



CMC
2010

DIVISION DE ESTUDIOS DE POSGRADO

Facultad de Ingeniería

ESTADO DEL ARTE DE LA
CONVERSION EOLICA

Zenaido Márquez Castillo

TESIS

PRESENTADA A LA DIVISION DE ESTUDIOS DE
POSGRADO DE LA

FACULTAD DE INGENIERIA

DE LA

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

COMO REQUISITO PARA OBTENER

EL GRADO DE

MAESTRO EN INGENIERIA

(DE CONTROL)

CIUDAD UNIVERSITARIA



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

ESTADO DEL ARTE DE LA CONVERSION EOLICA.

I N D I C E.

CAPITULO I.	PAG.
ANTECEDENTES HISTORICOS.	
I.1.-Antecedentes históricos en el mundo.	1
I.2.-Antecedentes históricos en el Istmo.	6
CAPITULO II.	
GENERALIDADES SOBRE EL ESTADO DE OAXACA EN SU ZONA ISTMICA.	
II.1.-Delimitación del Istmo Oaxaqueño.	8
II.2.-Orografía.	10
II.3.-Hidrografía.	12
II.4.-Clima.	15
II.5.-Delimitación de la zona ventosa.	21
II.6.-Estado de la agricultura, ganadería, pesca, silvicultura y electrificación en el Istmo.	23
CAPITULO III.	
GENERALIDADES SOBRE LA METEOROLOGIA EOLICA.	
III.1.-Origen del viento.	26
III.2.-Valor empírico del Coeficiente de rugosidad Z_0 .	29
III.3.-Exploración del viento.	31

CAPITULO IV.	PAG.
EVALUACION DEL VIENTO EN EL ISTMO.	
IV.1.-Evaluación preliminar de la potencia disponible anual , PDA.	36
IV.2.-Evaluación de la potencia del viento en sitios específicos.	42
CAPITULO V.	
COMPORTAMIENTO Y EFICIENCIA DE LOS SISTEMAS CONVERSORES DE ENERGIA EOLICA.	
V.1.-Representación matemática del viento.	45
V.2.-Ecuaciones de potencia y energía.	51
V.3.-Sistemas conversores de energía eólica comerciales.	59
V.4.-Diseño del rotor.	64
CAPITULO VI.	
CALCULO DE CONVERSORES EOLICOS.	
VI.1.-Aerobomba.	74
VI.2.-Aerogenerador.	84
CONCLUSIONES.	95
BIBLIOGRAFIA.	99

ESTADO DEL ARTE DE LA CONVERSION EOLICA.

RESUMEN.

En el primer capítulo se dan los antecedentes históricos del arte de la conversión eólica, tanto en el Istmo como en las principales partes del mundo.

En el segundo capítulo se dan las generalidades - como son: delimitación del Istmo, orografía, clima, agricultura, ganadería, silvicultura y electrificación, solamente de la zona Istmica.

En el tercer capítulo se trata el origen del viento y la metodología general para la exploración del viento

En el cuarto capítulo se dá el resultado de la - evaluación preliminar de la zona Istmica y la medición de la potencia del viento en sitios específicos, mediante el uso de equipos anemométricos de gran exactitud.

En el capítulo quinto se dá el sistema de ecuaciones matemáticas que representa al viento y se dan algunas generalidades sobre el diseño de rotores eólicos.

En el sexto y último capítulo se diseñan dos sistemas de conversión de energía, uno para el bombeo directo de agua y otro para la obtención de energía eléctrica que posteriormente se puede transformar en luz, calor o se puede utilizar para el bombeo de agua u obtener calefacción o refrigeración, etc.

I. ANTECEDENTES HISTORICOS

I.1 ANTECEDENTES HISTORICOS EN EL MUNDO

El arte de la conversión eólica se ha practicado desde el siglo X, en Persia, utilizando molinos de viento de eje vertical; en el siglo XII, en Europa usando molinos de viento de eje horizontal; hasta el siglo XVIII estos sistemas se emplearon para la molienda de granos y para el riego. A este siglo se le denominó "la Revolución Industrial", debido a la aparición de las máquinas de vapor, que entre otros usos que se le dió, reemplazaron a muchos sistemas eólicos, luego la aparición de las máquinas que emplean petróleo o gas, se marginó mas el uso de los sistemas eólicos. Sin embargo, con el alza del precio de los energéticos no renovables, algunos países consideraron la energía eólica como una posible fuente de energía para la solución de sus necesidades energéticas.

En 1891, Paul le Cour diseñó y construyó el primer aerogenerador de 18 kw en Dinamarca. En 1931 hubo un aerogenerador de 100 kw en la URSS.

En 1940, se inició en USA un experimento, que consistió en la dotación de energía eléctrica y agua a comunidades

rurales, por medio de la instalación de sistemas de energía eólica con una potencia de 355×10^6 kw-hr anual. Para la obtención de esta energía, se instalaron 30×10^3 bombas de 2×10^3 watts cada una y 50×10^3 generadores eléctricos de 2×10^3 watts cada uno, con vientos de 9 metros por segundo.

En 1941, hubo un aerogenerador de 1,250 kw en USA, diseñado por Palmer C. Putnam en el Instituto Tecnológico de Massachusetts. Este aerogenerador tenía aspas de acero de 53 metros de diámetro.

En 1958 hubo un aerogenerador de 1,000 kw en Francia. Era de tres aspas y tenía 30.3 metros de diámetro.

Todos los aerogeneradores mencionados hasta aquí, duraron 5 años en promedio y dejaron de funcionar al destruirse los álabes.

En 1959, se iniciaron investigaciones para la fabricación de aerogeneradores de gran capacidad.

En 1970 se iniciaron investigaciones distribuidas, entre los países mas desarrollados, sobre los aspectos siguientes: Sistemas de almacenamiento energético, métodos para la concentración de energía, estudios del potencial eólico en varios países, pruebas experimentales y evaluación de los

resultados.

En 1973, con el alza del petróleo, resurgió el interés por los aerogeneradores.

Actualmente, los países que más aerogeneradores tienen son: USA con 75,000, Argentina con 25,000 y la URSS con 10,000 pero se prevee para el futuro un fuerte incremento, debido a la escasez y al alto costo de los energéticos convencionales y a las ventajas del uso de las fuentes de energía no convencionales como son la accesibilidad por su simplicidad y bajo costo, mejora la calidad de vida en su entorno por no deteriorar el ambiente, complementa a los sistemas con energéticos convencionales, reduce la presión sobre los recursos naturales no renovables, integra al ser humano a su entorno, etc.

En 1987, dos turbinas eólicas de eje vertical desarrolladas en Gran Bretaña están siendo sometidas a prueba en la Bahía de Carmarthen, Gales. Una de ellas se asemeja a una antena de televisión en forma de H situada encima de una torre de hormigón de 25 metros de altura, mientras que la otra es de un rotor de gran solidez, que colocado en la parte superior de un poste, gira alrededor de un eje vertical. El prototipo de la turbina eólica en H ha sido sometido ya a pruebas intensivas a velocidades medias del viento de 6.7 m/s. Este prototipo (H) es de 135 kw, su brazo transversal

(horizontal), es de acero de 25 metros de diámetro, en cada extremo del brazo tiene dos semiálabes de acero de 9 metros. La segunda turbina eólica de eje vertical sometida a prueba en Gales, fue desarrollada en el Politécnico de Ringston, cerca de Londres. El rotor que circunda al eje vertical y que contiene cinco álabes horizontales y cinco verticales, se halla encerrado por un estator y soportado por una estructura en celosía que le proporciona seguridad y estabilidad. El estator incrementa el paso del aire por el rotor, generándose en la parte superior del primero una zona de baja presión cuando el viento sopla contra la turbina. El viento que sopla de cruzado sobre los álabes verticales resultará en el giro del rotor sobre la columna vertical. Subsiguientemente, el aire pasará hacia la región de baja presión hasta la salida situada en la parte superior del estator y al mismo tiempo accionará los álabes horizontales en la misma dirección, consiguiéndose así, que la rotación de la turbina se consiga aun con velocidades del viento de 4.4 metros por segundo solamente.

Como se observa en el párrafo anterior, en la actualidad existe gran variedad de configuraciones de convertidores, pero todas derivadas de la combinación de las configuraciones básicas siguientes:

ALABES EJE	SUSTENTACION	ARRASTRE
Vertical	Darrieus Trián- gulo H. Turbina Savonius despla- zado.	Savonius Copas Panemonas
Horizontal	Aspas 1,2,3,8, 12,16 Chalk, bicicleta Aspavela	Savonius flujo cru- zado Panemonas flujo - - cruzado

La tecnología de conversión de la energía eólica ha evolucionado desde sistemas de arrastre de palas planas o cóncavas, generalmente de eje vertical, a sistemas de sustentación de perfil aerodinámico de lámina curvada, hasta los perfiles modernos. Para la viabilidad técnico-económica de un sistema conversor de energía eólica depende de su sencillez, de la optimización de la relación peso/kw y del uso de materiales de la región.

I.2 ANTECEDENTES HISTORICOS EN EL ISTMO

En el período, desde 1951 hasta 1970, el observatorio meteorológico de Salina Cruz, Oax, obtuvo entre otros datos, la velocidad del viento en lapsos aleatorios y alturas diferentes (sin especificar). Estos datos, que se publicaron en 1976 en el Atlas del agua de la Comisión del Plan Nacional Hidráulico, son de 6.8 m/s anual con una frecuencia de 59.5%.

En 1974 la CETENAL, publicó los planos de la zona Istmica.

En 1975 la C.F.E. patrocinó la instalación de dos estaciones anemográficas en la zona, registrándose vientos de 8.5 m/s por 3,500 horas y vientos de 11 m/s por 2,000 horas.

En 1975 el I.I.E. inició estudios sobre la energía eólica y experimenta con un sistema eólico de bombeo de agua del tipo Savonius e investiga sobre sistemas de generación de energía eléctrica con capacidades desde 25 kw hasta 100 kw por unidad.

En 1976 se iniciaron estudios en este sentido en el Instituto de Ingeniería de la UNAM. Estos estudios se enfocaron hacia la meteorología eólica, se han obtenido expresiones para la cuantificación de la potencia disponible del

viento en función de sus velocidades máximas diarias, para la zonificación del país de acuerdo a su capacidad energética. Resultando la zona Istmica, la que tiene los vientos más fuertes y constantes en todo el país.

En 1977 el I.I.E. inició la recopilación de datos en el Istmo.

A principios de 1978, en base a un convenio entre el I.I.E. y la DGITR, se envió un profesor del I.T.I. al IIE para integrarse en el grupo de energía eólica del I.I.E.

En 1983 se estableció un convenio específico de colaboración entre el IIE y el ITI, para el desarrollo conjunto de actividades de investigación en el aprovechamiento de la energía eólica para la generación de electricidad, de beneficio al desarrollo tecnológico del sector eléctrico del país, en base al convenio firmado el 18 de marzo de 1980 con la Subsecretaría de Educación e Investigación Tecnológica de la S.E.P.

En 1984 se instaló una torre de 30 metros instrumentada climatológicamente, en los terrenos del I.T.I. y cinco estaciones anemométricas distribuidas en el Istmo en: Salina Cruz, Tehuantepec, La Venta, La Ventosa y Unión Hidalgo, todos en el Estado de Oaxaca.

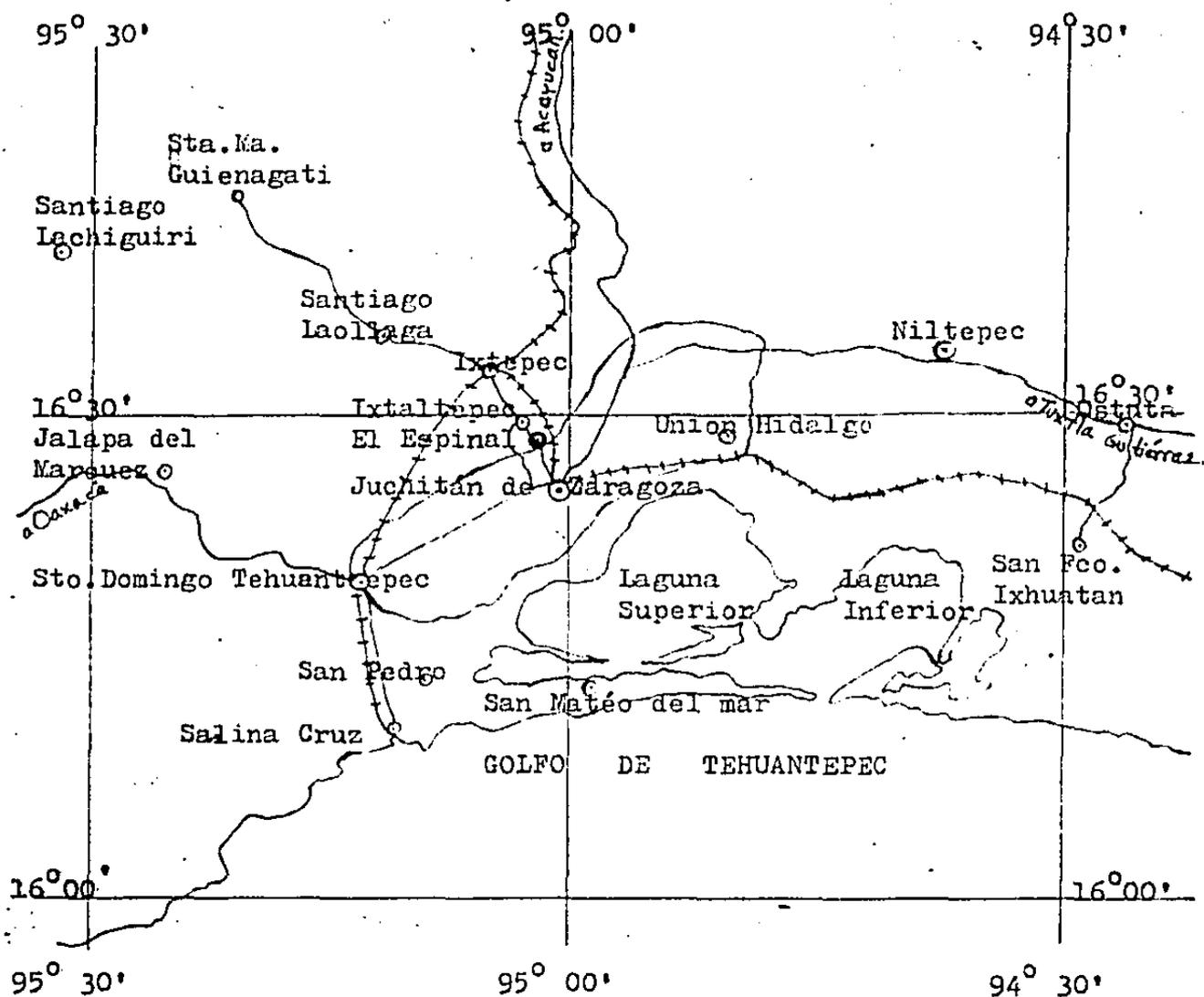
II.-GENERALIDADES SOBRE EL ESTADO DE OAXACA EN SU ZONA ISTMICA.

II.1.-DELIMITACION.

El Estado de Oaxaca se sitúa al Sur de la República Mexicana entre los paralelos $15^{\circ}38'30''$ y $18^{\circ}42'30''$ de Latitud Norte y los Meridianos $93^{\circ}54'36''$ y $98^{\circ}30'30''$ de Longitud Oeste; encontrándose formado por siete regiones de importancia económica y social que agrupan 570 municipios con 30 distritos. Estas regiones son: Los Grandes Valles del Centro Geográfico, La Mixteca alta y baja sobre la cordillera, La Cañada, El Istmo, La Costa, La Sierra y El Papaloapan.

El Istmo de Tehuantepec, Oax., se localiza al Sureste del Estado de Oaxaca, entre los paralelos $15^{\circ}49'12''$ y $17^{\circ}27'00''$ y los meridianos $93^{\circ}54'36''$ y $95^{\circ}58'40''$. Sus límites naturales son: al Norte la Sierra Atravezada, al Sur el Golfo de Tehuantepec, al Este el río Pueblo Viejo y al Oeste el Valle de Nejapa. Políticamente limita al Norte con el Estado de Veracruz, al Sur con el Océano Pacífico, al Este con el Estado de Chiapas y al Oeste con los municipios de Santa María Zoquitlán, San José Lachiguiri y San Cristóbal Amatlán, estos últimos pertenecientes al Estado de Oaxaca. Esto nos dá un área de $19,975.57 \text{ Km}^2$. con 510 Km. de litorales, en la que se asienta una población aproximada de 475,000 habitantes.

LOCALIZACION DEL AREA DE ESTUDIO.



ESCALA: 1;800 000

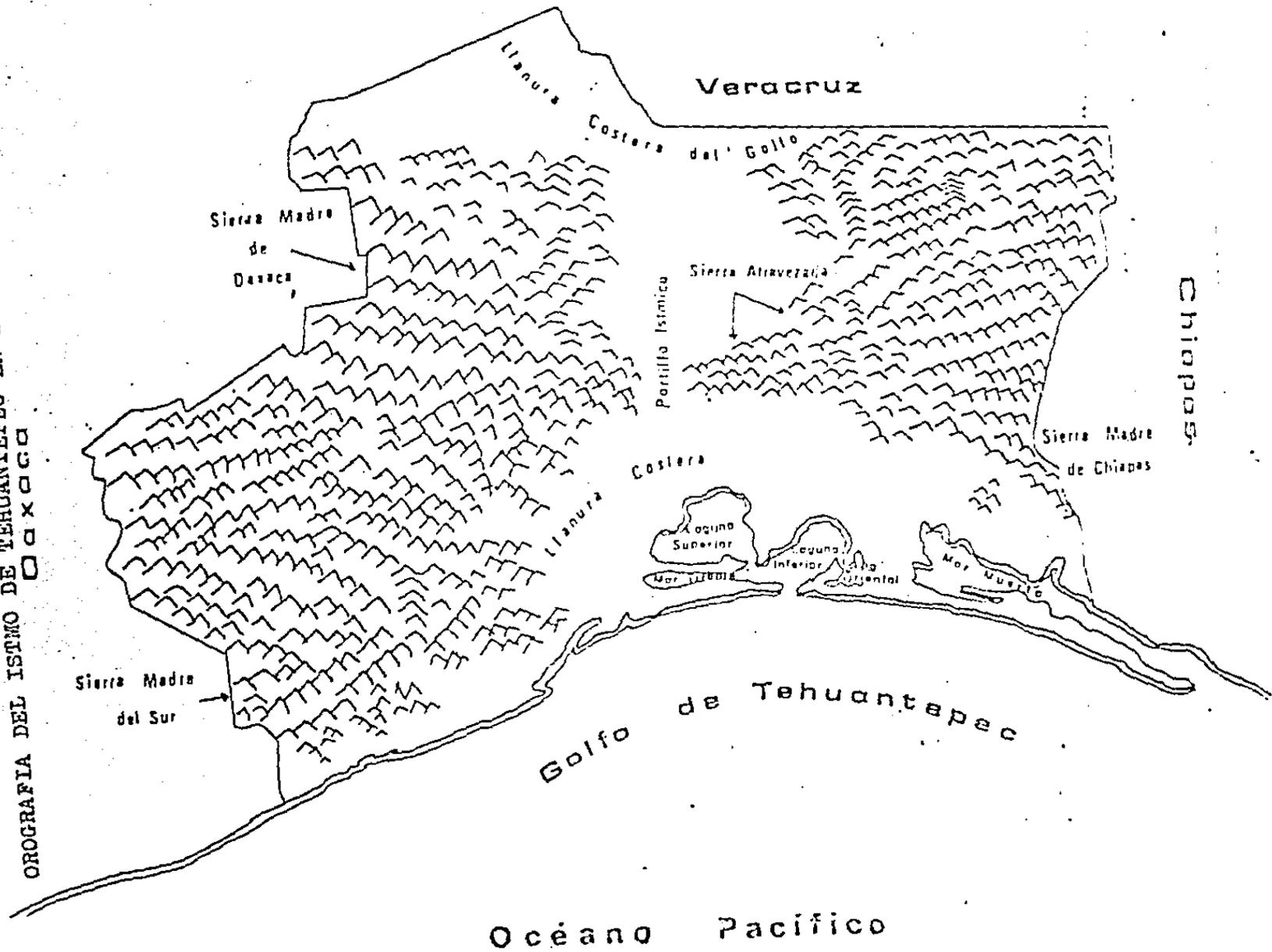
II.2.-OROGRAFIA.

Desde el punto de vista orográfico , el Istmo de Tehuantepec se caracteriza por poseer un perfil montañoso que configura algunos Valles importantes y una planicie costera de 145 Km. de longitud.

Dentro del Estado de Oaxaca , la Sierra Madre del Sur se extiende por el Suresta a lo largo de la Mixteca y de la Costa, extendiéndose paralelamente al Oceano Pacifico hasta el Istmo de Tehuantepec con una anchura de 116 Km. y su curso cercano al mar, que la planicie costera pocas veces alcanza más de 20Km. de ancho.

De acuerdo con estudios realizados de paleontología, el Istmo de Tehuantepec fue de las últimas áreas que recibieron innovaciones marinas cuando la mayor parte del País había emergido , por esto es que las formaciones que conectan a la Sierra Madre de Oaxaca y la Sierra Madre del Sur con la Sierra Madre de Chiapas son de poca elevación y muy recientes.

OROGRAFIA DEL ISTMO DE TEHUANTEPEC EN SU ZONA ISTMICA • Oaxaca



II.3.-HIDROGRAFIA.

En el Istmo de Tehuantepec existen varias corrientes de agua en forma de arroyos o ríos que en general son de curso corto y tempestuoso.

Los recursos hidrológicos de esta región incluyen al río Tehuantepec de régimen torrencial, se origina en las estribaciones de la Sierra Madre del Sur cerca del poblado de Miahuatlán, Oax. tiene una longitud de 240 Km. con una cuenca de captación de 10,090 Km² y un escurrimiento anual medio de $1,368.7 \times 10^6 \text{ M}^3$. Sus afluentes principales son los ríos La Virgen y Tequisistlán en su margen derecho, en el izquierdo los ríos San Antonio y Las Margaritas.

El río de los Perros nace en la Sierra Mixe y recorre 88 Km. tiene una cuenca de 1,081 Km². con un escurrimiento anual medio de $72.4 \times 10^6 \text{ M}^3$.

El río Chicapa se origina en la Sierra Madre de Chiapas, cerca de la Sierra atravezada ; tiene una longitud de 72 Km. y su cuenca de captación es de 573 Km². con un promedio de escurrimiento anual de $115.3 \times 10^6 \text{ M}^3$. Estos dos últimos ríos desembocan en la Laguna Superior y sus caudales no se aprovechan en sistemas de riego.

El río Niltepec tiene 45 Km. de longitud y 378 Km² de cuenca de captación con un escurrimiento medio anual de 30 millones de metros cúbicos.

El río Ostuta es de 65 Km. de longitud y de 118 Km². de cuenca de captación, tiene un escurrimiento anual medio de $527 \times 10^6 \text{ M}^3$., que equivalen a un gasto medio de $17 \text{ M}^3/\text{Seg}$.

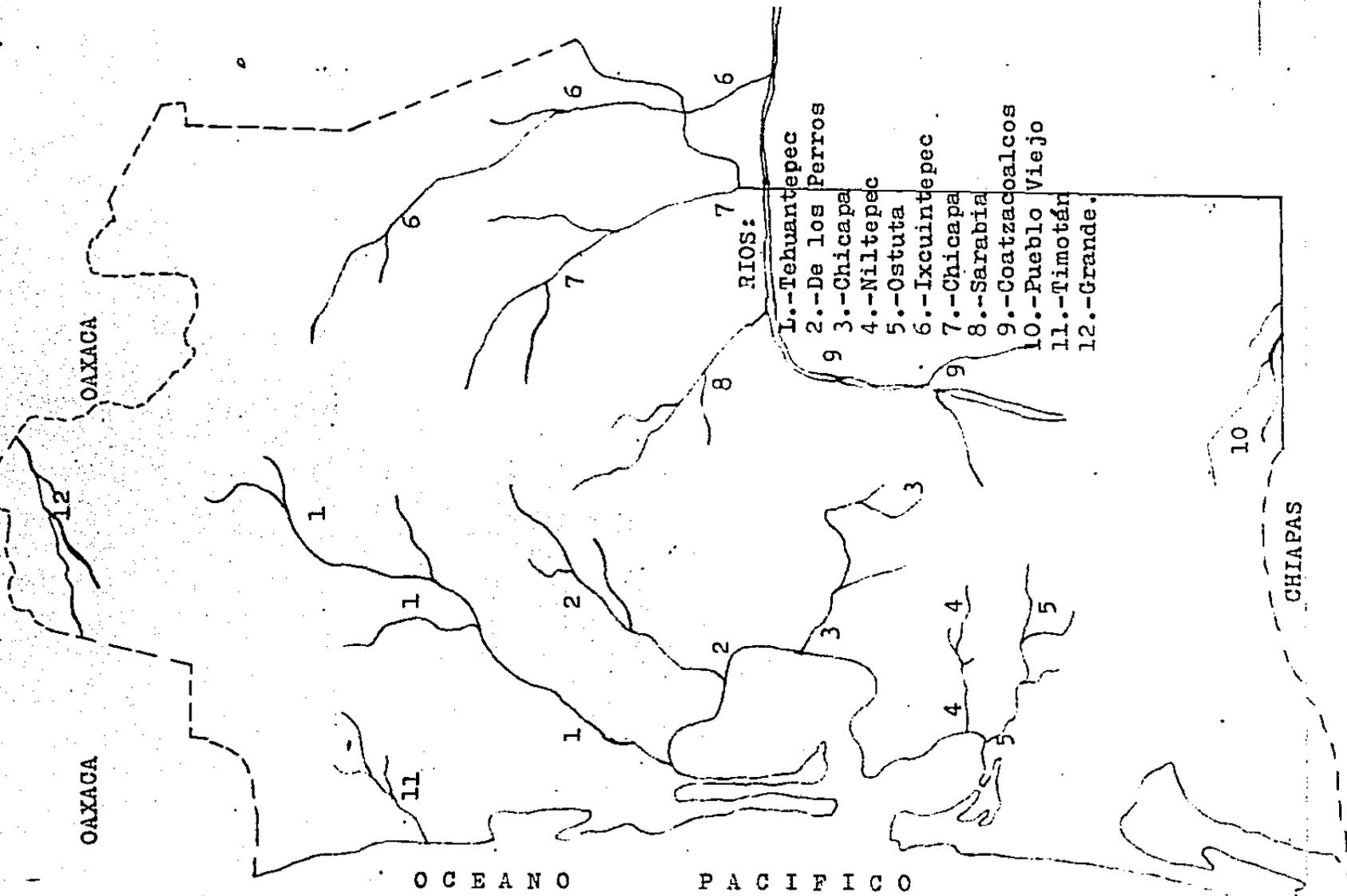
Otros escurrimientos importantes que existen en el Istmo son; al Norte, los ríos Ixcuintepec, Sarabia y Coatzacoalcos; inmediato al Estado de Chiapas se encuentra el río Pueblo Viejo; al Sur, en el municipio de San Pedro Huamelula existe el Timotán; y al Oeste limitando el área del Istmo, el río Grande. Existen dos Lagunas de origen salino llamadas Superior e Inferior y localizadas al sur del Distrito de Riego. También existen tres manantiales de agua dulce denominados "Ojo de agua". Se encuentran en las poblaciones de Laollaga, Tlacotepec y La Venta, Oaxx, utilizándose sus aguas con fines domésticos y para el riego de pequeñas superficies.

Para captar los escurrimientos del río Tehuantepec se construyó la presa "Presidente Benito Juárez" a 50 Km. de su desembocadura. Las principales características de esta presa son las siguientes:

Capacidad de almacenamiento	942.0 Millones de M ³ .
Capacidad de azolves	280.0 Millones de M ³ .
Volúmen muerto	19.0 Millones de M ³ .
Area de embalse	7,845.0 Hectáreas.
Capacidad de riego	51,955.0 Hectáreas.
Longitud total del canal principal	68.2 Kilómetros.
Longitud total de canales laterales	593.8 Kilómetros.
Longitud revestida del canal pral.	6.2 Kilómetros.
Longitud revestida de canales lat.	12.0 Kilómetros.

El agua de esta presa descarga en el río Tehuantepec recorriendo 17 Km. para llegar a la presa derivadora "las Pillas", en el municipio de Mixtequilla.

HIDROGRAFIA DEL ISTMO DE TEHUANTEPEC EN SU ZONA ISTMICA



II.4 CLIMA

El Istmo tiene un clima tropical cálido subhúmedo, 27.6°C de temperatura media anual y 1300 m.m. de promedio de precipitación anual. Lluvias en verano (mayo a octubre) y sequía en invierno (noviembre a abril), no hay granizada, ni helada.

II.4.1 Distribución de lluvias durante el año (variación del 20 al 30%).

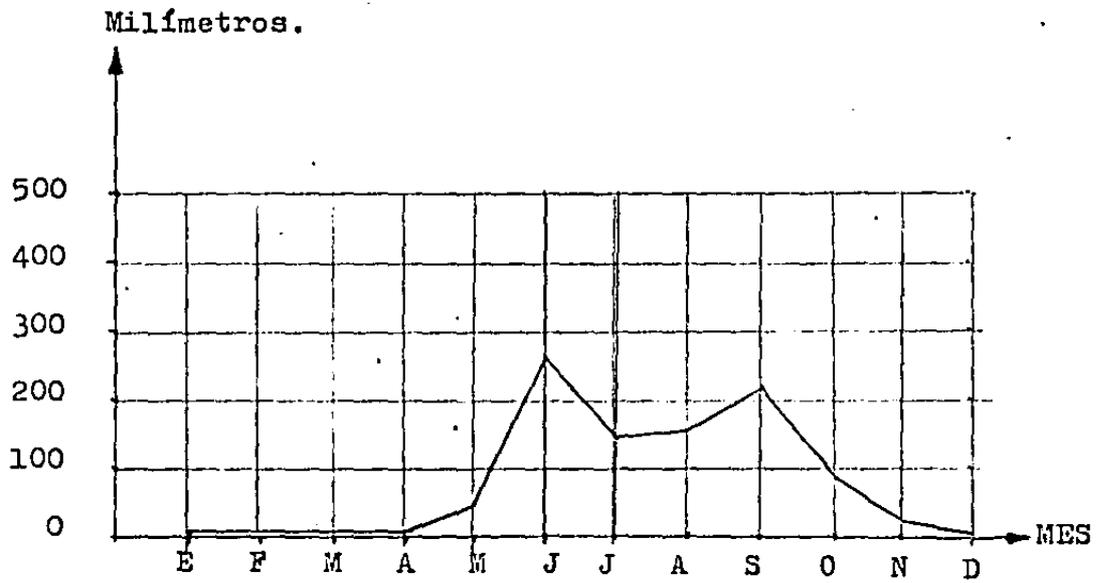
MES	CICLO	PROMEDIO MENSUAL DE PRECIP. (mm)	
Mayo	Primavera- Verano	64	
Junio		375	(250-500)
Julio		125	
Agosto		187	(125-250)
Sept.		375	(250-500)
Oct.		126	(64-125)
Nov.	Otoño — Invierno	25	
Dic.		4	
En.		3	(2-4)
Feb.		4	
Marzo		4	
Abril		3	(2-4)
		1 299	

194 días/año despejado

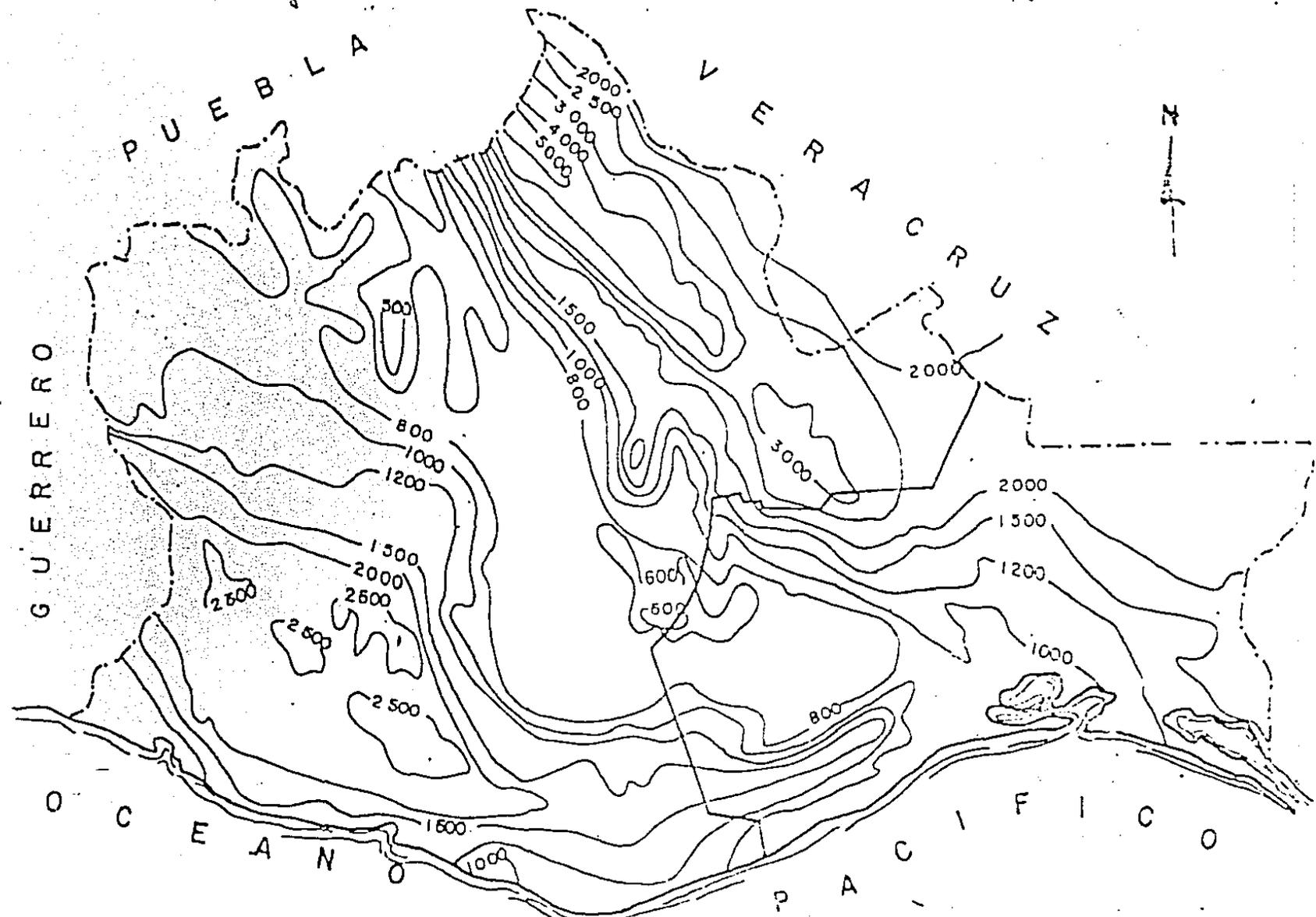
760.7 mm Hg. de presión atmosf.

26 días de calma total.

DISTRIBUCION DE LA PRECIPITACION PLUVIAL MEDIA EN EL
ISTMO .



UBICACION DE LAS ISOYETAS EN EL AREA DE INFLUENCIA

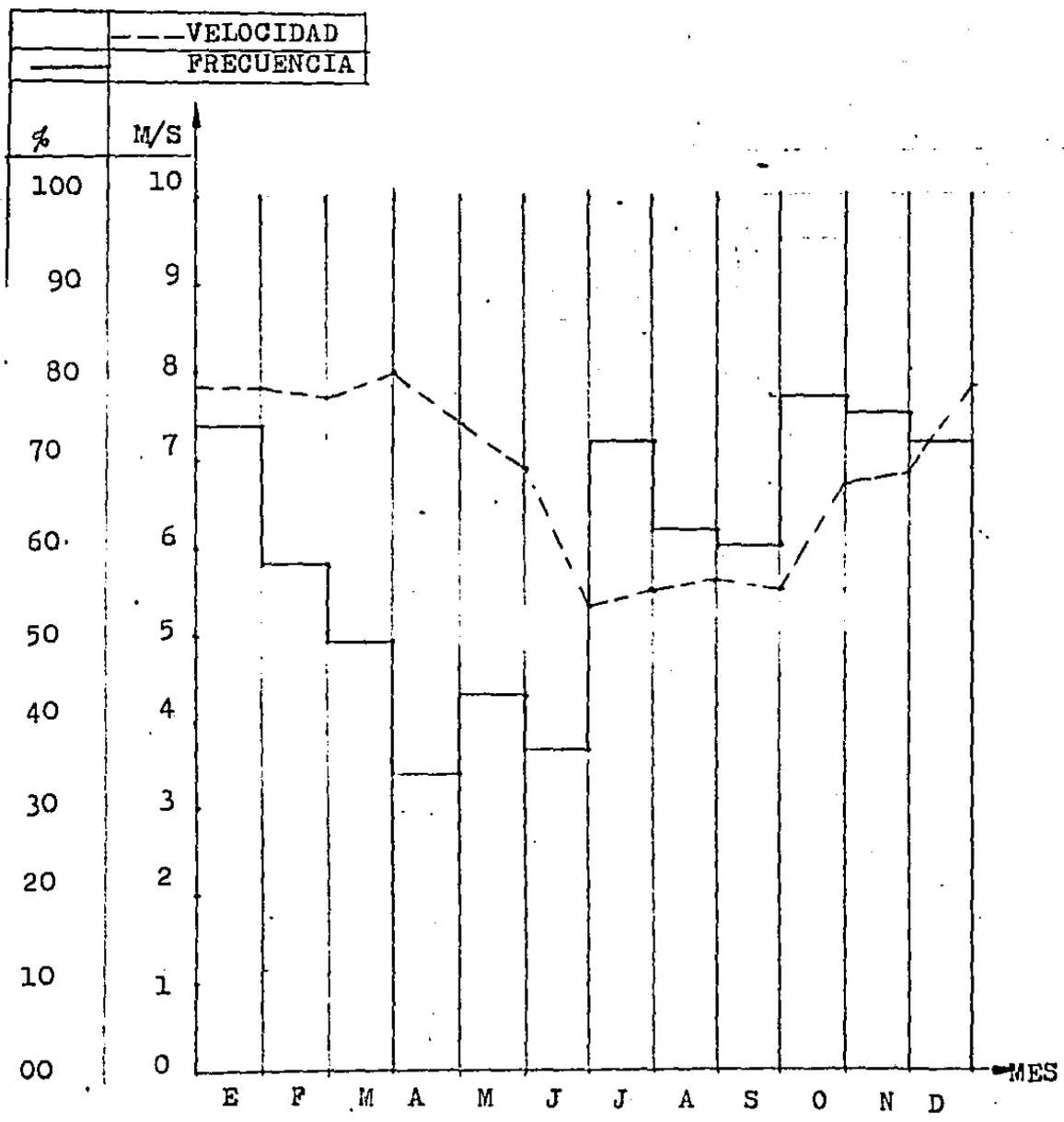


La característica del viento del Istmo de Tehuantepec se debe a la condición climática, a su altura sobre el nivel del mar, a las cordilleras del este y el oeste, que conducen corrientes de aire del norte, debido a los gradientes de temperatura de la atmósfera. Estos vientos con dirección N-S se mueven desde el Golfo de México hacia el Océano Pacífico, esta corriente se refuerza por las altas temperaturas de la costa sur, las grandes velocidades de viento se obtienen en la "unión" de las cordilleras a la altura de la Ventosa. Este fenómeno físico se presenta con las características siguientes, la dirección del viento predominante es el norte, se observa el viento principalmente entre Otoño e Invierno que abarca desde el mes de octubre hasta marzo.

II.4.2 Distribución de la dirección, frecuencia y velocidad del viento desde 1951 hasta 1970.

MES	NORTE		N E		ESTE		SE		SUR		SM		CALMA	
	FREC. %	VEL. $\frac{m}{s}$	F	V	F	V	F	V	F	V	F	V	F	V
Enero	74.2	7.8	0.3	1.0	-	-	-	-	3.2	18.0	-	-	7.7	0
Febrero	58.1	7.7	0.4	0.4	-	-	0.4	0.3	3.5	37.5	-	-	3.5	0
Marzo	48.6	8.0	-	-	-	-	1.1	0.6	3.6	48.5	-	-	2.0	0
Abril	34.2	7.4	-	-	-	-	1.1	1.2	3.6	63.6	-	-	1.1	0
Mayo	42.6	6.9	0.3	0.4	-	-	2.4	2.7	3.4	50.9	-	-	3.9	0
Junio	36.9	5.3	1.0	2.5	0.4	0.6	2.8	3.3	3.3	42.0	1.0	1.2	16.0	0
Julio	72.3	5.5	0.3	0.4	0.3	0.3	1.9	3.0	2.2	10.1	-	-	14.9	0
Agosto	62.1	5.6	0.9	2.0	0.3	0.4	2.6	1.6	2.7	24.4	0.6	1.4	9.3	0
Septiembre	60.6	5.5	-	-	-	-	2.5	1.7	3.1	25.1	2.0	1.8	9.9	0
Octubre	77.3	6.7	0.3	1.3	-	-	1.3	2.0	3.1	14.1	-	-	5.9	0
Noviembre	75.2	6.8	-	-	-	-	1.3	1.8	3.1	17.5	0.4	0.6	5.7	0
Diciembre	71.9	7.8	-	-	-	-	-	-	3.0	21.9	-	-	6.2	0
Promedio Anual	59.5	6.8	0.3	0.7	0.1	0.1	1.5	1.5	3.2	31.2	0.3	0.4	7.2	0

DISTRIBUCION DE VELOCIDADES DE VIENTOS EN LA DIRECCION NORTE EN EL ISTMO DE TEHUANTEPEC EN SU ZONA ISTMICA .
 (Frecuencia en % y Velocidad en metros por segundo.) .



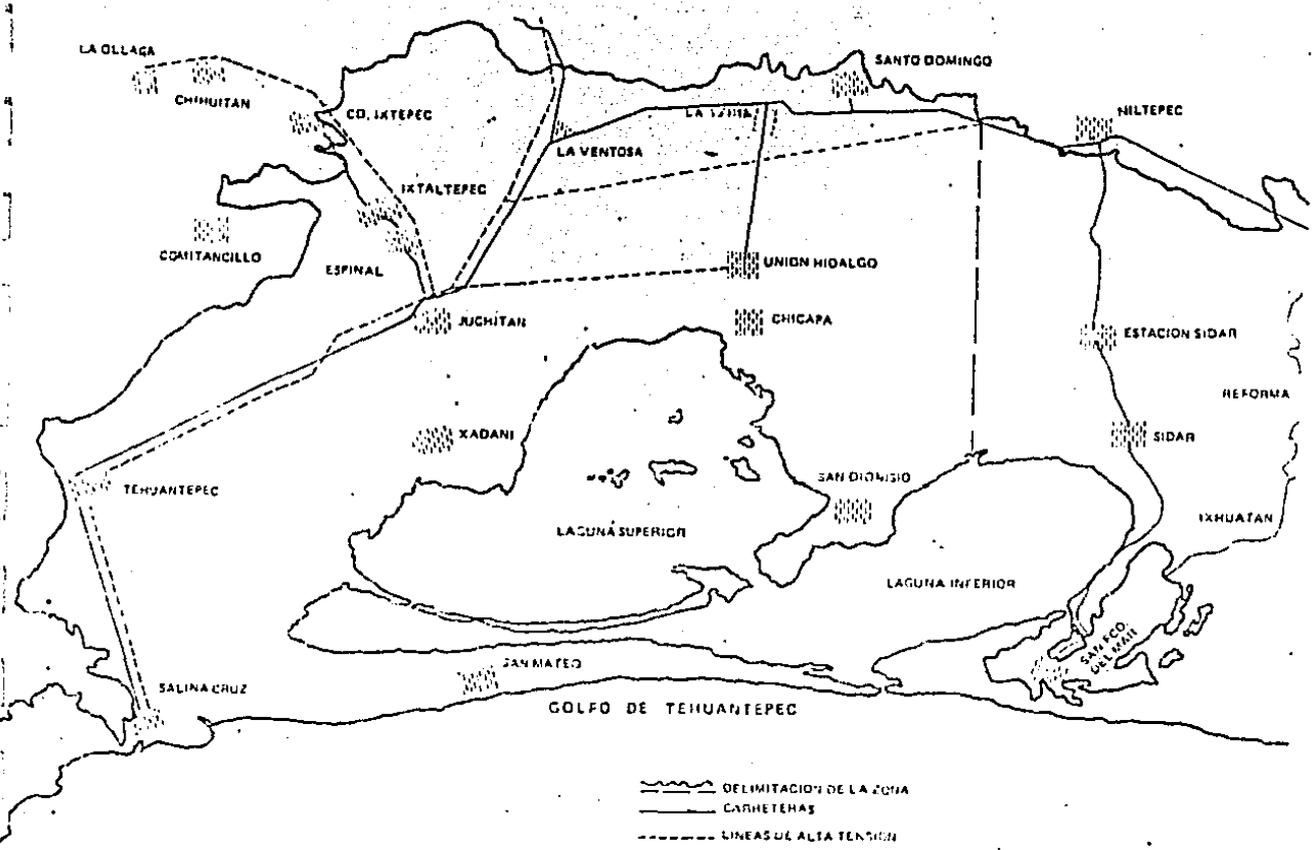
Se han medido vientos con velocidades de hasta 24.5 m/s y ráfagas de hasta 56 m/s en la dirección NOE. 16°36' a 17°15' latitud norte y 94°45' a 95°09' longitud oeste con 44 km de ancho.

II.5 DELIMITACION DE LA ZONA VENTOSA

La delimitación de la zona de vientos del Istmo, queda dentro del Estado de Oaxaca como sigue.

NORTE. 12 Km hasta la vía del ferrocarril transistmico:
NE . 32 Km hasta Santo Domingo y
18 Km hasta el cerro "Lagartero" (pasando por la Ventosa)
ESTE . 21 Km hasta Unión Hidalgo, más 15 Km.
Sur . 11 Km hasta las playas del Lago Superior
SO . 30 Km hasta la Cd. de Tehuantepec y
34 Km hasta el puerto de Salina Cruz
NO . 18 Km hasta Cd. Ixtepec y
16 Km hasta Comitancillo

El área ventosa, es aproximadamente de 1,600 Km², está entre 0 y 50 metros SNM, con nivel freático promedio de 10 metros. El cerro "Lagartero" tiene 250 metros SNM, el cerro "Llovisna" tiene 150 metros SNM, el cerro "Blanco" tiene 250 m. SNM y el cerro "Guilote" tiene 300 m. SNM.



Localización de la Región Estudiada

II.6 ESTADO DE LA AGRICULTURA, GANADERIA, PESCA, SILVICULTURA Y ELECTRIFICACION EN EL ISTMO

II.6.1 Agricultura

El Istmo tiene el sistema de riego N° 19 con una superficie aproximada de 74,150 hectáreas, de las cuales 50,800 hectáreas son cultivables y 23,350 hectáreas no son regables (cerros, zonas urbanas, ríos, etc.).

Este distrito se alimenta con aguas del río Tehuantepec, que se almacenan en la presa Benito Juárez en Jalapa del Marquez, Distrito de Tehuantepec.

Los cultivos más importantes del Istmo son: maíz, caña de azúcar, frijol, tomate, ajonjolí, sorgo, plátano, sandía, melón, cacahuate, forraje, etc.

También existe en el Istmo, el Distrito de temporal N° IV, con una supeficie aproximada de 1'131,600 hectáreas de las cuales 183,319 hectáreas se laboran, 862,279 hectáreas no se laboran y 82,607 hectáreas son productivas susceptibles de cultivo.

Hasta 1978 aún se obtenían dos ciclos de cultivo

de temporal, pero en los últimos años, ya solamente se cultiva un periodo en el ciclo Primavera-Verano (mediados de Mayo a mediados de Octubre) debido a la sequia de 1979 y a que en general las pricipitaciones pluviales han disminuido mucho en los dos ciclos agrícolas, pero sobre todo se ha resentido mas en el ciclo Otoño-Invierno.

II.6.2 Ganadería

En 1978 hab-ían 755,000 cabezas de ganado, pero fue decreciendo, actualmente existen 580,000 cabezas, debido a la falta de agua para abrevadero y para riego del pasto.

II.6.3 Pesca

En 1979 se pescó 9,765 toneladas, en 1980 se pescó 8,954 ton.

II.6.4 Silvicultura

En 1970 habian 290 000 ha. en 1980 habian 230,000 ha, actualmente ya solamente existen 210 hectáreas.

II.6.5 Electrificación

La C.F.E. en su zona K-140 proporciona el servicio

eléctrico a las principales ciudades y poblaciones del Istmo, pero no así a las comunidades aisladas.

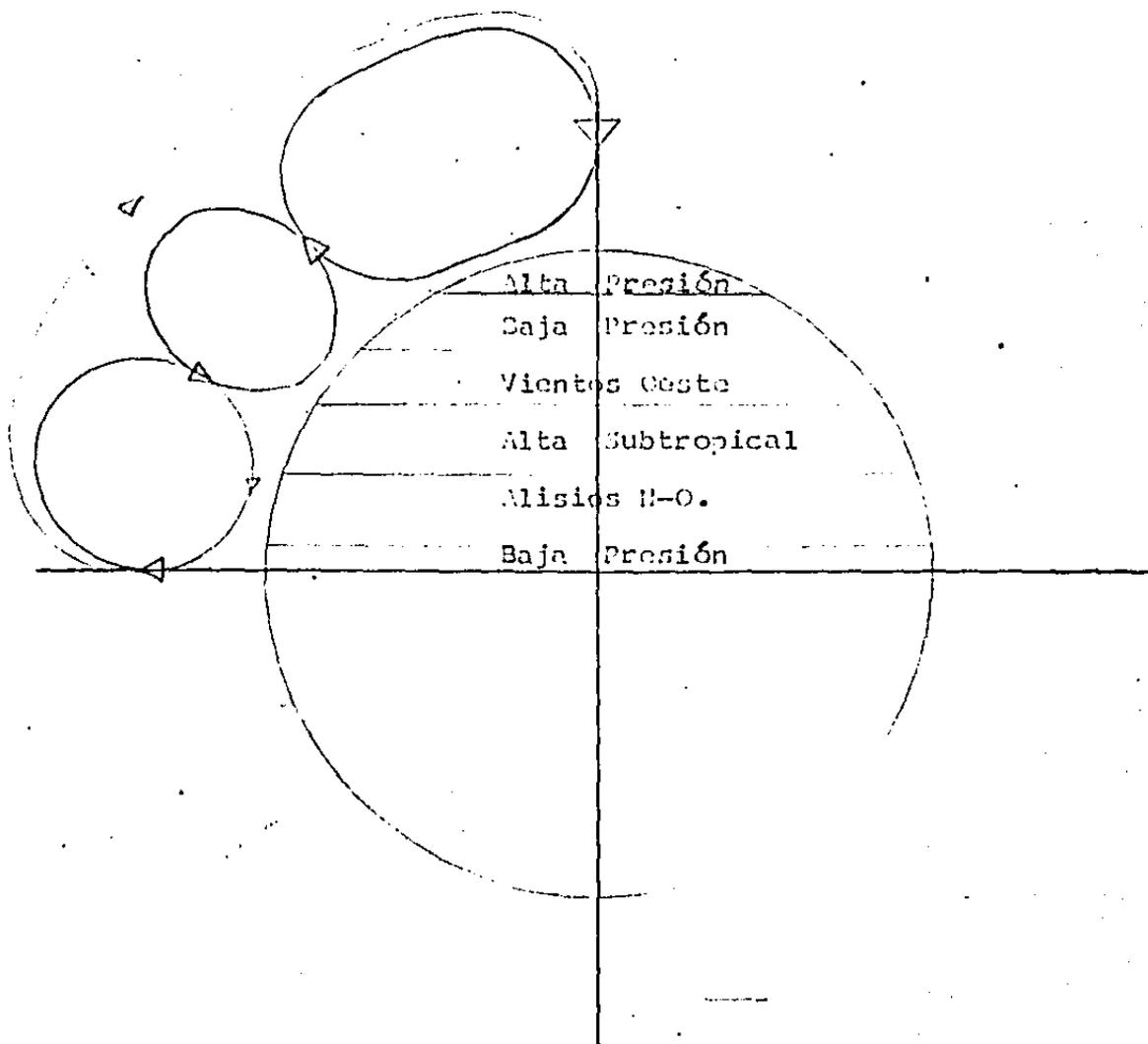
Hasta 1982, la CFE suministraba este servicio a 124 poblaciones con 43,800 consumidores, mediante una planta termoeléctrica de 54,000 Kw de capacidad, trabajando al 53.7% de su capacidad. Cabe mencionar que dentro de la zona, existían 17 poblaciones sin energía eléctrica, además de otras comunidades aisladas.

Actualmente la C.F.E. suministra el servicio eléctrico, mediante varias subestaciones a 131 poblaciones, con 50,000 consumidores, con 350,000 habitantes beneficiados.

III. GENERALIDADES SOBRE LA METEOROLOGIA EOLICA

III.1 ORIGEN DEL VIENTO

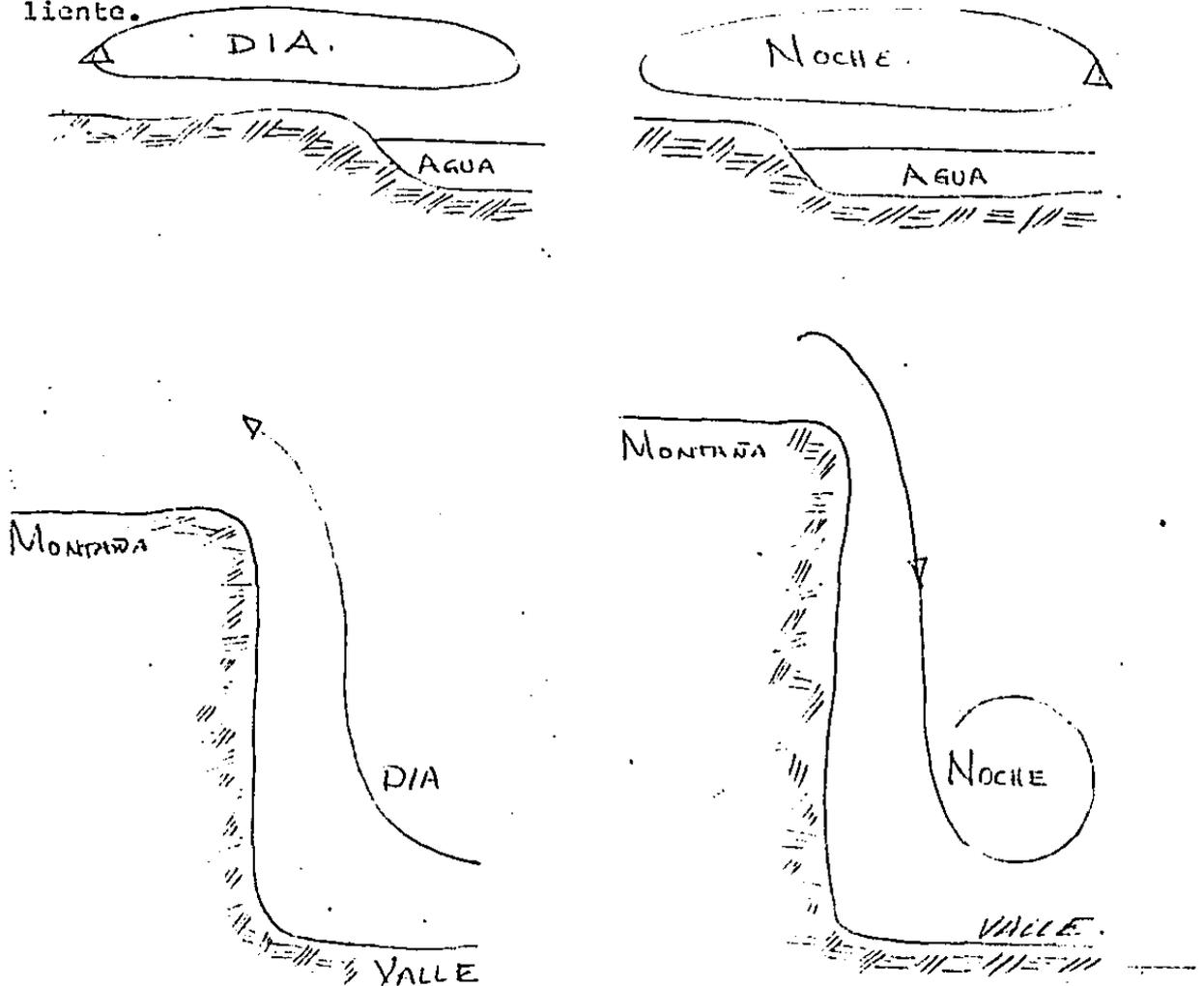
El viento se origina por el movimiento del aire, de zonas de altas a bajas presiones, producidas por el calentamiento irregular del planeta.



Para su aprovechamiento se considera hasta 200 m de altura, el nivel del viento.

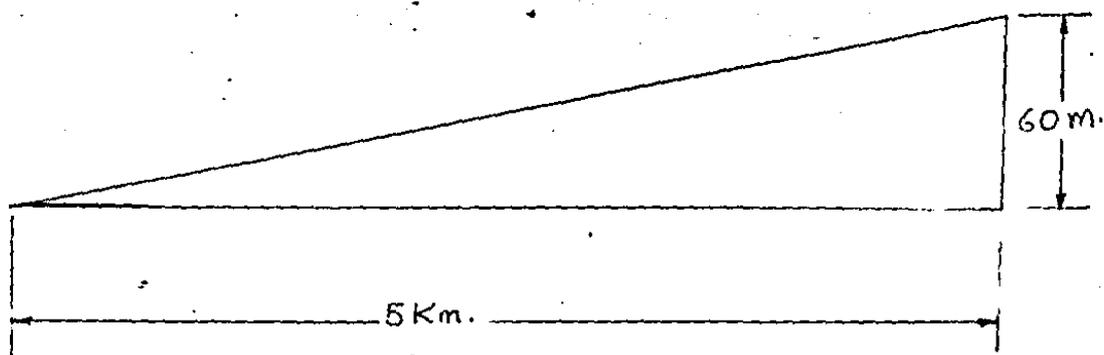
Vientos locales

La menor capacidad calorífica de la tierra respecto del mar, hace que se caliente más rápido la tierra y el aire que esta en contacto con ella, elevándose esta masa de aire caliente.

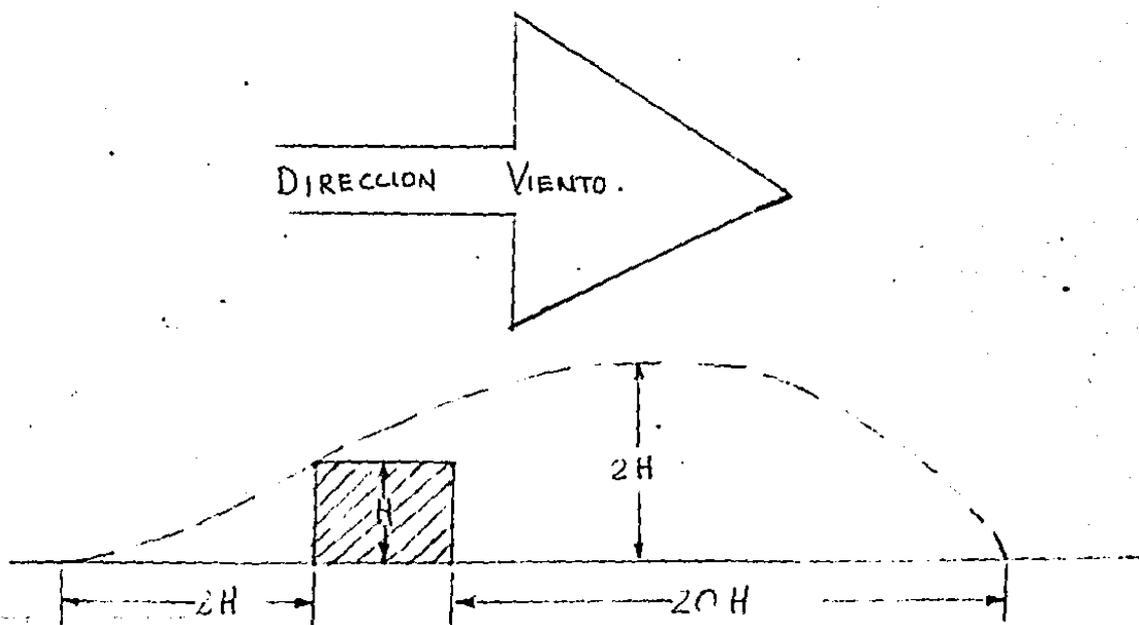


Terrenos planos.

De acuerdo con el manual de sitio para pequeños sistemas convertidores de la energía del viento por Harry L. Wegley del Laboratorio del Pacífico NO USA, un terreno se considera plano cuando:



Zona de turbulencia para pequeñas construcciones.



III.2 VALOR EMPIRICO DEL COEFICIENTE DE RUGOSIDAD Z_0 .

SUPERFICIE	Z_0 (metros).
Ciudad	2.5 ± 1.5
Suburbio y pueblo	1.5 ± 0.5
Arboles altos	0.55 ± 0.35
Arboles bajos	0.075 ± 0.025
Trigales	0.045
Pastizal alto	0.039
Estepa	0.032
Campo plano	0.02
Pastizal bajo	0.017
Nieve	0.0049
Arena	0.0015 ± 0.00015
Mar calmado	0.0002 ± 0.00005
Lele	0.000015
Hielo	0.0000025

EMPIRIC DE RUGOSIDAD Z_0^* .

SUPERFICIE	Z_0^* (metros).
Playa, hielo, mar, nieve.	0.005
Pastizal bajo, aeropuero, ho, tierra de sembradio vacio.	0.03
Pastizal alto, cultivo bajo.	0.10
Arboles pequenos, cul- tivos altos.	0.25
Josques, huertas fru- tales.	0.50

Pueblos y suburbios.	1.30
Centro de ciudades , espacios abiertos en el bosque.	2.00

VELOCIDAD MEDIA A CUALQUIER ALTURA.

$$\bar{V}_H = \bar{V}_a \left[\frac{H}{H_a} \right]^{\alpha_p} = \frac{\text{metros}}{\text{segundos}}$$

$$= \frac{L_n \left[\frac{z_0}{10} \right]}{L_n \left[\frac{z_0}{10} \right] - 0.068 L_n \left[\frac{H_a}{10} \right]} \left[\frac{\bar{V}_a}{6} \right]$$

Donde:

- \bar{V}_H = Velocidad media a conocer a la altura H.
- \bar{V}_a = Velocidad media actual conocida a la altura H_a .
- H = Altura nueva de \bar{V} en metros.
- H_a = Altura conocida de \bar{V}_a en metros .
- z_0 = Coeficiente de rugosidad en metros.

$$z_g = (H + H_a)^{1/2} = \text{metros.}$$

* Winds and wind system performance. C.G. Justus. The Franklin Institute Press. Philadelphia. 1979.

** Introduction to wind energy. J.H. Lysen. I.D. Consultancy Services and energy Developing Countries. 1983.

III.3 EXPLORACION DEL VIENTO

La exploración del viento se hace en diferentes exactitudes.

a) Regionalización del viento.- Esta exploración se obtiene con los datos estadísticos de la red meteorológica del país (SARH o el Servicio Meteorológico Nacional).

b) Prospección en zonas de potencial cólico.- Para esta exploración es necesario relacionar las condiciones climatológicas, la topografía y una zona de vientos constantes.

c) Localización de lugares específicos.- Para esta exploración se necesita ver la topografía y ecología del lugar y colocar anemómetros en diferentes lugares, para así seleccionar el sitio óptimo.

Procesando todos estos datos conocemos: los lugares en que la fuerza del viento es económicamente útil, las cantidades anuales de energía, la distribución del viento por día, mes o año, las duraciones de los vientos de alta velocidad y los periodos de calma.

Con respecto a la topografía.- Se puede guiar por los grandes desniveles o "embudos" del terreno, que ocasionen

gran gradiente de presión para el nivel regional.

Con respecto a la ecología.- Se puede guiar de las deformaciones de los árboles, ya que esto refleja la vel. media de vientos a que han estado sometidos.

La precisión de los estudios se hace de acuerdo a la importancia de la cantidad de energía que se desea.

La metodología que se utiliza para la prospección y evaluación de sitios, para aerogeneradores de un máximo de 100 Kw, consiste de las etapas siguientes:

1. Obtención y Análisis de Datos

A) Datos estadísticos meteorológicos existentes (mensuales y anuales) de temperatura, precipitación, viento en superficie y en la atmósfera (intensidad y frec.).

B) Mapas de la topografía de la zona.

2. Investigación de Campo

Información de la región sobre: Distribución de la población, formas de propiedad de la tierra, utilización potencial de la tierra, vías de comunicación y distancia del lugar

a las líneas de alta tensión.

3. Prospección de la Energía del Viento.

Determinar la distribución del viento en el área potencialmente aprovechable mediante una red anemométrica de bajo costo.

4. Verificación de Área

Se obtiene información de interés en relación con el SCEE, caracterizando el viento en el área, mediante un equipo anemométrico de mayor calidad.

5. Estudios Específicos en los Sitios de Instalación de Grandes SCEE.

Para este estudio en un sitio específico, se necesita de torres con varios niveles de medición, con sensores de velocidad, temperatura y presión, para conocer los parámetros sobre el viento que inciden en el funcionamiento de un gran SCEE.

Estaciones anemométricas básicas instaladas en: Salina Cruz, Tehuantepec, La Venta, la Ventosa y Unión Hidalgo.

Elementos básicos de estas estaciones.

- Mástil telescópico de 10 m.
- Caja metálica para el equipo electrónico
- Ga-rita de madera para protección ambiental del equipo y fuente de energía
- Acumulador, 12 V.
- Anemómetro
- Soportes para sensores anemométricos
- Anclas, igualadores de tensión y tensores para los "vientos".

En la estación meteorológica principal instalada en el ITI de Tluchitán Oax., se miden velocidades del viento en 3 niveles (10, 20 y 30 m), temperatura ambiente, presión barométrica, humedad relativa, precipitación pluvial, vel. del viento instantánea, dirección y vel. max. del viento.

CANAL				BIN	VELOCIDAD met./seg.	DIRECCION.				
0	1	2	3			N	NEE	SES	SWW	NNA
				00	0.0=V0= 0.4					
				01	0.4=V1= 0.8					
				02	0.8=V2= 1.2					
				03	1.2=V3= 1.6					
				04	1.6=V4= 2.0					
				05	2.0=V5= 2.4					
				06	2.4=V6= 2.8					
				07	2.8=V7= 3.2					
				08	3.2=V8= 3.6					
				09	3.6=V9= 4.0					
				10	4.0=V10= 4.4					
				11	4.4=V11= 4.8					
				12	4.8=V12= 5.2					
				13	5.2=V13= 5.6					
				14	5.6=V14= 6.0					
				15	6.0=V15= 6.4					
				16	6.4=V16= 6.8					
				17	6.8=V17= 7.2					
				18	7.2=V18= 7.6					
				19	7.6=V19= 8.0					
				20	8.0=V20= 8.4					
				21	8.4=V21= 8.8					
				22	8.8=V22= 9.2					
				23	9.2=V23= 9.6					
				24	9.6=V24=10.0					
				25	10.0=V25=10.4					
				26	10.4=V26=10.8					
				27	10.8=V27=11.2					
				28	11.2=V28=11.6					
				29	11.6=V29=12.0					
				30	12.0=V30=12.4					
				31	12.4=V31=12.8					
				32	12.8=V32=V _{max.}					

IV. EVALUACION DEL VIENTO EN EL ISTMO

IV.1 EVALUACION PRELIMINAR DE LA POTENCIA DISPONIBLE ANUAL, PDA.

El cálculo de la potencia disponible aproximada en w/m^2 , utilizando la velocidad máxima diaria, se hace mediante la expresión $PD = 0.4132 \frac{H + 8}{2H + 8} (VMD)^{2.125}$

Esta expresión se dedujo en el Instituto de Ingeniería de la UNAM, ajustando la velocidad máxima diaria VMD en m/s y la densidad del aire, donde H es la altura SNM en Km. Con esta expresión se calcularon las isolíneas de la PDMA en $watts/m^2$, como se muestra en la figura siguiente.

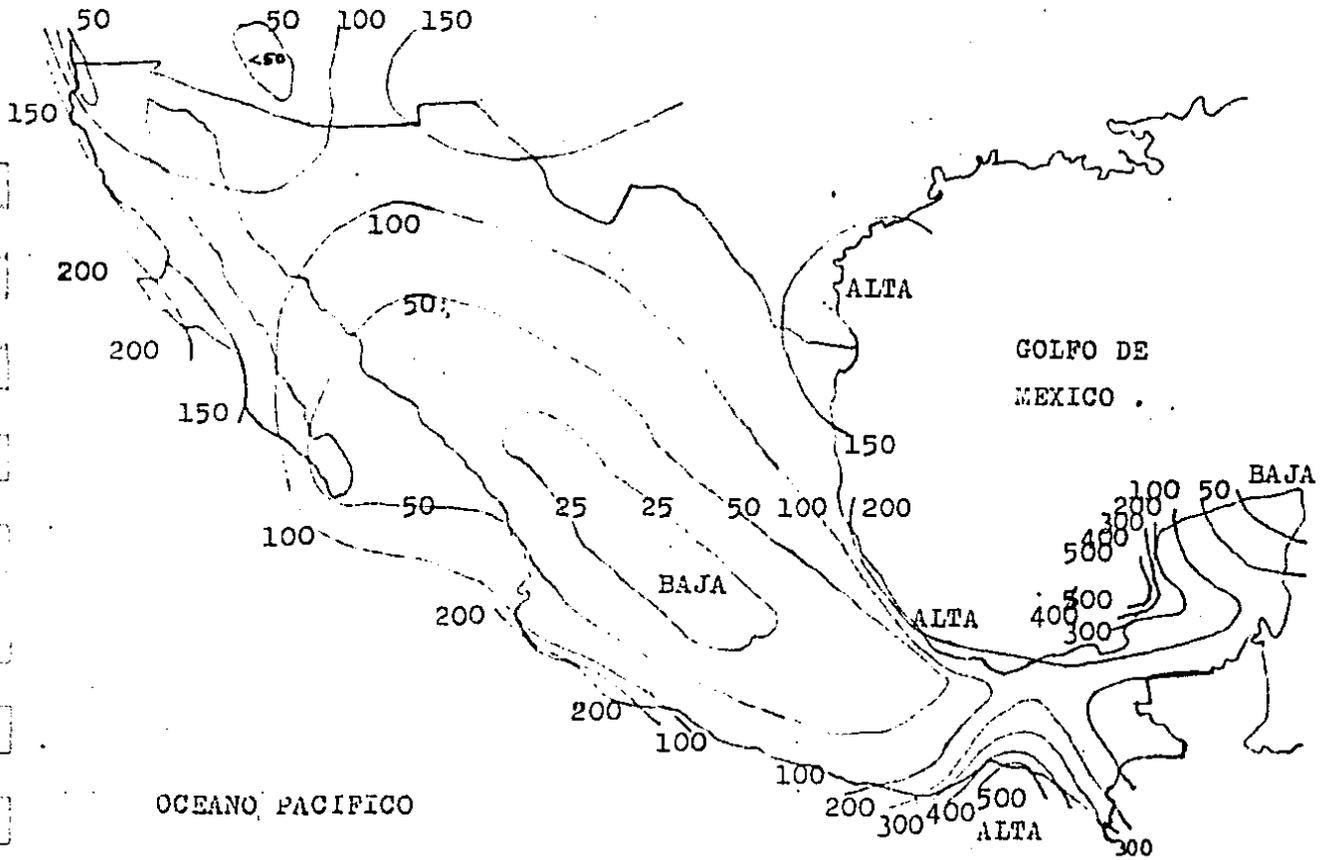
Utilizando la velocidad media, se puede calcular la potencia disponible para sistemas conversores de energía eólica SCEE, mediante la expresión:

$P = C_p \frac{1}{2} \rho A V^3$ donde C_p es el factor de potencia, ρ es la densidad del aire y V es la velocidad media.

De la tabla de distribución de vientos del observatorio de Salina, Cruz, Oax, se tiene únicamente para la dirección de viento NS una velocidad promedio anual de 6.8 m/s con una

ISOLINEAS DE LA POTENCIA DISPONIBLE MEDIA ANUAL PDMA
(Watts/m²).

ESTADOS UNIDOS AMERICANOS



frecuencia de 59.5%, medida a dos metros.

Normalizando la altura de medición a 10 metros, mediante la expresión: $V_H = V_a \left(\frac{H}{H_a}\right)^{1/7}$ o con la expresión más exacta:

$$\bar{V}_H = \bar{V}_a \left(\frac{H}{H_a}\right)^{\alpha_p} \quad \text{donde:}$$

$$\alpha_p = \frac{1}{\ln\left(\frac{Z_g}{Z_o}\right)} - \left[\frac{0.088}{1 - 0.088 \ln\left(\frac{H_a}{10}\right)} \right] \ln\left(\frac{\bar{V}_a}{6}\right) \quad \text{donde:}$$

$$Z_g = (H H_a)^{1/2} \quad (\text{metros})$$

Substituyendo nuestros valores en estas expresiones.

$$Z_g = 2 \times 10 = 4.472$$

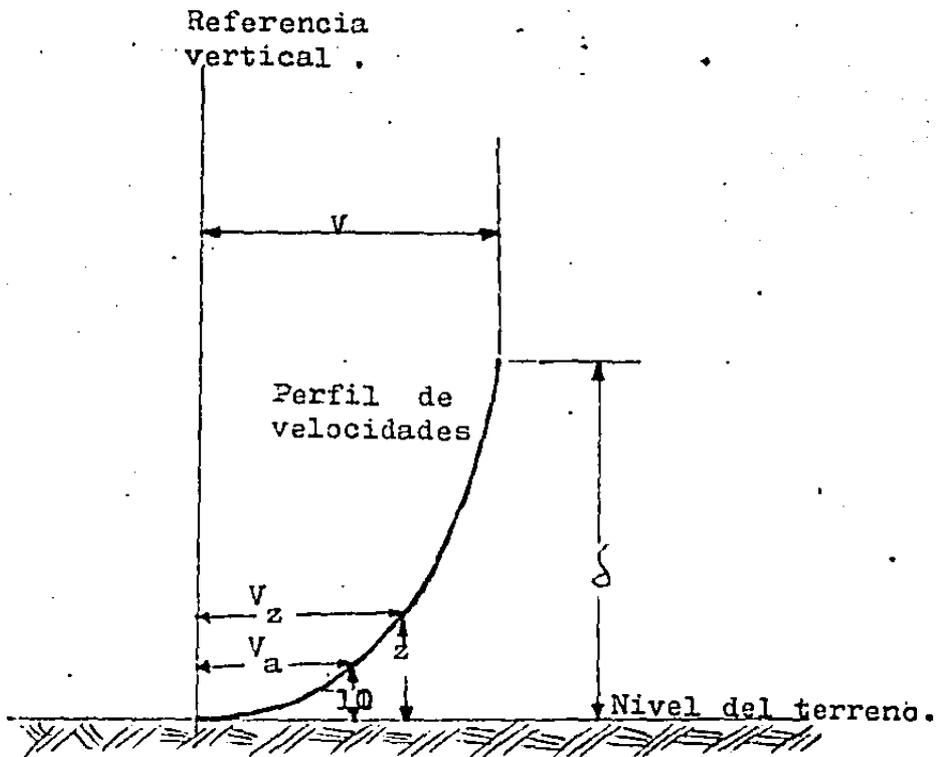
$$\alpha_p = \frac{1}{\ln\left(\frac{4.472}{0.1}\right)} - \left[\frac{0.088}{1 - 0.088 \ln\left(\frac{2}{10}\right)} \right] \ln\left(\frac{6.8}{6}\right) = 0.25$$

$$V_{10} = 6.8 \left(\frac{10}{2}\right)^{0.25} = 10.1684$$

$$P = \left(\frac{16}{10}\right) (0.5)(1.225)(1)(10.1684)^3 = 381.61 \text{ watts/m}^2$$

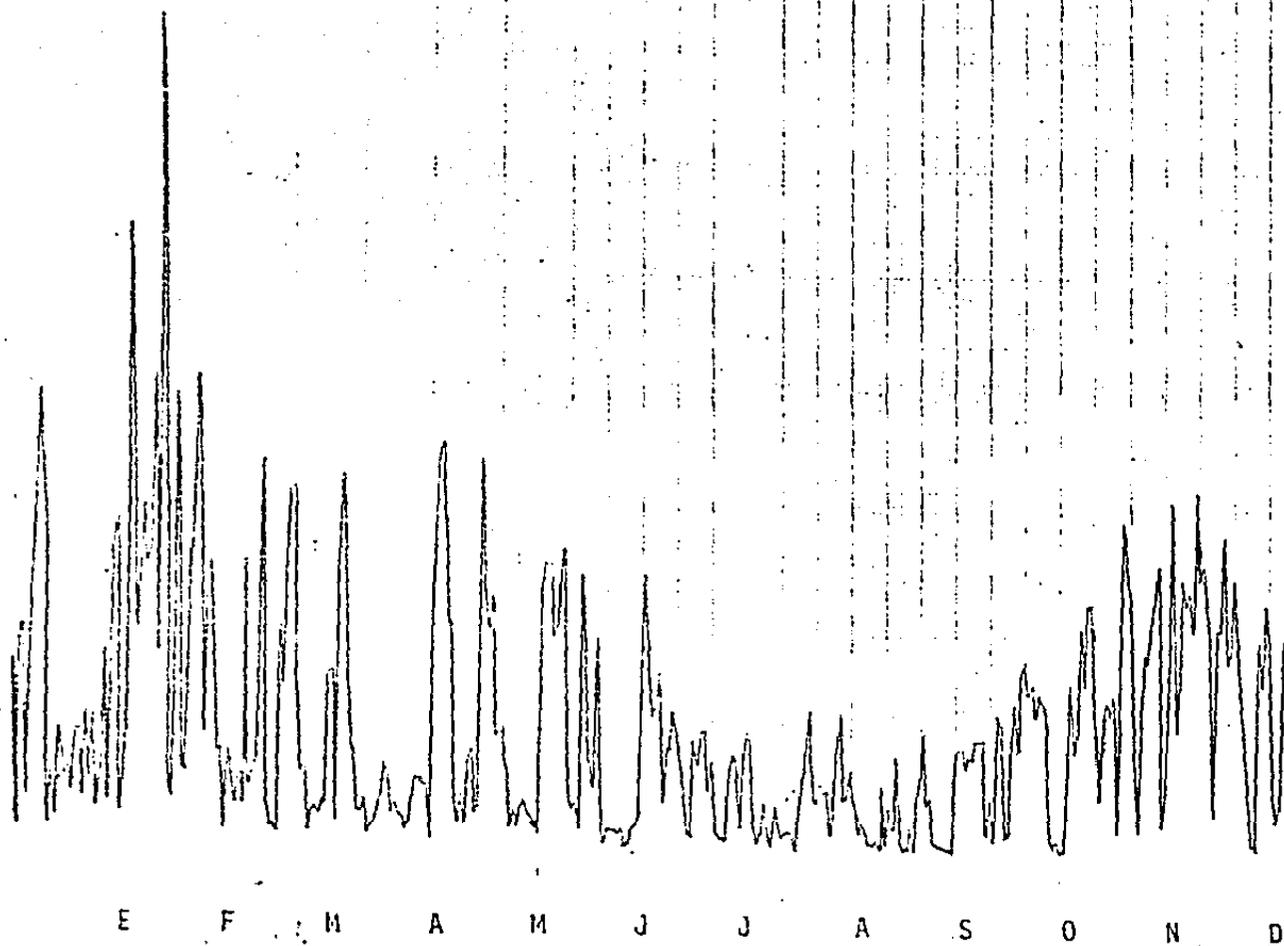
O sea que la energía total disponible en un año, solamente: $381.61 \times 365 \text{ días} \times 24 \text{ hrs} \times 0.595 (\%) = 1.989 \text{ Mega-}$

VARIACION DE LA VELOCIDAD DEL VIENTO CON LA ALTURA.



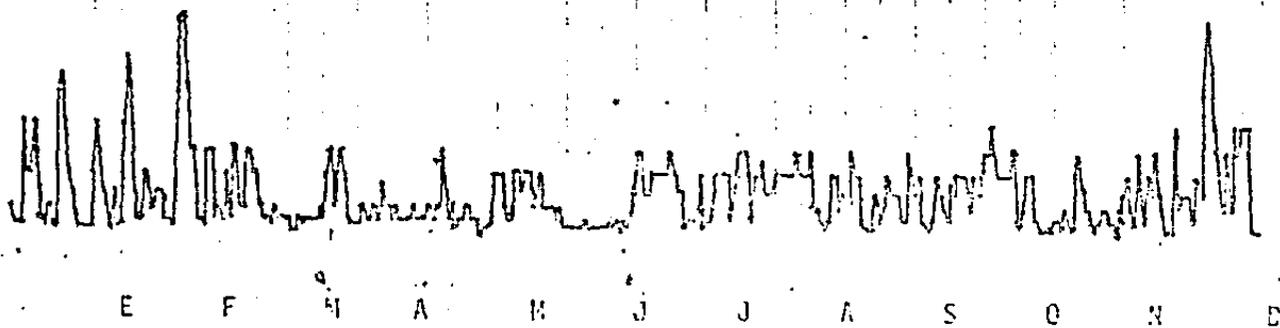
- V .- Velocidad gradiente.
- δ .- Altura gradiente.
- V_z .- Velocidad a la altura z .
- z .- Altura sobre el terreno.
- V_a .- Velocidad básica a 10 metros sobre el terreno.

u/s/m2



Distribución de Potencias. Tehuantepec

— μ^2/m^2



Distribución de Potencias Salina Cruz

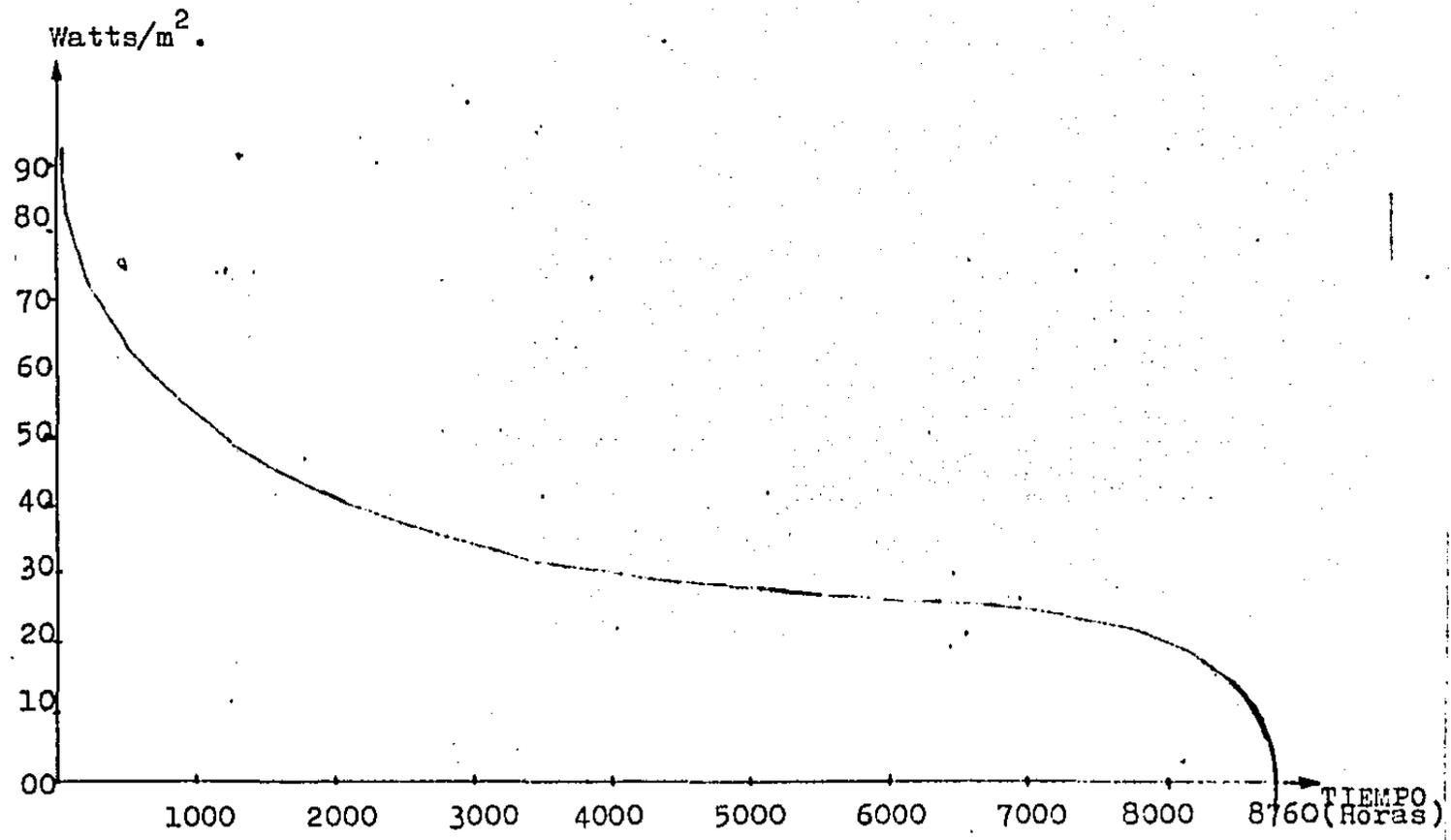
IV.2 EVALUACION DE LA POTENCIA DEL VIENTO EN SITIOS ESPECIFICOS.

De los datos obtenidos desde 1984 hasta el presente en las estaciones anemométricas de Salina Cruz, Tehuantepec, La Venta, La Ventosa y Unión Hidalgo, se tiene:

SITIO PARAME- TRO.	ENERO	FEB.	MAR.	ABR.	MAY.	JUN.	JUL.	AGOST.	SEPT.	OCT.	NOV.	DIC.	ANUAL.
LA VENTA \bar{V} (m/s)	7.4	6.4	5.8	5.2	4.6	3.1	6.1	5.5	5.1	6.4	8.1	7.7	5.9
TCSA. \bar{V} (m/s)	3.9	3.6	3.4	3.2	2.4	1.9	2.5	2.7	2.3	2.6	3.0	2.9	3.4
P (W/m ²)													125.8
E (KWH/m ²)													1103.0
F (%)	69.7	60.1	53.4	46.0	39.6	3.7	62.1	53.3	43.2	37.4	54.5	72.9	54.5
TEHUANTEPEC \bar{V} ()	7.1	5.9	5.4	6.9	4.1	2.1	3.0	4.6	4.8	6.0	6.4	7.2	5.3
TEHUANTEPEC \bar{V} ()	3.9	3.5	3.3	3.0	2.3	1.5	2.4	2.4	3.1	2.5	2.2	3.0	3.2
P ()													91.2
E ()													799.0
F ()	67.0	54.5	42.5	71.5	31.3	3.6	17.9	39.6	40.2	53.7	65.9	67.2	47.2
SALINA CRUZ \bar{V} ()	8.2	7.9	7.4	6.4	4.3	3.0	5.3	5.3	5.5	6.0	6.1	7.1	6.0
SALINA CRUZ \bar{V} ()	3.3	3.2	3.1	3.0	2.3	1.9	3.1	2.6	2.7	2.9	2.2	3.2	2.2
P ()													132.43
E ()													1160.0
F ()	92.5	79.6	76.3	71.5	22.9	14.7	59.9	50.9	53.2	60.8	62.1	67.0	60.2
UNION HIDALGO \bar{V} ()	6.9	7.9	5.4	6.4	3.5	1.2	4.4	4.4	4.4	4.3	6.4	6.1	5.0
UNION HIDALGO \bar{V} ()	3.3	3.1	3.3	2.6	2.5	1.2	2.9	2.2	3.0	2.9	2.6	2.2	3.2
P ()													76.6
E ()													671.0
F ()	65.1	74.5	42.5	69.2	23.6	1.5	25.5	26.2	35.5	24.1	22.4	30.1	43.4
LA VENTOSA \bar{V} ()	10.0	10.0	8.7	10.1	6.1	3.0	6.0	7.3	8.5	9.5	10.3	9.5	8.2
LA VENTOSA \bar{V} ()	3.7	4.9	4.2	3.6	2.2	1.3	3.2	3.9	4.3	4.3	4.7	4.5	4.1
P ()													337.7
E ()													2960.0
F ()	121.3	222.5	79.2	121.2	41.7	3.2	62.1	62.9	70.9	62.5	27.1	93.5	73.2

70	10.0	10.0	9.7	10.1	9.1	9.7	9.9	7.3	8.6	9.5	10.3	9.5	8.2
71	3.7	4.0	4.2	4.6	3.5	1.6	3.8	3.9	4.3	4.5	4.7	4.5	4.1
72													337.7
73													2960.0
74	91.3	80.5	79.2	86.3	84.7	6.3	65.1	63.8	78.6	83.6	87.1	83.5	75.9

CURVA DE DURACION-INTENSIDAD DEL VIENTO EN LA REGION



V COMPORTAMIENTO Y EFICIENCIA DE LOS SISTEMAS CONVERSORES DE ENERGIA EOLICA.

V.I REPRESENTACION MATEMATICA DEL VIENTO.

Para poder determinar el costo de la unidad y de producción de cada watt de potencia , para determinar la viabilidad - técnico-económica de aprovechar la energía eólica en un sitio específico , se simula el comportamiento del sistema - conversor de energía eólica y la potencia producida mensual estacional y anualmente.

Para hacer esta simulación se necesita que el viento se pueda representar por medio de una expresión matemática.

REPRESENTACION MATEMATICA DEL VIENTO

Después de dibujar el histograma de la duración de la velocidad o de la frecuencia del viento, dividiendo las velocidades entre el promedio de velocidad para que sea adimensional. Se busca una función matemática que se aproxime lo mejor posible a dichas curvas, para utilizarse como herramienta para predecir la salida de los aerogeneradores o aerobombas más tarde.

La expresión matemática que más se aproxima a las curvas es la función Weibull, aunque en la mayoría de las veces un caso especial, de la distribución Weibull, llamada distribución Rayleigh es la que más se aproxima.

La distribución Weibull se caracteriza por dos parámetros, el parámetro de forma K (adimensional) y el parámetro de escala C (m/s).

La función distribución acumulativa (probabilidad de que la velocidad del viento V sea menor o igual a una V dada) es:

$$F(v) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{v}{c} \right)^K \right]$$

Y la función probabilidad de densidad (curva de frecuencia de la velocidad) es:

$$f(V) = \frac{dF}{dV} = \frac{K}{c} \left(\frac{V}{c}\right)^{K-1} \exp \left[-\left(\frac{V}{c}\right)^K \right]$$

Con la expresión de la velocidad del viento promedio:

$$\bar{V} = \int_0^{\infty} V \cdot f(v) \cdot dv = (m/s)$$

La velocidad promedio del viento se puede expresar como una función de C y K o viceversa, C es una función de \bar{V} y K. La integral encontrada, sin embargo, no puede ser resuelta, pero puede reducirse a una integral estándar, llamada función Gamma:

Definición de la función Gamma: $\Gamma(x) = \int_0^{\infty} y^{x-1} e^{-y} dy$

con $y = \left(\frac{V}{c}\right)^K$ y $\frac{V}{c} = y^{x-1}$, uno obtiene $x = 1 + \frac{1}{K}$

después de algo de manipulación:

$$V = C \cdot \Gamma\left(1 + \frac{1}{K}\right)$$

Substituyendo esta última ecuación en $F(v)$ y $f(v)$, se tiene:

$$F(v) = 1 - \exp \left[- \Gamma^K \left(1 + \frac{1}{K} \right) \left(\frac{v}{V} \right)^K \right]$$

$$y \quad f(v) = \frac{K}{V} \left(\frac{v}{V} \right)^{K-1} \Gamma^K \left(1 + \frac{1}{K} \right) \exp \left[- \Gamma^K \left(1 + \frac{1}{K} \right) \left(\frac{v}{V} \right)^K \right]$$

Como ya se dijo antes, la distribución Rayleigh es un caso especial de la distribución Weibull, cuando $K = 2$. En este caso las anteriores expresiones se reducen:

$$\Gamma^2 \left(1 + 1/2 \right) = \frac{\pi}{4}$$

$$F(v) = 1 - \exp \left[- \frac{\pi}{4} \left(\frac{v}{V} \right)^2 \right]$$

$$y \quad f(v) = \frac{\pi}{2} \frac{v}{V^2} \exp \left[- \frac{\pi}{4} \left(\frac{v}{V} \right)^2 \right]$$

También se puede aproximar la función Gamma por la expresión:

$$G = 0.568 + \frac{0.434}{K}$$

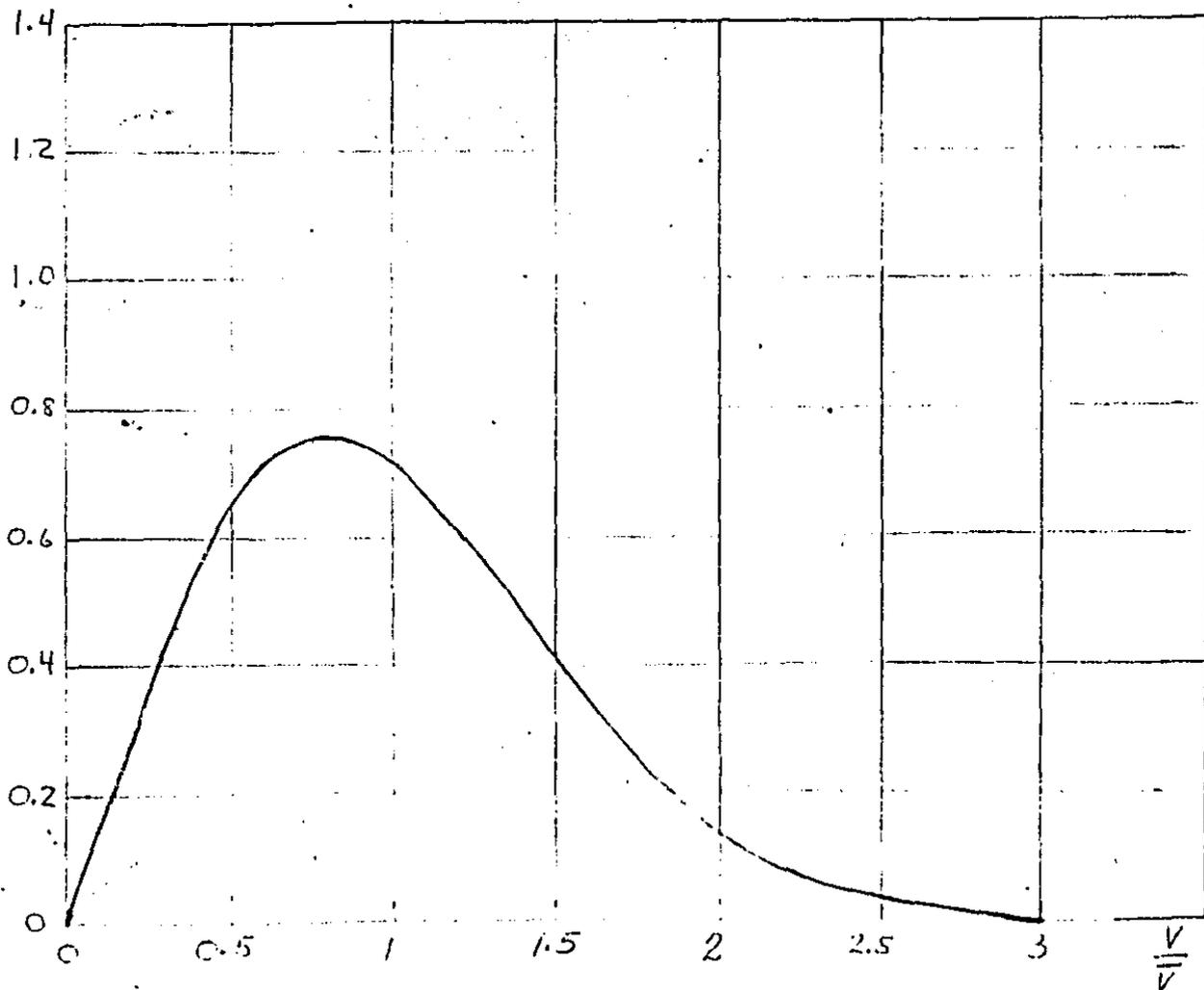
Esta aproximación está dentro del 0.22% para valores de K entre 1 y 4.

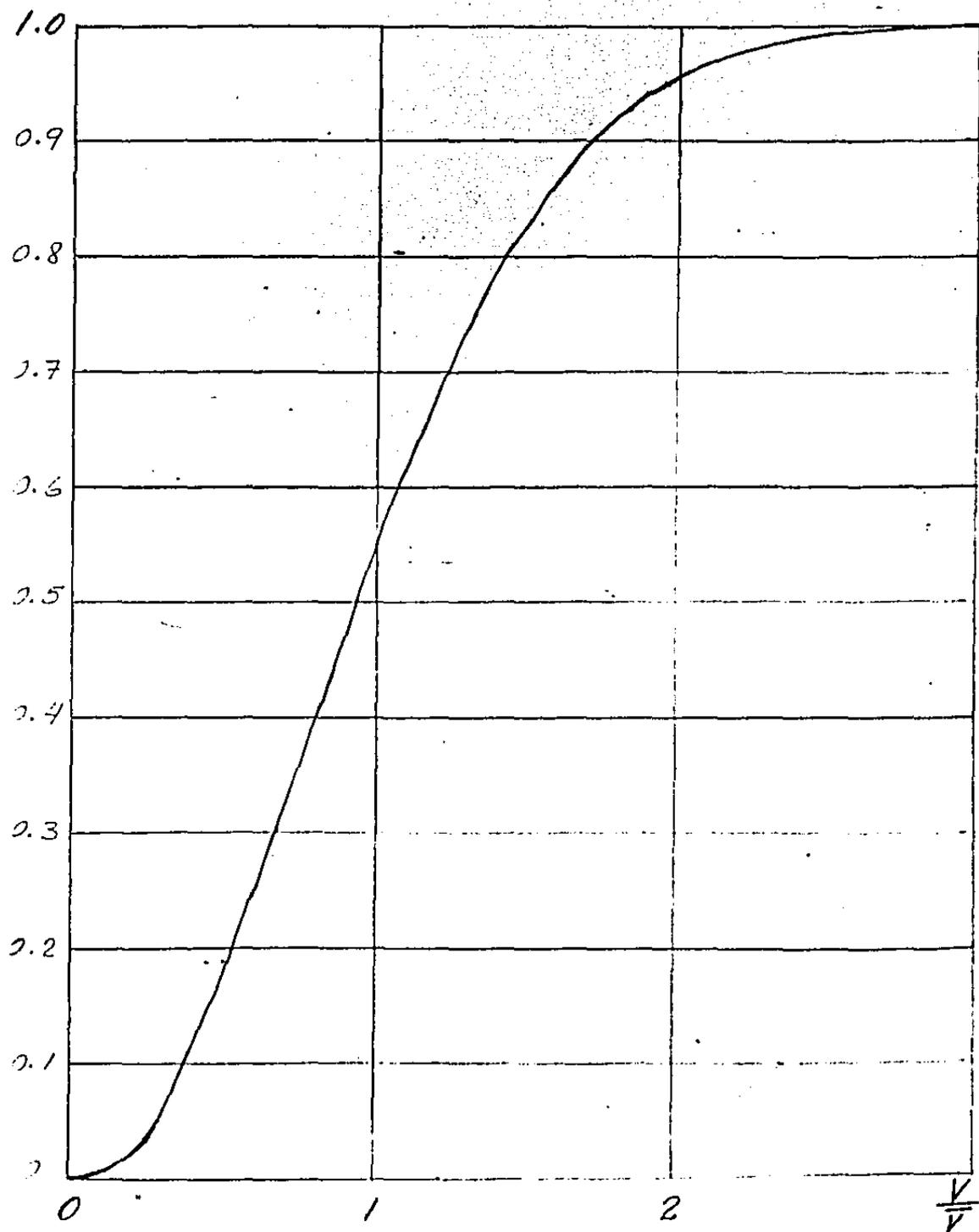
En general, la forma de la curva para vientos polares se adapta con $K = 1$, para vientos marítimos con $K = 4$ y para

vientos terrestres tradicionales con $K = 2$. Para el Istmo:

$$K = \frac{2.5 + 1.8 + 1.7 + 2.3 + 1.6 + 2.1}{6} = \frac{12}{6} = 2 \text{ (Distribución de Rayleigh).}$$

$f(\frac{V}{V})$



$F(\frac{v}{V})$ 

V.2 ECUACIONES DE POTENCIA Y ENERGIA.

V.2.1 POTENCIA TEORICA.

De las ecuaciones para:

La energía cinética de una masa en movimiento

$$E.C. = \frac{1}{2} m v^2 .$$

Y la masa de un fluido que atraviesa un área

$$m = A \rho V t .$$

Substituyendo la última ecuación en la anterior , tenemos

$$E = \frac{1}{2} A \rho V t v^2 = \frac{1}{2} A \rho t v^3 .$$

$$\text{Potencia} = \frac{E}{t} = \frac{1}{2} A \rho v^3 .$$

$$\text{Densidad de potencia} = P = \frac{\text{Potencia}}{\text{Area}} = \frac{1}{2} \rho v^3 .$$

Si $\rho = \text{Kg/m}^3$ y $v = \text{m/s}$, entonces

$$P = \text{watts/m}^2 .$$

V.2.2 POTENCIA DEL VIENTO.

Para el Istmo, se puede considerar $\rho = 1.225 \text{ Kg/m}^3$

$$P = 0.5 v^3 1.225 = 0.3125 v^3 = \text{watts/m}^2 .$$

Densidad media de potencia \bar{P} .

$$\bar{P} = \frac{1}{2} \rho (f_0 v_0^3 + f_1 v_1^3 + \dots + f_n v_n^3)$$

donde $f_0, f_1, f_2, \dots, f_n$ son las fracciones de t en las que hubo $v_0, v_1, v_2, \dots, v_n$ o sea que :

$$\sum_{i=0}^n f_i = 1.0$$

V.2.3 CUANTIFICACION DE LA ENERGIA.

Siendo la velocidad media $\bar{v} = f_0 v_0 + f_1 v_1 + \dots + f_n v_n$, entonces la energía del viento E es :

$$E = \frac{1}{2} \rho (f_0' v_0^3 + f_1' v_1^3 + \dots + f_n' v_n^3) = \text{watt-hora/m}^2.$$

donde f_0', \dots, f_n' es el intervalo en horas que hubo vientos con velocidades v_0, \dots, v_n (se incluyen las calmas v_0).

V.2.4 VELOCIDAD EQUIVALENTE Y FACTOR DE FORMA.

Con la densidad media de potencia \bar{P}

$$\bar{P} = \frac{1}{2} \rho \sum_{i=0}^n v_i^3 f_i = 0.5 \rho \bar{v}_e^3$$

donde \bar{v}_e es la velocidad equivalente para la potencia media

$$\bar{v}_e^3 = f_0 v_0^3 + \dots + f_n v_n^3 \quad y$$

$$\bar{v} = f_0 v_0 + \dots + f_n v_n$$

El factor de forma K' es :

$$K' = \frac{\bar{v}_e}{\bar{v}} > 1$$

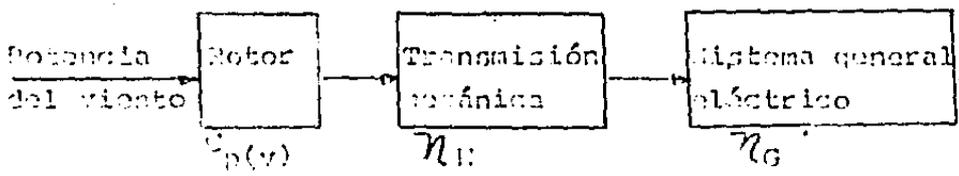
El factor de patrón de energía K_E es :

$$K_E = \frac{v_E}{\bar{v}^3} \quad \text{o} \quad K_E = \frac{\bar{v}_e^3}{\bar{v}^3}$$

Incluyendo estos factores en la ecuación de la densidad media de potencia \bar{P} , se tiene :

$$\bar{P} = \frac{1}{2} \rho (K' \bar{v})^3 \quad \text{o} \quad \bar{P} = \frac{1}{2} \rho K_E \bar{v}^3$$

V.2.5 EFICIENCIA TOTAL DE CONVERSIÓN η_T .



De la potencia teórica del viento

$$P = \frac{1}{2} \rho v^3 \quad \text{con} \quad \rho = 1.25$$

$$P_v = 0.6125 v^3 = \text{watts/m}^2$$

La potencia de la flecha de un rotor es :

$$P_{\text{flecha}} = 0.5 \rho v^3 \quad \text{para un rotor ideal } C_p = 16/27$$

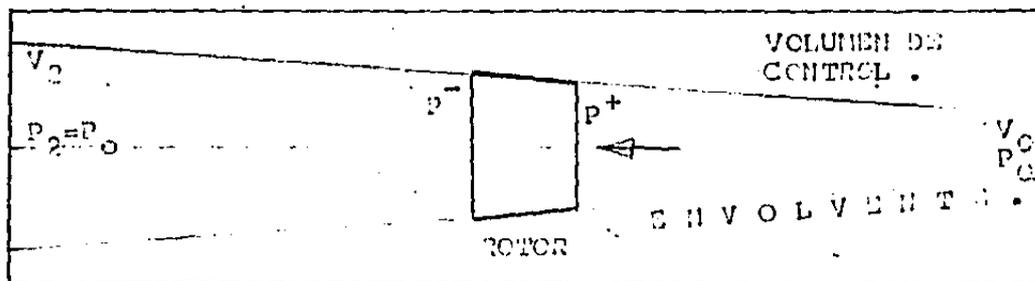
$$P_{\text{flecha rotor ideal}} = 0.34 v^3$$

La eficiencia total de conversión η_T es :

$$\eta_T = C_p(v) \eta_M \eta_G \quad \text{y} \\ P = 0.125 \eta_T v^3 \text{ watts/m}^2$$

V.2.6 POTENCIA MECÁNICA TRANSFERIDA A UN ROTOR IDEAL POR UN FLUJO UNIFORME DE VIENTO.

Considerando un experimento con flujo uniforme de aire, las aspas del rotor no tienen arrastre por fricción con el aire, el flujo que pasa a través del rotor está separado del resto, las presiones estáticas dentro, fuera, antes, después y lejos del rotor son iguales y no se le da rotación al flujo.



Aplicando el teorema de momentos:

$T =$ momento en el flujo de entrada - momento en el flujo de salida.

donde $m =$ flujo de masa / t.

$$T = mV_0 - mV_2$$

$$T = m(V_0 - V_2)$$

$$T = \rho AV(V_0 - V_2).$$

Partiendo de las presiones:

$$\text{momento} = F \cdot A = (P^+ - P^-) \cdot A$$

Aplicando la ecuación de Bernoulli al flujo de corriente abajo:

$$\frac{1}{2} \rho V_2^2 + P_+ = \frac{1}{2} \rho V_0^2 + P^-$$

Aplicando la ecuación de Bernoulli al flujo de corriente arriba:

$$(1/2)\rho v_0^2 + P_0 = (1/2)\rho v_2^2 + P^+ .$$

Restando estas dos últimas expresiones matemáticas entre sí :

$$P^+ - P^- = 0.5 \rho (v_0^2 - v_2^2)$$

Substituyendo en $T = A (P^+ - P^-)$

$$T = A (0.5 \rho (v_0^2 - v_2^2))$$

$$T = 0.5 A \rho (v_0^2 - v_2^2)$$

Igualando con

$$T = \rho A V (v_0 - v_2)$$

$$0.5 \rho (v_0^2 - v_2^2) = \rho A V (v_0 - v_2)$$

$$\therefore V = \frac{v_0 + v_2}{2}$$

O sea que la velocidad a través de la turbina es el promedio de las velocidades antes y después .

Definiendo el factor de interferencia como $V = v_0 (1 - a)$

e igualando :

$$V = v_0 (1 - a) = \frac{v_0 + v_2}{2}$$

$$\therefore a = 1 - \frac{v_0 + v_2}{2 v_0}$$

De la última expresión, cuando $v_2 = 0$, el rotor absorbe toda la energía y el factor de interferencia será máximo, o sea de 0.5

Como $P = \text{cambio de energía cinética} = m \Delta EC.$

$$P = \rho AV \left(\frac{v_0^2}{2} - \frac{v_2^2}{2} \right) = 0.5 \rho AV^3 \cdot 4a(1-a) \therefore$$

$$P = 2 \rho AV_0^3 a (1-a)^2$$

Como la potencia máxima se obtiene cuando la $dP/da = 0$, entonces

$$\frac{dP}{da} = 2 \rho AV_0^3 (1-4a + 3a^2) = 0 \therefore$$

$$a_1 = 1 \text{ y } a_2 = \frac{1}{3}$$

$$\text{Substituyendo en } P = 2 \rho AV_0^3 a (1-a)^2$$

$$P_{a1} = 0$$

$$P_{a2} = P_{\text{máx.}} = \frac{16}{27} (0.5 \rho V_0^3) = C_{P_{\text{máx.}}} \cdot 0.5 \rho V_0^3$$

Los coeficientes de potencia C_p de un sistema real son menores de $16/27$, las pérdidas se atribuyen al movimiento rotacional dado al flujo y a la fricción de las aspas contra el flujo.

El coeficiente de potencia depende del rotor y varía con la razón de la velocidad tangencial λ .

$$\lambda = \frac{\text{Velocidad de la punta}}{\text{Velocidad del viento}}$$

$P_{\text{máx.}}$ se alcanza con un λ característico de cada rotor.

λ	VELOCIDAD DEL ROTOR	$C_{p_{\text{máx.}}}$	SOLIDOS
< 4	BAJA	0.30	PLANO
≥ 4	ALTA	0.45	CONVEXA

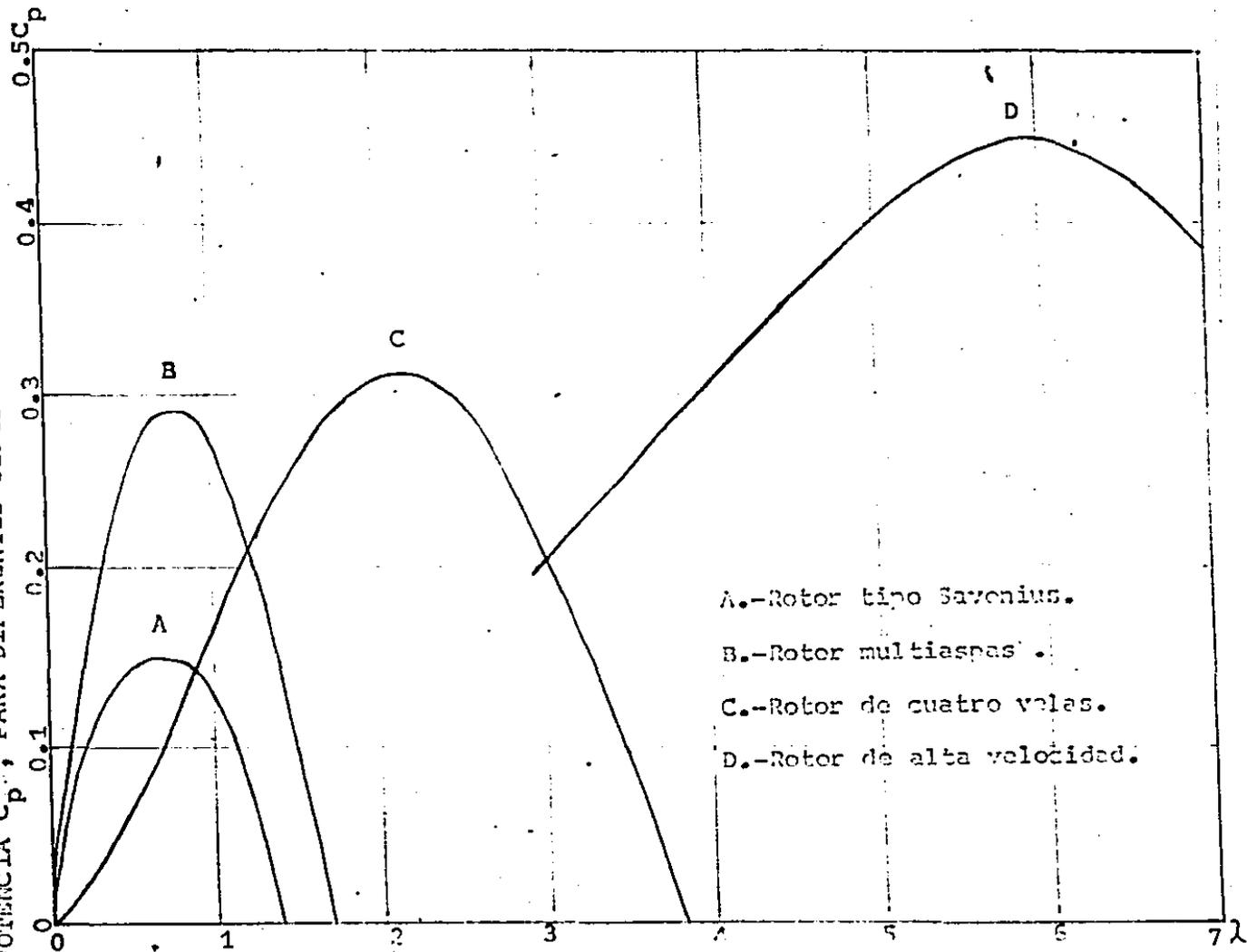
$$\text{Sólidos} = \frac{\text{Área de las aspas}}{\text{Área barrida}}$$

El rotor puede ser de velocidad angular constante o variar con la velocidad del viento , así se tienen dos funciones de $C_p(v)$.
Si la velocidad de la flecha es constante , entonces C_p y λ varían.

Si la velocidad de la flecha varía , entonces λ es constante.

RELACION DE LA RAZON DE VELOCIDAD TRUIGENCIAL λ Y DEL COEFICIEN

T: D: POTENCIA C_p , PARA DIFERENTES TIPOS DE ROTORES .



A.-Rotor tipo Savonius.

B.-Rotor multiaspas.

C.-Rotor de cuatro velas.

D.-Rotor de alta velocidad.

V.3 SISTEMAS CONVRSORES COMERCIALES DE ENERGIA EOLICA.

V.3.1 SISTEMAS COMERCIALES DE BOMBEO POR ENERGIA EOLICA.

El tipo de conversor eólico más conocido y empleado, es el multi aspas tipo americano, propio para el bombeo, con potencias de 5 a 60 Kilowatts, emplea una bomba rotatoria de baja velocidad o una bomba reciprocante de desplazamiento positivo.

El Instituto de Investigaciones Eléctricas IIE, ha estado experimentando con un prototipo de aerobomba VITA/IIE, con las características siguientes:

- a).- Eje horizontal, rotor de 10 metros de diámetro y orientación con timón de cola.
- b).- Tres aspauelas de aluminio extruido de tela de nylon.
- c).- Transmisión tipo biela/manivela con variador de desplazamiento accionado por la presión del viento sobre el rotor.
- d).- Bomba reciprocante de doble efecto con fugas controladas para facilitar arranques en vientos ligeros.
- e).- Torre de 10 metros .
- f).- Operación.- $2m/s < V_n < 5m/s$.
- g).- Potencia.- 3.1 Kilowatts al nivel del mar.
- h).- Gasto.- 4.35 litros/segundo a 20.5 metros de elevación.

Comercialmente existen aerobombas, tanto en el país como en el extranjero, con las mismas características en cuanto a capacidad medida y potencia.

De los datos que se tienen de las aerobombas, surge la necesidad

de desarrollar una aerobomba que este de acuerdo a las condicio
nes meteorológicas del Istmo.

En seguida se dan los datos de aerobombas de:

DUNPSTER INDUSTRIES INC.

Beatrice, Nebraska 68310.

Po Box 843.

BRONKHORST BRADEN INDUSTRIES INC.

200 S Dalia St. Broken.

Arrow, Ok 73012.

INGENIOS DE VEINTOS, S.A. (REVIERA).

Calle 53 # 1.

A.P. 724.

Chihuahua, Chich.

INDUSTRIAS DE ALICATE S.A. DE C.V.

Polisardo Miranda Guajardo.

Aldago 110, Comalapa.

Apodaca, Nuevo León.

Modelo	5	8	10	12	14	ING
OTRILL	0.25	0.33	0.53	0.75	1.0	HP.

CAPACIDAD DE BOMBEO " MOVISA " .

DIAMETRO DEL CILINDRO		ALTURA EN METROS A QUE PUEDE ELEVARSE EL AGUA.					
KILIMETROS	PULGADAS	CANTIDAD DE ALABES DEL MOLINO					
		6	8	10	12	14	16
44.5	1 3/4	45	60	90	135	190	315
47.6	1 7/8	40	57	85	127	180	290
50.8	2	33	47	70	110	155	250
57.2	2 1/4	28	39	56	90	125	200
60.3	2 3/8	24	36	52	80	115	180
63.5	2 1/2	21	32	46	75	100	170
69.9	2 3/4	19	28	40	65	95	145
73.0	2 7/8	17	25	37	58	90	125
76.2	3	15	23	34	52	75	115
82.6	3 1/4	--	--	30	45	60	100
88.9	3 1/2	13	19	25	40	55	90
95.3	3 3/4	--	--	22	35	50	75
98.4	3 7/8	11	15	21	30	45	70
101.6	4	10	13	19	28	40	65

V.3.3 La característica general de estas unidades fabricadas son:

- 1.- El modelo Americano Multiaspas.
- 2.- Las mismas medidas del rotor: 6, 8, 10, 12 y 14 pies
- 3.- Las mismas velocidades de diseños
- 4.- Las mismas capacidades de bombeo, elevaciones, gastos y potencias.
- 5.- El mismo funcionamiento de bombeo (convierten a la energía del viento en potencia mecánica).
- 6.- No están pensados para generar electricidad
- 7.- Son para bombeos locales, es decir, bombeo in situ.

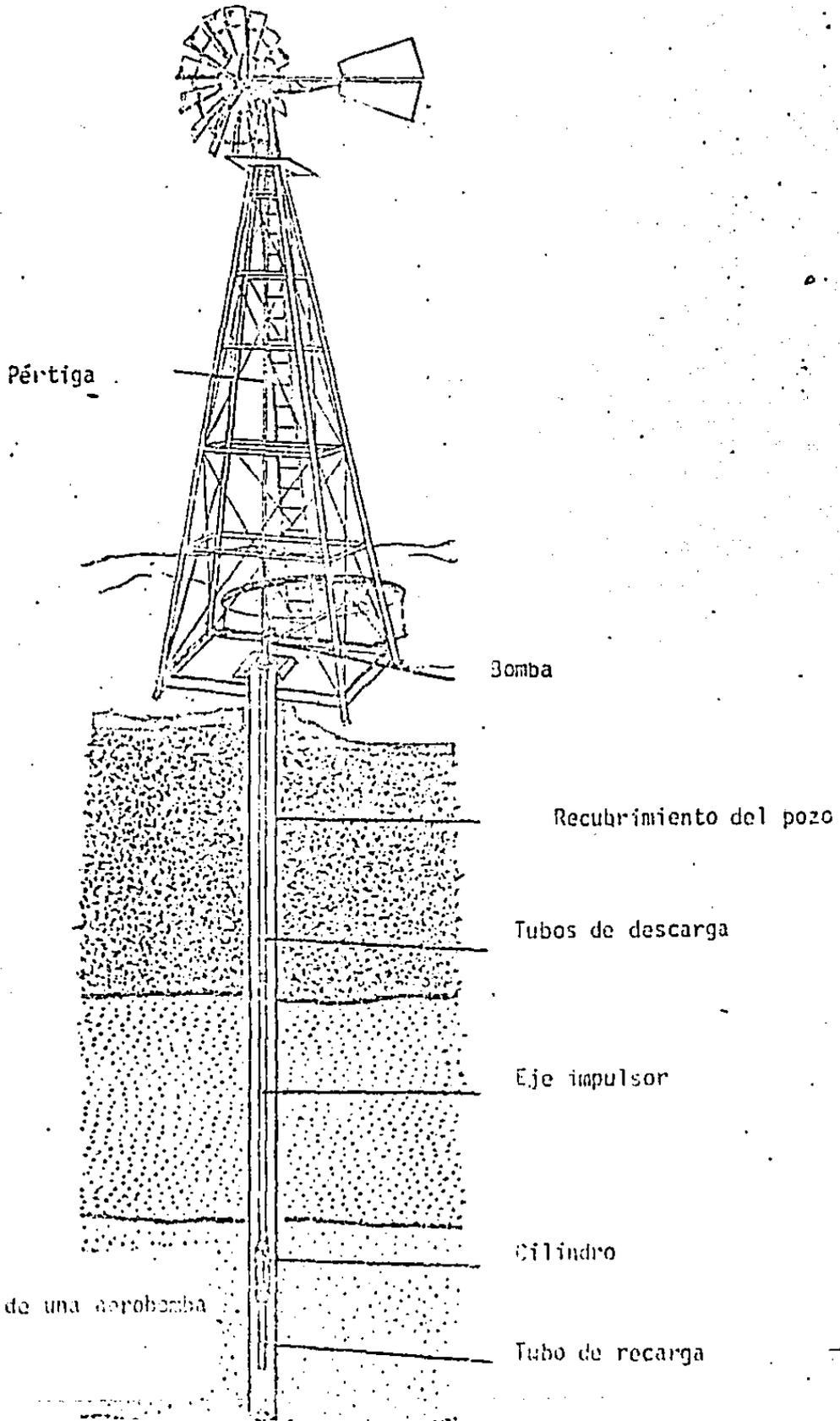
V.3.4.- ESPECIFICACIONES

Las especificaciones de los molinos, por medida del rotor, son:

Medida (pies)	Combinación de engranes	carrera (m).	No. de volantes o aspas	Peso(Kg.)
6	4 a 1	1.52	15	113.5
8	3 1/3 a 1	1.7 y 2.3	15	169.3
10	3 a 1	1.7 y 2.3	24	231.5
12	3 a 1	2.4,3.1,3.7	18	534.8
14	3 a 1	2.4,3.1,3.7	13	658.3

Por capacidad de bombeo:

Medida del Cilindro (cm)	5'		8'		10'		12'		14'	
	Elev. (m)	Gasto (Lt/seg)								
4.2	36.6	0.121	52.4	0.132	78.0	0.147	118.3	0.190	176.8	0.167
5.1	23.9	0.137	41.1	0.205	64.0	0.167	92.7	0.217	133.7	0.135
5.7	22.9	0.174	32.6	0.261	50.3	0.212	73.2	0.273	109.8	0.233
6.3	18.9	0.217	27.1	0.320	41.8	0.261	71.0	0.339	91.4	0.290
7.0	16.5	0.261	23.5	0.339	36.3	0.315	52.8	0.410	79.2	0.351
7.6	13.7	0.309	19.8	0.463	31.1	0.375	44.8	0.437	67.1	0.416
8.3	11.9	0.354	16.8	0.594	26.2	0.440	38.1	0.572	57.0	0.479
8.9	10.4	0.421	14.6	0.631	22.9	0.512	33.0	0.662	49.4	0.568
9.5	8.8	0.481	12.8	0.723	19.8	0.587	28.7	0.761	43.3	0.652
10.2	7.9	0.549	11.3	0.820	17.4	0.666	25.3	0.864	37.3	0.742



Dibujo de una aerobomba representativa

V.4 DISEÑO DEL ROTOR.

V.4.1 PASOS PARA EL DISEÑO DEL ROTOR HORIZONTAL.

PASO # 1.-Selección de parámetros básicos.

R = Radio del rotor.

λ_d = Relación de velocidad de punta de diseño.

D = Número de hojas.

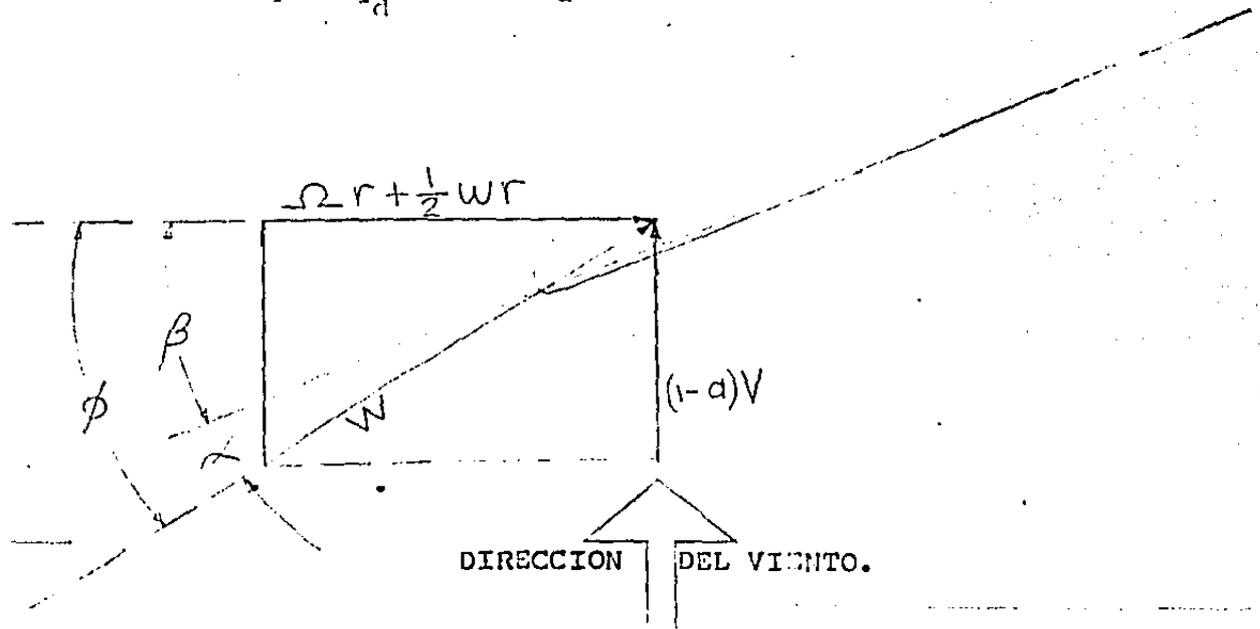
C_{1d} = Coeficiente de elevación de diseño de la hoja.

α_d = Angulo de ataque de la hoja.

PASO # 2.-Cálculo de los valores del ancho c de la hoja, manteniendo el ángulo β de la hoja en varias posiciones a lo largo de la hoja.

V.4.2 CÁLCULO PARA EL ROTOR EN SITUACIÓN DE DISEÑO :

λ_d , C_{1d} y α_d .



El radio del rotor deberá calcularse con la energía requerida de salida E en un año o en el mes más crítico, dado el promedio local de velocidad de viento \bar{V} y su distribución.

Un rotor extrae potencia del aire , por la oposición que le hace (esta oposición no debe ser mucha , ni poca) . Estando parado no produce potencia . Girando a muy altas revoluciones el aire es bloqueado y tampoco se extrae potencia . Entre estos dos extremos , existe una velocidad de extracción máxima de potencia.

Una aproximación simple para el bombeo de agua es :

$$E = K\pi R^2 \bar{V} T \quad E = \text{watt-hora.}$$

Donde : E = Energía.

R = Radio del rotor.

\bar{V} = Velocidad promedio y

T = Período dado en horas.

$$P_{\text{hidráulica}} = K\bar{V}^3 = \text{watts.}$$

Donde : $P_{\text{hidráulica}}$ = Potencia hidráulica y K es :

K	DESCR.
0.10	Bomba.
0.20	Aerogenerador pequeño.
0.25	Aerogenerador grande.

Estas expresiones son ciertas para :

\bar{V} = Velocidad promedio del viento.

El flujo de agua bombeada a una altura H (en metros) es :

$$Q = \frac{P_{hid}}{\rho g H} = m^3/s.$$

Donde : $\rho = 1.225 \text{ Kg/m}^3$.

$$g = 9.81 \text{ m / s}^2.$$

$$Q = P_{hid} / gH = \text{litros/ segundo}.$$

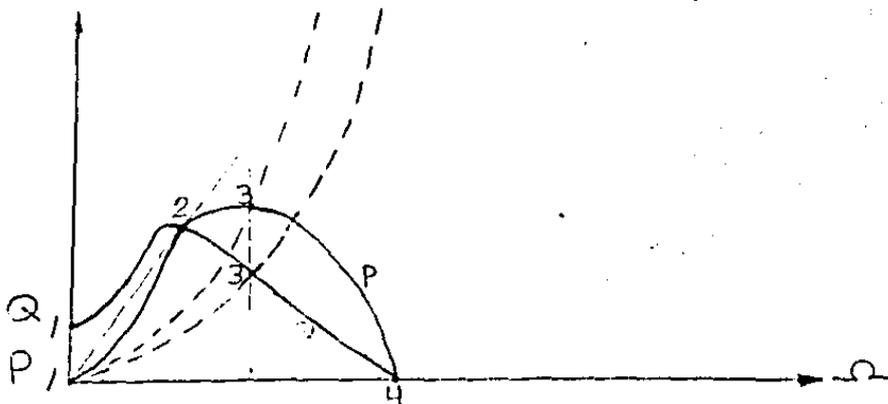
Para el acoplamiento del rotor con una bomba de torque (par) constante .

$$P = Q \Omega.$$

Donde : P = Potencia en watts.

Q = Par en Newton-metro.

Ω = Velocidad rotacional en radianes/segundo.



Debido a que el grupo de curvas varía en V, R y ρ; La P, el T y la V se vuelven adimensionales con las expresiones siguientes:

Coef. de Potencia C_p = $\frac{P}{1/2 \rho A V^3}$

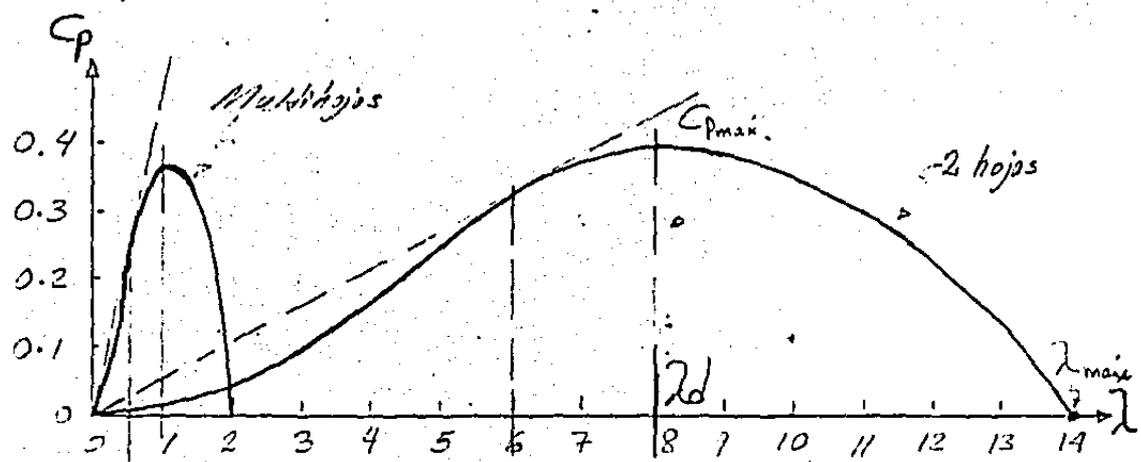
Coef. de Par C_Q = $\frac{Q}{1/2 \rho A V^2 R}$

Razón de vel. de punta λ = $\frac{\omega R}{V}$

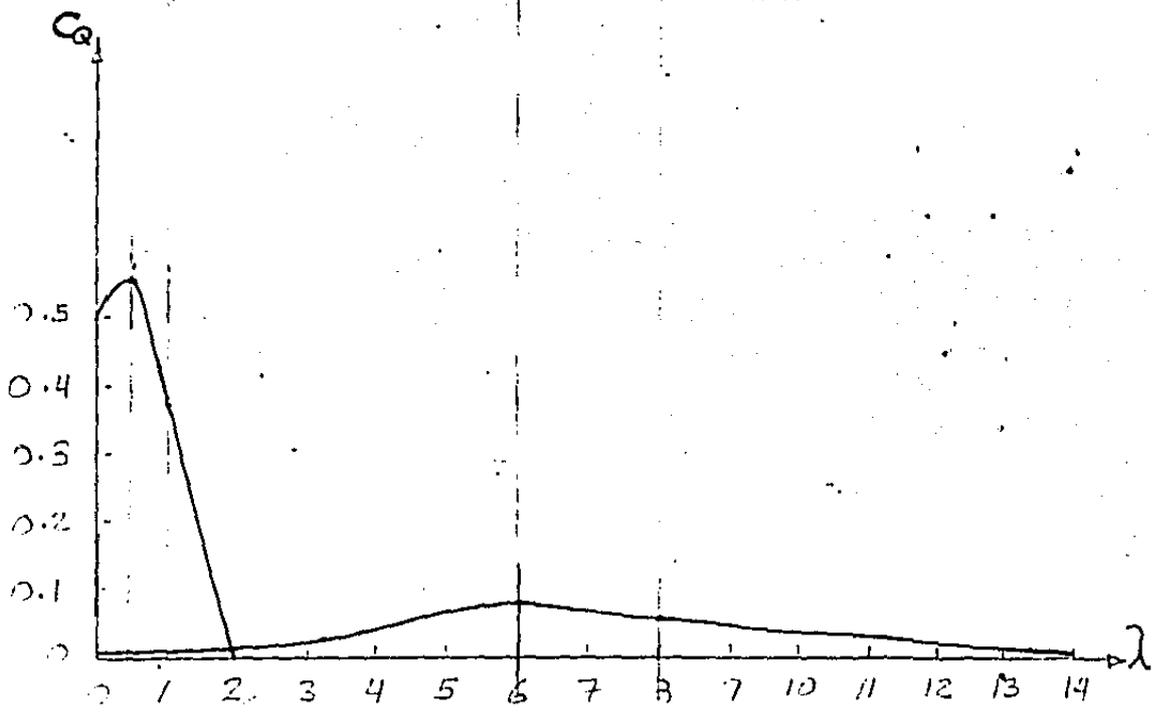
Subst. en P = Q ω

C_p = C_Q λ

Asi las variaciones del rotor, en dimensiones y a diferentes velocidades, se reduce a 2 curvas C_p-λ y C_Q-λ.



$$C_{p_{max.}} = \lambda d.$$



La selección de λ_d y B se hace de acuerdo a lo siguiente:

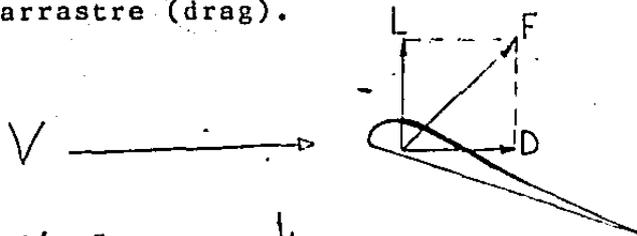
El tipo de carga determinará λ_d .

CARGA	λ_d
Bomba de agua	1 - 2
Generador eléctrico	4 - 10

λ_d	B
1	6 - 20
2	4 - 12
3	3 - 6
4	2 - 4
5 - 3	2 - 3
7 - 15	1 - 2

Fórmula empírica. - $C_{Q_{start}} = \frac{0.5}{\lambda^2}$

Sección transversal de la hoja : Elevación (lift) y arrastre (drag).



Coef. de elevación $C_l = \frac{L}{1/2 \rho V^2 A}$

A = Area de la hoja proyectada (cuerda x long = m²)

Coef. de arrastre $C_d = \frac{D}{1/2 \rho V^2 A}$

α = Angulo de ataque. - Es el ángulo entre la dirección de la velocidad del viento y la línea de referencia de la sección de la hoja.

Los valores C_p y C_d varían con la vel. y viscosidad del viento.

$$Re = \frac{Vc}{\nu}$$

V = vel. del viento

c = cuerda de la sección transversal

ν = viscosidad cinemática del fluido

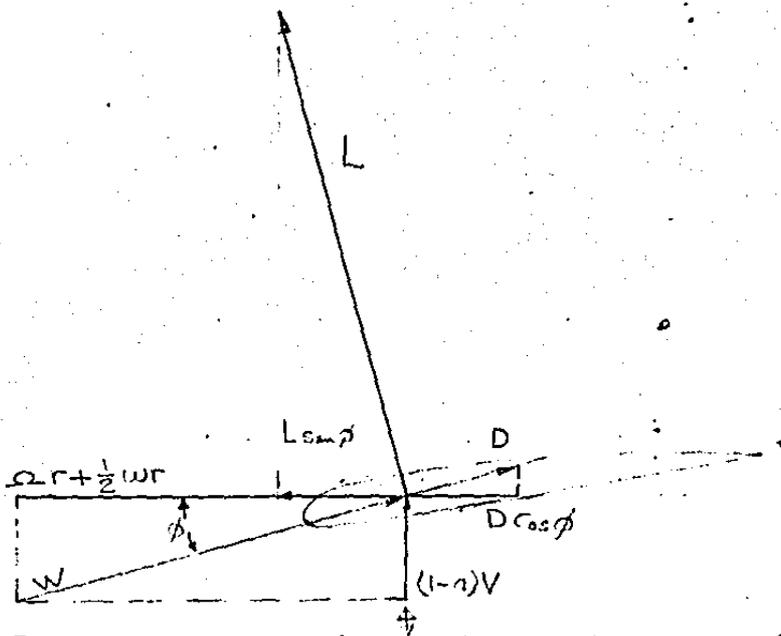
$\nu = 15 \times 10^{-6} \frac{m^2}{s}$ aire a 20°C

La tangente para la curva $c_p - c_d$, desde el origen, indica el ángulo de ataque con la relación mínima $\frac{C_d}{C_p}$. (Esta relación determina el coeficiente de potencia máxima que se puede alcanzar, a relación de vel. de punta alta).

7.4.3. - Valores típicos de la razón arrastre/elevación $\frac{C_d}{C_l}$ y de α y C_p para diferentes secciones transversales de hojas.

Sección transversal de la hoja (airfoils)	$\frac{C_d}{C_l}$	α	C_p	C_d	(2 a 12 aspas) C_Q max.
Plana	0.10	5°	0.80	0.125	0.33 0.38
Curva (10%)	0.02	3°	1.25	0.016	
Curva con tubo del lado cóncavo	0.03	4°	1.10	0.027	
Curva con tubo/lado convexo	0.20	14°	1.25	0.160	0.23 0.29
NACA 4412	0.01	4°	0.80	0.013	0.50 0.53
	0.05				0.40 0.45

La velocidad aparente del viento W , es la suma vectorial de una componente en la dirección del viento y una comp. en el plano del rotor.



Fuerza de elevación = Fuerza de impulsión (driving)

del rotor = $L \sin \phi$.

Fuerza de arrastre del rotor = $D \cos \phi$

Para $\Omega = \text{cte.}$ $|L \sin \phi| = |D \cos \phi|$

COEFICIENTE DE POTENCIA MAXIMA. $C_{p\text{máx.}}$

Para un rotor ideal $C_{p\text{máx.}} = \frac{16}{27} = 0.5926$

En la realidad este factor se reduce por:

- A) La rotación del aire alrededor del rotor
- B) Hay número finito de hojas
- C) $C_d/C_p \neq 0$
- D) Imperfecciones de acabado de la hoja.

Las cuatro fórmulas siguientes describen la información requerida sobre β y c :

$$\text{Ancho de la hoja} = c = \frac{8\pi r}{\sigma_1 d} (1 - \cos \vartheta)$$

$$\text{Angulo de sosten de la hoja} = \beta = \vartheta - \alpha$$

$$\text{Angulo del flujo aparente} = \vartheta = \frac{2}{3} \text{Arc.Tang.} \frac{1}{\lambda r}$$

$$\text{Velocidad de diseño local} = \lambda_{r_d} = \lambda_d \cdot \frac{r}{R}$$

CAPITULO VI .

CALCULO DE CONVERTIDORES EOLICOS .

VI.1.-AIRECIBIDA.

VI.1.1.-Gasto requerido .

De acuerdo al documento de la INRH "Proyectos de Zonas de riego. México 1971", se necesitan un gasto de 70 litros de agua por minuto para usos domésticos de abrevadero y de riego limitado, para una granja de 30 hectáreas; este gasto es necesario por 2 horas durante el día .

$$Q = \frac{70 \text{ litros}}{\text{minuto}} = \frac{1 \text{ minuto}}{60 \text{ seg.}} = 1.17 \text{ litros/segundo.}$$

VI.1.2.-Potencia hidráulica.

$$P = \frac{\rho \cdot g \cdot Q \cdot H}{\eta} = \frac{9.81 \cdot \sqrt[3]{\frac{1}{3}}}{0.8} = \left(\frac{1}{3} \right)$$

donde :

\bar{V} = Promedio de velocidad en los meses de mayor requerimiento de agua

g = Gravedad (9.81 m/s)

H = Altura de bombeo (m)

$Ph.d.$ = Potencia hidráulica (watts) = $0.1 \bar{V}^3 = 47.4552 \text{ watts/m}^2$

Mes	F%	V (m/s)
Enero	71.9	7.8
Dic	74.2	7.8
Prom.	73.05	7.8

VI.1.3.-Radio del rotor.

$$q = \frac{47.4552 \text{ A}}{(9.81)(35)} = 1.17 = 0.1382A$$

$$\therefore A = \frac{1.17}{0.138} = 8.441 \text{ m}^2$$

$$A = \pi R^2 = 8.441 \therefore R = \left(\frac{A}{\pi} \right)^{\frac{1}{2}} = \left(\frac{8.441}{\pi} \right)^{\frac{1}{2}} = 1.64 \text{ m.}$$

VI.1.4.-Diseño del rotor eólico para bombeo con una bomba de pistón recíprocante.

Se ha calculado que se necesita un rotor de $R = 1.64$

metros, se desean B = 6 hojas, por lo que $\lambda_d = 2$, la sección transversal de la hoja es curva al 10% ($c_f = 1.1$) con tubo sobre el lado cóncavo.

A) . - Si se desea mantener el coeficiente de elevación a un valor constante de C_{fd} , entonces varía el ancho C y el ángulo β .

B) . - Si se desea diseñar una hoja con un ancho C cte. (por facilidad de fabricación) entonces el coef. de elevación variará a lo largo de la hoja.

VI.1.4.A.-

A) Diseño con el coef. de elevación constante.

Este procedimiento consiste en calcular C y β en varias posiciones a lo largo de la hoja, cada uno a una distancia r del eje del rotor y a una relación de velocidad de diseño λ_d .

Posición	r(m)	λ_d	ϕ°	α_d°	β°	c (m)
1	1/4=0.41	0.5	42.3	4°	38.3°	0.407
2	1/2=0.82	1.0	30.0	4°	26.0°	0.418
3	3/4=1.23	1.5	22.5	4°	18.5°	0.357
4	1 =1.64	2.0	17.7	4°	13.7°	0.296

VI.1.4.A.1.-Velocidad de diseño local .

$$\lambda_{r_d} = \lambda_d \cdot \frac{F}{R}$$

$$\lambda_{r_{d_1}} = 2 \times 0.41 / 1.64 = 0.5$$

$$\lambda_{r_{d_2}} = 2 \times 0.32 / 1.64 = 1.0$$

$$\lambda_{r_{d_3}} = 2 \times 1.13 / 1.64 = 1.5$$

$$\lambda_{r_{d_4}} = 2 \times 1.64 / 1.64 = 2.0$$

VI.1.4.A.2.-Angulo del flujo aparente .

$$\theta = \frac{2}{3} \text{ arc. tang. } \frac{1}{\lambda_r}$$

$$\theta_1 = (2/3) \text{ arc. tang. } (1/0.5) = 42.3^\circ$$

$$\theta_2 = (2/3) \text{ arc. tang. } (1/1.0) = 30.0^\circ$$

$$\theta_3 = (2/3) \text{ arc. tang. } (1/1.5) = 22.5^\circ$$

$$\theta_4 = (2/3) \text{ arc. tang. } (1/2.0) = 17.7^\circ$$

VI.1.4.A.3.--Angulo de la hoja β .

$$\beta = \alpha - \alpha$$

$$\beta_1 = 42.3^\circ - 4^\circ = 38.3^\circ$$

$$\beta_2 = 20.0^\circ - 4^\circ = 16.0^\circ$$

$$\beta_3 = 22.5^\circ - 4^\circ = 18.5^\circ$$

$$\beta_4 = 17.7^\circ - 4^\circ = 13.7^\circ$$

VI.1.4.A.4.--Ancho de la hoja C .

$$C = \frac{2\pi r}{5C_1} (1 - \cos \beta)$$

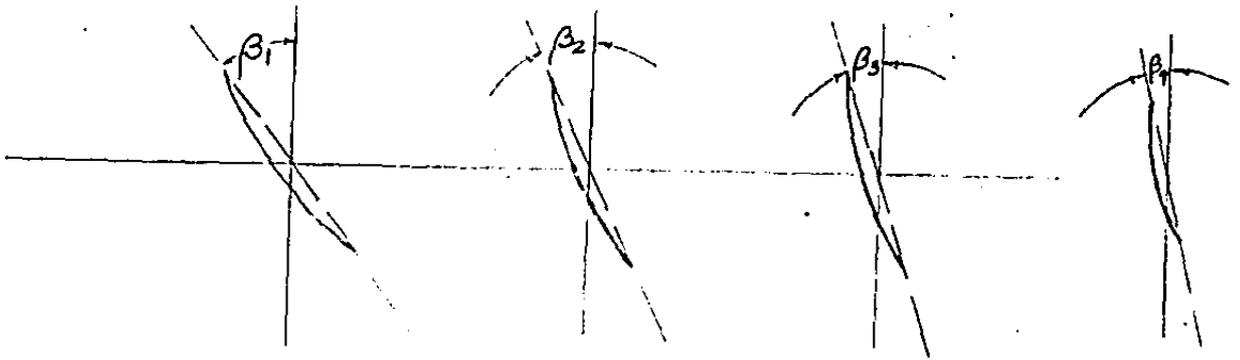
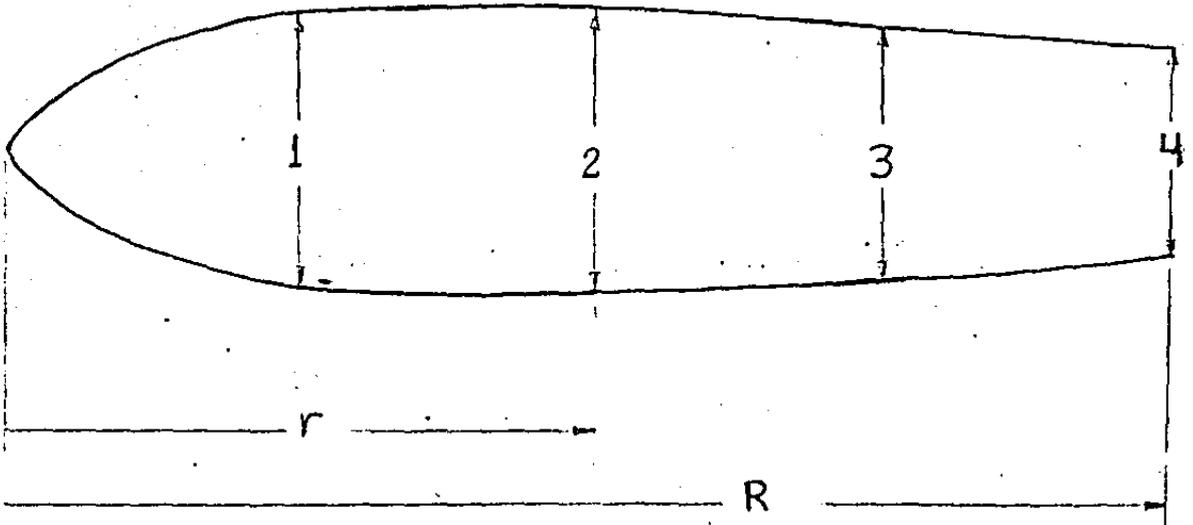
$$C_1 = (2\pi \cdot 0.11 / 5 \cdot 1.1) (1 - \cos 38.3^\circ) = 0.007$$

$$C_2 = (2\pi \cdot 0.22 / 5 \cdot 1.1) (1 - \cos 16.0^\circ) = 0.013$$

$$C_3 = (2\pi \cdot 1.23 / 6 \cdot 1.1) (1 - \cos 18.5^\circ) = 0.357$$

$$C_4 = (2\pi \cdot 1.64 / 6 \cdot 1.1) (1 - \cos 13.7^\circ) = 0.296$$

ESTA TESIS NO DEBE SALIR DE LA BIBLIOTECA



ESTA TESIS NO DEBE SALIR DE LA BIBLIOTECA

VI.1.4.B.-

B).- Diseño con el ancho de la hoja constante.

VI.1.4.B.1.-Dimensiones de la hoja .

Si en la fórmula $C = \frac{8 \pi r}{BC} (1 - \cos \phi)$, se hace $c = cte$, el coeficiente de levantamiento, en diferentes posiciones a lo largo de la hoja, varía.

$$C = \frac{8 \pi r}{BC} (1 - \cos \phi)$$

Como el coef. de levantamiento varía solamente con la variación del ángulo de ataque, se necesita de la relación sig:

$$C_L = C_L(\alpha) \left[\begin{array}{l} \bar{C} = \frac{\sum C}{4} = \frac{0.337 + 0.47 + 0.298 + 0.247}{4} = 0.307 \\ A = 1.03 \text{ m} \times 0.357 = 0.316 \text{ m}^2 \end{array} \right]$$

Posición	r (m)	Rrd	φ	C(m)	C _L	α	β	se selecciona
1	0.79	0.96	30.7°	0.324	1.43	10.8	20.1	20
2	1.14	1.39	23.8°	0.324	1.25	7.6	16.7	18
3	1.49	1.82	19.2°	0.324	1.07	3.7	15.8	16

Se necesita un $C \approx 0.307$, pero como la medida comercial de la lámina es de 1 m x 2 m, se cortan láminas de 0.333 m de ancho, que al darles la curvatura de 10% quedan de 0.324 m de ancho (c).

Longitud de la hoja = $\frac{\text{Área de la hoja del cálculo anterior.}}{\text{Ancho C de la hoja .}}$

$$\text{Longitud} = \frac{0.316}{0.324} = 0.976 \text{ metros.}$$

Se toma un metro de longitud de la hoja, ya que es la medida comercial de la lámina.

VI.1.4.B.2.-Velocidad de diseño local .

$$\lambda_{rd} = \lambda_d \cdot \frac{\Xi}{R}$$

$$\lambda_{rd_1} = (2 \times 0.79 / 1.64) = 0.9534$$

$$\lambda_{rd_2} = 2 \times 1.14 / 1.64 = 1.3900$$

$$\lambda_{rd_3} = 2 \times 1.49 / 1.64 = 1.8170$$

VI.1.4.B.3.-Ángulo de flujo aparente .

$$\theta = \frac{2}{3} \text{ arc.tang. } \frac{1}{\lambda_r}$$

$$\theta_1 = (2/3) \text{ arc.tang. } (1/0.9534) = 30.71$$

$$\theta_2 = (2/3) \text{ arc.tang. } (1/1.39) = 23.82$$

$$\theta_3 = (2/3) \text{ arc.tang. } (1/1.817) = 19.210$$

VI.1.4.B.4.-Coeficiente de elevación .

$$C_L = \frac{C R_r}{C} (1 - \cos \theta)$$

$$C_{L1} = (0.8 \times 0.79 / 0.324) (1 - \cos 30.7^\circ) = 1.431$$

$$C_{L_2} = (8 \pi 1.14 / 6 \times 0.324) (1 - \cos 23.3^\circ) = 1.253$$

$$C_{L_3} = (8 \pi 1.49 / 6 \times 0.324) (1 - \cos 19.2^\circ) = 1.072$$

VI.1.4.B.5.-Angulo de la hoja β .

$$\beta = \theta - \alpha$$

El coeficiente de elevación para la hoja curva al 10% con un tubo sobre el lado cóncavo es :

α	0	2	4	6	8	10	12
C_L	0.9	1.0	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5

Esta tabla se puede representar por la ecuación de la recta:

$$Y = m X + b$$

Con $m = 0.05$ y $b = 0.9$ quedando :

$$Y = 0.05 X + 0.9 \text{ dentro de sus límites.}$$

Despejando αX , se tiene:

$$X = \frac{Y - 0.9}{0.05}$$

Cambiando X por α y Y por C_L , queda:

$$\alpha = \frac{C_L - 0.9}{0.05}$$

$$\alpha_1 = (1.431 - 0.9) / (0.05) = 10.62$$

$$\alpha_2 = (1.253 - 0.9) / (0.05) = 7.06$$

$$\alpha_3 = (1.072 - 0.9) / (0.05) = 3.44$$

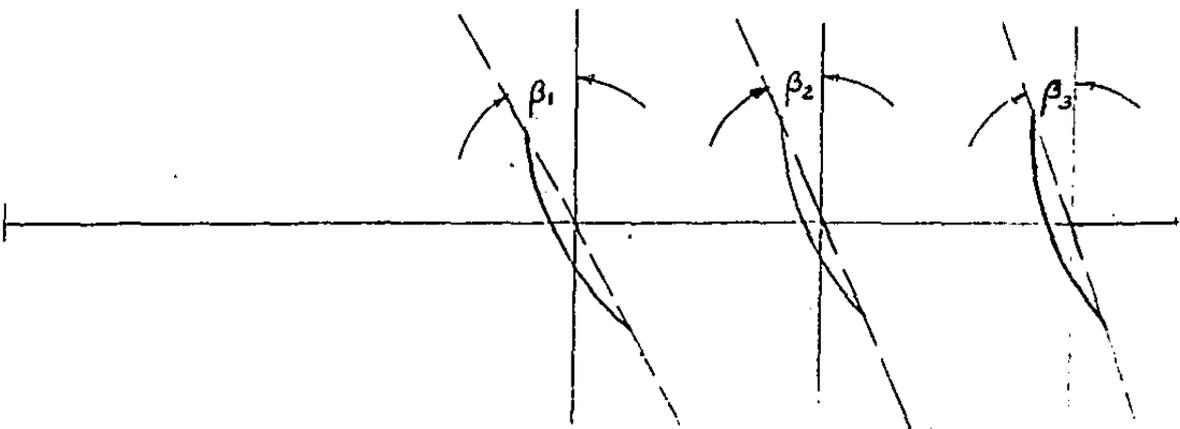
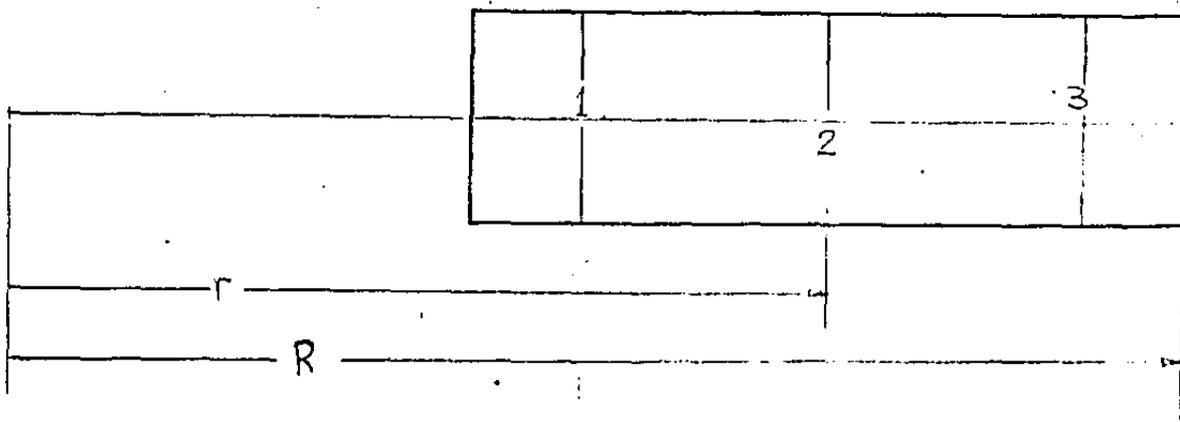
$$\beta = \theta - \alpha$$

$$\beta_1 = 30.7 - 10.62 = 20.08$$

$$\beta_2 = 23.2 - 7.06 = 16.14$$

$$\beta_3 = 19.2 - 3.44 = 15.76$$

La selección final de β difiere del teórico, debido a la dificultad de rolar la hoja curva con β no lineal. Así, empezando con el ángulo cerca de la punta β_3 se reparte en partes iguales entre β_1 y β_2 escogiendo valores enteros de β_1 y β_2 .



VI.2.- AEROGENERADOR .

1.- NECESIDAD DE ENERGIA PARA UNA GRANJA DE 20 HECTAREAS.

De acuerdo a la SARH^{*1}, se necesitan 70 litros de agua por minuto, de gasto, para usos domésticos, de abrevadero y de -- riego limitado, en una granja de 20 hectáreas.

$$\frac{70 \text{ lt.}}{\text{min.}} \times \frac{480 \text{ min.}}{\text{día}} = 33,600 \text{ lts./día}$$

33,600 litros/día de agua, se pueden obtener con una bomba de agua de 70% de eficiencia de 40 w., trabajando 8 horas -- por día, elevando el agua a 35 metros.^{*2}

La cantidad total de energía que se requiere en la granja es: ^{*3} .

APLICACION	POTENCIA (WATTS.)	USO (HORAS)	CONSUMO DIARIO (WATTS-HORA)
Aire acondicionado	560	3	1,680
Aspiradora	373	0.1	38
Bomba de agua	40	8	320
Cafetera	300	1	300
Lámparas fluorescentes (3x60 cms.)	60	10	600
Lavadora de ropa	249	0.5	125
Licuadaora	249	0.05	13
Máquina de coser	187	0.1	19
Parrilla	1000	1.5	1,500
Plancha	1000	0.5	500
Radio tocadiscos	30	4	120
Radio transmisión(50 km)	50	1	50
Rasuradora	20	0.15	3
Refrigerador	249	9	2,241
Reloj	0.0001	24	0
Rostizador	1000	0.5	500

APLICACION	POTENCIA (WATTS)	USO (HORAS)	CONSUMO DIARIO (WATTS-HORA)
Secadora de cabello	187	0.5	94
Televisión	60	4	240
Torno	249	0.25	62
Trampas entomológicas	20	10	200
Tostador de pan	1000	0.15	150
Ventilador	85	2	170
Otros:			1000.
TOTAL :			10,000 $\frac{WH}{DIA}$

VI.2.2 DIAMETRO DE LA HELICE.

De acuerdo a los datos estadísticos de vientos sig.: *4 .

DIR. MES	NORTE		NE		ESTE		SE		SUR.		SW		CALMA
	F	V	F	V	F	V	F	V	F	V	F	V	FREC.
	%	M/S	%	M/S	%	M/S	%	M/S	%	M/S	%	M/S	%
ENERO	74.2	7.8	0.3	1.0	-	-	-	-	18	3.2	-	-	7.7
FEBRERO	58.1	7.7	0.4	0.4	-	-	0.4	0.3	37.5	3.5	-	-	3.5
MARZO	48.6	8.0	-	-	-	-	1.1	0.6	48.5	3.6	-	-	2.0
ABRIL	34.2	7.4	-	-	-	-	1.1	1.2	63.6	3.6	-	-	1.1
MAYO	42.6	6.9	0.3	0.4	-	-	2.4	2.7	50.9	3.4	-	-	3.9
JUNIO	36.9	5.3	1.0	2.5	0.4	0.6	2.8	3.3	42.0	3.3	1.0	1.2	16.0
JULIO	72.3	5.5	0.3	0.4	0.3	0.3	1.9	3.0	10.1	2.2	-	-	14.9
AGOSTO	62.1	5.6	0.9	2.0	0.3	0.4	2.6	1.6	24.4	2.7	0.6	1.4	9.3
SEPT.	60.6	5.5	-	-	-	-	2.5	1.7	25.1	3.1	2.0	1.8	9.9
OCT.	77.3	6.7	0.3	1.3	-	-	1.3	2.0	14.1	3.1	-	-	5.9
NOV.	75.2	6.8	-	-	-	-	1.3	1.8	17.5	3.1	0.4	0.6	5.7
DIC.	71.9	7.3	-	-	-	-	-	-	21.9	3.0	-	-	6.2
PROM.DIC	59.5	6.3	0.3	0.7	0.1	0.1	1.5	1.5	31.2	3.2	0.3	0.4	7.2

Como el aerogenerador empezará a girar con vientos de 3 m/s, - y generará con vientos de 4 m/s, solamente los vientos del norte son aprovechables.

De los vientos del norte, se utilizará en la sequía de otoño-- invierno, que abarca desde octubre hasta marzo.

Promedio de velocidad en el período de sequía:

$$\frac{6.7+6.8+7.8+7.8+7.7+8}{6} = \frac{44.8}{6} = 7.47 \text{ m/s.}$$

Promedio de la frecuencia de los vientos en el período de sequía:

$$\frac{77.3+75.2+71.9+74.2+58.1+48.6}{6} = \frac{405.3}{6} = 67.55\%$$

$$\text{Potencia del viento}^3 = 1/2 \rho AV^3.$$

$$\text{Para } \rho = 1.225 \text{ kg/m}^3$$

$$A = 1 \text{ m}^2$$

$$V = 7.47 \text{ m/s}$$

$$\text{Pot. viento} = (0.5) (1.225) (1) (7.47)^3 = 255.31 \frac{\text{Watts}}{\text{metro}^2}$$

$$\text{Pot. viento por día} = 255.31 \times 24 \times 0.6755 = 4,139.1 \frac{\text{W-H}}{\text{DIA}}$$

Como potencia real = $1/2 \rho AV^3 C_p \eta_a \eta_t^e$, igualando con la potencia requerida:

$$\text{Pot. requerida} = 10.000 = 4,139.1 A C_p \eta_a \eta_t^e$$

$$\therefore A = \frac{10.000}{4,139.1 C_p \eta_a \eta_t^e}$$

donde:

Λ = área de barrido del rotor.

C_p = coeficiente de potencia del rotor = 0.45

η_a = eficiencia del alternador = 0.92

η_t = eficiencia de la transmisión = 0.85

e = caída de tensión (2%) = 0.98

Substituyendo valores:

$$\Lambda = \frac{10\,000}{4,139.1 \times 0.45 \times 0.92 \times 0.85 \times 0.98} = 7.006 \text{ M}^2.$$

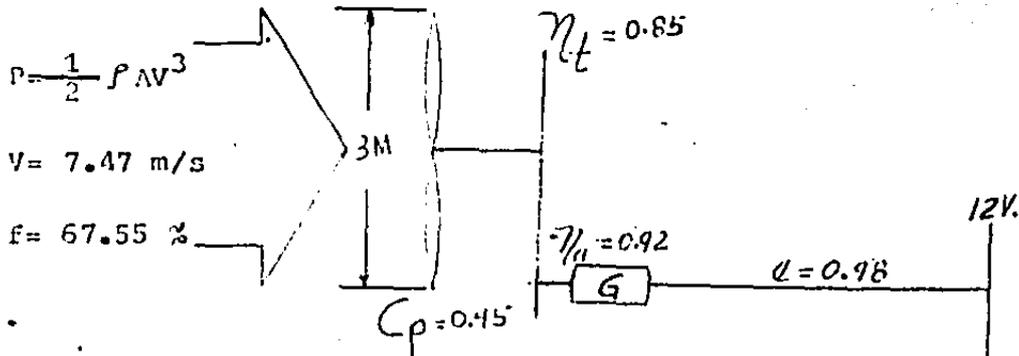
como $\Lambda = \frac{\pi}{4} D^2 \quad \therefore \quad D = \sqrt{\frac{4\Lambda}{\pi}} \rightarrow ;$

$$D = \sqrt{\frac{4 \times 7.006}{\pi}} = 2.99 \approx 3 \text{ metros.}$$

3.1.3.-

3. POTENCIA DE LA HELICE DE 3 METROS.

$$P = \frac{1}{2} \rho A V^3 C_p \eta_t \eta_a e.$$



OBSERVACION.	VELOCIDAD			POTENCIA EN WATTS.					
	M/S	Km/Hr	M11/Hr	VIENTO	EJE HELICE	EJE ALTERNADOR	TERMINAL ALTERNADOR	UTIL. MAXIMA	UTIL. MEDIA
				$1/2 \rho A V^3$ 4.29V ³	$C_p=0.45$ 1.93 V ³	$\eta_t=0.85$ 1.64 V ³	$\eta_a=0.92$ 1.51 V ³	$\beta=0.98$ 1.48V ³	$f=67.55$ 0.999V ³
INICIO GIRO	3	10.8	6.7	116	52	44	41	40	27
INICIO GENERACION.	4	14.4	9.0	275	124	105	97	95	64
	5	18.0	11.2	536	241	205	189	185	125
	6	21.6	13.4	927	417	354	326	320	216
	7	25.2	15.7	1471	662	563	518	508	343
VEL. DISEÑO	7.47	26.9	16.7	1788	305	684	629	617	417
	8	28.8	17.9	2196	988	340	773	758	512
IN. CONTROL	9	32.4	20.1	3127	1407	1196	1101	1079	729
VEL. NOM.	10	36.0	22.4	4290	1931	1641	1510	1480	1000
	11	39.6	24.6	5710	1545	1313	1208	1184	800
	12	43.2	26.8	7413	1159	985	906	888	600
	13	46.8	29.1	9425	773	657	604	592	400
	14	50.4	31.3	11772	386	328	302	296	200
SALIDA	15	54.0	33.6	14479	—	—	0	0	0
REGISTRADO.	24.5	83.2	54.7	63089	—	—	—	—	—
MAX. SOFT.	30	108.0	67.2	115,330	—	—	—	—	—

Potencia media del aerogenerador = 417. Watts.

Potencia nominal del aerogenerador = 1500 Watts.

VI.2.4.-

4. CAPACIDAD DEL ALTERNADOR.

A).- Para la frecuencia del viento, $f=67.55\%$ y necesidad de

$$10\ 000 \frac{W-H}{DIA} \times \frac{DIA}{24\ hrs. (0.6755) (0.98)} = 630\ Watts.$$

B).- Para la vel. promedio de viento en el ciclo invierno-verano, $v=7.47\ m/s$, se tiene:

$$P = \frac{1}{2} \rho AV^3 C_p \eta_t \eta_a^e$$

$$P = (0.5) (1.225) (7) (.45) (.85) (0.92) (0.98) v^3 = 1.48 v^3$$

$$P = 1.48(7.47)^3 = 617\ Watts.$$

El alternador comercial más próximo en potencia que satisface las necesidades de A y B es:

$$55\ Amperios \times 12\ Voltios = 660\ Watts.$$

Para aprovechar la energía hasta antes de la salida (picos) - del aerogenerador, se usan dos alternadores.

VI.2.5.-

5. ALMACENAMIENTO DE ENERGIA.

La energía se puede almacenar por medio de baterías, celdas de combustible, rueda de inercia, bombeo de agua, etc. Se ha seleccionado el almacenamiento por baterías por ser más fácil limpio y barato.

Como el período más largo sin viento es de dos días consecutivos y considerando que únicamente se utilice en éstos días la mitad de la carga, se tiene:

$$\frac{10\,000 \times 2 \times 0.5}{0.98} = 10,200 \frac{W-H}{2 \text{ DIAS}}$$

El amperaje es:

$$\frac{10\,200 \text{ W}}{12 \text{ V}} = 850 \text{ Amp-Hr.}$$

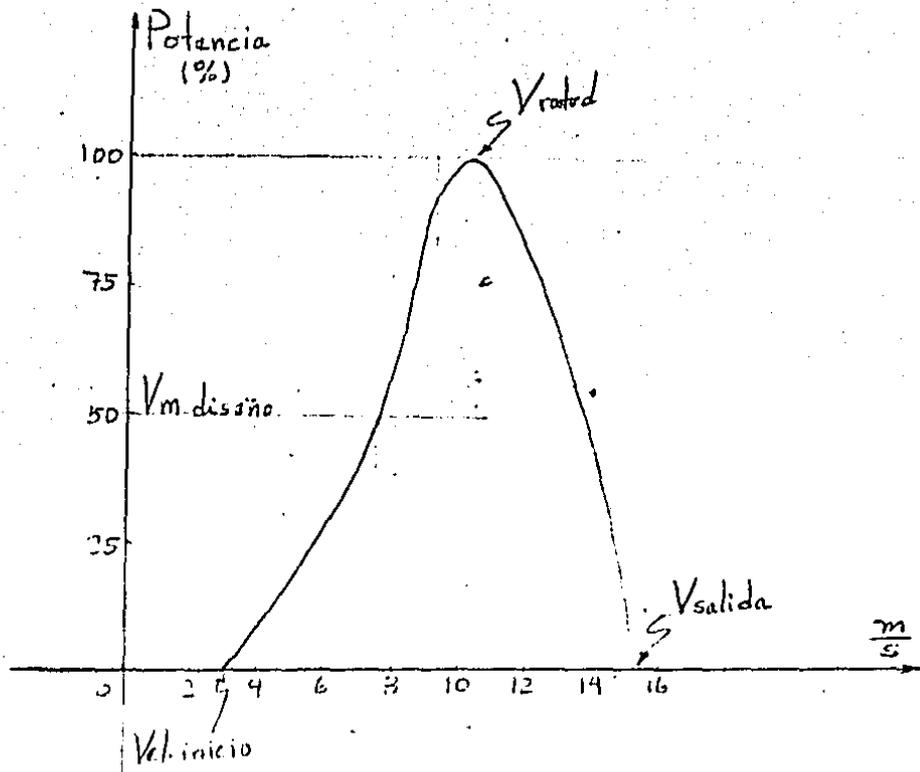
Esta energía se puede almacenar en cinco acumuladores de 180 amp-hr. cada uno.

/I.2.6.-

6. DIMENSIONAMIENTO DE LA HELICE.

Vel. de inicio de giro = 3 m/s = 10.8 Km/Hr.
Vel. de generación = 4 m/s = 14.4 Km/Hr
Vel. de diseño = 7.47 m/s = 26.9 Km/Hr.
Inicio de control = 9 m/s = 32.4 Km/Hr.
Vel. nominal = 10 m/s = 36 Km/Hr.
Vel. salida = 15 m/s = 54 Km/Hr.
Vel. registrada = 20 m/s = 72 Km/Hr.
Vel. máxima soportará = 30 m/s = 108 Km/Hr.
Factor de seguridad 3.

Vida útil = 25 años.



El alternador necesita 1425 r.p.m. para generar energía a plena capacidad.

Teniendo una transmisión de velocidad de 5:1, se necesita que la hélice gire a:

$$\frac{1425}{5.0} = 285 \text{ r.p.m.}$$

La relación $\frac{U}{V}$ de punta es:

$$\frac{U}{V} = \frac{0.105 \times N \times r}{KV}$$

donde: U = Vel. de cualquier punto de la hélice.

V = Vel. del viento.

N = Vel. rotacional en r.p.m.

r = radio de la sección (donde $\frac{U}{V}$ se calcula en pies)

K = $\begin{cases} 1.47 & \text{para vel. viento en millas por hora.} \\ 1 & \text{para vel. viento en pies por segundo.} \end{cases}$

Para N= 285 r.p.m.

$$r = \frac{9.84}{2} = 4.92'$$

$$K = 1.47$$

$$V = 7.47 \text{ m/s} = 16.7 \text{ millas/hr.}$$

$$\left(\frac{U}{V}\right)_{\text{punta}} = \frac{0.105 \times 285 \times 4.92'}{1.47 \times 16.7} = 6$$

$$\left(\frac{U}{V}\right)_{\text{medio}} = \frac{0.105 \times 285 \times 2.71'}{1.47 \times 16.7} = 3.29$$

$$\left(\frac{U}{V}\right)_{\text{base}} = \frac{0.105 \times 285 \times 0.5'}{1.47 \times 16.7} = 0.61$$

Subst. en la fórmula para la solidez⁶ sig.:

$$\text{Solidez (punta)} = 1.25 \left(\frac{1}{U/V}\right)^2 = 1.25 \left(\frac{1}{6}\right)^2 = 0.035 \text{ p.v.} = 3.5\%$$

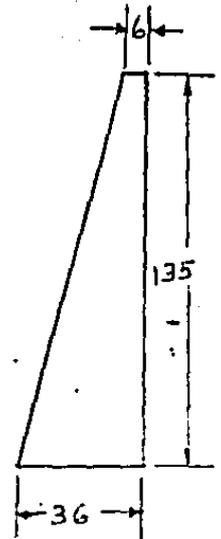
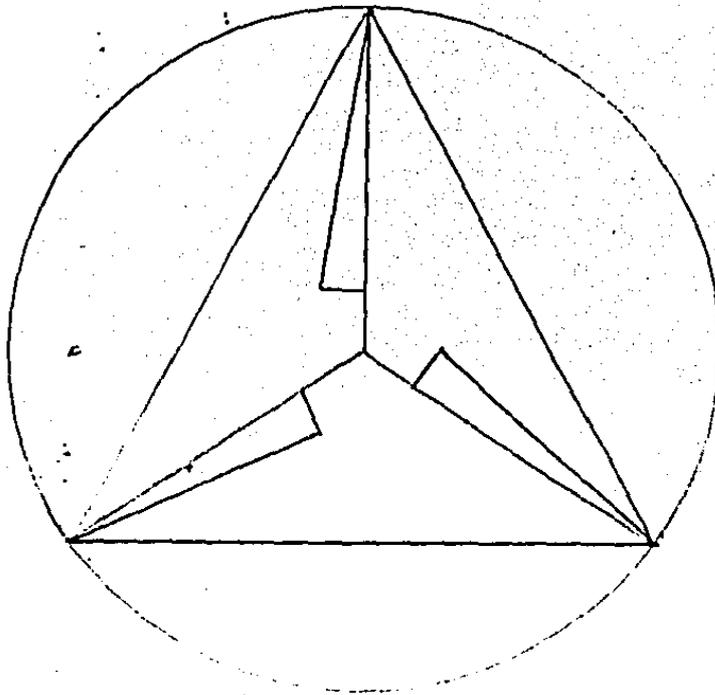
$$\text{Solidez (medio)} = 1.25 \left(\frac{1}{3.29}\right)^2 = 0.11 \times 55 \text{ p.v.} = 11.55\%$$

$$\text{Area de hoja (punta)} = 7.006 \times 0.035 = 0.245 \text{ m}^2$$

$$\text{Area de hoja (medio)} = 7.006 \times 0.1155 = 0.8 \text{ m}^2$$

$$\text{Ancho de la hélice (punta)} = \frac{0.245}{3 \times 1.35} = 0.06 = 6 \text{ cm.}$$

$$\text{Ancho de la hélice (medio)} = \frac{0.8}{3 \times 1.35} = 0.1975 \approx 20 \text{ cms.}$$



VI.2.7.-

7. ANGULO DE TORCIMIENTO DE LA HELICE.

Substituyendo los valores de $\frac{U}{V}$ en la ecuación del ángulo aparente del viento, desde 0° hasta 45° , se tiene:

$$\text{Angulo del viento} \cdot 6 = \frac{37.7}{\left(\frac{U}{V}\right)} =$$

$$\text{Ang. viento (punta)} = \frac{37.7}{6^\circ} = 6.28^\circ$$

$$\text{Ang. viento (medio)} = \frac{37.7}{3.29^\circ} = 11.46^\circ$$

$$\text{Ang. viento (base)} = \frac{37.7}{0.61^\circ} = 61.8 \quad 45^\circ$$

Considerando una hélice, con perfil Clark Y,⁶ que es más sencilla y que varía desde 0° hasta 16° su ángulo de ataque y desde 0.35 hasta 1.55 el coeficiente de deslizamiento, se toma un punto medio con coeficiente de deslizamiento 0.92 y ángulo de ataque de 9° .

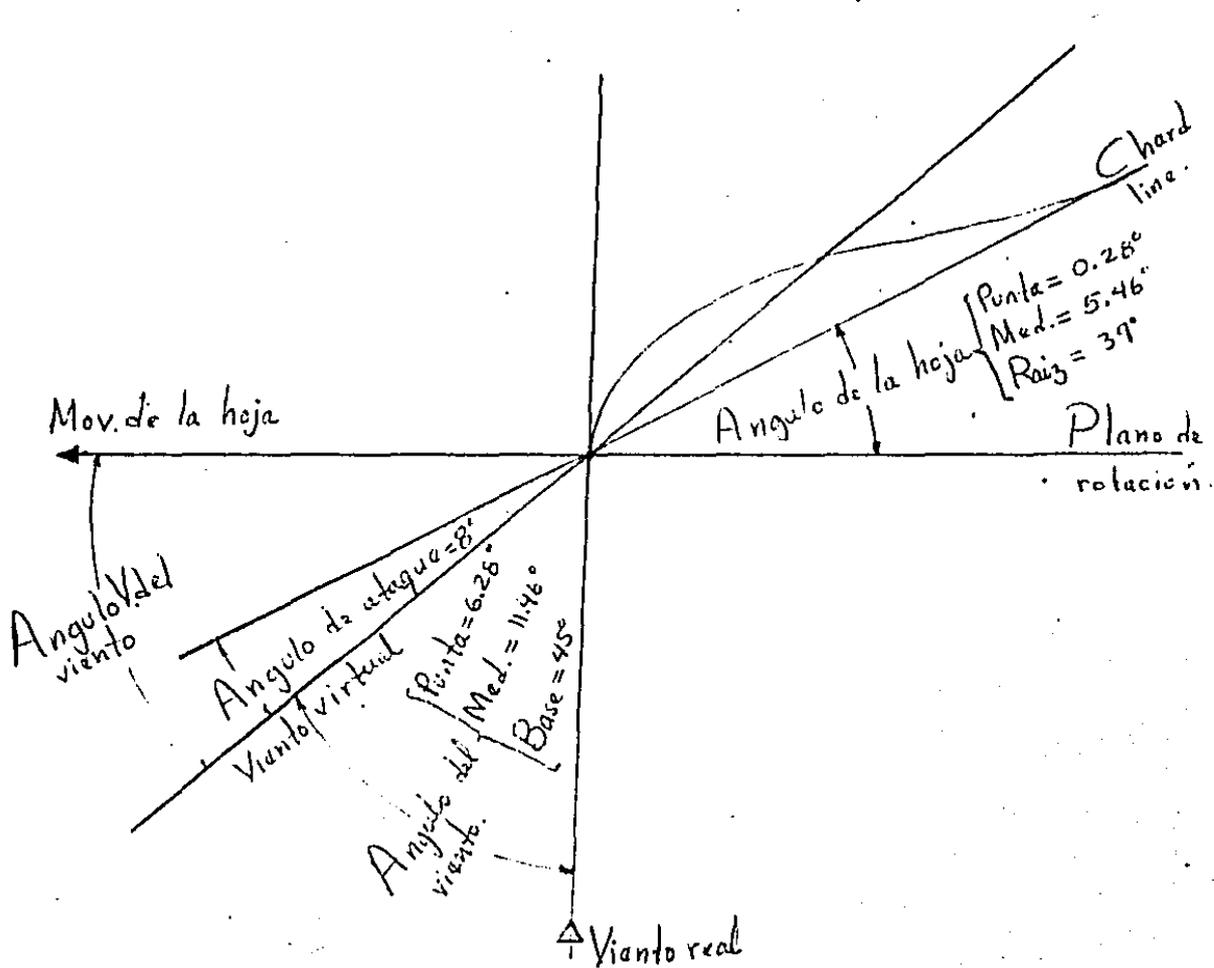
El ángulo cero de ésta hoja es de 2° (0° para simétrica y 4° para alta convección).

Angulo de la hoja = Ang. viento - Ang. ataque + áng. cero de la hélice.

$$\text{Ang. hoja (punta)} = 6.28 - 8^{\circ} + 2^{\circ} = 0.28^{\circ}$$

$$\text{Ang. hoja (medio)} = 11.46 - 8^{\circ} + 2^{\circ} = 5.46^{\circ}$$

$$\text{Ang. hoja (base)} = 45^{\circ} - 8^{\circ} + 2^{\circ} = 39^{\circ}$$



CONCLUSIONES

El objetivo de la evolución del potencial eólico en el Istmo, es cuantificar, los rangos de velocidad, potencia y energía del viento, la distribución espacial de las zonas en cuanto a su intensidad y el tiempo de estas intensidades.

El Istmo tiene tres sistemas de vientos, el primer sistema es de tipo general con dirección NS, que se origina en el Golfo de México bajando hacia el Golfo de Tehuantepec, pasando por todo el Istmo oaxaqueño, este viento es ayudado por las altas temperaturas del sur del Istmo; el segundo sistema es local, es un sistema de brisas con dirección S-N; el tercer sistema se debe a vientos de drenaje del norte que bajan de la parte central alta del Istmo hacia el Golfo de Tehuantepec.

De las 6 estaciones anemométricas, 3 son las recomendadas para el aprovechamiento a gran escala (para el aprovechamiento en pequeña escala, todo el Istmo es recomendable).

La tipología del comportamiento del viento es:

SITIO	VARIANZA	CARACTERISTICA
Salina Cruz	Baja	Influenciada por el sist. gral.
La Ventosa Juchitan Unión Hidalgo y Tehuantepec	Media	Influenciadas por los 3 sistemas
La Venta	Alta	Principalmente influenciada por el flujo general, pero intervienen los otros 2 sistemas.

La zona de vientos aprovechables para grandes aerogeneradores en el Istmo, es de aproximadamente 1500 Km². Explo-tando toda la zona, equivaldrá a unos 12,000 MW de capacidad instalada, que darán unos 42 Twh/año con un factor de planta del 40%. A esta energía habría que sumarle la generada con máquinas de pequeña capacidad en el resto de la zona Istmica.

Con la generación eléctrica a gran escala conectadas a la red de la C.F.E., la hidroeléctrica consumiran menos aguas, quedando estas para aprovecharse en los sistemas de riego.

A lo expuesto en este trabajo respecto de estado

de la agricultura, ganadería y electrificación, nos damos cuenta que en cuanto a la agricultura, se necesita agua para las tierras de temporal, sobre todo en el ciclo Otoño-Invierno; para las tierras de riego, debido a la baja precipitación pluvial de los últimos años, el agua que se almacena en la presa no alcanza ni para el cultivo de la caña de azúcar actual (que es menos de la mitad de la capacidad del Ingenio azucare-ro), así es que no hay agua para los demás cultivos, ya que le dan prioridad a la caña de azúcar.

Respecto a la ganadería, al no haber agua suficiente, no hay forraje, por lo que ha ido disminuyendo.

En cuanto a la electrificación, resulta muy costoso para la C.F.E. dotar del servicio eléctrico a 12 poblaciones que se encuentran dentro de su distrito K-140 y a otras ranche-rías que se encuentran muy aisladas.

Estas necesidades de agua para riego y abrevadero, así como la necesidad de refrigeración y conservación de ali-mentos marítimos se pueden satisfacer en el ciclo de Otoño-Invierno, utilizando, conversores eólicos de pequeña capacidad.

Por último, en general, los aerogeneradores tienen

costos de inversión similar al de plantas de turbinas de gas
y costos de operación, al de plantas hidroeléctricas.

BIBLIOGRAFIA

- *1. SARH Proyectos de Zona de Riego.
Dirección General de gran irrigación y control de ríos.
México, 1971.
- *2. Posibilidad de emplear la energía del viento en el Istmo.
Francisco Cazorla Santiago.
- *3. I.I.E. División Fuentes de Energía.
Informe anual 1978. Anexos J. Nicolás Puga R.
- *4. Atlas del agua de la República Mexicana.
Secretaría de Recursos Hidráulicos
Datos estadísticos obtenidos en el meteorológico de Salina
Cruz, Oax., desde 1951 hasta 1970.
- *5. Boletín I.I.E. Sept.-Oct.-/84. V-8#5.
- *6. Informe "Evaluación Preliminar del Potencial Energético
Eólico de la Zona de La Ventosa, Oax".
I.I.E. Div. Fuentes de Energía. Depto. Fuentes no conven-
cionales de Energía. Octubre de 1985.
- *7. Manual de Meteorología Eólica.
OLADE.
- *8. Plan Estatal de Desarrollo 1986 p. 87.
- *9. Información Geohidrológica. Subdirección de Geohidreología
y Zonas Aridas. SARH 1978.

- *10. Análisis Preliminar Eval del Potencial Energético Eólico. E. Caldera M. y D.I. Chirinos P. Mayo de 1979.
- *11. Anuario Estadístico de Oaxaca 1985. Tomo III. p. 2222
- *12. Metodología y Necesidades para la Prospección y Evaluación del Viento en la Zona de "La Ventosa, Oax". Daniel I. Chirinos Pérez. Dic. de 1979.
- *13. Evaluación Preliminar del Potencial de Generación Eléctrica en la Zona de la Ventosa, Oax. I.I.E. Abril de 1986.
- *14. Bombeo de Agua con Energía Eólica. Inf. Int. IIE. 1980.
- *15. Aerogenerador para la Zona del Istmo de Tehuantepec Nitron García. Tesis. I.T.I. Méx.
- *16. Aprovechamiento de la Energía Eólica. Informe Anual y Anexos 1978. México.
- *17. Diseño, Construcción y Pruebas del Prototipo Experimental del Aerogenerador tipo Savonius de 200 watts. I.I.E. México. E. Caldera, N. Puga, D.I. Chirinos.
- *18. Problemas Asociados a la Exploración y exportación de la Energía Eólica. E. Caldera Muñoz. IIE. México.
- *19. Simplified Wind Power System por Experimenters. Jack Park. USA.
- *20. Análisis Crítico del Uso de la Energía del Viento Inf. Int. Instituto de Ingeniería, UNAM, Junio de 1976.

- *21. Aprovechamiento de la Energía Eólica.
Tesis de Ing. Civil, UNAM. 1978.
- *22. Introduction to wind energy
E. H. Lysen. CWD 82-1. May. 1983.
Consucrancy Services Wind Energy Developing Countries.
CWD. Amersfoort. The Netherlands.
- *23. Matching of wind rotorsto low power electrícal generators
H.J. Hengeveld, E.H. Ly--sen and L.M.M. Paulissen. CWD.
78-3. December 1978.
P.O. Box 85 3800 AB Amersfoort. The Netherlands.
- *24. Horizontal Axis fast Running wind Turbines for developing
Countries.
W.A.M. Jansen.
CWD 76-3. June 1976.
Amersfoort. The Netherlands.