



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO**

**ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES**

**" ARAGON "**

**EVALUACION DE MAQUINAS  
DE VIENTO**

**TRABAJO DE INVESTIGACION  
DE METODOLOGIAS PARA LA  
EVALUACION DE SCEE**

**QUE PARA OBTENER EL TITULO DE  
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA**

**P R E S E N T A**

**ELISEO ISIDRO ANGELES CISNEROS**

**SAN JUAN DE ARAGON, EDO. DE MEX.**

**1985**



Universidad Nacional  
Autónoma de México



## **UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso**

### **DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

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

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

## Indice

.....	6
1.1	Capítulo I. Antecedentes y Conceptos Básicos sobre la Energía Eólica y SCEE ..... 6
1.2	Origen del Viento y Cuantificación de su Contenido Energético... 6
1.2.1	Origen del viento ..... 6
1.2.2	Estimaciones del Viento .....11
1.3	Energía y Potencia del Viento .....11
1.4	Sistemas Conversores de Energía Eólica .....14
1.5	Características de los S C E E .....19
1.5.1	Conceptos Básicos .....19
1.5.2	Aplicaciones de los SCEE .....25
.....	28
2.1	Capítulo II. Normas y Métodos para la Evaluación de los SCEE.....28
2.2	Observaciones del contenido del documento Prácticas Internacionales Recomendadas en los SCEE .....29
2.3	Asesados a las Normas .....30
2.3.1	a) Corrección por Densidad del Aire. ....31
2.3.2	b) Corrección por perfil del viento .....31
2.3.3	c) Cálculo de la eficiencia del sistema y de la relación de velocidad de punta de aspa ( $\lambda$ ).....33
2.3.4	d) Cálculo y representación de la desviación estándar de los datos 36
2.4	Métodos de Evaluación para los SCEE .....36
2.4.1	Método de Bins .....36
2.4.2	Método de Acoplamiento de Frecuencia .....40
2.4.3	Método de la Potencia más Probable .....46
.....	50
3.1	Capítulo III. Pruebas en Viento Libre de un Aerogenerador de 6 Kilowatts, de una Aerobomba Mecánica de 200 Watts y de un Aerogenerador de 10 Kilowatts .....50
3.2	Características Generales de un Aerogenerador Comercial de 6 Kilowatts .....51
3.2.1	Características generales del Rotor .....51

3.2.2	Características de Operación .....	52
3.2.3	Control de Sobrevelocidad .....	52
3.2.4	Características Generales del Sistema Eléctrico .....	52
3.2.5	Control de sobrevelocidad .....	53
3.2.6	Salida: .....	53
3.2.7	Inversor Síncrono .....	53
3.2.8	Generalidades .....	53
3.3	Objetivos de la Prueba al Aerogenerador Comercial de 6 Kw .....	53
3.4	Instalación del Sistema para la Prueba .....	54
3.5	Método de Prueba para el Aerogenerador de 6 Kw .....	56
3.6	Método de Corrección por Densidad del Aire .....	59
3.7	Resultados de la Prueba del Aerogenerador Comercial de 6 Kilowatts .....	61
3.7.1	Interpretación de Resultados del Aerogenerador de 6 Kw .....	66
3.8	Características Generales de la Aerobomba Mecánica de 200 Watts .....	66
3.8.1	Características Generales del Rotor .....	67
3.8.2	Características de Operación .....	67
3.8.3	Control de Sobrevelocidad y Frenado .....	67
3.8.4	Características de la Bomba Utilizada .....	68
3.8.5	Carga Conectada .....	68
3.8.6	Generalidades .....	68
3.9	Objetivos de la Prueba a la Aerobomba Mecánica de 200 Watts .....	68
3.10	Instalación de la Aerobomba Mecánica de 200 Watts en la Prueba .....	69
3.11	Método de Prueba para la Aerobomba Mecánica de 200 Watts .....	72
3.12	Resultados e Interpretación .....	73
3.13	Características Generales del Aerogenerador de 10 Kilowatts. ....	82
3.13.1	Características generales del rotor .....	82
3.13.2	Características de operación .....	82
3.13.3	Control de Sobrevelocidad y Frenado .....	83
3.13.4	Características Generales del Sistema Eléctrico .....	83
3.13.5	Panel de Control .....	83
3.13.6	Carga Conectada .....	84
3.13.7	Generalidades .....	84

3.14	Objetivos de la Prueba .....	84
3.15	Instalación del Sistema para la Prueba .....	85
3.16	Método de Prueba empleado para el Aerogenerador de 10 Kw .....	92
3.17	Resultados de la Prueba al Aerogenerador de 10 Kw .....	93
3.18	Instrumentación Empleada en las Evaluaciones de los tres SCEE.....	99
.....	.....	101
4.1	Capítulo IV. Comentarios, Conclusiones y Su- sugerencias .....	101
4.2	Comentarios a los Antecedentes y Conceptos .....	101
4.3	Comentarios sobre los Métodos de Evaluación .....	101
4.3.1	Comentarios Generales a los Métodos de Evaluación .....	101
4.3.2	Comentarios sobre el método de bins .....	102
4.4	Comentarios sobre el método de la potencia más probable .....	103
4.5	Comentarios sobre el método de acoplamiento de frecuencia .....	103
4.6	Conclusiones y Sugerencias .....	103
4.6.1	Conclusiones para la Evaluación del Aerogenerador de 6 Kw ...	103
4.6.2	Sugerencias .....	104
4.6.3	Conclusiones para la Evaluación de la Aerobomba de 200 Watts	104
4.6.4	Sugerencias .....	105
4.6.5	Conclusiones para la evaluación del Aerogenerador de 10 Kw ..	105
4.6.6	Sugerencias .....	105
4.6.7	Conclusiones y Sugerencias Generales del Capítulo III .....	105
	ANEXO I .....	106
	ANEXO II .....	127
	ANEXO III .....	134
	ANEXO IV.....	139
	Referencias Bibliográficas .....	142

## **SIGLARIO**

**SCEE:**

**Sistemas Conversores de Energía Eólica.**

**FNC:**

**Fuentes No Convencionales.**

**APSCEE:**

**Analizador de Pequeños Sistemas Conversores de Energía Eólica.**

## INTRODUCCION

La situación actual de crisis económica mundial, en la que nuestro país no queda exento, afecta marcadamente a la población de escasos recursos, las necesidades de energéticos aumentan cada día más, las fuentes convencionales de energía tienden a encarecerse y a escasear. La opción de utilizar otro tipo de fuentes de energía, tiende a considerarse como una alternativa viable.

El uso de la energía solar, de la energía del viento, la biomasa y la energía geotérmica como F N C, presenta la posibilidad de abrir un campo en el uso de otro tipo de energéticos.

Es cierto que la magnitud de energía que se pueda generar con este tipo de fuentes, comparado con la proporción actual instalada de las fuentes convencionales, como son la hidroeléctrica, la termoeléctrica, etc., no será significativa en sus inicios. Pero al considerar que una de las ventajas que tienen las fuentes no convencionales es que son inagotables; es de esperarse que si se propicia su desarrollo, se produzca un grado de penetración considerable.

La diversificación de las fuentes de energía, es una manera para no depender exclusivamente de un tipo de energético. Las características de algunas de las F N C, permite usarlas en zonas muy distantes, lográndose así una distribución mejor de los energéticos y consecuentemente un impulso para hacer más productivas algunas zonas que no cuentan con servicio de energía eléctrica.

El desarrollo de las F N C ha sido lento, debido a que las necesidades no han llegado a un extremo tal, que exija la búsqueda de otra forma de aprovechar la energía, sin embargo la necesidad ha sido detectada y en diversos países del mundo, se trabaja sobre su desarrollo y aplicación.

El aprovechamiento de los recursos eólicos que el país posee, está en sus inicios, actualmente se busca crear y adecuar tecnología sobre esta rama.

El presente trabajo está enfocado a un tipo de F N C de energía; la energía del viento. El viento es uno de los recursos ilimitados que no han sido explotados, su empleo en México ha sido muy escaso, a diferencia de otros países donde se ha estudiado y promovido su uso, a través de SCEE, básicamente aerogeneradores y aerobombas.

En México existe la posibilidad viable de fabricar máquinas que aprovechen esta fuente; la tecnología requerida para su manufactura no es del todo especializada y se cuenta con los elementos necesarios; para poder llevar a cabo los diseños y construcciones de algunos SCEE. Además se puede contar; hasta cierto punto; con la información de lo que se ha hecho en otros países.

En América Latina existe un organismo que ha promovido la difusión sobre el empleo de algunas de las F N C de energía; la Organización Latinoamericana de Energía (OLAIE); que está integrada por países como Argentina, Brasil, Colombia, Chile, México y Perú. Existen pues; los elementos básicos para llevar a cabo un avance en el aprovechamiento de la energía eólica.

La inversión económica en una máquina de viento sería justificable ; si su creación ayuda a resolver problemas básicos; tales como; la distribución de energía eléctrica; el bombeo de agua para riego y otros usos. Existen muchas comunidades rurales que necesitan urgentemente de estos servicios. La infraestructura actual no permite que la energía eléctrica llegue a todos los poblados que existen en el país; ya sea por condiciones geográficas o económicas; y aunque las características intermitentes del viento no permiten que se obtenga un suministro constante y confiable cien por ciento; particularmente la generación de electricidad puede ser una alternativa atractiva; tanto para aplicaciones en la alimentación de pequeñas cargas para suplir necesidades domésticas y productivas de familias que viven en zonas rurales como para la integración en gran escala de SCEE a las líneas públicas de energía eléctrica.

Parte importante dentro del desarrollo de un SCEE es su evaluación. El contenido de este trabajo está enfocado al estudio de metodologías y a la aplicación de éstas; para la evaluación del comportamiento en viento libre (condiciones naturales de operación) de aerogeneradores y aerobombas.

La idea básica de la evaluación de los SCEE es conocer cuanta energía se puede extraer del viento y con que calidad para un sistema específico. Es necesario saber en función a la velocidad del viento; la cantidad de energía o potencia que se puede aprovechar.

Las evaluaciones de las máquinas de viento; llevadas a cabo por los fabricantes de estos; no siempre son confiables. Existen muchos fabricantes de SCEE en el mundo; principalmente los Estados Unidos; Dinamarca; Suecia; Holanda; Inglaterra. Todos estos países tienen programas de in-



investigación y desarrollo de los SCEE, ya sea por parte del gobierno, de la iniciativa privada o trabajos conjuntos. Se destinan varios millones de dólares para la investigación; algunos otros países que cuentan con programas de desarrollo de la energía eólica son Alemania y España. En México, en los últimos 20 años se ha trabajado en forma esporádica en el aprovechamiento de esta fuente. Los trabajos realizados por instituciones y particulares se han desarrollado aisladamente, sin formar parte de un programa global con objetivos concretos.

La importancia de la evaluación de una máquina de viento es relevante; si consideramos que los fabricantes muchas veces, dan las características de sus productos sobrevaloradas, es decir, que indican aprovechamientos y eficiencias mayores que las que realmente tienen, es por esto que se hace necesario tener en el caso de las máquinas que se construyan en el país, una metodología que atienda a normas bien definidas. Existen editadas normas internacionales que pretenden unificar criterios al respecto. Sin embargo para conocer el verdadero comportamiento de un sistema, es necesario saber interpretar los resultados que se presentan; así como lo adecuado de los métodos utilizados para su evaluación. Por esta razón, también se hace necesario dar mayor difusión a este tema, que es uno de los objetivos esenciales del presente trabajo; su contenido se describe en forma concreta a continuación:

## **CAPITULO I**

**Antecedentes y Conceptos Básicos sobre Energía Eólica y SCEE.**

En este capítulo se presentan las definiciones, los conceptos y la terminología básica empleada en los SCEE.

## **CAPITULO II**

**Normas y Métodos para la Evaluación de los SCEE**

Aquí se presentan las diferentes normas y métodos de evaluación; sus ventajas y desventajas.

## **CAPITULO III**

**Pruebas en Viento Libre de un Aerogenerador de 6 Kilowatts, de una Aerobomba Mecánica de 200 watts y de un Aerogenerador de 10 Kilowatts.**

En este capítulo se presentan las características de los

sistemas, su evaluación, los problemas inherentes a esta y los resultados.

#### CAPITULO IV

##### Comentarios, Conclusiones y Sugerencias.

En este capítulo se concentra lo más relevante de los capítulos que le anteceden.

Por último es importante indicar que los sistemas evaluados que se presentan, estuvieron instalados en la Estación Experimental Eólica "El Gavillero" ubicada en el ejido del mismo nombre, que se encuentra situada a 20 Kilómetros del municipio de Huicharan Estado de Hidalgo.

E. I. A. C.

**CAPITULO I**  
**ANTECEDENTES Y CONCEPTOS**  
**BASICOS SOBRE LA ENERGIA**  
**EOLICA Y LOS SISTEMAS**  
**CONVERSORES DE ENERGIA**  
**EOLICA (SCEE).**

**1.1 INTRODUCCION**

El estudio del viento como F N C de energía conlleva una serie de elementos que integran toda una estructura particular, partiendo de su origen y comportamiento hasta el empleo de artefactos que pueden transformar la energía cinética de éste, a una forma utilizable doméstica o industrial.

El objetivo básico de éste capítulo es la presentación de los conceptos más comunes empleados en el argot de la investigación y aprovechamiento de la energía eólica, para que sirva como antecedente que permita entender mejor la exposición de los capítulos subsecuentes.

**1.2 Origen del Viento y Cuantificación de su Contenido Energético.**

**1.2.1 Origen del viento**

El viento es aire en movimiento; el desplazamiento de un lugar a otro de las partículas que lo forman es originado por un gradiente de presión, es decir, que el flujo de aire tendrá un sentido de los sitios de alta presión a los de baja. El gradiente de presión es una diferencia de presiones de dos sitios separados una cierta distancia. Esta diferencia obedece a gradientes térmicos causados por el calentamiento desigual de la superficie terrestre, considerando que las capacidades y las conductividades térmicas son diferentes en dos sitios determinados, por ejemplo el mar y la tierra.

En la tierra, si ésta se considera inmóvil y su superficie uniforme las masas de aire situadas sobre el ecuador, estarían más calientes que las de los polos, trayendo como consecuencia que las masas de aire del ecuador se eleven y que sean reemplazadas por masas de aire frío provenientes de los polos, tal como se muestra en la figura 1.1 A. El viento en la superficie terrestre sería de norte a sur, en el hemisferio

norte, y de sur a norte, en el hemisferio sur, siguiendo las líneas de los meridianos. Pero si se considera el movimiento de rotación y traslación terrestre, se provocará que las masas de aire sufran una desviación hacia el oeste.

Los vientos alisios son aquellos que soplan del noreste en el hemisferio norte y del sureste en el hemisferio sur. En la figura 1.1 B se muestra la circulación general de los vientos en la atmósfera.

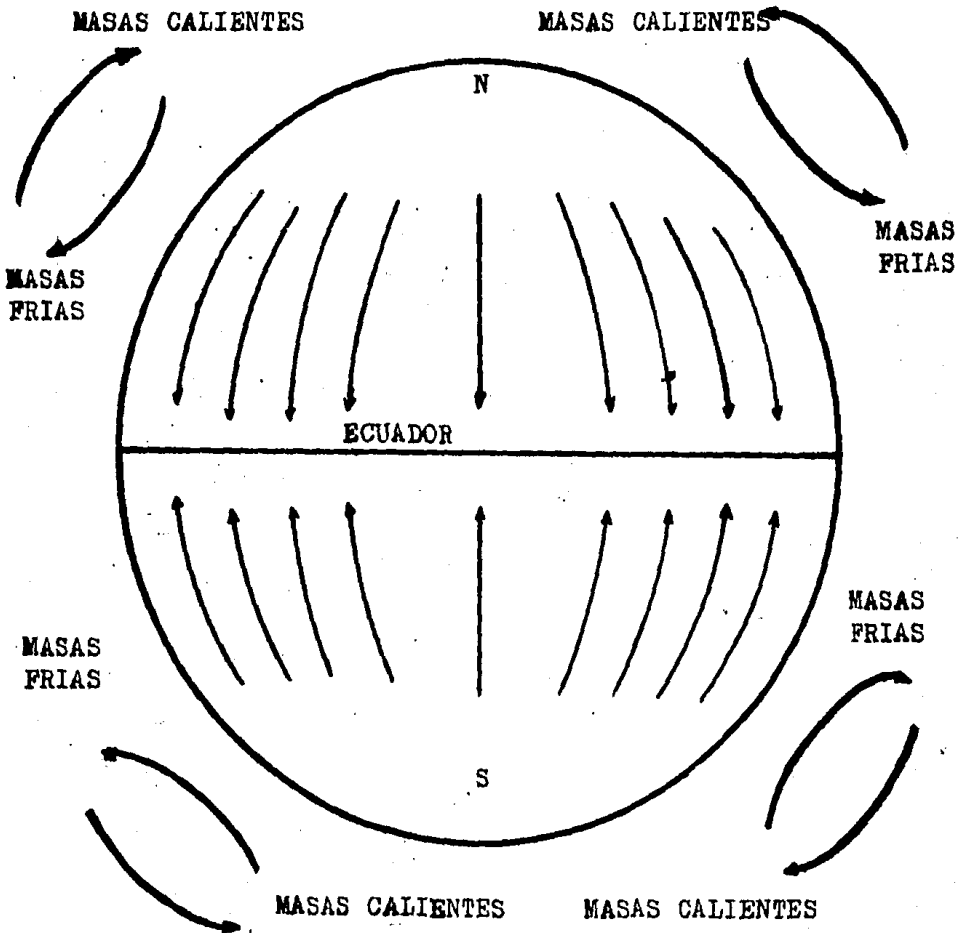


fig. 1.1 A Movimiento del viento; tierra inmóvil.

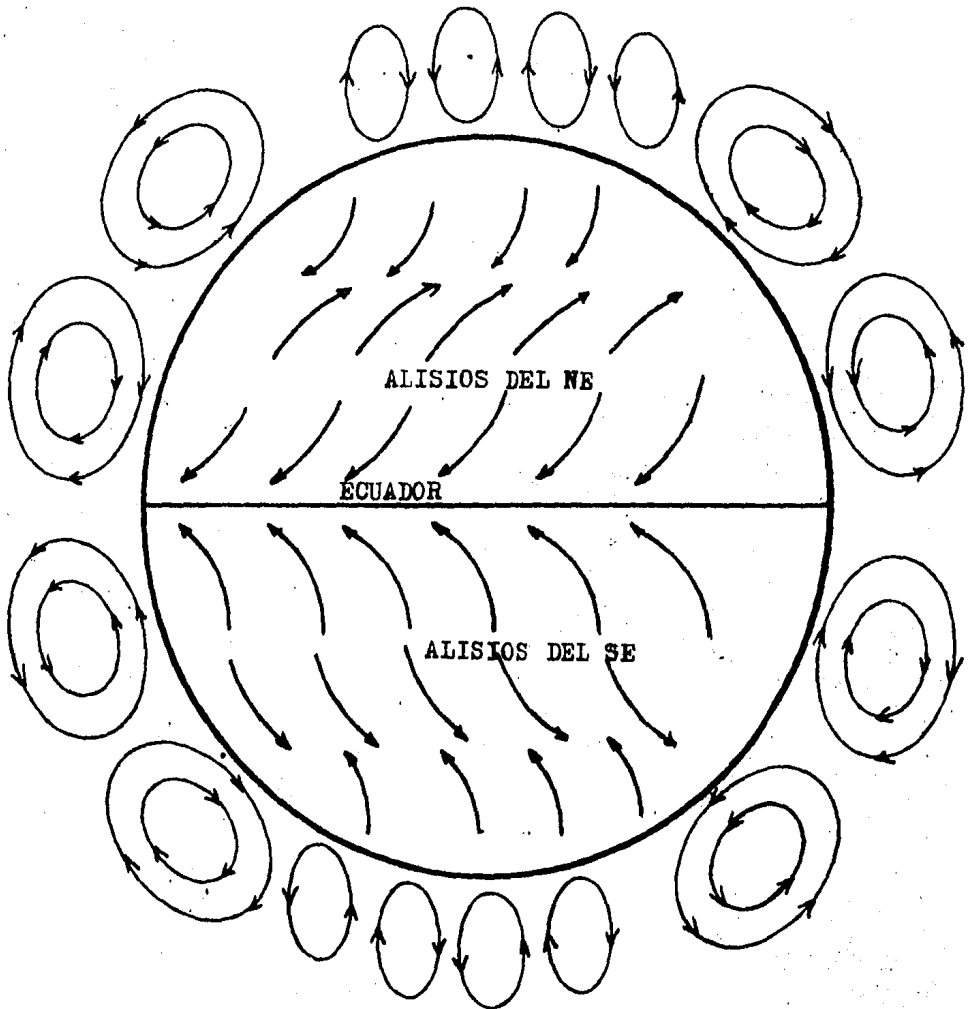


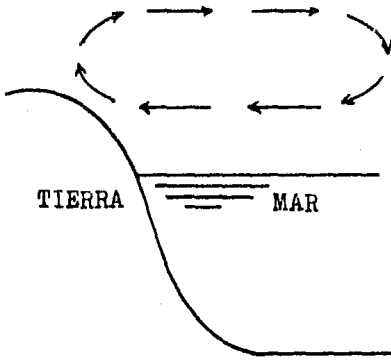
fig. 1.1 B Movimientos del viento

Los cambios en las estaciones del año afectan el comportamiento de los vientos en fuerza y en dirección, y para condiciones topográficas particulares, el viento puede tomar diferentes características de comportamiento, de aquí lo aleatorio de este.

Los vientos periódicos son aquellos que se originan por las variaciones alternadas de presión, ocasionadas por el desigual calentamiento sobre una superficie dada; las llamadas brizas marinas y las brizas valle-montaña caen en esta categoría. La causa que origina las brizas marinas es la diferente temperatura del mar y de la tierra que crea movimientos convectivos en el aire; la tierra tiene una capacidad calorífica menor y una conductividad térmica menor, por ésta razón, durante el día el aire que está sobre ella se calienta más rápido que las masas de aire que están sobre el mar ya que la conductividad térmica es mayor y absorbe el calor que recibe más rápidamente, en consecuencia el aire que está sobre el mar tarda más en calentarse, ya que está comunicando el calor que recibe al mar. De esta forma el aire caliente se dilata comenzando un movimiento ascendente, siendo así substituido por el aire frío procedente del mar. Al caer la tarde el mar cederá su calor más rápidamente que la tierra, en consecuencia el aire que está sobre el mar tendrá una temperatura más elevada que el aire que está sobre la tierra y el fenómeno se invertirá, produciéndose las brizas de tierra a mar. En las figuras 1.2 A y B se ilustran éstos fenómenos.

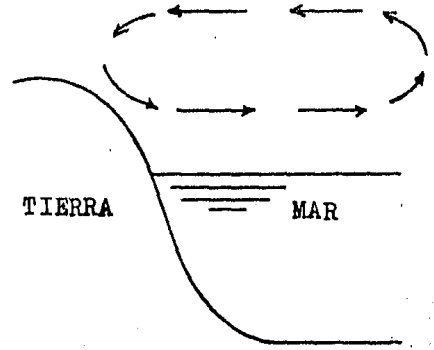
Otros fenómenos parecidos a los anteriores son la briza de valle y la briza de montaña. La primera se refiere a la ascendencia del aire del valle durante el día por las laderas de una montaña y la briza de montaña se presentará al caer la tarde cuando las masas de aire en contacto con ésta pierden calor por irradiación de las laderas. En las figuras 1.2 C y D se ilustran éstos fenómenos.

Los vientos orográficos son vientos que se producen por el efecto de relieve en ciertos lugares. Cuando el viento choca con un obstáculo más o menos extenso se ve obligado a subir para poder rebasarlo; esto causa que se formen componentes verticales cuya ascendencia puede ser fuerte e incluso formar torbellinos.



DIA

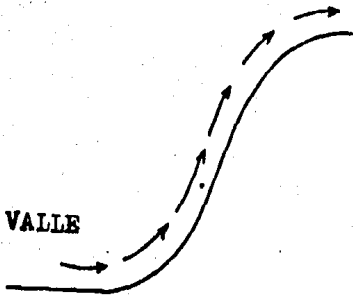
BRIZA MARINA  
(A)



NOCHE

BRIZA TERRAL  
(B)

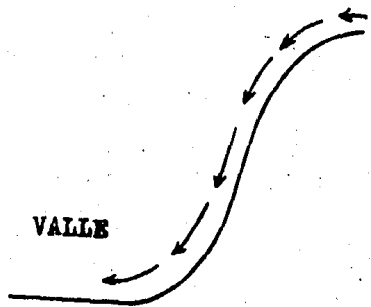
MONTAÑA



DIA

BRIZA DE VALLE  
(C)

MONTAÑA



NOCHE

BRIZA DE MONTAÑA  
(D)

fig. 1.2 Tipos de Brizas

## 1.2.2 Estimaciones del Viento

La manera como se puede predecir hasta cierto punto el comportamiento del viento es llevando registros continuos de la velocidad del viento por periodos lo más largo posibles. Existen métodos estadísticos que tratan de predecir el comportamiento del viento. Las instituciones encargadas del manejo y evaluación meteorológicas, llevan registros continuos de la velocidad de éste, y la información que se obtiene se traduce a curvas de frecuencia de velocidades; en dónde se observan en el eje de las abscisas las velocidades del viento y en el de las ordenadas el tiempo que se mantienen estas velocidades (en realidad la curva de frecuencia de velocidades corresponde a un histograma de velocidades). La curva de frecuencia de velocidades (curva de distribución) se hace para cada mes y para un año completo; esto permite conocer, por rangos de velocidades el porcentaje del tiempo que le corresponde a cada velocidad. Al agrupar los datos mensualmente se determinan las variaciones estacionales y finalmente el comportamiento del viento a lo largo de un año. Para una buena definición de la distribución de velocidades a lo largo de un año se requiere llevar registros (mediciones anemográficas) por 5 años al menos; aunque se puede sustituir este trabajo si se cuenta con información que permita establecer correlaciones, y con el auxilio de modelos matemáticos que permitan aplicar una función de densidad de probabilidad que siga una tendencia semejante al comportamiento del viento, como es el caso de la distribución de probabilidad de Weibull. Para mayor información se puede consultar la referencia 1 Capítulo I sección 1.3

## 1.3 Energía y Potencia del Viento

Si el viento es una masa de aire en movimiento que se desplaza con una velocidad determinada, este adquiere una energía cinética directamente proporcional a su masa y a la velocidad que lleva de acuerdo con :

$$E_c = 1/2 M V^2$$

1.1

Si definimos a  $\rho$  = Densidad del aire en Kg/m<sup>3</sup>  
 $V$  = Velocidad del viento en m/s



A = Area que atravieza el viento en m

tendremos que la masa de aire que fluye en la unidad de tiempo será :

$$M/t = A V \quad 1.2$$

y la energía cinética en la unidad de tiempo que atravieza el área A será:

$$Ec/t = 1/2 (\rho A V) V^2 = 1/2 \rho A V^3 \quad 1.3$$

de acuerdo con las leyes de la física sabemos que la potencia esta definida por :

$$P = Ec/t$$

Por lo tanto la potencia total disponible en el viento será:

$$P = 1/2 \rho A V^3 \quad 1.4$$

o bien

$$P = K V^3$$

donde K es una constante que depende de la densidad del viento y de las unidades en que se expresan las variables que intervienen en esta ecuación.

La densidad del aire varia con la altitud y con la temperatura por lo que será necesario efectuar correcciones, determinadas por las características propias del lugar, para poder obtener la potencia disponible del viento en ese sitio.

Resulta importante resaltar que la potencia es función cúbica de la velocidad del viento, lo cual indica que para pequeñas variaciones en la velocidad del viento se tendrán fuertes repercusiones en la potencia. En la figura 1.3 se muestra la relación entre la potencia disponible y la velocidad del viento. Sin embargo no es posible extraer toda la energía disponible del viento ya que equivaldría a detener el viento, como un vehículo que al chocar contra una pared se detiene completamente perdiendo toda su energía cinética.

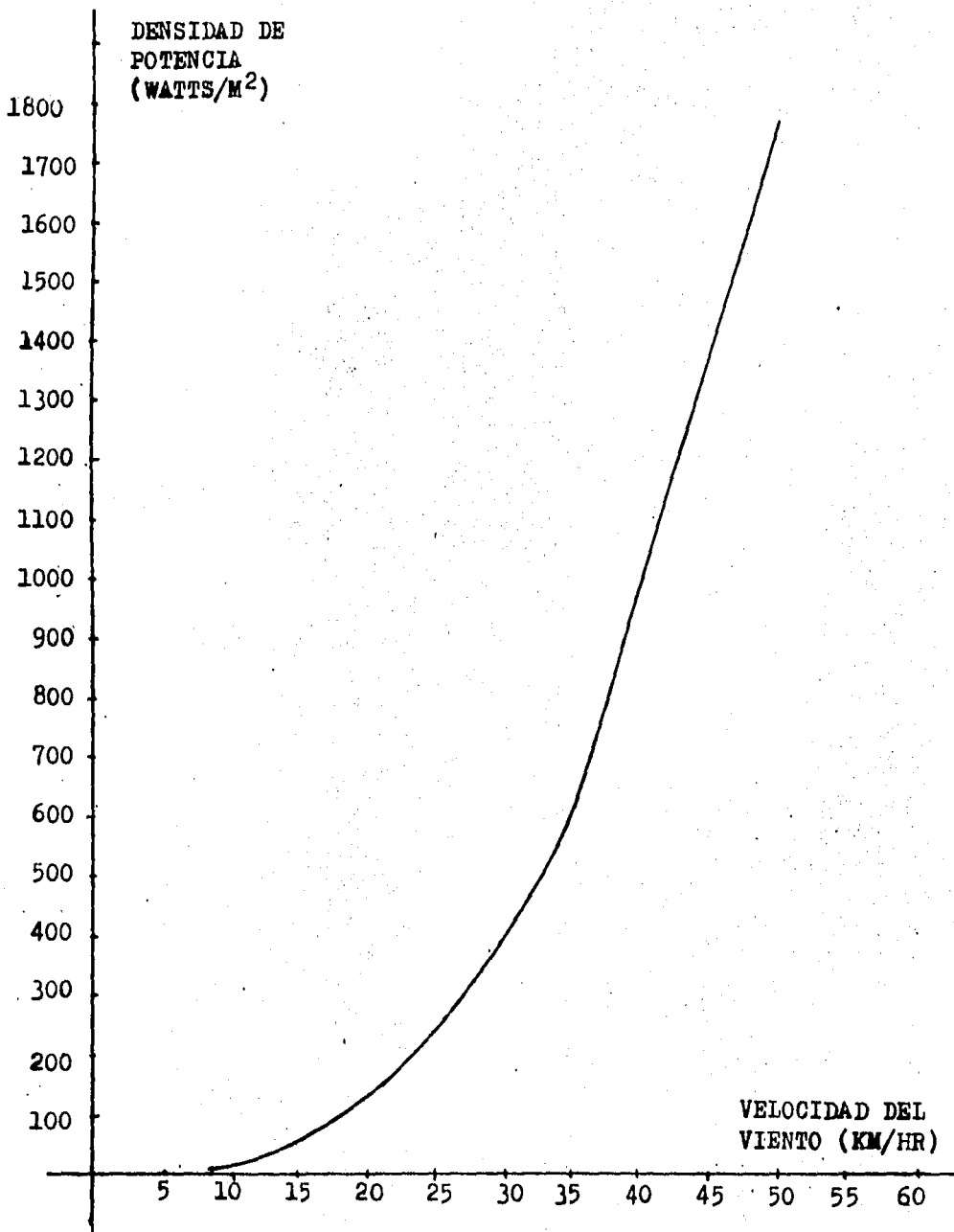


fig. 1.3 Gráfica de densidad de potencia contra velocidad del viento.

#### 1.4 Sistemas Conversores de Energía Eólica

La utilización de la energía del viento, se logra a través de SCEE, cuya función es convertir la energía del viento en otras formas, como son: la energía mecánica o la energía eléctrica principalmente. La energía producida por los SCEE, puede ser utilizada en forma directa o puede ser almacenada para su utilización posterior, como sería el caso de almacenamiento de energía eléctrica en acumuladores, o bien, el bombeo de agua en un depósito que permita posteriormente la generación por caída de agua.

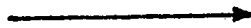
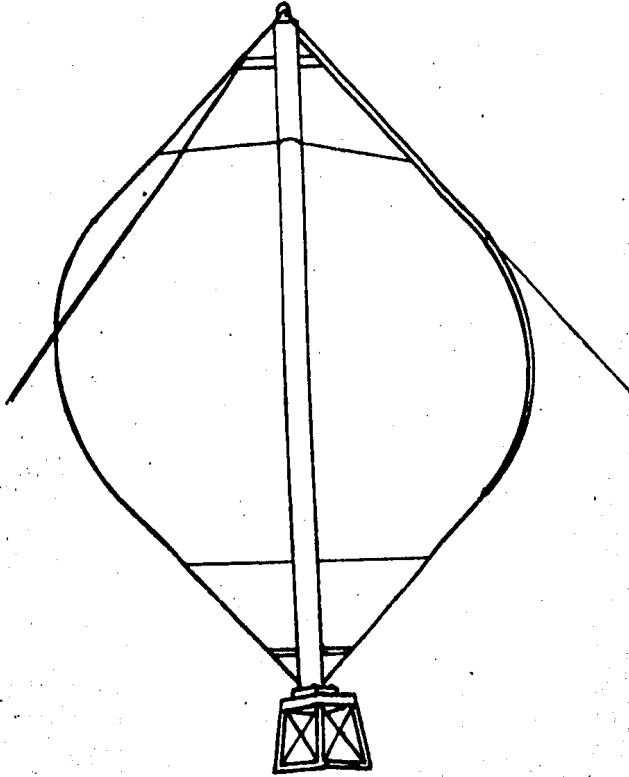
Actualmente las formas principales de aprovechamiento de la energía eólica están dirigidas a la generación de electricidad y al bombeo de agua, tomando la primera una gran importancia en la última década y observándose un amplio panorama en un corto plazo, sobre todo en los países desarrollados.

En la historia del desarrollo de los SCEE se han realizado varios diseños y pruebas a estos, los cuales difieren en cuanto a su configuración, tamaño, partes que los componen, materiales utilizados y aplicaciones. En cuanto a su configuración, estos pueden clasificarse en dos grupos importantes que son:

- Máquinas de Eje Vertical
- Máquinas de Eje Horizontal

Las máquinas de eje vertical, son aquellas en las que los álabes motrices se desplazan en planos paralelos a la dirección del viento tal como se ilustra en la figura 1.4. Y las máquinas de eje horizontal, son aquellas en las que los álabes motrices se desplazan en planos perpendiculares a la dirección del viento tal como se ilustra en la figura 1.5.

En las dos figuras también se observa con flechas las direcciones de los planos de rotación de los rotores de los sistemas y la dirección del viento incidente.

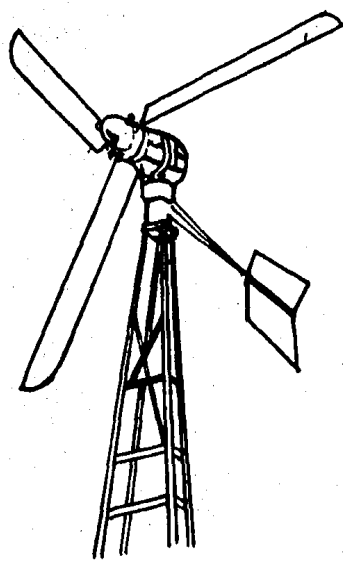


DIRECCION DEL VIENTO



PLANO DE GIRO DEL ROTOR

fig. 1.4 Máquina de Eje Vertical



DIRECCION DEL VIENTO

PLANO DE GIRO DEL ROTOR

fig. 1.5 Máquina de Eje Horizontal

Dentro de la clasificación anterior, existen varios tipos específicos de máquinas, dependiendo del número de aspas, forma de ellas y objetivos de aplicación. En la figura 1.6 se muestra una clasificación de los diferentes diseños y tipos de máquinas que se han realizado a lo largo del desarrollo histórico de los SCEE.

Actualmente los tipos de máquinas para generación de electricidad más utilizadas en orden de importancia son:

- 1) Eje horizontal, tres aspas, viento abajo.
- 2) Eje horizontal, tres aspas, viento arriba.
- 3) Eje horizontal, dos aspas, viento abajo.
- 4) Eje vertical, dos aspas (Tipo Darrieus).

Y para bombeo de agua:

- 1) Eje horizontal, múltiples, viento arriba.
- 2) Eje horizontal, tres palas, viento abajo.
- 3) Eje vertical, dos o más aspas (tipo Savonius).

Cabe mencionar que en el transcurso del desarrollo de los SCEE se ha venido sustituyendo poco a poco una tecnología que implicaba materiales pesados y caros, por otra que implica materiales ligeros, esbeltos y baratos pero con mayor resistencia que los primeros, lo cual es el resultado del avance en la tecnología de materiales tales como fibra de vidrio, aceros reforzados y aluminio de alta resistencia.

Las máquinas para generación de electricidad más usadas actualmente, tienen capacidades nominales entre los 50 y 250 Kw; dichas máquinas usualmente son interconectadas entre sí para formar, lo que en general se denomina "Granja Eólica" (del inglés: Wind Farm); de dichos conjuntos de sistemas se pueden obtener plantas eolenergéticas; que de hecho lo son capaces de producir potencia del orden de 1 Mw, 2 Mw, 3 Mw, o más.

Otro tipo de máquinas son sauelas utilizadas para dotar de energía eléctrica a lugares donde las redes de distribución de energía eléctrica convencional no están presentes; dichas máquinas usualmente tienen capacidades nominales entre 1 y 25 Kw. Finalmente, las máquinas para bombeo de agua de tipo mecánico, son generalmente construidas en capacidades que oscilan entre 200 w y 10 Kw.

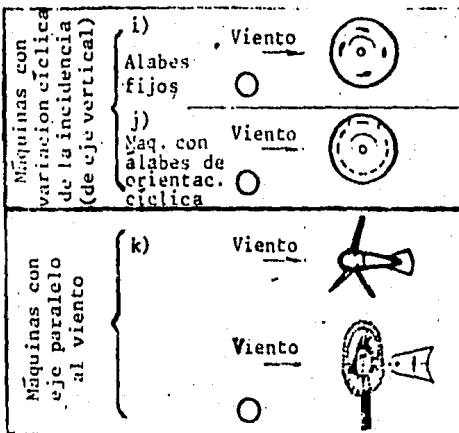
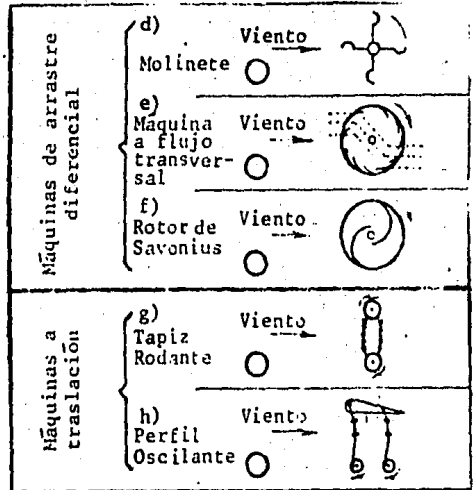
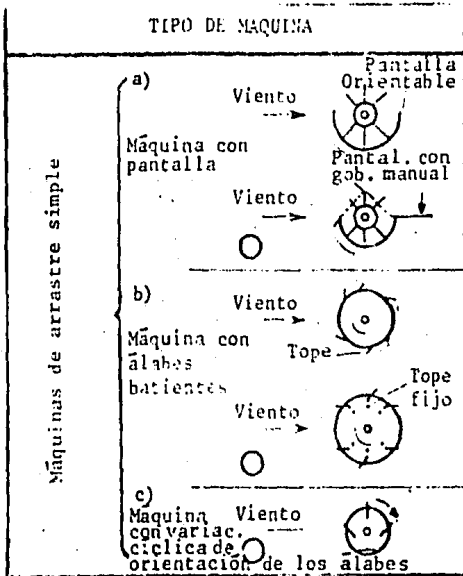


fig. 1.6 Diferentes Tipos de SCEE

## 1.5 Características de los S C E E

### 1.5.1 Conceptos Básicos

Para definir las características de una máquina de viento se necesita establecer algunos conceptos como son :

a) **Coefficiente de Potencia (C<sub>p</sub>)** : es un coeficiente que indica cuánta potencia puede extraer el rotor de un SCEE del viento que incide sobre el área barrida por éste; depende del tipo de máquina, de la velocidad del viento y de la velocidad de rotación; es adimensional.

$$C_p = \frac{\text{Potencia extraída por el rotor}}{\text{Potencia disponible en el viento}} \quad 1.5$$

El C<sub>p</sub> máximo teórico que puede tener una máquina de viento fué establecido por el científico alemán A. Betz y tiene un valor de 0,593 (16/27), lo que indica que el valor máximo teórico del C<sub>p</sub> expresada en porcentaje es de 59,3 %. La deducción de éste valor puede encontrarse en la referencia 2 páginas de la 93 a la 98.

b) **Potencia Mecánica** : Es el producto del C<sub>p</sub> por la potencia disponible en el viento.

$$P = 1/2 \rho A V^3 C_p \quad 1.6$$

c) **Lambda (λ)** : Es una relación adimensional entre la velocidad de punta de aspa (velocidad periférica) y la velocidad del viento, definida por:

$$\lambda = \frac{\text{Velocidad Periférica}}{\text{Velocidad del viento}} = \frac{\omega R}{V} \quad 1.7$$

donde :



$\omega$  = Velocidad angular en radianes/seg.

$R$  = Radio del rotor

$V$  = Velocidad del viento

El parámetro  $\lambda$  es muy importante, ya que guarda una relación muy estrecha con el  $C_p$ ; este último es en realidad una función de  $\lambda$ . Todas las máquinas poseen un rango típico de  $\lambda$  que depende de su solidez. La solidez es el cociente entre la superficie de los álabes y la superficie del área barrida por éstos (su valor puede variar de 0.05 a 0.75). El valor  $\lambda$  de diseño no varía y es dado siempre a la velocidad nominal.

d) Potencia de salida en el eje del Rotor : Es la potencia extraída del viento por el rotor; se determina mediante el producto del par por la velocidad angular.

$$P = \bar{T} \cdot \bar{\omega}$$

1.8

donde:

$T$  = torque o par

$\omega$  = velocidad angular

De acuerdo con la ecuación 1.8, una misma potencia puede obtenerse usando dos criterios distintos; uno sería producir un par alto con baja velocidad angular y el otro sería producir un par bajo con alta velocidad.

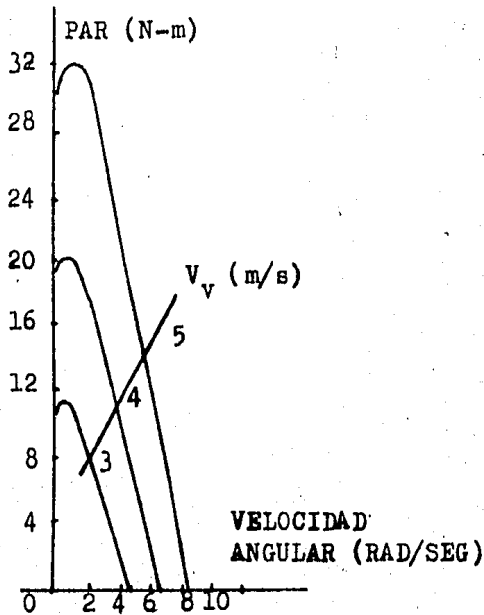
En los sistemas para bombeo de agua por medio de émbolo y cilindro, se usará el primer criterio, ya que se necesita un par elevado para su funcionamiento pero para la generación de la energía eléctrica donde se necesitan velocidades relativamente altas se empleará el segundo criterio; a menos que se use una relación de transmisión.

De lo anterior se puede establecer que dos molinos de viento de la misma potencia pueden funcionar con distintas velocidades angulares. También podemos agregar que los sistemas de bajo par y altas velocidades angulares tienen menos pérdidas para transmitir una misma potencia que los sistemas de alto par y bajas velocidades angulares (de acuerdo con la referencia 1).

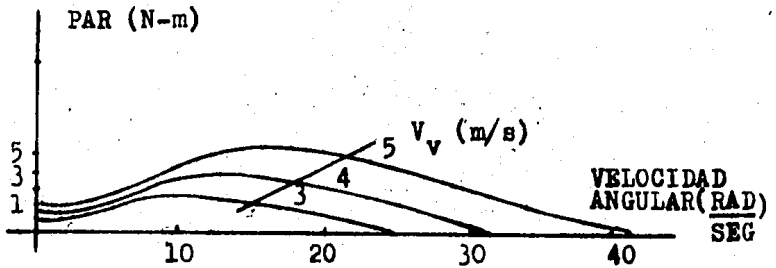
En las figuras 1.7 A y B se muestran las curvas de par contra velocidad angular para dos molinos de eje horizontal de baja y alta velocidad angular.

Los gráficos anteriores nos indican el comportamiento del par a diferentes velocidades angulares, para dos molinos de una misma potencia; puede deducirse de ellos que el par de arranque es considerablemente más bajo para los molinos de alta velocidad que para los de baja.

En las figuras 1.8 A y B se muestran las curvas de potencia característica contra velocidad angular de dos molinos de eje horizontal de baja y alta velocidad, a diferentes velocidades. Puede observarse que los máximos valores de la curva de potencia contra velocidad angular varían con el cubo de ésta última, mientras que los correspondientes valores de par varían con el cuadrado de la misma.

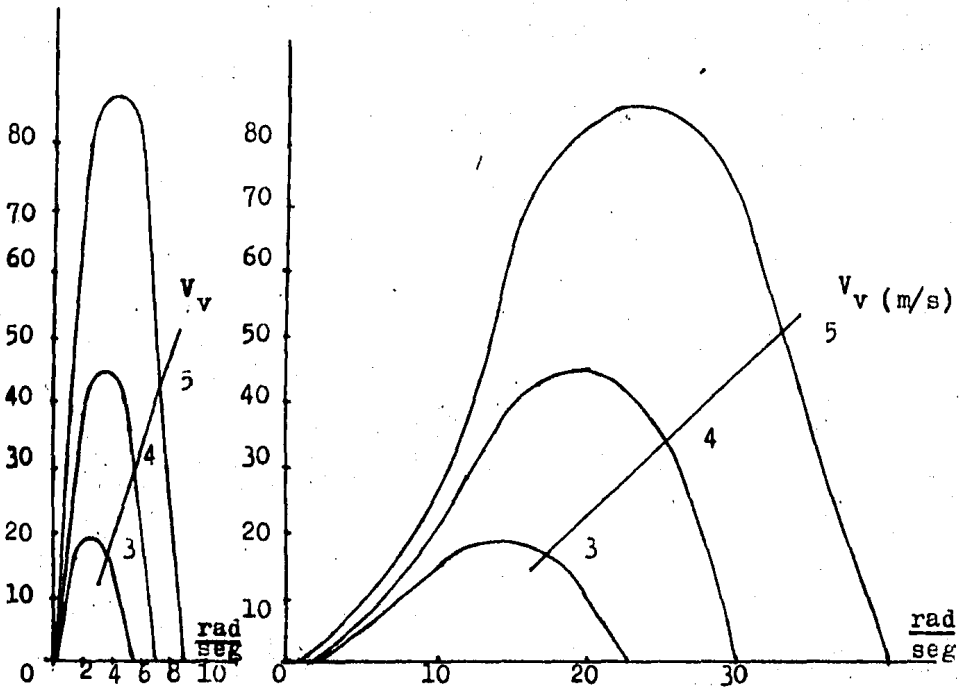


(A) = CURVA DE PAR CARACTERISTICO CONTRA VELOCIDAD ANGULAR PARA UN MOLINO DE BAJA VELOCIDAD DE EJE HORIZONTAL



(B) = CURVA DE PAR CARACTERISTICO CONTRA VELOCIDAD ANGULAR PARA UN MOLINO DE ALTA VELOCIDAD DE EJE HORIZONTAL

fig. 1.7 Curvas de Par contra Velocidad Angular



(A)

(B)

$V_v$  = Velocidad del viento

(A) = CURVA DE POTENCIA CARACTERISTICA CONTRA VELOCIDAD ANGULAR PARA UN MOLINO DE BAJA VELOCIDAD DE EJE HORIZONTAL.

(B) = CURVA DE POTENCIA CARACTERISTICA CONTRA VELOCIDAD ANGULAR PARA UN MOLINO DE ALTA VELOCIDAD DE EJE HORIZONTAL

fig. 1.8 Curvas de Potencia contra Velocidad Angular

e) **Ángulo de paso de aspa** : es el ángulo formado por el arco tangente entre la velocidad del viento y la velocidad tangencial; puede ser fijo o variable.

f) **Velocidad de inicio de siro** : es la velocidad del viento a la cual el sistema empieza a girar.

g) **Velocidad de paro** : Es la velocidad del viento a la cual la máquina es frenada de acuerdo con su sistema de sobrevelocidad y frenado.

h) **Velocidad de sobrevivencia** : es la velocidad de viento máxima que el sistema puede soportar antes de destruirse o sufrir algún daño en sus componentes estructurales.

i) **Rendimiento de diseño** : Es la potencia de salida predicha a la cual la máquina de viento es estimada con la más baja velocidad de viento.

j) **Control de velocidad del rotor** : es el método usado para prevenir la velocidad rotacional excesiva y proteger al SCEE de los daños en la sustentación estructural; resultado de altas velocidades de viento.

k) **Configuración del rotor** : es la descripción del tamaño del rotor; su configuración física y los materiales de construcción.

l) **Transmisión** : es el sistema usado para adecuar o incrementar las revoluciones por minuto de la flecha para ajustarse a los requerimientos del generador o bomba.

#### 11) **Velocidades de viento de operación**

- **Velocidad de cut-in**: éste término generalmente se emplea sin traducción e indica la velocidad a la cual el sistema empieza a entregar potencia aprovechable a la carga conectada.

- **Velocidad de cut-out**: igualmente que el anterior se emplea generalmente sin traducción e indica la velocidad a la cual el sistema deja de entregar potencia útil a la carga conectada.

En la figura 1.9 se ilustran en una curva de potencia contra velocidad de viento los puntos límites del intervalo de operación. Las velocidades de cut-in y cut-out pueden variar de acuerdo a la calibración hecha en los sistemas de control y adecuación. Un mismo sistema puede calibrarse para diferentes velocidades de inicio y fin de operación con el objeto de ob-

tener una mejor eficiencia, o bien adecuar la curva de potencia contra velocidad de viento al comportamiento de la carga.

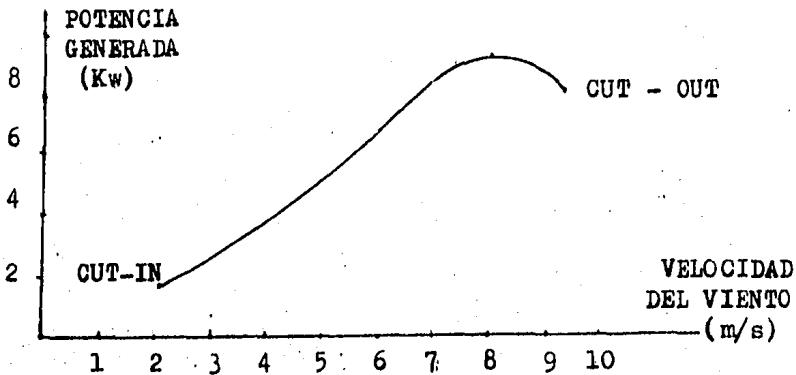


fig. 1.9 Velocidades de cut-in y cut-out

### 1.5.2 Aplicaciones de los SCEE

En general se puede decir que los inconvenientes en la utilización de la energía eólica son básicamente: su intermitencia y la predicción de su comportamiento.

Cuando las aplicaciones son directas, como en el bombeo de agua o la molienda de granos, la intermitencia no es importante, pero en las aplicaciones de generación de energía eléctrica esta característica toma mayor importancia.

Las condiciones de un SCEE para la generación de electricidad deben estar bien definidas de tal forma que su configuración minimice los efectos indeseables de las características de la energía eólica.

Tomando en cuenta las consideraciones anteriores se tienen dos esquemas básicos de utilización de los SCEE para la producción de energía eléctrica: el sistema aislado o el sistema acoplado a una red de energía eléctrica por lo menos diez veces mas grande en capacidad

Los sistemas aislados pueden tener tres configuraciones:

1) Aerogenerador-Carga: la energía eléctrica generada se aplica directamente a la carga, por ejemplo cuando la carga es resistiva para proporcionar calefacción ambiental o para procesos, por ejemplo la hidrólisis del agua para producción

de hidrógeno.

2) Aerogenerador - Sistema de almacenamiento - Carga: la energía es almacenada en bancos de baterías; cuando la demanda es baja para proporcionarla cuando la demanda es alta y la generación no es suficiente.

3) Aerogenerador - Sistema de respaldo - Carga: cuando el aerogenerador se emplea en conjunto con otra fuente de energía ya sea convencional o no convencional; este sería el caso de un aerogenerador acoplado a un motogenerador diesel; cuyo régimen de trabajo y consumo de combustible estarán en función inversa a la disponibilidad de la energía eólica; reflejándose esto en una mayor vida útil para la máquina de combustión interna y menor consumo de combustible.

Los sistemas acoplados a una red eléctrica tienen el objetivo de aportar energía a la red para el ahorro de otros energéticos. El empleo de generadores de inducción se considera la mejor opción para máquinas de pequeña y mediana capacidad y para el caso de aerogeneradores mayores a un megawatt interconectados a una red eléctrica los generadores síncronos son la opción aparentemente más adecuada (1).

Debido a que existen diversas máquinas eléctricas, la generación de energía eléctrica, ya sea de corriente directa o corriente alterna, puede ser efectuada a velocidad angular constante o variable dependiendo del SCEE.

De lo anterior surgen los esquemas de generación de energía eléctrica a partir de los SCEE, que vienen siendo los siguientes:

- 1) Sistemas de velocidad variable frecuencia variable.
- 2) Sistemas de velocidad variable frecuencia constante.
- 3) Sistemas de velocidad constante frecuencia constante.

Los tres esquemas de generación anteriores pueden estar aplicados de las siguientes formas:

Los sistemas de velocidad variable frecuencia variable con:

- a) Generador de corriente alterna - Rectificación
- b) Generador de corriente alterna -Carga resistiva para calefacción-

Los sistemas de velocidad variable frecuencia constante con:

- a) Generador de corriente alterna con conmutador
- b) Generador de campo modulado
- c) Generador de inducción de doble salida
- d) Generador de corriente alterna - Rectificador - Banco de baterías - Inversor - Carga
- e) Generador de corriente alterna - Rectificador - Inversor síncrono - red eléctrica

Los sistemas de velocidad constante frecuencia constante con:

- a) Generador síncrono
- b) Generador de inducción

Para información mas detallada acerca de los esquemas de generación consulte la referencia 1 (Capítulo 4 sección 4.2)



## CAPITULO II NORMAS Y METODOS PARA LA EVALUACION DE LOS S C E E

### 2.1 INTRODUCCION

Las normas que se emplean en la evaluación de los SCEE no han sido unificadas a nivel mundial; algunos países se guían por sus propias normas establecidas de acuerdo con sus experiencias en el medio. Un esfuerzo por lograr esa unificación ha sido la emisión de documentos como el editado conjuntamente por la Rockwell International, la Universidad Técnica de Dinamarca y los Laboratorios Riso de Dinamarca, de esta forma se conjugan los esfuerzos de dos países bastante representativos de los continentes Americano y Europeo de acuerdo con el desarrollo llevado en este campo; por esta razón en la primer parte del capítulo se presenta un breve comentario del contenido de la traducción de un documento denominado: Prácticas Internacionales Recomendadas en las Pruebas a SCEE. Hacemos notar que el propósito del mismo es el de normalizar o estandarizar las prácticas de evaluación de los SCEE; las normas que se presentan; podemos tomarlos aún; como un punto de vista particular; que pueda considerarse para documentar una evaluación; la traducción completa del documento mencionado se presenta en el anexo 1; se dan también algunos adredados que no fueron contemplados en el mismo.

En la segunda parte del capítulo se presentan los métodos que se emplean para evaluar a los SCEE. Los métodos de evaluación de los SCEE están basados en la estadística y su desarrollo se ha hecho en base a la experiencia. Para conocer las características y el comportamiento de un SCEE en diferentes condiciones; es necesario el empleo de una metodología específica a seguir. En el desarrollo de ésta fue necesario emplear diferentes medios y hacer estimaciones a varias máquinas; para después obtener la metodología más apropiada y así poder encontrar resultados que permitan conocer el comportamiento real de una máquina en condiciones naturales.

La evaluación; en general; es una estimación de las características en un lapso relativamente corto; permitiendo hacer proyecciones a largo plazo en cuanto a la cantidad de energía del viento que puede ser aprovechada por un SCEE en particular.

Un buen método de evaluación; nos definirá el comporta-

miento de la máquina a evaluar; apesandose lo mejor posible a la realidad. No existe información en textos acerca de los métodos de evaluación de los SCEE; solo están establecidos en reportes de convenciones o conferencias hechas sobre el tema.

Los métodos presentados en el capítulo son tres: el método de bins; el método de acomodamiento de frecuencias y el método de la potencia más probable.

En el capítulo IV, se dan comentarios y las posibles aplicaciones de cada uno.

## 2.2 Observaciones del contenido del documento Prácticas Internacionales Recomendadas en los SCEE

El documento mencionado se editó atendiendo a la necesidad de estandarizar los procedimientos de prueba a los SCEE; para que exista congruencia de los diversos fabricantes en relación a la forma como se ejecutan las pruebas a los SCEE. Los alcances más importantes que plantea el documento son los siguientes:

- Los métodos establecidos no están limitados a SCEE productores de electricidad.

- Los procedimientos y prácticas mencionadas se aplican a todos los tamaños y clasificaciones de SCEE.

- También se dan las definiciones y los conceptos más relevantes empleados en los SCEE; se establecen así mismo, los requisitos para la obtención de la curva de potencia. Se indica los puntos que debe contener el reporte de evaluación de un SCEE; dentro de los más importantes están:

- La descripción de las características de los SCEE.

- Indicar y describir el sitio donde se efectuó la prueba.

- Una descripción de la instalación hecha para la prueba.

- Descripción de la instrumentación empleada.

Una parte dentro del documento indica los lineamientos

que debe contener la instrumentación empleada; así como la ubicación que debe tener esta para las diferentes variables a medir. Se establecen las especificaciones de las mediciones de la carga aplicada y se da un resumen del procedimiento de análisis, indicándose los métodos para procesar los datos registrados y los métodos de corrección del aire.

### 2.3 Adresados a las Normas

En el documento presentado en el anexo 1 existen algunas omisiones, que pueden deberse a que los conceptos que a continuación se mencionarán, no fueron discutidos en las fechas en que se redactó el documento o en otro caso a que posteriormente a la fecha de su redacción, fueron desarrolladas nuevas metodologías que consideran aspectos de mayor importancia.

Cabe mencionar que basándose en las normas mencionadas, se han desarrollado esfuerzos en diferentes centros de pruebas de SCEE en el mundo, con objeto de mejorar la calidad y confiabilidad que debe representar la evaluación de una máquina eólica; tanto para la utilidad del fabricante como para la utilidad de los compradores, dado que basándose en los resultados de las pruebas de este tipo, se deberán tomar decisiones con el fin de mejorar su sistema, y los compradores podrán verificar que la máquina a adquirir sea la apropiada para sus necesidades, desde los puntos de vista de energía requerida, régimen de viento disponible y economía del sistema, cotejada con los dos puntos anteriores. Los adresados que se proporcionan en este trabajo se refieren a los siguientes conceptos:

- a) Corrección por densidad del aire.
- b) Corrección por perfil del viento.
- c) Cálculo de la eficiencia del sistema y de la relación de velocidad de punta de aspa (tip speed ratio  $\lambda$ ).
- d) Cálculo y representación de la desviación estándar de los datos con que se calculan los puntos de las curvas generadas.

### 2.3.1 a) Corrección por Densidad del Aire.

La densidad del aire afecta el comportamiento de los SCEE, esto se debe a que la presión dinámica así como la viscosidad del viento son también afectadas por esta. De acuerdo con lo anterior es recomendable que se reporte el comportamiento de los SCEE en condiciones estándar a nivel del mar, ya que no es lo mismo que un sistema sea evaluado en determinadas condiciones y posteriormente sea instalado en otras muy diferentes. Por esta razón se necesita hacer referencia a condiciones estándar. Actualmente se emplean dos formas para corregir las potencia que entrega un SCEE, debido a la densidad. Una es afectando directamente la potencia por una relación donde intervienen la temperatura y la presión y la otra es afectando la velocidad asociada a la potencia; la primera forma se define en el documento del anexo 1 y la segunda en el documento del anexo 2. Los dos métodos se emplearon en las evaluaciones presentadas en el capítulo III.

### 2.3.2 b) Corrección por perfil del viento

A menudo, por las condiciones del centro de pruebas, no es posible instalar un anemómetro a la misma altura del centro del rotor del SCEE que se está probando, ya sea por la topografía del sitio o bien por existir otros SCEE's instalados, que pudieran afectar las mediciones de velocidad del viento, esto también puede suceder por el hecho de que la altura de montaje del SCEE a probar sea considerable (Por ejemplo 30 metros) y si no se dispone de una torre de ese tamaño en el sitio adecuado o bien que resulte antieconómico instalar un anemómetro a determinada altura, entonces se prefiere instalarlo en la misma torre donde está ubicado el SCEE, pero a una altura menor, el anemómetro puede ubicarse a una distancia del centro del rotor del SCEE igual a dos veces el diámetro del mismo rotor. Cuando se realiza este tipo de instalaciones, es necesario encontrar la relación que existe entre la velocidad del viento presente a la altura del centro del rotor y la velocidad del viento medida por el anemómetro. Para ello se utiliza el modelo modificado de la ley de la potencia de Mikhail y Justus de 1979, el cual se explica a continuación :

Dicho modelo está definido matemáticamente por:

$$V = V_a [z/z_a]^{\alpha_P}$$

2.1

Donde:

$\alpha_P$  este dado por:

$$\alpha_P = \frac{1}{\ln(Z_g/Z_0)} \left[ \frac{0.088}{(1 - 0.088 \ln(Z_g/10))} \right] \times \ln(V_g/6) \quad 2.2$$

Donde:

$Z_0$  = Rugosidad del terreno en metros

0.5

$Z_g = (Z \times Z_0)$

En esta relación  $V$  es la velocidad media del viento medida a la altura  $Z$  y  $V_g$  es la velocidad media del viento medida a la altura de  $Z_g$ . El exponente  $\alpha_P$  sustituye al valor usado comúnmente de  $1/7$  y es una función de la rugosidad del terreno y de la velocidad media del viento  $V_g$  medida para un periodo dado. De la anterior se desprende el procedimiento para evaluar el coeficiente  $\alpha_P$  que consistirá en instalar 2 anemómetros, uno de ellos a una altura  $Z$  que estará dada por la altura de montaje al centro del rotor del SCEE a probar (esto se realizará antes de instalar el aerogenerador o si no es posible, con el sistema frenado y evitando hasta donde sea posible los efectos de turbulencia o interferencia ocasionados por la presencia del sistema) y el otro anemómetro a una altura  $Z_0$  donde se instalará el anemómetro de pruebas. Una vez instalados, se toman muestras por periodos largos de tiempo y en condiciones climáticas variadas, con diferentes direcciones de viento, ya que el exponente  $\alpha_P$  es una función de la velocidad medida a la altura  $Z_0$ , se hace necesario calcular la rugosidad del terreno, la altura  $Z_0$  de la ecuación 2.2 quedará definida por:

$$Z_0 = \frac{(Z \times Z_g)^{0.5}}{\exp\left\{\left[\frac{\ln(\bar{V}/\bar{V}_g)}{\ln(Z/Z_g)}\right] + 0.088 / (1 - 0.088 \times \ln(Z/10))\right\} \times \ln(\bar{V}_g/6)} \quad 2.3$$

Con los datos obtenidos, se calcula el valor de  $Z_0$  y se obtiene el promedio aritmético de los resultados; este valor se tomará posteriormente como la rugosidad promedio del ter-

preparado para la realización de las pruebas del SCEE.

Durante la evaluación del comportamiento del SCEE, todos los datos de velocidad de viento adquiridos deberán ser modificados usando las ecuaciones 2.1 y 2.2 con el valor de la  $Z_0$  obtenido, utilizándose primero la ecuación 2.2 para el cálculo del factor  $K_r$  y luego la ecuación 2.1 para el cálculo de la velocidad al centro del rotor.

### 2.3.3 c) Cálculo de la eficiencia del sistema y de la relación de velocidad de punta de aspa ( $\lambda$ ).

Uno de los conceptos más importantes y necesarios para conocer el comportamiento real de un SCEE y sobre todo, la cantidad de energía que puede extraer del viento durante un período de tiempo operando a diferentes regímenes de viento, es la eficiencia del sistema. La eficiencia de un SCEE es función de la velocidad del viento y está definida por:

$$\eta (V) = \frac{P_{sal.}(V)}{\frac{1}{2} \rho A V^3} \times 100 \quad 2.4$$

Donde:

$P_{sal.}(V)$  = Potencia entregada por el sistema a la velocidad  $V$ .

$\rho$  = Densidad del aire ( $\text{Kg/m}^3$ )

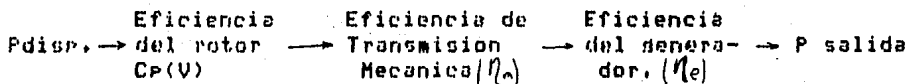
$A$  = Área de barrido del rotor

$V$  = Velocidad del viento

(\*) La densidad del aire utilizada en esta fórmula deberá ser medida en el sitio de pruebas, y si durante el período de pruebas se requiere de la potencia de salida ajustada al nivel del mar se deberá emplear una densidad de  $1,225 \text{ Kg/m}^3$ .

Es interesante hacer notar que la eficiencia del sistema implica la multiplicación de las eficiencias de los subsistemas o partes que componen el sistema total; por ejemplo para un aerogenerador simplificado su eficiencia total estaría de-

finida por:



donde:

$$\eta(V) = C_p(V) \cdot \eta_m \cdot \eta_e$$

2.5

De aquí que el comportamiento real del sistema deba referirse a la eficiencia total de éste ya que es posible y factible que un sistema este implementado con un rotor muy eficiente pero con una caja de transmisión y un generador bajos en eficiencia lo cual repercutirá considerablemente en la potencia que se obtendrá de dicho sistema. Por esto es necesario que se diferencien claramente las curvas de eficiencia de un rotor ( $C_p$ ), de las curvas de eficiencia de un sistema, al considerar su comportamiento real; y no deberá utilizarse por ningún motivo la curva de  $C_p$  para calcular el rendimiento anual de energía (Annual Energy Output) o sea la cantidad de energía que entregaría un sistema durante el período de un año, utilizando la distribución de probabilidad de viento de Rayleigh o bien la distribución de probabilidad de Weibull para estimar el comportamiento del viento con diferentes factores de forma (K) y de escala (C) lo que resulta mas correcto, referencias (6) y (8).

Para que un sistema funcione óptimamente es necesario que todas sus partes estén correctamente acopladas y un error en el diseño del rotor, en el diseño o selección de la caja de transmisión o en el generador eléctrico repercutirá significativamente en la eficiencia de éste.

Por último cabe mencionar que la potencia entregada por el sistema, deberá ser medida de tal manera que se tome como potencia negativa toda aquella utilizada por el sistema para su operación. Es deseable para las pruebas iniciales de un SCEE. (Cuando no es un producto terminado) medir la eficiencia del rotor como parte de la prueba; ya que esto indicará a los diseñadores el comportamiento aerodinámico del mismo y así determinar si se requieren modificaciones. Para lo anterior se hace necesario medir el par de la flecha del rotor y la velocidad rotacional del mismo; ya que la potencia en la flecha del rotor estará dada por:

$$\text{Potencia Rotacional} = \tilde{T} \tilde{W}$$

2.6

Donde:

$\tilde{T}$  = Par

$\tilde{W}$  = Velocidad angular

Y el  $C_p$  podrá ser calculado por:

$$C_p (V) = \frac{\text{Potencia Rotacional (V)}}{1/2 \rho A V^3}$$

2.7

Donde:

$\rho$  = Densidad del aire

$A$  = Area de barrido del rotor

$V$  = Velocidad del viento

De igual forma es deseable conocer la relación de velocidad de punta de aspa contra la velocidad del viento, la cual está definida por:

$$\lambda = \frac{W R}{V}$$

2.8

Donde:

$W$  = velocidad angular en Rad/ses.

$R$  = Radio del rotor en metros

$V$  = Velocidad del viento en m/s

Evidentemente este parámetro puede conocerse si se adquieren los datos de revoluciones por minuto del rotor en función a la velocidad del viento, lo cual puede realizarse utilizando el método de bins que es explicado en la siguiente sección. Este parámetro es muy importante para conocer el correcto acoplamiento rotor-caja de transmisión-generador eléctrico (ó bomba mecánica)



Para concluir éste inciso se establece que se deberán realizar las curvas de eficiencia contra velocidad de viento,  $C_p$  contra velocidad de viento, relación de velocidad de punta de aspa ( $\lambda$ ) contra velocidad del viento y eficiencia contra velocidad del viento.

#### 2.3.4 d) Cálculo y representación de la desviación estandar de los datos ( $\sigma$ )

Una práctica conveniente para analizar los datos para la evaluación de los SCEE, consiste en el cálculo de la desviación estandar de los valores con que fueron obtenidos los puntos para las curvas realizadas. En la curva de potencia se deberá graficar una banda alrededor de los puntos que indique el valor de la desviación estandar.

La desviación estandar es una medida de la inhabilidad del sistema para responder a fluctuaciones rápidas de la velocidad del viento, contrario a una concepción errónea; la desviación estandar no representa una banda de error en las mediciones y no decrecerá su valor a medida que se incremente la duración de las pruebas después que se han tomado suficientes datos para obtener una curva de potencia precisa. Sin embargo la desviación estandar si se decrementará cuando se incremente el tiempo en el cual se toman los promedios de los datos registrados (por ejemplo de 30 seg a 10 minutos) y se puede decir que el tiempo tomado en los promedios, el cual la desviación estandar se decrementará marcadamente, será una aproximación al tiempo de respuesta del SCEE.

### 2.4 Métodos de Evaluación para los SCEE

#### 2.4.1 Método de Bins

En el Método de Bins se agrupan los datos de velocidad de viento y potencia entregada en rangos definidos de antemano, a estos se les denomina bins; el tamaño del rango de cada bin depende del intervalo total de velocidades de viento a considerarse por ejemplo si se considera un intervalo total de 0 m/s a 20 m/s, el número de bins podría ser 20 si el rango del bin es de 1 m/s ó bien 10, si el rango del bin es de 2 m/s. El tamaño del rango de cada bin, en realidad es hasta cierto punto arbitrario, aunque en los intentos hechos por estandarizar este punto se dice que entre el cut-in y la potencia máxima en la curva de potencia contra velocidad de viento, el rango del bin será de 1 m/s, y entre la potencia máxima y el cut-out el rango del bin será de 2 m/s; en realidad todavía no se define

esto con precisión. Lo que si podemos decir es que un indicador del tamaño del bin, será el intervalo total de las velocidades de viento a considerar para el SCRE que se este evaluando. No podemos usar un rango de 2 m/s en un intervalo total de 0 a 5 m/s, porque solo tendríamos dos puntos para definir la curva de potencia, o bien para el caso de un intervalo total de 0 a 30 m/s, si se estableciera rangos de bin de 0.5 m/s, se tendrían 60 puntos para definir la curva, en estas circunstancias se perdería el objetivo principal del método que es simplificar el procesamiento de los datos.

Ya que se han agrupado los datos de potencia y velocidad de viento en los rangos de cada bin, se obtiene la media aritmética de cada uno, este valor es el que se emplea para definir los puntos de la curva.

Por ejemplo si se tienen 500 datos que se quisieren agrupar en 10 bins y el intervalo de velocidades de viento es de 0 a 11 m/s, se tendría un listado como el que aparece a continuación:

\*\*\*\*\*

No. Bin	Rango (m/s)	Frecuencia de velocidad	Velocidad promedio	Potencia promedio
Bin 00	0 >V> 1	25	0.9	0
Bin 01	1 >V> 2	35	1.8	50
Bin 02	2 >V> 3	50	2.7	75
Bin 03	3 >V> 4	100	3.5	100
Bin 04	4 >V> 5	75	4.2	200
Bin 05	5 >V> 6	60	5.7	400
Bin 06	6 >V> 7	65	6.3	620
Bin 07	7 >V> 8	30	7.5	1000
Bin 08	8 >V> 9	35	8.1	1800
Bin 09	9 >V> 10	25	9.7	1600
Bin 10	10 >V> 11	10	10.4	1400

\*\*\*\*\*

Donde; en la primera columna se especifica el número de bin; en la segunda el rango del bin; en la tercera el número de veces en que la velocidad del viento se mantuvo dentro del rango de cada bin; en la cuarta el promedio de los datos de velocidad de viento para cada bin y en la quinta columna el promedio de los datos de potencia entregada asociados a los datos de velocidad de viento para cada bin.

Los valores de velocidad de viento promedio y de potencia promedio, son los pares que definen los puntos de la curva. La

gráfica definida con estos puntos sería la curva de potencia entregada. En la figura 2.1 se muestra la curva para los datos del ejemplo.

Enseguida se presenta un ejemplo con datos ficticios para la obtención de la curva de potencia, con el empleo del método de bins.

Datos Recolectados

\*\*\*\*\*

No.	Velocidad (M/S)	Potencia (Watts)	No.	Velocidad (M/S)	Potencia (Watts)
1	1.5	100	29	7.0	900
2	1.5	100	30	7.0	980
3	1.0	20	31	6.5	740
4	2.2	110	32	7.2	1250
5	1.0	20	33	6.0	700
6	2.2	110	34	9.0	1800
7	5.0	400	35	7.2	1150
8	3.0	150	36	6.0	705
9	5.0	420	37	10.0	2000
10	3.0	150	38	9.0	1700
11	3.5	160	39	10.0	2200
12	3.5	165	40	7.9	1350
13	6.0	700	41	6.1	720
14	6.0	702	42	4.2	230
15	4.0	220	43	6.1	680
16	4.1	240	44	7.9	1500
17	4.1	210	45	4.2	250
18	4.0	215	46	5.0	470
19	7.0	1000	47	5.0	410
20	5.3	410	48	4.2	220
21	8.5	1300	49	3.0	170
22	7.0	1100	50	3.0	170
23	8.5	1700	51	0.9	80
24	8.0	1400	52	0.9	60
25	7.0	1200	53	2.5	115
26	8.0	1500	54	2.7	140
27	5.3	430	55	2.9	150
28	6.5	700	56	4.0	235

\*\*\*\*\*

El siguiente paso después de la recolección de datos es el ordenamiento. Considerando que el intervalo total de velocidades de viento va de 0 a 10 m/s, estableceremos 10 bins.

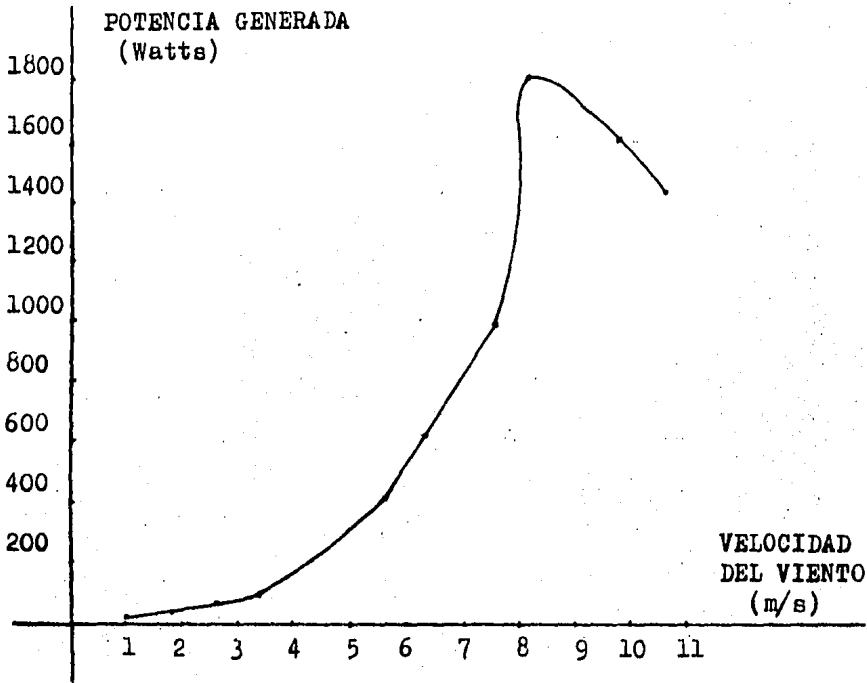


fig. 2.1 Curva de Potencia contra Velocidad del viento.

```

*****
Bin      Rango   Frecuencia  Datos de Velocidad          Vel.
-----
00      0 >V> 1      2      0,9,0,9                    0,9
01      1 >V> 2      4      1,1, 1,5,1,5                1,25
02      2 >V> 3      5      2,2,2,2,2,2,5,2,7,2,9      2,5
03      3 >V> 4      6      3,3,3,3,3,3,5,3,5          3,16
04      4 >V> 5      8      4,4,4,4,4,4,1,4,1,4,2,4,2,4.  4,1
05      5 >V> 6      6      5,5,5,5,5,5,3,5,3          5,1
06      6 >V> 7      8      6,6,6,6,6,6,1,6,1,6,5,6,5    6,15
07      7 >V> 8      9      7,7,7,7,7,7,7,7,2,7,2,7,9,7,9  7,9
08      8 >V> 9      4      8,8,8,5,8,5                  8,25
09      9 >V>10     2      9,9                            9
10     10>V>11     2      10,10                          10
*****

```

Para la potencia tendremos !

Bin	Datos de Potencia Asociados a las Velocidades	Pot. Prom.
00	80,60	70
01	20,20,100,100	60
02	110,110,115,140,150	125
03	150,150,170,170,160,165	160,833
04	215,220,235,210,240,220,230,250	227,5
05	400,410,420,470,410,430	423,333
06	700,700,702,705,680,720,700,740	705,875
07	900,980,1000,1100,1200,1150,1250,1350,1500	1031,11
08	1400,1400,1500,1700	1525
09	1700,1800	1750
10	2000,2200	2100

Con los valores de velocidad promedio y de la potencia promedio asociados a cada bin tendremos los pares de valores para poder graficar la curva de potencia. El tamaño de las escalas para el eje de la potencia, es el valor de la potencia de diseño del SCEE, si este es de 4 Kw; y para el eje de velocidad de viento, hasta el valor de velocidad máxima que se haya presentado en la prueba. Según lo establecido en el documento de la referencia 1, las abscisas deben extenderse hasta una velocidad de 20 m/s independientemente del sistema.

Suponiendo que los datos obtenidos, para el caso presentado, pertenecían a un aerogenerador de 3 Kw; la gráfica de la curva de potencia quedará como se muestra en la figura 2.2.

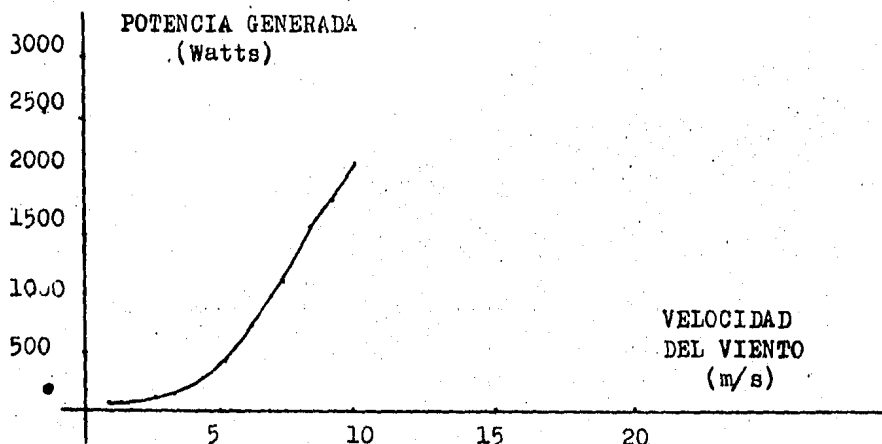


fig. 2.2 Gráfica de Potencia contra Velocidad

#### 2.4.2 Método de Acoplamiento de Frecuencia

El segundo método considerado es el de acoplamiento de frecuencia; en este método la curva de potencia contra velocidad de viento está definida por un grupo de pares de puntos, que tienen probabilidades acumulativas iguales. Las lecturas de potencia y velocidad se toman simultáneamente, pero para una misma velocidad que se repita le pueden corresponder dos valores diferentes de potencia y viceversa.

La correspondencia en este caso no es determinante, lo que define los pares de datos es la frecuencia acumulada de los grupos de datos separadamente. La interpretación de este método puede ser comprendida más fácilmente de acuerdo con lo siguiente:

Si se grafican las velocidades de viento contra su frecuencia acumulada y de manera igual para la potencia. Las curvas que se obtienen se comparan y para las mismas frecuencias acumuladas en velocidad y en potencia, se obtienen los pares de datos. En las figuras 2.3 A y B puede visualizarse la interpretación dada a este método.

Acoplando los valores para una misma frecuencia acumulada se obtienen los pares de valores de la curva de potencia.

En el ejemplo que se da a continuación se aplica el método de acoplamiento de frecuencias. Y en las figuras 2.4 A y B se observan las curvas de frecuencias acumulativas para la velocidad y la potencia del ejemplo presentado.

Datos Recolectados

\*\*\*\*\*

No.	Velocidad (M/S)	Potencia (Watts)	No.	Velocidad (M/S)	Potencia (Watts)
1	1.0	0	25	6.7	900
2	1.2	0	26	6.9	950
3	2.1	10	27	7.0	1100
4	2.5	10	28	7.2	1150
5	2.5	20	29	7.5	1300
6	3.0	40	30	7.5	1350
7	3.0	45	31	7.9	1500
8	3.3	50	32	7.9	1800
9	3.3	70	33	8.0	2000
10	3.7	90	34	8.3	2300
11	4.0	95	35	8.5	2900
12	4.2	100	36	8.9	3000
13	4.2	120	37	8.9	3200
14	4.4	140	38	9.1	3300
15	4.7	200	39	9.1	3400
16	5.0	300	40	9.3	3600
17	5.0	390	41	9.4	3700
18	5.1	420	42	9.5	4000
19	5.3	460	43	9.5	4100
20	5.4	500	44	9.6	4100
21	5.4	580	45	10.0	5000
22	6.1	620	46	10.0	5100
23	6.1	700	47	10.1	5100
24	6.5	710	48	10.3	5120

\*\*\*\*\*

Para que resulte mas objetivo se ordenan los datos de la siguiente forma:

Velocidad

```
*****
```

Dato	Frec.	Frec. Acum.	Dato	Frec.	Frec. Acum.	Dato	Frec.	Frec. Acum.
1.0	1	1	5.1	1	18	8.3	1	34
1.2	1	2	5.3	1	19	8.5	1	35
2.1	1	3	5.4	2	21	8.9	2	37
2.5	2	5	6.1	2	23	9.1	2	39
3.0	2	7	6.5	1	24	9.3	1	40
3.3	2	9	6.7	1	25	9.4	1	41
3.7	1	10	6.9	1	26	9.5	2	43
4.0	1	11	7.0	1	27	9.6	1	44
4.2	2	13	7.2	1	28	10.0	2	46
4.4	1	14	7.5	2	30	10.1	1	47
4.7	1	15	7.9	2	32	10.3	1	48
5.0	2	17	8.0	1	33			

```
*****
```

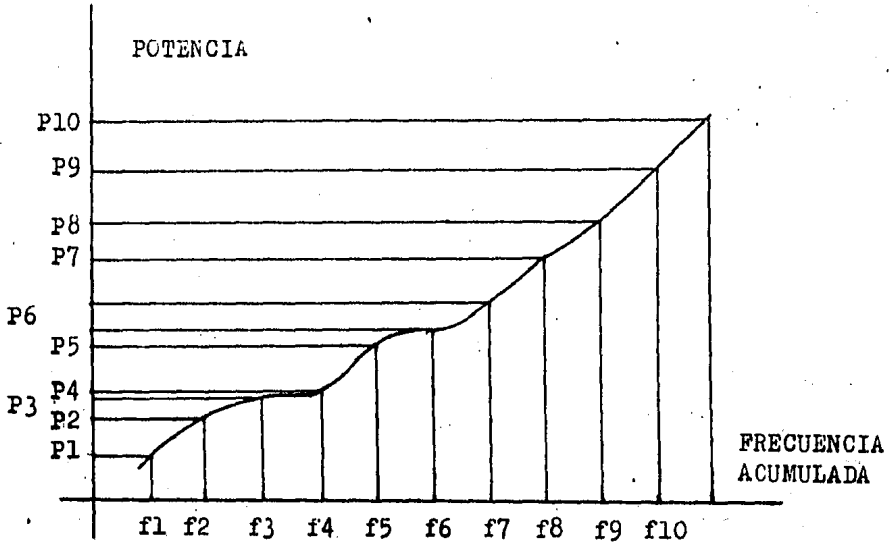
Potencia

```
*****
```

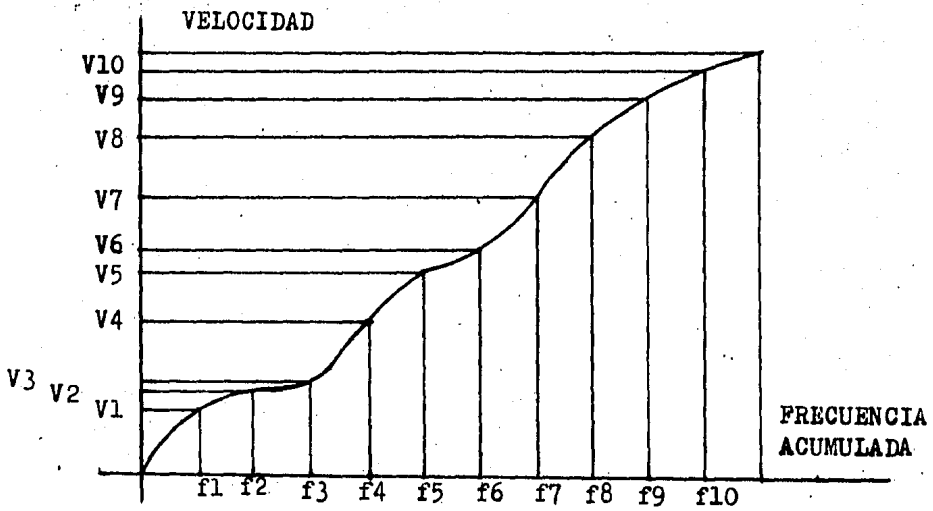
Dato	Frec.	Frec. Acum.	Dato	Frec.	Frec. Acum.	Dato	Frec.	Frec. Acum.
0	1	1	390	1	17	1800	1	32
0	1	2	420	1	18	2000	1	33
10	2	4	460	1	19	2300	1	34
20	1	5	500	1	20	2900	1	35
40	1	6	580	1	21	3000	1	36
45	1	7	620	1	22	3200	1	37
50	1	8	700	1	23	3300	1	38
70	1	9	710	1	24	3400	1	39
90	1	10	900	1	25	3600	1	40
95	1	11	950	1	26	3700	1	41
100	1	12	1100	1	27	4000	1	42
120	1	13	1150	1	28	4100	2	44
140	1	14	1300	1	29	5000	1	45
200	1	15	1350	1	30	5100	2	47
300	1	16	1500	1	31	5120	1	48

```
*****
```





(A)



(B)

fig. 2.3 Curvas de Potencia y Velocidad contra sus frecuencias acumuladas.

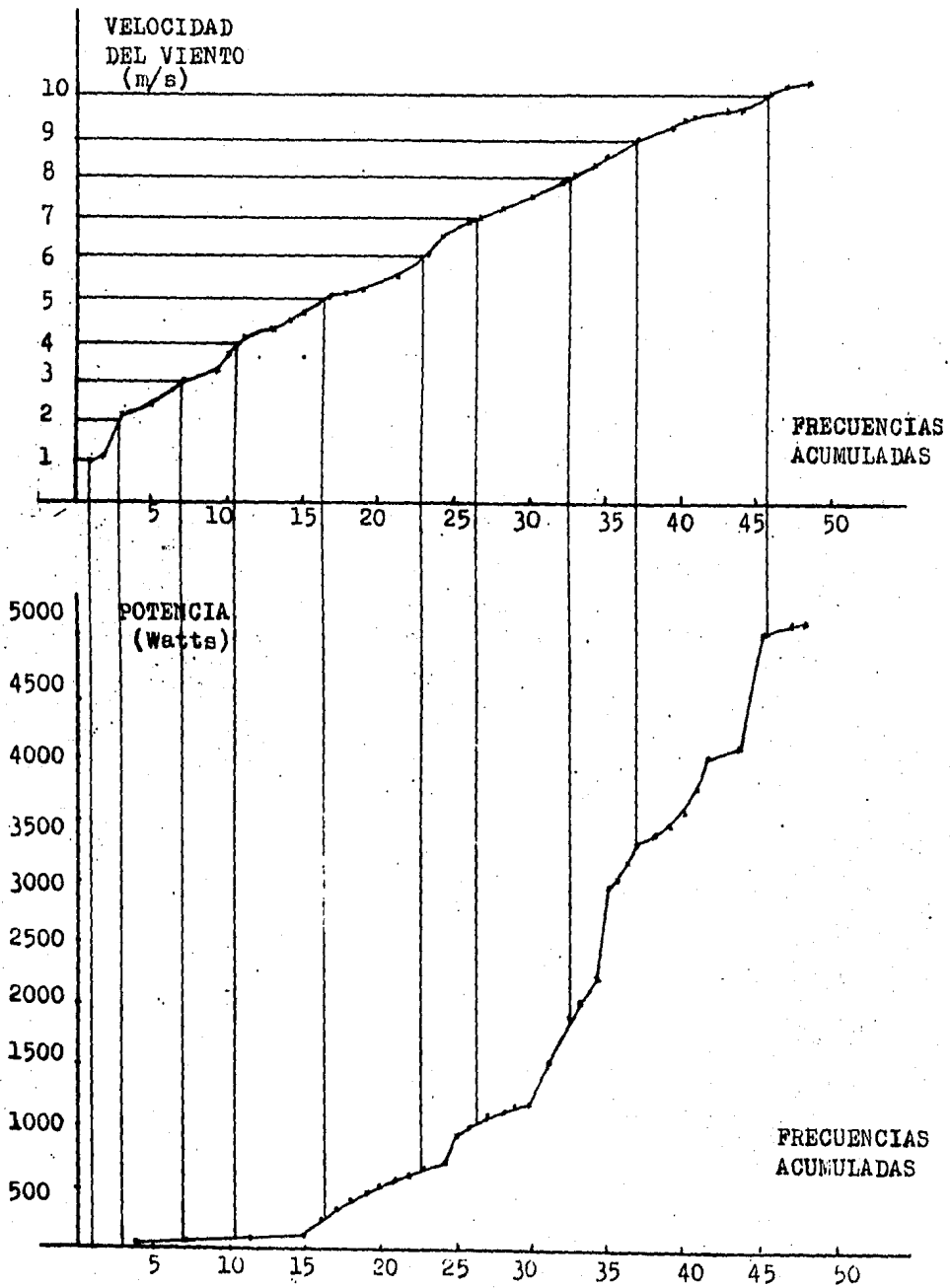


fig. 2.4 Curvas de Potencia y Velocidad contra sus Frecuencias Acumuladas

De esta forma, los pares de valores asociados, de acuerdo al acoplamiento de frecuencia, se obtienen las gráficas, quedando los pares de valores como se muestra a continuación:

```

*****
Velocidad de viento          Potencia
(M/S)                        (Watts)
-----
1                             0
2                             0
3                             ~ 40
4                             ~ 90
5                             ~300
6                             ~640
7                             ~1100
8                             ~2000
9                             ~3400
10                            ~5100
*****

```

Con los pares de valores se elabora la gráfica correspondiente suponiendo que la potencia de diseño es de 6 Kw tendríamos una curva como la que se muestra en la figura 2.5.

### 2.4.3 Método de la Potencia más Probable

El tercer método es el de la potencia más probable; el cual consiste en encontrar la moda o el valor más frecuente de potencia asociado a cada velocidad de viento. Como se sabe, los valores de potencia asociados a una misma velocidad de viento pueden variar; es decir que si se repite 50 veces el valor de 5 m/s y la potencia correspondiente a este valor es de 10 valores de 3000; 20 de 2700; 15 de 2300; y 5 de 3100, el valor de potencia que corresponderá a los 5 m/s será el de 2700, ya que este fué el que más se repitió o sea el más probable.

Con este método se pueden identificar las ramas en una curva con histéresis; este fenómeno se ocasiona debido a la inercia del sistema y siempre está presente.

A continuación se da un ejemplo del empleo del método con valores ficticios

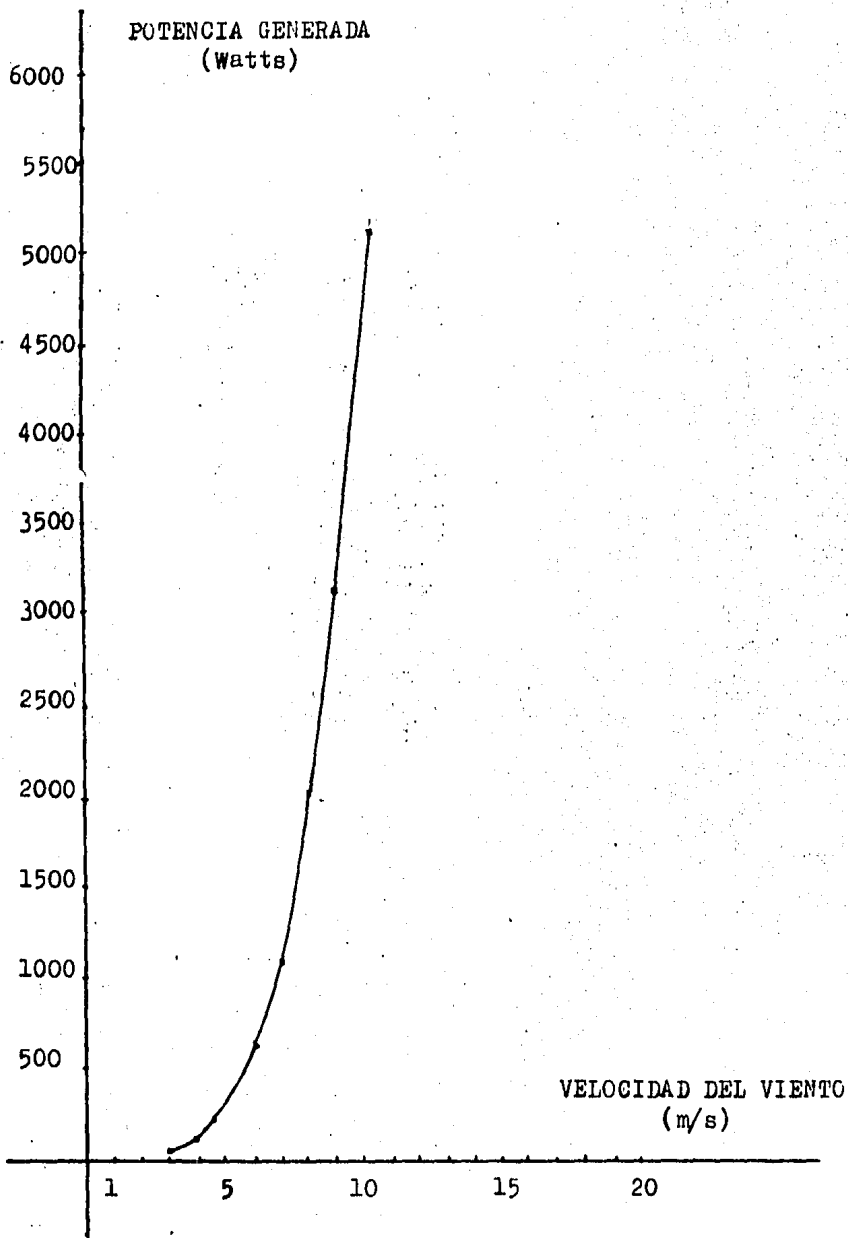


fig. 2.5 Gráfica de Potencia contra Velocidad del Viento

\*\*\*\*\*

No.	Velocidad (M/S)	Potencia (Watts)	No.	Velocidad (M/S)	Potencia (Watts)
1	1	100	18	6	1900
2	1	100	19	6	1950
3	2	300	20	6	1990
4	2	320	21	7	2100
5	3	600	22	7	2100
6	3	600	23	7	2300
7	3	620	24	7	2400
8	3	640	25	7	2500
9	4	900	26	8	2800
10	4	900	27	8	2800
11	4	950	28	8	2900
12	5	1000	29	9	3000
13	5	1500	30	9	3550
14	5	1500	31	9	3550
15	5	1500	32	20	4000
16	6	1800			
17	6	1900			

\*\*\*\*\*

El ordenamiento ya estaba dado en los datos. Los pares de valores para obtener la curva serán los siguientes !

\*\*\*\*\*

Velocidad (M/S)	Potencia (Watts)
1	100
2	300(*)
3	600
4	900
5	1500
6	1900
7	2100
8	2800
9	3350
10	4000

\*\*\*\*\*

(\*) se puede tomar este valor o bien el de 320. O se puede esperar a disponer de mas datos.

La gráfica quedará como se muestra en la figura 2.6., considerando que el sistema está diseñado para 8 Kilowatts.

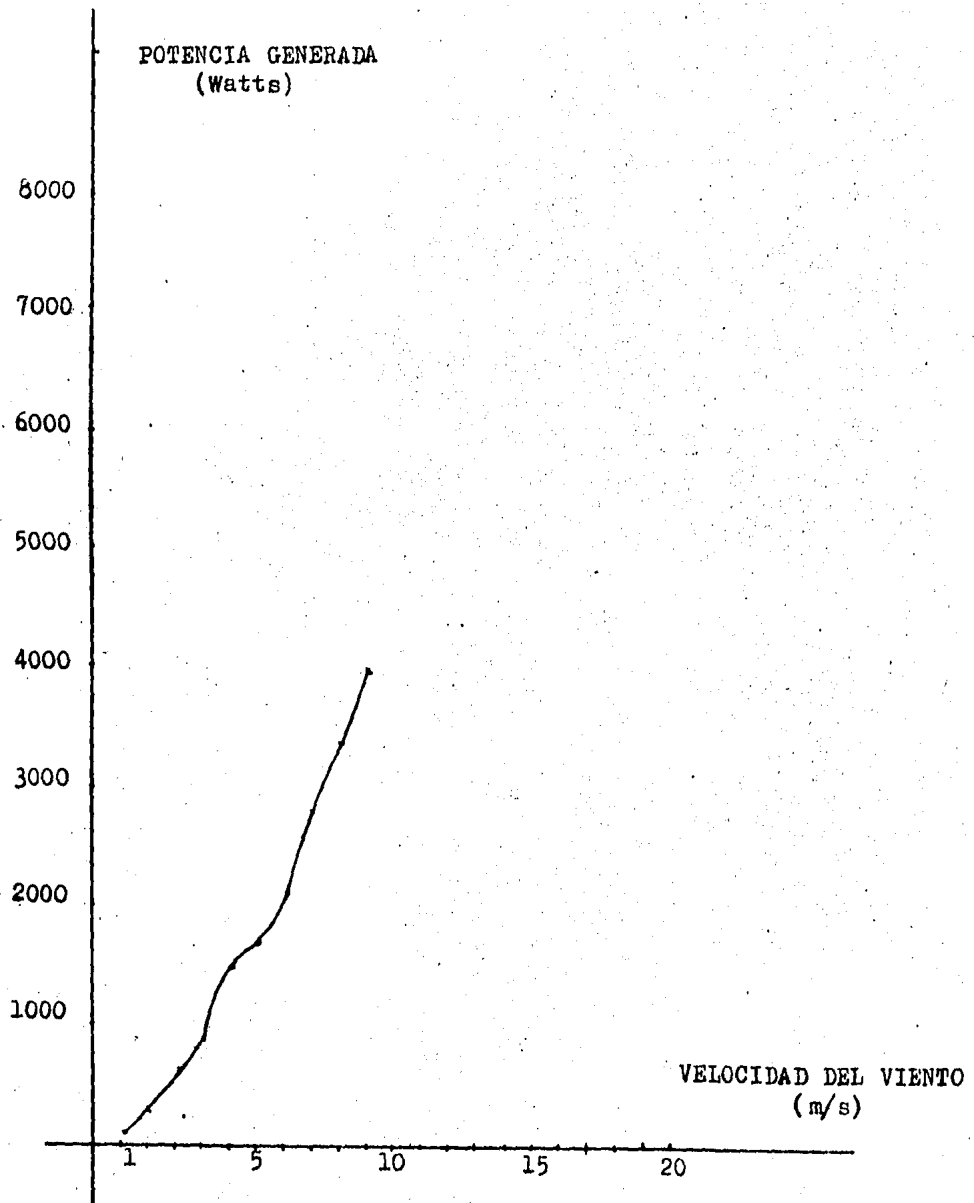


fig. 2.6 Gráfica de Potencia contra Velocidad del Viento

**CAPITULO III  
PRUEBAS EN VIENTO LIBRE  
DE UN AEROGENERADOR DE  
6 KILOWATTS, DE UNA  
AEROBOMBA MECANICA  
DE 200 WATTS Y DE  
UN AEROGENERADOR  
10 KILOWATTS**

**3.1 INTRODUCCION**

El presente capítulo se divide en tres partes básicamente, en la primer parte se dan las características y el proceso efectuado en la evaluación de un aerogenerador comercial de 6 Kilowatts, así como los resultados obtenidos de ésta; en la segunda parte del capítulo se presentan las características, el proceso de evaluación y los resultados preliminares obtenidos de un prototipo de aerobomba de 200 watts y en la tercera parte como en las anteriores se presentan características del proceso efectuado y los resultados obtenidos de la evaluación de un prototipo de aerogenerador de 10 kilowatts denominado "Albatros", que fué desarrollado en el IIE y que es la parte principal del proyecto 3467.

De lo más relevante que se llevó a cabo en el ter. parte fué la interconexión del aerogenerador a una red de distribución de energía eléctrica, a través de un inversor sincrónico, el empleo de éste último fué para adecuar la energía generada por el SCEE a las características requeridas para evitar problemas de acoplamiento entre la red eléctrica y el SCEE. El número de datos registrados para la evaluación de este sistema fué de mas de dos mil, y fueron tomados a través de un "analizador de pequeños sistemas conversores de energía eólica (APSCEE)", que los registra en periodos de tiempo definidos de antemano y que además pueden considerarse como datos promediados. Cabe mencionar que dicho analizador fué desarrollado y construido en el Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE). En la segunda parte es importante mencionar que la Aerobomba fué diseñada y construida dentro del proyecto denominado "Prototipos de Sistemas Conversores de Energía Eólica para Bombeo de Agua en Comunidades Rurales" cuyo número de registro en el IIE es el 3467 y que recibe apoyo financiero de la Organización de Estados Americanos (OEA).

El número de datos registrados para la evaluación de la aerobomba fué de 275; sus registros de dato fueron tomados mediante lecturas de nivel de agua y los de velocidad de viento por medio del APSCEE. En la tercer parte para la valorización del aerogenerador de 10 Kw se emplearon dos métodos de evaluación; el método de la potencia más probable con datos instantáneos y el método de bins utilizando datos promediados. El total de datos instantáneos que se obtuvo fué de 682 y el total de datos promediados es de 620. Los datos instantáneos se registraron con instrumentos convencionales y los datos promediados fueron registrados con el APSCEE. Cabe mencionar que este aerogenerador tendrá cambios estructurales considerables debido a que sufrió daños durante el periodo de su evaluación; los daños consistieron en la rotura y desprendimiento de una de sus aspas así como el torsamiento de la flecha; por esta razón se tomaron dos grupos de datos, unos antes y otros después del daño. Con los resultados de su evaluación se determinará si puede ser conectado a una bomba eléctrica sumergible de 7.5 HP y posteriormente el rotor de la máquina se acoplará a una bomba mecánica de carrera variable de desplazamiento positivo.

Los tres sistemas fueron instalados en la Estación Experimental Eólica "El Gavilero" donde se efectuaron todas las pruebas y se obtuvieron todos los registros.

### 3.2 Características Generales de un Aerogenerador Comercial de 6 Kilowatts

El aerogenerador comercial de 6 Kw que se considera en este trabajo, fué diseñado para ser interconectado a una línea de distribución de 220 volts de corriente alterna y frecuencia de 60 hertz; por medio de un inversor síncrono de 10 kilowatts.

#### 3.2.1 Características generales del Rotor

Tipo de eje.....	Horizontal
Exposición al viento .....	Arriba
Angulo de paso de aspas .....	Fijo
Número de aspas .....	3
Diámetro .....	4.26 m



2

Area barrida ..... 14,25 m<sup>2</sup>  
Material de las aspas ..... Fibra de vidrio  
Orientacion al viento ..... Por medio de la cola

### 3.2.2 Características de Operación

Potencia nominal ..... 6000 watts a 11,6 m/s (\*)  
Potencia Intermitente ..... 8000 watts a 12,8 m/s (\*)  
Potencia máxima ..... 10000 watts a 13,8 m/s (\*)  
Velocidad de inicio de giro ..... 4,0 m/s (\*)  
Velocidad de inicio de generación ..... 3,0 m/s (\*)  
Velocidad de paro ..... 27,7 m/s (\*)  
Velocidad de sobrevivencia ..... 55,5 m/s (\*)

(\*) Velocidades de viento aproximadas

### 3.2.3 Control de Sobrevelocidad

Sistema Mecánico: mediante el desplazamiento del eje de la cola respecto al eje del rotor e inclinación ajustable del mismo respecto a la vertical.

### 3.2.4 Características Generales del Sistema Eléctrico

#### Generador

Tipo ..... Imanes permanentes  
Número de polos ..... 28  
Número de fases ..... 3

### 3.2.5 Control de sobrevelocidad

El sistema eléctrico consta de sensores electrónicos de corriente y revoluciones por minuto para el freno dinámico automático, que actúa por medio de la conexión de resistencias entre las fases del generador. Se tiene acceso a operación de freno dinámico en forma manual.

### 3.2.6 Salida:

Corriente directa rectificada de tres fases para uso con un inversor sincrónico.

### 3.2.7 Inversor Sincrónico

Inicio de operación .....	140 Volts CD	
Operación nominal .....	200 Volts CD	6000 watts
Operación intermitente .....	220 Volts CD	10000 watts
Operación máxima .....	230 Volts CD	

### 3.2.8 Generalidades

Peso .....	300 Kg
Accionamiento Rotor-Generador ...	Directo

### 3.3 Objetivos de la Prueba al Aerogenerador Comercial de 6 Kw

Los objetivos fundamentales de las pruebas fueron obtener las curvas de:

- a) Potencia generada contra velocidad del viento sin corrección por densidad del aire.
- b) Potencia generada contra velocidad del viento con corrección por densidad del aire.
- c) Eficiencia del sistema contra velocidad del viento.

### 3.4 Instalación del Sistema para la Prueba

El aerogenerador comercial de 6 kilowatts fué instalado en una torre de 10 metros de altura sobre el nivel del piso, quedando la altura del centro del rotor a 11.07 metros. El sensor de velocidad (anemómetro) fué colocado en otra torre situada a 10 metros de distancia y a una altura de 11.07 metros; en la figura 3.1 A se muestra un esquema de la instalación.

La instalación eléctrica se llevó a cabo como se muestra en la figura 3.1 B. Puede observarse que del aerogenerador salen las conexiones al sistema de control de sobrevelocidad y frenado; el objetivo de éste es detener el funcionamiento de la máquina cuando ésta se excede de un límite determinado de corriente y/o voltaje, o bien de las revoluciones por minuto que alcance. La forma como se lleva a cabo el frenado dinámico es mediante la conexión de resistencias de bajo valor resistivo y alta potencia a disipar entre las fases del generador. Posteriormente del control salen conexiones al inversor sincrónico, cuya función es adecuar la energía que entrega el aerogenerador, para después aplicarla a la línea pública de distribución de energía eléctrica, a través de un wathhorímetro, que tiene la función de contar la energía entregada por el sistema.

El sistema de registro de datos lo constituye el Analizador de Peaños Sistemas Conversores de Energía Eólica (APSCEE), el cual tomó los datos del anemómetro y del wathhorímetro antes mencionados.

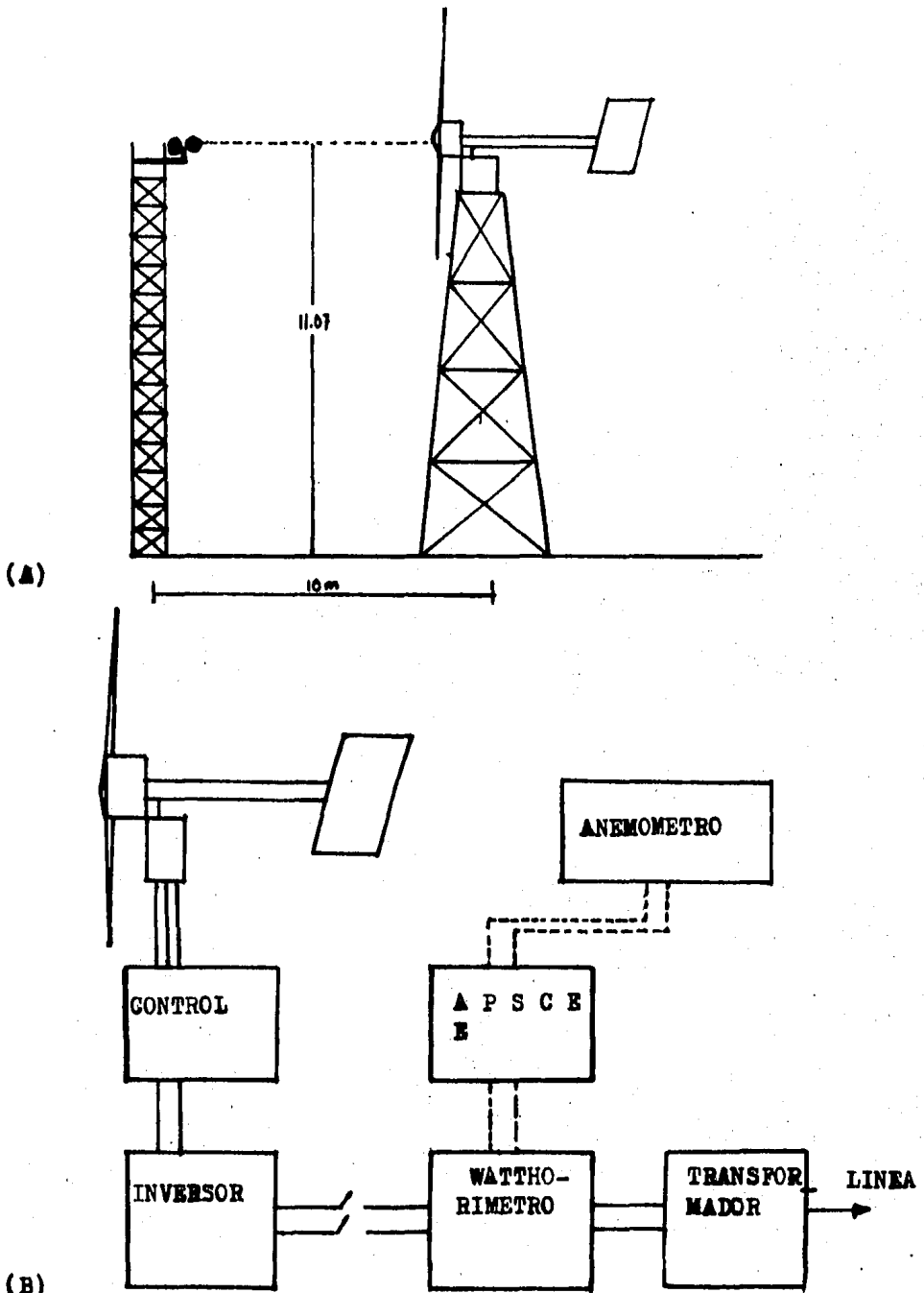


fig. 3.1 Instalaciones del sistema

### 3.5 Método de Prueba para el Aerogenerador de 6 Kw

La manera como se adquirieron los datos y la forma como se procesaron se explica a continuación :

Durante el periodo de pruebas se adquirieron simultáneamente los datos de velocidad promedio de viento en metros/segundo y de potencia promedio generada en watts.

Los datos tanto de velocidad como de potencia se estuvieron imprimiendo cada 5 minutos en rollos de papel, gracias al empleo del Analizador de Pequeños Sistemas Convertidores de Energía Eólica (APSCEE-JI -IIE); el cual los registra para la velocidad del viento; por medio de un anemómetro colocado tal como se indicó en la sección anterior; dicho anemómetro genera un determinado número de pulsos por cada vuelta dada; para este caso específico; por cada 16 vueltas se genera un pulso; de tal forma que el APSCEE cuenta los pulsos generados por el anemómetro durante un periodo de tiempo que se ha fijado de antemano (5.04 minutos en este caso) y los imprime al final del periodo; de esta forma la velocidad media del viento en dicho periodo puede calcularse mediante la siguiente relación:

$$\text{Velocidad Media} = \text{No. Pulsos} \times (0.0887) \text{ m/s} \quad 3.1$$

( 5.04 minutos )

Donde el valor de 0.0887 es una constante particular que depende de las características del anemómetro y que sirve para transformar los pulsos en unidades de metros sobre segundo.

Todos los anemómetros están diseñados de tal forma que su comportamiento sea lineal respecto a la velocidad del viento; en la figura 3.2 puede observarse como varían las revoluciones de un anemómetro respecto a la velocidad del viento.

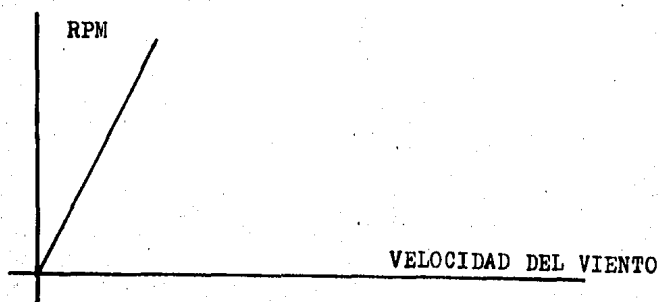


fig. 3.2 Curva de Anemómetro

La pendiente de la recta define la constante particular del anemómetro, y las RPM's promedio están definidas por:

$$\text{R.P.M} = \frac{\text{Número de pulsos} \times (K)}{\text{Tiempo en minutos}} \quad 3.2$$

Donde la constante K es el número de vueltas que da el anemómetro por pulso. Para determinar la velocidad del viento en un periodo de 5.04 minutos se empleará:

$$\text{Vel. viento} = \frac{\text{Número de Pulsos}}{5.04} \quad 3.3$$

Ya que

$$K = \frac{\text{RPM}}{\text{Vel. viento}} \quad 3.4$$

En el caso específico del anemómetro que se empleó, el valor de K es 16 y los resultados obtenidos estaban dados en millas sobre hora, por esta razón se afectó la relación 3.3 por:

$$\frac{\text{Millas}}{\text{hora}} = \frac{1609 \text{ m}}{1 \text{ Milla}} \times \frac{1 \text{ hora}}{3600 \text{ seg}} = 0.447$$

Por lo tanto:

$$\text{Vel. viento} = \frac{\text{No. Pulsos}}{5.04} (0.0447)$$

$$\text{Vel. viento} = \text{No. Pulsos} \times (0.0887) \quad (\text{m/s})$$

Las relaciones anteriores son aplicables únicas y exclu-

sivamente al anemómetro que se empleó.

Para la potencia media generada se utilizó como sensor el disco del wathhorímetro conectado a la red eléctrica; al cual se le pusieron 8 marcas espaciadas igualmente; dichas marcas fueron sensadas por el APSCEE de tal forma que por cada vuelta del disco el analizador contó 8 pulsos; y ya que el wathhorímetro gira una vuelta por cada 7.2 watts-hora generados, la potencia promedio generada se calcula de acuerdo con la siguiente relación; para una base de tiempo de 5.04 minutos:

$$\text{Potencia promedio generada} = \text{No. pulsos} \times 10.71 \text{ (watts)} \quad 3.5$$

Donde 10.71 es una constante definida por la siguiente relación:

$$\frac{7.2 \text{ watts-hora}}{8 \text{ pulsos}} \times \frac{60 \text{ minutos}}{\text{hora}} \times \frac{1}{5.04 \text{ minutos}} = 10.71 \frac{\text{watts}}{\text{pulso}}$$

Los datos obtenidos en número de pulsos fueron introducidos en una computadora VAX-VMS propiedad del IIE en forma de archivo y se procesaron por medio de un programa de cómputo que se presenta en el anexo 3; su propósito es transformar los pulsos en unidades congruentes para posteriormente procesarlos por el método de bins. Cabe mencionar que éste programa es preliminar y está siendo perfeccionado para formar un programa completo que pueda evaluar íntegramente las características de cualquier SCEE. Con el empleo de dicho programa se obtuvieron los siguientes resultados:

- Número de datos por cada bin
- Potencia promedio generada para cada bin
- Desviación estandar de la potencia para cada bin
- Velocidad de viento promedio
- Desviación estandar de la velocidad del viento
- Eficiencia del sistema
- Potencia con corrección por densidad del aire

Para obtener la eficiencia del sistema se empleo la siguiente ecuación:

$$\text{Eficiencia} = \frac{\text{Potencia generada}}{\text{Potencia disponible}}$$

$$\eta = \frac{\text{Potencia generada a la velocidad } V}{\frac{1}{2} \rho A V^3} \quad 3.6$$

### 3.6 Método de Corrección por Densidad del Aire

La corrección por densidad del aire se llevó a cabo, obteniendo el valor típico de la densidad en el lugar donde se llevó a cabo la prueba (Estación Experimental Eólica "El Gavillero"). Cabe señalar que la importancia que ofrece la corrección por densidad del aire es relevante, ya que un SCEE puede variar considerablemente su eficiencia y funcionamiento, del lugar donde se llevó a cabo su evaluación y el lugar donde se vaya a instalar; de aquí que la corrección por densidad del aire define la cantidad de energía que un SCEE entregará en condiciones estándar o nivel del mar. El modelo matemático empleado para determinar la densidad típica fue:

$$\text{Densidad Típica} = 1.225 \times \left[ \frac{288.13}{\bar{T} \text{ } ^\circ\text{K}} \right] \times \left[ \frac{\bar{P} \text{ mm Hg}}{760} \right] \quad 3.7$$

Donde T y P son los valores medios de temperatura del aire y de presión barométrica del lugar de la prueba.

El valor de la densidad típica obtenida se aplicó a cada intervalo (bin) en forma individual de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$\begin{array}{l} \text{Potencia corregida} \\ \text{por densidad en} \\ \text{condiciones estándar} \\ \text{a nivel del mar} \end{array} = \frac{\text{Densidad Estándar}}{\text{Densidad Típica}} \times \begin{array}{l} \text{Potencia Generada} \\ \text{en el lugar de} \\ \text{pruebas} \end{array} \quad 3.8$$



Donde los valores de densidades de aire son:

$$\rho_{\text{Estandar}} = 1.225 \text{ Kg/m}^3$$

$$\rho_{\text{típica}} = 1.1036036 \text{ Kg/m}^3$$

Por lo tanto :

$$\frac{\text{Densidad estandar } 1.225}{\text{Densidad típica } 1.10360} = 1.111$$

El valor anterior indica que el factor de corrección incrementará el valor de la potencia generada en condiciones estandar a nivel del mar, en un 11.111 %, por lo tanto :

$$P_{\text{correctada}} = P_{\text{generada en lugar de pruebas}} \times 1.11 \text{ [watts]}$$

El método anterior esta de acuerdo con el método propuesto en el documento de la referencia 4 de la bibliografía, y que también es empleado en la estación de prueba de Rocky Flats dependiente de Rocwell International Co..

La velocidad de inicio de generación también fue corregida de acuerdo con la referencia 4, mediante la ecuación:

$$\frac{V_{c.e.} - V_{hav}}{V_{hav}} = \frac{1}{2} \times \frac{\rho_{c.e.} - \rho_{tip}}{\rho_{tip}}$$

$$V_{c.e.} = \left[ \frac{1}{2} \times \frac{\rho_{c.e.} - \rho_{tip}}{\rho_{tip}} \right] \times V_{hav} + V_{hav} \quad 3.9$$

Donde:

$V_{c.e.}$  = Velocidad de inicio de generación, corregida en condiciones estándar.

$V_{sav}$  = Velocidad de inicio de generación en el lugar de pruebas (Estación "El Gavillero).

$\rho_{c.e.}$  = Densidad del aire en condiciones estándar.

$\rho_{tip}$  = Densidad típica del aire en el lugar de pruebas durante la prueba (Estación "El Gavillero).

Es importante hacer notar que, la velocidad asociada a la potencia correspondiente a un 10 % de la potencia total es la única velocidad corregida que se tomó en cuenta para la gráfica de la curva de potencia, de acuerdo con la información establecida en el documento de la referencia 4.

Las evaluaciones de los tres SCEE presentados en este capítulo fueron corregidas por densidad del aire por los métodos mencionados en esta sección.

### 3.7 Resultados de la Prueba del Aerogenerador Comercial de 6 Kw

De acuerdo con el procesamiento de los datos obtenidos, mediante el programa de cómputo que se presenta en el anexo 3, se obtuvieron los resultados presentados en las figuras 3.3 y 3.4. Y en las figuras 3.5 y 3.6 se presentan las gráficas de las curvas de potencia contra velocidad de viento y de eficiencia contra velocidad de viento.

RESULTADOS DE PRUEBAS DE COMPORTAMIENTO EN VIENTO LIBRE DE SCEE'S

DATOS GENERALES

NOMBRE DEL SISTEMA :  
 TIPO: AEROGENERADOR  
 POTENCIA NOMINAL (WATTS): 6000 WATTS A 11.6 M/S  
 DIAMETRO DEL ROTOR (METROS): 4.26  
 FABRICANTE:  
 LUGAR DE PRUEBAS : ESTACION EXPERIMENTAL EOLICA "EL GAVILLERO"  
 FECHA DE PRUEBAS : JULIO DE 1984

RESULTADOS

IN	D/BI	VEL1	DSV1	PGEN1	DSPI	RPM	DSR	EFE	LRA	PGEN2	VEL2	GASTO
0	10	0.8	0.2	71	64	0	0	99.9	0.0	79	0.7	0.0
1	28	1.6	0.3	54	21	0	0	99.9	0.0	60	1.5	0.0
2	67	2.6	0.3	57	21	0	0	43.1	0.0	64	2.4	0.0
3	168	3.6	0.3	85	70	0	0	23.6	0.0	95	3.4	0.0
4	431	4.5	0.3	188	101	0	0	26.2	0.0	209	4.2	0.0
5	492	5.5	0.3	387	170	0	0	29.5	0.0	431	5.2	0.0
6	440	6.5	0.3	705	202	0	0	32.6	0.0	784	6.1	0.0
7	309	7.5	0.3	974	264	0	0	29.7	0.0	1083	7.1	0.0
8	183	8.4	0.3	1260	243	0	0	26.6	0.0	1400	8.0	0.0
9	134	9.4	0.3	1517	254	0	0	23.1	0.0	1686	8.9	0.0
0	58	10.3	0.2	1701	259	0	0	19.7	0.0	1891	9.7	0.0
1	8	11.4	0.3	1887	227	0	0	16.1	0.0	2098	10.8	0.0
2	1	12.2	0.0	2452	0	0	0	17.0	0.0	2725	11.6	0.0
3	0	0.0	0.0	0	0	0	0	0.0	0.0	0	0.0	0.0
4	1	14.8	0.0	1080	0	0	0	4.3	0.0	1201	13.9	0.0
5	1	15.9	0.0	1026	0	0	0	3.2	0.0	1141	15.0	0.0
6	0	0.0	0.0	0	0	0	0	0.0	0.0	0	0.0	0.0
7	0	0.0	0.0	0	0	0	0	0.0	0.0	0	0.0	0.0
8	0	0.0	0.0	0	0	0	0	0.0	0.0	0	0.0	0.0
9	0	0.0	0.0	0	0	0	0	0.0	0.0	0	0.0	0.0
0	0	0.0	0.0	0	0	0	0	0.0	0.0	0	0.0	0.0

fig. 3.3

## RESULTADOS DE EVALUACION

### RESUMEN Y PROMEDIOS TOTALES

VELOCIDAD MEDIA DEL PERIODO DE PRUEBAS (M/S): 6.08825  
NUMERO DE DATOS TOMADOS: 2331  
POTENCIA PROMEDIO GENERADA (WATTS): 624.343  
REVOLUCIONES POR MINUTO PROMEDIO:  
TIEMPO DE MUESTREO FIJO: 5  
DENSIDAD DEL AIRE TIPICA PROPORCIONADA (KG/M3): 1.102  
EFICIENCIA PROMEDIO DEL SISTEMA (%): 294.761  
LAMBDA PROMEDIO DEL SISTEMA (ADIM):

### INTERPRETACION DE TABLA DE RESULTADOS

BIN=NUMERO DE BIN o RANGO DE VELOCIDAD DE VIENTO 1 M/S  
D/BIN=NUMERO DE DATOS POR CADA BIN  
VEL1=VELOCIDAD PROMEDIO DEL VIENTO EN MTS/SEG  
DSV1=DESVIACION ESTANDAR DE VEL1  
PGEN1=POTENCIA SUMINISTRADA POR EL SISTEMA SIN CORRECCION POR DENSIDAD  
EL AIRE (WATTS)  
DSP1=DESVIACION ESTANDAR DE PGEN1 (WATTS)  
RPM=REVOLUCIONES POR MINUTO DEL ROTOR  
DSR=DESVIACION ESTANDAR DE RPM  
EFE=EFICIENCIA DEL SISTEMA (%)  
LBA=RELACION DE VELOCIDAD DE PUNTA DE ASPA (ADIM)  
PGEN2=POTENCIA CORREGIDA A CONDICIONES ESTANDAR(\*)  
VEL2=VELOCIDAD CORREGIDA A CONDICIONES ESTANDAR(\*)  
GASTO=GASTO PROMEDIO BOMBEADO(LTS/SEG)

(\*) PARA POTENCIAS MENORES QUE EL 10 % DE  
LA POTENCIA MAXIMA, TOMESE LA CORRECCION  
POR VELOCIDAD DE VIENTO.

fig. 3.4 Resultados

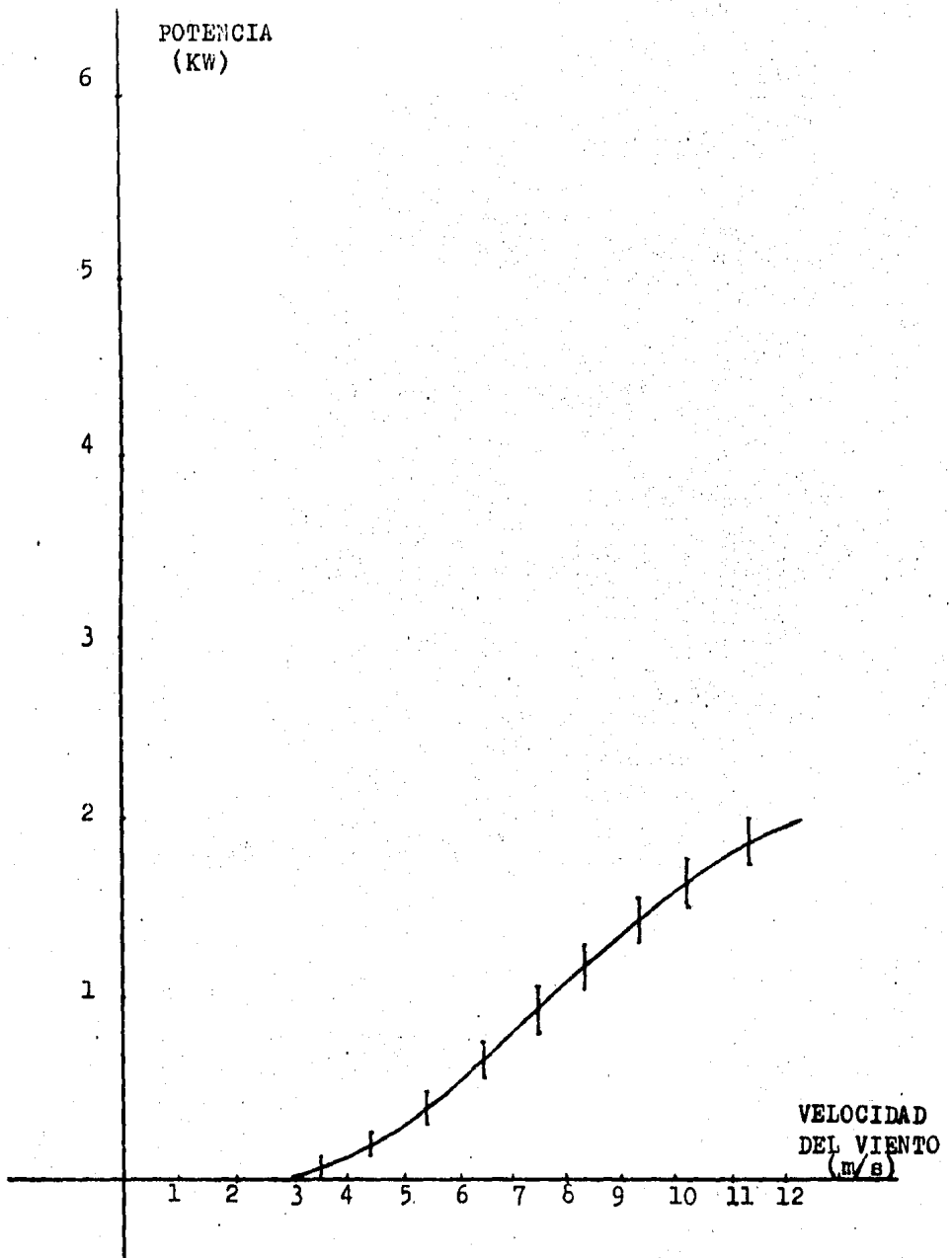


fig. 3.5 Curva de Potencia contra Velocidad del viento sin corrección por densidad del aire

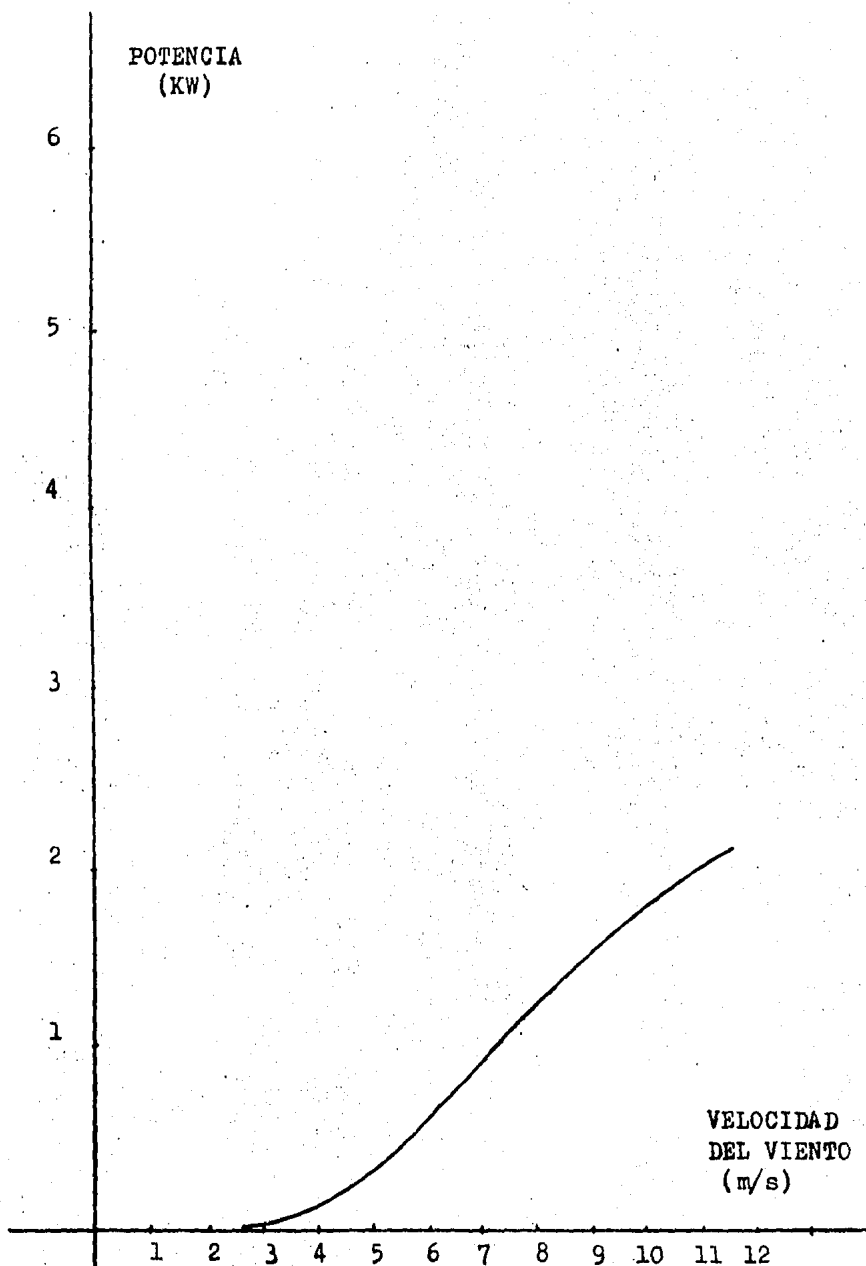


fig. 3.5 A Curva de Potencia contra Velocidad del viento con corrección por densidad del aire.

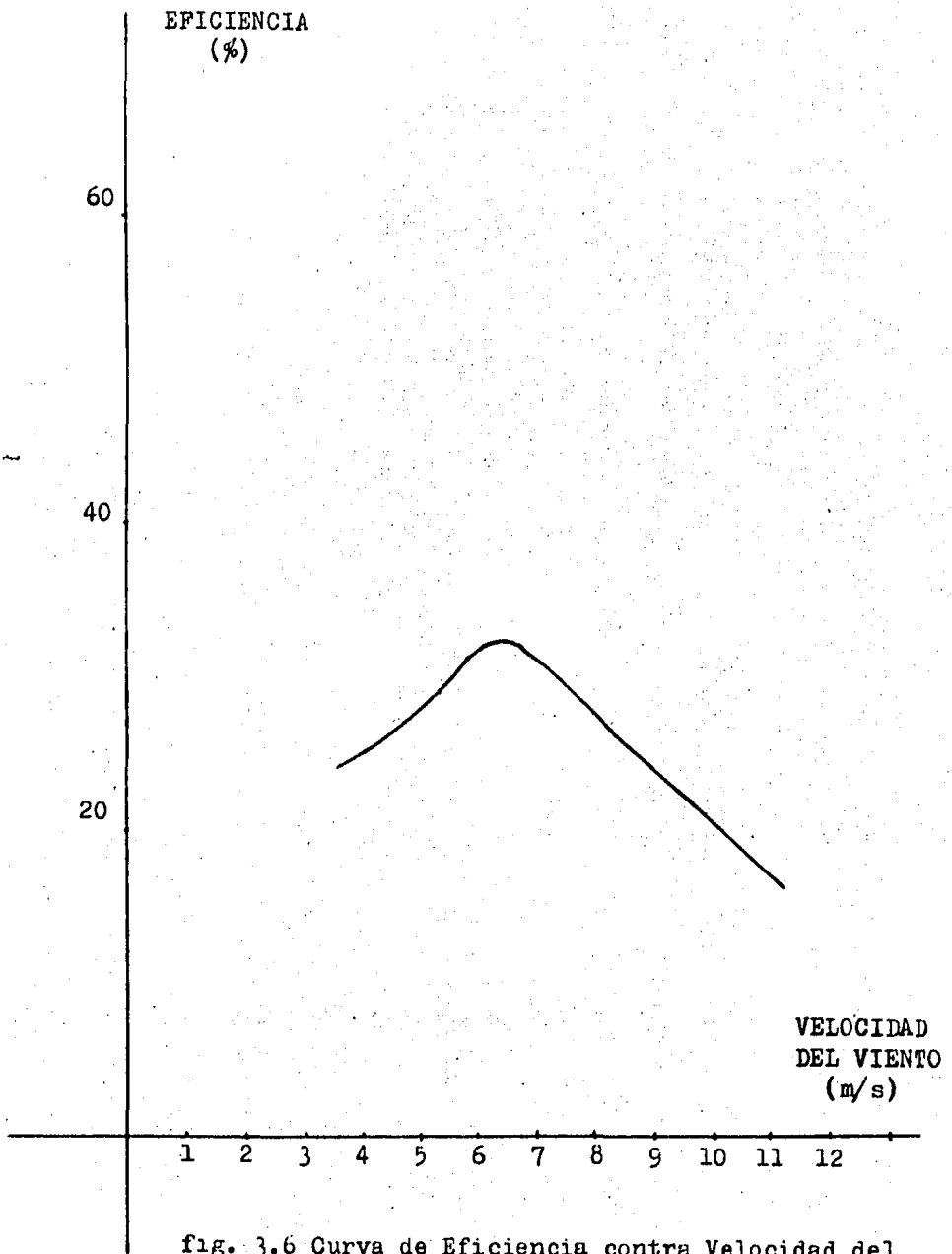


fig. 3.6 Curva de Eficiencia contra Velocidad del Viento.

### 3.7.1 Interpretación de Resultados del Aerogenerador de 6 Kw

La gráfica de la curva de potencia con corrección por densidad del aire muestra que el sistema entrega una potencia de 2 kilowatts a una velocidad de 11 m/s; de acuerdo con los datos de diseño, a una velocidad de 11.6 m/s el sistema debe entregar una potencia de 6 kilowatts; en la presente evaluación no se registra la suficiente cantidad de datos a velocidades superiores a esta, pero a la velocidad promedio de 11.4 m/s se obtuvieron 8 datos, que es una cantidad suficiente, de acuerdo con la referencia 3, en la que se recomienda recolectar 10 datos por bin; como la diferencia no es muy marcada se puede considerar como válido este punto.

En la parte correspondiente a las bajas velocidades, el número de datos registrados es suficiente, como para considerar ajustados a la realidad, los resultados que aparecen en la curva de potencia.

De los resultados presentados en la lista anterior los valores asociados a las velocidades de 0.8 y 1.6 m/s no se consideran porque a estas velocidades no hay generación de energía (aparecen subrayados); también las velocidades de 14.8 y 15.9 m/s no se toman en cuenta por el reducido número de datos registrados.

Por lo que toca a la eficiencia del sistema, se observa la máxima, a la velocidad de 6.5 m/s, y a medida que la velocidad del viento va creciendo o decreciendo a partir de este punto la eficiencia va disminuyendo.

### 3.8 Características Generales de la Aerobomba Mecánica de 200 Watts

Los datos que se presentan a continuación, se desprenden del estudio teórico llevado a cabo para el diseño del sistema, y pueden compararse algunos de los datos dados con los resultados obtenidos en la evaluación.



### 3.8.1 Características Generales del Rotor

Tipo de eje .....	Horizontal
Exposición al viento .....	Arriba
Ángulo de paso de aspas .....	Fijo
Número de aspas .....	5
Diámetro .....	2.5 m
Área de barrido .....	4.9 m <sup>2</sup>
Material de las aspas .....	Aceero
Coefficiente de Potencia .....	0.2 a 7 m/s
Lambda de diseño .....	4

### 3.8.2 Características de Operación

Potencia .....	200 watts a 7 m/s
Velocidad de inicio de giro .....	3 m/s
Velocidad de paro .....	16 m/s
Velocidad de sobrevivencia .....	30 m/s

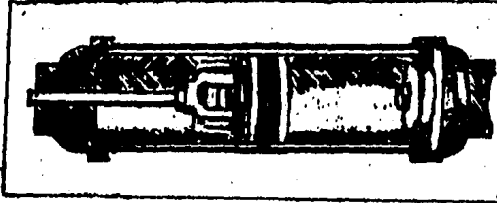
### 3.8.3 Control de Sobrevelocidad y Frenado

El control de sobrevelocidad es un sistema de cola de orientación articulada y para el frenado por el pliegue manual de la cola.

### 3.8.4 Características de la Bomba Utilizada

Se empleo una bomba de émbolo y cilindro (desplazamiento positivo) con un diámetro de 1 7/8 de pulgada por 16 pulsadas de largo; marca Bonass.

En la siguiente figura se muestra una bomba como la empleada en el sistema durante la evaluación.



### 3.8.5 Carga Conectada

Se conectó la bomba a través de una varilla que comunica a esta última con el rotor de la máquina y el diseño del sistema fué optimizado para bombear agua a 35 metros de profundidad.

### 3.8.6 Generalidades

Acorlamiento rotor-carga: Por excéntrico con cinturón de hule; relación 4:1

Peso estimado del sistema: 77 Ks

Altura de montaje:..... 6.4 m

### 3.9 Objetivos de la Prueba a la Aerobomba Mecánica de 200 Watts

Los objetivos fundamentales de las pruebas llevadas a cabo fueron obtener las curvas de:

a) Potencia aprovechada contra velocidad del viento sin corrección por densidad del aire.

b) Potencia aprovechada contra velocidad del viento con corrección por densidad del aire.

c) Gasto de agua bombeada contra velocidad del viento con corrección por densidad del aire.

d) Eficiencia del sistema contra velocidad del viento con corrección por densidad del aire.

### 3.10 Instalación de la Aerobomba Mecánica de 200 Watts en la Prueba

La instalación realizada para las pruebas iniciales de comportamiento de la aerobomba de 200 watts, se llevaron a cabo en la Estación Experimental Eólica 'El Gavillero'. Sin embargo dicha instalación se realizó inadecuadamente de acuerdo al diseño original del sistema, ya que la profundidad de bombeo en la mencionada instalación fue de 4 metros, a diferencia de los 35 metros necesarios para una operación eficiente con la BOMBA DE DESPLAZAMIENTO POSITIVO INSTALADA. Si bien las alternativas posibles para una instalación correcta eran:

- a) Instalación con profundidad de bombeo igual a 35 metros.
- b) Simulación de la profundidad de bombeo.
- c) Selección y cambio de una bomba adecuada para 4 metros de profundidad.

ninguna de ellas fue realizada.

Sin embargo con ésta instalación se recolectaron datos del funcionamiento de dicho sistema y se llevó a cabo su procesamiento, con el fin de ESTIMAR EL COMPORTAMIENTO DEL SUSODICHO SISTEMA EN UNA INSTALACION ADECUADA.

El sistema fue colocado sobre un tubo de 2.5 pulgadas de diámetro por 7.20 metros de largo, que sirvió como torre, quedando el centro del rotor de la máquina a una altura sobre el nivel del piso de 7.80. En la figura 3.7 se muestra un esquema de la instalación.

El sensor de velocidad de viento (anemómetro) fue colocado en una torre ubicada aproximadamente a 10 metros de distancia del sistema.

La instalación del sistema para registro del gasto de agua bombeado se llevó a cabo por medio de un nivel de mansuera colocado en una escala graduada, que permitió observar las variaciones producidas por el bombeo, a través de los incrementos de altura del nivel de agua. El área del depósito es de 1.66 metros cuadrados, y el producto de ésta por la diferencia de alturas definió la cantidad de agua bombeada.

También se utilizó otro sistema para el registro de gasto de agua que consistió en un flotador comunicado a una escala graduada, el cual sensó las variaciones de la altura de la superficie de agua; posteriormente se transformó a cantidad de agua bombeada.

El tiempo considerado entre lectura y lectura fue de 5.23 minutos, en este tiempo se definió el gasto y el mismo periodo fue la base de tiempo empleada para la adquisición de los datos de velocidad de viento, los cuales fueron registrados por el APSCEE. En las figuras 3.8 A y B se muestran esquemáticamente los sistemas de registro que se emplearon para determinar la cantidad de agua bombeada.

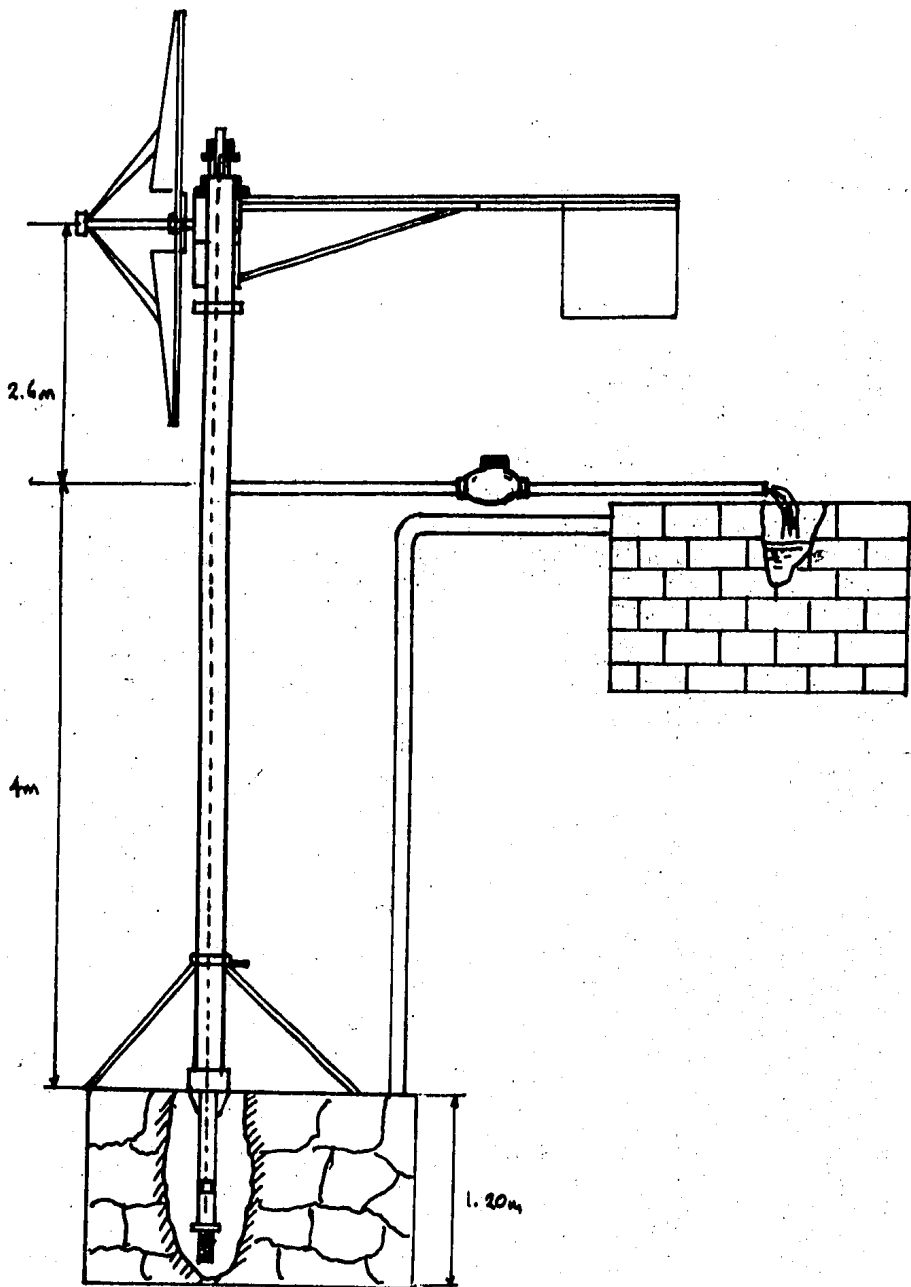
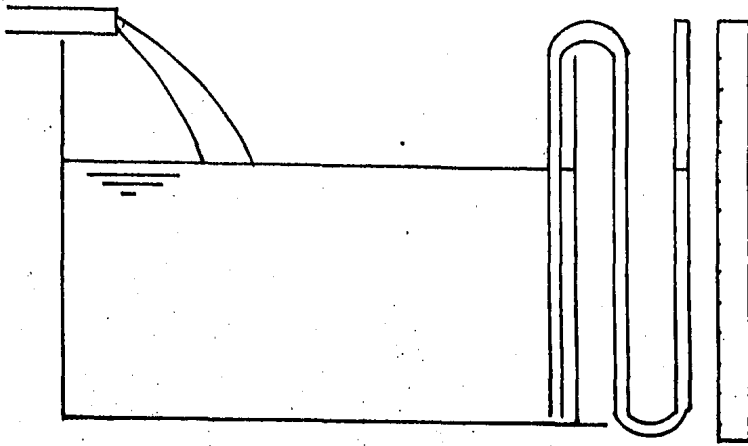
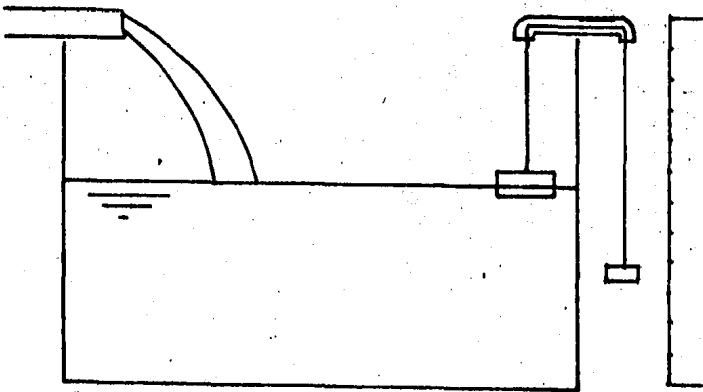


fig. 3.7 Instalación del sistema

$$\text{AREA} = 1.665 \text{ m}^2$$



(A)



(B)

fig. 3.8 Sistemas de Registro de agua bombeada

### 3.11 Método de Prueba para la Aerobomba Mecánica de 200 Watts

La adquisición de datos y la forma como se procesaron se explica a continuación:

Los datos de velocidad de viento y gasto de agua bombeada se registraron simultáneamente. Los valores de velocidad fueron cuantificados mediante el uso de un anemómetro tipo calculadora (APTI-1-IE) en intervalos de 5 minutos con 14 segundos, tiempo durante el cual, también se cuantificaba el gasto de agua bombeada por el sistema.

El número de datos generados, consistió en 362, dichos datos fueron introducidos a la computadora VAX-VMS en forma de archivo y se procesaron por medio de programas de cómputo elaborados especialmente para ello, dichos programas aparecen en el anexo 3. Con el programa EK1.RAS se procesaron los datos por el método de bins y se obtuvieron los siguientes resultados:

- Velocidad de viento promedio para cada bin
- Número de datos para cada bin
- Desviación estandar de la velocidad de viento para cada bin
- Gasto de agua bombeada para cada bin
- Desviación estandar del gasto para cada bin
- Potencia promedio aprovechada para cada bin
- Desviación estandar de la potencia para cada bin

Con los resultados anteriores fué posible obtener los pares de puntos para elaborar las curvas de:

- Potencia aprovechada contra velocidad del viento
- Gasto de agua bombeada contra velocidad del viento
- Potencia aprovechada contra gasto

Se realizaron los cálculos necesarios para obtener la potencia disponible en el viento así como los cálculos necesarios para obtener la potencia disponible corregida por densidad del aire a nivel del mar. Ya con los valores de potencia aprovechada y potencia disponible se determinó la curva de eficiencia de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$\eta = \frac{\text{Potencia aprovechada}}{\text{Potencia disponible}}$$

Debido a las limitantes de la instalación del sistema, con los datos obtenidos a la profundidad de 4 metros, se hicieron extrapolaciones para obtener la potencia teórica aprovechada y la eficiencia a 35 metros de profundidad, que es la profundidad de diseño, además se elaboró un programa de cómputo denominado EFEKI.BAS para obtener dichas extrapolaciones. Se obtuvieron así las gráficas correspondientes de potencia y eficiencia teóricas.

### 3.12 Resultados e Interpretación

Los resultados obtenidos por el procesamiento de la información se muestran en las figuras 3.9, 3.10, 3.11 y 3.12

Para hacer una interpretación conveniente de los resultados obtenidos en la presente evaluación es importante resaltar lo siguiente:

Se ha establecido en el diseño que el coeficiente de potencia ( $C_p$ ) es de 0.2 y la velocidad de diseño es 7 m/s, es decir, que a esta velocidad se tendría la máxima eficiencia del sistema; en estas condiciones tendríamos que la potencia aprovechada por la aerobomba será:

$$P = \frac{1}{2} \rho A V^3 C_p \quad 3.10$$

Sustituyendo valores:

$$P = 1/2 \times 1,225 \text{ Kg/m}^3 \times \pi/4 \times 2.5^2 \text{ m} \times 7 \text{ m} \times 0.2 =$$

$$P = 206.2 \text{ watts}$$

Esta sería la potencia nominal a una velocidad de viento igual a 7 m/s.

De los datos adquiridos se observa que a una velocidad de viento igual a 7 m/s se obtuvo un gasto de 16 lts/min, lo cual implica que la potencia utilizada por el sistema es:

$$\text{Potencia} = \rho \frac{Q}{4r^3} h$$

Donde:

- $Q$  = gasto de agua en  $\text{m}^3/\text{seg}$
- $\rho$  = densidad del agua en  $\text{Kg}/\text{m}^3$
- $g$  = gravedad terrestre en  $\text{m}/\text{s}^2$
- $h$  = profundidad o altura en  $\text{m}$

Sustituyendo los valores correspondientes se tiene:

$$P = 16 \frac{\text{Lt}}{\text{min}} \times \frac{0.001 \text{ m}^3}{\text{Litro}} \times \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ seg}} \times \frac{1000 \text{ Kg}}{\text{m}^3} \times 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \times 4 \text{ m} =$$

$$P = 10.464 \text{ watts}$$

De lo anterior se demuestra que el sistema fue subutilizado debido a la instalación experimental realizada.

Considerando que la aerobomba es un SCEE de velocidad variable, es decir al incrementarse la velocidad del viento se incrementa la velocidad angular del rotor de acuerdo con la relación:

$$\omega = \frac{\lambda}{R} v$$



Y va que en este tipo de sistemas  $\Lambda$  no varía para una misma velocidad de viento, es decir independientemente de la profundidad de bombeo, cuando al rotor incide una velocidad de viento  $V_1$ , siempre corresponderá una misma velocidad angular del rotor  $\omega_1$  del rotor. Esto implica que en teoría que para una misma bomba de desplazamiento positivo (Con carrera del pistón y diámetro constante), se tenga siempre un gasto constante considerando una misma velocidad de viento, independientemente de la profundidad de bombeo (Siempre y cuando no se exceda de los límites teóricos de diseño).

Lo anterior permite suponer que los resultados de gasto contra velocidad del viento, se mantendrán iguales para este mismo sistema instalado en condiciones de diseño o sea a una profundidad de bombeo de 35 metros.

La aerobomba está diseñada para instalarse a una profundidad determinada y no es recomendable colocarla en condiciones diferentes a las de diseño, ya que su potencia aprovechada está en función de la profundidad a que se está bombeando el agua, para un mismo diámetro y carrera del pistón de la bomba; es decir, si se instala la máquina con una misma bomba a diferentes profundidades, su eficiencia variará considerablemente.

Para la profundidad de diseño se tendrá la eficiencia óptima y para profundidades diferentes, la eficiencia declinará, solo se podrá mantener la eficiencia óptima a diferentes profundidades, si se cambiará el gasto, variando el diámetro y la carrera del pistón de la bomba empleada. Pero esto implicaría el cálculo desde el diseño mismo de la máquina de viento.

Extrapolando los resultados de la profundidad de 4 metros a la profundidad de 35 m se tendrán las gráficas mostradas en las figuras 3.11 y 3.12.

Para aclarar lo anterior se muestra el siguiente ejemplo: para una profundidad de 4 metros y un gasto de 16 litros por minuto a la velocidad de diseño de 7 m/s se tendrá:

$$\eta = \frac{\text{Potencia aprovechada}}{\text{Potencia disponible}}$$

$$= \frac{Q \frac{\rho}{1000} g h}{\frac{1}{2} \rho A V^3} =$$

$$\frac{0.016 \frac{3}{60} \text{ m}^3/\text{s} \times 1000 \text{ Kg/m}^3 \times 9.81 \text{ m/s}^2 \times 4 \text{ m}}{\frac{1}{2} \times 1.225 \text{ Kg/m}^3 \times \frac{\pi}{4} \times 2.5^2 \times 7^3} =$$

$$= 0.010164 \quad \text{en porcentaje} \quad \rightarrow \quad 1.0164 \%$$

Pero si la profundidad que se considera es de 35 metros en circunstancias semejantes se tendrá:

$$\frac{0.016 \frac{3}{60} \text{ m}^3/\text{s} \times 1000 \text{ Kg/m}^3 \times 9.81 \text{ m/s}^2 \times 35 \text{ m}}{\frac{1}{2} \times 1.225 \text{ Kg/m}^3 \times \frac{\pi}{4} \times 2.5^2 \times 7^3} =$$

$$= 0.08949 \quad \text{en porcentaje} \quad \rightarrow \quad 8.94 \%$$

De todo lo anterior se puede deducir que la aerobomba es un sistema que puede funcionar eficientemente, dentro de las posibilidades de un SCEE, si las condiciones en las que este funcionando son las adecuadas y si la instalación esta hecha de acuerdo con el diseño.

En las figuras 3.9 y 3.10 se muestran las gráficas de la potencia contra velocidad de viento y de gasto contra velocidad de viento para una profundidad de 4 metros, que es la profundidad a la que se estuvo tomando los datos para la presente evaluación. En la figura 3.9 se puede observar que a medida que se incrementa la velocidad del viento se incrementa el gasto, lo mismo sucede en la figura 3.10 donde la potencia aprovechada se incrementa proporcionalmente a la velocidad del viento, la interpretación de estas gráficas indica que la potencia que se necesita para incrementar el gasto de agua bombeada, es mayor a medida que el gasto aumenta, esa potencia es suministrada por la potencia disponible en el viento.

En la figura 3.11 se muestra la gráfica de la curva teórica de la potencia aprovechada con corrección por densidad del aire a la profundidad de diseño y en la figura 3.12 se muestra con línea punteada la curva de la relación de potencia aprovechada y potencia disponible a 4 metros de profundidad en esta misma, aparece la curva de eficiencia teórica a 35 metros, esta última es la extrapolación de la curva de 4 metros. De lo más relevante que se observa, es el valor de la eficiencia máxima que se encuentra a los 3.2 m/s, a diferencia de lo esperado que sería a la velocidad de diseño.

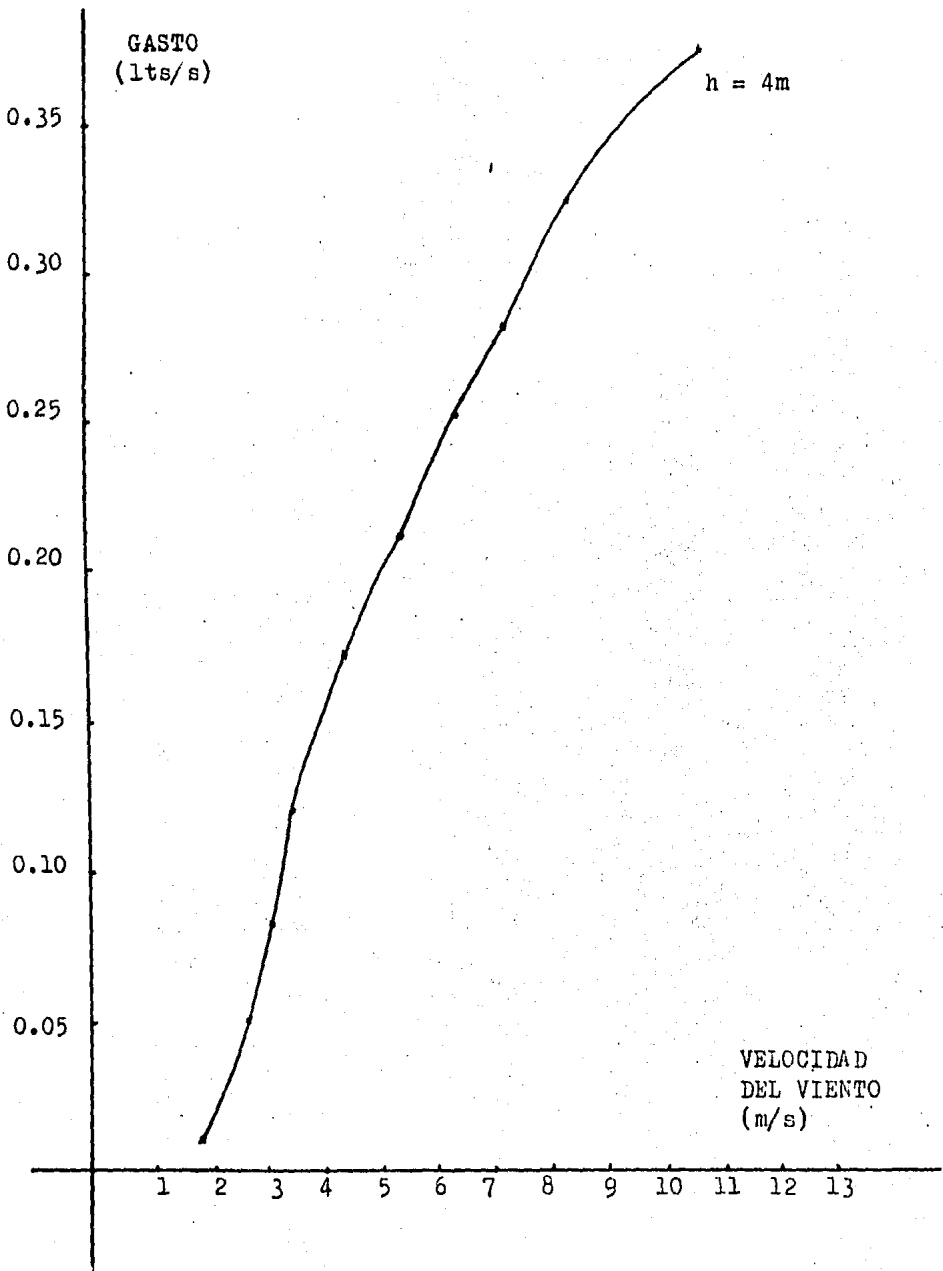


fig. 3.9 Gráfico de Gasto contra Velocidad de Viento

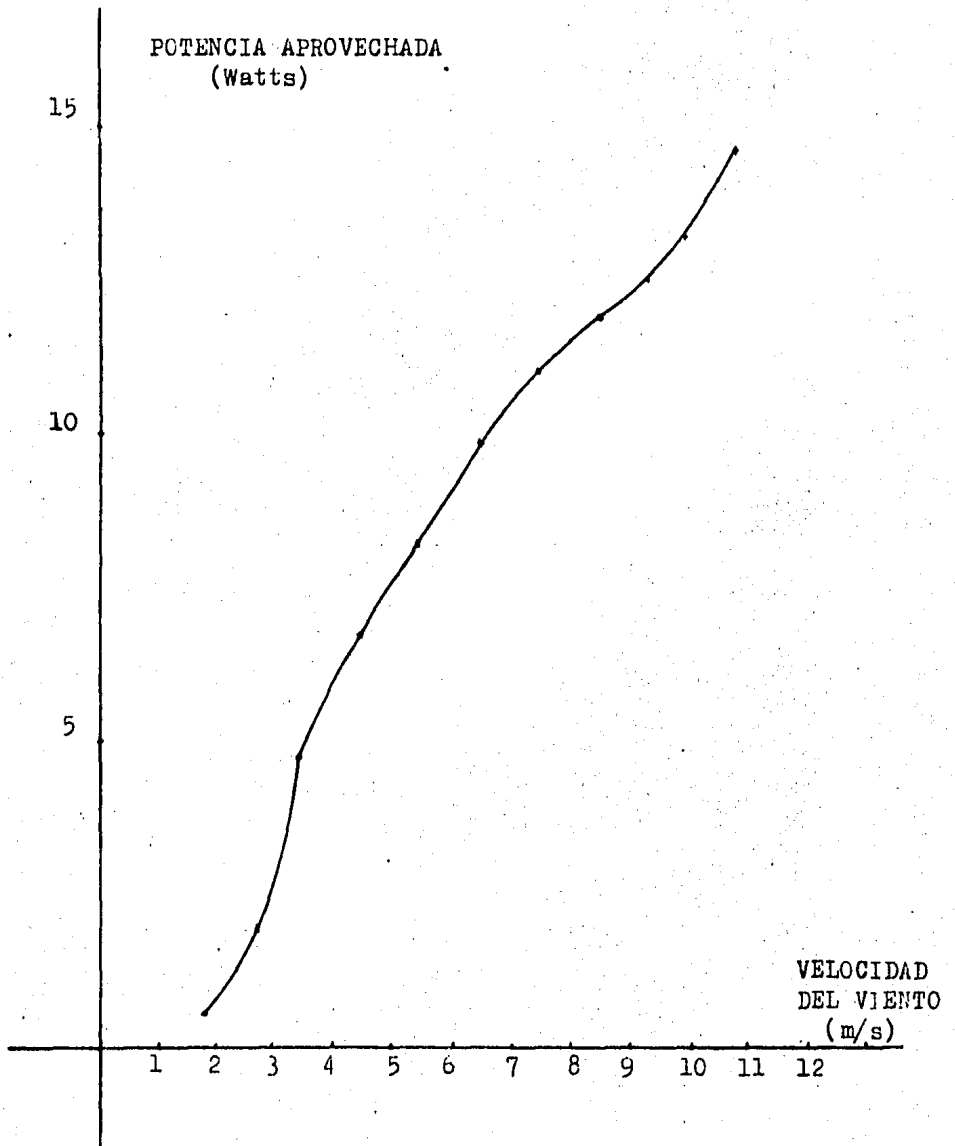


fig. 3.10 Gráfica de Potencia contra Velocidad de Viento

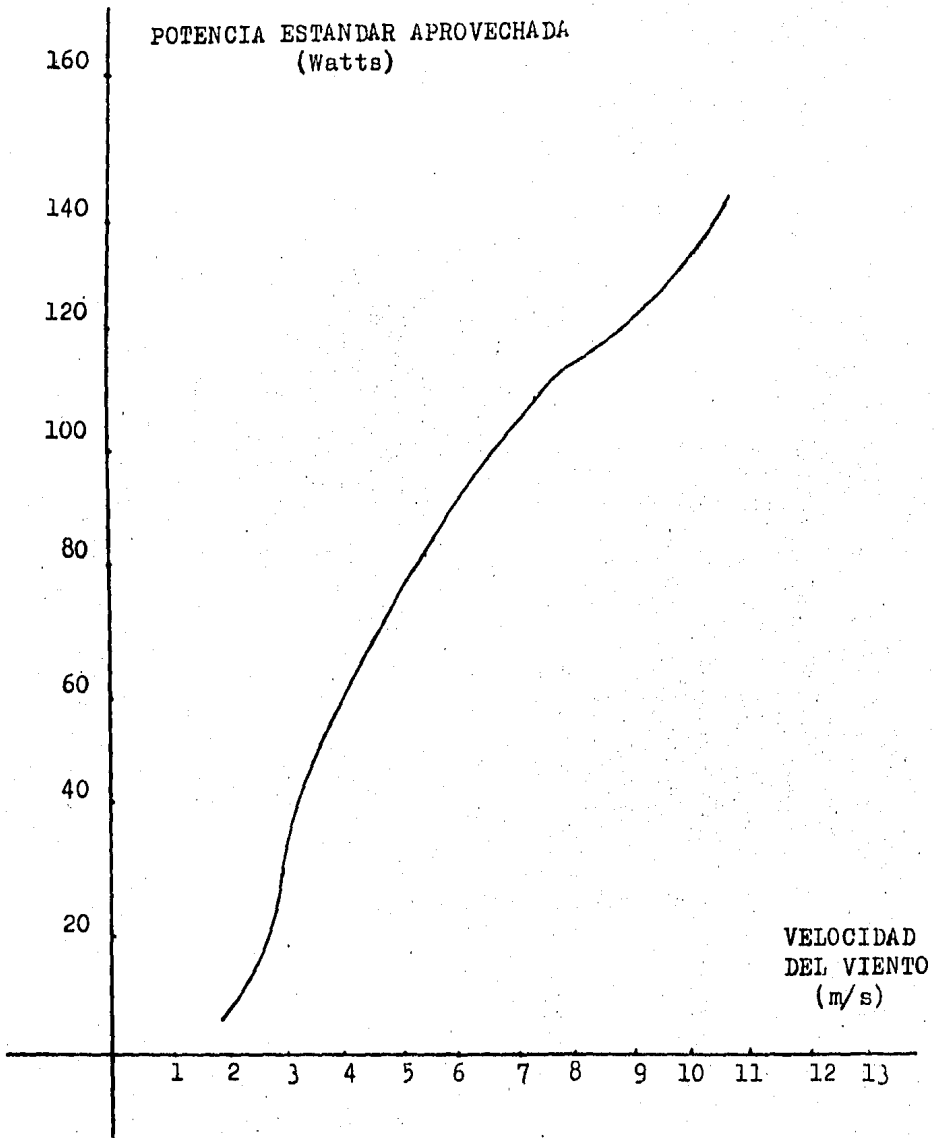


fig. 3.11 Curva teórica de Potencia Aprovechada en condiciones estándar a nivel del mar.

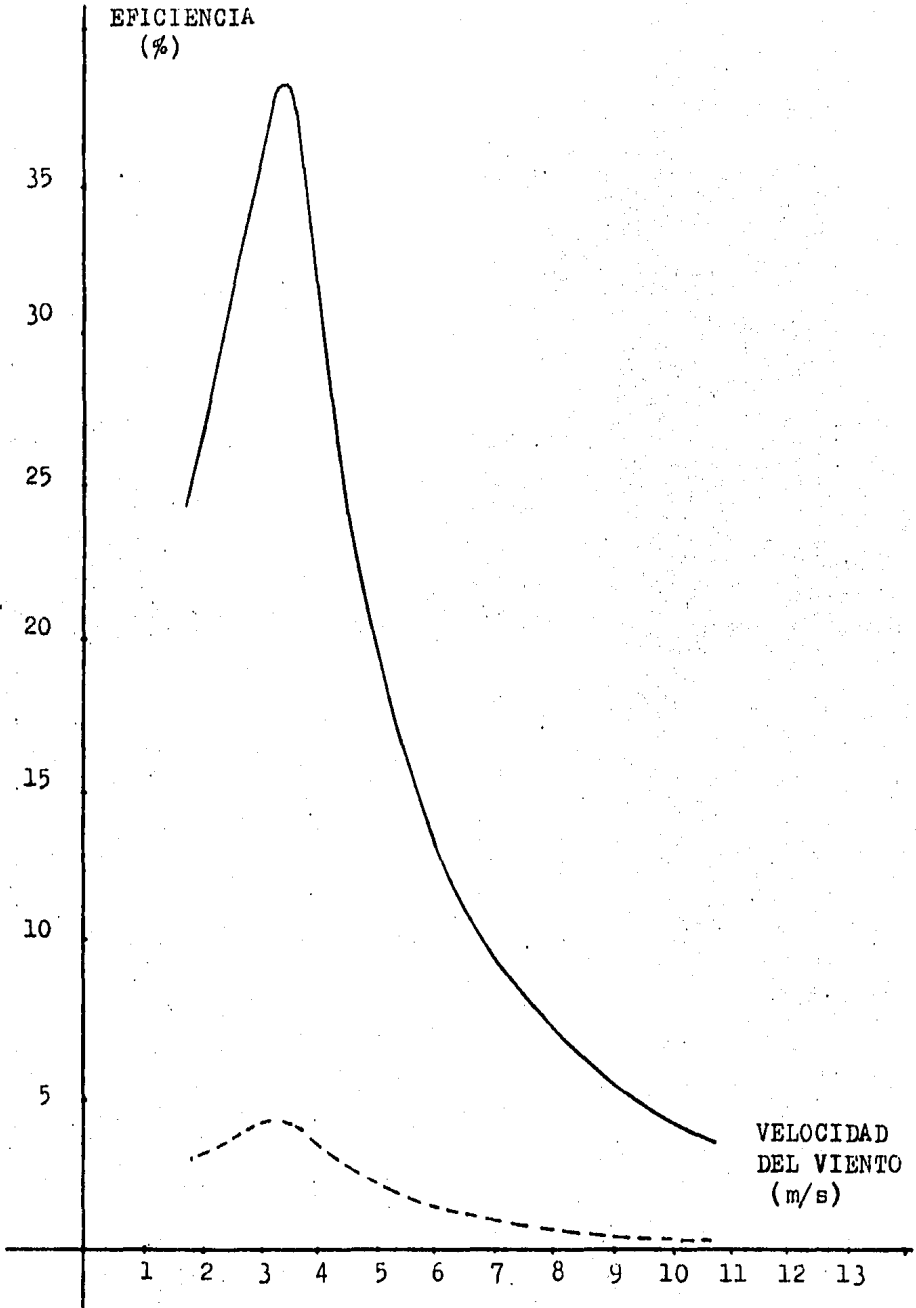


fig. 3.12 Curvas de Eficiencia Teórica y de relación de potencia aprovechada- potencia disponible (punteada).

### 3.13 Características Generales del Aerogenerador de 10 Kilowatts.

Es importante recordar en esta parte que se efectuaron dos evaluaciones, una con datos instantáneos empleando el método de bins y el de la potencia más probable conjuntamente y otra empleando únicamente el método de bins.

Los datos que se establecen a continuación fueron determinados mediante el estudio teórico realizado para el diseño del sistema, por lo que deben considerarse como valores teóricos y pueden compararse algunos de ellos con los resultados obtenidos en esta prueba.

#### 3.13.1 Características generales del rotor

Tipo de eje .....	Horizontal
Exposición al viento .....	Atras
Ángulo de paso de aspa .....	Fijo
Número de aspas .....	3
Diámetro .....	11.0
Área de barrido .....	95.0034 m <sup>2</sup>
Material de las aspas.....	Tipo aspa de aluminio tela de dacrón
Coeficiente de potencia medio ..	0.22

#### 3.13.2 Características de operación

Potencia .....	10000 watts a 10.0 m/s
Velocidad de inicio de giro .....	3.0 m/s
Velocidad de paro .....	60 R.P.M (*)
Velocidad de sobrevivencia .....	30.0 m/s

(\*) Velocidad de viento que provoca 60 R.P.M.



### 3.13.3 Control de Sobrevelocidad y Frenado

Sistema Mecánico: con la operación de los dispositivos de punta de aspa a 57 r.p.m. aproximadamente.

Sistema Eléctrico: con la activación del freno dinámico automático; al sensarse 60 r.p.m. durante la 1a. evaluación; y por la la activación del mismo al sensarse 10 m/s de velocidad de viento durante la 2a. evaluación.

Freno: para frenado total se emplearon frenos del tipo de disco accionados por una bomba manual.

### 3.13.4 Características Generales del Sistema Eléctrico

#### Generador

Tipo ..... Imanes permanentes

Número de polos ..... 28

Número de fases ..... 3

Potencia nominal ..... 10 Kilowatts

Voltaje nominal ..... 220 volts a 60 hertz

### 3.13.5 Panel de Control

El panel de control contiene los elementos para la rectificación de las tres fases del generador con salida de corriente directa a través de contactores accionados por un sistema de voltaje ajustable (Variac); para la conexión de la carga, durante la 1a. evaluación.

El control electrónico para freno dinámico automático se logra por medio de la conexión de resistencias entre fases del generador, activándose por los sensores de frecuencia (revoluciones del rotor) durante la 1a. evaluación; y por sensores de velocidad durante la 2a.. Con acceso a operación del freno dinámico en forma manual en los dos casos.

### 3.13.6 Carga Conectada

En la 1a. evaluación preliminar se conectó un banco de resistencias u/o un inversor síncrono marca Gemini de 8 Kw, ajustable en nivel de voltaje de inicio de operación, voltaje máximo de operación y corriente máxima permitida.

En la 2a. evaluación se conectó un inversor síncrono de 10 Kw, también ajustable en nivel de voltaje de inicio de operación, voltaje máximo de operación y corriente máxima permitida.

### 3.13.7 Generalidades

Accionamiento rotor-generador: Por cadena con relación 1:4

Peso del sistema:..... 1900 Kg aproximadamente

Altura de montaje sobre el piso: 13.4 m

### 3.14 Objetivos de la Prueba

Los objetivos de la 1a. y 2a. evaluaciones fueron obtener las curvas de:

- Potencia generada contra velocidad del viento, sin corrección por densidad del aire.
- Potencia generada contra velocidad del viento, con corrección por densidad del aire.
- Eficiencia del sistema contra velocidad del viento. (solo para la 2a. evaluación)

En ambas evaluaciones (1a. y 2a.) se tuvo también como objetivo observar cualitativamente el funcionamiento de los controles de sobrevelocidad y frenado.

### 3.15 Instalación del Sistema para la Prueba

El aerogenerador de 10 Kw fué instalado en una torre de 12 metros de altura sobre el nivel del piso, quedando la altura del centro del rotor a 13.4 metros.

El sensor de velocidad fué colocado en otra torre a 11.07 metros de altura. Un esquema de la instalación se muestra en la figura 3.13.

La instalación eléctrica para la 1a. evaluación preliminar quedó hecha en la forma como se muestra en la figura 3.14.

La instalación eléctrica para la 2a. evaluación preliminar quedó en la forma como se muestra en la figura 3.16.

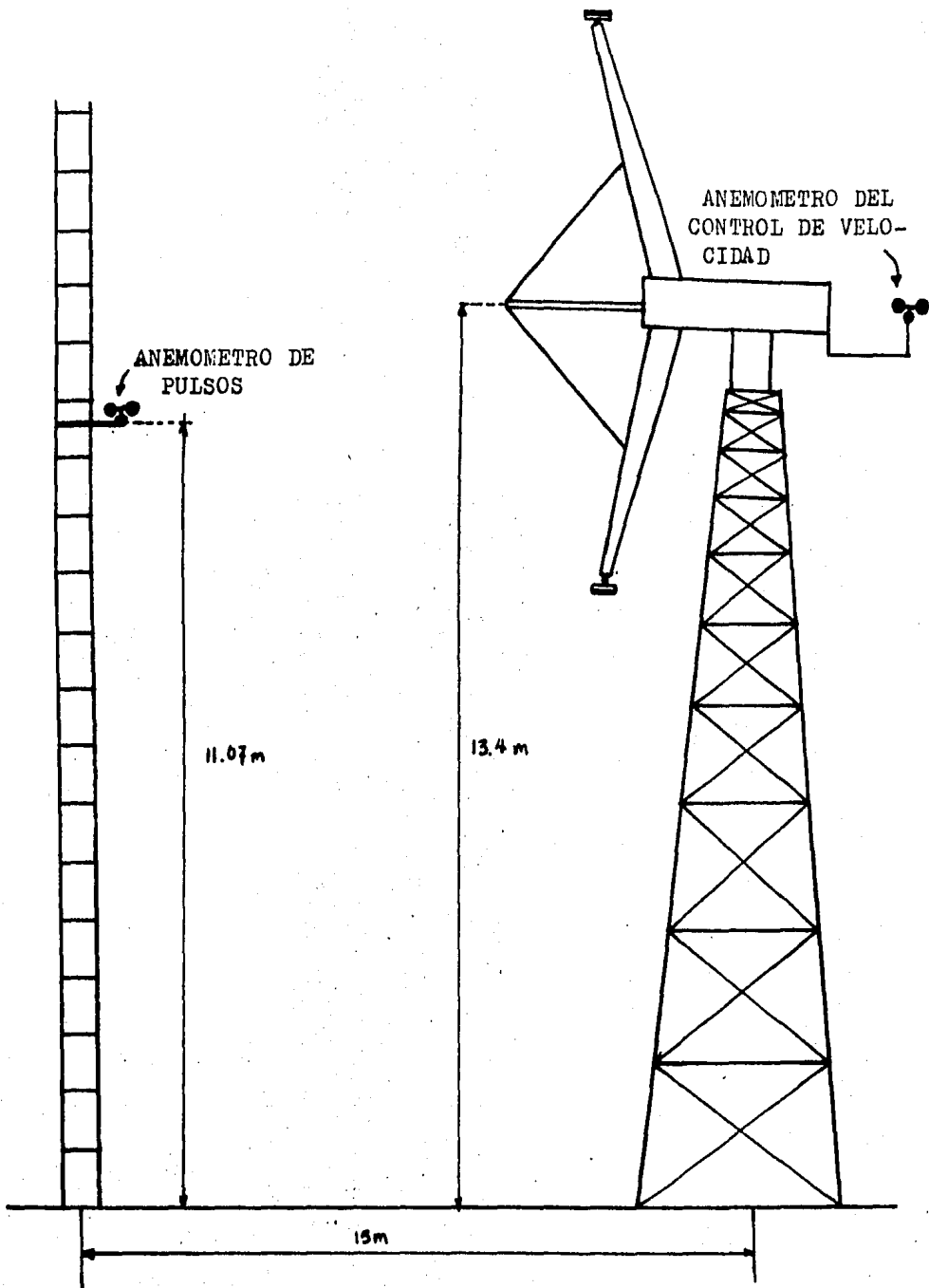


fig. 3.13 Instalación del Sistema

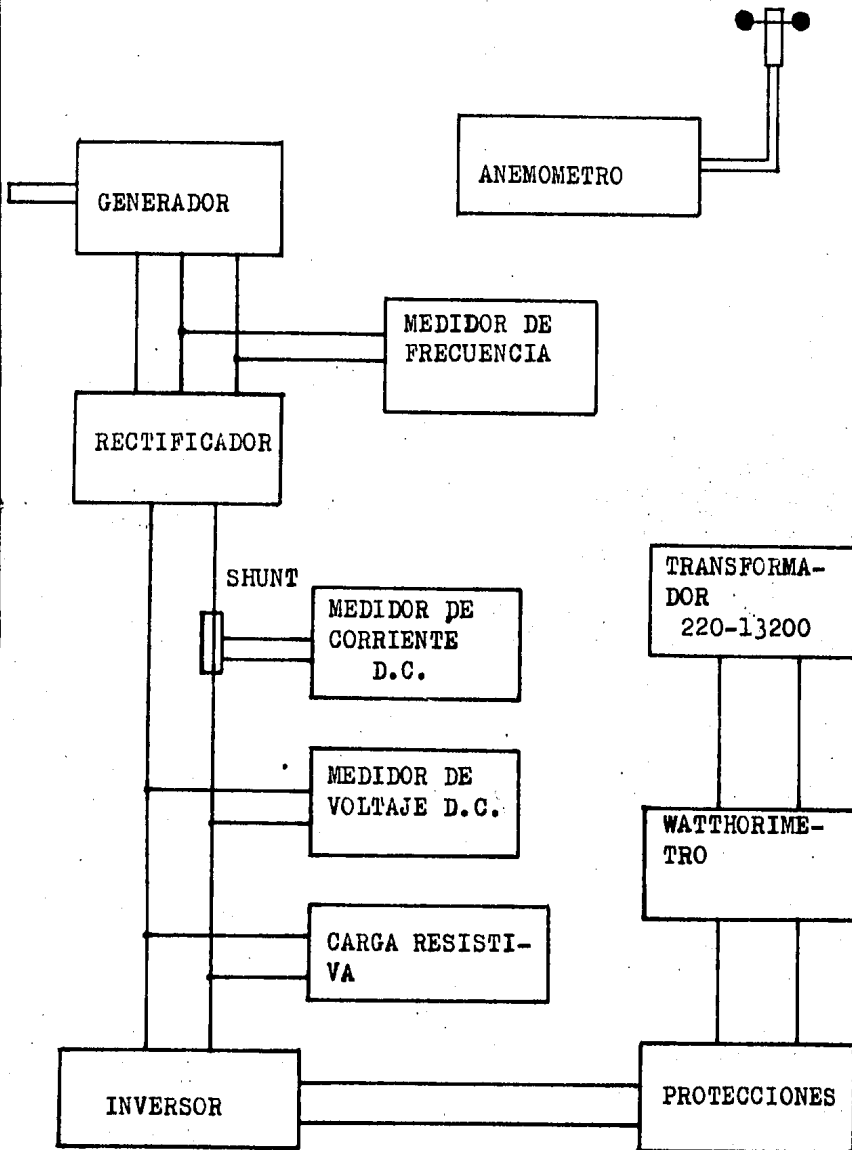


fig. 3.14 Instalación Eléctrica del Sistema en la 1a. Evaluación

Las razones por las cuales la instalación quedó en esas condiciones fueron:

1) Como la frecuencia y el voltaje de generación inmediatamente a la salida del generador son variables de acuerdo con el comportamiento del viento; se dificultó tomar las lecturas de potencia generada en este punto; debido a que los medidores convencionales funcionan correctamente solo para un rango de frecuencia muy restringido (normalmente entre  $\pm 5\%$  de su frecuencia nominal) debido a ello se optó en rectificar el voltaje trifásico generado y tomar lecturas de corriente y voltaje a la salida del rectificador.

2) Con la rectificación se hizo posible conectar un inversor sincrónico marca Gemini de 8 Kw; interconectable directamente con una línea de distribución de energía eléctrica. A grandes rasgos la función del inversor es transformar el voltaje de corriente alterna que recibe, al voltaje y la frecuencia necesarios para aplicarse a la línea de distribución.

El inversor se ajustó de acuerdo con los requerimientos recomendados por el fabricante, con los siguientes valores:

- Voltaje de cut-in = 100 volts
- Voltaje máximo = 190 volts
- Corriente máxima = 35 amperes

Sin embargo el inversor no se acopló directamente al generador en los primeros intentos, porque se llegaba al voltaje y corriente máximos, por lo que se hizo necesario la conexión en paralelo a la entrada del inversor, de un banco ajustable de resistencias, dando como resultado un mejor acoplamiento entre el aerogenerador y la carga; esta combinación se prefirió como primer paso en vez de una carga resistiva pura; ya que con la introducción del inversor sincrónico se suministraría una carga inductiva arriba de los 100 volts y así se simularía una operación semejante a la de la bomba sumergible; la que representa una carga puramente inductiva.

3) Finalmente el funcionamiento del sistema se desarrolló de la siguiente forma durante la toma de datos:

Al iniciarse la operación del sistema, la potencia generada se disipaba totalmente en el banco de resistencias hasta

que el voltaje de generación alcanzaba los 100 volts de corriente directa necesarios para que el inversor comenzara a funcionar; a partir de este punto la potencia generada era absorbida en parte por el inversor y en parte por el banco de resistencias tal como se muestra en la figura 3.15.

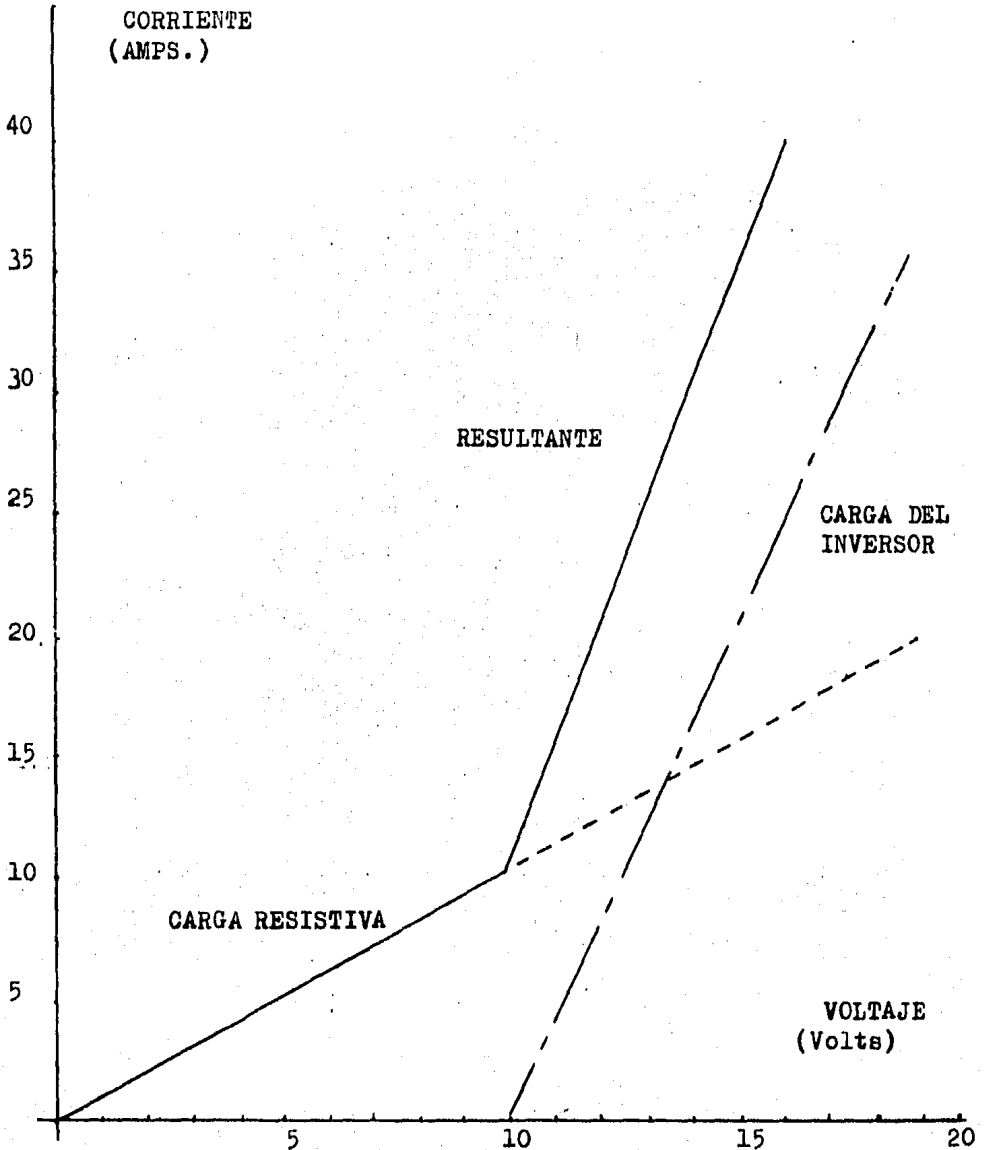


fig. 3.15 Comportamiento de las Cargas Aplicadas al Generador

El único efecto nocivo encontrado en la operación del sistema con esta carcasa combinada se refiere a que al inicio de funcionamiento, el aerogenerador no podía comenzar a girar a velocidades bajas de viento, debido a la presencia permanente de la carcasa resistiva; sin embargo una vez que el aerogenerador comenzaba a girar, fué posible tomar datos en la gama de velocidades de operación. Es posible que el efecto de este comportamiento afecte los datos tomados a velocidades bajas de viento (menores a los 4m/s) para los cuales es necesario considerar la histéresis del sistema. Para suavizar lo anterior se empleó con los datos el método de la potencia - más probable.

En la 2a. evaluación la instalación eléctrica se cambió para integrar el APSCEE, tal como se muestra en la figura 3.16, también se cambió el control de sobrevelocidad del sistema, en la 1a. evaluación se sensaban las revoluciones por minuto y al alcanzar las 57 entraba en acción el freno dinámico; para la 2a. evaluación se sensó la velocidad del viento y al llegar a los 10 m/s se produjo una señal que accionaba el repetido freno dinámico.

El freno dinámico consiste en conectar a la salida del generador eléctrico tres resistencias de bajo valor resistivo, una en cada fase de tal forma que representen una carga muy grande y el generador tienda a detenerse, reduciéndose así las revoluciones del rotor.

La instalación del freno total consistió en frenos de disco colocados en la flecha del aerogenerador, accionados por una bomba hidráulica manual colocada en la base de la torre en que esta soportado el sistema.



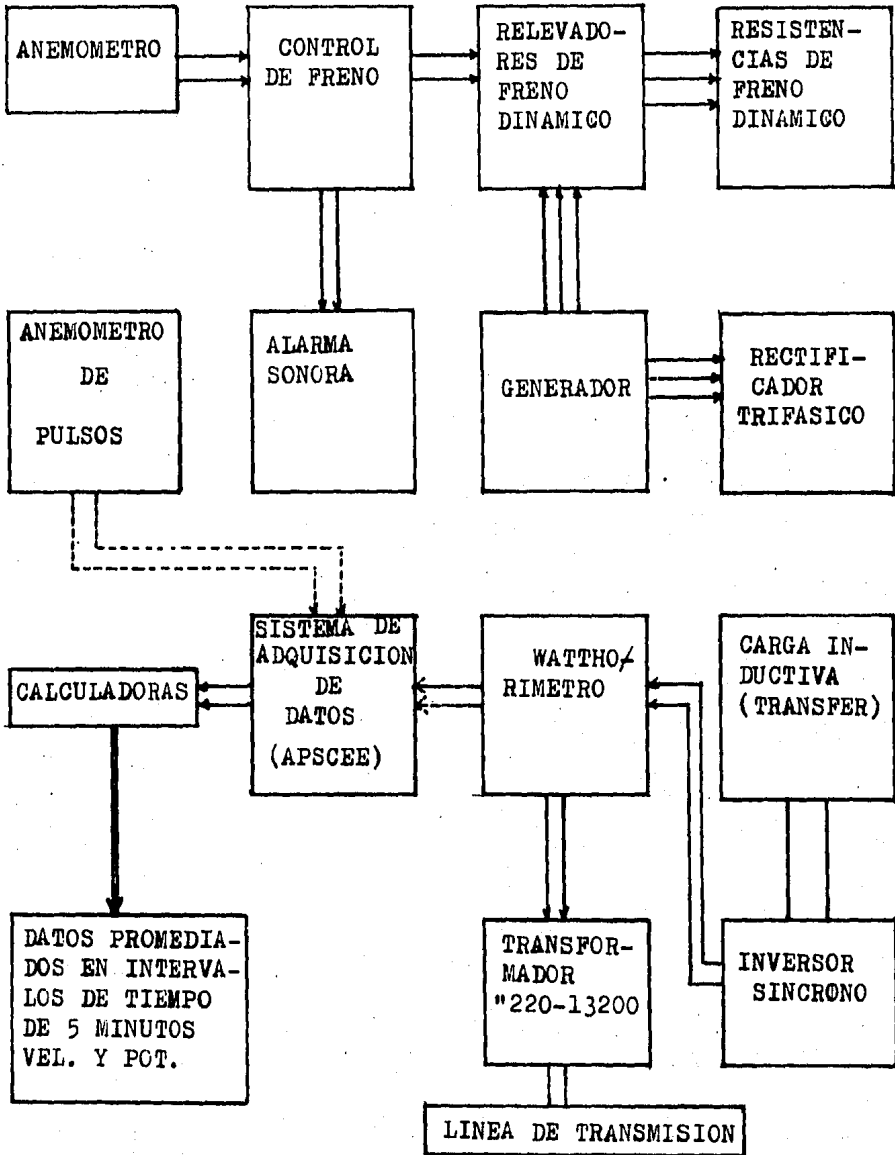


Fig. 3.16 Instalación Eléctrica en la 2a. Evaluación

### 3.16 Método de Prueba empleado para el Aerogenerador de 10 Kw

#### 1a. Evaluación

La adquisición de datos consistió en la lectura simultánea de datos instantáneos de las siguientes variables del sistema:

- Velocidad de viento en m/s
- Frecuencia del voltaje generado en hertz
- Voltaje generado de corriente directa en volts
- Corriente directa generada en amperes

El archivo de datos generados consistió en 682, dichos datos fueron introducidos a la computadora VAX-VMX del IIE en forma de archivo y procesados por medio de programas de cómputo elaborados especialmente para ello.

Esta evaluación de comportamiento, se llevo a cabo utilizando el método propuesto en la sección 4.6 de este mismo documento, el cual utiliza el método de la potencia mas probable para el cálculo de los puntos inferiores de la curva de potencia contra velocidad del viento y el método de bins para el cálculo de los puntos superiores de dicha curva.

Como primer paso los datos adquiridos se procesaron por medio de programa de cómputo BIN.BAS (Anexo III), el cual los maneja por el método de bins para la obtención de puntos que permitan generar la curva de potencia contra velocidad del viento; los valores resultantes fueron alimentados a otro programa de cómputo denominado EVAL.BAS (Anexo III), que tiene por objeto corregirlos en cuanto a la densidad del aire se refiere de acuerdo a lo expuesto en la sección 3.6 de este documento. Los resultados así obtenidos fueron introducidos a una computadora tektronics, que cuenta con un paquete matemático para el ajuste de puntos por el método de regresión polinomial obteniéndose la curva esperada por el método de bins.

Como segundo paso, los datos base fueron procesados por el método de la potencia mas probable, obteniéndose los puntos correspondientes para generar la curva de potencia contra velocidad del viento y de igual forma los resultados se procesaron por medio del programa EVAL.BAS para su corrección por densidad del aire. Los puntos encontrados se introdujeron a la computadora tektronics para su ajuste por medio de regresión polinomial, obteniéndose de esta manera la curva buscada por el método de la potencia mas probable.

Las curvas obtenidas, fueron graficadas en un mismo plano y de acuerdo al criterio propuesto en la sección 4.6. Donde se se da validez al método de la potencia mas probable para la sección de la curva hasta el cruce de la potencias generada y al método de bins para el resto de la curva.

## 2a. Evaluación

En este caso se adquirieron simultáneamente los datos de velocidad promedio del viento y de potencia generada en pulsos. Dichos datos fueron cuantificados en una base de tiempo de 5 minutos, para ello se utilizó el APSCEE, el cual los adquiere en forma de pulsos de un anemómetro para la velocidad del viento y del wathhorímetro conectado a la red eléctrica para la potencia, de igual forma como se obtuvo en el caso del aerogenerador de 6 Kw. Para transformar los pulsos a unidades congruentes se emplearon las relaciones 3.1 y 3.5.

El número de datos registrados para esta evaluación fué de 420 y fueron introducidos en forma de archivo a la computadora VAX-VMX, procesandose con el mismo programa de cómputo empleado en la evaluación de la máquina de 6 Kw; dicho programa se presenta en el anexo 3, su función es transformar los pulsos que entresó el anemómetro y el wathhorímetro en unidades congruentes y procesarlos posteriormente por el método de bins obteniendose los siguientes resultados:

- Número de datos para cada bin
- Potencia promedio generada para cada bin
- Velocidad del viento promedio para cada bin
- Desviación estandar de la velocidad del viento
- Eficiencia del sistema
- Potencia con corrección por densidad del aire

Para la obtención de la eficiencia se empleó nuevamente la ecuación 3.6.

## 3.17 Resultados de la Prueba al Aerogenerador de 10 Kw

### 1a. Evaluación

De acuerdo al método de prueba mencionado, los resultados obtenidos para el cálculo de la curva de potencia contra velocidad del viento utilizando el método de bins son:

- Resultados sin corrección por densidad del aire

No. de Rin	No. de Datos	Potencia (watts)	Potencia con Correccion (watts)
1	-	-	-
2	-	-	-
3	24	711	711(x)
4	39	1758	1953.33
5	73	2489	2765.56
6	111	3430	3811.11
7	155	5289	5876.67
8	223	6174	6860
9	54	7109	7898.89
10	3	7713	8570

- El polinomio de ajuste encontrado fué:

$$F(X) = C(0) + C(1)T + C(2)T^2 + \dots + C(N)T^N$$

Donde:  $T = 0.53050397878 (X) - 3.3050397878$

$C(0) = 4494.57723672$

$C(1) = 2461.13394486$

$C(2) = 45.0868895025$

$C(3) = -172.538191402$

En la figura 3.17 se presenta la curva obtenida dibujada con línea continua.

De igual forma, los resultados obtenidos, utilizando el método de la potencia más probable son:

Velocidad de Viento (m/s)	Potencia más Probable (watts)	Potencia con Correccion (watts)
0	0	0
1	0	0
2	0	0
3	660	733.26
4	2115	2349.765
5	2167	2467.537
6	2557	2840.827
7	6289	6987.069
8	7504	8336.944
9	7111	7900.321
10	-	-

- El polinomio encontrado con los datos anteriores fué:

$$F(X) = C(0) + C(1)T + C(2)T^2 + \dots + C(N)T^N$$

Donde:  $T = 0.571428571429 (X) - 3.142857142857$   
 $C(0) = 3645.0896875$   
 $C(1) = 2907.97572238$   
 $C(2) = 179.012695313$   
 $C(3) = - 220.56197889$

En la misma figura 3.17 aparece dibujada con línea pun-  
teada la curva obtenida.

Finalmente la combinación de ambas curvas (Punteada y  
continua) de acuerdo al método propuesto, se presenta en la  
figura 3.18

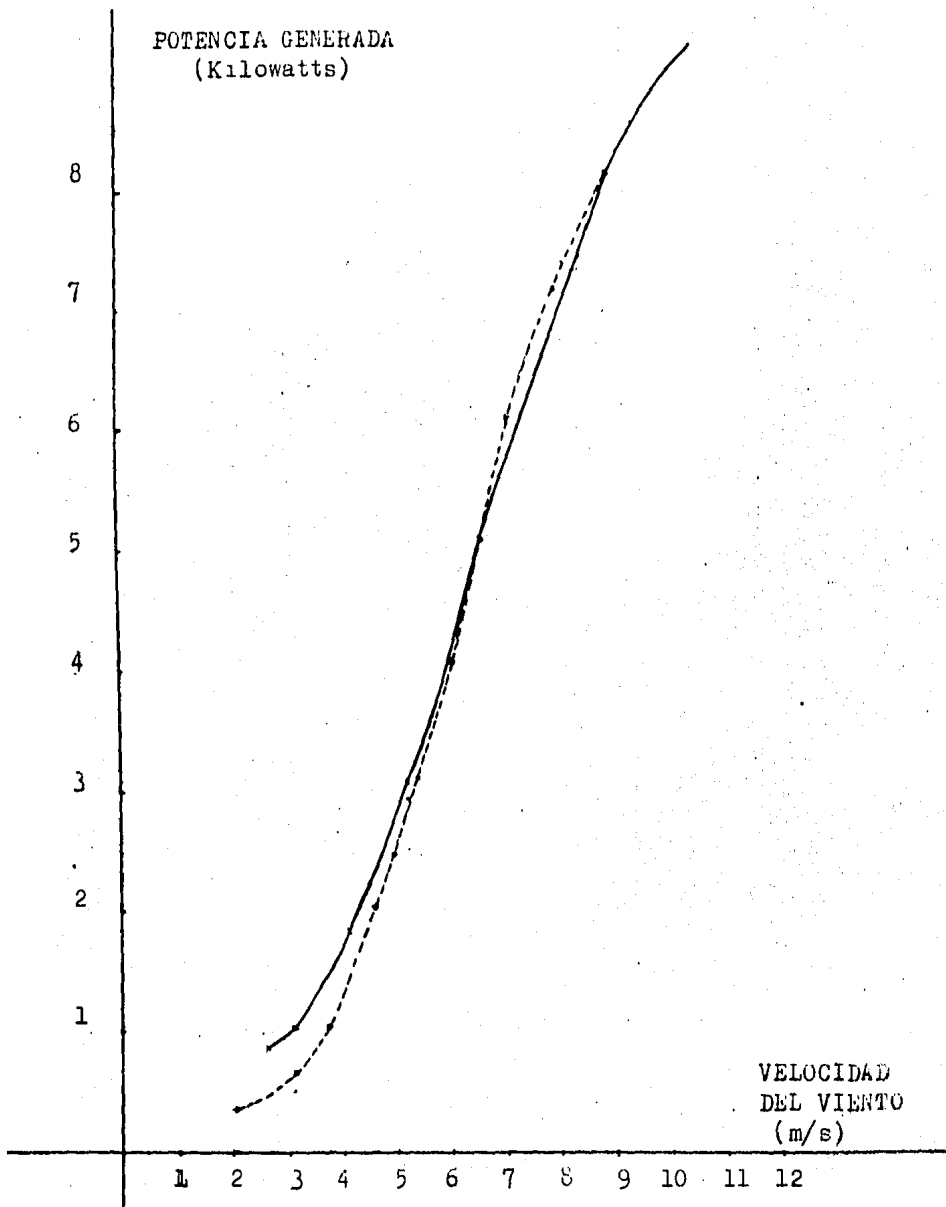


fig. 3.17 Curvas de Potencia contra Velocidad del Viento usando los métodos de: Bins y Potencia más Probable

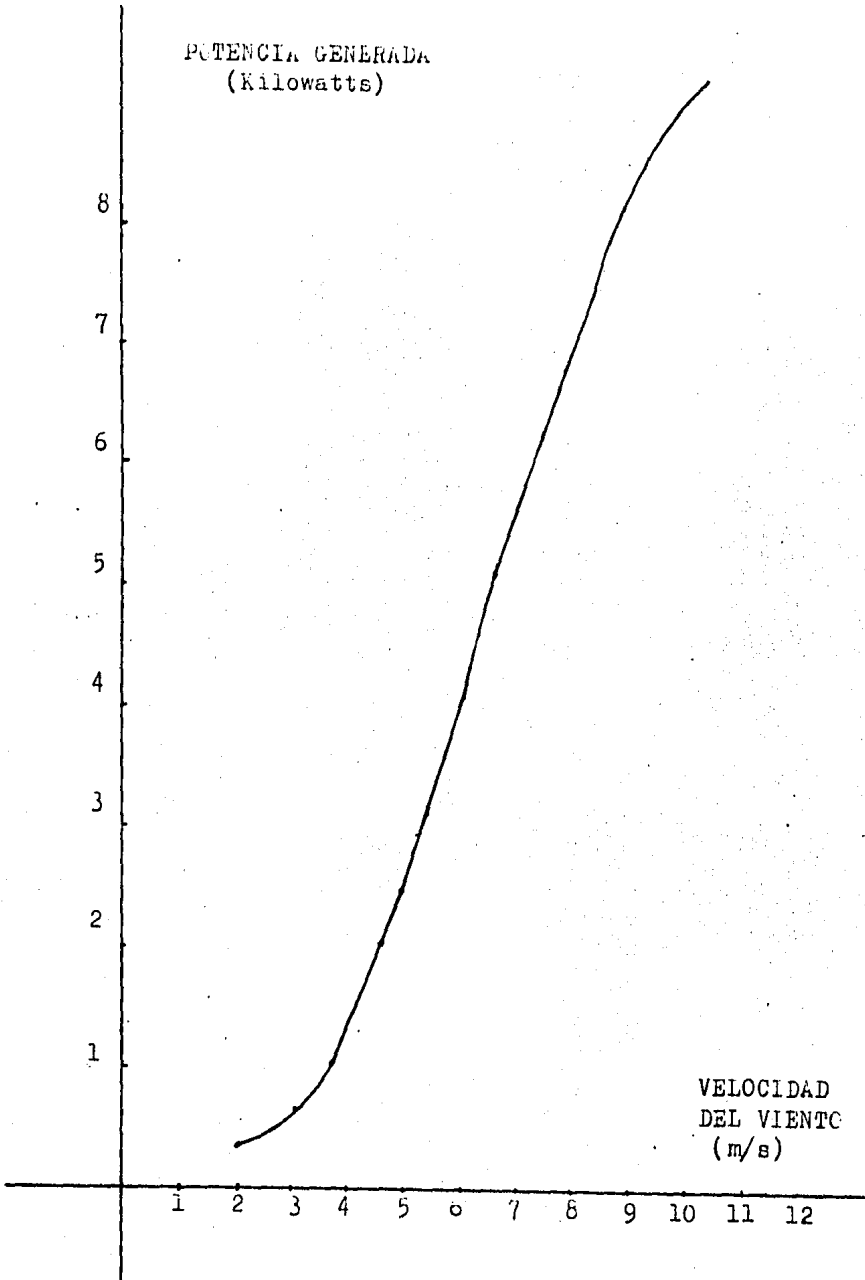


fig. 3.18 Curva de Potencia contra Velocidad del Viento con corrección por densidad, elaborada por la combinación de los métodos de: Bins y Potencia más Probable.

## Operación de los Sistemas de Seguridad

### - Dispositivos de punta de aspa:

Se observó que estos funcionaban satisfactoriamente, comenzando su operación a las 57 r.p.m. del rotor aproximadamente y regulando la velocidad de giro de este durante un rango de velocidades de viento del 20 % de la velocidad de diseño (10 m/s) aproximadamente; a partir de dicho rango los dispositivos no eran suficientes para regular la velocidad de giro del rotor, aumentando ésta hasta que el freno dinámico tenía que entrar en operación.

### -Freno dinámico:

Se observó que el freno dinámico operaba correctamente para el frenado del sistema a velocidades de viento iguales o menores que la velocidad de diseño del sistema. De igual forma el control manual permitía la operación esperada de arranque y frenado manual del aerogenerador. Sin embargo se encontró que a velocidades de viento mayores, para los casos en los que los dispositivos de punta de aspa regulaban la velocidad del rotor y permitían la operación arriba de los límites en cuanto a velocidad de viento se refiere; al entrar en operación automáticamente el freno dinámico, no podía detener al sistema por lo que se requirió de la operación manual del freno hidráulico. Por otra parte, se observó que el sensor de frecuencia era afectado por el inversor síncrono de 8 Kw, disparándose en ocasiones el freno dinámico automático en situaciones inesperadas, esto posiblemente se deba a la generación de señales producidas por el inicio de operación del inversor.

### - Freno Hidráulico

Este sistema de seguridad operó correctamente en toda la gama de velocidades de viento suscitadas durante el periodo de pruebas.

## 2a Evaluación

El resultado del procesamiento de los datos obtenidos mediante los programas de cómputo se presenta en las paginas 97A y 97B en las figuras 3.19 y 3.20 se presentan los gráficos de las curvas de potencia contra velocidad de viento y eficiencia contra velocidad de viento.



NOMBRE DEL SISTEMA: ALBATROS

TIPO: AEROGENERADOR

POTENCIA NOMINAL(WATTS): 8000 A 9 M/S

DIAMETRO DEL ROTOR(METROS): 11

FABRICANTE: INSTITUTO DE INVESTIGACIONES ELECTRICAS

LUGAR DE PRUEBAS: ESTACION EXPERIMENTAL EOLICA 'EL GAVILLERO'

FECHA DE PRUEBAS: AGOSTO DE 1984

BIN	D/BIN	VEL1	DSU1	PGEN1	DSP1	RPM	DSR	EFE	LRA	PGEN2	VEL2	GASTO
0	0	0.0	0.0	0	0	0	0	0.0	0.0	0	0.0	0.0
1	4	1.6	0.1	629	1028	0	0	99.9	0.0	700	1.5	0.0
2	45	2.7	0.2	353	243	0	0	34.3	0.0	392	2.5	0.0
3	167	3.6	0.3	821	390	0	0	34.6	0.0	913	3.4	0.0
4	231	4.5	0.3	1367	414	0	0	29.3	0.0	1520	4.2	0.0
5	96	5.5	0.3	2240	623	0	0	25.6	0.0	2491	5.2	0.0
6	59	6.5	0.3	2376	601	0	0	16.7	0.0	2641	6.1	0.0
7	14	7.3	0.2	2522	403	0	0	12.5	0.0	2804	6.9	0.0
8	0	0.0	0.0	0	0	0	0	0	0.0	0	0.0	0.0
9	0	0.0	0.0	0	0	0	0	0	0.0	0	0.0	0.0
10	0	0.0	0.0	0	0	0	0	0	0.0	0	0.0	0.0
11	0	0.0	0.0	0	0	0	0	0	0.0	0	0.0	0.0
12	0	0.0	0.0	0	0	0	0	0	0.0	0	0.0	0.0
13	0	0.0	0.0	0	0	0	0	0	0.0	0	0.0	0.0
14	0	0.0	0.0	0	0	0	0	0	0.0	0	0.0	0.0
15	0	0.0	0.0	0	0	0	0	0	0.0	0	0.0	0.0
16	0	0.0	0.0	0	0	0	0	0	0.0	0	0.0	0.0
17	0	0.0	0.0	0	0	0	0	0	0.0	0	0.0	0.0
18	0	0.0	0.0	0	0	0	0	0	0.0	0	0.0	0.0
19	0	0.0	0.0	0	0	0	0	0	0.0	0	0.0	0.0
20	0	0.0	0.0	0	0	0	0	0	0.0	0	0.0	0.0

RESULTADOS DE LA EVALUACION  
VELOCIDAD MEDIA DEL PERIODO DE PRUEBA(M/S): 6.08825  
NUMERO DE DATOS TOMADOS: 620  
POTENCIA PROMEDIO GENERADA: 624.343  
REVOLUCIONES POR MINUTO PROMEDIO: --  
TIEMPO DE MUESTREO FIJO: 5 MINUTOS  
DENSIDAD DEL AJRE TIPICA PROPORCINADA (KG/M3): 1.102  
EFICIENCIA PROMEDIO DEL SISTEMA (%): 26.10  
LAMBDA PROMEDIO DEL SISTEMA (ADIM): --

#### INTERPRETACION DE RESULTADOS

BIN = NUMERO DE BIN O RANGO DE VELOCIDAD DE VIENTO (J) EN M/S  
D/BIN = NUMERO DE DATOS POR CADA BIN  
VEL1 = VELOCIDAD DEL VIENTO PROMEDIO EN M/S  
DES1 = DESVIACION ESTANDAR DE LA VEL1  
PGEN1 = POTENCIA SUMINISTRADA POR EL SISTEMA SIN CORRECCION POR  
DENSIDAD DEL AJRE (WATTS)  
DSP1 = DESVIACION ESTANDAR DE LA PGEN1 (WATTS)  
RPM = REVOLUCIONES POR MINUTO DEL ROTOR  
DSR = DESVIACION ESTANDAR DE RPM  
EFE = EFICIENCIA DEL SISTEMA (%)  
LBA = RELACION DE VELOCIDAD DE PUNTA DE ASPA (ADIM)  
PGEN2 = POTENCIA CORREGIDA A CONDICIONES ESTANDAR (\*)  
VEL2 = VELOCIDAD CORREGIDA A CONDICIONES ESTANDAR (\*)

(\*) PARA POTENCIAS MENORES QUE EL 10 % DE LA POTENCIA MAXIMA,  
TOMESE LA CORRECCION POR VELOCIDAD DE VIENTO.

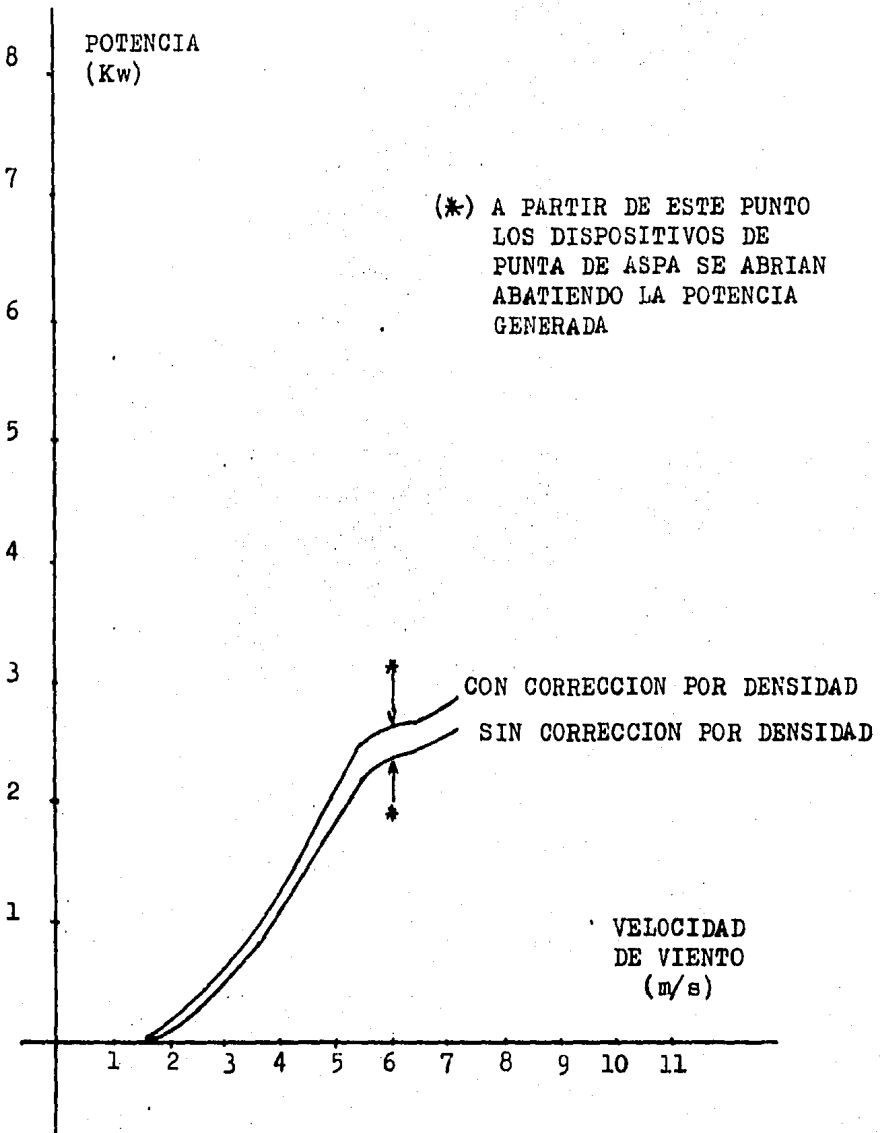


fig. 3.19 Gráficas de Potencias contra Velocidad de Viento

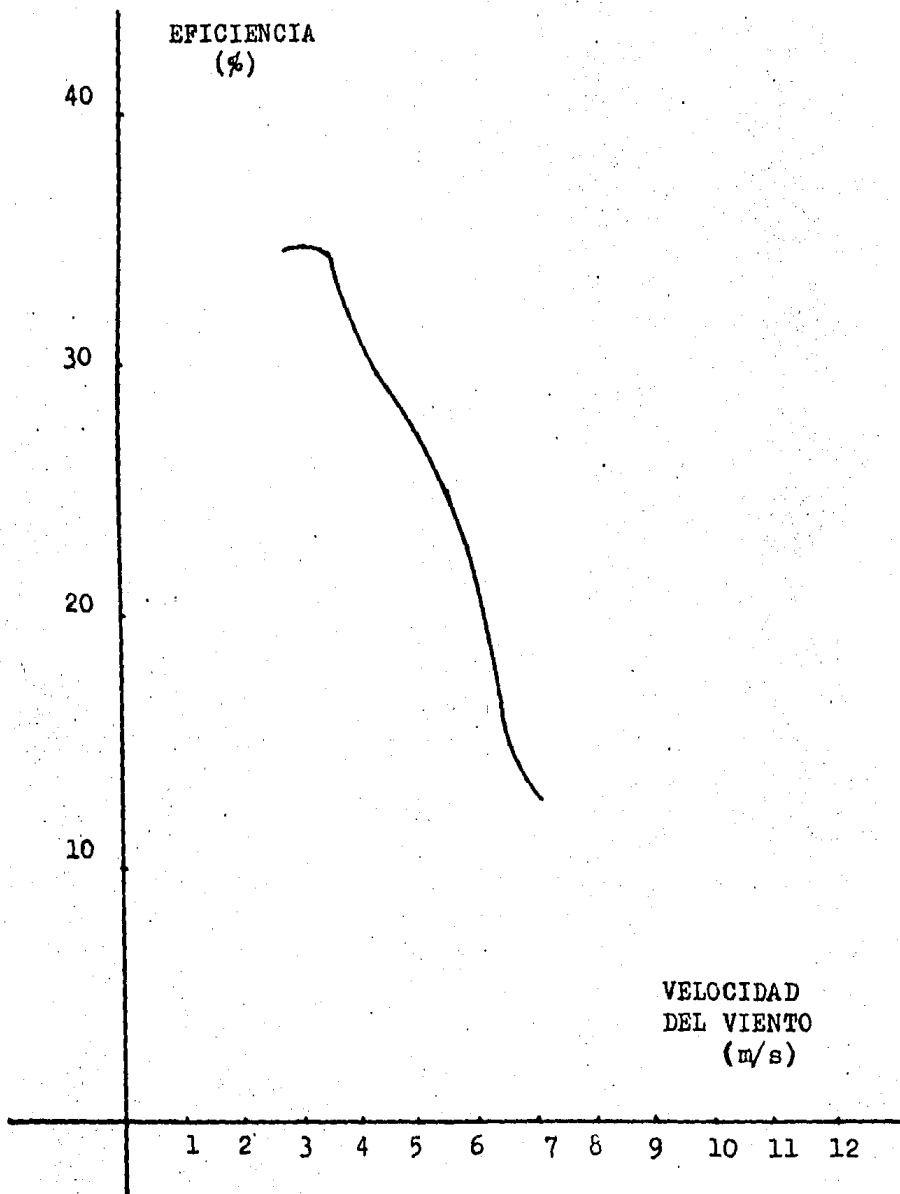


fig. 3.20 Gráfico de Eficiencia contra Velocidad de Viento

## Operación de los Sistemas de Seguridad

Después de que el sistema sufrió los daños de rotura y desprendimiento de una de sus aspas, se pensó en cambiar los dispositivos de seguridad; el freno dinámico se hizo operar a través de un sensor de velocidad de viento en vez de un sensor de revoluciones del rotor; el nuevo sistema de seguridad al registrar una velocidad de 10 m/s generaba dos señales, una señal sonora (timbre) y otra para hacer funcionar el freno dinámico.

### - Freno dinámico

Se observó que el freno dinámico operaba correctamente al sensor los 10 m/s, alcanzando a detener el sistema.

### - Dispositivos de punta de aspa

Después del cambio de las tres aspas requerido para la 2a. evaluación; la calibración de los dispositivos se hizo necesaria ya que uno de ellos operaba a las 30 r.p.m.; precisamente el dispositivo correspondiente al aspa que se rompió. Por esta razón estuvieron calibrando hasta que su operación se efectuó a las 45 r.p.m.

### - Freno hidráulico

Igual que en la 1a. evaluación el freno operó correctamente para toda la gama de velocidades de viento.

## 3.17 A Interpretación de Resultados.

### 1a. Evaluación

Los resultados obtenidos deben ser considerados como la potencia máxima que en un momento dado puede entregar el aerogenerador en función a la velocidad del viento; ya que fueron calculados a partir de datos instantáneos; otra posible interpretación; es una aproximación de la potencia entregada en la flecha del rotor; si se aplican los factores de eficiencia del generador eléctrico y la relación de transmisión utilizados. Sin embargo esta evaluación no deberá ser considerada por ningún motivo como la evaluación del comportamiento del sistema rotor-generador-inversor sincrónico; para lo cual se debe realizar un procedimiento de adquisición de datos como el utilizado en la 2a. evaluación; cuando el sistema opere correctamente.

## 2a. Evaluación

Las gráficas de la figura 3.19, en la curva con corrección por densidad, puede observarse que la potencia que entra el sistema no alcanza los 3 Kw a la velocidad de 7 m/s, señalándose el punto en el cual entran en acción los dispositivos de punta de aspa, abatiéndose marcadamente la potencia. Lo anterior se debió a la descalibración de los dispositivos de punta de aspa que entraban en acción a 45 R.P.M. después que se cambiaron las tres espas. Por lo que los resultados de esta prueba no son representativos en su totalidad, solo para las velocidades bajas de viento (Inferiores a 5 m/s)

## 3.18 Instrumentación Empleada en las Evaluaciones de los tres SCEE

### Mediciones de Voltaje y Corriente.

Multímetro digital marca Fluke B022A. (John Fluke MFG Co. Inc. Seattle Washington U.S.A.).

Escala Ac/Dc: 20M ohms, 2000, 1000 VCD, 750 VCA; 200, 20, 2 Vcd y Vca; 200mv ca y cd, 200 ohms.

Multímetro digital BK Precision Dynascan Corporation. Modelo: 2845 Autoranging. Escala Autolock DC/AC. Volts, Ohms, Milliamps.

### Mediciones de Velocidad de Viento.

Anemómetro marca Weather Measure Corporation Sacramento California. P/N 403006. Modelo W 200 S-1. Serie 1460 Escalas 0 a 45 m/s ( 0 a 100 millas/hora).

### Mediciones de Revoluciones por Minuto.

Frecuencímetro YEW Yokosawa Electric Works, LTD 120, 240 volts.

### Mediciones de Potencia

Wattímetro marca Sanso Rr 27 7/9 (5239 BW). C400, 120v, 3 H, E4HS, 60 Hz, 15 a, 7.2 Kh. CFE.

### Mediciones de Velocidad y Potencia a través de pulsos.

Analizador de Pequeños Sistemas Conversores de Energía Eléctrica. Diseño y construcción del Instituto de Investigaciones Eléctricas.

## CAPITULO IV COMENTARIOS, CONCLUSIONES Y SUGERENCIAS

### 4.1 INTRODUCCION

El propósito del presente capítulo es concentrar lo más relevante de los capítulos precedentes, aportándose las conclusiones y sugerencias que el autor considera pertinentes.

### 4.2 Comentarios a los Antecedentes y Conceptos

En esa sección las observaciones que pueden hacerse son muy reducidas porque son definiciones establecidas, solo podemos subrayar que lo que motivó su incorporación al contenido de la tesis fué la necesidad de establecer ciertas bases que permitan entender mejor las exposiciones de los capítulos II y III.

### 4.3 Comentarios sobre los Métodos de Evaluación

#### 4.3.1 Comentarios Generales a los Métodos de Evaluación

Independientemente del método usado para la evaluación de un SCEE de los presentados en el capítulo II es evidente que la precisión de las curvas que se obtienen estará en función de la cantidad de datos que se hayan registrado; a mayor cantidad de datos, mayor precisión y a menor cantidad de datos menor precisión.

Resulta importante hacer notar que los datos registrados para la evaluación de un SCEE, deben cubrir la gama total de las velocidades de viento a que puede trabajar el sistema, además, para cada velocidad tener un número suficiente de registros, es decir, si un sistema trabaja de 3 a 10 m/s, se toman suficientes datos (10 como mínimo) para los intervalos de 3 a 4, de 4 a 5, y así sucesivamente hasta los 10 m/s.

Los métodos mencionados también son aplicables para obtener las curvas de la relación de velocidad de punta de aspa ( $\dot{A}$ ) contra la velocidad del viento y de la velocidad angular (revoluciones por minuto) contra la velocidad del viento. También cabe resaltar que, de la curva de potencia se puede obtener la curva de eficiencia contra velocidad del viento.

#### 4.3.2. Comentarios sobre el método de bins

De los tres métodos presentados anteriormente, el método de bins es el que se emplea con mayor frecuencia, tanto, que inclusive se da como método a seguir en forma estandarizada en documentos como el que se presenta en el anexo 1. Como se sabe el rasgo principal del método de bins es obtener los valores promedio de los datos agrupados en cada bin; para estas condiciones se pueden acarrear algunos errores en la zona de baja velocidad, en las curvas de potencia contra velocidad de viento. La razón por la que puede suceder esto, es que la potencia que entrega un SCEE inicia con una velocidad de viento diferente de cero, denominada velocidad de cut-in y en las velocidades inferiores a esta, el sistema no está entregando potencia de tal forma que algunos datos de la misma valen cero y al promediarse, para determinar la cifra que define uno de los puntos de la curva, se obtendrá un valor muy bajo, que no es en realidad el que corresponde al valor promedio de la velocidad de viento asociada. Con el siguiente ejemplo numérico puede observarse mejor lo que se ha expuesto.

	Datos Registrados	Promedio
Velocidad (m/s):	4,4,3,3,3,3,3,3,3,4,4,5,4,3	3.467 m/s
Potencia (Watts):	30,20,10,0,0,0,0,0,0,10,20,40,20,0	10 watts

Suponiendo que la velocidad de cut-in es de 4 m/s y los datos registrados fueron tomados cuando el sistema estuvo funcionando al rededor de ésta velocidad, resulta erróneo que aparezca asociada a una velocidad de 3.47 m/s una potencia de 10 watts, cuando en realidad el sistema no está entregando potencia.

En el ejemplo anterior resultaría más adecuado aplicar el método de la potencia más probable; ya que definiría que para una velocidad de 3 m/s se tendrá una potencia igual a cero y en realidad eso es lo correcto.



#### 4.4 Comentarios sobre el método de la potencia más probable

El método de la potencia más probable no es conveniente para la evaluación total de un SCEE porque al tomar la moda de la velocidad del viento y hacer la estimación en una curva de distribución de velocidad de viento, se observa que la posición de la moda respecto a la media queda ubicada en un valor más bajo; esto se traducirá en una estimación de potencia más baja de lo que en realidad es. (5)

#### 4.5 Comentarios sobre el método de acoplamiento de frecuencia

El método de acoplamiento de frecuencia tiene la desventaja de que solo es aplicable a los SCEE que presentan un comportamiento monotonamente creciente en sus curvas características de potencia contra velocidad de viento. Para sistemas que presentan comportamientos crecientes decrecientes o decrecientes no es aplicable, ya que para una misma potencia se tienen dos diferentes velocidades; en la figura 4.1 se muestra la curva de potencia de un SCEE con comportamiento creciente decreciente. Como puede verse para la potencia  $P_1$ , le corresponden los valores de velocidad  $V_1$  y  $V_2$ ; de esta manera las frecuencias acumulativas y las velocidades  $V_1$  y  $V_2$  son diferentes y no pueden asociarse a la frecuencia acumulativa de la potencia  $P_1$ . En estas condiciones solo quedaría definido el punto  $P_1 V_1$  de la curva pero no el punto  $P_1 V_2$ .

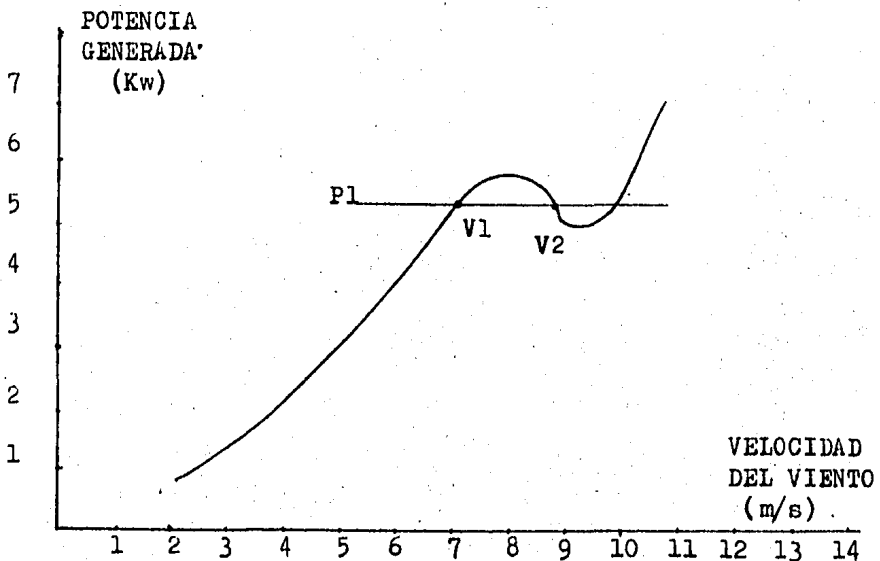


fig. 4.1 Curva de Potencia de un SCEE creciente-decreciente

#### 4.6 Conclusiones y Sugerencias

De acuerdo con los comentarios expresados para el método de bins y para el método de potencia más probable, en donde se describen los inconvenientes del primer método para el cálculo de la parte inferior de la curva de potencia, así como la ventaja del método de la potencia más probable para la identificación de las ramas de la curva de histéresis de un sistema, y su desventaja para el cálculo de la parte superior de la curva; tomando también la experiencia obtenida en el desarrollo de pruebas a SCFE, así como el estudio de métodos y resultados utilizados en las mismas se propone a manera experimental el uso de un método consistente en la unión de los métodos mencionados; de tal forma que se calcule la parte baja de la curva a partir del método de la potencia más probable y la parte alta mediante el método de bins. Lo que se busca es eliminar los inconvenientes de ambos métodos y unir sus ventajas. El criterio para el punto de intersección de ambos métodos se fija en el cruce de las curvas obtenidas durante la prueba y se pretende observar empíricamente la conveniencia de este valor.

##### 4.6.1 Conclusiones para la Evaluación del Aerogenerador de 6 Kw

De acuerdo con los objetivos establecidos se puede decir que se cumplieron, ya que se obtuvieron las gráficas de potencia y eficiencia, y aunque no está dentro de los objetivos, podemos señalar también como conclusión que los sistemas de sobrevelocidad y frenado operan de manera óptima; durante el transcurso de la prueba dichos sistemas operaron en más de tres ocasiones, cuando se excedía alguno de los parámetros que permitían su control.

Respecto a las curvas de potencia se puede concluir que la potencia que entrega el sistema es muy diferente a la que señalan los datos del fabricante y como consecuencia las eficiencias también resultan afectadas. Pueden existir muchas causas por las que se ocasione esta diferencia.

##### 4.6.2 Sugerencias

Se sugiere que para posteriores evaluaciones se hagan cambios en la calibración de los sistemas de adecuación de la energía entregada (inversor sincrónico) y en los sistemas de orientación (para este caso la cola del sistema) y se extraigan datos a diferentes condiciones de calibración para poder ubicar hasta cierto punto un indicador de las mejores condiciones de trabajo del aerogenerador. De no ser posible estas variaciones, se sugiere que exista mayor comunicación entre fabricantes diseñadores y evaluadores.

#### 4.6.3 Conclusiones para la Evaluación de la Aerobomba de 200 Watts.

En éste caso se cumplieron los objetivos que se pretendían, aunque existieron algunas limitantes bastante marcadas para la evaluación ya que la instalación no estaba de acuerdo a las condiciones de diseño, por lo que todos los datos obtenidos fueron a 4 metros de profundidad. Con las correcciones teóricas hechas de las curvas de potencia y de eficiencia para la aerobomba se prevé que es una máquina que puede rendir muy buenos resultados en las condiciones de diseño exclusivamente.

#### 4.6.4 Sugerencias

Se sugiere para posteriores evaluaciones la implementación de un sistema simulador de carga, si es que no se dispone de las instalaciones a las profundidades de diseño. Se sugiere también para dar mayor versatilidad, en el sentido de que pueda operar la bomba a diferentes profundidades, se den diferentes diámetros y carreras de pistón de la bomba de desplazamiento positivo a emplear.

#### 4.6.5 Conclusiones para la Evaluación del Aerogenerador de 10 Kw.

Se puede decir que los objetivos planteados fueron alcanzados y aunque solo se pretendía una evaluación con este sistema se tuvieron que realizar dos. De acuerdo con lo observado durante estas, se concluye que todo tiende a indicar que el sistema tiene deficiencias en cuanto a su control y construcción, además, la potencia que se esperaba obtener de acuerdo con los datos de diseño, no se alcanzó según lo indican las evaluaciones, las razones de esto pueden ser muy diversas y exceden los alcances de esta tesis.

#### 4.6.6 Sugerencias

Se sugiere para posteriores evaluaciones de SCEE de tamaños que excedan los 5 metros de diámetro y pesos considerables la implementación de sistemas de seguridad (controles de sobrevelocidad y frenado) que se activen al registrar tres de los parámetros de evaluación más importantes como son voltaje corriente y velocidad de viento para aerogeneradores, sesto, metros cúbicos y velocidad de viento para aerobombas.

#### 4.6.7 Conclusiones y Sugerencias Generales del Capitulo III

Se puede dar como conclusión del capítulo III que la evaluación tanto de los aerogeneradores como de la aerobomba en las condiciones en que se realizó, puede tomarse como ajustada a las normas existentes que se tienen, dándose los resultados lo mas cercano posibles a la realidad de acuerdo con los medios de que se dispuso.

**SE SUGIERE PARA MEJORAR LOS RESULTADOS DE EVALUACIONES POSTERIORES UN PERIODO MAS LARGO DE REGISTRO DE DATOS.**

Es muy importante la implementación de equipo para el registro de todos los parámetros a evaluar. Para el caso de los aerogeneradores se sugiere el empleo de equipos para registrar voltaje, corriente, var en la flecha, potencia producida, r.p.m. cuando sean datos instantáneos.

Para las aerobombas equipo para registrar gasto, presión, r.p.m., var en la flecha y metros cúbicos bombeados.

Es un buen acierto el empleo del APSCEE, que permite un registro continuo de los parámetros de evaluación.

**ANEXO I**

## **"Prácticas Internacionales Recomendadas para las Pruebas de los Sistemas Conversores de Energía Eólica"**

### **I. Pruebas de Ejecución**

Editado por:

Andrew R. Trenka; Gerente de operación de pruebas en la rama de SCEE de Rockwell International; P.O. Box 464; Golden Colorado 80401 U.S.A.

B. Maribo Pedersen; Departamento de Mecánica de Fluidos de la Universidad Técnica de Dinamarca; Lundtoftevej 100, Building 404; DK 2800 Lyngby.

Sten Frandsen; del Laboratorio Nacional Riso de Dinamarca; DK 4000 Roskilde.

Preparado para la "Reunión de Energía Eólica en la Ejecución de Pruebas" en Barandula Hofjellshotell, Geilo, Noruega; el 19 y 20 de febrero de 1981.

### **Agradecimientos**

El formato y contenido de este documento, está basado en "Performance Rating Document" (ASTM #157), preparado por la Asociación Americana de Energía Eólica en el programa para sistemas conversores de energía eólica (SCEE), que está siendo llevado con la cooperación del Departamento de Energía (U.S.A.). Las secciones que presenta este documento han sido reproducidas textualmente. Agregados y modificaciones han sido dados al respecto por los laboratorios SANDIA, la Administración Nacional del Espacio y Aeronáutica (NASA), y varios miembros de la Asociación Internacional de Energía.

### **1.0 Introducción**

Como la demanda de energía en el mundo ha ido en aumento y los datos divulgados de las reservas proyectadas y conocidas de petróleo, no son prometedoras, es de interés que el desarrollo y producción de fuentes alternativas de energía tendan un crecimiento. De especial interés han sido las fuentes renovables, como la solar, geotérmica, hidráulica, etcétera. De los recursos solares, la energía del viento ha experimentado un rápido resurgimiento. Como los SCEE penetran el mercado nacional e internacional de energía, la necesidad crecerá por aceptación general; así también los procedimientos de prueba uniformes y significativos para la evaluación de estos

Los procedimientos necesarios para la evaluación, deben

abarcando todos los aspectos de un SCEE; aspectos como: producción de energía, calidad de potencia, confiabilidad, durabilidad, seguridad; así como también; costo económico real; divulgación de características; el impacto en el medio ambiente y la interferencia electromagnética. El desarrollo internacionalmente acorde, sobre los procedimientos de prueba es necesario en cada una de estas áreas, como una ayuda al desarrollo de esta industria; mientras se confirma la confianza y prevención del caos en el mercado.

La intención de la Asociación Internacional de Energía es proponer un anexo para los SCEE, que dirija el desarrollo internacionalmente acorde con los procedimientos de prueba; tratando cada uno de los aspectos antes mencionados; para poder caracterizar los SCEE. El anexo persigue este esfuerzo mediante el mantenimiento periódico de Juntas de expertos; definiendo y determinando un consenso de procedimientos de pruebas en cada una de las siguientes áreas:

- 1) Ejecución de pruebas
- 2) Evaluación de pruebas de fatiga
- 3) Pruebas acústicas
- 4) Pruebas de interferencia electromagnética
- 5) Pruebas de seguridad y confiabilidad
- 6) Pruebas de calidad de potencia

Este documento consigna el primero de estos esfuerzos. El anexo entonces; buscará ganar la aprobación de los procedimientos en cada país miembro a través de acuerdos con la Asociación Internacional de Energía (IEA)

## 2.0 Alcance de la Práctica de Ejecución de Pruebas

Este documento describe las prácticas recomendadas para pruebas y características de los reportes de ejecución en SCEE. Se da la metodología estándar para comparar las características de producción de energía de los SCEE disponibles en el mercado. A continuación se dan los alcances:

- 1) Los métodos presentados aquí no están limitados a SCEE que producen electricidad.
- 2) Los procedimientos y prácticas son generalmente aplicados a todos los tamaños y clasificaciones.

3) Los procedimientos especificados están recomendados. Pueden admitirse procedimientos alternativos si la documentación demuestra su equivalencia a las prácticas recomendadas.

### 3.0 Prácticas Recomendadas para la Ejecución de Pruebas en SCEE's

#### 3.1 Definiciones y Unidades

##### Rendimiento Anual de Energía:

Es la energía total calculada que puede ser producida por un SCEE durante el período de un año, suponiendo una distribución de Rayleigh en la densidad de probabilidad de la velocidad del viento, basada en la velocidad de viento promedio.

##### Tiempo Promedio :

Para cada par de datos que abarca la curva de potencia, deben ser promedios de diez minutos de velocidad de viento y de potencia neta.

##### Ancho del Bin :

Es el tamaño del intervalo de velocidad de viento usando el método de bins, como técnica de análisis de datos (ver figura 1).

##### Cut-in de Velocidad de Viento :

Es la mínima velocidad de viento a la cual el SCEE comienza a producir potencia aprovechable que es entregada a la carga ( ver figura 1).

##### Velocidad de Viento Máxima de Diseño :

Es la máxima velocidad de viento para un SCEE operando automáticamente (o sin operación manual), pero no necesariamente generando a la que ha sido diseñado, para sostenerse sin daño estructural de sus componentes o pérdida de su capacidad de funcionamiento normal.

##### Potencia Máxima :

Es la cantidad máxima de potencia que producirá un SCEE en operación normal (ver figura 1).

##### Prueba de Velocidad de Viento Máxima :



Es la máxima velocidad de viento para un SCEE operando automáticamente, pero no necesariamente generando, que ha sostenido sin daño en componentes estructurales o pérdida de su capacidad para funcionar normalmente.

#### Rendimiento de Potencia Media (MPD) :

Es la potencia promedio calculada, que sería producida por un SCEE suponiendo una distribución de Rauleish, en la densidad de probabilidad de la velocidad de viento, basada sobre la velocidad de viento promedio.

#### Rendimiento de Potencia Neta :

Es el rendimiento de potencia de un SCEE ; menos la potencia consumida por el control del SCEE, monitor, pantalla o mantenimiento de operación; por ejemplo la potencia de suministro a usar

#### Control de Sobrevelocidad :

Es una descripción del medio por el cual la velocidad del rotor es controlada durante los periodos de alta velocidad; que acción es empleada a las velocidades de viento correspondientes.

#### Curva de Potencia :

Es una gráfica que describe la potencia neta de salida de un SCEE como una función de la velocidad de viento. La duración del período de pruebas sobre la cual la curva de potencia neta entrasada es recopilada, debe ser con un mínimo de 500 horas de operación del sistema.

#### Forma de la Potencia :

Son las características físicas que definen la forma por la cual la potencia es producida por el SCEE, para ser entregada a la carga.

#### Distribución de Rauleish:

Es una función de distribución asumida por la velocidad de viento, que es utilizada para cálculos en la conversión de energía del viento. La función de distribución basada en la velocidad de viento promedio anual específica, esta definida por la siguiente ecuación :

$$F(v) = V \left( \frac{V}{\Delta V} \right) \left( \frac{V}{V_c} \right) \times \exp \left( - \left( \frac{V}{V_c} \right) \left( \frac{V}{\Delta V} \right)^2 \right)$$

donde:

$F(V)$  = Frecuencia de ocurrencia asociada a cada velocidad de viento incremental  $V$ , centrada en  $V$ . NOTA: La función de distribución es igual a  $8760 [F(V)]$

$V_c$  = Centro del incremento de la velocidad de viento.

$\Delta V$  = Promedio anual de velocidad de viento.

$\Delta V$  = Anchura del incremento de velocidad de viento.

**Velocidad del Rotor :**

Es la velocidad o rango de velocidades del rotor del SCEE entre la velocidad de viento de Cut-in y la velocidad de viento correspondiente a la máxima potencia.

**Unidades :**

Son los valores numéricos reportados que están dados en unidades del sistema métrico internacional y entre paréntesis por el equivalente al sistema inglés.

### 3.2 Metodología en el Campo de Prueba

#### Generalidades

Las características básicas de comportamiento de los SCEE deben estar definidas por la curva de potencia (potencia neta entregada contra velocidad del viento). La curva de potencia debe constar de datos recolectados del comportamiento en el campo de pruebas en condiciones atmosféricas naturales (esto es el sistema está estacionario y se expone al viento natural). Los datos obtenidos de los cálculos analíticos de un modelo de SCEE, de un banco de pruebas, con pruebas de velocidad constante (pruebas con arda) o de pruebas en túnel de viento no deben ser empleados para generar la curva de potencia de un SCEE.

#### La Máquina de Prueba

Los SCEE deben ser descritos a fondo incluyendo la ingeniería pertinente, datos geométricos y fotografías de la má-

quina en la prueba realizada

En el caso de las pruebas a modelos de SCEE de producción estandar, el fabricante debe de dar una descripción clara del modelo y número de serie de la máquina probada. El fabricante no debe modificar o ajustar cualquiera de los componentes del SCEE de forma que realce el funcionamiento mas allá de la producción regular de la máquina, en una instalación típica de uso.

En el caso de pruebas a prototipos o sistemas especiales de una misma clase de SCEE, debe ser suministrada la documentación completa de la ingeniería y configuración geométrica. Los cambios paramétricos a controles, geometría, cargas aplicadas y otros, deben ser completos y claramente anotados.

### **El Sitio de la Prueba**

Debe ser proporcionada una descripción y un mapa del sitio de la prueba. La selección del sitio debe minimizar la posibilidad de modificaciones, por las características topológicas locales en los resultados de la prueba. En situaciones donde las características topológicas locales puedan afectar los resultados de la prueba por periodos de tiempo, debido a la dirección del viento, es recomendable que esos resultados de la prueba sean suprimidos o reportados separadamente con una explicación adecuada.

### **Instalación**

La descripción de la instalación debe ser dada. En el caso de pruebas para modelos de SCEE de producción estandar, la torre y la carga aplicadas al SCEE, deben ser recomendadas por el fabricante, para el uso normal. Cualquier desviación debe ser anotada.

Debe considerarse en la instalación para un SCEE, el sistema de control, la carga aplicada, la torre y la instrumentación para efectuar las mediciones pertinentes.

### **Instrumentación**

#### **Medición de Condiciones Atmosféricas**

#### **Medición de Velocidad del Viento - Especificaciones del Anemómetro**

El anemómetro empleado para medir la velocidad del viento debe tener un error máximo del 5 % ó menos sobre un rango de

velocidades de 4 a 25 m/s

La calibración del anemómetro debe ser vigilada del inicio a fin del periodo de prueba de la máquina. El uso de una fuente secundaria de calibración (fabricantes de anemómetros, laboratorios, etc.) es aceptable en función de su prestigio.

En la organización de la prueba, debe determinarse el mejor tipo de anemómetro a ser usado en esta.

#### Medición de Velocidad de Viento - Localización del Anemómetro

En la colocación del anemómetro se deben minimizar los efectos de interferencia por el SCEE, la torre y la topografía local.

Es ampliamente recomendado que el anemómetro de prueba este localizado a la misma altura del centro del rotor o su equivalente, no obstante pueden darse variaciones, para estas deben considerarse los siguientes puntos:

a) Para SCEE's de eje horizontal, que tienen su eje a una altura mayor que 15 metros, la elevación del anemómetro debe tener un margen del 10 % de la altura del eje.

b) Para SCEE's (pequeños generalmente) que tienen su eje mas abajo de los 15 metros, la elevación del anemómetro debe estar entre los 6 metros y la altura del centro del eje del SCEE.

Para anemómetros de prueba que estén colocados a una altura diferente del cubo del rotor, debe aplicarse una corrección a los datos tomados por el efecto del perfil del viento, este método se describe en la sección siguiente (3.3).

Durante el curso de la prueba, el anemómetro de prueba nunca debe estar inmediatamente después de cualquier parte del rotor del SCEE, si esto ocurre durante la prueba, estos datos deben ser descartados.

El anemómetro de prueba debe estar colocado entre 2 y 8 veces el diámetro del rotor viento arriba del SCEE. La línea de centros de la torre, debe ser la referencia para los requerimientos de la colocación del anemómetro.

Para los SCEE's de eje vertical, el diámetro de referencia que debe ser usado para localizar la elevación del anemómetro

es el promedio del diámetro máximo del rotor y la altura del mismo,  $(D = (D_{max} + h) / 2)$

#### Especificaciones de las Mediciones de la Temperatura Atmosférica

El termómetro u otro indicador de temperatura deben tener subdivisiones de 0.5 grados Celsius, en el rango de temperaturas experimentadas en la prueba.

El termómetro u otro indicador de temperatura debe tener una marca mínima de 1 grado Celsius ó menos.

#### Localización de Mediciones de Temperatura Atmosférica

La temperatura del aire debe ser medida en la base de la torre del SCCE o en la base de la torre del anemómetro. Las mediciones de presión deben ser hechas en el mismo lugar.

El bulbo del termómetro u otro transductor de temperatura deben estar protegidos de los rayos directos del sol durante la prueba.

#### Especificaciones de las Mediciones de Presión Atmosférica

El barómetro usado para medir la presión atmosférica debe tener una exactitud del 0.3 % en el rango de presiones experimentado durante la prueba.

El barómetro debe tener una marca mínima de 2.5 mm de Hg ó menos.

#### Localización de la Medición de Presión Atmosférica

La presión atmosférica debe ser medida en la base de la torre del SCCE o en la base de la torre del anemómetro; ambas mediciones, de presión y temperatura, deben ser hechas en el mismo lugar.

#### Parámetros Principales de Medición de la Máquina a Prueba

#### Especificaciones de la Medición de Velocidad del Rotor

El dispositivo usado para medir la velocidad del rotor debe tener una exactitud de  $\pm 3\%$  en el rango de potencia producida por la máquina a prueba. El tiempo de respuesta máximo del dispositivo debe ser 0.1 de la potencia máxima producida por la velocidad del rotor.

#### Localización de la Medición de Velocidad del Rotor

La velocidad del rotor debe ser medida directamente de la flecha del mismo o en cualquier punto atrás de él. También puede ser deducida de mediciones tomadas en otra parte del sistema. De cualquier forma cuando la medición no este hecha en la flecha del rotor, una verificación experimental, entre la velocidad del rotor y la velocidad en la localización física de la medición debe ser dada.

#### Especificación de la Medición de Potencia de Salida

La instrumentación usada para monitorear la potencia debe tener una exactitud acumulativa con un margen del 3 % sobre el rango del 5 al 125 % de la potencia máxima del SCEE.

Cada componente de esta instrumentación debe ser calibrado antes y después de la prueba. Esta calibración debe ser traducible a estándares internacionales.

Para SCEE's que tienen una salida de corriente alterna, en la instrumentación eléctrica, deben tenerse verdaderas lecturas de valores RMS (Root-Mean-Square) de potencia real. Las mediciones de voltaje y corriente con contenido de armónicas, deben estar dadas en forma de porcentaje (%) de amplitud a cada una de las primeras 5 armónicas de la frecuencia fundamental de la potencia máxima de salida de la máquina a prueba.

La referencia de amplitud debe ser la amplitud de la fundamental de la potencia máxima de la máquina a prueba.

Para SCEE que serán interconectados con líneas de energía pública, deben hacerse las mediciones de V A R (volts-amperes-rectivos) requeridos para la máquina a prueba. En suma se deben establecer las condiciones para medir las variaciones del voltaje máximo de la potencia de salida y la corriente de puesta en marcha.

#### Localización de la Medición de Potencia de Salida

La instrumentación para monitoreo de la potencia del SCEE deberá estar colocada en el circuito de potencia o el equivalente de tal manera que garantice que solamente la potencia entregada a la carga es la medida.

## Medición de la Carga Aplicada

### Especificación de las Mediciones a la Carga Aplicada

La aplicación de la carga a prueba debe ser representativa del consumo probable en situación de carga. Los parámetros físicos deben ser medidos y documentados consistentemente con los lineamientos de este documento y buenas prácticas ingenieriles.

### Localización de Mediciones de la Carga Aplicada

La carga aplicada debe estar colocada en el circuito de potencia del SCEE o su equivalente, de tal forma que asegure que toda la potencia neta de salida de la máquina a prueba, sea la entregada a la carga, cuidese que la medición, deba ser solo, la energía de salida entregada por la máquina a prueba.

## Procedimiento de Prueba

### Comentarios

Todos los aspectos de los procedimientos de prueba deben ser claros y documentados para que las condiciones de las pruebas físicas, puedan ser llevadas a cabo nuevamente en cualquier ocasión posterior. Debe ser escrito un plan de prueba detallado al destinatario aplicable a cada artículo de la sección 3.2 de este documento, agregando las actividades necesarias adicionales para lograr el correcto desarrollo de la prueba y el mantenimiento de la máquina.

La prueba debe de hacerse en condiciones atmosféricas naturales, para las cuales la máquina a prueba estará sujeto. La instrumentación apropiada debe disponerse para medir los parámetros necesarios y así caracterizar la potencia de salida experimental de la máquina a prueba. Un elevado número de muestras de velocidad de viento y los principales parámetros asociados, deben ser llevados sobre un amplio rango de velocidades de viento y los principales parámetros asociados, deben ser llevados sobre un amplio rango de velocidades de viento. También deben ser hechas mediciones periódicas de presión

y temperatura. Todos los datos deben ser revisados para su exactitud y consistencia; sobre bases periódicas durante la prueba, para asegurar un máximo de confiabilidad, deben mantenerse diarios apropiados y documentados de todos los eventos sucedidos durante la prueba.

#### Algunos Requerimientos Generales

##### Duración y Continuidad de las Pruebas

El procedimiento dirigido a la duración y continuidad de las pruebas debe ser dado para un mínimo de 500 horas continuas, en un periodo ininterrumpido del tiempo de prueba, sin embargo se reconoce que esta condición no es posible llevarla a cabo, en muchos casos debido al mal funcionamiento de la máquina; al mal funcionamiento de la instrumentación, a los requerimientos de conservación, etcétera. Por lo tanto la mínima duración de la prueba de la máquina, debe ser 500 horas acumuladas de tiempo de operación. Durante el periodo de prueba de la máquina, debe haberse experimentado por lo menos tres veces el requerimiento del sistema de control de seguridad.

Si por cualquier razón, el último periodo de pruebas es menor de 15 minutos, esa prueba debe invalidarse y agregarse a los datos que serán descartados.

##### Limitaciones en las Modificaciones y Ajustes de la Máquina Prueba

Si la máquina es un prototipo o una máquina experimental, cualquier ajuste o modificación hecha en esta, durante el periodo de prueba debe estar indicada. También se documentará una estimación de los impactos de estos cambios en el funcionamiento del SCEE.

Si la máquina es un modelo de producción estandar y las pruebas están siendo llevadas, para entregar datos al consumidor, entonces se aplicará lo siguiente :

Los cambios manuales en la posición de la inclinación de los álabes en la velocidad de operación del rotor no deben ser hechos durante el periodo de pruebas.

Cualquier protección para velocidades altas o sobrevelocidades, normalmente se dará con el SCEE y su acción



no debe ser descartada durante el curso de la prueba.

Los movimientos o diros debidos a la inercia del rotor y tren de conducción no deben ser usados para dar un mejoramiento momentáneo en la salida de los SCEE. Los efectos de la inercia que sucederan normalmente son un caso aparte y no obstante, el procedimiento por computadora promediará estos efectos; la diferencia esencial es que esto ocurre naturalmente y los efectos no pueden ser considerados en una forma que solo realice su funcionamiento.

Los ajustes a la carga, al campo del generador o sus equivalentes, no deben ser hechos con cualquier clase de sincronización; en la toma de datos.

Un fabricante no puede modificar o ajustar cualquier componente del SCEE para realizar su funcionamiento mas allá que la producción regular de la operación de la máquina en una instalación de uso típico.

Si el fabricante modifica un modelo particular bajo la prueba, en forma tal que impacte significativamente el funcionamiento de la máquina, el nuevo modelo debe ser nuevamente probado de acuerdo con este procedimiento.

#### Aducción de Datos

##### Datos Análogos

Los datos deben ser recolectados por dispositivos registradores en tiempo real, tales como rollos de papel para gráfica, cintas grabadoras, etc., la frecuencia de respuesta del sistema recopilador, debe ser la adecuada para que permita grabar sobre la respuesta completa del rango de frecuencia de interés.

##### Datos Digitales

Las pruebas automáticas y sistemas recopiladores son preferidos en este método. Debe ponerse una atención cuidadosa para dar la exactitud y resolución de cualquier convertidor análogo a digital (A.D) usado en el sistema de aducción de datos, ya que después pueden afectar el resultado del procedimiento de análisis.

## Algunos Requerimientos Especificos

### Respuesta de la Frecuencia en el Sistema de Adquisición de Datos

El sistema de adquisición de datos debe ser lineal en el rango completo de amplitud/frecuencia de los parámetros a medir en la prueba. Debe cuidarse que sean hechos en sistemas digitales para evitar tipos de pruebas de análogo a digital que sean múltiplos enteros de la frecuencia fundamental de la potencia de salida.

### Requerimiento Mínimo de Datos Base

En resumen los requerimientos de la sección de "Duración y Continuidad de las Pruebas", en la prueba no deben ser considerados como completos hasta que las condiciones siguientes sean cubiertas :

-El mínimo número de muestras por bin es 10.

-El mínimo tiempo efectivo por bin (número de muestras en un bin multiplicadas por las veces que se probó) es 100 minutos.

## 3.3 Análisis de los Resultados de la Prueba de Campo

### Sumario del Procedimiento de Análisis

#### Método de Bins

El análisis de datos debe ser hecho usando el método de bins.

En este procedimiento, el rango de operación de la velocidad de la prueba del SCEE es dividido en una serie de bins (o rango de velocidad de viento). El rango de velocidades de operación está definido; como todas las velocidades en que opera el SCEE, del cut-in al cut-out. El ancho de los bins de la velocidad de viento comprendidos entre el cut-in y la potencia máxima estimada debe ser 1 m/s. El ancho de los bins de la velocidad de viento comprendidos entre la potencia máxima y el cut-out debe ser de 2 m/s.

Cada bin debe tener dos registros acumulativos, uno para la velocidad de viento y otro para la potencia generada.

Los pares de datos constan del promedio de 10 minutos , para ambos, velocidad y potencia. Los pares de datos deben ser acumulados en cada bin hasta un mínimo de 10 puntos. Después los valores promedio de los pares de datos acumulados en cada bin deben ser definidos por el cociente de los valores sumados de los datos de velocidad de viento y el número de datos. De manera semejante, por el cociente de los valores sumados de potencia y el número de datos

$$\begin{aligned} \bar{V}_i &= \frac{\sum_{j=1}^{N_i} V_{ij}}{N_i} \\ \bar{P}_i &= \frac{\sum_{j=1}^{N_i} P_{ij}}{N_i} \end{aligned}$$

donde:

$V_{ij}$  = velocidad del viento en un promedio de 10 minutos en el  $i$ avo bin.

$P_{ij}$  = Potencia generada en un promedio de 10 minutos en el  $i$ avo bin.

Los valores promedios de los pares de datos ( P V ) son trazados en una curva regular, esta curva es la curva de potencia del SCEE.

La curva debe ser realizada solo después de cubrir las condiciones mínimas de la sección de "Duración y continuidad de la pruebas".

## Conversión de Datos a Referencia Atmosférica Estandar

### Corrección por Perfil del Viento

Si es más de un metro la diferencia de altura entre el anemómetro de prueba y el eje del rotor entonces todos los datos de velocidad de viento deben ser corregidos por el efecto de perfil del viento (el viento se comporta diferente en las caras límites). Esta corrección debe ser aplicada antes de que los datos sean acumulados en cada bin.

El método presentado consiste en multiplicar las muestras tomadas por un factor de corrección, que haya sido determinado experimentalmente en el sitio de la prueba. Este factor representa el promedio de muchos términos de los cocientes he-

chos entre la velocidad de viento del anemómetro y la velocidad en el eje del SCEE. El factor se emplea como un exponente al que hay que elevar la razón de alturas del centro del rotor y del anemómetro; también se puede usar, de acuerdo con la ley de la potencia como factor de corrección el valor de  $1/7$  de la potencia

$$V_{hub} = V_{anem} \times \left[ \frac{Z_{hub}}{Z_{anem}} \right]^B$$

donde :

$V_{hub}$  = Velocidad del viento correspondiente a la altura del rotor  
hub

$Z_{hub}$  = Altura del eje del rotor  
hub

$V_{anem}$  = Velocidad del viento medida por el anemómetro  
anem

$Z_{anem}$  = Altura del anemómetro  
anem

$B$  = Exponente determinado experimentalmente 'o  $1/7$

El método empleado para corregir por perfil de viento debe ser indicado.

#### Corrección Atmosférica Estandar

#### Requerimientos de la Corrección

Para cada periodo de pruebas separado, la potencia promedio leída en cada bin, debe ser corregida a la densidad estandar del aire de  $1.225 \text{ kg/m}^3$ . Los datos de prueba tomados separadamente, no pueden ser combinados hasta que esta corrección sea hecha a ambos grupos de datos.

#### Métodos de Corrección

La prueba de la densidad del aire es calculada, primero, promediando los valores anotados de la temperatura del aire y

presión atmosférica para cada periodo de prueba y entonces se aplicará la siguiente fórmula :

$$\rho_T = 1,225 \left[ \frac{288,13}{T} \right] \times \left[ \frac{B}{760} \right]$$

donde :

$\rho_T$  = Densidad del aire en la prueba, en Kg/m<sup>3</sup>

T = Temperatura promedio del aire, en grados K

B = Presión promedio barométrica, en mm de Hg

El rendimiento de potencia promedio corregida para cada bin puede ser calculada por medio de :

$$P_s = P_T \left[ \rho_s / \rho_T \right]$$

donde:

$P_s$  = Potencia corregida en condiciones estandar

$P_T$  = Potencia promedio no corregida

$\rho_s$  = Densidad de aire estandar, 1,225 Kg/m<sup>3</sup>

$\rho_T$  = Densidad de aire en la prueba, Kg/m<sup>3</sup>

Quando se aplican las correcciones a la potencia, hay que cuidar que no sea hecha a la máxima capacidad de salida del SCEE.

La potencia máxima de salida del SCEE, generalmente estará limitada por el tamaño del generador y los sistemas de control. El método de corrección no debe producir una potencia

de salida mas grande que la potencia máxima.

## Cálculo de los Parámetros de Ejecución

### Curva de Potencia

La curva de potencia es una gráfica de un sistema de coordenadas cartesianas graduadas linealmente; en las ordenadas del sistema aparece la potencia de salida del SCEE y en las abscisas la velocidad del viento, ver figura 1 como ejemplo detallado. Ambas escalas empiezan en cero. La escala de las ordenadas debe extenderse a un mínimo del 110% de la potencia máxima del SCEE. Las abscisas deben extenderse a una velocidad de viento de 20 m/s.

Asegúrese que las condiciones de la sección de 'Duración y Continuidad de Pruebas' y 'Limitaciones en las Modificaciones y Ajustes de la Máquina a Prueba', han sido consideradas.

La curva de potencia será entonces una línea regular aplanada que conecta a los valores de los puntos trazados de velocidad de viento y potencia del SCEE, y que fueron obtenidos por el método de bins. La curva de potencia se muestra en la figura 1.

### Potencia Media Entregada (MPO)

La potencia media de salida es determinada por:

$$MPO = \int_0^c F(V) P(V) dV$$

donde:

$F(V)$  = Función de densidad de probabilidad de la distribución de Rayleigh.

NOTA: Obviamente si se requiere evaluar la MPO para un sitio específico, la función de distribución de probabilidad utilizada, deberá ser la característica del sitio.

$P(V)$  = Curva de potencia experimental.

C = Velocidad de viento de cut-out

La función de densidad de probabilidad esta dada por :

$$F(v) = \Delta V \left[ \frac{\pi}{2} \right] \times \left[ \frac{V}{\bar{V}} \right]^2 \exp \left[ - \left[ \frac{\pi}{4} \right] \times \left[ \frac{V}{\bar{V}} \right]^2 \right]$$

donde:

F(v) = Frecuencia de ocurrencia asociada con cada velocidad de viento incremental de V centrada en V

NOTA: La función de distribución es igual a 8760[F(v)]  
(Donde 8760 es el número de horas en un año)

V = Es el centro del incremento de la velocidad de viento

$\bar{V}$  = Es el promedio anual de la velocidad de viento

$\Delta V$  = Es la amplitud del incremento de la velocidad de viento

Mediante la evaluación discreta de esta función en incrementos pequeños (incrementos de 1 m/s son recomendados), los errores introducidos son muy pequeños en la integración exacta.

#### Rendimiento Anual de Energía (AEO)

El rendimiento anual de energía esta dado por :

$$AEO = 8760 \times (MPO)$$

#### 3.4 Formato del Reporte de Prueba

El reporte de prueba debe incluir los siguientes artículos, aunque no se limite a estos.

1. Máquina a probar, incluyendo modelo y número de serie- (si es una máquina de producción)

2. Instrumentación, incluyendo tipo y localización. Si la calibración es aplicable; el método de calibración usado; el tiempo de calibración empleado en el intervalo, así como las referencias de calibración para el departamento de estándares.

3. Sitio de la prueba (incluyendo el croquis).

4. Instalación.

5. Método de recolección de datos.

6. Carga, incluyendo tipo, tamaño y método de control.

7. Tiempo.

8. Correcciones usadas.

9. Variaciones en las prácticas recomendadas.

Los sumarios de datos primarios deben ser incluidos como un apéndice del reporte. Las estimaciones deben ser listadas en el reporte. Las curvas siguientes deben ser presentadas:

-Potencia neta entregada contra velocidad del viento

-(AEO) Rendimiento anual neto contra velocidad media del viento (arriba de los 10 m/s a la altura del eje del rotor)

#### 4.0 Estrategias para Revisar y Actualizar los Procedimientos Recomendados

1) Las recomendaciones detalladas de la sección 3, están cuidadosamente revisadas y las áreas de mutuo acuerdo son identificadas y aceptadas como parte de los procedimientos recomendados por el anexo.

2) Las áreas con necesidad de investigación adicional son identificadas y definidas en acciones específicas para asignar a países específicos rotación de representantes.

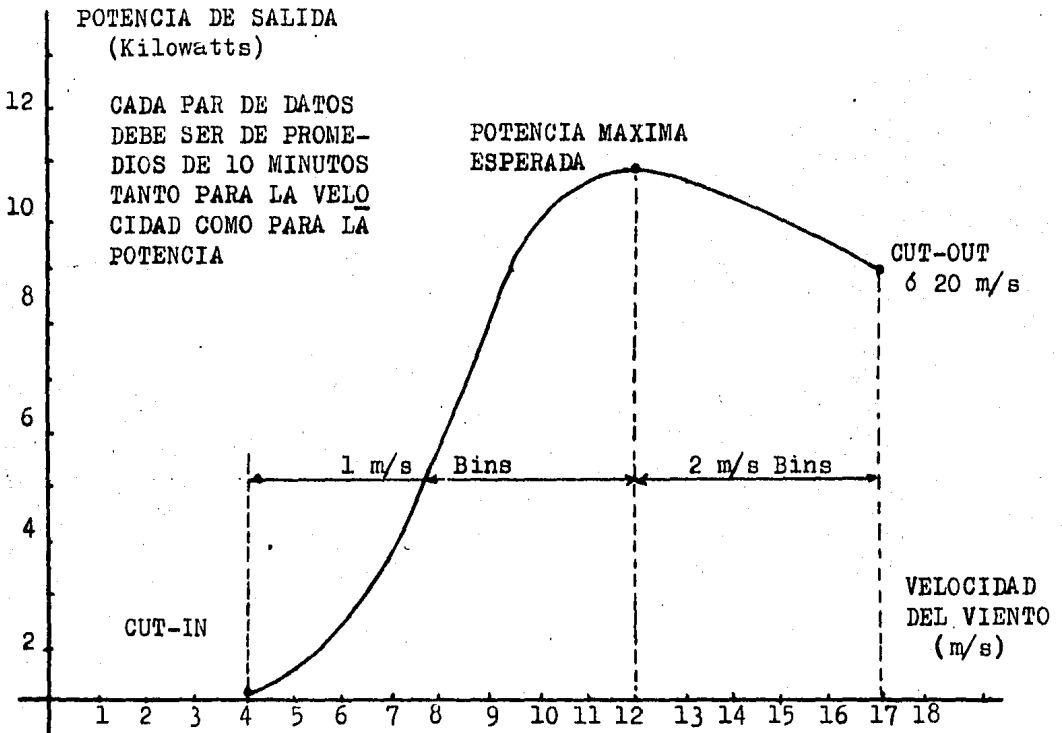
3) Calendarios específicos son establecidos para la realización del punto 2.

4) Las investigaciones que se marcan en el punto 2 deben concluir con recomendaciones específicas, resolviendo áreas



definidas. Estas recomendaciones deben ser presentadas en el anexo, para la aprobación e incorporación de estos procedimientos.

5) Una vez que el documento donde se presenta el procedimiento, ha sido definido, debe ser establecida una metodología para revisión y modificación.



\* LA DURACION DE LAS PRUEBAS DEBE SER DE 500 HORAS DE OPERACION ACUMULADA

FIGURA 1

**ANEXO II**

**"Ajuste por Variación de Densidad del Aire para las Curvas de Potencia de Sistemas Conversores de Energía Eólica"**

por A.C. Hansen en marzo de 1980, del centro de pruebas de SCEE en Rocky Flats de Rockwell International.

**Introducción**

La densidad del aire afecta la presión dinámica, así como la viscosidad cinemática del viento y por consiguiente el rendimiento de potencia de un SCEE.

Al reportar las pruebas de comportamiento de un SCEE, es deseable que se de el comportamiento que sería observado en condiciones estándar para la densidad del aire.

**Efectos de la Densidad en el Comportamiento de un SCEE.**

La presión dinámica y la densidad de potencia del aire de acuerdo con :

$$\text{Presión Dinámica} = 1/2 \rho V^2$$

$$\text{Densidad de Potencia} = 1/2 \rho V^3$$

Donde:

$\rho$  = Densidad del aire

V = Velocidad del viento

Si un SCEE opera a una eficiencia constante ( o coeficiente de potencia constante ), la salida de potencia es directamente proporcional a la densidad.

$$P/A = C_p \times 1/2 \rho V^3$$

Donde :

C<sub>p</sub> = Coeficiente de potencia del sistema

A = Area de barrido del rotor

P = Potencia de salida del sistema

La presión dinámica (debido a la densidad) afectan las fuerzas de arrastre y levantamiento en el rotor y por consiguiente el comportamiento del sistema; por lo que deben ser consideradas cuando se presentan resultados de pruebas de comportamiento. Sin embargo la densidad también puede afectar el coeficiente de potencia del sistema por lo menos de dos maneras. Como primera aproximación, el coeficiente de potencia de un rotor depende solamente de la relación de velocidad de punta de aspa ( tip speed ratio ) para una geometría dada del rotor. Entonces en primer orden el coeficiente de potencia es independiente de la densidad. Pero, el número de Reynolds del flujo a través del rotor es linealmente proporcional a la densidad de aire y los coeficientes de levantamiento y arrastre están influenciados por el número de Reynolds. Por lo tanto la eficiencia del rotor puede ser modificada por variaciones de densidad. Pero el número de Reynolds del flujo a través del rotor es linealmente proporcional a la densidad del aire y los coeficientes de levantamiento y arrastre están influenciados por el número de Reynolds. Por lo tanto la eficiencia del rotor puede ser modificada por variaciones de densidad. Bajo condiciones típicas de operación de un SCEE, un cambio en un orden de magnitud en el número de Reynolds se requerirá para observar un impacto significativo en el comportamiento del sistema. La excepción será en pequeños rotores ( 3.5 metros de diámetro ) operando muy cerca de su número crítico de Reynolds. En esta situación, un cambio del 10 al 20 % en la densidad podría producir un cambio similar en el coeficiente de potencia; sin embargo se hace notar que un rotor no debe ser diseñado para operar cerca del número crítico de Reynolds. Por lo anterior, los efectos del número de Reynolds no serán significativos en sistemas diseñados correctamente cuya operación se requiera en condiciones climáticas diferentes.

La segunda forma por la que la densidad puede influenciar el coeficiente de potencia del sistema, puede ser importante en algunos SCEE de velocidad variable. Cuando existe un acoplamiento crítico entre la potencia de salida del rotor y la carga ( el generador conectado al rotor ) para optimizar el comportamiento del sistema se puede sobrecargar o no poner carga suficiente; esto causará que este operando a una relación de velocidad de punta de aspa que no es la óptima y en casos extremos puede parar el rotor. Como la carga del generador depende únicamente de la velocidad del rotor ( para un mismo sistema de control ), y la potencia del rotor depende de

la densidad del aire y de la velocidad del rotor, las variaciones de densidad pueden dar como resultado una pérdida del acoplamiento del rotor y la carga. Este efecto es altamente dependiente de la configuración específica del sistema por lo cual no es posible tener técnicas generalizadas de ajuste.

Como los efectos del número de Reynolds son en general de segundo orden de importancia y los efectos del acoplamiento rotor/carga son posiblemente más importantes en casos especiales, no se les puede considerar para ajustes en forma generalizada. En el resto de este documento se tratará únicamente las correcciones de densidad referentes a los efectos de la presión dinámica.

#### Variaciones de Densidad Esperadas

El centro de pruebas de Rocky Flats está a 1 860 metros sobre el nivel del mar y tiene una presión atmosférica estándar de 23.90 pulgadas de Hg. Las variaciones diarias y estacionales en la temperatura y presión del aire daran como resultado variaciones significativas en la densidad del mismo durante el periodo de pruebas de un SCFE dado. La tabla uno muestra el rango de densidades que son observadas en Rocky Flats y algunas relaciones a las condiciones estándar a nivel del mar. Las condiciones estándar a nivel del mar para este caso tienen un rango de variación en la densidad de 1.1 a 1.4 veces las observadas en Rocky Flats. ( lo cual reduce de un 10 a un 40 % de la potencia entregada por el sistema ).

#### NOTA:

El centro de pruebas del Instituto de Investigaciones Eléctricas en México, está localizado a 2 550 metros sobre el nivel del mar y para un periodo de pruebas (mayo de 1983) se determinó la densidad típica del aire durante 20 días a partir de los datos de:

Temperatura promedio = 20.84 C

Presión promedio = 585.65 mm de Hg

Por lo que :

El método utilizado anteriormente, suponía que la potencia generada a una velocidad de viento dada, podía ser ajustada por la simple multiplicación, de la potencia por la razón de la densidad. O sea:

$$P = P \left( \rho_1 / \rho_2 \right)$$

Sin embargo este método tiene dos desventajas :

1.- Aunque la velocidad de cut-in es función de la densidad, el método de ajuste solo cambia la potencia, pero la velocidad no puede ser ajustada con la misma razón de densidad.

2.- El máximo rendimiento de muchos SCEE está limitado por los controles o por la capacidad del generador (o bien por la bomba mecánica en el caso de aerobombas) más que por los límites aerodinámicos. Por esto, el método anterior puede dar como resultado una potencia máxima mayor que aquella limitada por la capacidad del sistema, lo cual resulta incorrecto.

De lo anterior se puede concluir que este método es siempre inadecuado a velocidades de viento cercanas a la velocidad de cut-in del SCEE y a menudo inadecuado cerca de la velocidad de cut-out. Una alternativa de ajuste a la potencia de salida sería un ajuste a la velocidad de viento para una potencia dada; es decir, el ajuste puede consistir en desplazar la curva de potencia a lo largo del eje de la velocidad de viento, para una cantidad calculada de la pendiente de la relación: Potencia/Velocidad de viento medida. Este método cambiaría la velocidad de cut-in y no sobre-estimaría la potencia en vientos altos. Sin embargo el método tiene una falla considerable para aquellos SCEE cuya potencia máxima de salida está limitada por la aerodinámica más que por la capacidad del generador. Muchos de los rotores que están limitados aerodinámicamente producirían más potencia en aire a condiciones estándar. El segundo método de corrección por densidad no estimará este incremento en la potencia máxima del sistema. Por lo tanto el segundo método será aplicable universalmente a todos los SCEE's.

#### Método Utilizado Actualmente en Rocky Flats

El método de ajuste utilizado en Rocky Flats, está compuesto por los métodos antes mencionados y se presenta gráficamente en la figura uno. Cada SCEE tiene una salida máxima de potencia independientemente de la densidad del aire. Esta

potencia máxima (Pmax.) estará generalmente limitada por los controles y tamaño del generador. El método de corrección no debe producir nunca una potencia más grande que la potencia máxima, a velocidades de viento menores, que la velocidad a la cual, es generado el 10 % de la potencia máxima (10 % de P máx.) la cuál se denomina como V 10%, para evitar que Pmax. no sea medida se utiliza el siguiente método:

$$V > V_{10\%}$$

$$P_{c.e.} = P_{c.p.} \times \frac{(Densidad)_{c.e.}}{(Densidad)_{c.p.}}$$

ó

$$P_{c.e.} = P_{max.} \text{ cualquiera que sea menor}$$

Donde:

P<sub>c.e.</sub> = Potencia corregida a condiciones estándar

P<sub>c.p.</sub> = Potencia medida en el centro de pruebas

(Densidad)<sub>c.e.</sub> = 1.225 Kg/m<sup>3</sup>

(Densidad)<sub>c.p.</sub> = Densidad en el centro de pruebas cuando la P<sub>c.p.</sub> fue medida

P<sub>max</sub> deberá ser obtenida de las pruebas del dinamómetro de pruebas atmosféricas de larga duración para cada SCEE. A velocidades de viento cerca del cut-in (V < V 10%) se deberá ajustar la velocidad del viento en vez de la potencia de salida. Como el inicio de giro de un SCEE depende de la presión dinámica del viento, se aplica una corrección a V. Para mantener una presión dinámica constante cuando un cambio de densidad es aplicado, un cambio en la velocidad de viento  $[\Delta V_{10} = (1/2 \rho / \rho) V]$  también deberá ser aplicado. Por lo tanto

$$V < V_{10\%}$$

$$\frac{V_{c.e.} - V_{c.p.}}{V_{c.p.}} = \frac{1/2 [ Densidad_{c.e.} - Densidad_{c.p.} ]}{Densidad_{c.p.}}$$

donde:

Vc.e. = Velocidad en condiciones estandar

Vc.p. = Velocidad en el centro de pruebas

Densidad c.e. = 1.225 Ks/m<sup>3</sup>

Densidad c.p. = Densidad en el centro de pruebas  
cuando fue medida la Vc.p.

Para suavizar la transición entre los dos métodos de corrección para V 10%, una corrección igual a un medio de la corrección por velocidad y un medio de la corrección por potencia, es aplicado en V= V 10%.

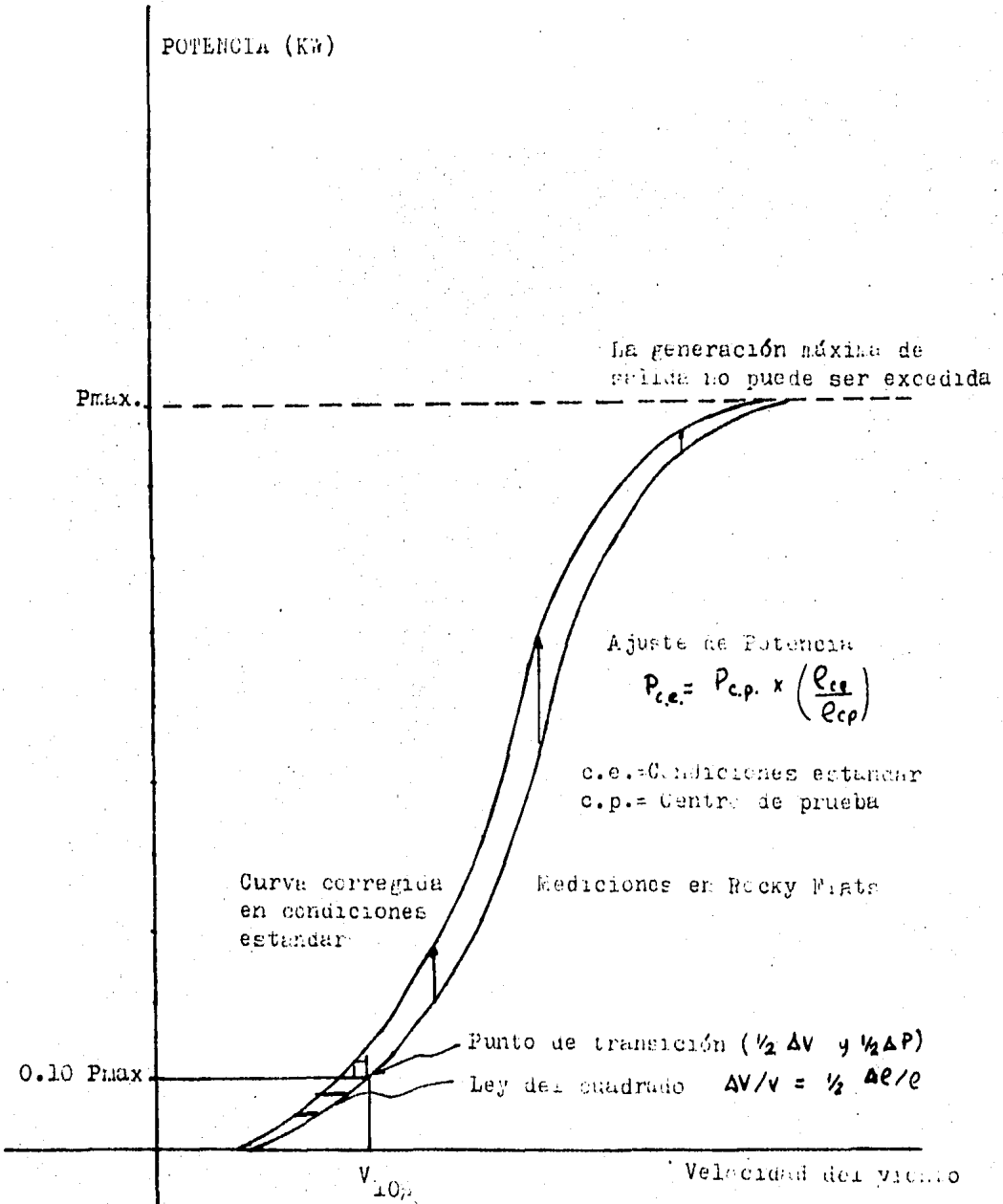
TARLA I

Variaciones de Densidad en la estacion de prueba de Rocky Flats

CONDICION	TEMPERATURA (°C)	PRESION (in. Hg)	DENSIDAD (Ks/m <sup>3</sup> )	RAZON DE DENSIDAD/ NIV. MAR
				EST. PRUEBA
- Estandar (nivel del mar)	15	22.92	1.226	1.0
- Estandar (1860 m)	3	23.90	1.022	1.20
- Dia Tipico	15	23.90	0.977	1.25
- Verano Extremo	38	23.00	0.873	1.40
- Invierno Extremo	- 18	25.00	1.156	1.06
- Dia Tipico de verano	30	24.00	0.932	1.32
- Dia Tipico de Invierno	0	24.00	1.033	1.19



FIGURA 1 : CORRECCION DE LAS CURVAS DE POTENCIA EN ROCKY PLATS PARA CONDICIONES ESTANDAR A NIVEL DEL MAR



ANEXO III

EFEK1.BAS

```
010 REM * ESTE PROGRAMA PROCESA DATOS DE EVALUACION DE UNA
020 REM * DE UNA AEROBOMBA ,PREVIAMENTE CLASIFICADOS POR EL
030 REM * METODO DE BINS PARA OBTENER PUNTOS DE LAS CURVAS
040 REM * DE EFICIENCIA CONTRA VELOCIDAD DE VIENTO ,POTENCIA
050 REM * ESTANDAR CONTRA VELOCIDAD Y ALYURA CONTRA EFICIENCI-
060 REM * CIA
070 REM *
080 REM * AUTOR : ING. MARCO ANTONIO BORJA
090 REM *
100 PRINT*ALTURA          VELOCIDAD          POTENCIA          EFICIENCIA
110 PRINT* (MTS)          (M/SEG)          (WATTS)          (%)
120 DIM V(10),P(10)
130 V(1)=1.8038
140 V(2)=2.67
150 V(3)=3.43
160 V(4)=4.46
170 V(5)=5.41
180 V(6)=6.41
190 V(7)=7.39
200 V(8)=8.53
210 V(9)=9.32
220 V(10)=10.85
230 P(1)=0.49
240 P(2)=2.133
250 P(3)=5.288
260 P(4)=7.488
270 P(5)=9.255
280 P(6)=10.933
290 P(7)=12.344
300 P(8)=13.288
310 P(9)=13.955
320 P(10)=16.20
330 I=1
340 FOR H=10 TO 35 STEP 5
350 P2=P(I)*H/4
355 P3=3.00125*(V(I)**3)
360 E=(P2/P3)*100
365 PRINT*-----
370 PRINT H,V(I),P2,E
380 I=I+1
390 IF I<11 GO TO 350
392 PRINT CHR*(12)
395 PRINT*ALTURA          VELOCIDAD          POTENCIA          EFICIENCIA
396 PRINT* (MTS)          (MTS/SEG)          (WATTS)          (%)
400 I=1
410 NEXT H
420 END
```

EK1.BAS

```
010 REM * ESTE PROGRAMA CLASIFICA DATOS DE EVALUACION DE
020 REM * AERODROMOS, DE ACUERDO AL METODO DE BINS, OBTENIENDO
030 REM * LA DESVIACION ESTANDAR PARA LOS PUNTOS ENCONTRADOS.
040 REM
050 REM * AUTOR : ING. MARCO ANTONIO BORJA DIAZ.
060 REM
070 DIM A(11),V(11),P(11),G(11),V1(11),P1(11),G1(11)
080 DIM V2(11),P2(11),G2(11),V3(11),P3(11),G3(11)
090 FOR L=1 TO 11
100 A(L),V(L),P(L),G(L),V1(L),P1(L),G1(L),V2(L)=0
110 P2(L),G2(L),V3(L),P3(L),G3(L)=0
120 NEXT L
150 READ Z,D
160 V=7*0.0854183
170 G=0*0.0530883
180 P=G*39.24
300 IF Z=1000 GO TO 430
310 I=0
320 IF V>I AND V<=I+1 GO TO 350
330 I=I+1
340 GO TO 320
350 A(I)=A(I)+1
360 V(I)=V(I)+V
370 P(I)=P(I)+P
380 G(I)=G(I)+G
390 V1(I)=V1(I)+V**2
400 P1(I)=P1(I)+P**2
410 G1(I)=G1(I)+G**2
420 GO TO 150
430 FOR N=0 TO 10
431 IF A(N)=0 GO TO 530
440 V2(N)=(V(N)**2/A(N))
450 P2(N)=(P(N)**2/A(N))
460 G2(N)=(G(N)**2/A(N))
470 V3(N)=((V1(N)-V2(N))/A(N))**0.5
480 P3(N)=((P1(N)-P2(N))/A(N))**0.5
490 G3(N)=((G1(N)-G2(N))/A(N))**0.5
500 V(N)=V(N)/A(N)
510 P(N)=P(N)/A(N)
520 G(N)=G(N)/A(N)
530 NEXT N
540 PRINT"VEL. MED. N.DAT. DS. VEL. GASTO DS. GASTO POTENCIA DS. POT"
550 PRINT"(M/S) (M/S) (LTS./S) (LTS./S) (WATTS) (WATTS)"
560 FOR N=1 TO 10
570 PRINT USING"###.## ### ##.## ###.## ###.## ###.## ###.##";V(N)
580 NEXT N
```



```
100 REM ESTE PROGRAMA PROCESA DATOS DE EVALUACION DE SCFF'S
200 REM PREVIAMENTE CLASIFICADOS POR EL METODO DE BINS, PARA
300 REM OBTENER PUNTOS DE LAS CURVAS DE EFICIENCIA, POTENCIA
400 REM GENERADA CON CORRECCION POR DENSIDAD DEL AIRE Y -
500 REM LAMBDA, REFERIDOS A LA VELOCIDAD DE VIENTO.
600 REM
700 REM AUTOR: ING. MARCO ANTONIO BORJA DIAZ
800 REM
900 PRINT " VELOCIDAD      POTENCIA      EFICIENCIA      LAMBDA"
1000 READ V,P,R
1010 IF V=20 GO TO 1100
1011 L=0.57594*R/V
1020 E=(P/(0.5*0.9*V**3*95.0334))*100
1030 IF P<771 GO TO 1070
1040 P=P/0.9
1060 GO TO 1080
1070 V=V-0.18*V
1080 PRINT V,P,E,L
1090 GOTO 1000
1100 END
```

```

010 REM *****
020 REM *          PROGRAMA MARCO.BAS          *
030 REM *****
040 REM *
050 REM *     ESTE PROGRAMA ES UN METODO GENERALIZADO PARA EL     *
060 REM *     PROCESAMIENTO DE DATOS PARA EVALUACION DE         *
070 REM *     COMPORTAMIENTO EN VIENTO LIBRE DE SCFF'S,TANTO    *
080 REM *     PARA AEROGENERADORES COMO AEROBOMBAS             *
090 REM *
100 REM *     AUTOR: ING. MARCO ANTONIO R. BORJA DIAZ          *
110 REM *     SEPTIEMBRE 1984                                   *
120 REM *
130 REM *****
135 REM
140 REM * DATOS DE ENTRADA*
150 INPUT "NOMBRE DEL SISTEMA :";A$
160 INPUT "TIPO (AEROGENERADOR) O (AEROBOMBA)";B$
170 INPUT "POTENCIA NOMINAL (WATTS)";C$
180 INPUT "DIAMETRO DEL ROTOR (METROS)";D$
190 INPUT "FABRICANTE";E$
200 INPUT "LUGAR DE PRUEBAS";F$
210 INPUT "FECHA DE PRUEBA";G$
220 INPUT "SE INCLUYEN DATOS DE PRESION Y TEMPERATURA (S) O (N)";H$
230 IF H$="S" GO TO 250
240 INPUT "DENSIDAD DEL AJRE TIPICA DEL PERIODO Y LUGAR DE PRUEBA";P$
250 IF B$="AEROGENERADOR" GO TO 270
260 INPUT "PROFUNDIDAD DE BOMBEO";Q$
270 INPUT "SE INCLUYEN DATOS DE TIEMPO ASOCIADOS CON DATOS (S) O (N)";I$
280 IF I$="S" GO TO 410
290 INPUT "TIEMPO DE MUESTREO (MINUTOS)";F$
400 REM * DIMENSIONES DE VECTORES *
410 DIM B(21),C(21),D(21),E(21),F(21),G(21),H(21),I(21),J(21),K(21),L(21),M(21)
420 DIM C1(21),D1(21),E1(21),F1(21),G1(21),H1(21),I1(21)
430 DIM C2(21),D2(21),E2(21),F2(21),G2(21),H2(21),I2(21)
440 DIM C3(21),D3(21),E3(21),F3(21),G3(21),H3(21),I3(21)
442 FOR X=0 TO 20
450 B(X),C(X),D(X),E(X),F(X),G(X),H(X),I(X),J(X),K(X),L(X),M(X)=0
460 C1(X),D1(X),E1(X),F1(X),G1(X),H1(X),I1(X)=0
470 C2(X),D2(X),E2(X),F2(X),G2(X),H2(X),I2(X)=0
480 C3(X),D3(X),E3(X),F3(X),G3(X),H3(X),I3(X)=0
490 NEXT X
495 A,A1,A2,A3,A4,A5,A6,A7,A8,A9,Z1,Z2=0
500 REM *CONVERSION DE DATOS*
520 REM *TANTO LA LECTURA COMO LA CONVERSION ES PARTICULAR*
530 REM *DEL TIPO DE DATOS ADQUIRIDOS*
540 READ D,C
550 C=C*0.447/F
560 D=D*54/F
570 E,G,H,I=0
690 IF C>30 GO TO 910
700 REM *MANEJO POR BINS*
710 Y=0
720 IF C>Y AND C<=Y+1 GO TO 750
730 Y=Y+1
740 GO TO 720
750 B(Y)=B(Y)+1\C(Y)=C(Y)+C\D(Y)=D(Y)+D\E(Y)=E(Y)+E
760 F(Y)=F(Y)+F\B(Y)=G(Y)+G\H(Y)=H(Y)+H\I(Y)=I(Y)+I
830 C1(Y)=C1(Y)+C**2
840 D1(Y)=D1(Y)+D**2
850 E1(Y)=E1(Y)+E**2
860 F1(Y)=F1(Y)+F**2
870 I1(Y)=I1(Y)+I**2

```

```

900 REM *CALCULO DE PROMEDIOS*
910 FOR Z=0 TO 20
920 IF B(Z)=0 GO TO 1180
930 C2(Z)=(C(Z)**2/B(Z))
940 D2(Z)=(D(Z)**2/R(Z))
950 E2(Z)=(E(Z)**2/B(Z))
960 F2(Z)=(F(Z)**2/B(Z))
970 I2(Z)=(I(Z)**2/B(Z))
980 C3(Z)=((C1(Z)-C2(Z))/B(Z))*0.5
990 D3(Z)=((D1(Z)-D2(Z))/R(Z))*0.5
1000 E3(Z)=((E1(Z)-E2(Z))/R(Z))*0.5
1010 REM
1020 I2(Z)=((I1(Z)-I2(Z))/R(Z))*0.5
1030 A=A+B(Z)\A1=A1+C(Z)\A2=A2+D(Z)\A3=A3+E(Z)
1040 A4=A4+F(Z)\A5=A5+G(Z)\A6=A6+H(Z)\A7=A7+I(Z)
1110 C(Z)=C(Z)/B(Z)\D(Z)=D(Z)/R(Z)\E(Z)=E(Z)/B(Z)
1120 F(Z)=F(Z)/B(Z)\G(Z)=G(Z)/R(Z)\H(Z)=H(Z)/R(Z)
1130 I(Z)=I(Z)/B(Z)
1180 REM * CALCULO DE EFICIENCIA *
1190 IF H#="N" GO TO 1210
1195 IF H(Z)=0 GO TO 1210
1200 P=1.225*(15.13/H(Z))*G(Z)/760
1210 S=PI*(D0/2)**2
1220 S1=0.5*P*S*(C(Z))**3
1225 IF S1=0 GO TO 1280
1230 J(Z)=D(Z)/S1*100
1250 REM *CALCULO DE LAMBDA*
1260 K(Z)=0.10472*D0/2*E(Z)/C(Z)
1280 NEXT Z
1290 A1=A1/A\A2=A2/A\A3=A3/A\A4=A4/A
1300 A5=A5/A\A6=A6/A\A7=A7/A
1360 REM * CORRECCION POR DENSIDAD DEL AIRE *
1370 FOR Z=0 TO 20
1380 IF H#="N" GO TO 1400
1390 P=1.225*15.13/A6*A5/760
1400 L(Z)=1.225*K(Z)/P
1410 H(Z)=C(Z)*(1-0.5*((1.225-P)/P))
1420 NEXT Z
1430 FOR Z=0 TO 20
1440 IF J(Z)=0 GO TO 1500
1450 IF J(Z)>50 GO TO 1500
1460 A8=A8+J(Z)\Z1=Z1+1
1470 IF K(Z)=0 GO TO 1500
1490 A9=A9+K(Z)\Z2=Z2+1
1500 NEXT Z
1505 IF Z1=0 GO TO 1530
1507 IF Z2=0 GO TO 1530
1510 A8=A8/Z1\A9=A9/Z2
1530 REM * COMIENZA IMPRESION DE RESULTADOS *
1540 PRINT "          INSTITUTO DE INVESTIGACIONES ELECTRICAS "
1550 PRINT "          FUENTES DE ENERGIA -NO CONVENCIONALES- "
1560 PRINT\PRINT
1580 PRINT " RESULTADOS DE PRUEBAS DE COMPORTAMIENTO EN VIENTO LIBRE DE SCCE'S "
1590 PRINT\PRINT\PRINT\PRINT
1591 PRINT "          DATOS GENERALES "
1595 PRINT "-----"
1600 PRINT " NOMBRE DEL SISTEMA : 'IA$ "
1610 PRINT " TIPO: 'JB$ "
1620 PRINT " POTENCIA NOMINAL (WATTS): 'IC$ "
1630 PRINT " DIAMETRO DEL ROTOR (METROS): 'JD$ "
1640 PRINT " FABRICANTE: 'JE$ "
1650 PRINT " LUGAR DE PRUEBAS : 'JF$ "
1660 PRINT " FECHA DE PRUEBAS : 'JG$ "
1665 PRINT "-----"
1670 IF B#="AEROGENERADOR" GO TO 1690

```

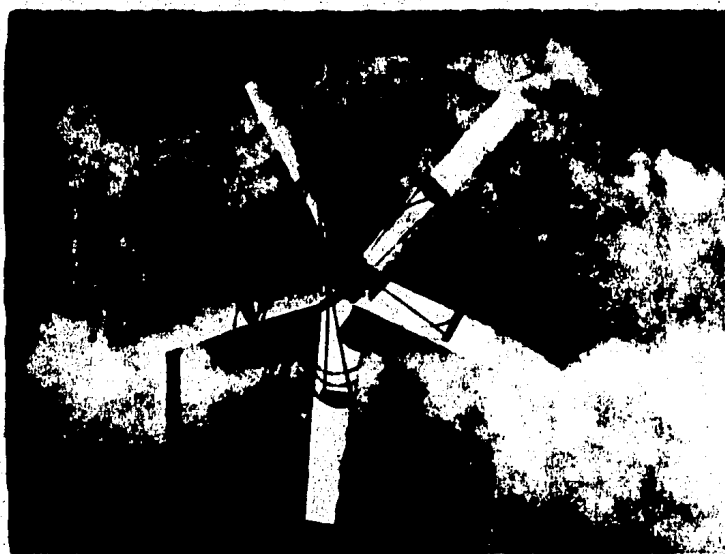




**ANEXO IV**



AEROBOMBA DE 200 WATTS





▲EROGENERADOR DE 10 KW



## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

(1) TOLSA, Jorge Rubén; Centro Espacial San Miguel.- ARGENTINA;

ALCIR de Furo; Orlando/ SABOYA, Francisco E.M./RENHA, Geraldo/ LEAL Braga, Sergio.- Pontificia Universidad Católica de Río de Janeiro BRASIL;

DLARTE Caro, Luis Alberto; Universidad Nacional.- COLOMBIA;

SANHUEZA Guardamagna, Luis; Instituto de Investigaciones Tecnológicas CHILE;

CALDERA Muñoz, Enrique; Instituto de Investigaciones Eléctricas.- MEXICO;

SANCHEZ Campos, Teodoro; Instituto de Investigación Tecnológica Industrial y de Normas Técnicas.- PERU; AEROGENERACION DE ENERGIA Quito, Ecuador; Organización Latinoamericana de Energía (OLADE), 1981.

(2) VETROUSTANDVKI, Vetrodvisseleli (Traductor); State Publishing House of Agricultural Literature.- WIND ENGINES AND WIND INSTALATIONS MOSCU, 1948. (NASA - TT-F- 16170),

(3) TRENKA, Andrew R. , Rockwell International.- U.S.A.;

PEDERSEN, B. Naribor; Technical University of Denmark.- DINAMARCA, ON INTERNATIONAL RECOMMENDED PRACTICES FOR WIND ENERGY CONVERSION SYSTEMS TESTING NORUEGA; 1981. (REPORT).

(4) HANSEN, A. Crais; ADJUSTMENT OF SNECS POWER CURVES FOR AIR DENSITY VARIATIONS U.S.A. ; Rocky Flats Plant; 1980. (REPORT)

(5) HANSEN, A. Crais; EFFECTS OF TURBULENCE ON WIND TURBINE PERFORMANCE.- U.S.A. ; Rocky Flats Plant; 1979 (REPORT)

(6) JUSTUS, WIND SPED DISTRIBUTIONS AND HEIGHT PROFILES EVALUATION APPLICATIONS U.S.A. , 1977 (REPORT).

(7) PEDERSEN Troels, Friis; STANDAR MEASUREMENTS ON WINDMILLS AT THE TEST STATION FOR SMALL WINDMILLS AT RISOE, Denmark.- U.S.A.; 1983 (REPORT).

(8) KOEPEL, Gerald W., PUTNAMS POWER FROM THE WIND. U.S.A. ; Van Nostrand Reinhold Co. , 1975.

(9) CALDERA Muñoz, Enrique / PUGA Ramirez, Nicolás, LA ENERGIA EOLICA MEXICO ; Boletín del Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE); 1978