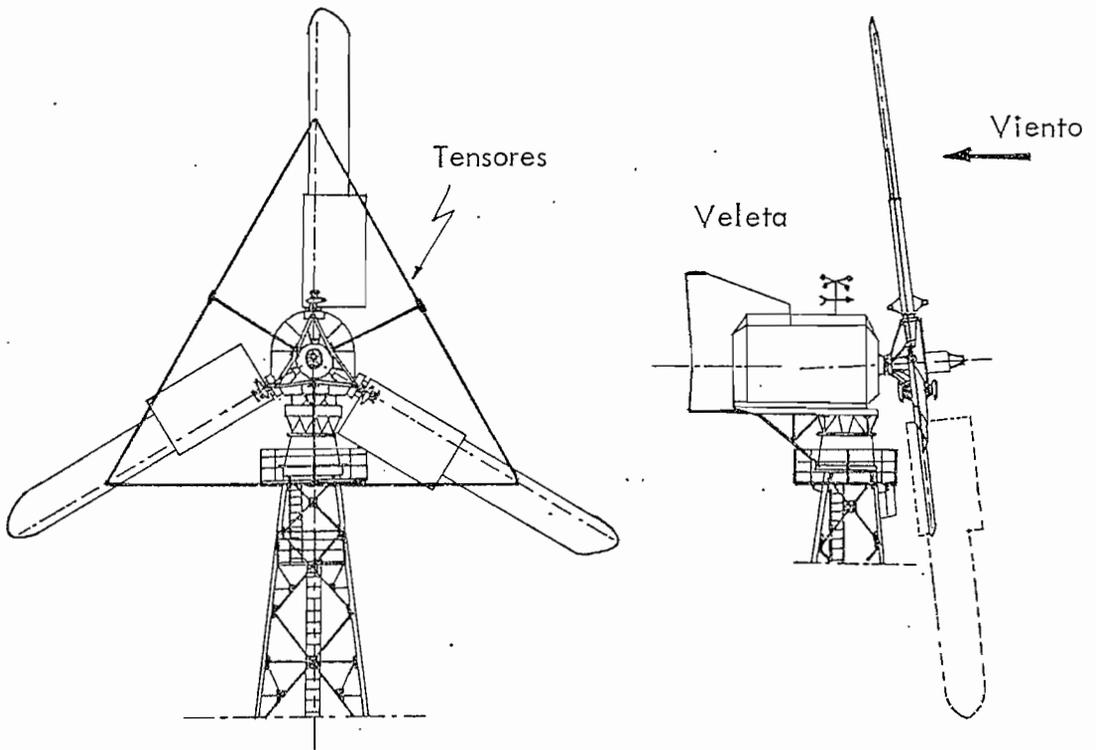


FIGURA No. 51 .- Variaciones en el modelo mecánico.

4.4. CARACTERISTICAS DEL GENERADOR :

Es necesario empezar a calcular los valores de potencia factible que se podría obtener con las condiciones impuestas .

La potencia máxima está dada por : $P_{max} = 0.0024 D^2 V^3$, donde:

$$D = 8 \text{ m} \approx 24 \text{ pies}$$

$$V = 9 \text{ m/seg} \approx 20 \text{ mph} .$$

por lo que : $P_{max} \approx 11 \text{ kW}$

Considerando una eficiencia del 50 % de la máxima teórica, se tendría, que la potencia del generador debe ser :

$$P_{gen} \approx 6 \text{ kW}$$

Para el cálculo de la energía proporcionada por un generador de estas características, podemos asumir las siguientes condiciones :

TABLA No. 15.- Energía mensual a distintas velocidades

Rango de Velocidad (mph)	% de Observaciones .	Velocidad promedio (mph)	Horas por mes	Potencia (kW)	Energía (kWh)
0-4.5	0	2.25	0	0.01	0
4.6-11.2	40	7.90	37	0.5	18.5
11.3-18	33	14.10	30	2.7	82
18.1-25	27	21.50	25	9.6	240

TOTAL : 340.5 kWh/mes

Se debe notar que para el porcentaje de observaciones se tomó como una hora diaria para cada medida. Es necesario considerar por lo menos un 60 % adicional, para tener una idea más real de las condiciones de fluctuación del viento en el mes y a distintas horas del día; por lo tanto la energía total sería : 580 kWh / mes básicos .

Entonces la energía que podría liberar por kW el generador sería aproximadamente de : 97 kWh / kW.

Asumiendo un voltaje de 120 voltios, la capacidad del generador, debe ser de : 50 Amperios.

Así, las características generales del generador deben ser :

GENERADOR DE CORRIENTE CONTINUA

VOLTAJE	: 120 Voltios
POTENCIA	: 6 kW
VELOCIDAD	: 1200 rpm
CONEXION	: Shunt

El generador Shunt DC, será un generador con tres escobillas, tal como se lo esquematiza a continuación :

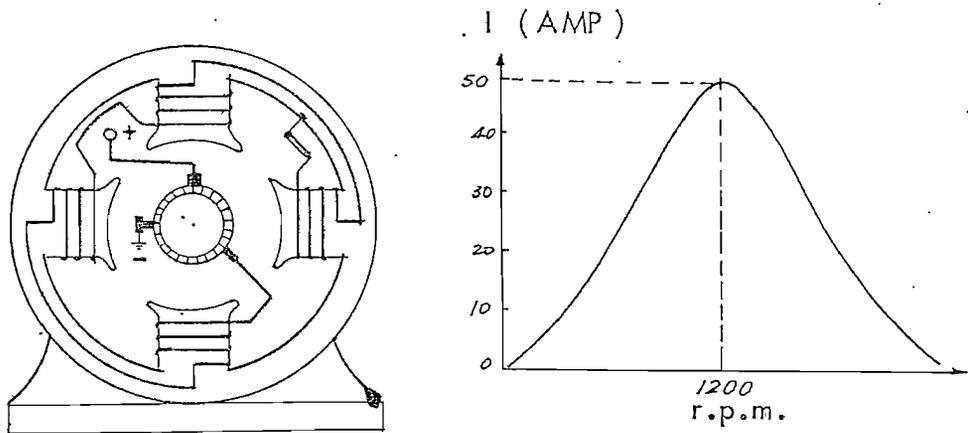


FIGURA No. 52 .- Generador Shunt - 120 Volt.

La selección del nivel de voltaje (120 Voltios) es debido a la gran utilidad que tiene para las cargas eléctricas en general .

Por ejemplo un sistema a este nivel de voltaje puede ser utilizado para iluminación en general, motores DC, AC que accionan elementos mecánicos de trabajo y en especial para todos los electrodomésticos.

Lógicamente que este nivel de voltaje es independiente de las aplicaciones que se tengan en AC y en DC.

4.5 SISTEMA DE CONTROL Y ACUMULACION :

El sistema de control eléctrico que se usará, permite mantener más o menos constante el voltaje proporcionado por el generador al sistema de acumulación. Este sistema está constituido por relés de voltaje, corriente y disyuntor y/o diodo, el mismo que no permitirá la inversión de la corriente, del sistema de acumulación al generador en caso de que la hélice no tenga su adecuada velocidad. Este sistema se lo presenta a continuación en forma esquemática.

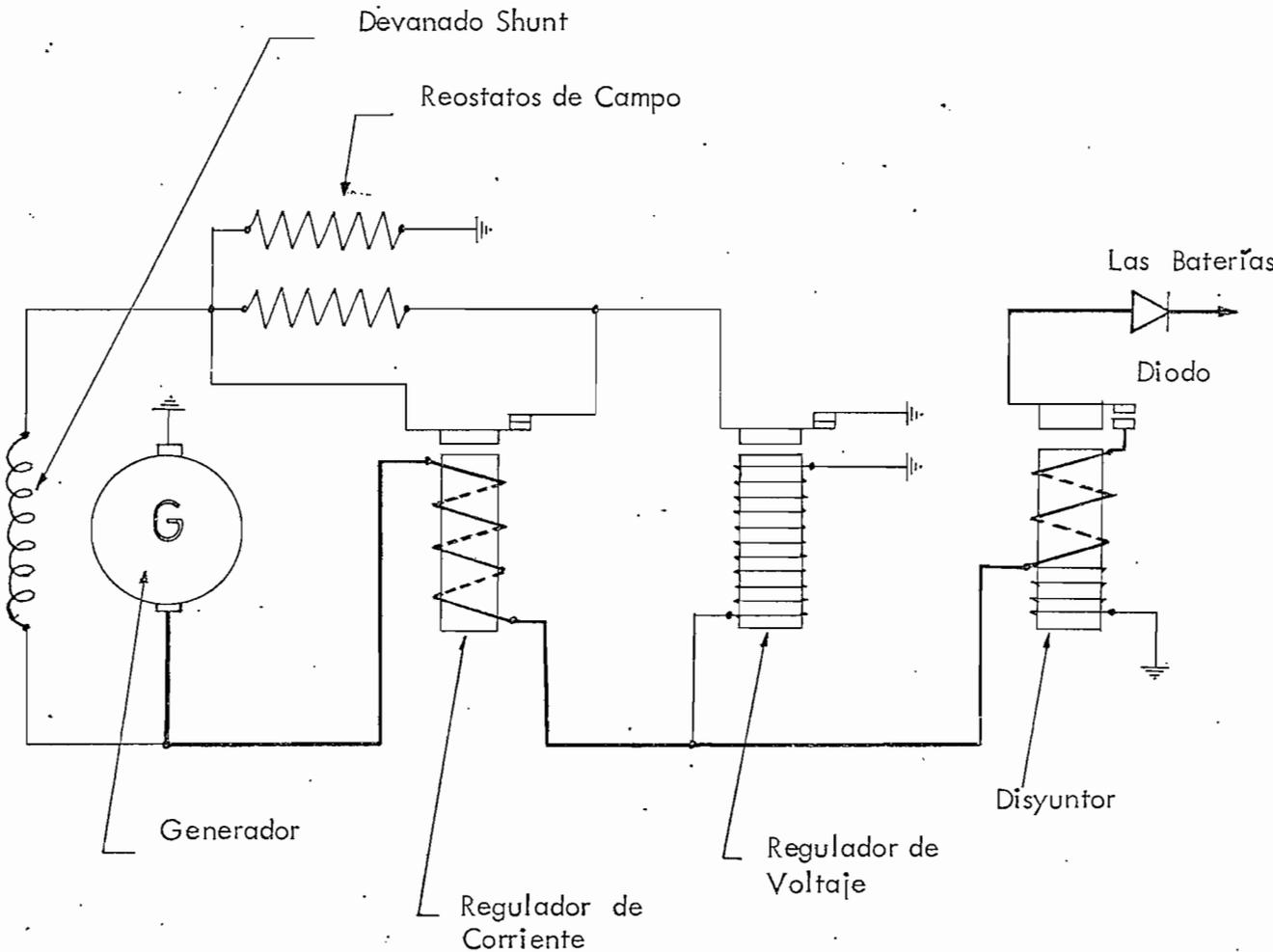


FIGURA No. 53 .- Esquema del sistema de control eléctrico.

Cuando las baterías están descargadas, o la demanda de energía es grande, el regulador de corriente funciona para que la salida del generador no exceda de su capacidad nominal. Entonces el voltaje de la corriente generada por el generador no es suficiente para hacer funcionar el regulador de voltaje; pero las baterías empiezan a adquirir su estado de carga o los aparatos eléctricos cesan de demandar corriente, el voltaje de la corriente generada aumenta hasta un valor suficiente para que este regulador funcione.

Al funcionar el regulador de voltaje, la corriente de salida del generador no es suficiente para que funcione el regulador de corriente, y toda la regulación depende del de voltaje.

Los reguladores de corriente y voltaje emplean dos resistencias, conectadas en paralelo con el circuito inductor del generador, que al abrir los contactos del regulador de corriente proporcionan un valor de resistencia suficiente para que la corriente de salida del generador no exceda de su máxima de seguridad o nominal.

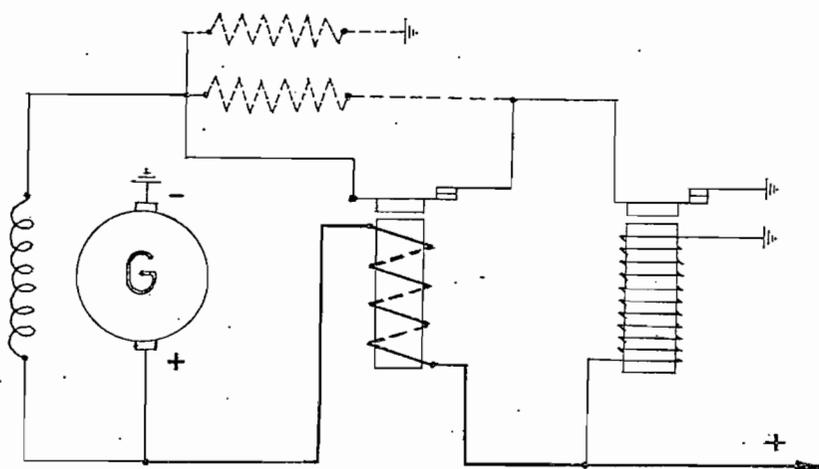
Cuando se abren los contactos del regulador de voltaje sólo se intercala una de las resistencias, con lo que se consigue una reducción de corriente de excitación aún mayor, ya que dos resistencias en paralelo ofrecen menor resistencia al paso de la corriente que la más pequeña de ellas.

La resistencia del regulador de voltaje tiene que ser mayor que la de la corriente, puesto que el regulador de voltaje tiene que reducir la corriente, mientras que el de corriente sólo impide que rebase un valor máximo previamente determinado.

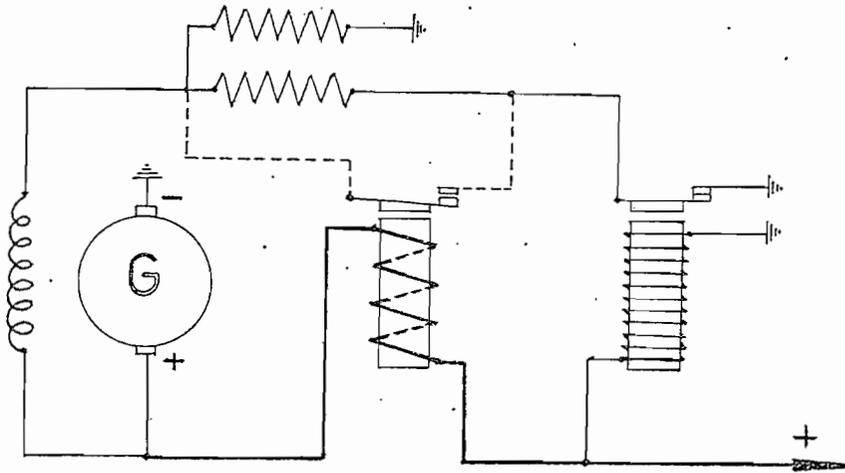
Como ya se dijo, el disyuntor tiene la finalidad de desconectar el generador de las baterías (cuando la velocidad del generador es insuficiente, pese a los órganos de regulación, para producir un voltaje igual al de las baterías) y conectarle cuando el voltaje sea igual o ligeramente superior al de la batería.

Es necesario utilizar un diodo, para que en ningún momento haya reversión de la corriente del sistema de almacenamiento al generador.

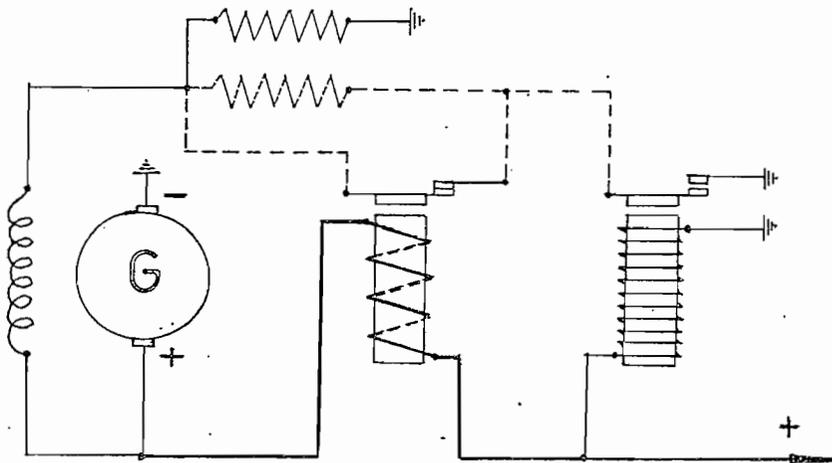
Las fases de funcionamiento se muestran a continuación :



- a) Reducción de la corriente de excitación por la acción del regulador de voltaje .



b) Reducción de la corriente de excitación por la acción del regulador de intensidad .



c) Reducción de la corriente de excitación, trabajando a pleno rendimiento de corriente y voltaje .

FIGURA No. 54.- Fases de funcionamiento del regulador .

Es necesario a más de este sistema de control, un sistema de medición de corriente y voltaje, para tener como guía sus lecturas y darnos una idea de cómo todo el sistema funciona .

Por otro lado, el sistema de acumulación que se escogerá, es el de acumuladores de baterías de Plomo - Acido, en vista de sus ventajas económicas y de mayor facilidad de adquisición en el mercado .

Así, este sistema de acumulación elegido debe cumplir con las siguientes condiciones :

Las baterías deben estar lo más cerca posible de la carga .

El local donde se coloque el sistema será lo más ventilado, puesto que las baterías son muy sensibles a la temperatura cuando están a una temperatura baja, no pueden rendir a toda su capacidad como cuando la temperatura es la correcta. Para un buen rendimiento deberían estar colocadas en temperatura de 25° a 30° C.

La ventilación del área donde estarán las baterías, se debe porque, cuando se cargan se produce oxígeno e hidrógeno y esto puede ser explosivo .

Finalmente deberá ser mantenida limpia, seca y fuera del piso y solamente agua destilada deberá usarse para mantener el nivel propio de electrolisis.

A continuación se muestran las dimensiones reglamentarias que se deben tomar en el local donde sean ubicadas las baterías.

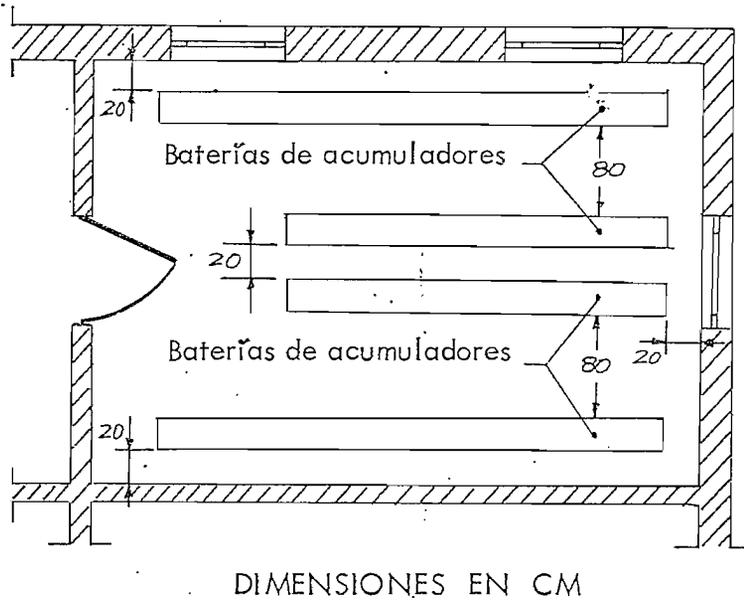


FIGURA No. 55.- Dimensionado de un local para batería de acumuladores de Plomo - Acido .

Cabe anotar que la base de las baterías debe ser sobre una estantería de madera .

Antes de pasar al cálculo de la capacidad de almacenamiento, es necesario considerar las pérdidas en las líneas, para saber cual debe ser la potencia útil disponible del generador cuando éste opere a su capacidad nominal .

La tabla No. 16 nos presenta algunos datos útiles sobre pérdidas y caídas de voltaje para conductores de cobre y aluminio a distintas capacidades .

Cobre # AWG	Aluminio # AWG	CAIDA DE VOLTAJE (Volt / 30 m)							PERDIDAS (Watios / 30 m)						
		I=10 A	20 A	30 A	40 A	50 A	60 A	70 A	I=10 A	20 A	30 A	40 A	50 A	60 A	70 A
3/0	-	0.12	0.24	0.38	0.5	0.62	0.74	0.86	1.2	5.0	11	20	32	44	60
2/0	4/0	0.16	0.32	0.46	0.62	0.78	0.94	1.1	1.6	6.2	14	26	40	56	76
1/0	3/0	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4	2.0	8.0	18	32	50	72	98
2	1/0	0.32	0.62	0.94	1.2	1.6	1.9	2.2	3.2	12.0	28	50	78	102	144
4	2	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	5.0	20.0	44	80	124	188	240
6	4	0.8	1.6	2.4	3.2	4.0	4.8	-	8.0	32.0	72	128	200	288	-
8	6	1.2	2.4	3.8	5.0	-	-	-	12.0	50.0	112	200	-	-	-
10	-	2.0	4.0	6.0	-	-	-	-	20.0	80.0	180	-	-	-	-

TABLA No. 16 .- Caídas de Voltaje y pérdidas en Cobre y Aluminio entre el generador y las baterías .

./..

Según la tabla No. 13 y la capacidad de nuestro sistema, podemos considerar un conductor de cobre No. 6 ó uno de Aluminio No. 4, para los cuales se tienen a 50 amperios de capacidad una caída de voltaje de 4 Voltios y una pérdida de potencia de 200 Watios.

Ahora si se desea mejorar las condiciones de pérdidas, se deben utilizar conductores de mayor sección, involucrando un aumento de costo que no justificaría, puesto que en un porcentaje moderado de tiempo el viento entregará la potencia deseable a la capacidad del generador.

Será necesario además considerar la distancia a la carga, la misma que debe mantenerse lo más cerca posible a nuestro sistema, si es posible en la misma área, para que las pérdidas en las líneas (entre las baterías y la carga) sea mínima.

Nuestro sistema consistirá de 10 baterías de Plomo - Acido de 12 voltios cada una, colocadas en serie.

Con las condiciones de energía mensual, podemos calcular la capacidad de almacenamiento, la misma que está determinada de la siguiente manera :

$$580 \text{ kWh} / \text{mes} \simeq 20 \text{ kWh} / \text{día}$$

Asumiendo una demanda pico mensual de 1200 kWh, entonces la capacidad de almacenaje debe ser de : 20 kWh / día .

$$\text{por lo tanto : } \frac{20 \text{ kWh} / \text{día}}{120 \text{ Voltios}} \simeq 167 \text{ Amp - hora} / \text{día}$$

Considerando una descarga diaria de 8 horas / día, se tiene que la corriente del sistema es :

$$\frac{167}{8} \simeq 21 \text{ Amp} . \text{ (Corriente máxima de descarga)}$$

NOTA: Se establece que, mientras la corriente descargada o la carga prolongada no exceda el 15 % de la medida de Amp - h, se obtendrá la máxima vida de una batería.

Para la utilización de la energía en carga alterna, es necesario utilizar un inversor electrónico que son mucho más eficientes y no requieren un mantenimiento cuidadoso. Lógicamente que esto involucra un costo adicional al sistema pero que a lo largo justificaría su costo.

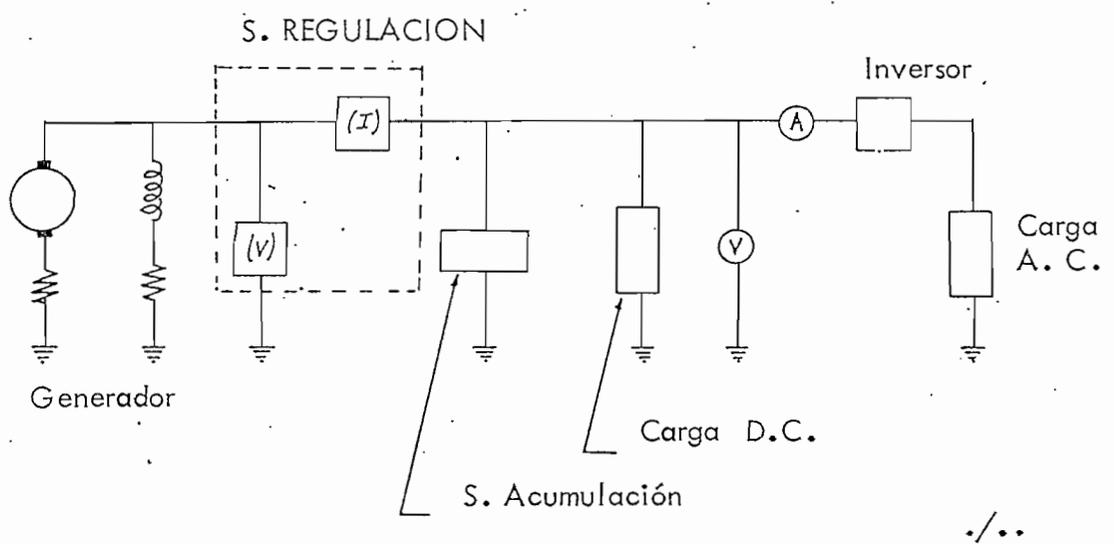
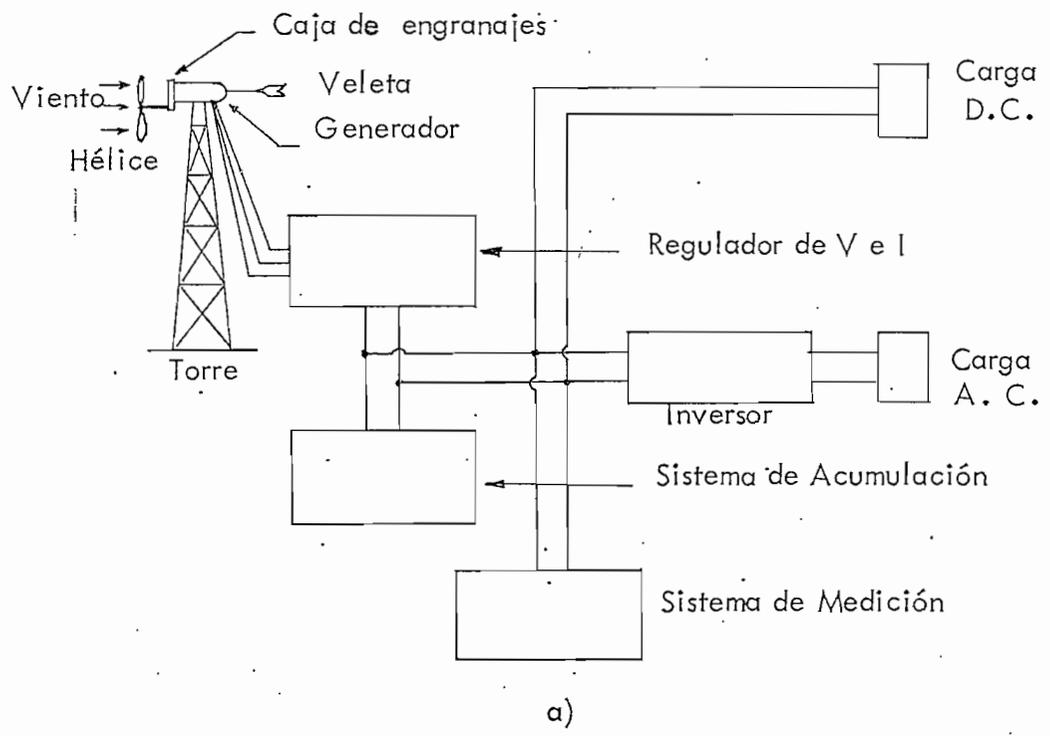
Este inversor debe ser encendido solamente cuando se lo vaya a usar, puesto que son elementos que consumen potencia.

Por consiguiente es necesario independizar la carga DC de la carga AC.

4.6 ESQUEMATIZACION DEL MODELO :

a) ESQUEMATIZACION BASICA

b) ESQUEMATIZACION UNIFILAR DEL SISTEMA ELECTRICO



b)

5. CAPITULO QUINTO : CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES. Y REFERENCIAS

5.1 CONCLUSIONES :

En breves rasgos se ha demostrado los usos posibles de la energía del viento. Además se ha visto que no se requiere elementos sofisticados en generadores a viento para que estos sean exitosos, o a su vez de un tremendo tamaño para producir cantidades apreciables de potencia.

Cabe anotar que las turbinas de viento de eje vertical, vienen a constituirse una de las mayores promesas para la generación de electricidad, las mismas que además eliminan la torre y pueden estar sobre el nivel de tierra.

Las incertidumbres acerca de la carencia de conocimientos de los futuros precios del combustible, de las tasas de interés y de la falta de medios de comunicación en nuestro país y el mundo son relativamente importantes en la selección de un sistema no convencional de energía.

En la actualidad, la utilización de la energía del viento es una opción atractiva para las sociedades que están interesadas forzosamente.

Por otro lado se ha pretendido con este trabajo alentar la investigación en los sistemas de conversión de energía que extraigan más potencia (en este caso del viento) y hacer posible una aplicación directa e inmediata en sectores que están marginados en electrificación y en especial para aquellas en las que se está planificando colocar líneas de

transmisión que no justificarían en su inversión .

La mayoría de los esquemas propuestos para la conversión de la energía del viento en energía mecánica o eléctrica utilizable se basan en tecnologías relativamente antiguas, desde que aparecen los molinos de viento en las centurias Séptima y Octava en Irán, donde se tuvo oportunidad de brindar la primera revolución mecánica.

Otra cosa concerniente que ha sido discutida es el impacto climático potencial para la extracción de energía eólica, pues una cuidadosa investigación de las posibilidades de los disturbios climáticos deberá ser realizada antes de que los programas de conversión del viento sean implementadas en una escala de verdad grande.

Respecto a almacenaje de energía, existe una regla dada por la práctica, la cual sugiere que la energía por mes es cerca del doble del valor del cual ha sido obtenido (multiplicando la potencia de salida y el promedio de la velocidad del viento por el número de horas al mes), de ahí que en nuestro diseño se ha estimado esta regla para el cálculo de energía de almacenaje.

5.2 RECOMENDACIONES GENERALES :

Las aplicaciones potenciales o posibles de la energía del viento dan credulidad a las recomendaciones de los proponentes , de energía no convencional, a utilizar generadores a viento en gran escala para aliviar de alguna manera la crisis energética mundial.

Una recomendación fundamental para nuestro medio, es la de

./..

utilizar a la brevedad posible un sistema a viento que satisfaga las condiciones de electrificación rural fundamentalmente.

Desde que estos generadores a viento responden a altas velocidades de viento, se recomienda que los sistemas de generación eólica sean ubicados en sitios estratégicos, esto es, en lugares altos puesto que las velocidades del viento se incrementan con la altitud, o en lugares sin obstáculos considerables de modo que el viento no se vuelva turbulento.

En vista de que este es un trabajo parcial, se recomienda que para la instalación de un sistema a viento, se hagan estudios profundos del comportamiento del viento a diferentes alturas, si es posible tomando datos de velocidad y frecuencia cada hora, de manera de obtener datos estadísticos en un lapso de algunas semanas que sería lo aceptable para las estimaciones de potencia eléctrica.

Estos datos pueden ser comparados con los de una estación Meteorológica cercana, la misma que puede servir de referencia.

Es necesario además que la carga no esté distante del sistema, para evitar las pérdidas en las líneas.

Algo más parejo de la potencia del viento se puede esperar si los molinos de viento en localizaciones diferentes son colocados al mismo circuito de transmisión.

Dentro del plano netamente rural, se han estimado datos sobre costos de líneas de transmisión a 13.2 kV en conductores de aluminio, los mismos que oscilan entre 50 y 150 mil sucres por kilómetro.

Analizando estos costos debemos pensar, qué costo tendría una línea de transmisión, dirigida a un sector donde las condiciones de comunicación terrestre sean las peores, y no solo a estos sectores sino también a otros donde la población es tan baja que el costo por kilovatio-hora se constituiría en un precio prohibitivo y que por querer satisfacer las necesidades de electrificación, el estado deba subvencionar el costo de energía.

En todo caso, es recomendable un sistema a viento por las múltiples ventajas que este presenta frente a otros sistemas de potencia convencionales.

Un sistema a viento ofrece un fácil montaje, un costo de mantenimiento bajo, no utiliza combustibles sino una materia prima renovable en todo momento y que no contribuye de ninguna manera a la contaminación ambiental, la misma que debe ser pensada en todo momento.

Por la experiencia mínima existente en la construcción de modelos, es necesario proponer la construcción de un modelo simple de los analizados, el mismo que serviría como fuente de información para el análisis del comportamiento y aplicación de un modelo general para nuestras condiciones de viento en las distintas regiones del país.

5.3 BIBLIOGRAFIA :

1. J. LECKIE, G. MASTERS, Other Homes and Garbage, " Designs for Self - Sufficient living ", Sierra Club Book, 1975, Cap. 3 .
2. GRANGER MORGAN, Energy and Man, " Technical and Social Aspects of Energy ", IEEE PRESS, pgs. 221 - 230, 1977 .
3. NAMOWITZ, SAMUEL N., Earth Science, " The world we live in ", 3ra. Ed., pgs. 450 - 458, 1976 .
4. TENNEKES, H., " A First course in Turbulance ", The MIT Press, 1974.
5. HÜTTE, Manual del Ingeniero, Ed. Gustavo Gili S.A., Tomo I, pgs. 416-472, Tomo II, pgs. 397 - 403, 1963 .
6. KNOWLTON, ARCHER, Manual Standard del Ingeniero Electricista, Vo. 2, pgs. 1189 - 1192, 1967 .
7. MARKS, Manual del Ingeniero Mecánico, Ed. 39, pgs. 1220 - 1226, 1967.
8. RAMIREZ, JOSE, Enciclopedia CEAC de Electricidad, Vol. 6, pgs. 87 - 231, 1973 .
9. Electricidad Teórico - Práctica, AFHA, Tomo VII, pgs. 27 - 44, 1973 .
10. NTIS, Wind Motors, " Theory, Construction, Assembly and use in drawing water Generating Electricity", California, pgs. 6 - 19, 1975 .

11. NTIS, Lewis Research Center Cleveland, " Status report of 100 kW Experimental Wind Turbine Generator Project ", pgs. 1 - 20, 1974 .
12. NTIS, " Wind Power usage in Europe ", pgs. 1 - 15, 1974 .
13. Applied Aerodynamics of Wind Machines, Cap. I - III, pgs. 1-20, 1969.
14. Compressed air Magazine, " Everturning Windmills", pgs. 8-11, V-1976.
15. Bulletin of the Atomic Scientist, "Wind Power Now i", pgs. 20-26 , Oct.-1975.
16. Bulletin of the Atomic Scientist, " Wind Energy", pgs. 38-45, Sep.1976.
17. BSI-NEWS, "Wind Loods", pgs. 7 - 8, Aug. 1970.
18. REPRINT, " Tornado Windmill", USIS Popular Science, pgs. 1-6, 1971
19. SCIENCE, " Artificial Tornadoes : A Novel Wind Energy Concept", pgs. 257, Oct. 1975.
20. SCIENCE, " Energy and Resources ", pgs. 255-260, July - 1975.
21. MACHINE DESIGN, " Something in the Wind ? ERDA thinks so ", A Penton Publication, Vol. 48, No. 12, pgs. 18 - 26, May - 1976
22. MACHINE DESIGN, " Advanced Turbine Designs Boost Wind - Power Potential ", A Ponton Publication, Vol. 48, No. 14, pgs. 26-32 , Jun - 1976 .

23. MACHINE DESIGN, " The Truth About Ni-Cd Cell Reversal ", A Penton Publication, Vol. 48, No. 14, pgs. 97 - 99, Jun. - 1976 .
24. NEW SCIENTIST, " Windmills Change Direction ", pgs. 596 - 597 , Dec. 1976 .
25. SPECTRUM, " Windmills Stage a Comeback ", IEEE, Vol. 13, No. 11, pgs. 44 - 49, Nov. 1976 .
26. SPECTRUM, " Batteries Today and Tomorrow ", IEEE, pgs. 36 - 41, Mar. 1976 .
27. PROGRESSIVE, " The Answer is Blowing in the Wind ", pgs. 43 - 46, Jan. 1972 .
28. ENVIROMENT, " Reduced Fuel Costs - Energy Storage ", Vol. 18, No. 5, pgs. 11 - 12, Jun. 1976 .
29. ENVIROMENT, " Wind Power ", Vol. 76, No. 22, Feb. 1977 .
30. Found of Science and Technology, Vol. 37, No. 1, 1970.
31. Boletines Meteorológicos, Instituto Meteorológico, 1964 - 1973 .