

MINISTERIO DE MINAS Y ENERGIA

ENERGIA EOLICA

OLADE

1980

2232

**PROSPECCION, EVALUACION Y CARACTERIZACION
DE LA ENERGIA EOLICA**



333.97
C977
EJ.1

333.972.2
0512 P
1980

383

Este documento, presentado y discutido en el I Curso—Seminario Latinoamericano sobre Prospección, Evaluación y Caracterización de la Energía Eólica, promovido por la Organización Latinoamericana de Energía (OLADE) y el Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE) de México, el cual se realizó en la sede del IIE en la ciudad de Cuernavaca — Morelos del 26 al 30 de mayo de 1980, fue elaborado por la Comisión Organizadora del Curso—Seminario, compuesta por las siguientes personas:

*Dr. José Luis Aiello
CNIE/ARGENTINA*

*Ing. Met. Jorge Iván Valencia Franco
HIMAT/COLOMBIA*

*Ing. Enrique Caldera Muñoz
IIE/MEXICO*

*Ing. Luiz Augusto Marciano da Fonseca
OLADE*

*Edición Final
Quito—Ecuador
Octubre 14, 1980*

INTRODUCCION

Hasta el desarrollo de la máquina a vapor, en la segunda mitad del siglo XVIII "los países que dominaban el viento, también dominaban el mundo". Unica fuente natural de energía mecánica existente, además de la hidráulica, la energía eólica movió una prolongada época bajo la forma de miles de molinos de viento, y hoy se le considera una legítima precursora de la revolución industrial y, en consecuencia, de la civilización contemporánea.

¿Por qué entonces una tecnología tan antigua no es debidamente utilizada en la actualidad?

Algunas razones podría argumentarse, tales como la falta de continuidad que presenta el viento, su baja densidad energética, si se compara con otras formas de energía de producción masiva, entre otras. Por otro lado tiene ventajas que no pueden ser olvidadas, o sea, el acceso directo a este recurso y su carácter no dañino al ecosistema, factor tan importante en la época actual.

La crisis energética de la década pasada mostró la importancia de invertir en fuentes alternas de energía con carácter renovable y de bajo costo. La generación de energía a través del viento satisface la primera condición pero no se puede decir que tiene un costo reducido de producción, pues la tecnología no está investigada en su totalidad y aún se carece de producción de equipos en larga escala a fin de reducir estos costos, principalmente en términos de América Latina.

Dentro de la amplia gama de opciones energéticas a largo y mediano plazo con que cuenta América Latina, la fuerza eólica es una de sus más promisorias fuentes no convencionales de energía. Su aprovechamiento masivo supone un aporte sustancial de varios millones de kilovatios para surtir, fundamentalmente, las necesidades domésticas, e incluso productivas, de la población rural latinoamericana, de cuyos 150 millones no más del 15 por ciento se abastece de suministro eléctrico.

La evaluación del recurso viento, así como su futura utilización en beneficio prioritario de los grandes sectores rurales marginales del continente, constituyen el punto inicial de un proyecto de coordinación iniciado sobre esta materia por la Organización Latinoamericana de Energía, OLADE.

La metodología propuesta por el organismo regional al respecto, se basa en la cooperación entre países, mediante una plena utilización de la capacidad técnica existente y el desarrollo coordinado de la investigación que se realiza sobre este recurso energético renovable.

Se estima que la aplicación de este método permitirá, además, realizar un inventario de tecnología latinoamericana actual, como necesario parámetro para establecer un mecanismo de intercambio y consulta, así como estudios de conocimiento del recurso viento y su distribución para la confección de un atlas regional sobre los niveles de potencial energético eólico.

Con esto, se llegaría finalmente a determinar las áreas de interés donde tanto la intensidad como la disponibilidad del viento lo transforman en un recurso interesante para su empleo eléctrico o mecánico, además de la estimación de los mercados potenciales de demanda de equipos que estas áreas podrán ofrecer.

El proyecto enunciado por OLADE se orienta en gran medida a difundir en forma masiva el uso de este recurso, que tradicionalmente se ha centrado en faenas de molienda de granos y bombeo de agua para uso agropecuario en pequeña escala. Se pretende, mediante la aplicación de una tecnología apropiada, que acentúe la descentralización, el pluralismo de las técnicas y su control local, poder cubrir en cierta proporción las necesidades no satisfechas de energía del medio rural.

OLADE espera que los estudios aquí presentados sean útiles para profundizar los conocimientos sobre Energía Eólica y sugiere que esta energía que hoy se releva, puede ser aquella que está soplando para el futuro de América Latina.

INDICE GENERAL

Pág.

CAPITULO 1 – EL VIENTO COMO FUENTE DE ENERGIA

1.1 ANTECEDENTES HISTORICOS DEL USO DE LA ENERGIA EOLICA	1
1.2 NATURALEZA DEL VIENTO	3
1.2.1 Descripción Cualitativa de la Atmósfera en Escala Planetaria o Global	3
1.2.2 Movimiento Atmosférico	7
1.2.2.1 Breve descripción de las distintas escalas	8
1.2.2.2 Ecuación de movimiento	9
1.2.2.2.1 Fuerzas fundamentales	9
a. Fuerza debida al gradiente de presión	10
b. Fuerza gravitacional	11
c. Fuerza de fricción	12
1.2.2.2.2 Fuerzas aparentes	13
d. Fuerza centrífuga	13
e. Fuerza de Coriolis	14
1.2.2.2.3 Expresión de la ecuación de movimiento	15
1.2.2.3 Aproximación geostrófica y viento geostrófico	16
1.2.3 Sistemas de Vientos Locales	17
1.2.3.1 Brisas de Montaña y Valle	17
1.2.3.2 Brisas de Tierra y de Mar	17
1.2.3.3 Vientos de Drenaje	18
1.2.3.4 "Föhn", "Chinook" y "Zonda"	18
1.3 POTENCIA Y ENERGIA DEL VIENTO	19
1.3.1 Ecuaciones de Potencia y Energía	19
1.3.2 Curvas de Frecuencia de Velocidades	21
1.3.3 Curvas de Duración de Velocidades	22
1.3.4 Curvas de Duración de Potencia	23
1.3.5 Conversión de la Energía Eólica	24
1.3.5.1 Potencia teórica máxima de una turbina eólica	24
1.3.5.2 Sistemas conversores de energía eólica	27
1.3.5.3 Energía aprovechable y análisis económico preliminar	32
1.3.5.4 Explotación de la energía eólica	32
1.3.5.4.1 El sistema de conversión de energía eólica como economizador de combustible	32
1.3.5.4.2 Perspectivas en la utilización de la energía eólica	32

CAPITULO 2 – INSTRUMENTOS DE MEDICION

2.1 ESCALA DE BEAUFORT	35
2.2 ANEMOMETROS	36
2.2.1 Tipo Copas	37
2.2.1.1 Generador de C.A.	37
2.2.1.2 Generador de C.D.	37
2.2.1.3 Contador	37
2.2.1.4 Contacto	37
2.2.2 Tipo Molino de Viento	38
2.2.3 Tipo Tubo de Presión	38
2.2.4 Tipo Sónico	38
2.2.5 Tipo de Alambre Caliente	38
2.3 ANEMOSCOPIOS	38
2.4 ANEMOCINEMOGRAFOS	40
2.4.1 Anemocinemógrafos de Velocidad Instantánea	40
2.4.2 Anemocinemógrafos de Distancia Recorrida	42

2.5 ANEMOCINEMOGRAFOS ELECTRONICOS	42
--	----

CAPITULO 3 – MANEJO DE DATOS

3.1 ESCALA DE BEAUFORT	45
3.1.1 Indicaciones de Velocidad y Rumbo en la Hoja de Registro	46
3.1.2 Análisis de la Hoja de Registro	46
3.1.2.1 Rosa de los vientos	47
3.1.2.2 Distribuciones horarias de velocidad e histogramas del período	48
3.1.3 Evaluación de Resultados	49
3.2 REGISTROS DE DISTANCIA RECORRIDA	49
3.2.1 Introducción	49
3.2.2 El Gráfico de Distancia Recorrida y su Procesamiento	49
3.2.3 Procedimiento de Graficación de la Curva Diaria de Distribución de Velocidades ..	50
3.3 ROSA DE LOS VIENTOS	52
3.3.1 Obtención de la Duración de cada Dirección durante un Mes de Observación	53
3.3.2 Representación sobre la Base de los Ocho Puntos Cardinales del Porcentaje de Fre-	
cuencia	54
3.4 HISTOGRAMAS DE COMPILADORES ELECTRONICOS	55
3.5 REGISTRADORES CON REGISTRO DE DIRECCION DE VIENTO	59

CAPITULO 4 – PROSPECCION DE ZONAS Y SITIOS DE INTERES

4.1 PROSPECCION INDIRECTA	64
4.1.1 Servicio Meteorológico Nacional	64
4.1.2 Mapas Climatológicos	64
4.1.3 Toponimos y Referencia Oral	64
4.2 PROSPECCION DIRECTA	65
4.2.1 Encuesta	65
4.2.2 Evidencia Ecológica	65
4.2.2.1 Introducción	65
4.2.2.2 Clasificación de la evidencia ecológica	65
4.2.2.3 Métodos de evaluación de velocidad a partir de efectos en la vegetación ..	66
4.2.3 Mediciones In Situ	69
4.2.3.1 Selección de sitios	69
4.2.3.2 Altura de medición	69
4.2.3.3 Mediciones	70

CAPITULO 5 – EVALUACION ENERGETICA

5.1 ESTACION ANEMOMETRICA BASICA	71
5.1.1 Introducción	71
5.1.2 Objetivos de la Medición	71
5.1.3 Metas de la Medición Anemométrica Preliminar	71
5.1.4 Configuración de la Estación Básica	72
5.1.5 Procedimiento de Instalación	72
5.1.5.1 Preparación de equipo y materiales	72
5.1.5.2 Instalación	72
5.1.5.3 Operación e inspección	73
5.2 PROCESAMIENTO DE DATOS	
5.2.1 Descripción de la Hoja de Distribución de Velocidades	73
5.2.2 Digitalización de las Hojas Diarias, Método y Hojas de Datos Intermedios	73
5.2.3 Hoja de Datos y Procedimientos	75
5.2.4 Programas: Viento y Windca	76

5.3 CURVAS DE DISTRIBUCION DE PROBABILIDAD DE VELOCIDADES DE VIENTO	
5.3.1 Introducción	84
5.3.2 La Función de Densidad de Probabilidad	85

CAPITULO 6 – CARACTERIZACION DEL VIENTO

6.1 TURBULENCIA	
6.1.1 Concepto sobre la Turbulencia	91
6.1.2 Origen de la Turbulencia	92
6.1.3 Turbulencia Vertical	95
6.2 GRADIENTE VERTICAL	96
6.2.1 Capa cercana a la Superficie. Ley logarítmica de la Distribución Vertical de la Velocidad del Viento	96
6.2.2 Capa Límite Atmosférica	99
6.2.2.1 Capa de superficie	100
6.2.2.2 Subcapa laminar	102
6.2.2.3 Capa de transición	103
6.3 RACHAS Y TORMENTAS	104
6.3.1 Características Espectrales del Campo Turbulento de Velocidad	105
6.4 ROSA DE LOS VIENTOS	107
6.4.1 Principios Generales de la Medida del Viento en Superficie	107
6.4.2 Dirección del Viento en Superficie – Unidades	107
6.4.3 Medida de la Dirección del Viento en Superficie	108
6.4.4 Velocidad del Viento en Superficie – Unidades	108
6.4.5 Medición y Registro de la Dirección del Viento	109
6.4.6 Estimación de la Dirección del Viento	109
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	111
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	113
LISTA DE PARTICIPANTES	115

INDICE DE TABLAS Y FIGURAS

TABLAS

Pág.

1. Antecedentes Históricos del uso de la Energía Eólica	3
2. Escala Beaufort de la Fuerza del Viento	35
3. Velocidad Media Anual según la Deformación de los Árboles	68
4. Velocidad Media Anual según la Relación de Deformación	68
5. Coeficientes K y C para las curvas de Distribución de Probabilidad de Velocidades de Viento	85
6. Dirección del Viento - Equivalencia en los rumbos de la Rosa de los Vientos	108

FIGURAS

1. Formación de los Vientos	4
2. Componente Zonal del Viento	5
3. Estructura Térmica de la Atmósfera	6
4. Variaciones Estacionales del Campo Térmico	6
5. Relación entre las Escalas Espaciales y Temporales con Fenómenos Típicos Asociados (adaptado de I. Orlanski, 1975)	8
6. Fuerza debida al Gradiente de Presión (descripción)	10
7. Fuerza Gravitacional (descripción)	11
8. Fuerza de Fricción (descripción)	12
9. Fuerza Centrífuga (descripción I)	13
10. Fuerza Centrífuga (descripción II)	14
11. Fuerza de Coriolis (descripción)	14
12. Ecuación de Movimiento (descripción)	16
13. Viento Geostrófico (descripción)	17
14. Brisas de Tierra y de Mar	18
15. Potencia en el Viento	20
16. Curva de Frecuencia de Velocidades	22
17. Curva de Duración de Velocidades	23
18. Volumen de Control de una Turbina Eólica	26
19. Diagrama de bloques para un SCEE	27
20. Características de potencia para diferentes tipos de rotores	28
21. Configuraciones y características de rotores de SCEE	29
22. Configuraciones de rotores de SCEE de Eje Vertical	30
23. Configuraciones de rotores de SCEE de Eje Horizontal	31
24. Anemocinemógrafo de Velocidad Instantánea	41
25. Gráfica de Velocidad del Viento	43
26. Implementación de un Registrador Electrónico	44
27. Registro de Dirección y Velocidad del Viento - Escala de Beaufort	45
28. Rosa de los Vientos	47
29. Análisis de Velocidad del Viento según la Escala de Beaufort	48
30. Gráfico de Distancia Recorrida	49
31. Ejemplo de Gráfico de Distancia Recorrida	50
32. Gráfica de Distribución de Velocidades de Viento	51
33. Registro de Dirección de Viento	52
34. Representación en los Ocho Puntos Cardinales	53
35. Hoja de datos para Registro de Duración de Velocidades	54
36. Distribución de Frecuencia de Velocidades	57
37. Curva de Duración de Velocidades	58
38. Esquemas de los Límites de Transición de un clima a otros mostrando la dirección probable del Viento Adveectivo	64
39. Formación de Dunas	66
40. Esquemas según la escala de Viento basada en la Deformación de los Árboles	67
41. Relación de Deformación	68

42.	Registro de los Intervalos de Duración de Velocidad del Viento	74
43.	Hoja de Datos de Duración de Velocidad del Viento	75
44.	Curvas de Distribución de Probabilidad de Velocidades de Viento	84
45.	Distribución de Probabilidad de Rayleigh	86
46.	Registros Típicos de la Variación Temporal de la Componente Horizontal de la Velocidad del Viento	91
47.	Distribución de la Velocidad de Viento en Altura en condiciones de Estratificación Indiferente (0800), Inestable (1200) y Estable (0200) de la Capa Inferior de la Atmósfera Arys, República de Kazajstan —URSS, 27 Agosto 1945.	98
48.	Capa límite Atmosférica y sus Subdivisiones	100
49.	Efecto de la Fuerza de Fricción en la Capa de Transición	103
50.	Espiral de Ekman	104
51.	Variación de la Dirección y Velocidad del Viento cuando se presenta una Turbonada . .	105

CAPITULO 1 – EL VIENTO COMO FUENTE DE ENERGIA

1.1 ANTECEDENTES HISTORICOS DEL USO DE LA ENERGIA EOLICA

Desde el punto de vista histórico, podemos mencionar que entre los antiguos molinos de viento y los aerogeneradores de la actualidad hay toda una etapa de desarrollo tecnológico.

Si bien no se puede señalar con exactitud en que lugar del mundo se construyó el primer molino de viento, hay razones para creer que fue en Egipto y que los cruzados llevaron la idea desde el Cercano Oriente a Europa. A principios del Siglo XII existían molinos de viento en el norte de Alemania, en los Países Bajos y en Portugal.

En 1430, los Caballeros de la Orden Teutónica usaron molinos de viento en los trabajos de drenaje y desagüe de los pantanos de Vístula. El aprovechamiento del viento se limitó durante siglos a la aplicación en molinos de bombeo y molienda.

La idea de transformar la energía del viento en energía eléctrica parte de las investigaciones del científico danés Paul Le Cour, efectuadas durante el último decenio del siglo pasado. Le Cour se ocupó principalmente de los aspectos aerodinámicos en relación con las aspas de los molinos y llegó así, en cierto modo, a ser uno de los precursores de la aviación moderna y del aprovechamiento eólico—energético, puesto que las reglas por él establecidas permitieron más tarde el perfeccionamiento de las hélices de toda clase, lográndose un máximo grado de acción.

El alemán Kurt Bilau y el norteamericano Halladay, llegaron más lejos. Este último puede considerarse el padre de las ruedas de agua que tanto se utilizan en las zonas rurales. Bilau, en cambio, fue quien concibió la idea de generar energía eléctrica con hélices movidas por el viento: él diseñó y construyó el primer aerogenerador del que se tiene conocimiento, basándose en las ya mencionadas investigaciones del danés Le Cour. De Bilau, quien aceleró sus trabajos durante la Primera Guerra Mundial, parten la mayoría de los proyectos para aprovechar cada vez en mayor escala la energía eólica. Fue en sus ideas que se basaron los trabajos de Schulthes, Melzer, Flettner, Savonius, Leschinski, Wiedmer, Wenk y todos aquellos ingenieros cuyos planos y diseños despertaron entre las dos Guerras Mundiales el interés general por el aprovechamiento de la energía eólica.

Las dificultades técnicas que se presentaron y los costos considerables que hubiera originado la realización de los proyectos de Honneff, Bendmann, Scheller y Kleinzhenz, dilataron el desarrollo general de esta tecnología. Con la Segunda Guerra Mundial y la extraordinaria demanda de energía en todas partes, frente a la escasez de combustibles calóricos, y la necesidad de emplearlos principalmente en la industria química y con los enormes progresos de la aviación, los científicos volvieron a pensar en el aprovechamiento de la energía eólica.

Esta vez partió el movimiento de Inglaterra, al publicar Percy H. Thomas sus obras "Electric Power from the Wind" (Energía Eléctrica del Viento), "The Wind Power Aerogenerator" (El Aerogenerador de Energía Eólica), y "Aerodynamics of the Wind—turbine" (Aerodinámica de la Turbina Eólica). Los libros pre-citados datan de los años 1945, 1948 y 1949 y condujeron, junto con el libro de P.C. Putnam, "Power from the Wind" (Energía Eólica), que resume las experiencias norteamericanas en el terreno, a lo que podríamos llamar el renacimiento de la investigación eólica—energética.

El punto de partida de los nuevos esfuerzos fueron las investigaciones ya realizadas por los alemanes. Los Aliados encomendaron a H.W. Hamm, la recopilación de todo el material disponible, publicando el mencionado ingeniero, el informe titulado "German Wind—Turbine—Projects Planned during the Hitler Era" (Los Proyectos Alemanes de Turbinas Aereas—Proyectos planificados durante la Era de Hitler), que, conjuntamente con la obra del danés Martín Pedersen, "Oversig Over Vindelektricitetsproduktionen fra 1940 til 1948" (Sinópsis de las Producciones de Energía Eólica—Eléctrica desde 1940 a 1948), marcó el nuevo auge en esta disciplina.

Desde el final de la Segunda Guerra Mundial, con la notable escasez de combustible y la extraordinaria demanda de energía, se ha vuelto a volcar en todas partes del mundo el interés de los técnicos sobre la energía eólica.

Tal como sucedió con los antiguos molinos hídricos con respecto a las actuales centrales hidroeléctricas, bien pueden convertirse los viejos molinos de viento en el origen de las futuras centrales eólica—eléctricas de grandes dimensiones. Los posibles desarrollos se encontraron (dadas las recientes experiencias meteorológicas y aerodinámicas) con un clima científico favorable y se vislumbra la posibilidad del aprovechamiento eólico en diferentes escalas.

El ingeniero Palmer C. Putnam en su obra anteriormente citada, ha informado ya hace algunos años sobre los esfuerzos norteamericanos en materia de energía eólica. Putnam diseñó, en íntima colaboración con los profesores Dr. Vannevar Bush y Dr. Theodor Von Karman del Instituto Tecnológico de Massachusetts y los meteorólogos Dr. Sverre Pettersen y Dr. Karl O. Lange, una gran turbina eólica—eléctrica, financiada por una cooperativa eléctrica del Estado de Vermont. La turbina de Putnam tuvo una altura de 53 metros y generaba 1250 KW mediante un generador sincrónico impulsado por engranajes y embragues hidráulicos. Cada una de las aspas del gigantesco molino pesaban ocho toneladas y eran de acero inoxidable, juntas median 36.5 metros de diámetro y soportaron vientos de 115 m/seg. El día 19 de octubre de 1941 comenzó a funcionar con buenos resultados, llegando a generar 700 KW. El aerogenerador fue conectado luego con la red hidroeléctrica del estado de Vermont, llegó a producir hasta 1500 KW y trabajó perfectamente hasta febrero de 1943, mes en que sufrió una avería y dejó de funcionar.

El trabajo de Putnam ha sido de extraordinaria importancia para los esfuerzos eólico—energéticos de todo el mundo, pues hoy sabemos que las centrales eólicas no son una utopía técnica sino posibilidades al alcance del hombre.

En Inglaterra, la "British Electrical and Allied Industries Research Association" (Asociación Británica y Aliada de Investigación Eléctrica e Industrial) publicó el informe preliminar del ingeniero E.W. Golding, sobre la generación aerodinámica en gran escala, realizado en Gran Bretaña.

En Alemania, se construyeron equipos pequeños según el sistema del Dr. Huetter. También Porsche, Voigt y otros han diseñado instalaciones útiles medianas y pequeñas.

En Dinamarca, siguiendo la tradición de Le Cour, se desarrollaron aerogeneradores cuya potencia oscila entre 30 y 70 KW.

Esta breve reseña a título informativo comprende lo realizado hasta la década de los 50, actualmente hay muchas publicaciones de distintos países en donde se encuentran reseñas de actividades hasta el presente, entre las que podemos mencionar "Wind Machines" (Máquinas de Viento) reporte preparado por la "National Science Foundation" (Fundación Nacional de Ciencia) (Ver referencias).

Los esfuerzos y antecedentes que se señalaron se extienden a muchos países. Particularmente en los últimos años, en algunos de América Latina, de ahí que es importante encausar esfuerzos para planificar adecuadamente esta problemática.

Entre los aspectos a considerar para la utilización del viento con fines energéticos aparece como prioritario el reconocimiento y estudio previo del mismo. Para tomar decisiones, las investigaciones meteorológicas y la información correcta que de ellos se deriven, significa un factor económico de fundamental interés.

En el desarrollo de este Curso Seminario se tratarán diversos aspectos del comportamiento de la atmósfera, dirigidos al estudio y evaluación del recurso eólico.

A continuación se muestra una Tabla de antecedentes históricos del uso de la energía eólica.

TABLA 1

ANTECEDENTES HISTORICOS DEL USO DE LA ENERGIA EOLICA

2000 AC	(?) Uso de molinos de viento por chinos y japoneses
1700 AC	(?) En Babilonia son empleados los molinos de viento para la irrigación.
100 AC	(?) Uso de molinos de viento en Egipto.
600's	Uso de molinos de viento Persas (tipo eje vertical)
900's	Ruedas de viento horizontales son empleadas en la irrigación de los jardines persas.
1105	Es extendido un documento francés permitiendo la construcción de molinos de viento.
1191	Primer molino de viento reportado en Inglaterra
1200's	Velas verticales sostenidas por pilares y torres empleadas para la molienda de granos para los propietarios de tierras europeas y para campesinos.
1349	Bronce Flamenco sobre el cual se encuentra ilustrado un molino de viento en la Iglesia de Sta. Margarita, Kingslynn.
1390	Cuadro referente a un molino de viento sobre lienzo en el Museo Alemán de Nuremberg.
1500	Bosquejo de Leonardo da Vinci sobre la construcción de un molino de Viento.
1600's	Los colonizadores construyen molinos de viento al estilo de los europeos sobre los litorales orientales de América.
1700's	Las máquinas de vapor comienzan a desplazar el uso de las ruedas accionadas por viento.
1745	Edmund Lee patenta el método de direccionamiento automático de los molinos.
1870's	Chicago se convierte en el centro de la industria de molinos de viento.
1891	Establecimiento de una estación experiemetal en Askov, Dinamarca, por el Profesor P. Le Cour.
La Mitad del Siglo XX	Desarrollo de molinos de viento para la generación de electricidad y abastecimiento de agua.
Post. Guerra Mundial	Investigaciones en varios países encaminadas a la utilización, en gran escala, de la energía del viento.
1950's	La Energía Atómica disminuye el interés sobre el uso de la energía del viento.
1970's	La Escasez de energéticos revive el interés sobre el aprovechamiento de la energía del viento.

1.2 NATURALEZA DEL VIENTO

1.2.1 Descripción Cualitativa de la Atmósfera en Escala Planetaria o Global

Consideramos el sistema más sencillo posible de distribución de las variables atmosféricas: el que resulta de suponer una superficie terrestre lisa y homogénea. Si a pesar de la distribución de los continentes y océanos, así como la topografía, alterar en los campos que resulten de esta suposición, este sistema es adecuado como primera aproximación y permite fijar ideas sobre el comportamiento en escala global de la atmósfera. En este caso no habrá variación longitudinal de los campos promedios.

Como el sistema tierra-atmósfera está mecánicamente aislado, deberá conservarse el impulso angular total. La atmósfera y la tierra interactúan mecánicamente por medio del rozamiento: si el viento es del oeste, la atmósfera entrega impulso a la tierra (ya que se mueve más rápido que ella para un observador absoluto) y si el viento es del este, la atmósfera recibe impulso de la tierra. En un intervalo largo de tiempo no podrá existir un transporte neto de impulso de la tierra a la atmósfera o viceversa, pues de lo contrario cambiaría la velocidad de rotación de la tierra notablemente. Como esto no ocurre deberán existir bandas planetarias de vientos con componentes este y oeste en superficie, en forma alternada.

En las zonas tropicales la tierra tiene una velocidad tangencial mayor que la atmósfera, apareciendo en la superficie bandas de viento **este**, definiendo los alisios del noreste en el hemisferio norte y del sudeste en el sur, como muestra la figura 1.

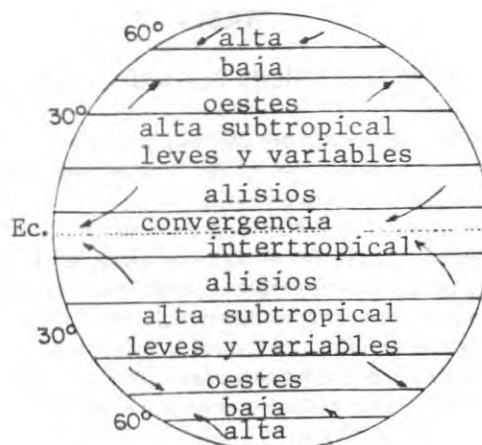


Figura 1 — Formación de los Vientos

Los alisios convergen hacia el Ecuador donde se encuentra una zona de vientos suaves llamada convergencia intertropical.

A los 30° de latitud (norte y sur) la tierra y la atmósfera se mueven aproximadamente a la misma velocidad y por lo tanto aparecen bandas de calmas o vientos suaves y variables. En las latitudes medias (30° a 60° de latitud aproximadamente), aparecen cinturones de viento oeste. En latitudes extremas se encuentran estos polares. Las zonas límites entre las oestes en latitudes medias y los estes polares no son de calma sino tempestuosas, con vientos variables.

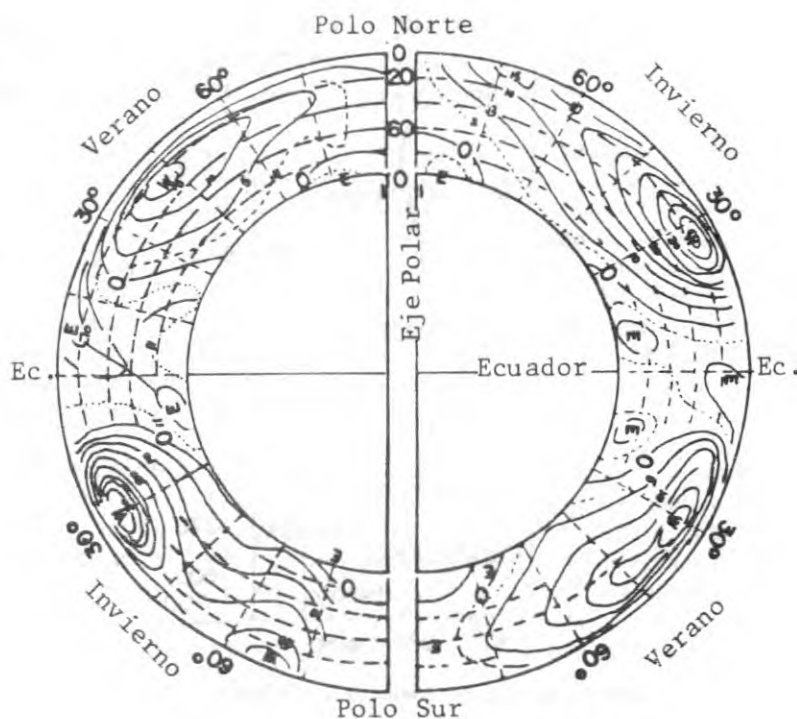
En cuanto al campo de presión, las isobaras coincidirán con los paralelos en el esquema expuesto en la Figura 1, comprendiendo: una banda de bajas presiones relativas en el Ecuador, llamada cinturón ecuatorial; una banda de alta presión en los 30° de latitud (norte y sur), llamada cinturón de altas subtropicales; una banda de bajas presiones en aproximadamente 60° de latitud llamada cinturón de bajas subpolares.

El efecto de la rotación terrestre hace que la circulación de los vientos en el sistema de bajas subpolares sea en el sentido de la rotación terrestre (en ambos hemisferios), llamado sentido ciclónico, y en el sistema de altas subtropicales, en el sentido contrario a la rotación terrestre o anticiclónico. De allí el nombre de ciclones y anticiclones para los centros de baja y alta presión, respectivamente, en las latitudes medias y altas.

Respecto al campo térmico las isotermas coincidirán con los paralelos existiendo un mayor contraste térmico en las latitudes medias.

Lo descrito anteriormente se aplicaría a los equinoccios; en las distintas estaciones las bandas planetarias seguirán el movimiento anual del sol, es decir, se desplazarán hacia los polos del hemisferio respectivo en el verano, y hacia el Ecuador en el invierno.

Estudiaremos ahora, en un corte meridional (Figura 2), la componente zonal del viento, para distintos niveles de presión y para diferentes latitudes, promediada en longitud para invierno y verano en ambos hemisferios. Allí se representa, en intensidad y dirección, la componente zonal promedio del viento mediante isotacas (Líneas de igual velocidad del viento en metros por segundo).



(Mintz, 1954)

Figura 2 — Componente Zonal del Viento

Las componentes oeste serán positivas y las este negativas. Las características más sobresalientes comprenden:

a) La existencia de un máximo de viento oeste muy pronunciado en ambos hemisferios y estaciones de año, situado aproximadamente en el nivel bórico de 200 mb (mb = milibares) (correspondiente a una altura de 12 Km aproximadamente y alrededor de 30° de latitud), con velocidades promedio hasta de 40 m/seg. Este máximo se encuentra directamente por encima de los cinturones de altas subtropicales y se denomina "corriente en chorro" (subtropical). Esta corriente es más intensa en el hemisferio sur si se comparan los correspondientes campos estacionales.

b) La existencia de viento del este en todos los niveles en las áreas ecuatoriales y en niveles bajos en áreas polares.

c) La inclinación de los ejes de los anticiclones subtropicales (dados por las isotacas de valor cero) hacia las zonas calientes a medida que se asciende y la de los ejes de las bajas subpolares hacia las zonas frías.

d) El movimiento estacional de los máximos de viento siguiendo al sol, apareciendo en el invierno de los respectivos hemisferios un máximo secundario (corriente en Chorro polar).

Estudiaremos la estructura térmica de la atmósfera en un promedio anual para todas las latitudes (Figura 3). La tropósfera es la capa inferior, en la que la temperatura disminuye con la altura alcanzando un mínimo que define la tropopausa. Sobre la tropopausa se encuentra la estratósfera, donde la temperatura aumenta (o al menos no disminuye) con la altura. La estratósfera se extiende desde la tropopausa hasta la estratopausa que, a una altura de 50—60 Km, tiene una temperatura que varía entre -10 y +20° Celsius. Luego aparecen otras capas, definidas también por su estructura térmica llamadas mesósfera y termósfera. (También es usual definir la ozonósfera como la región de máxima concentración de ozono, situada entre los 20 y 25 Km de altura). La tropósfera es la zona donde se producen los fenómenos de tiempo meteorológico (nubes, lluvia, etc.) y la mayor parte de la masa atmosférica se encuentra en ella.

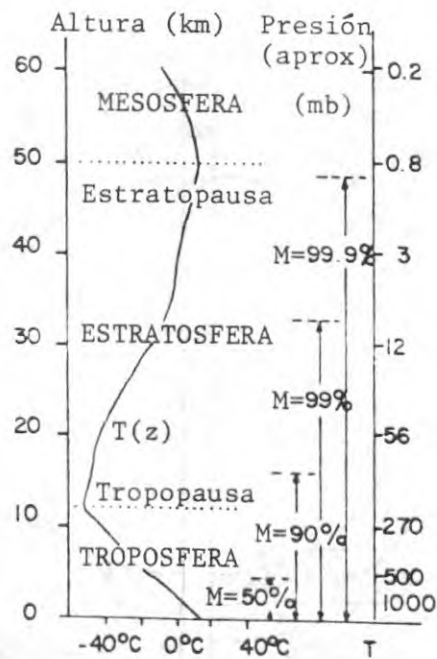


Figura 3 — Estructura Térmica de la Atmósfera

Las variaciones estacionales del campo térmico promediado a lo largo de círculos de latitud se muestran en la Figura 4.

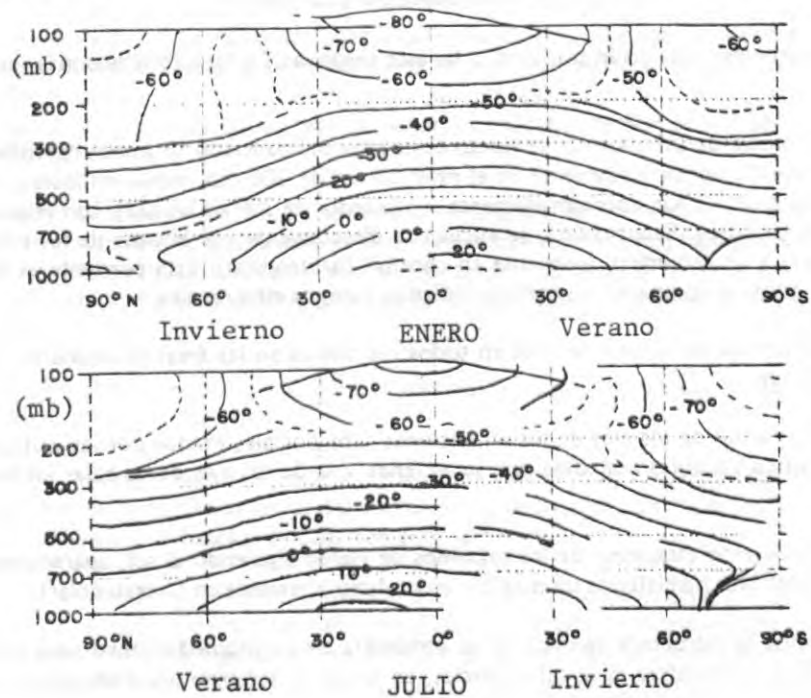


Figura 4 — Variaciones Estacionales del Campo Térmico

Se observan como características salientes:

- a) La variación latitudinal en la altura de la tropopausa, siendo la tropopausa ecuatorial mucho más alta y más fría que la polar.

b) El contraste térmico horizontal en las latitudes medias es mucho mayor en el invierno que en el verano (visualizado a través de la inclinación de las líneas isotermas). Nótese que este contraste coincide en posición con las correspondientes corrientes en chorro.

En la atmósfera real los sistemas sinóptico—planetarios que aparecen en los mapas diarios, rara vez se asemejan a estos flujos zonales promedio que hemos presentado, ya que son generalmente asimétricos, concentrando los mayores contrastes térmicos y los vientos más fuertes en altura a lo largo de bandas estrechas, zonas límites entre masas frías y calientes, denominadas frentes. Más aún, el flujo planetario se encuentra influenciado por la topografía y los contrastes térmicos producidos por la distribución de continentes y mares, particularmente en el hemisferio norte. No es entonces enteramente exacto considerar los sistemas sinópticos (cyclones y anticiclones y las ondas en altura asociadas a ellos) como perturbaciones superpuestas a un movimiento zonal que varíe solamente con la latitud y con la altura. Sin embargo este esquema es muy útil como primera aproximación en el análisis teórico de las ondas sinópticas.

En las cartas sinópticas diarias se observa que las circulaciones en superficie (más débiles en verano que en invierno) consisten en vórtices o torbellinos ciclónicos, asociados con centros de baja presión, y vórtices anticiclónicos más débiles asociados con centros de alta presión. Los vórtices ciclónicos se identifican claramente como espirales nubosas en las imágenes del globo terrestre obtenidas por intermedio de satélites meteorológicos. Los vórtices principales pueden verse hasta en las cartas de nivel de 500 mb (aproximadamente 5.5 Km), algo desplazados hacia el oeste e inmersos en un flujo del oeste. Estas ondas migratorias o progresivas son eliminadas cuando se efectúan los promedios que llevan a las distribuciones mostradas.

De todas formas las distribuciones promediadas zonalmente dan una buena información sobre las características típicas de la circulación en escala planetaria.

1.2.2 Movimiento Atmosférico

Los movimientos atmosféricos ocurren en un amplio espectro de escalas espaciales y temporales que van desde el movimiento molecular hasta aquellos que dominan la circulación general.

La dinámica de la atmósfera es el estudio de los movimientos de esta, asociados directamente con los fenómenos del tiempo en todas sus escalas.

Para todos los movimientos, la atmósfera es considerada como un fluido o medio continuo.

El punto de partida de la meteorología dinámica surge de la aplicación de las leyes de la hidrodinámica y de la termodinámica de la atmósfera.

La aplicación de estas leyes permiten obtener sistemas de ecuaciones de alto grado de complejidad que incluyen todas las escalas.

Para poder tratar movimientos de interés, dicho sistema debe ser debidamente simplificado a través de técnicas de análisis de escala.

No es objetivo de este Curso—Seminario hacer un estudio exhaustivo de tal sistema y desarrollar técnicas del análisis de escala.

A los efectos del objetivo que se persigue se hará lo siguiente:

1.2.2.1 Breve descripción de las distintas escalas

1.2.2.2 Ecuación de movimiento

1.2.2.2.1 Fuerzas fundamentales

- a. Fuerza debida al gradiente de presión
- b. Fuerza gravitacional
- c. Fuerza de fricción

1.2.2.2.2 Fuerzas aparentes

- d. Fuerza centrífuga
- e. Fuerza de Coriolis

1.2.2.2.3 Expresión de la ecuación de movimiento (breve descripción).

1.2.2.3 Aproximación geostrófica y viento geostrófico

1.2.2.1 Breve descripción de las distintas escalas

Las distintas perturbaciones o fenómenos meteorológicos, que ocurren en diferentes períodos de tiempo o "bandas" dan lugar a una clasificación de rangos espaciales que tradicionalmente se dividen en fenómenos de:

- Microescala
- Mesoescala
- Escala sinóptica
- Escala planetaria

En la Figura 5, se muestran los límites aproximados de estas bandas, los fenómenos que comprenden, así como su relación espacio-temporal.

		T				
		L	mes	día	hora	min. seg.
MACROESCALA	Planetaria 10 000 km	OE CC	OUL	OM		
	Sinóptica 2000 km		OB			
MESOESCALA	200 km		F H			
	20 km			LI OI GN PM		
	2 km				T OGI TAC EU	
	200 m				To CP OGC	
MICROESCALA	20 m					TP Te
						P T

Figura 5 — Relación de las Escalas Espaciales y Temporales con fenómenos típicos asociados (adaptado de I. Orlandi, 1975)

LEYENDA

OE:	Ondas estacionarias	TP:	Torbellinos de polvo
OUL:	Ondas ultra largas	TU:	Turbulencia
OB:	Ondas baroclínicas	CC:	Cambio climático
H:	Huracanes	OM:	Ondas de marea
OI:	Ondas inerciales	F:	Frentes
PM:	Perturbaciones de montaña	LI:	Líneas de inestabilidad
T:	Tormentas	GN:	Grupos nubosos
TAC:	Turbulencia en aire claro	OGI:	Ondas de gravedad inercia
EU:	Efectos urbanos	To:	Tornados
CP:	Convección profunda	Te:	Térmicas
OGC:	Ondas de gravedad cortas	P:	Plumas

1.2.2.2 Ecuación de movimiento

La segunda Ley de Newton establece que la aceleración que sufre un cuerpo, referida a un sistema fijo de coordenadas, multiplicada por la masa del mismo es igual a la sumatoria de todas las fuerzas que sobre él actúan, es decir:

$$\sum_i \vec{F}_i = m \cdot \vec{a} \quad (1)$$

Para los movimientos de interés meteorológico, las fuerzas que debemos considerar actuando sobre un elemento de masa del fluido gaseoso son:

- a. La fuerza debida al gradiente de presión
- b. La fuerza gravitacional
- c. La fuerza de fricción

A éstas las denominamos **fuerzas fundamentales**. Si nos referimos a un observador fijo a la tierra y por el hecho de que el fluido gaseoso que consideramos es rotante, debemos introducir otras fuerzas que denominamos **fuerzas aparentes**, que son:

- d. La fuerza centrífuga
- e. La fuerza de Coriolis

A continuación identificamos dichas fuerzas a fin de establecer la ecuación del movimiento.

1.2.2.2.1 Fuerzas fundamentales

a. Fuerza debida al gradiente de presión

Considerando un elemento de volumen $\partial V = \partial x \cdot \partial y \cdot \partial z$ centrado en el punto X_0, Y_0, Z_0 (ver Figura 6).

Por el movimiento molecular, continuamente se transfiere momento a las paredes de dicho elemento de volumen.

Este momento transferido por unidad de tiempo y área, es precisamente la presión ejercida sobre las paredes del elemento de volumen por el aire del entorno.

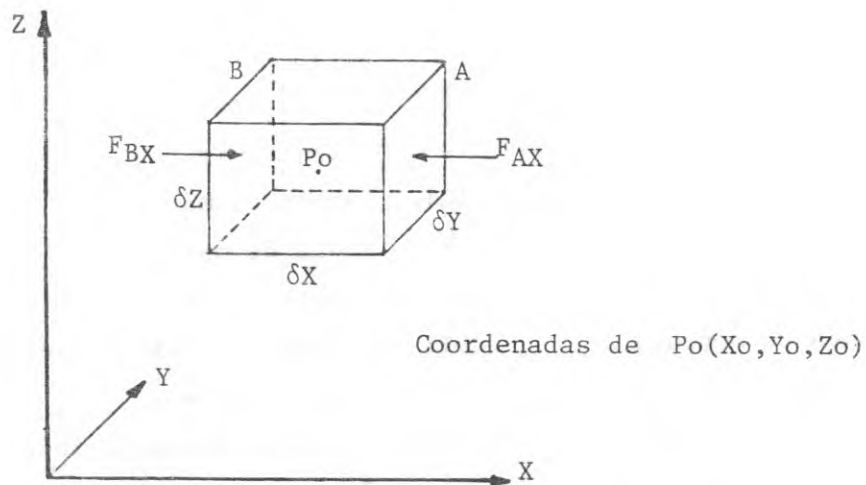


Figura 6 — Fuerza debida al gradiente de presión (descripción)

Si la presión en el centro es P_o , es válido que en la pared A la presión será: (por expansión según Taylor).

$$P_o + \frac{\partial p}{\partial x} \cdot \frac{\delta x}{2} + \text{Términos de orden superior (se desprecian)}$$

entonces, la fuerza de presión sobre la pared A será:

$$F_{AX} = - \left(P_o + \frac{\partial p}{\partial x} \cdot \frac{\delta x}{2} \right) \cdot \delta y \delta z$$

y sobre la pared B:

$$F_{BX} = + \left(P_o - \frac{\partial p}{\partial x} \cdot \frac{\delta x}{2} \right) \cdot \delta y \delta z$$

luego la componente neta de la fuerza de presión según x será:

$$F_X = F_{AX} + F_{BX} = - \frac{\partial p}{\partial x} \delta x \cdot \delta y \cdot \delta z$$

y por unidad de masa:

$$\frac{F_X}{m} = \frac{- \frac{\partial p}{\partial x} \cdot \delta x \delta y \delta z}{\rho \delta V} = - \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial x}$$

ésta es la fuerza debida al gradiente de presión por unidad de masa según la dirección X

Idénticamente:

$$\frac{F_Y}{m} = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y}$$

$$\frac{F_z}{m} = - \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial z}$$

Se ve claramente que dichas componentes están dirigidas desde las mayores a las menores presiones (observar el signo -)

En forma vectorial puede escribirse:

$$\frac{\vec{F}}{m} = - \frac{1}{\rho} \cdot \vec{\nabla} p \quad (2)$$

donde $\vec{\nabla} = \frac{\partial}{\partial x} \vec{i} + \frac{\partial}{\partial y} \vec{j} + \frac{\partial}{\partial z} \vec{k}$ es denominado operador NABLA.

b. Fuerza gravitacional

Según la Ley de Gravitación universal de Newton, la fuerza de atracción entre dos elementos de masa M y m, separados por una distancia r será:

$$|\vec{F}_g| = - \frac{G.M.m}{r^2}, \text{ donde G es la constante universal.}$$

o vectorialmente:

$$\vec{F}_g = - \frac{G.M.m}{r^2} \left(\frac{\vec{r}}{|\vec{r}|} \right)$$

si designamos:

M = masa de la tierra

m = masa de un elemento de la atmósfera, tendremos:

$$\frac{|\vec{F}_g|}{m} = - \frac{G.M.}{r^2}$$

y:

$$\frac{\vec{F}_g}{m} = - \frac{G.M.}{r^2} \left(\frac{\vec{r}}{|\vec{r}|} \right) \quad (3)$$

la Figura 7, muestra el sentido de $\vec{F}_g$:

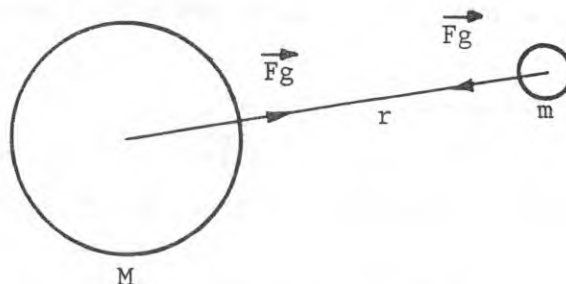


Figura 7 — Fuerza gravitacional (descripción)

c. Fuerza de fricción.

Como expresamos al comienzo, se pretende a través de este tratamiento, fijar tan solo algunos lineamientos generales y en particular una discusión completa de la fuerza de fricción o fuerza debida a la viscosidad, es bastante compleja por lo que se dará el concepto físico ilustrado en forma sencilla.

Consideramos una capa de fluido incomprensible entre dos placas horizontales separadas por una distancia ℓ como se indica en la Figura 8.

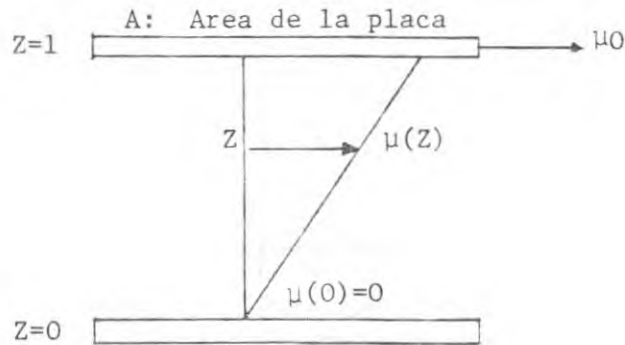


Figura 8 - Fuerza de fricción (descripción)

La placa inferior la consideramos fija y la superior móvil, desplazándose a una velocidad μ_0 .

Se encuentra que la fuerza tangencial aplicada para que ello ocurra es:

$$F = \mu \cdot \frac{A \cdot \mu_0}{\ell}$$

donde μ , que es una constante de proporcionalidad, se denomina coeficiente de viscosidad dinámica.

Entonces, en el límite, podemos definir a la fuerza por unidad de área o tensión de corte como:

$$\frac{F}{A} = \mu \frac{\partial \mu}{\partial z}$$

y puede demostrarse que la fuerza neta viscosa por unidad de masa sobre un elemento de volumen según la dirección X es:

$$\frac{F \text{ viscosa } X}{m} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \left(\frac{\partial \mu}{\partial z} \right) \right] \quad (4)$$

Si μ es constante y llamando $\nu = \frac{\mu}{\rho}$, como coeficiente de viscosidad cinemática, se tiene que:

$$\frac{F \text{ viscosa } X}{m} = \nu \frac{\partial^2 \mu}{\partial z^2} \quad (5)$$

Para la atmósfera por debajo de los 100 km, ν es pequeña y la fuerza de fricción se desprecia respecto de las demás.

No obstante, en la denominada capa límite de la atmósfera (primer kilómetro de la atmósfera en contacto con el suelo) si debemos considerarla, y por ello las expresiones para calcular V (velocidad del viento) toman formas distintas que las derivadas en la denominada atmósfera libre (por encima del primer kilómetro). A estas cuestiones nos referimos más adelante.

1.2.2.2 Fuerzas aparentes.

Cuando se trata el movimiento atmosférico, es natural considerar un sistema de referencia fijo a la tierra rotante.

La segunda Ley de Newton, establece que un elemento de masa de movimiento uniforme relativo a un sistema de referencia fijo en el espacio quedará en movimiento uniforme en ausencia de fuerzas. Se dice que dicho movimiento está referido a un **SISTEMA INERCIAL** y al sistema de referencia se le llama **INERCIAL** o **NEWTONIANO**.

Es claro que un objeto en reposo respecto de la tierra rotante, no está ni en reposo ni en movimiento uniforme respecto a un sistema de referencia fijo en el espacio.

Por lo tanto, el movimiento que aparece como inercial para un observador en un sistema de referencia fijo en la tierra rotante es, realmente un movimiento acelerado.

En consecuencia, un sistema de referencia rotante es un sistema **NO-NEWTONIANO**. Las leyes de Newton son aplicables tan solo si la aceleración de las coordenadas son tenidas en cuenta y ésto se hace introduciendo **fuerzas aparentes**, éstas son, en nuestro caso: la fuerza centrífuga y la fuerza de Coriolis.

d. Fuerza centrífuga

Consideramos una masa en la punta de un hilo de longitud r girando a una velocidad angular constante ω (Figura 9).

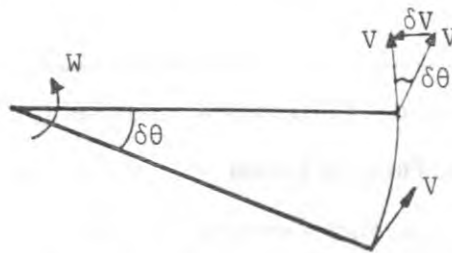


Figura 9 — Fuerza centrífuga (descripción I)

puede verse que:

$$\frac{|\partial \vec{V}|}{|\vec{V}|} = \tan \partial \theta$$

cuando: $\partial \theta \rightarrow 0 \quad \tan \partial \theta \rightarrow \partial \theta$ y entonces

$$|\partial \vec{V}| = |\vec{V}| \cdot \partial \theta$$

Dividiendo por ∂t

$$\frac{\partial \vec{V}}{\partial t} = |\vec{V}| \frac{\partial \theta}{\partial t} \left(-\frac{\vec{r}}{|\vec{r}|} \right)$$

y a esta aceleración se le llama centrípeta, que es la que detecta un observador desde el sistema fijo.

Si observamos desde un sistema fijo al elemento que rota, es claro que la partícula está estacionaria, pero aún actúa la "fuerza del hilo".

Luego, para aplicar la segunda Ley de Newton para describir el movimiento relativo al sistema rotante, debemos incluir una fuerza adicional aparente a la que llamamos **fuerza centrífuga** que equilibra a la centrípeta.

Entonces, una partícula de masa m , que está en reposo sobre la superficie terrestre, observada desde un sistema rotante con la tierra, está sujeta a una fuerza centrífuga.

$$\vec{F}_{cfg} = m \Omega^2 \vec{R} \quad (6)$$

donde Ω es la velocidad angular de la tierra y podemos definir la gravedad efectiva.

$$\vec{g}_e = \vec{g} + \Omega^2 \vec{R} \quad (7)$$

y se tiene según la Figura 10.

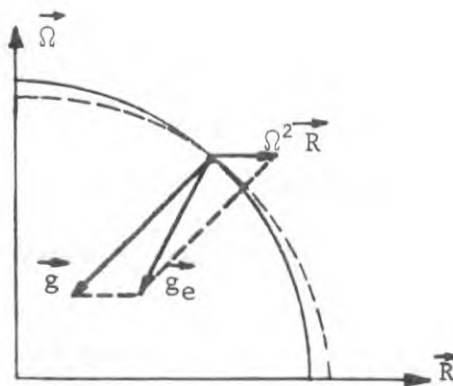


Figura 10 — Fuerza centrífuga (descripción II)

e. Fuerza de Coriolis

Es una fuerza originada por la rotación terrestre. Se supone un observador en el Polo Norte (Figura 11) que en un instante dado lanza una partícula hacia un objeto situado en A. La partícula se desplaza según la dirección OA, y al llegar a A el objeto se habrá desplazado debido a la rotación terrestre ocupando la posición B. Un observador que se desplaza con el objeto ve que la partícula es desviada hacia su derecha durante su recorrido y éste es el efecto de la denominada Fuerza de Coriolis o debida a la rotación terrestre.

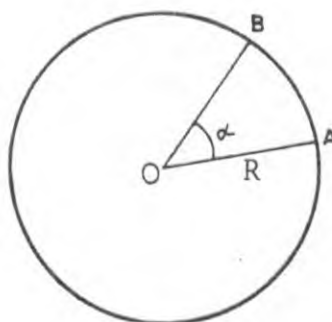


Figura 11 — Fuerza de Coriolis (descripción)

Como la velocidad angular de la tierra es Ω , si t es el tiempo en que el objeto se desplazó de A a B, se tiene que:

$$\alpha = \Omega t$$

Además, si v es el módulo de la velocidad de la partícula:

$$R = vt$$

donde R es el radio de la tierra.

Entonces, la longitud del arco AB está dada por:

$$\widehat{AB} = \Omega v t^2$$

Esto puede explicarse suponiendo la existencia de una aceleración a que actúa perpendicularmente a la trayectoria provocando una desviación

$$\frac{1}{2} a t^2$$

donde:
$$\frac{1}{2} a t^2 = \Omega v t^2$$

entonces:
$$a = 2 \Omega v$$

Esto vale para el Polo Norte, puede demostrarse que para una latitud ϕ se tiene:

$$a = 2 \Omega v \sin \phi$$

Si se hubiera mostrado este ejemplo para el Hemisferio Sur, valdrían las mismas expresiones y la desviación debida al efecto Coriolis sería hacia la izquierda de la trayectoria.

Se puede entonces expresar el módulo de la Fuerza de Coriolis por unidad de masa mediante:

$$\left| \frac{\vec{F}_c}{m} \right| = 2 \Omega v \sin \phi$$

o vectorialmente:

$$\frac{\vec{F}_c}{m} = - 2 \vec{\Omega} \times \vec{V} \quad (8)$$

1.2.2.2.3 Expresión de la ecuación de movimiento (breve descripción).

Para un sistema rotante, de acuerdo a las fuerzas descritas anteriormente, la forma es:

$$\frac{d\vec{v}}{dt} = - \frac{1}{\rho} \nabla p + \vec{g}_e - 2 \vec{\Omega} \times \vec{V} + \vec{F}_{roz} \quad (9)$$

Si se adapta al sistema tal como muestra la Figura 12, pueden hallarse las componentes de dicha ecuación.

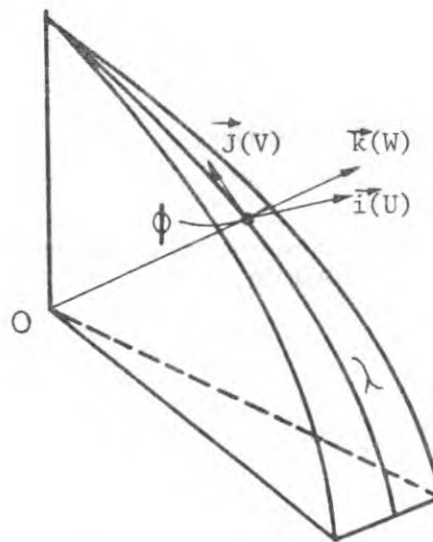


Figura 12 — Ecuación de movimiento (descripción)

En particular, sin considerar $\vec{g}_e$ y $\vec{F}_{roz}$ la parte horizontal es:

$$\frac{d\vec{V}_h}{dt} = -\frac{1}{\rho} \nabla_H p - f \vec{k} \times \vec{V}_h \quad (10)$$

donde $\vec{V}_h$ es la parte horizontal del vector velocidad

$$\nabla_H = -\frac{\partial}{\partial x} \vec{i} + \frac{\partial}{\partial y} \vec{j} + \frac{\partial}{\partial z} \vec{k} \quad \text{es el operador}$$

NABLA horizontal.

1.2.2.3 Aproximación geostrófica y viento geostrófico

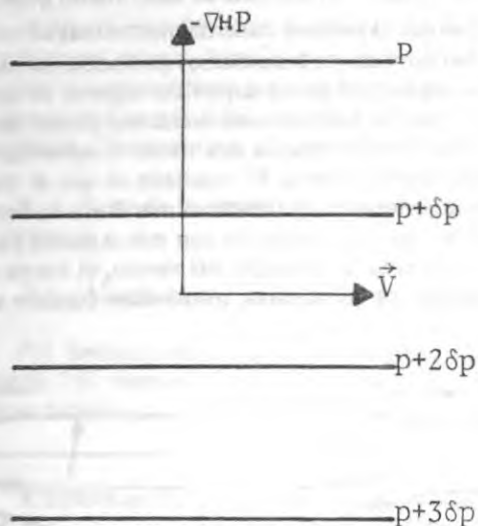
Es una aproximación en escala sinóptica cuando se considera despreciable la aceleración $d\vec{V}_h/dt$ en la ecuación de movimiento horizontal.

Entonces, si se supone despreciable la aceleración horizontal, se tiene:

$$\begin{aligned} -f \vec{k} \times \vec{V}_h - \alpha \nabla_H p &= 0 \quad \vec{k} \times \vec{V}_h = -\frac{\alpha}{f} \nabla_H p \\ \vec{V}_h &= -\frac{\alpha}{f} \nabla_H p \times \vec{k} \end{aligned} \quad (11)$$

Esta velocidad obtenida, suponiendo equilibrio entre la fuerza de Coriolis y la de presión, se denomina **Viento Geostrófico**. La ecuación muestra que el viento geostrófico es paralelo a las isobaras, en superficie de altura constante. Considerando además, que $f = 2 \Omega \sin \phi$, es positivo en el hemisferio Norte y negativo en el hemisferio Sur, debido al $\sin \phi$; deducimos además, que el viento geostrófico deja las bajas presiones a la izquierda del sentido de su movimiento, en el hemisferio Norte y a la derecha en el hemisferio Sur. Tal cual como se presenta en la Figura 13.

H.N.



H.S.

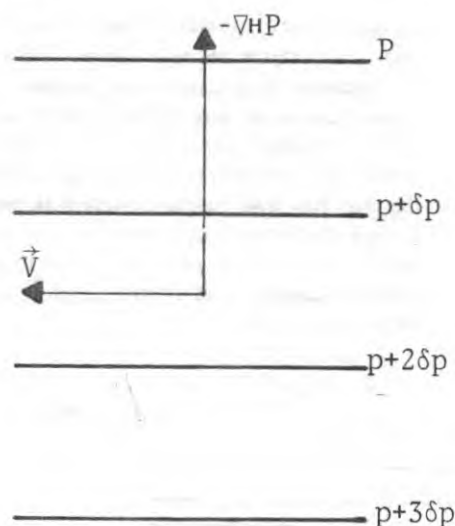


Figura 13 — Viento Geostrófico (descripción)

Mediante esta expresión del viento geostrófico (ecuación 11) se puede ver la estrecha relación que tiene éste con la distribución horizontal de isobaras en escala sinóptica.

Como se expresó anteriormente, no es intención hacer análisis exhaustivos de las cuestiones que se tratan y en este sentido el lector puede dirigirse a los textos y artículos señalados en las Referencias.

La aproximación geostrófica que se acaba de mostrar no es válida en latitudes ecuatoriales, pues en esos lugares f es cero ($\phi = 0$) o tiende a cero (ver por ejemplo Necco, 1980).

1.2.3 Sistemas de Vientos Locales

Aunque un viento cualquiera se designa por su dirección y su velocidad, algunos vientos se denominan con nombres particulares. Algunos sistemas locales de viento son de interés general. Unos se desarrollan como resultado del calentamiento desigual de la tierra y el mar; otros tienen su causa en el calentamiento y enfriamiento de laderas de montañas, y un tercer grupo está relacionado con la deformación de las corrientes de aire al cruzar las cordilleras.

1.2.3.1 Brisas de montaña y valle

Durante las horas de sol en la ladera de una montaña, el aire en contacto con ella se calentará más de prisa que el aire a cierta altura sobre la misma. Este diferente calentamiento establece una circulación que es análoga a la de las brisas de mar. El aire se mueve hacia arriba sobre la ladera de la montaña durante el día, y hacia abajo durante la noche. Si el terreno tiene una configuración tal que existen en él valles convergentes, el aire fresco afluirá por los lechos de los valles, acelerándose hacia abajo, y se encauzará en el valle principal, de lo que puede resultar que el viento por la noche, en tales lugares, sea más fuerte que la brisa del día.

La intensidad de este tipo de circulaciones está supeditada a la escala sinóptica.

1.2.3.2 Brisas de tierra y de mar

Frecuentemente se observa en los días calurosos que el viento sopla cruzando la línea de la costa, de mar a tierra durante el día y en sentido contrario durante la noche. Estos vientos afectan a una capa de muy poco espesor según las condiciones particulares. Su alcance horizontal depende de la latitud y también de factores locales.

En la Figura 14 se muestra la estructura general de las brisas de tierra y de mar. Por la mañana es pequeña la diferencia de temperatura entre la tierra y el mar, y en ausencia de todo viento general, las superficies isobaras serían horizontales. Cuando sale el sol, la tierra se calienta mucho mas de prisa que la superficie del mar debido a la diferente capacidad térmica y a los procesos de mezcla del mar, y el espesor de la capa entre isobaras crece sobre tierra, de manera que la superficie superior de igual presión adquiere una inclinación desde la tierra hacia el mar. Se establece una fuerza horizontal debida a la presión, que acelera el aire de tierra a mar, y esta transferencia de aire tiende a aumentar la presión al nivel del mar fuera de la costa y a disminuirla sobre la tierra. El resultado es que al nivel del mar hay una fuerza debida a la presión que tiende a acelerar el aire desde el mar hacia la tierra. En sus comienzos, una brisa de mar sopla atravesando las isobaras, las cuales son más o menos paralelas a la costa; sin embargo, cuando pasa el tiempo y aumenta la velocidad del viento, el efecto de Coriolis aparece y el viento tiende a colocarse en el sentido de las isobaras, poniéndose paralelo a la línea de la costa.

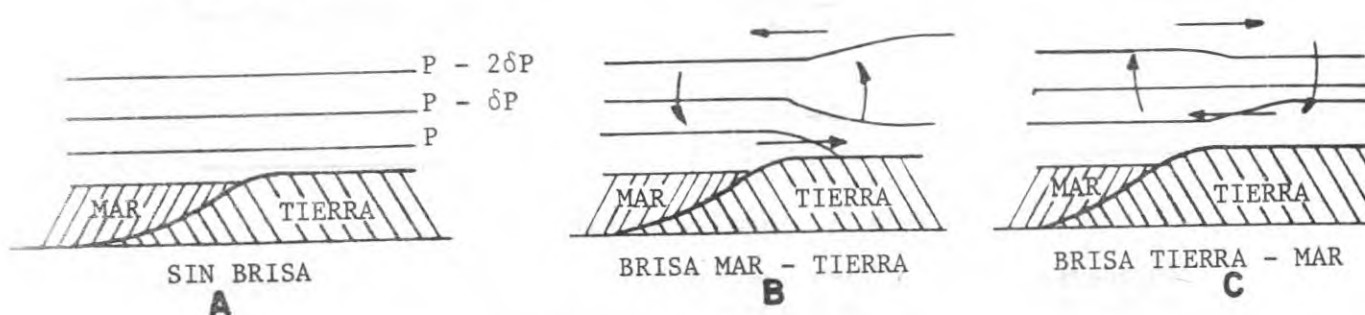


Figura 14 — Brisas de Tierra y de Mar

Por la tarde, cuando la tierra se enfría por pérdida de radiación, desaparece el contraste de temperaturas y no hay brisa. Durante la noche, cuando la tierra está más fría que el mar, se origina un flujo de tierra a mar, que se llama brisa de tierra.

El efecto de brisa es pronunciado con condiciones de calma a escala sinóptica. Si en dicha escala hay fuertes vientos, el efecto de brisa no es notorio. La intensidad y penetración de una brisa también dependen de la latitud terrestre.

1.2.3.3 Vientos de drenaje

Durante la estación fría, se acumularán grandes cantidades de aire frío sobre las altiplanicies y zonas de tierra rodeadas por montañas. Parte de este aire fluirá hacia abajo por las laderas, acumulándose en valles y fiordos y llegando a la costa como una brisa moderada y débil. Sin embargo, cuando se aproxima una perturbación móvil, tal como un sistema de presiones bajas, el aire frío será acelerado a través de las grietas de las montañas, valles y cañones, y llegará como una cascada de aire frío, con vientos fuertes. Aunque el aire se calentará adiabáticamente mientras desciende normalmente, la diferencia de temperatura entre la costa y el interior será tan grande que el aire llegará a la costa como una corriente fría. Estos vientos son particularmente fuertes y a veces destructivos, cuando un gran remanente de aire frío ha de vaciarse a través de una estrecha grieta o valle, o cuando convergen, encontrándose varios valles. A este efecto se le denomina catabático. Como el aire está encallejonado entre las paredes de un valle, los vientos de drenaje muestran poca relación con las isobaras yendo de altas a bajas presiones.

1.2.3.4 "Föhn", "Chinook" y "Zonda"

Estos vientos son fuertes, secos y calientes y se desarrollan ocasionalmente en la ladera de sotavento de las cordilleras. Son, sobre todo, frecuentes y fuertes sobre las laderas norte de los Alpes y la Cordillera de los Andes, pero con menor intensidad pueden tener lugar a sotavento de cualquier montaña. En los países de lengua alemana se llama a tales vientos "Föhns", y éste es el nombre de uso general en todas partes. Vientos análogos tiene lugar a veces al este de las Montañas Rocosas en Norteamérica, siendo llamados de "Chinooks", y en Argentina se les identifican como "Zondas".

1.3 POTENCIA Y ENERGÍA DEL VIENTO

Habiendo estudiado el fenómeno viento, el punto que nos interesa es el aprovechamiento energético del mismo. Visto el potencial eólico de un sitio como un recurso energético, es necesario evaluarlo y caracterizarlo para poder establecer las condiciones óptimas de operación del Sistema Conversor de Energía Eólica (SCEE), destinado a aprovechar ese recurso bajo restricciones técnico-económicas, fijadas por los límites prácticos para:

1. Área de la sección transversal al flujo de aire, que es posible abarcar para extraer energía del viento, y

2. Altura sobre el nivel del suelo a la que es práctico realizar esta obtención de energía.

Por limitaciones de tipo tecnológicas y económicas, únicamente el viento que fluye en los primeros 150 metros sobre el nivel del suelo es factible aprovechar con la actual tecnología, limitándose también el área unitaria barrida a la de una circunferencia con un diámetro de 100 metros.

A continuación se exponen las características de potencia y energía del viento.

1.3.1 Ecuaciones de Potencia y Energía

El viento es aire en movimiento. El aire tiene masa, aunque su densidad es baja y cuando esta masa lleva cierta velocidad, el viento resultante tiene una energía cinética proporcional al producto $1/2 \mid \text{masa} \times (\text{velocidad})^2 \mid$

Si ρ = la masa por unidad de volumen de aire (densidad)
 V = velocidad del viento
 A = un área que atraviese el viento

La masa de aire que pasa por unidad de tiempo es ρAV , y la energía cinética que atraviesa el área por unidad de tiempo es:

$$P = 1/2 \cdot \rho AV \cdot V^2 = 1/2 \rho AV^3$$

Esta es la potencia total disponible en el viento.

La densidad de potencia del viento, expresada en watts/m² en el plano vertical y a 10 m de altura, es una manera de definir el potencial eólico de un punto. Esta potencia por unidad de área es función directa del cubo de la velocidad del viento:

$$P/A = K V^3$$

donde K es una constante que depende de la densidad del aire y de las unidades en que se expresa la potencia y la velocidad. Esta expresión se conoce como la ley del cubo y es indicativa de porqué es necesario un registro continuo de velocidades para hacer una estimación correcta de su contenido energético, ya que existe una diferencia entre el cubo de la velocidad media y el promedio de los cubos de un conjunto de velocidad en una distribución dada. La figura 15, muestra gráficamente la relación entre velocidad y potencia.

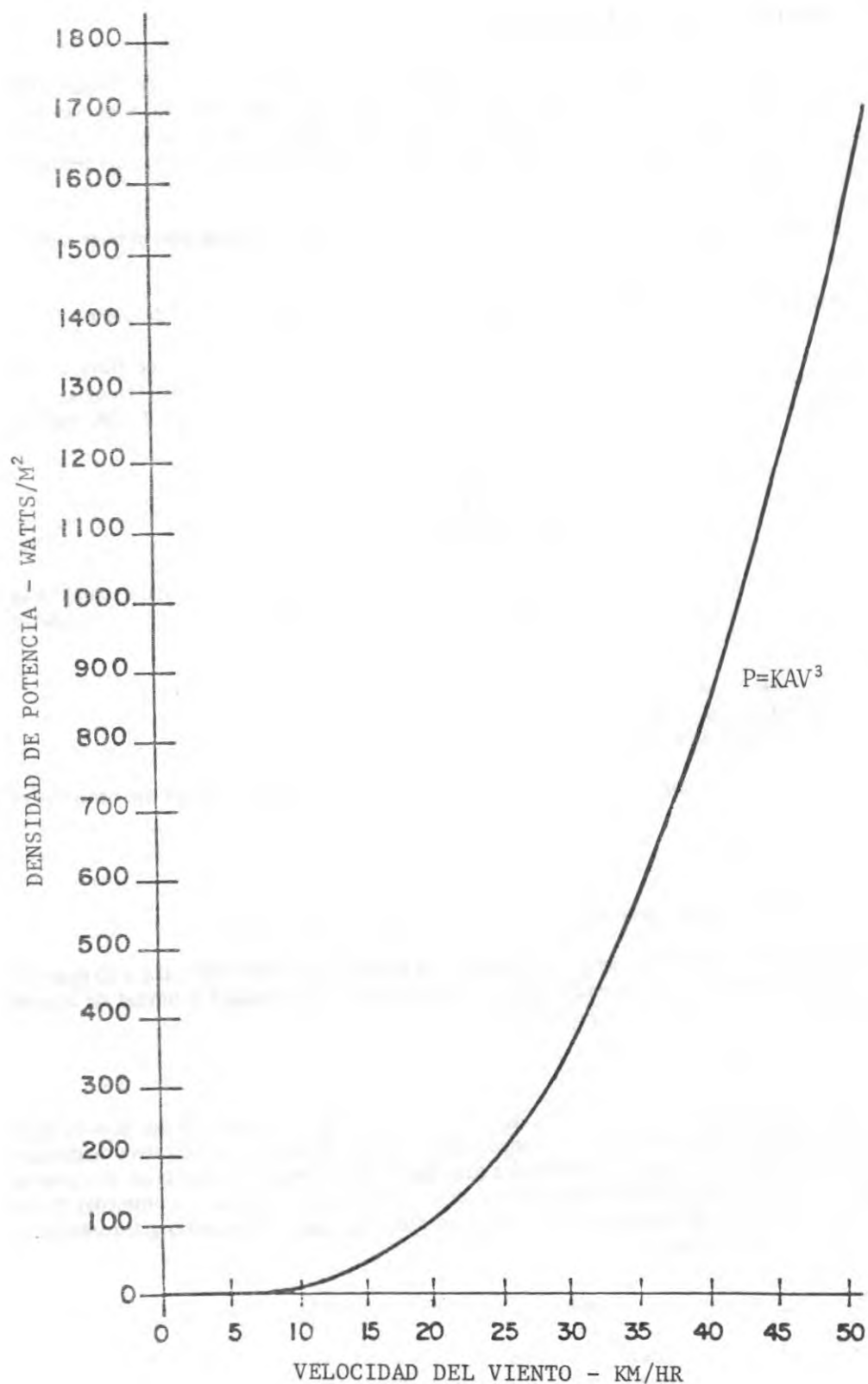


Figura 15 — Potencia en el Viento

Si matemáticamente expresamos el viento como un vector, éste en la realidad se comporta de una manera aleatoria, variando su rumbo y velocidad de tal suerte que, cuando expresamos su potencia por unidad de área, nos referimos a promedios estadísticos, obtenidos a partir de mediciones continuas anemográficas, por un período de un año al menos.

Siendo la potencia del viento proporcional al cubo de su velocidad, se aprecia que variaciones porcentualmente pequeñas en la velocidad del viento tienen una fuerte repercusión por cuanto a su potencia. Un viento de 20 Km/hr (5.55 m/s) tiene una potencia de 109.6 w/m^2 y uno de 25 Km/hr (6.94 m/s) de 213.85 w/m^2 , en tanto que un viento de 50 Km/hr (13.88 m/s) que mueve a los árboles y se dificulta caminar contra él, tiene una potencia de 1720.8 w/m^2 .

De toda la potencia del viento sólo es posible obtener una fracción, la que tiene un límite teórico establecido por el científico alemán A. Betz en 1927, por el cual un aeromotor ideal sólo puede extraer $16/27$ ó 59.3 o/o de la potencia del viento. Para obtener el 100 o/o de la energía cinética del viento, sería necesario que el equipo conversor suprimiera el movimiento, reduciendo su velocidad hasta cero, lo cual es imposible.

De esta manera la ecuación que define la potencia aprovechable del viento, para condiciones ideales es:

$$P = 0.593 KAV^3$$

Dadas las características aleatorias del viento, determinar su potencia y energía en un período de tiempo, será resultado de un análisis estadístico del rango de velocidad observado, y de la duración total de cada intervalo de velocidad. En esta forma, la energía del viento que atraviesa una unidad de área en un plano vertical, siempre perpendicular al viento, durante un período de tiempo, está dada por la expresión:

$$E = \sum_{i=1}^n P_i \cdot t_i$$

$i = 1 \dots n$, intervalos de velocidad de viento a los que corresponde una potencia (P_i) y una duración acumulada t_i .

La potencia media durante el período T será por tanto:

$$\bar{P} = \frac{E}{T}$$

Para realizar el análisis de energía y potencia del viento, en un período dado, de la información obtenida de las velocidades del viento en el lugar bajo estudio, se hace uso de las siguientes representaciones gráficas:

- Curvas de frecuencia de velocidad
- Curvas de duración de velocidad
- Curvas de duración de potencia

1.3.2 Curvas de Frecuencia de Velocidades

Los registros continuos de velocidad del viento se traducen a una curva de frecuencia de velocidades, que en realidad corresponde a un histograma de velocidades, ver Figura 16. Esta curva de distribución se hace para cada mes y para el año completo. Esto permite conocer, por rangos de velocidades, el porcentaje del tiempo total que le corresponde. Al agrupar los datos mensualmente, se determinan las variaciones estacionales y finalmente el comportamiento del viento a lo largo del año. Hacer una buena caracterización de la distribución de velocidades a lo largo del año, requiere de mediciones anemográficas por 5 años al menos, aunque se puede prescindir de éstas si se cuenta con información que permita establecer correlaciones. Esta información es indispensable para establecer la energía que contiene el viento y poder estimar así la que es potencialmente aprovechable en un período determinado.

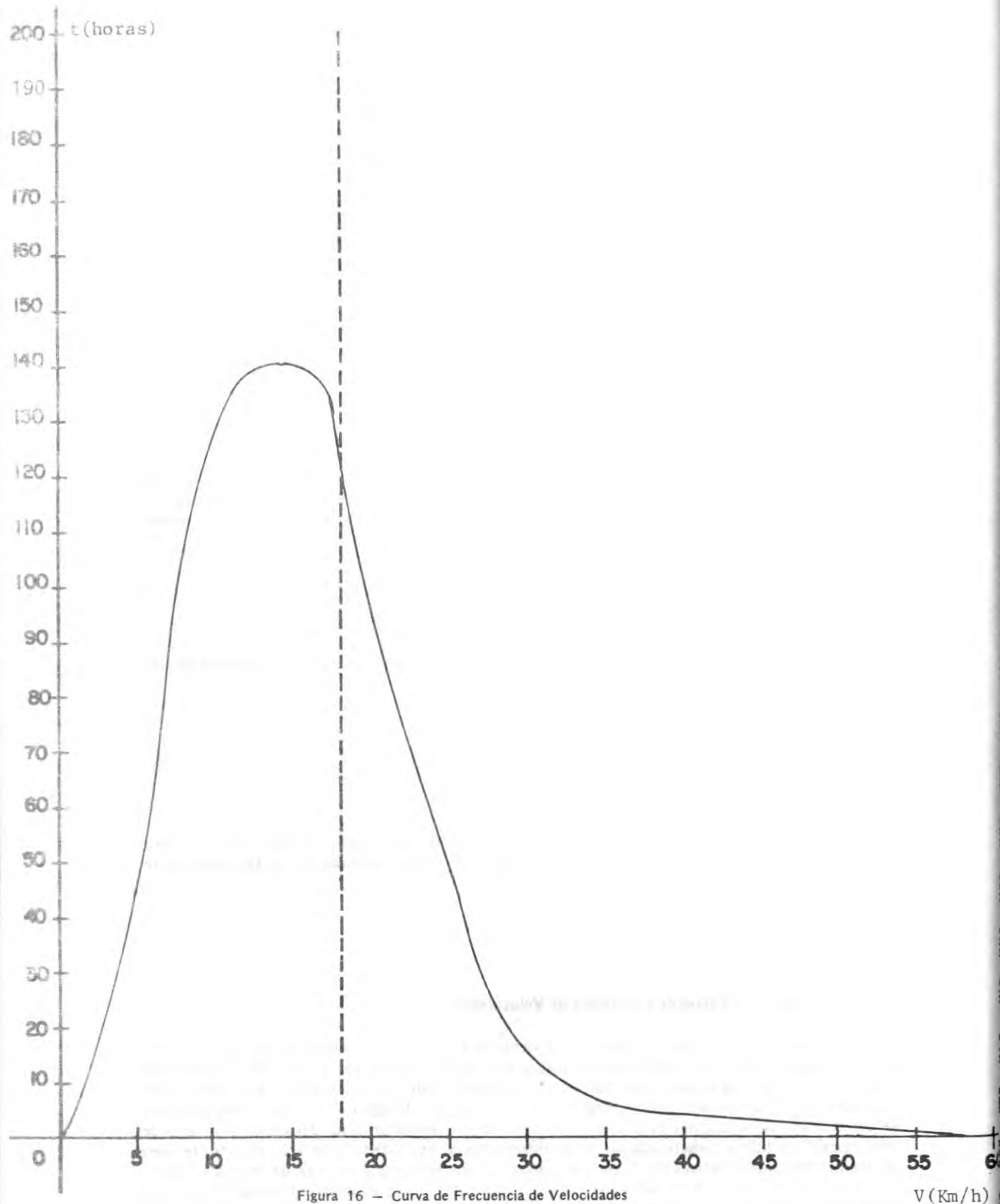
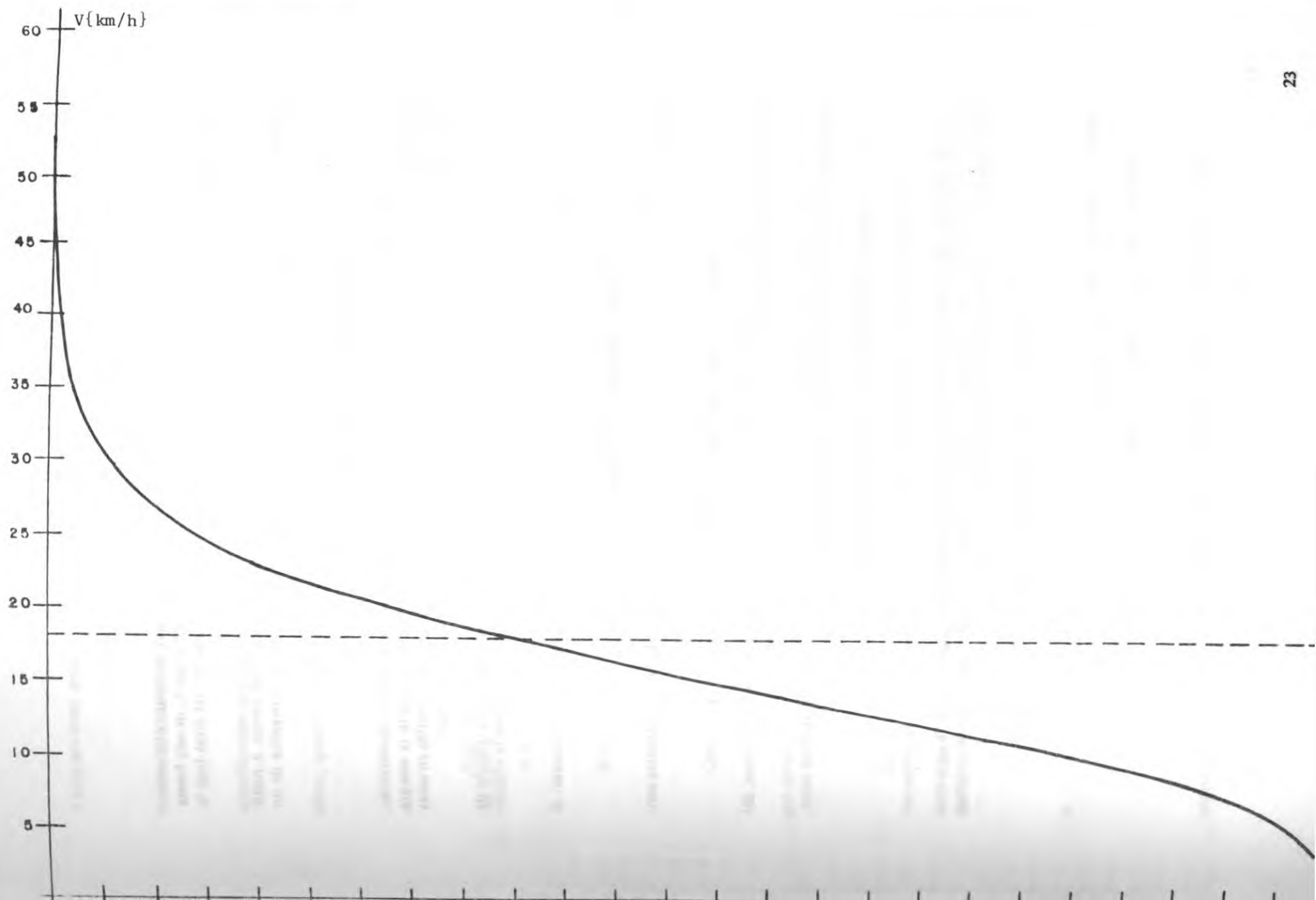


Figura 16 — Curva de Frecuencia de Velocidades

1.3.3 Curvas de Duración de Velocidades

Una forma útil de representar la distribución de frecuencia de velocidades durante un período dado, es con la curva de duración de velocidades, mostrada en la Figura 17, la misma que indica progresivamente el número de horas en que el viento tuvo una velocidad superior a los valores de cada ordenada.



1.3.4 Curvas de Duración de Potencia

Si la curva de duración de velocidades puede ser convertida en una curva de duración de potencia al cubrir los valores de las ordenadas y aplicar el coeficiente de proporcionalidad K, de esta forma se hace patente la importancia energética de un sitio relativo a otro al comparar las áreas bajo la curva que son indicativas de la energía del viento.

El uso de procedimientos computacionales para procesar la información del viento, a partir de registros anemométricos continuos, ha desplazado este método de evaluación energética de un sitio, pero no por ello puede decirse que sea obsoleto.

1.3.5 Conversión de la Energía Eólica

La obtención de energía del viento se efectúa a través de sistemas aerodinámicos conversores, conocidos como Sistemas Conversores de Energía Eólica (SCEE). Un SCEE convierte la energía cinética del aire en energía mecánica de rotación. Esta energía puede a su vez ser convertida en otras formas de energía: eléctrica o térmica, o ser utilizada directamente como energía mecánica.

En todo cambio de una forma de energía a otra, se incurre en ciertas pérdidas. La relación de la energía disponible para su utilización y la energía primaria de donde se obtuvo, define la eficiencia del sistema de conversión.

En el caso de una turbina eólica, las pérdidas en el rotor pueden atribuirse a dos factores: al movimiento rotacional comunicado al aire por las aspas y a la fricción contra el aire.

1.3.5.1 Potencia teórica máxima de una turbina eólica

Para determinar la eficiencia máxima de una turbina eólica, hay que asumir las siguientes condiciones:

1. Las aspas trabajan sin arrastre por fricción con el aire.
2. Una envolvente bien definida separa el flujo que pasa a través del disco del rotor, del que lo hace por fuera del mismo.
3. Las presiones estáticas dentro y fuera de la envolvente y lejos, antes y después del rotor, son iguales a la presión estática de la corriente libre ($P_2 = P_\infty$).
4. El empuje está aplicado en forma uniforme sobre todo el disco del rotor.
5. El disco no imparte rotación alguna al flujo.

Si definimos un volumen de control como el que se muestra en la Figura 18 y la aplicamos al teorema de momentos, suponiendo que los planos de corriente arriba y corriente abajo del volumen de control están infinitamente lejos del plano de la turbina, se tiene:

$T = \text{momento en el flujo que entra} - \text{momento en el flujo que sale.}$

$$T = m (V_\infty - V_2) = \rho A U (V_\infty - V_2) \quad (1)$$

donde m es el flujo de masa por unidad de tiempo.

También, a partir de las condiciones de presión, el empuje puede ser expresado como:

$$T = A (P^+ - P^-) \quad (2)$$

Ahora, aplicando la ecuación de Bernoulli al flujo corriente arriba de la turbina, se obtiene:

$$\frac{1}{2} \rho V_\infty^2 + P_\infty = \frac{1}{2} \rho U^2 + P^+ \quad (3)$$

y para corriente abajo:

$$\frac{1}{2} \rho V_2^2 + P_{\infty} = \frac{1}{2} \rho U^2 + P^- \quad (4)$$

o, si se restan estas dos ecuaciones:

$$P^+ - P^- = \frac{1}{2} \rho (V_{\infty}^2 - V_2^2) \quad (5)$$

substituyendo la ecuación (5) en la (2) se tiene:

$$T = \frac{1}{2} A \rho (V_{\infty}^2 - V_2^2) \quad (6)$$

ahora, igualando la ecuación (6) con (1) se tiene:

$$\frac{1}{2} A \rho (V_{\infty}^2 - V_2^2) = \rho A U (V_{\infty} - V_2)$$

o,

$$U = \frac{V_{\infty} + V_2}{2} \quad (7)$$

Este resultado establece que la velocidad a través de la turbina es el promedio de las velocidades antes y después de la turbina.

Si ahora definimos el factor de interferencia como:

$$U = V_{\infty} (1 - a) \quad (8)$$

Si hacemos la ecuación (7) igual a (8) se tiene:

$$V_{\infty} (1 - a) = \frac{V_{\infty} + V_2}{2}$$

Con lo que la velocidad de la estela de la turbina puede ser expresada como:

$$V_2 = V_{\infty} (1 - 2a)$$

por lo tanto,

$$a = 1 - \frac{V_{\infty} + V_2}{2 V_{\infty}} \quad (9)$$

Lo cual implica que si el rotor absorbe toda la energía, v.gr., $V_2 = 0$, el factor de interferencia tendrá un valor máximo de 1/2.

Dado que la potencia es expresada como el producto del flujo de masa por unidad de tiempo por el cambio de energía cinética, la potencia P, es:

$$P = m \Delta E.C. + \rho A U \left(\frac{V_{\infty}^2}{2} - \frac{V_2^2}{2} \right) + \frac{1}{2} \rho A V_{\infty}^3 4a (1-a)^2$$

o:

$$P = 2 \rho A V_{\infty}^3 a (1-a)^2 \quad (10)$$

La máxima potencia se obtiene cuando:

$$\frac{dp}{da} = 0$$

$$\frac{dp}{da} = 2 \rho A V_{\infty}^3 (1 - 4a + 3a^2) = 0$$

o, $a = 1$ o, $a = 1/3$

P máxima se obtiene para: $a = 1/3$

luego:

$$P_{\max} = 16/27 (1/2 \rho A V_{\infty}^3)$$

Este coeficiente (16/27) = 0.593, se llama coeficiente de potencia y representa eficiencia del rotor de una turbina eólica:

$$P = \frac{1}{2} \rho A V^3 C_p \quad (11)$$

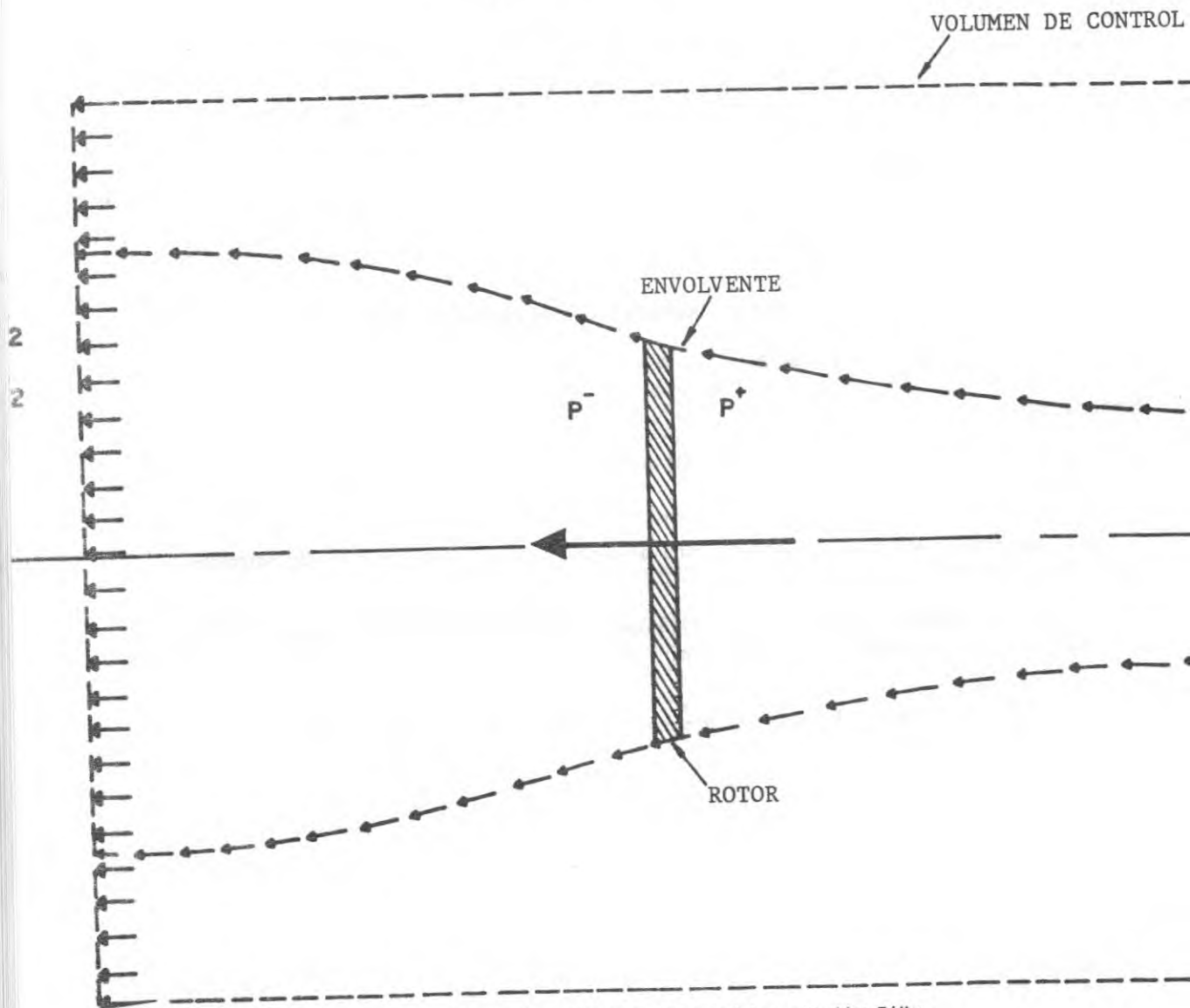


Figura 18 - Volumen de Control de una Turbina Eólica

1.3.5.2 Sistemas conversores de energía eólica

Existen diversos tipos de Sistemas Conversores de Energía Eólica (SCEE), operando sobre todos ellos la restricción teórica y práctica por supuesto, de la energía del viento que es posible recuperar.

La Figura 19, ilustra el esquema general en diagrama de bloques de un aerogenerador, o SCEE para producción de electricidad.

Básicamente, los dos primeros bloques son comunes a todo tipo de SCEE, siendo el último el específico del tipo de aplicación.

El primer bloque indica el rotor propiamente, que obtiene parte de la energía del viento, que como ya hemos visto, de toda su potencia, existe un límite teórico próximo a 60 o/o que nos refiere la que es posible aprovechar en condiciones óptimas de transferencia de energía para un sistema conversor. En la realidad, un aeromotor de aspas aerodinámicas y alta eficiencia, se encuentra en el rango del 40 al 45 o/o de eficiencia de conversión.

$$P_E = (C_p) (\eta_M) (\eta_G) (P_v)$$

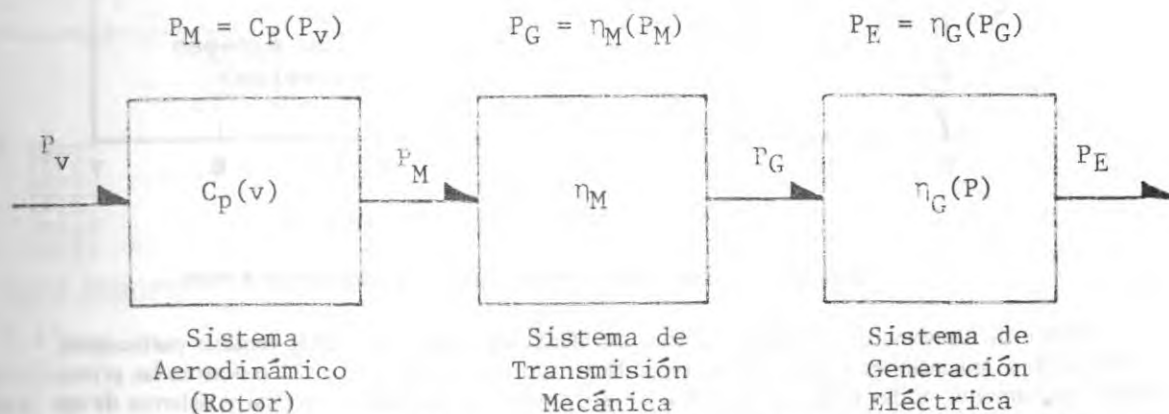


Figura 19 — Diagrama de Bloques para un SCEE

Como en toda conversión energética, la relación entre la energía disponible para su utilización y la energía primaria de donde se obtuvo, define la eficiencia del sistema. El coeficiente de potencia C_p representa la eficiencia aerodinámica del rotor, cuyas pérdidas pueden atribuirse principalmente al movimiento rotacional comunicado al aire por las aspas y a la fricción contra el mismo. Este coeficiente, depende del tipo y características de las aspas del rotor, y varía con la razón de velocidad tangencial (λ), la cual está definida como la relación instantánea entre la velocidad de la punta del asa y la velocidad del viento. El valor máximo de C_p es alcanzado a un valor de λ característico de cada rotor. Si este valor es menor de 4, el rotor puede ser considerado como de baja velocidad, y su máxima eficiencia C_p será de 0.3 menor. La solidez del rotor, definida como la relación entre la superficie de las aspas y el área barrida por el rotor, tiende a valores grandes para turbinas de este tipo. Si el valor de λ es del orden de 4 o superior para C_{pmax} , se trata de un rotor de alta velocidad con una eficiencia máxima C_p del orden de 0.45. La solidez en este tipo de rotores tiende a valores pequeños.

Si la velocidad nominal del rotor corresponde al valor máximo de C_p , un aumento o disminución de la velocidad del viento resultará en una disminución de C_p , si la velocidad de la flecha se mantiene constante, Figura 20. Por otro lado, si se permite que la velocidad del rotor varíe con la velocidad del viento (razón de velocidad tangencial (λ) constante), se puede lograr un máximo C_p para todo rango de velocidades de operación. Esto resulta de dos modos básicos de generación: sistemas de velocidad constante, en los cuales la velocidad del rotor se mantiene constante cambiando el ángulo de ataque de las aspas y/o las características de la carga; y sistemas de velocidad variable, en los cuales se permite que la velocidad del rotor varíe proporcionalmente a la velocidad del viento, lo cual permite C_{pmax} para la mayor parte del rango de operación. En la Figura 20, se muestran las características de potencia para algunos tipos de rotores.

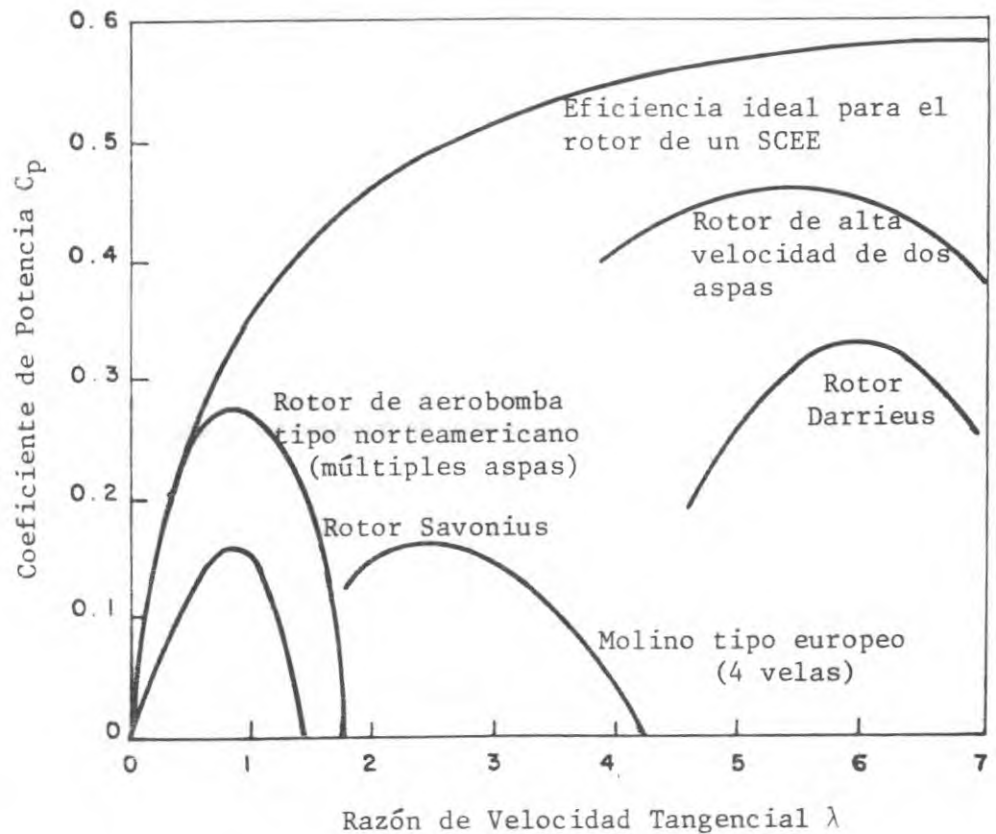
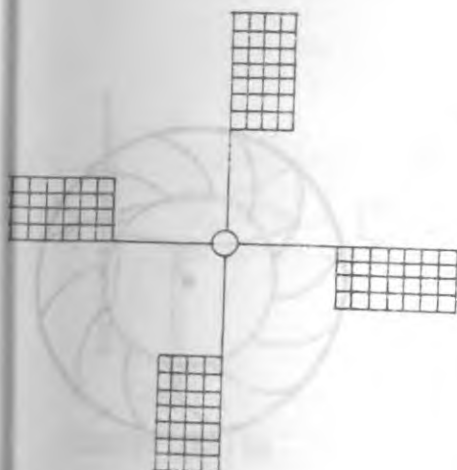


Figura 20 — Características de Potencia para Diferentes tipos de Rotores

Existe un sinnúmero de configuraciones de SCEE, cada una con ciertas ventajas particulares, y adecuado a aplicaciones más o menos específicas. Las Figuras 21, 22 y 23 muestran las principales. Básicamente, todas podrían agruparse en dos tipos: sistemas de eje vertical y sistemas de eje horizontal. Los sistemas incluidos en el primer grupo, no necesitan orientarse ya que aprovechan vientos de cualquier dirección. Los del segundo, aunque limitados por su velocidad de respuesta a cambios de dirección en el viento, se caracterizan por eficiencias más altas que los del primero.



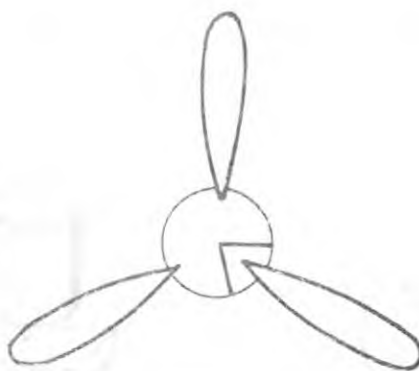
MOLINO TIPO EUROPEO

C_p max 0.17

Par elevado

Bajas RPM

Aspas de diseño ineficiente

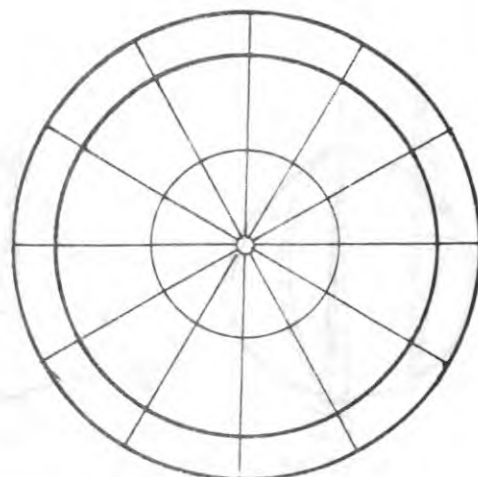


ROTOR MODERNO DE
ASPAS AERODINAMICAS

C_p max 0.47

Par reducido

Altas RPM



ROTOR DE AEROBOMBA
Tipo Norteamericano

C_p max 0.15

Par elevado

Bajas RPM

Pérdidas muy altas

Figura 21 — Configuraciones y características de rotores de un SCEE

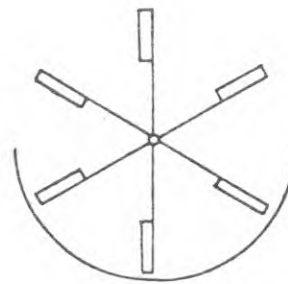
- DE ARRASTRE -



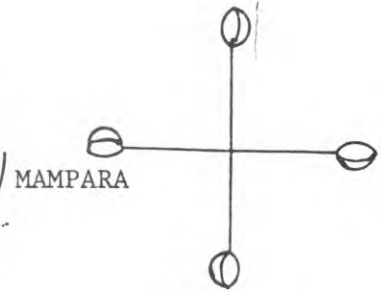
SAVONIUS



SAVONIUS
MULTIPLE

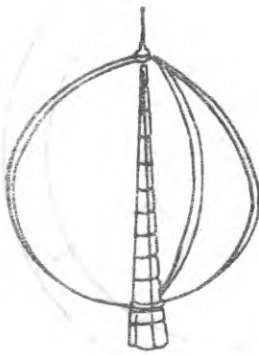


PANEMONAS



COPAS

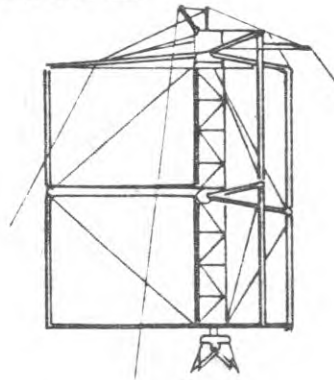
- DE SUSTENTACION -



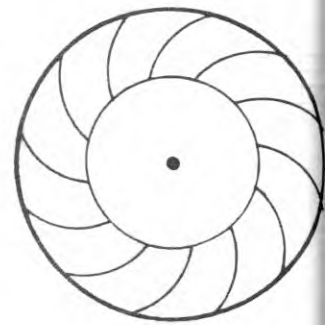
ϕ - DARRIEUS



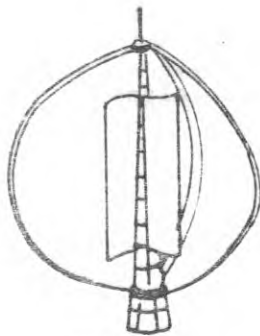
Δ - DARRIEUS



H - DARRIEUS



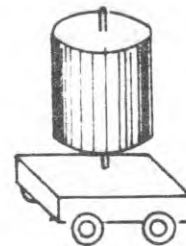
TURBINA



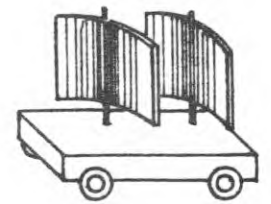
HIBRIDO
SAVONIUS/
 ϕ DARRIEUS



SAVONIUS
DESPLAZADO



MAGNUS



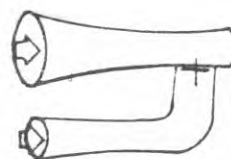
PERFIL
AERODINAMICO



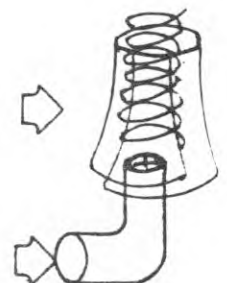
DEFLECTOR
30



CONVECTIVO
SOLAR



VENTURI



VORTEX
CONFINADO

Figura 22 - Configuraciones de rotores de SCEE de eje vertical



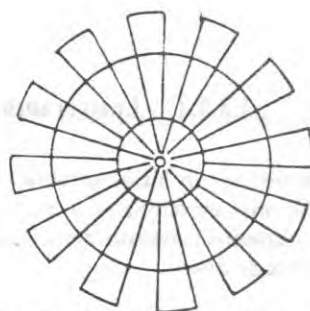
UN ASPA
CONTRAPESADA



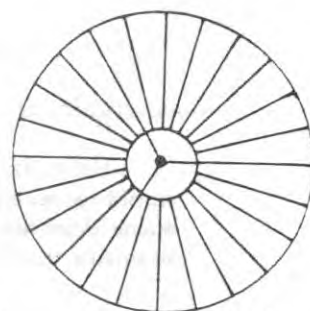
DOS
ASPAS



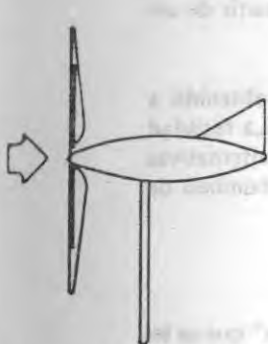
TRES ASPAS



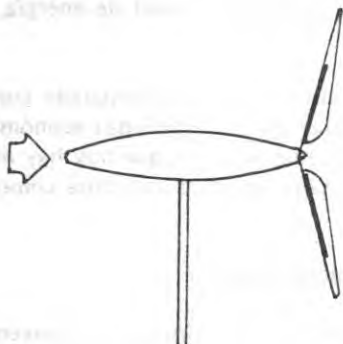
ROTOR DE ASPAS MULTIPLES
DE AEROBOMBA TIPO NORBEA
MERICANO



ROTOR CHALK
(RUEDA DE BICICLETA)



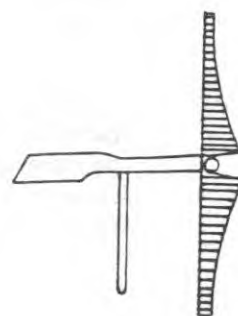
VIENTO ARRIBA



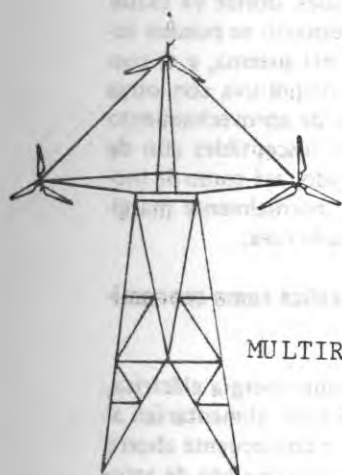
VIENTO ABAJO



ENFIELD-ANDREAU



ASPA VELA

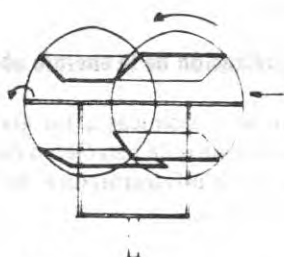


MULTIROTOR

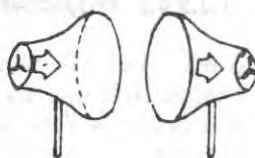
DOBLE ROTOR
CON ROTACION
OPUESTA



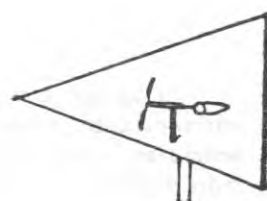
SAVONIUS DE FLUJO
CRUZADO



PANEMONAS DE
FLUJO CRUZADO



DIFUSOR CONCENTRADOR



VORTEX
NO CONFINADO

Figura 23 — Configuraciones de rotores de SCEE de eje horizontal

1.3.5.3 Energía aprovechable y análisis económico preliminar.

Hecha la medición de un sitio, establecido el patrón de distribución anual de velocidades, considerando las variaciones estacionales y traducido ésto a un patrón anual de energía y potencia, puede determinarse el comportamiento de un sistema conversor de energía eólica, considerando básicamente tres parámetros de diseño:

1. Velocidad de inicio de operación
2. Velocidad límite superior de operación
3. Eficiencia de conversión promedio en el rango de velocidades de operación.

Correlacionando estas características del equipo con la caracterización energética del sitio, es posible predecir la cantidad de energía útil aprovechable a partir del viento. Esta cantidad total anual de energía, se correlaciona a su vez con el costo del sistema, considerando la inversión inicial, tasas de interés y costos de operación y mantenimiento durante su vida útil, para determinar el costo anual de la instalación, obteniendo así nuestro costo por unidad de energía, a partir de un sistema conversor de energía eólica.

Cuando otras alternativas son posibles, este costo unitario es comparado con el obtenido a partir de otras fuentes de energía y pudiendo establecer así su factibilidad económica. La realidad del aprovechamiento de la energía eólica en zonas aisladas, es la de que hoy hay otras alternativas variables que puedan competir con ella, máxime tratándose de aplicaciones como el bombeo de agua.

1.3.5.4 Explotación de la energía eólica

Al respecto de la energía eólica, como de la energía solar directa, las "desventajas" que se les atribuye en una sociedad industrial ávida de energía, son su intermitencia y su baja densidad energética, si la comparamos con los medios convencionales de producción de energía en forma masiva. La realidad es que la energía solar directa así como la eólica, tienen las ventajas que los sistemas convencionales no tienen: el del acceso a la energía. Si bien esta energía por sí misma no presenta las características de disponibilidad y continuidad de las formas convencionales, donde ya existe la infraestructura de distribución, a través de sistemas de almacenamiento o respaldo se pueden lograr las características antes descritas. Esto indudablemente aumenta el costo del sistema, y el costo unitario de la energía disponible, aún así su utilización puede resultar competitiva con otras fuentes. Desde un punto de vista económico, al nivel actual de la tecnología de aprovechamiento de la energía eólica y el nivel de producción industrial de estos equipos, son susceptibles aún de significativas disminuciones en sus costos, al ampliarse la magnitud de su mercado, así como de innovaciones en su construcción. La realidad actual es que para lugares aislados, normalmente marginados y pauperizados, cualquier fuente de energía, convencional o no, es demasiado cara.

1.3.5.4.1 El sistema de conversión de energía eólica como economizador de combustible.

Un conjunto de aerogeneradores de mediana y gran capacidad, produciendo energía eléctrica, e interconectados a líneas de subtransmisión o distribución y sincronizadas a ellas, alimentarían al sistema eléctrico con determinadas cantidades de energía, que representarían un consecuente ahorro de agua en plantas hidroeléctricas o combustibles en plantas termoeléctricas. Este conjunto de aerogeneradores, al representar una capacidad instalada del orden del 10 o/o de un sistema interconectado, alimentan a éste de cantidades considerables de energía, sin consumir otros recursos y sin afectar la estabilidad del sistema, dado el carácter irregular del viento.

1.3.5.4.2 Perspectivas en la utilización de la energía eólica.

El agregar grandes plantas hidroeléctricas, termoeléctricas o atómicas a los grandes sistemas interconectados, el descubrir y explotar nuevos y grandes yacimientos de petróleo o carbón, en nada benefician a aquellos sectores de la población rural para quienes la infraestructura, por cuanto a las redes de comunicación, transporte y energéticos, brilla por su ausencia.

Por el contrario, propicia patrones centralistas que agudizan la marginación y la migración a las ciudades.

El aprovechamiento de la energía eólica, como de todas las formas de energía solar, las llamadas fuentes no—convencionales, constituyen la única opción inmediata, de proporcionar en forma muy limitada aún, formas útiles de energía a las zonas rurales alejadas de las redes de distribución de energéticos convencionales.

CAPITULO 2 – INSTRUMENTOS DE MEDICION

2.1 ESCALA DE BEAUFORT

Esta escala fue establecida en 1905 por el almirante de marina inglesa cuyo nombre es precisamente el dado a esta escala (Beaufort), con el objeto de estimar la velocidad del viento en el mar.

El objetivo principal de esta escala, es hacer una cuantificación preliminar y sencilla de las variables más directas del viento o sea, dirección y velocidad. Como es conocido, el viento se define como la componente horizontal del movimiento del aire atmosférico y su velocidad se mide en m/s, km/h, mill/h o nudos en otras palabras, en unidades de distancia sobre unidades de tiempo; el rumbo del viento es la dirección angular respecto a los cuatro puntos cardinales de la cual sopla el viento.

A fin de aprovechar la energía del viento es necesario evaluar sus variables en un determinado lugar. Este procedimiento comprende varias etapas, las cuales van en orden ascendente en complejidad e instrumentación utilizada.

La primera etapa consiste precisamente en utilizar la escala de Beaufort, ya que para ello no se necesita instrumento alguno y cualquier persona con grado mínimo de educación puede evaluar dicha escala. Esto es posible debido a que la cuantificación se la hace observando el efecto del viento sobre la vegetación, la superficie del agua en lagos y océanos, las olas, el humo, banderas, etc. A continuación se explica detalladamente dicha escala y sus equivalentes de velocidad, así como sus efectos y el nombre que se le da a cada tipo de viento.

TABLA 2

ESCALA BEAUFORT DE LA FUERZA DEL VIENTO

FUERZA BEAUFORT	NOMBRE	EQUIVALENCIA DE LA VELOCIDAD A UNA ALTURA TIPO DE 10 MTS. SOBRE TERRENO LLANO Y DESCUBIERTO			CARACTERISTICAS PARA LA ESTIMA- CION DE LA VELOCI- DAD EN TIERRA
		NUDOS	MTS/S	KM/H M.P.H.	
0	Calma	0.1	0-0,2	1 1	Calma; el humo se eleva verticalmente
1	Ventolina	1-3	0,3-1,5	1-5 1-3	La dirección del viento se revela por el movimiento del humo, pero no por las veletas
2	Brisa muy débil	4-6	1,6-3,3	6-11 4-7	El viento se percibe en el rostro: las hojas se agitan la veleta se mueve
3	Brisa débil	7-10	3,4-5,4	12-19 8-12	Hojas y ramitas agitadas constantemente; el viento despliega las banderolas
4	Brisa moderada	11-16	5,5-7,9	20-28 13-18	El viento levanta polvo y hojitas de papel; ramitas agitadas

5	Brisa fresca	17-21	8,0-10,7	29-38 19-24	Los arbustos con hojas se balancean; se forman olitas con cresta en las aguas interiores (estanques)
6	Viento fresco	22-27	10,8-13,8	39-49 25-31	Las grandes ramas se agitan; los hilos telegráficos silban; el uso del paraguas se hace difícil
7	Viento fuerte	28-33	13,9-17,1	50-61 32-38	Los árboles enteros se agitan; la marcha en contra del viento es penosa
8	Viento duro	34-40	17,2-20,7	62-74 39-46	El viento rompe las ramas; es imposible la marcha contra el viento
9	Viento muy duro	41-47	20,8-24,4	75-88 47-54	El viento ocasiona ligeros daños en las viviendas (arranca cañerías, chimeneas, tejados)
10	Temporal	48-55	24,5-28,4	89-102 55-63	Raro en los continentes; árboles arrancados; importantes daños en las viviendas
11	Borrasca	56-63	28,5-32,6	103-117 64-72	Observado muy raramente acompañado de extensos destrozos
12	Huracán	64 ó más	32,7 ó más	118 ó 73 ó más más	Estragos graves y extensos

NOTA: Los instrumentos de medida y registro de la velocidad del viento han reducido considerablemente la utilización de la escala Beaufort, particularmente para las estaciones terrestres. Sin embargo, constituye un medio cómodo para estimar la velocidad del viento a falta de otros instrumentos.

2.2 ANEMOMETROS

Se llama anemómetro al transductor que convierte la energía del viento en otro tipo de energía que sea más fácil de medir, de acuerdo a los instrumentos existentes. Generalmente se la transforma en: energía eléctrica, energía cinética, etc.

Los tipos de anemómetros más comunes son los siguientes:

2.2.1 Anemómetros de Tipo Copas

- 2.2.1.1 Generador de C.A.
- 2.2.1.2 Generador de C.D.
- 2.2.1.3 Contador
- 2.2.1.4 Contacto

2.2.2 Anemómetros de tipo Molino de Viento

2.2.3 Anemómetros de tipo Tubo de Presión

2.2.4 Anemómetros de tipo Sónico

2.2.5 Anemómetros de tipo Alambre Caliente

2.2.1 Anemómetros de tipo Copas

Estos tipos de anemómetros fueron desarrollados por T.R. Robinson en 1846. Su rotor está compuesto por un eje vertical que sostiene cuatro brazos horizontales, colocados en ángulos rectos uno al otro. En los extremos se colocarán copas hemisféricas en planos verticales en un eje común de rotación y sus caras convexas contra el sentido de rotación. Su principio consiste en que la presión del viento en las caras cóncavas es mayor que en las caras convexas, esto hace que roten independientemente de la dirección del viento.

Muchos experimentos y estudios teóricos de este tipo de anemómetro llevaron a las siguientes conclusiones:

1. que usando tres copas en lugar de cuatro, el torque proporcionado es más uniforme.
2. que haciendo las copas cónicas en lugar de hemisféricas, se reduce la sobre-estimación del flujo de viento en vientos fluctuantes.

2.2.1.1. Anemómetros de tipo copas — generador de C.A.

Como se explicó anteriormente, esta variedad de anemómetro, consiste en un rotor en cuya parte superior se encuentran colocadas 3 copas y en la parte inferior tiene un sistema de imanes permanentes rodeando un estator de baja resistencia, esto en sí, es un pequeño generador de C.A., el cual produce voltajes de baja amplitud cuando el viento hace girar el arreglo de copas y por consiguiente el rotor. Generalmente se trata de hacer un diseño de este tipo de anemómetros, de tal manera que la frecuencia del voltaje producido sea directamente proporcional a la velocidad de viento y con incrementos lineales.

2.2.1.2 Anemómetros de tipo copas — generador de C.D.

Este anemómetro es fabricado de una manera similar al anterior, solo que en vez de un generador de corriente alterna, utiliza un generador de corriente directa.

2.2.1.3 Anemómetros de tipo copas — contador

Esta clase de anemómetro utiliza el movimiento generado en el rotor para que, por medio de una caja de engranes, mueva un contador mecánico, o sea, utiliza las revoluciones del rotor, las cuales mide mecánicamente.

2.2.1.4 Anemómetros de tipo copas — de contacto

Estos anemómetros operan por medio de un interruptor de estado normal abierto que es accionado cada fracción de vuelta del rotor. Estos interruptores pueden ser de diferentes clases tales como: de presión, de relay, líquidos, etc.; de esta manera proporcionan un número determinado de pulsos, los cuales serán utilizados de acuerdo al sistema que procese estos datos. Actualmente se utilizan interruptores optoelectrónicos acoplados al eje del rotor, esto es, se perfora el rotor un determinado número de veces, igual al número de pulsos requeridos por cada revolución del rotor, y se coloca un par acoplado luz-detector (diodo emisor de luz-fototransistor) cuya salida proporcionará un pulso cada vez que el detector reciba luz, o sea, que la perforación correspondiente coincida con el eje emisor-detector.

2.2.2 Anemómetros de tipo Molino de Viento

Este anemómetro tiene la peculiaridad de que debe ser orientado en la dirección del viento, para lo cual utiliza una veleta y sus aspas estarán colocadas como su nombre lo indica, como un molino de viento, o sea, los brazos en un plano perpendicular al viento y las aspas con una inclinación que permite el movimiento de rotor. Este movimiento puede ser utilizado bajo el principio de generación de C.A., C.D., o cualquier otro, y da la opción de utilizarlo también como anemoscopio por su necesidad de orientación en la dirección del viento.

2.2.3 Anemómetros de tipo Tubo de Presión

La construcción de los anemómetros de presión se basa en los siguientes principios: una veleta colocada al extremo de un mástil mantiene el orificio de un tubo cara al viento. El aire que sopla en esta abertura crea una sobrepresión en el tubo, que depende de la velocidad del viento. Esta sobrepresión se transmite a los aparatos indicadores por un conducto. Otro tubo, situado inmediatamente debajo de la veleta, está previsto de numerosos agujeritos y el viento que pasa alrededor del mismo crea una depresión que se transmite a los aparatos por otro conducto. El conjunto forma un sistema en el cual la diferencia entre depresión y sobrepresión es independiente de la diferencia de presión que puede existir entre el interior y el exterior del edificio donde se encuentra el aparato indicador o manómetro. Se dispone de dos tipos de manómetros para los anemómetros de presión. En el manómetro de flotador de Dines la diferencia de presión hace variar la posición de equilibrio de un cilindro flotante sobre el agua, el flotador acciona el dispositivo indicador. Se puede utilizar igualmente un manómetro aneroide, más indicado para los navíos donde el modelo de flotador no se puede utilizar. Existe otro tipo que utiliza un tubo de boca abierta, dirigido por una veleta en la dirección del viento; en la boca del tubo es producida una presión que es proporcional a la velocidad del viento. Esta presión se transfiere a lo largo de un conductor hueco y flexible y se lleva hasta el aparato de lectura, el cual puede estar diseñado de varias maneras, por ejemplo: burbuja introducida en un recipiente con líquido (dines), presión aplicada a un líquido de densidad específica en un tubo graduado.

2.2.4 Anemómetros de tipo Sónico

Se utiliza el principio de que la velocidad de un sonido esférico generado es igual a la suma de la velocidad del sonido más la velocidad del viento (a temperatura constante), de aquí se transmiten dos señales esféricas de igual frecuencia en dos transmisores a dos receptores cuyos ejes transmisor-receptor son perpendiculares entre sí, la diferencia en tiempo es una medida de la velocidad del viento.

2.2.5 Anemómetros de tipo Alambre Caliente

El funcionamiento de este anemómetro se basa en la variación de la resistencia eléctrica de un conductor con respecto a cambios de su temperatura. Un conductor al ser calentado adquiere una cierta temperatura y por lo tanto un cierto valor de resistencia; si se le coloca dentro de un flujo de aire, éste le proporcionará un determinado enfriamiento que se traducirá en una variación de su resistencia, la cual estará formando parte de un puente de Wheatstone, de tal manera que sea posible medir tal enfriamiento en base a un balance de corriente en el circuito, este hecho puede ser observado mediante un amperímetro, con una escala de velocidad en función de la corriente.

2.3 ANEMOSCOPIOS

Como se dijo anteriormente, una de las variables que nos interesa medir del viento es su dirección, para esto se desarrollaron los instrumentos llamados anemoscopios. Estrictamente un anemoscopio es un sensor y transductor que convierte la dirección del viento en otro tipo de variable, tal como electricidad, movimiento, etc.

El más sencillo de los anemoscopios es propiamente el explicado en el punto correspondiente a la escala de Beaufort, el cual consistía en un listón amarrado a un poste a una cierta altura, el mismo que indica la dirección con respecto a los cuatro puntos cardinales.

En el desarrollo de este tipo de instrumentos, se encuentra, en principio, una veleta colocada en uno de los extremos de un eje horizontal, el cual tiene en su otro extremo un contrapeso para balancear el peso de la veleta. Este se coloca sobre un eje vertical con libertad de movimiento en el plano horizontal; esto hace que la veleta apunte siempre en la dirección en la cual sopla el viento. Se utiliza también cuatro ejes horizontales, fijos, los cuales indican la dirección de los cuatro puntos cardinales como referencia.

Ya que este tipo de sensor es muy confiable, básicamente los anemoscopios desarrollados últimamente emplean este principio, con ligeras variantes en la fabricación de la veleta, aunque existen también otros tipos de sensores tales como el sónico.

La diferencia entre los tipos de sensor "veleta" está fundamentalmente en el transductor. Básicamente se dividen en dos tipos: mecánico y eléctrico.

El tipo mecánico consiste en aprovechar directamente el movimiento de la veleta. Usual y convenientemente, son utilizados los del tipo eléctrico, éstos pueden ser construidos en base a dos tipos de transductor: potenciómetro y de contacto.

El de contacto consiste en polos fijos que abarcan un ángulo específico, y en un polo movable que es accionado por la veleta. De esta manera, cuando el polo movable hace contacto con uno de los polos fijos, habrá continuidad eléctrica entre esos dos puntos y si se aplica una corriente o voltaje en el polo movable, será transferida al otro polo, de tal manera que puede ser colectada por medio de otro transductor que convierta dicha posición—corriente eléctrica a una dirección en una escala analógica o digital según el caso. De los últimos diseños de anemoscopios se puede mencionar uno de tipo de contacto optoelectrónico, el cual consiste en pares acoplados L.E.D. (diodo emisor de luz) — fototransistor y operan de una manera similar al anemómetro de este tipo. Aquí cabe mencionar que es posible codificar la salida de este tipo de anemoscopio en un código determinado, esto se puede hacer codificando una placa movable accionada por la veleta de tal manera que para una determinada posición de la veleta, varios orificios coincidan con los ejes de los pares LED—fototransistor dando así una salida codificada, cuyo código puede ser cualquiera de uso común en circuitos digitales, facilitando así el procesamiento de la información.

El anemoscopio con transductor de tipo potenciómetro consiste en la utilización de un potenciómetro de 360° de giro, el cual será movido por la veleta, cuando éste gira; su resistencia eléctrica, en la salida, varía si se aplica un voltaje entre sus extremos. El voltaje en el punto medio variará proporcionalmente al giro producido o bien a la dirección del viento. Esta variación de voltaje puede ser leída directamente por un voltímetro calibrado para lecturas de rumbo, o bien si se aplica una resistencia constante a ese voltaje variable, tendremos una corriente variable que puede ser medida por un amperímetro. En diseños más avanzados, esta corriente o voltaje puede ser traducida por medio de un convertidor analógico—digital y usar así el código digital para lectura y procesamiento de información.

Es importante hacer una diferencia clara de lo que se puede considerar como un anemocinógrafo y lo que se considera como un anemoscopio o anemómetro, ya que anteriormente llamamos a los dos últimos como los transductores de las variables de viento y de hecho se puede considerar un transductor hasta el punto final de la trayectoria recorrida por la señal a utilizar. Esto infiere que un anemómetro o anemoscopio pueden ser aquellos que traduzcan el parámetro proporcionado por el transductor a un desplazamiento eléctrico, mecánico o de otro tipo, el cual puede ser observado en una escala graduada en unidades correspondientes. A través del tiempo, se han interpretado erróneamente los términos anemómetros y anemoscopio y se ha llamado así a los transductores que proporcionan una señal que todavía no puede ser reconocida por los sensores humanos y también se le ha llamado de esta manera a aquellos que si proporcionan una señal de ese tipo. El intentar cambiar esta nomenclatura sería inoperante, ya que esto se ha hecho en libros y manuales tanto actuales como de épocas pasadas, por lo cual asumimos esa nomenclatura estando concientes del hecho.

2.4 ANEMOCINEMOGRAFOS

Se define como un anemocinemógrafo un equipo que utilizando variables obtenidas de un anemoscopio y un anemómetro, procesan dicha información y la traducen en una gráfica con respecto al tiempo. Debe sobreentenderse que el anemómetro y anemoscopio a que nos referimos aquí son del tipo transductor que produce una señal que no es directamente mostrada en forma de monitoreo.

Estos equipos se pueden dividir en dos categorías:

- De velocidad instantánea
- De distancia recorrida

Antes de entrar en detalles, mencionaremos que un anemocinemógrafo puede ser considerado como un instrumento formado por un equipo que grafique la velocidad del viento más un equipo que grafique su dirección, siendo éstos en principio muy similares, dependiendo su diferencia de la clase de anemómetro y anemoscopio que se utilicen. Esto se menciona con el objeto de dar a entender al lector que dichos aparatos pueden ser encontrados individualmente, aunque en el mercado es más común encontrar un instrumento completo o sea un anemocinemógrafo.

Consideramos entonces un anemocinemógrafo como un equipo con dos canales, uno para graficar la velocidad de viento y otro para graficar su dirección, pero bajo una escala de tiempo simultánea.

2.4.1 Anemocinemógrafos de Velocidad Instantánea

Estos equipos grafican simultáneamente la magnitud de la velocidad instantánea y el rumbo de dicha velocidad. Los anemómetros y anemoscopios a utilizar pueden ser de cualquier tipo de los mencionados anteriormente, siendo los más comunes, los de generación de C.A. o C.D., y los de contacto en anemómetros; y los de contacto o con potenciómetro en anemoscopios.

Las señales obtenidas de los anemómetros y anemoscopios, son procesadas y convertidas a impulsos eléctricos de diferente magnitud proporcional a la velocidad y dirección del viento respectivamente. Estos impulsos se transfieren al movimiento de unas agujas, las cuales tiene colocadas en sus extremos unas plumas que grafican sobre un papel unas curvas; para lograr esto es obvio que el papel deberá estar corriendo a una cierta velocidad, esto se logra por medio de un motor que es controlado por un reloj, el cual da pulsos al motor cada determinado tiempo. Para citar un ejemplo teórico muy sencillo, la gráfica de la dirección del viento puede hacerse de la siguiente forma (ver Figura 24).

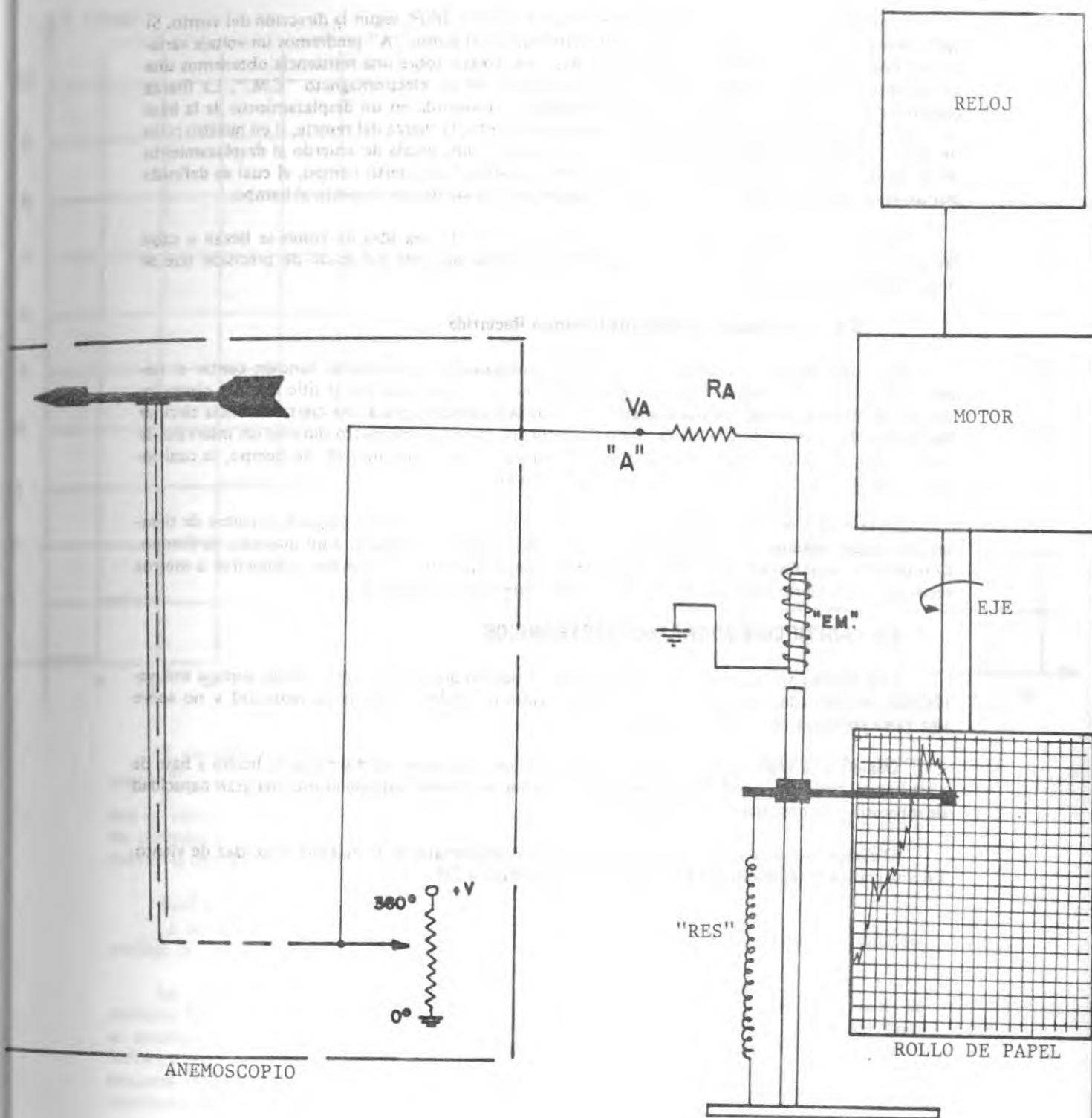


Figura 24 — Anemocinemógrafo de Velocidad Instantánea

Aquí el anemoscopio tipo potenciómetro varía de 0° a 360° , según la dirección del viento. Si aplicamos un voltaje constante $+V$ entre sus extremos, en el punto "A" tendremos un voltaje variable proporcional a la dirección del viento; al pasar ese voltaje sobre una resistencia obtenemos una corriente variable que producirá una fuerza magnética en un electromagneto "E.M.". La fuerza magnética será proporcional a la corriente generada y convertida en un desplazamiento de la base de la aguja que será de acuerdo a la fuerza magnética contra la fuerza del resorte, si en nuestro rollo de papel tenemos bien marcados los puntos cardinales en una escala de acuerdo al desplazamiento de la aguja, y si a estos sumamos que el motor se desplace cada cierto tiempo, el cual es definido por un reloj, obtendremos en nuestra gráfica la dirección del viento con respecto al tiempo.

Aunque este ejemplo es teórico y muy sencillo, nos da una idea de como se llevan a cabo las gráficas en un anemoscopio. La complejidad de estos depende del grado de precisión que se desee obtener en las mediciones.

2.4.2 Anemocinémógrafos de Distancia Recorrida

Este tipo de equipo, llamado comunmente integradores, tienen como función contar el número de millas o kilómetros o metros que recorre el viento que pasa por el sitio durante cierto intervalo de tiempo, o sea, un anemómetro de copas por ejemplo, girará una cierta distancia circular por efecto del viento, si se mide la distancia recorrida por el anemómetro durante un intervalo de tiempo bien definido, se tendrá la distancia recorrida por el viento/período de tiempo, lo cual lógicamente se refiere a un promedio de velocidad de viento.

De la misma manera, si un anemoscopio de contacto es usado para disparar circuitos de tiempo, es posible obtener un promedio de dirección del viento con respecto a un intervalo de tiempo. Combinando este último al primero, podremos obtener la cantidad de millas, kilómetros o metros recorridos cada cierto intervalo de tiempo y en una determinada dirección.

2.5. ANEMOCINEMOGRAFOS ELECTRONICOS

Este equipo tiene como función acumular el tiempo durante el cual el viento sopla a una velocidad determinada, lógicamente esto se hace sobre intervalos discretos de velocidad y no sobre una gama continua, lo cual sería imposible.

Debido a la gran cantidad de datos que se deben almacenar, su diseño se ha hecho a base de circuitos electrónicos, con los cuales, como es conocido, puede implementarse una gran capacidad de memoria y de procesamiento de datos.

Digamos que en cierto lugar tenemos una idea aproximada de la máxima velocidad de viento. En una gráfica se representaría por el punto V_m (ver Figura 25).

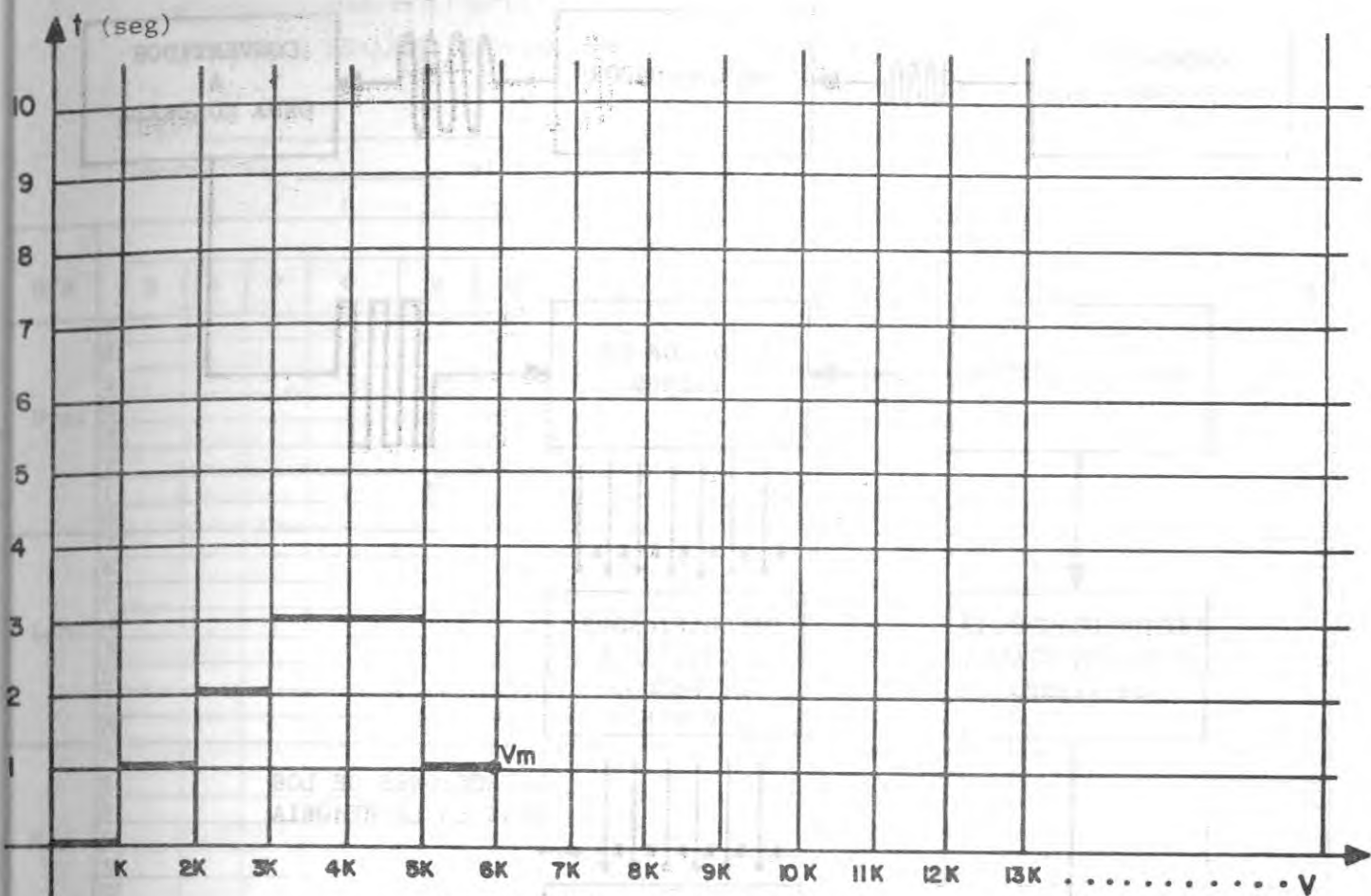


Figura 25 — Gráfica de la Velocidad del Viento

Si escogemos intervalos de velocidad iguales a su valor pequeño que llamaremos K , tendremos $\frac{V_m}{K}$ intervalos en nuestra magnitud de velocidad; ahora si cada segundo vemos en qué velocidad está el viento, tendremos una gráfica como la mostrada en la Figura 25, si de aquí sumamos todos los segundos en que el viento estuvo a cada una de las velocidades $K, 2K, 3K, \dots, V_{max}$, obtendremos el tiempo durante el cual la velocidad estuvo en un cierto valor para el ejemplo:

$K=0$ seg, $2K=1$ seg, $3K=2$ seg, $4K=3$ seg, $5K=3$ seg, $6K=1$ seg.

La suma de los tiempos de cada una de las velocidades nos dará como resultado el total del período de recopilación de datos.

En sí, lo que hace un registrador electrónico es eso, pero estos cuentan con capacidades de memoria hasta para tres años/intervalo de velocidad. A este intervalo se le da el nombre de Bin y su amplitud puede ser seleccionada, el procedimiento electrónico puede ser a base de Hardware o Software, esto es a base de circuitos integrados discretos o bien a base de microprocesadores. Un esquema (Figura 26) muestra una forma a bloques de una posibilidad de implementación de un registrador electrónico.

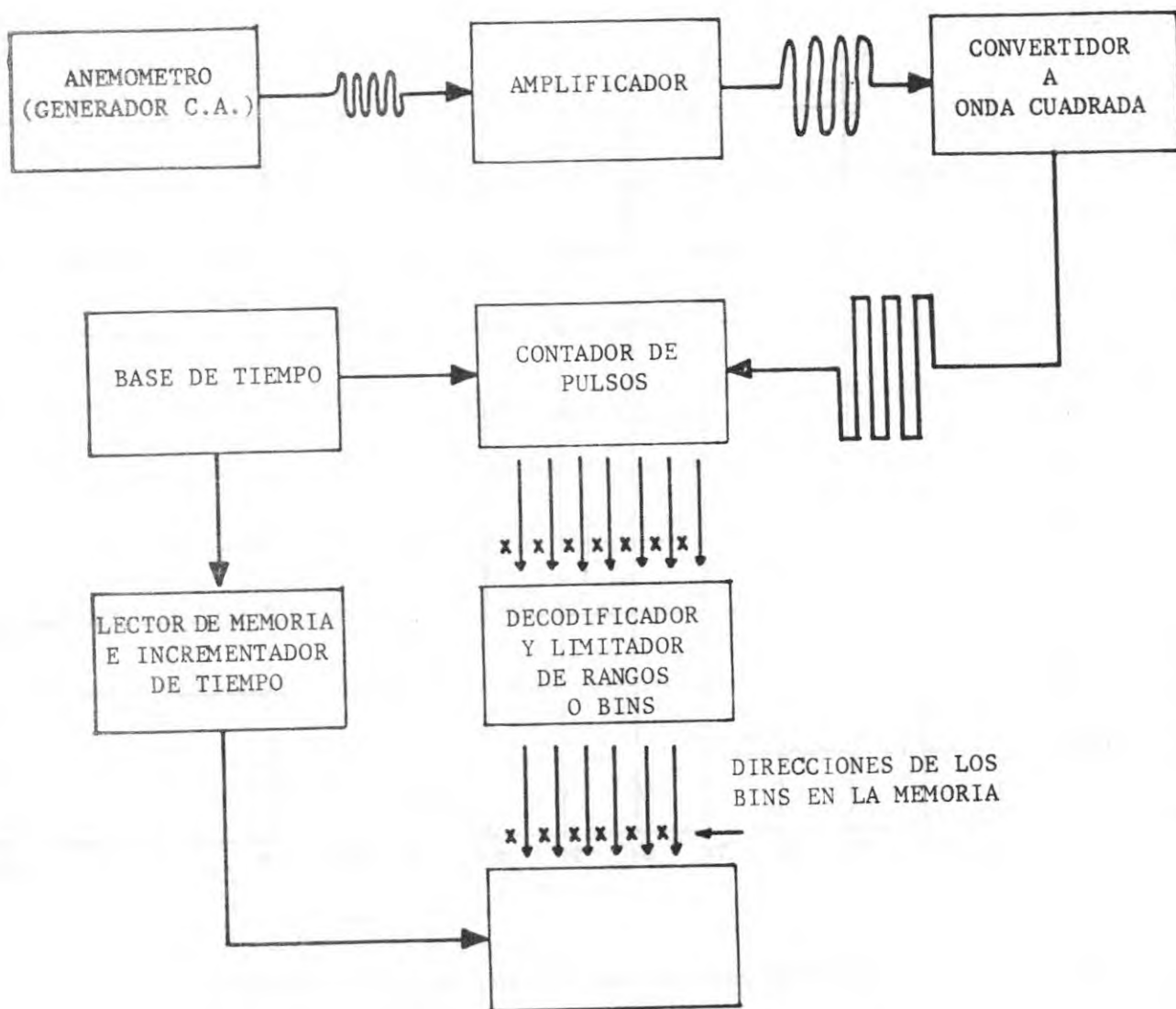


Figura 26 -- Implementación de un Registrador Electrónico

De esta manera, en una o más localidades de memoria correspondientes a 1 Bin se almacenará el número de segundos que la velocidad de viento estuvo en un determinado Bin durante un período de tiempo x , en el siguiente punto se verá la forma de procesar los datos de viento y se verá claramente la gran utilidad que tiene un equipo de estos.

En el Instituto de Investigaciones Eléctricas de México, la División de Equipos desarrolló un aparato que usando un microprocesador registra estos datos.

~~CAPITULO 5 - MANEJO DE DATOS~~

REGISTRO SEMANAL DE VELOCIDAD DEL VIENTO SEGUN LA ESCALA DE BEAUFORT

Semana: del _____ al _____ de _____

Día		Hora del Día																		
		5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	
Dom.	7																			
	6																			
	5																			
	4																			
	3																			
	2																			
	1																			
	0																			
Lun.	7																			
	6																			
	5																			
	4																			
	3																			
	2																			
	1																			
	0																			
Mar.	7																			
	6																			
	5																			
	4																			
	3																			
	2																			
	1																			
	0																			
Mier.	7																			
	6																			
	5																			
	4																			
	3																			
	2																			
	1																			
	0																			
Jue.	7																			
	6																			
	5																			
	4																			
	3																			
	2																			
	1																			
	0																			
Vie.	7																			
	6																			
	5																			
	4																			
	3																			
	2																			
	1																			
	0																			
Sab.	7																			
	6																			
	5																			
	4																			
	3																			
	2																			
	1																			
	0																			

Este formato permite hacer una primera evaluación y caracterización del viento, al obtener:

- a) Rango de velocidades medias y máximas
- b) Vientos dominantes (rosa de los vientos)
- c) Distribución horaria de los vientos
- d) Porcentaje promedio de calmas

3.1.1 Indicaciones de Velocidad y Rumbo en la Hoja de Registro.

La forma de "registro semanal de velocidades de viento" consta de siete grandes renglones, uno para cada día de la semana, los que contienen a su vez dieciocho columnas, una para cada hora, de las 5 de la mañana hasta las 10 de la noche. Los ocho pequeños renglones que subdividen cada día, desde el cero hasta el 7, indican la velocidad según la escala de Beaufort. Así, para cada hora del día durante toda la semana, existe un lugar para indicar rumbo y velocidad del viento.

Para la observación de la dirección del viento, se puede colocar un listón de dos o tres centímetros de ancho y de 40 a 50 centímetros de largo en el extremo superior de un palo, el que se colocará en un sitio alto (una azotea, un árbol, etc.). La dirección que señale la punta amarrada al palo, será la que en ese momento tenga el viento en relación a los cuatro puntos cardinales, los que deben estar perfectamente identificados para el lugar de las observaciones del viento.

El procedimiento para efectuar el registro es el siguiente:

- a) Observar unos cuantos segundos las referencias visibles para hacer la estimación de velocidad y rumbo en ese momento.
- b) Las letras que indican rumbo se anotarán en el renglón correspondiente a la velocidad estimada en la columna de la hora más próxima.
- c) Si existe calma, se anotará un guión en el renglón "cero" a la hora de la observación.

Al llenar esta forma, nos queda "dibujada" la distribución de velocidades durante el día, y si existe un patrón definido, este será visible. Veremos también cual es el viento dominante, al constatar que rumbo es el que se repite con mayor frecuencia.

De los datos obtenidos en la primera etapa se puede evaluar de una manera superficial si el lugar en estudio cumple con los requisitos para llevar a cabo un estudio más preciso de la distribución de velocidades de viento en el que se investigará: si el viento sopla con la suficiente intensidad para ser económicamente útil; como se distribuye de una manera precisa la velocidad del viento durante el día, los meses y el año; cuales son las duraciones probables de los vientos fuertes de su periodicidad, así como los períodos de calma y cual es su naturaleza dominante.

Todos estos datos nos permitirán saber, probabilísticamente, cuanta energía del viento es posible utilizar.

3.1.2 Análisis de la Hoja de Registro.

Con el objeto de efectuar un análisis estadísticamente válido, la mínima cantidad de información a procesar será la correspondiente a cuatro semanas.

Las tres preguntas básicas a responder al analizar estos registros son:

- 1 ¿Se aprecia la existencia de un patrón diario de distribución de velocidades?
- 2. ¿Es evidente la presencia de rumbos predominantes?
- 3. ¿Las calmas presentan una distribución y frecuencia más o menos definida?

El procesamiento de los datos nos debe llevar a disponer de la siguiente información:

- Rosa de los vientos (poligonal)
- Media mensual y desviación standard de la velocidad
- Medias horarias de velocidad de vientos dominantes y su desviación standard, cuando existe un patrón diurno definido de distribución de velocidades.

A continuación se describen los procedimientos a seguir para efectuar lo anterior.

3.1.2.1 Rosa de los Vientos

Para la realización de la rosa de los vientos, se utilizará un formato como el descrito en la Figura 28, en el que se procesarán los datos de rumbos de al menos cuatro semanas.

LUGAR: _____

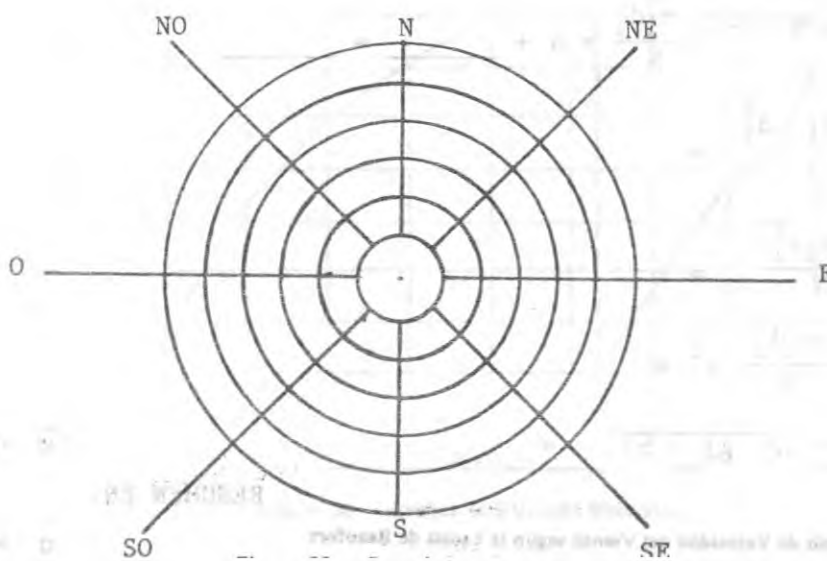
PERIODO: DEL DOMINGO _____ DE _____ DE 19 ____.

AL SABADO _____ DE _____ DE 19 ____.

FORMULO: _____

RUMBOS	C O N T E O	FRECUENCIA	PORCENTAJE
N			
NE			
E			
SE			
S			
SO			
O			
NO			
CAIMAS			

TOTAL: _____



3.1.2.2 Distribuciones horarias de velocidad e histogramas del período.

La Figura 29, ilustra el formato útil para el procesamiento de los datos de velocidad para un determinado período, obteniendo así la velocidad media y su desviación standard.

ANALISIS DE VELOCIDAD DEL VIENTO SEGUN LA ESCALA DE BEAUFORT

LUGAR: _____

FORMULO: _____

PERIODO: DOMINGO _____ DE _____

AL SABADO _____ DE _____

VELOCIDAD (BEAUFORT)	C O N T E O	FRECUENCIA n_i	DESVIACION d_i	$n_i d_i$
1			- 3	
2			- 2	
3			- 1	
4			0	
5			1	
6			2	
7			3	
TOTALES:				

a) Número de casos $N =$ _____

b) Media supuesta $M.S. =$ 4

c) $\sum n_i d_i =$ _____

d) $\frac{\sum n_i d_i}{N} =$ _____

e) $\bar{V} = M.S. + \frac{\sum n_i d_i}{N} = 4 + \text{_____} = \text{_____}$

f) $\sum n_i d_i^2 =$ _____

g) $\frac{\sum n_i d_i^2}{N} =$ _____

h) $\left(\frac{n_i d_i}{N} \right)^2 =$ _____

i) $\sigma = \sqrt{g) - h)} =$ _____

$\bar{V} =$ _____

Para la determinación de la distribución horaria de velocidades, cuando se observa la existencia de un patrón diario definido, se hará con un formato básicamente igual al de la Figura 29, pero para cada hora en que se desea determinar velocidades media y desviación standard.

Con esta información se estará en condiciones de hacer un gráfico de distribución diaria de velocidades, indicando valores medios horarios y amplitud de desviación standard.

3.1.3 Evaluación de Resultados.

Habiendo procesado la información y disponiendo de la rosa de los vientos, porcentaje de calmas, velocidad media del período, su desviación standard y opcionalmente el gráfico del patrón de distribución horaria de velocidades, se está en condiciones de realizar una evaluación preliminar del sitio y tomar la decisión de continuar el estudio anemométrico con un anemocinemógrafo y disponer así de información más completa y confiable.

Es evidente que al traducir el valor medio de la velocidad en escala de Beaufort a un valor en m/s, km/h, o mill/hora, se haga utilizando los valores mínimos del rango.

Es preferible manejar conservativamente estos valores y no ser muy optimistas.

3.2 REGISTROS DE DISTANCIA RECORRIDA

3.2.1 Introducción

Un anemógrafo de distancia recorrida, es un instrumento que registra la distancia que ha recorrido el viento al pasar por éste, referido a un intervalo de tiempo. Sus registros corresponden así a promedios de velocidad, para los intervalos considerados.

Un anemógrafo de distancia recorrida funciona como un integrador, que en forma mecánica o eléctrica cuenta o acumula las revoluciones del anemómetro de copas, hasta que totalicen un recorrido establecido en millas o kilómetros y el contador se restablezca en cero nuevamente.

La indicación analógica de la aguja de este instrumento indica la distancia recorrida acumulada para ese ciclo. El avance del papel registrador, proporciona la escala de tiempo y la combinación de ambos movimientos ortogonales papel y aguja registradora, da un trazo inclinado cíclico (diente de sierra) cuya pendiente representa la velocidad promedio del viento, en el intervalo considerado.

3.2.2 El Gráfico de Distancia Recorrida y su Procesamiento.

El gráfico de distancia recorrida se ilustra en la Figura 30.

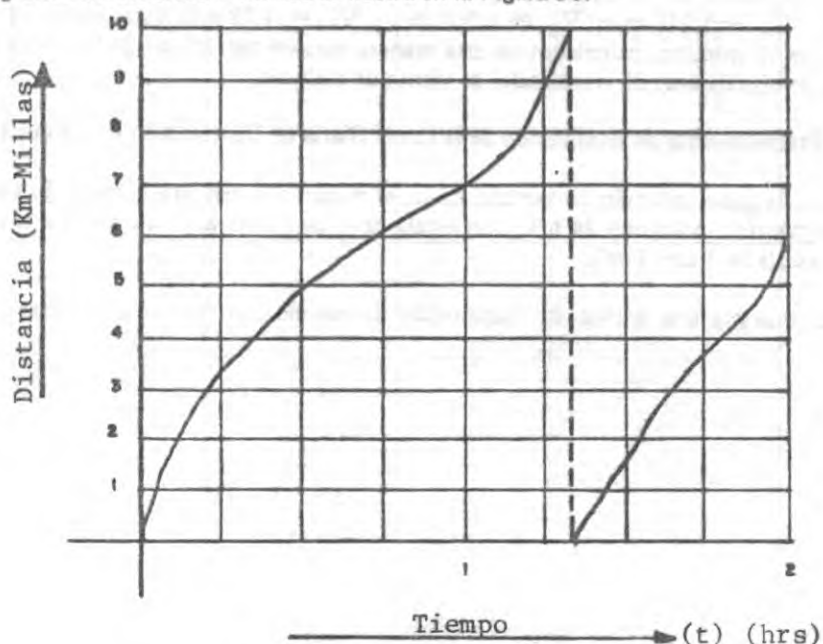


Figura 30 — Gráfico de Distancia Recorrida

El eje vertical denota la distancia en kilómetros o millas, y el eje horizontal la escala de tiempo, según la velocidad de arrastre del papel (un caso típico es de 1 pulgada/hora).

El desplazamiento de la aguja sobre el papel da un trazo en diagonal.

Para obtener la velocidad media del viento en un cierto intervalo de tiempo, simplemente se divide la distancia recorrida entre la duración de dicho intervalo.

La Figura 31, ilustra el caso de un gráfico cuya escala de distancia es de 0 a 10 millas y el desplazamiento del papel de 2 pulgadas/hora.

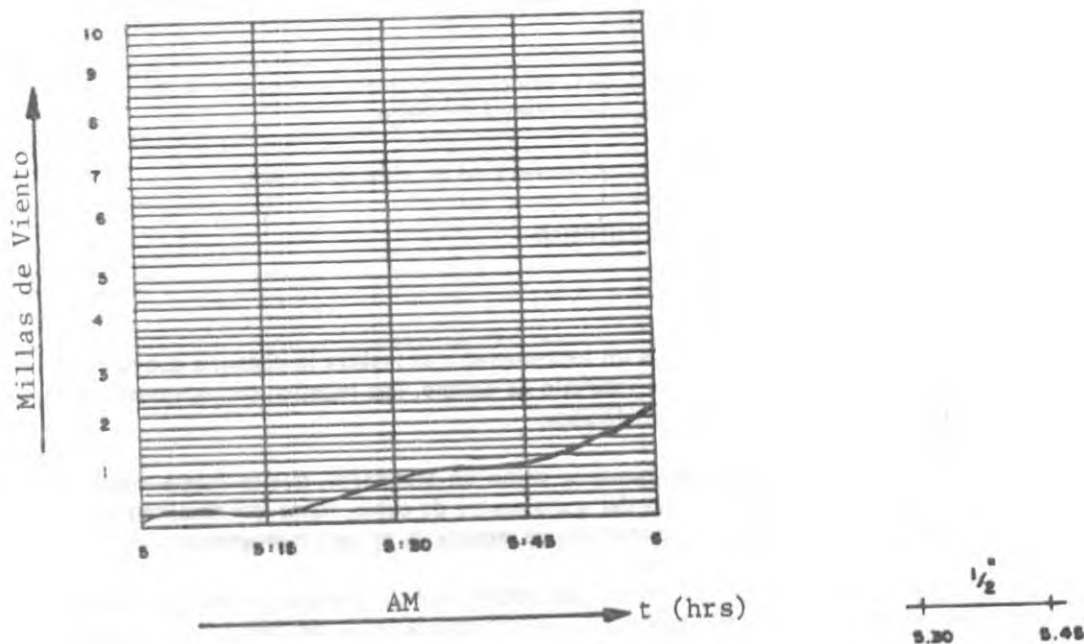


Figura 31 — Ejemplo de Gráfico de Distancia Recorrida

Considerando intervalos de 15 minutos, para el período de las 5 a las 6 hrs., tenemos que $\bar{V}_1 = 0.178$ m/s, $\bar{V}_2 = 1.246$ m/s; $\bar{V}_3 = 1.068$ m/s y $\bar{V}_4 = 1.78$ m/s. Estas velocidades medias para intervalos de 15 minutos, calculados de esta manera para un período de 24 hrs., nos permiten graficar la curva de distribución de velocidades de viento de cada día.

3.2.3 Procedimiento de Graficación de la Curva Diaria de Distribución de Velocidades

Sobre una hoja de papel milimétrico tamaño carta, se trazan dos ejes ortogonales. El eje horizontal representa el tiempo, indicando 24 hrs., con escala de 1 cm: 1 hora. El eje vertical indica velocidad en m/s con escala de 1 cm: 1 m/s.

La Figura 32, muestra una gráfica de distribución de velocidades de viento durante un día.

800-4-DIGIT 800-4-0200

A detailed wind speed distribution graph plotted on a grid. The vertical axis (y-axis) is labeled with values from 0 to 24 in increments of 1. The horizontal axis (x-axis) is labeled with values from 0 to 24 in increments of 1. The graph shows a step-like distribution curve, representing the frequency of wind speeds. The curve starts at a low frequency for low wind speeds, rises to a peak frequency of approximately 2.5 between 12 and 14 units, and then gradually decreases as the wind speed increases towards 24 units.

Es necesario indicar el período de registro, éste puede hacerse con una clave numérica del siguiente tipo: (AAMDDHH)₁ - (AAMDDHH)₂

en donde: AA últimos dos dígitos del año
MM mes indicado ordinalmente
DD día del mes, ordinalmente
HH hora del día, ordinalmente

EJEMPLO: 80040100 - 80040200

De:

Año: 1980
Mes: abril
Día: 1o.
Hora: cero horas

Hasta:

Año: 1980
Mes: abril
Día: 2
Hora: cero horas

El último dato para anotar en la hoja es el nombre, en extenso, del sitio donde se realizan esas mediciones.

3.3 ROSA DE LOS VIENTOS

La representación más común de la distribución de direcciones del viento es la rosa de los vientos.

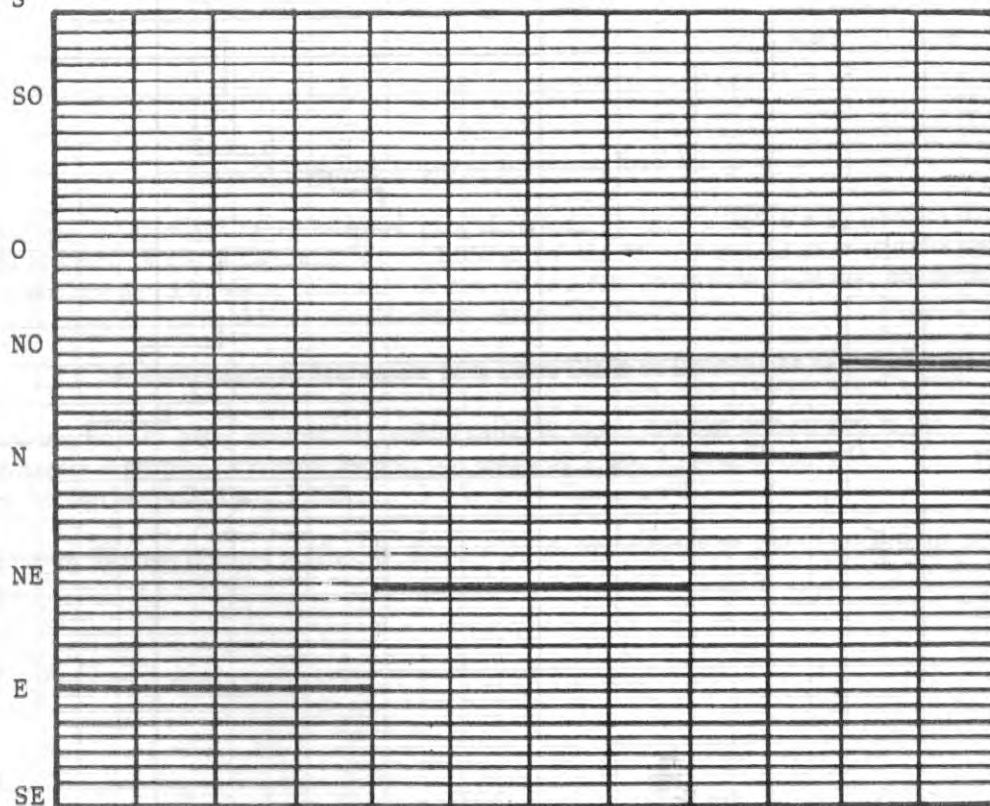
Su confección se logra a partir de la información obtenida a lo largo de cierto período mediante un registrador y un transductor (veleta).

Es de suma importancia, dado que es posible observar a simple vista el viento dominante y su porcentaje de ocurrencia, así como las calmas.

La manera de realizar una rosa de los vientos es la siguiente:

1. Obtención de la duración de cada dirección durante un período de observación (mes, estación, año) y obtención del porcentaje de frecuencia de cada dirección, a partir del gráfico del anemoscopio, Figura 33.

S



2. Representación sobre base de los ocho puntos cardinales del porcentaje de frecuencia, indicado como un polígono, Figura 34.

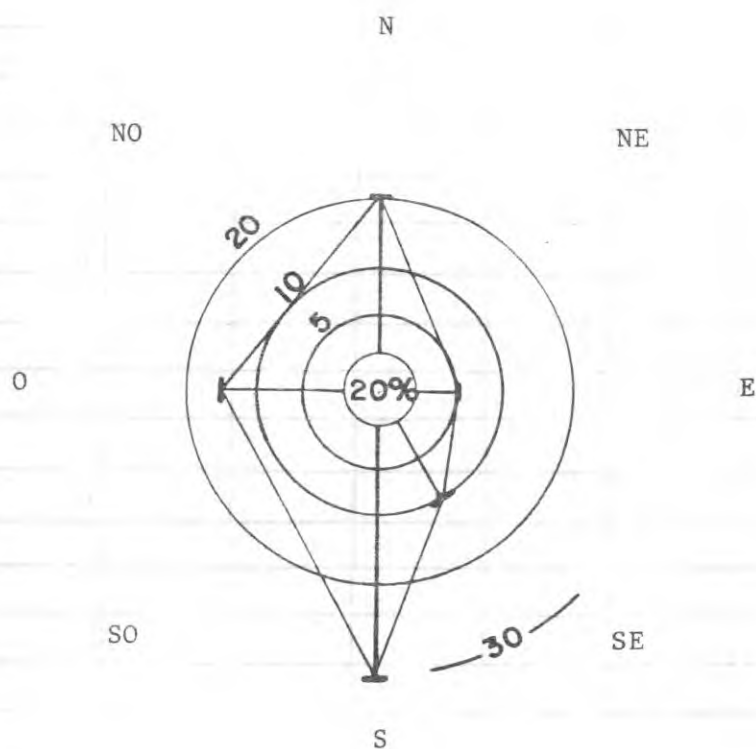


Figura 34 — Representación en los Ocho Puntos Cardinales

3.3.1 Obtención de la Duración de cada Dirección durante un Mes de Observación

A partir del registro de velocidad representado en la Figura 32, obtenemos día a día la duración de cada una de las direcciones y la anotamos sobre la hoja de datos (Figura 35). Dicha hoja muestra cada una de las direcciones contra los días del mes de observación.

rumbo DIA	N	NE	E	SE	S	SO	O	NO
1								
2								
3								
4								
5								
6								
7								
8								
9								
10								
11								
12								
13								
14								
15								
16								
17								
18								
19								
20								
21								
22								
23								
24								
25								
26								
27								
28								
29								
30								
31								
TOTAL								
%								

Figura 35 - Hoja de Datos para Registro de Duración de Velocidades

NOTA: en este tipo de registro, cuando existe calma, queda grabada la última posición de la veleta cuando existía viento; por lo tanto, es necesario cotejar el registro de velocidad para observar las direcciones en las que sí existió viento.

Al terminar cada mes, se procede a sumar el número de horas de cada dirección y se divide este valor entre el número de horas de un mes, obteniéndose así el porcentaje de frecuencias para cada dirección durante un mes.

3.3.2 Representación sobre la Base de los Ocho Puntos Cardinales del Porcentaje de Frecuencia

Esto es en sí, a lo que se le conoce como rosa de los vientos, es decir, a la representación del porcentaje de frecuencias para cada dirección, en la que el valor de dicho porcentaje está resumido por una barra de cierta longitud que señala cada una de las direcciones del viento y en el centro de esta configuración se encuentra anotado el porcentaje de calmas (ver Figura 34).

3.4 HISTOGRAMAS DE COMPILADORES ELECTRONICOS

Como se explicó anteriormente, un registrador electrónico almacena el tiempo durante el cual el viento sopla en un pequeño rango de velocidad definido de antemano. Con objeto de dar un ejemplo del manejo de la información registrada en este tipo de aparatos, utilizaremos un ejemplo teórico de uno de estos aparatos:

El ancho del BIN o sea, el rango de velocidad para un BIN, puede ser seleccionado en estos equipos; aquí usaremos un rango de 0.4 m/s. Por lo tanto, si consideramos un registrador con una capacidad de 32 BINS, quedarían definidos de la siguiente forma:

BIN	VEL	(V _X)	en	m/s	BIN	VEL	(V _X)	en	m/s
00	0	< V ₀	<	0.4	17	6.8	< V ₁₇	<	7.2
01	0.4	< V ₁	<	0.8	18	7.2	< V ₁₈	<	7.6
02	0.8	< V ₂	<	1.2	19	7.6	< V ₁₉	<	8.0
03	1.2	< V ₃	<	1.6	20	8.0	< V ₂₀	<	8.4
04	1.6	< V ₄	<	2.0	21	8.4	< V ₂₁	<	8.8
05	2.0	< V ₅	<	2.4	22	8.8	< V ₂₂	<	9.2
06	2.4	< V ₆	<	2.8	23	9.2	< V ₂₃	<	9.6
07	2.8	< V ₇	<	3.2	24	9.6	< V ₂₄	<	10.0
08	3.2	< V ₈	<	3.6	25	10.0	< V ₂₅	<	10.4
09	3.6	< V ₉	<	4.0	26	10.4	< V ₂₆	<	10.8
10	4.0	< V ₁₀	<	4.4	27	10.8	< V ₂₇	<	11.2
11	4.4	< V ₁₁	<	4.8	28	11.2	< V ₂₈	<	11.6
12	4.8	< V ₁₂	<	5.2	29	11.6	< V ₂₉	<	12.0
13	5.2	< V ₁₃	<	5.6	30	12.0	< V ₃₀	<	12.4
14	5.6	< V ₁₄	<	6.0	31	12.4	< V ₃₁	<	12.8
15	6.0	< V ₁₅	<	6.4	32	12.8	< V ₃₂	<	V max
16	6.4	< V ₁₆	<	6.8					del re gistra dor

El equipo en cuestión y por lo general, todo equipo de esta clase, cuenta con dos displays de tipo digital, uno de los cuales indicará el número de BIN y el otro el tiempo (en segundos) que la velocidad del viento alcanzó dentro del rango del BIN mostrado. Estos displays están, por regla general, apagados, con el objeto de que se consuma el mínimo de energía eléctrica cuando el equipo se deja en cierto lugar alimentado por una batería. Cuando se requiere leer los datos recopilados, se acciona un botón del tipo "PUSH BOTTOM", el cual cada vez que se oprima avanzará en uno, la cuenta del número de BIN, y por consiguiente la información en el display de tiempo, cambiará para cada cambio de número de BIN.

Si iniciamos nuestra recopilación de datos a partir del BIN 00, podríamos "vaciarlos" en una tabla como la siguiente:

NUMERO DE BIN	TIEMPO EN SEGUNDOS		
00	7,000	=	1.9444 hrs.
01	8,000	=	2.2222 "
02	8,000	=	2.2222 "
03	9,000	=	2.5000 "
04	10,000	=	2.7777 "
05	12,000	=	3.3333 "
06	15,000	=	4.1666 "
07	15,000	=	4.1666 "
08	20,000	=	5.5555 "
09	35,000	=	9.7222 "
10	43,000	=	11.9444 "
11	50,000	=	13.8888 "
12	100,000	=	27.7777 "
13	110,000	=	30.5555 "
14	120,000	=	33.3333 "
15	130,000	=	36.1111 "
16	140,000	=	38.8888 "
17	150,000	=	41.6666 "
18	210,000	=	58.3333 "
19	270,000	=	75.0000 "
20	280,000	=	77.7777 "
21	300,000	=	83.3333 "
22	100,000	=	27.7777 "
23	100,000	=	27.7777 "
24	80,000	=	22.2222 "
25	70,000	=	19.4444 "
26	60,000	=	16.6666 "
27	50,000	=	13.8888 "
28	40,000	=	11.1111 "
29	30,000	=	8.3333 "
30	10,000	=	2.7777 "
31	6,000	=	1.6666 "
32	4,000	=	1.1000 "

TIEMPO TOTAL = 2,592,000 seg = 720h = 30 días

Con objeto de hacer una gráfica de distribución de frecuencia de la velocidad del viento, se toma la velocidad media del BIN o sea, para BIN 00 su rango o clase es $0 > V_0 < 0.4$ m/s y la velocidad media de la clase será 0.2 m/s, para el BIN 01 será 0.6, para el 02 será 1.0 y así sucesivamente, entonces tomamos dicha velocidad media como la significativa del BIN, esto llevado a una gráfica de velocidad de viento contra horas nos daría una gráfica como la mostrada en la Figura 36.

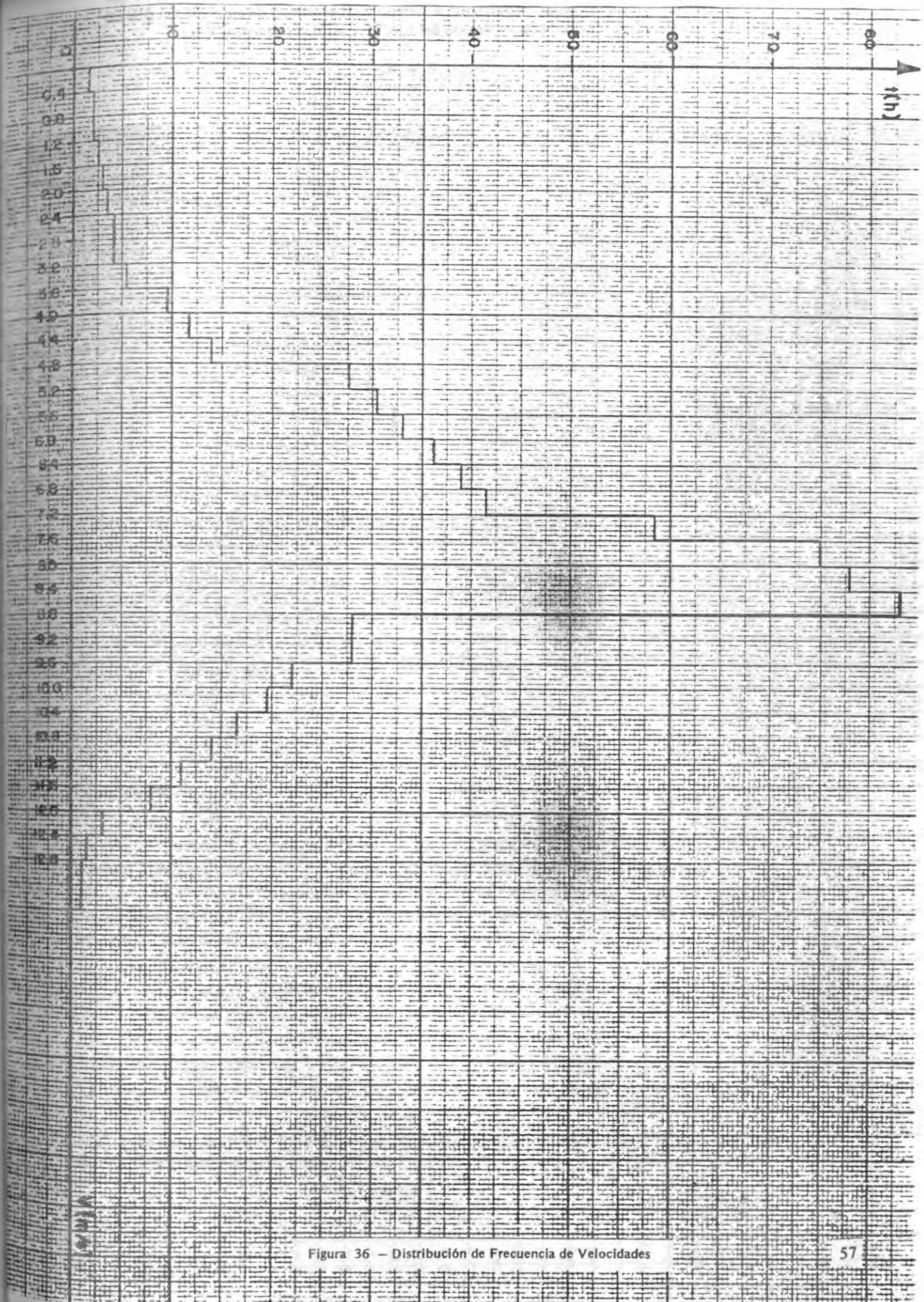


Figura 36 — Distribución de Frecuencia de Velocidades

De estos datos, es muy fácil obtener la curva de duración de velocidades (Figura 37), ya que lo único que queda por hacer es restar inicialmente al tiempo total el tiempo de duración del BIN 00 y posteriormente a la duración del BIN 00, el tiempo del BIN 01 y así sucesivamente, o sea:

Duración BIN 00 = Tiempo total - tiempo BIN 00

Duración BIN 01 = Duración del BIN 00 - tiempo BIN 01

Duración BIN XX = Duración del BIN (XX-1) - tiempo BIN XX

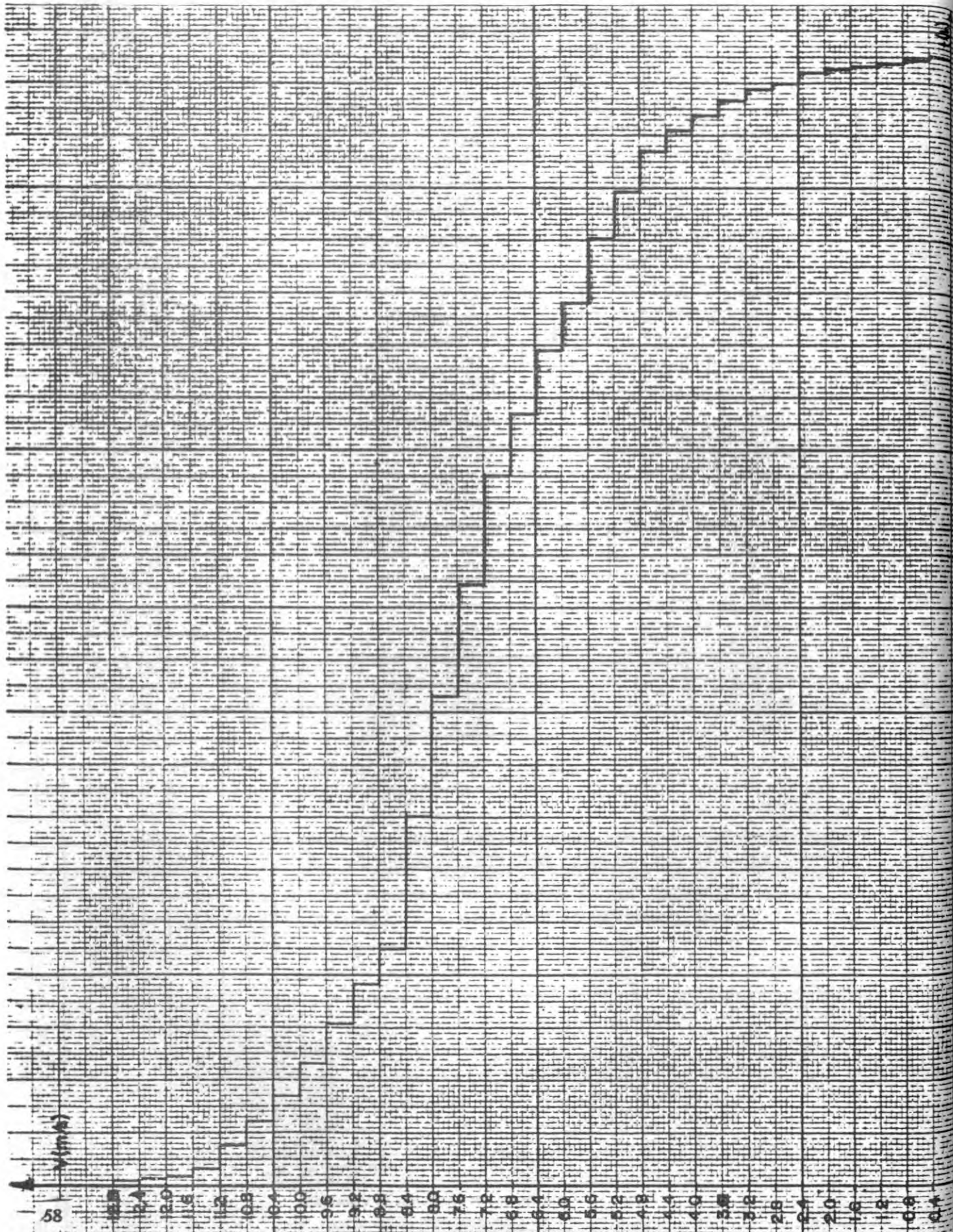


Figura 37 - Curva de Duración de Velocidades

Si obtenemos esta información y la "vaciamos" en una tabla, obtendremos:

BIN	DURACION DE TIEMPO	BIN	DURACION DE TIEMPO
00	718.0556 Hrs.	15	527.7785 Hrs.
01	715.8334 Hrs.	16	488.8897 Hrs.
02	713.6112 Hrs.	17	447.2231 Hrs.
03	711.1112 Hrs.	18	388.8898 Hrs.
04	708.3335 Hrs.	19	313.8898 Hrs.
05	705.0002 Hrs.	20	236.1121 Hrs.
06	700.8336 Hrs.	21	152.7788 Hrs.
07	696.6670 Hrs.	22	125.0011 Hrs.
08	691.1115 Hrs.	23	97.2234 Hrs.
09	681.3893 Hrs.	24	75.0012 Hrs.
10	669.4449 Hrs.	25	55.5568 Hrs.
11	655.5561 Hrs.	26	38.8902 Hrs.
12	627.7784 Hrs.	27	25.0014 Hrs.
13	597.2229 Hrs.	28	13.8903 Hrs.
14	563.8896 Hrs.	29	5.5570 Hrs.
		30	2.7793 Hrs.

3.5 REGISTRADORES CON REGISTRO DE DIRECCION DE VIENTO

Este tipo de registradores separa las mediciones con respecto a cierto número de direcciones de viento (generalmente ocho, que son: N, S, E, O, NO, NE, SO y SE). Cada una de estas direcciones están asociadas con determinado número de BINS (para nuestro ejemplo, 32 BINS) y los datos se leerán con un selector de dirección de velocidad de viento, o sea, que tenemos un selector de ocho posiciones y cuando seleccionamos una de ellas, obtendremos la lectura del tiempo durante el cual el viento estuvo en cierto rango de velocidad y en cierta dirección, esto se muestra a continuación:

SELECTOR DE	N	NE	E	SE	S	SO	O	NO
DIRECCION BIN								
00	XXXXX	XXXXX	XXXXX	XXXXX	XXXXX	XXXXX	XXXXX	XXXXX
01	XXXXX	XXXXX	XXXXX	XXXXX	XXXXX	XXXXX	XXXXX	XXXXX
02	XXXXX	XXXXX	XXXXX	XXXXX	XXXXX	XXXXX	XXXXX	XXXXX
03	XXXXX	XXXXX	XXXXX	XXXXX	XXXXX	XXXXX	XXXXX	XXXXX
04	XXXXX	XXXXX	XXXXX	XXXXX	XXXXX	XXXXX	XXXXX	XXXXX
.	.	.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.	.	.
XX	XXXXX	XXXXX	XXXXX	XXXXX	XXXXX	XXXXX	XXXXX	XXXXX

Estos datos se pueden llevar a gráficas como las mostradas anteriormente y obtener, por ejemplo, los vientos dominantes en direcciones determinadas.

CAPITULO 4 – PROSPECCION DE ZONAS Y SITIOS DE INTERES

La exploración del viento puede establecerse a tres niveles de resolución: la regionalización del viento, la prospección de zonas con buen potencial eólico y la localización de sitios para un aprovechamiento óptimo.

Para la regionalización de los vientos, indudablemente que la red meteorológica de un país y su información histórica son de vital importancia.

Por otra parte, es necesario desarrollar una metodología de análisis sobre cartas, que permita localizar zonas con vientos, determinando la correlación adecuada entre factores topográficos y climatológicos, asociados a una zona de vientos predominantes relativamente constantes o de periodicidad bien definida.

A nivel de localización de sitio, la inspección visual de la topografía local, la evidencia ecológica y la colocación de anemómetros en diferentes sitios para mediciones simultáneas, permitirá localizar el sitio adecuado.

La determinación del sitio adecuado, es relativa a la aplicación que se pretenda hacer de la energía eólica, dada su magnitud y los requerimientos a satisfacer. No es lo mismo localizar una aerobomba para un pozo artesiano, donde es el pozo lo que determina el punto de aplicación, a la localización de un aerogenerador de 1 MW de capacidad instalada interconectado a una línea de subtransmisión o de distribución eléctrica.

Aquí es donde surgen cuestiones asociadas a la factibilidad del aprovechamiento de la energía eólica, ellas son:

- a) ¿En qué lugares existe viento con la suficiente intensidad como para ser económicamente útil?
- b) ¿Cuáles son las cantidades anuales de energía del viento que pueden ser esperadas en un determinado sitio?
- c) ¿Cómo se distribuye el viento en el tiempo, durante el día, el mes o el año y aún en períodos más largos?
- d) ¿Cuáles son las duraciones probables de vientos de alta velocidad o de períodos de calma y sus frecuencias durante un determinado tiempo?

Localizar un buen lugar para aprovechar la energía del viento es equivalente a localizar la veta de algún mineral. Una estructura geológica determina la posibilidad de la existencia de determinados minerales, una prospección detallada localiza las vetas. En esta comparación, el papel del geólogo y del meteorólogo son semejantes. Al igual que el papel del especialista en eoloenergética y el directamente enfocado a la prospección de minerales. Lugares con elevado potencial eólico, al igual que un yacimiento mineral, corresponden a características muy específicas del sitio.

Deslindado esto, ¿Cuáles son las características del viento y en consecuencia las influencias topográficas, que interesan para su aprovechamiento energético?

Por cuanto a su dirección, el que los vientos dominantes prevalezcan un gran porcentaje de tiempo, indica la uniformidad de los gradientes de presión que los origina; cambios constantes de dirección alrededor de la dominante, son indicativas de turbulencia local que lo demerita. Por lo que a la velocidad respecta, es necesario conocer la distribución estadística de velocidades en períodos diarios, mensuales y anuales. El dato de la velocidad media anual es indicativo de lo que puede esperarse.

Se han mencionado ya algunas características topográficas que indican un lugar con buen potencial eólico.

La localización de estos sitios se puede hacer en base a cartas topográficas y climatológicas, ya que fuertes desniveles e isobaras muy juntas son indicativos de fuertes gradientes de presión responsables de vientos de naturaleza regional. En el sitio específico, la evidencia ecológica es importante, ya que se manifiesta como deformaciones en los árboles al estar sujetos a esfuerzos continuos ocasionados por los vientos dominantes, siendo el grado de esta deformación indicativa de su velocidad media.

Por otra parte, un buen punto para aprovechamiento eólico tiene que sobresalir sobre las irregularidades del terreno u otros obstáculos: edificios, árboles, rocas, o estar alejados al menos 100 metros, si se requiere de un flujo lo menos turbulento posible.

Localizado un sitio importante y hecha su medición, la curva anual de duración de velocidades se convierte en una curva anual de duración de potencias, al obtener los cubos para los distintos valores de las ordenadas y aplicar la constante de proporcionalidad.

Además de estas mediciones, es necesario conocer las velocidades instantáneas de rachas de viento, que si bien no contribuyen en nada a la energía que se obtiene del viento, dada la inercia de los equipos conversores, es importante conocerlas para considerar los esfuerzos instantáneos a que se sujetan tales equipos. Ya que estos pueden estar localizados a una altura diferente de 10 metros sobre el suelo, o las mediciones se hacen a la altura deseada o se establece el patrón vertical de distribución de velocidades para ese punto.

Por lo mencionado en la parte anterior, se infiere la necesidad de una metodología de prospección de este recurso. Ahora bien, dada la importancia del aprovechamiento energético que se pretende realizar, será la extensión, profundidad y precisión con que se hará este estudio.

Para la generación de electricidad con SCEE de mediana y gran capacidad (≥ 100 kW) en instalaciones unitarias o en conjuntos, la metodología de la prospección y evaluación de sitios, cubre las siguientes seis etapas:

Etapas 1. Obtención y Análisis de Datos

A) Datos meteorológicos existentes*

1. Temperaturas
2. Precipitación
3. Viento en superficie
4. Viento en la atmósfera libre
5. Registros horarios de viento
 - Intensidad
 - Persistencia

* Mensuales, estacionales y anuales.

B) Mapas topográficos de la zona en estudio

Etapas 2. Investigación de Campo

Esta etapa está orientada a realizar una compilación de información sobre la región en estudio, sobre los siguientes aspectos:

- a) Uso potencial del suelo
- b) Modalidades de propiedad de la tierra
- c) Vías de comunicación
- d) Recursos naturales
- e) Distribución de la población
- f) Otros aspectos de interés

Etapas 3. Prospección del Recurso Eólico en un Área Definida

Una región interesante desde el punto de vista de su potencial eólico, puede quedar físicamente limitada a áreas restringidas, como resultado del análisis de la etapa anterior. Así, las áreas potencialmente aprovechables serán estudiadas para determinar la distribución espacial del viento, esto se hará con una red de anemómetros de relativo bajo costo.

Etapas 4. Verificación de Área

Habiendo localizado los lugares de interés, se procederá a caracterizar el viento en esos lugares. Esto se hará utilizando equipo de mayor calidad y costo. Si las primeras tres etapas se orientaron a determinar intensidad, duración y variación estacional del viento para detectar aquellos lugares de mayor interés energético, en esta etapa se recaba información de interés en relación con el SCEE, al caracterizar el viento en el área.

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

Este análisis meteorológico en el sitio específico en que se pretende instalar grandes SCEE, requiere de torres de medición con sensores de velocidad, temperatura y presión a varios niveles, que permitan caracterizar el comportamiento de la capa inferior de la atmósfera, por cuanto a condiciones de perfil vertical de velocidades, turbulencia, etc., serie de parámetros sobre el comportamiento del viento que tienen incidencia en el funcionamiento, el costo, vida útil, etc., de un gran SCEE.

Etapas 6. Investigación sobre el Comportamiento y Eficiencia del SCEE

Esta última etapa, está destinada a simular el comportamiento de el SCEE, y la cantidad de energía eléctrica producida, en forma mensual, estacional y anual. De esto no solo se determina el costo total por unidad de energía producida a partir de un SCEE, sino que considerando su condición integrada a un sistema eléctrico, se evalúa también el ahorro de combustible en una termoeléctrica o agua en una planta hidroeléctrica. Este análisis será el que finalmente determine la viabilidad técnico-económica de aprovechar la energía eólica en ese sitio.

Habiendo mencionado a grandes rasgos la metodología para la localización de sitios de interés para generación de electricidad, para ser alimentada a un sistema eléctrico, es conveniente insistir en que dependiendo de la magnitud de la aplicación será la calidad del proceso de selección de sitios.

En términos generales las técnicas de localización de áreas y sitios de interés por su posible potencial energético eólico, las podemos dividir en dos grupos: indirectas y directas, que enumeramos a continuación:

Prospección indirecta:

- Información histórica de parámetros climatológicos, proporcionados por los Servicios Meteorológicos Nacionales
- Mapas climatológicos
- Topónimos y referencia oral.

Prospección directa:

- Encuesta
- Evidencia ecológica
- Mediciones in situ.

4.1 PROSPECCION INDIRECTA

4.1.1 Servicio Meteorológico Nacional

La información histórica de los parámetros climatológicos que los Servicios Meteorológicos de cada país han compilado durante muchos años, es indudablemente el punto de partida para una evaluación de este recurso en cada país de la región; sin embargo, la experiencia ha mostrado que

se debe ser cuidadoso al manejar esta información, asegurándose primero de su consistencia y confiabilidad antes de proceder a su análisis.

4.1.2 Mapas Climatológicos

El análisis de mapas climatológicos, es un paso preliminar a la prospección directa, por el cual es posible delimitar zonas con probabilidad de vientos aprovechables.

Esto se basa en que las zonas de transición de un clima a otro, en razón de topografía, orografía, precipitación, humedad, etc., que determinen una respuesta termodinámica diferente al ciclo diario de insolación, lo que dará lugar a vientos locales de carácter advectivo, similares a brisas mar/tierra en función de la diferencia de temperatura en las capas inferiores de la atmósfera durante el día. La Figura 38, ilustra lo mencionado.

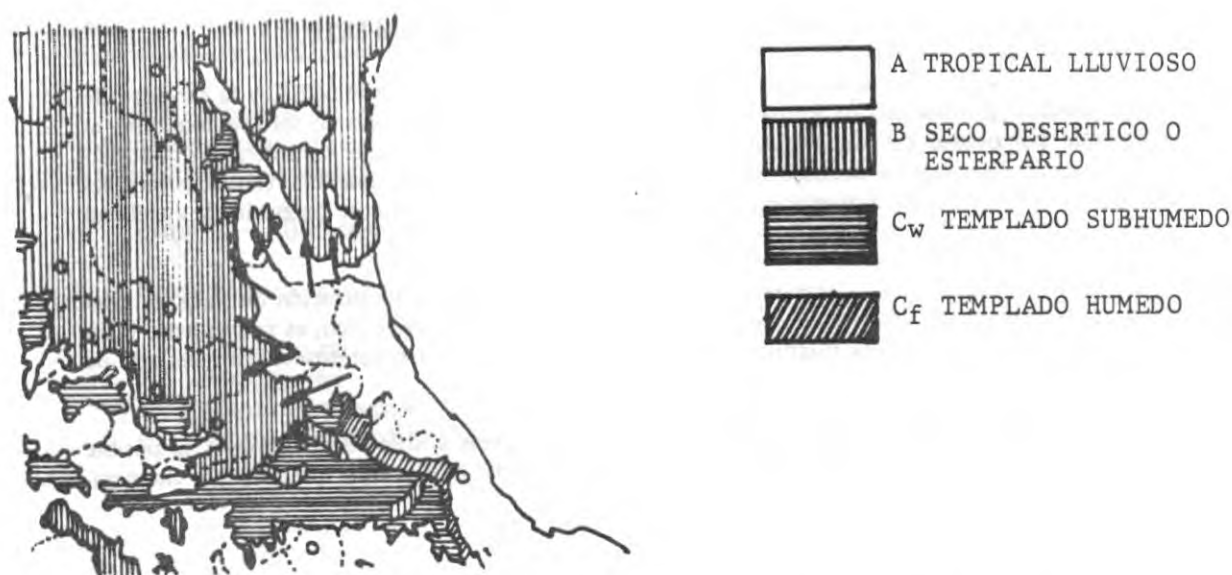


Figura 38 — Esquema de los Límites de Transición de un Clima a Otro mostrando la Dirección Probable del Viento Advectivo

4.1.3 Topónimos y Referencia Oral

Una investigación de topónimos (nombres de sitios) puede significar una buena referencia de áreas con viento fuerte, cuando al ser significativo este fenómeno, de alguna manera se asocia al nombre del lugar. En México, por ejemplo, la zona más importante por su potencial energético eólico, se localiza a los alrededores de una población cuyo nombre es "La Ventosa".

La referencia oral, no es otra cosa que "dicen que hay mucho viento en tal lugar" para lo cual el personal que trabaja en instituciones gubernamentales o ministerios, que tienen que realizar trabajo en la zonas rurales, puede ser una fuente de información de mucho valor.

4.2 PROSPECCION DIRECTA

4.2.1 Encuesta

La encuesta consiste en la búsqueda sistemática y en la región bajo estudio, de la referencia oral acerca de lugares o zonas donde el viento puede ser interesante desde el punto de vista energético.

4.2.2 Evidencia Ecológica

4.2.2.1 Introducción

La evidencia ecológica es básicamente el conjunto de efectos ocasionados por el viento sobre el terreno y la vegetación en un determinado lugar.

Dentro de la investigación para la selección de sitios considerados como probables para el aprovechamiento de la energía eólica, la observación de la evidencia ecológica resulta útil para la obtención de información acerca del comportamiento del viento.

El principal objetivo de la inspección ecológica es la obtención del rango de velocidades y dirección del viento dominante, dado el ahorro de tiempo de investigación que esto puede significar ya que no es empleado ninguna clase de instrumento. Este tipo de análisis involucra una serie de observaciones acerca del terreno y vegetación bajo el efecto de vientos de determinado rango de velocidades, contando que dichos efectos pueden variar según el lugar y que esta inspección es sólo un paso preliminar de estudios más precisos sobre el mismo.

4.2.2.2 Clasificación de la evidencia ecológica

La evidencia ecológica se puede clasificar como:

- Efectos sobre el terreno
- Efectos sobre la vegetación

Dentro de los efectos ocasionados sobre el terreno debido a su exposición al viento, podemos contar la erosión y la formación de dunas sobre un medio desértico.

La erosión consiste en el desgaste por rozamiento del viento sobre el terreno, aunque esto no puede ser el único agente físico que la ocasione.

La formación de dunas es la acumulación de arena en montecillos por efecto del viento en zonas desérticas, las que se distribuyen como grandes surcos en forma perpendicular a la dirección del viento dominante. Ver Figura 39.

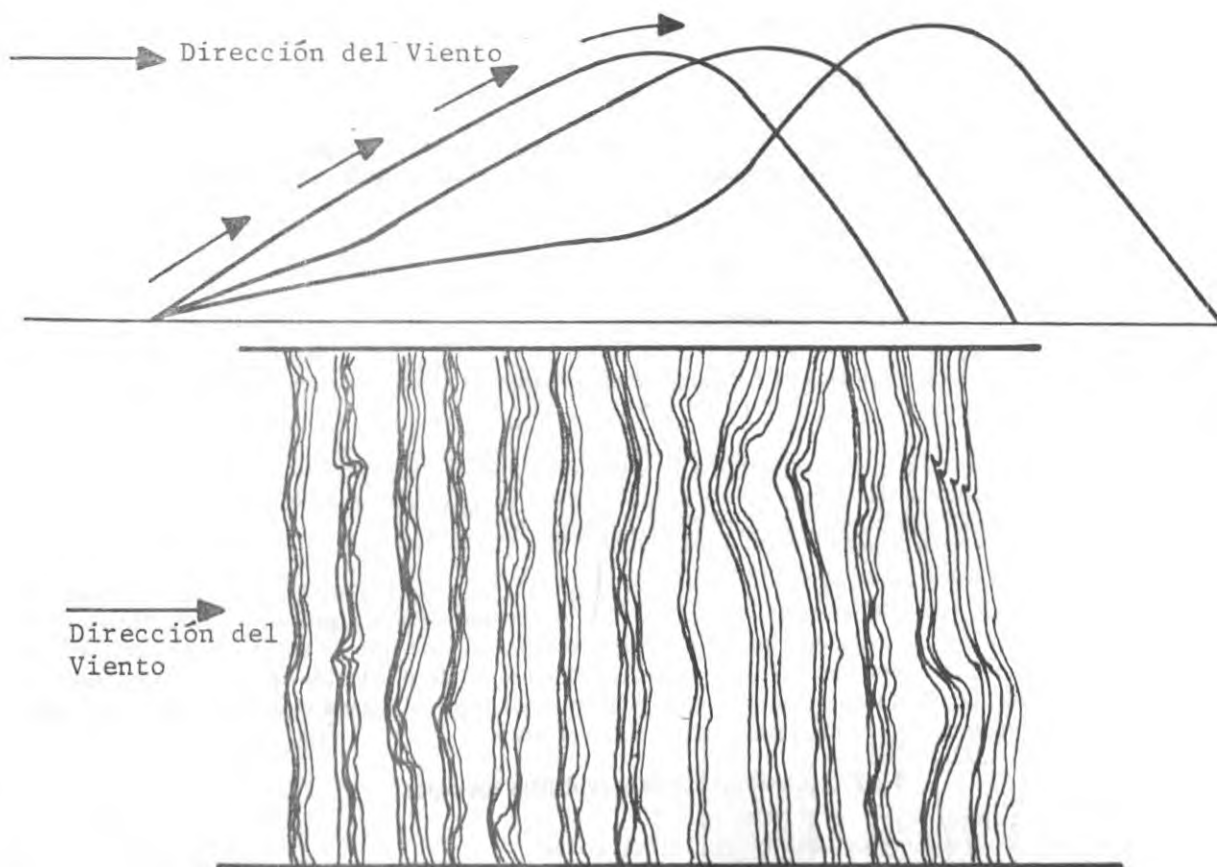


Figura 39 — Formación de Dunas

Los efectos en la vegetación causados por exposición al viento son los siguientes:

- Cepillado
- Deformado
- Tendido

El primer efecto consiste, en el simple roce del viento con la vegetación, vientos con velocidad media anual entre (6 y 10 mph) 2.7 y 4.5 m/s. El segundo consiste, en la deformación con tendencia al viento dominante entre (8 y 10 mph) 3.6 y 8.5 m/s, y por último el tendido que es básicamente una deformación extrema a solo una escasa distancia del suelo con (22 mph) 9.83 m/s.

Un caso que puede citarse como ejemplo, es el bajo crecimiento de la vegetación en colinas donde la velocidad media anual es mayor de 10.3 m/s (23 mph) en Gran Bretaña.

Una metodología interesante de inspección de evidencia ecológica, consiste en la medición de las proporciones de la excentricidad de los anillos de un corte transversal de un tronco, así como de su deformación de circular a elipsoidal. Esta metodología se puede aplicar sin necesidad de cortar el tronco, tomando dimensiones externas en dos ejes ortogonales y haciendo un taladro de muestreo, para localizar el corazón y medir excentricidad.

Por último, es necesario aclarar que estas técnicas, tienen valor cualitativo generalizado, pero no así cuantitativo, ya que la adaptación a cada habitat específico, puede significar propiedades mecánicas distintas para la madera de una misma variedad de árboles.

4.2.2.3 Métodos de evaluación de velocidad a partir de efectos en la vegetación

Existen métodos para llevar a cabo la evaluación de la velocidad en un determinado lugar a partir de los efectos en la vegetación tales como:

- Observación de la deformación del árbol
- Cálculo de la relación de deformación.

El primer método es simplemente la observación de la forma del árbol y su comparación con los esquemas que aparecen en la Figura 40, de ahí obtenemos el rango de velocidad media anual especificado en la Tabla 3.

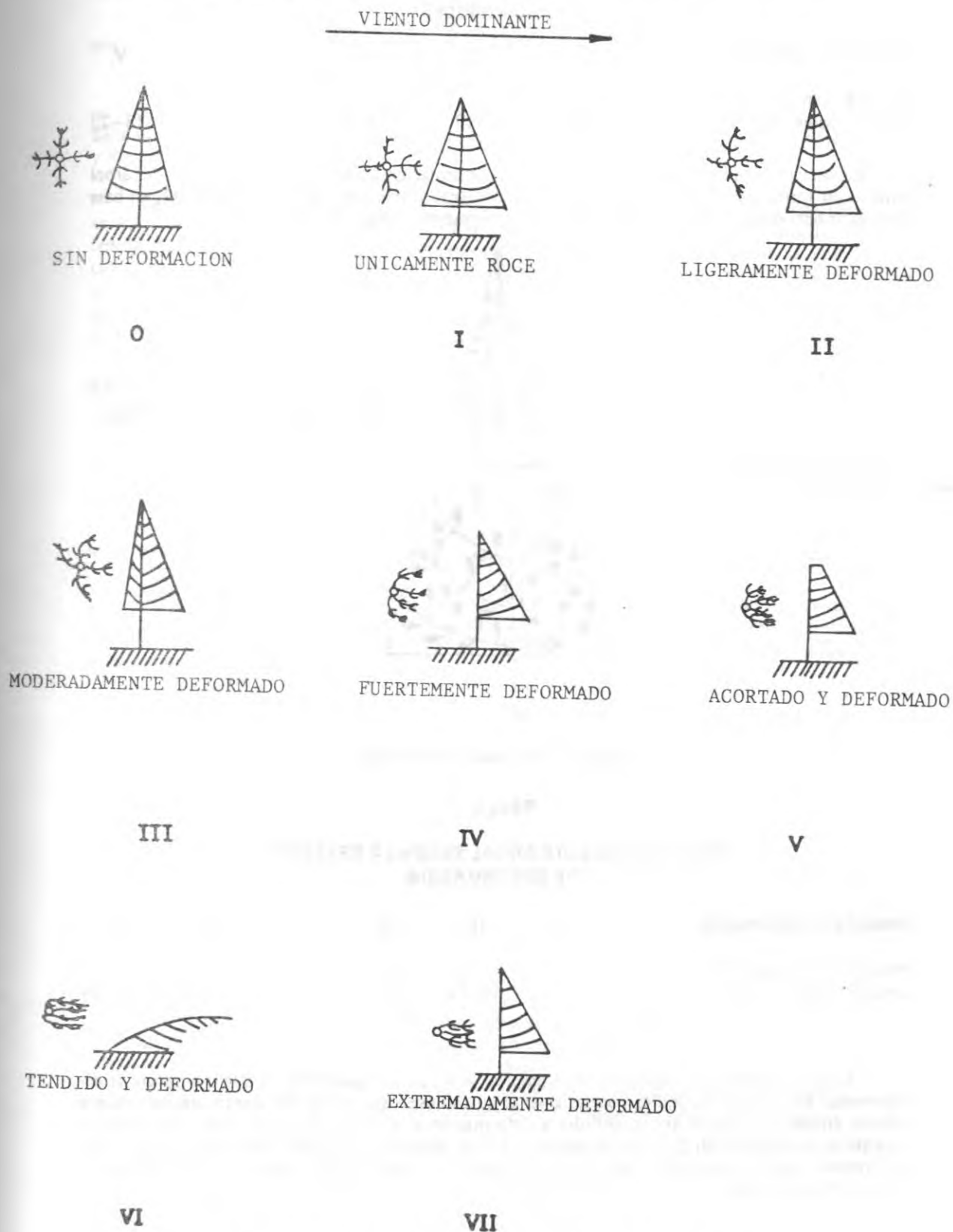


Figura 40 — Esquema según la Escala de Viento basada en la Deformación de los Árboles

TABLA 3
VELOCIDAD MEDIA ANUAL SEGUN LA DEFORMACION
DE LOS ARBOLES

Esquema de Deformación	I	II	III	IV	V
Rango de deformación media anual probable, mph	6-10	8-12	11-15	12-19	13-22

La otra manera es calculando la relación de deformación a partir de una fotografía del árbol tomado en forma perpendicular a la dirección del viento dominante, según la Figura 41, en base a ese valor obtenemos el rango de velocidad que le corresponde según la Tabla 4.

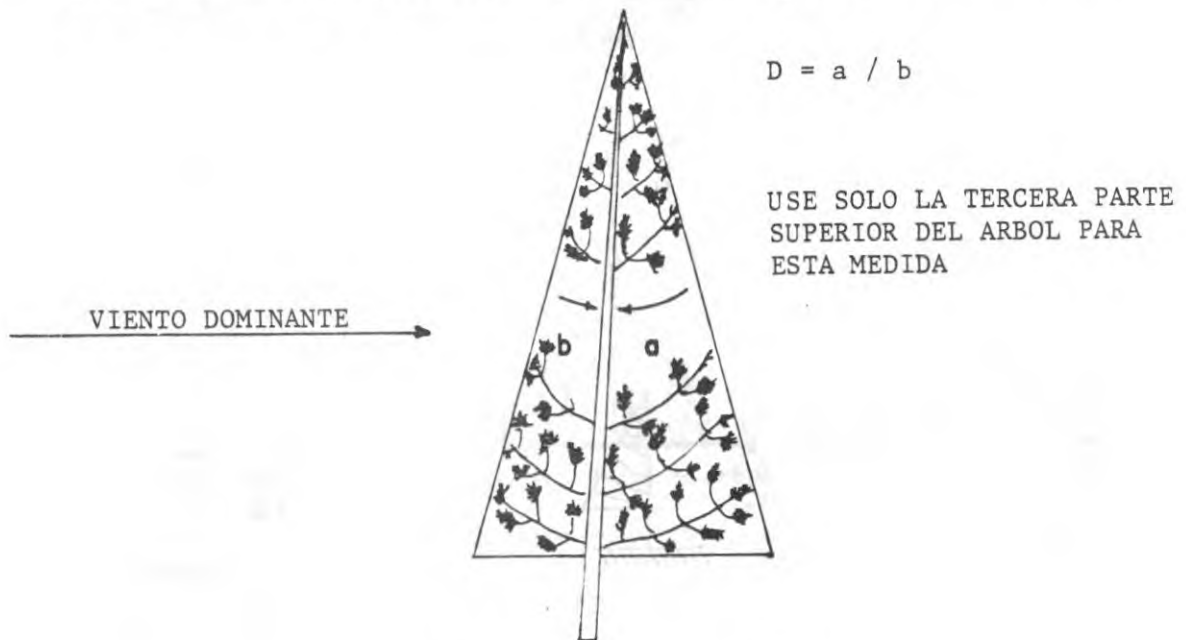


Figura 41 — Relación de Deformación

TABLA 4
VELOCIDAD MEDIA ANUAL SEGUN LA RELACION
DE DEFORMACION

Relación de Deformación	I	II	III	IV	V	VI	VII
Rango de velocidad media anual probable, mph	4-8	7-10	10-12	12-15	14-18	15-21	16-24

Una precaución que debe tomarse al emplear este tipo de indicadores, es que la ausencia de deformación en un árbol no indica necesariamente que en ese lugar prevalecen vientos débiles, ya que dichos árboles no pueden ser susceptibles a deformación o posiblemente estén expuestos a vientos fuertes en toda dirección. Los árboles empleados para este tipo de análisis, deben ser árboles de hojas perenes, los de variedades caducifolias no sirven para este tipo de análisis, ya que introducen mayor grado de incertidumbre al evaluar el viento.

4.2.3 Mediciones In Situ

4.2.3.1 Selección de sitios

Antes de empezar a medir la velocidad del viento, es necesario seleccionar el mejor sitio posible para instalar el anemómetro. Para este fin será útil reiterar algunos conceptos básicos.

Todos los vientos son básicamente el resultado de diferencias de temperatura en la atmósfera y la influencia de las características superficiales del planeta. Los vientos que son significativos para su aprovechamiento energético, pueden ser divididos en dos categorías: los vientos planetarios y los vientos locales.

Los sistemas de vientos planetarios, conocidos normalmente como vientos prevalecientes, son aquellos grandes movimientos que dominan áreas enteras y muestran características direccionales constantes, variando solamente con el movimiento de sistemas de alta y baja presión y con las estaciones del año. En muchos lugares, ellos son los vientos dominantes, y los buenos lugares para un aprovechamiento energético, son aquellos que toman máxima ventaja de los vientos prevalecientes. Las lomas expuestas al viento, líneas costeras expuestas a vientos prevalecientes, una planicie abierta o una meseta, un valle abierto que corre paralelo a vientos prevalecientes, o el lado expuesto al viento de una colina de flancos con suave pendiente.

Los vientos locales, por el contrario son causados por diferencias de temperatura creadas por condiciones topográficas locales.

Las brisas tierra-mar, por ejemplo, que soplan del mar hacia la tierra durante el día, y de la tierra hacia el mar durante la noche son debidas simplemente a que la temperatura sobre la tierra es más susceptible de cambiar que sobre el océano. Las brisas de valles y montañas son causadas por los mismos efectos locales y en un día tibio y soleado, los vientos pueden desatarse fuertemente del fondo de un valle a lo largo de las pendientes de colinas adyacentes.

Seleccionar el mejor sitio en áreas donde los vientos locales son dominantes, o son al menos suficientemente fuertes para modificar el efecto de los prevalecientes, es claramente más difícil; además antes de hacer una selección final del sitio, podrán ser requeridas pruebas frecuentes en varios puntos apropiados.

Independientemente de los vientos que sean dominantes, deberá tenerse cuidado para seleccionar un sitio que tenga la mínima cantidad de obstrucciones para el libre flujo del viento. Grandes obstrucciones como cerros, son propicias para crear "sombras de viento", reduciendo la disponibilidad total de viento. Las obstrucciones pequeñas tales como casas, árboles, lomas pequeñas, o lomas con abrupta elevación detrás del sitio de interés, pueden causar interferencia o turbulencia, inutilizando el flujo de viento aprovechable.

Para la instalación del anemómetro, es necesario fijar las condiciones de emplazamiento despejado, a fin de obtener medidas representativas de la zona, es decir que todo obstáculo (árboles, casas, etc. . .) deben estar a cierta distancia de la base del instrumento superior a diez veces la altura del obstáculo.

4.2.3.2 Altura de medición

Habiendo localizado el sitio de medición, será necesario establecer la altura mínima para la medición. Convencionalmente esta altura será de 10 metros aunque si la localización de sitios de interés es para fines de aerogeneración eléctrica, y la presencia de árboles y otros obstáculos pequeños condicionarían una altura del aerogenerador superior a 10 metros, entonces la medición se hará a mayor altura. La turbulencia producida por los obstáculos pequeños no solo reducen la disponibilidad de energía eólica, sino que es nociva para los sistemas conversores de energía eólica al propiciar diferencias de presión y esfuerzos no uniformemente distribuidos en las aspas del rotor.

Un método simple de detectar turbulencia en el sitio de interés, es fijar primero en la punta del mástil del anemómetro uno o dos listones de 1.5 metros. Durante una buena brisa, si los listones flotan rectos y estables, el flujo del viento es uniforme. Pero si bambolean mucho, existe turbulencia y la medición tendrá que hacerse en otro sitio o a mayor altura.

4.2.3.3 Mediciones

El registro continuo de la velocidad del viento para obtener gráficas de distribución de velocidad, el uso de compiladores electrónicos para obtener el histograma de velocidades y el de rumbos o energía durante el período, o el uso de anemómetros totalizadores (anemómetro-odómetro) de los que se obtiene velocidad media durante el período, sirven para realizar las primeras evaluaciones energéticas.

Teniendo el anemómetro en funcionamiento, es conveniente cotejar esta información con la del observatorio meteorológico más cercano y establecer alguna forma de comparación para verificar si existe alguna correlación. Si es posible establecer este factor de correlación mes a mes, es posible llegar rápidamente a establecer el comportamiento anual. De no ser así, es necesario prolongar las observaciones por un período largo que permita evaluar variaciones estacionales.

CAPITULO 5 – EVALUACION ENERGETICA

5.1 ESTACION ANEMOMETRICA BASICA

5.1.1 Introducción

La evaluación energética preliminar de un sitio de interés por su potencial eólico, estimado cualitativamente, dadas las referencias orales o la evidencia ecológica, así como por la posible aplicación potencial de algún sistema conversor de energía eólica (SCEE), dada una necesidad evidente, requiere de una medición anemométrica continua por un período de al menos tres meses.

Este carácter preliminar y provisional de la medición en sitios de interés, en general en localidades remotas y aisladas, determinan la necesidad de satisfacer estos requisitos por parte del equipo de medición:

1. Instrumento de bajo costo
2. Energéticamente autónomo por períodos de al menos un mes.
3. Fácil de inspeccionar, dar mantenimiento menor en campo y verificar condiciones de operación.
4. Robusto para soportar transporte e instalación sin detrimento de calibración.
5. Fácil de instalar y quitar, de transportar y almacenar.
6. Estar protegido contra animales y vandalismo.

5.1.2 Objetivos de la Medición

Las mediciones preliminares del sitio de interés, con el equipo que satisfaga los requisitos anteriores, estará orientado a proporcionar las siguientes informaciones:

- a) Patrón diario de distribución de velocidades.
- b) Velocidad media diaria y desviación estándar.
- c) Porcentaje de calmas, diaria y mensual.
- d) Patrón mensual de frecuencia de velocidades.
- e) Curva mensual de duración de velocidades.
- f) Rosa de vientos en porcentajes.
- g) Velocidad media del viento dominante.
- h) Rumbo dominante.
- i) Porcentaje del tiempo con vientos arriba de un umbral determinado.
- j) Velocidad media en el período y desviación estándar.

5.1.3 Metas de la Medición Anemométrica Preliminar

A partir de los objetivos cumplidos de la medición, enumerados en la sección anterior, se está en condiciones de lograr las siguientes metas:

- a) Determinación de energía en watts— hora/m² a 10 m de altura en base mensual, estacional y anual.
- b) Determinación de potencia media mensual en watts/m² a 10 m de altura.
- c) Determinación de energía y potencia aprovechable considerando un umbral de velocidad de viento, a partir del cual consideramos vientos útiles (velocidad de inicio de operación de SCEE).
- d) Determinación de media diaria de horas, con viento aprovechable y distribución horaria.
- e) Determinación de curvas teóricas mensuales de distribución de probabilidad de velocidades.
- f) Disponer de elementos de juicio para la evaluación preliminar, técnica y económica, de la potencialidad de un lugar y/o la idoneidad de un determinado SCEE a ser utilizado en ese sitio.

5.1.4 Configuración de la Estación Básica

Establecidos los requerimientos, objetivos y metas de una estación anemométrica básica, para la evaluación energética preliminar de sitios de interés, es posible establecer su configuración básica.

Descripción General

1. Un anemocinémógrafo con registro de distancia recorrida con los siguientes aditamentos:

- a) Graficado sobre papel sensible.
- b) Energizado el arrastre del papel con una batería de tipo automotriz.
- c) Transductores montados sobre un mástil telescópico de antena de T.V.
- d) Arriostrado el mástil con tres juegos de vientos a 120° y tres niveles.
- e) Caja metálica con cerradura e indicaciones de peligro.
- f) Cerca opcional para protección del equipo.

5.1.5 Procedimiento de Instalación

5.1.5.1 Preparación de equipo y materiales

1. En cada una de las anclas, coloque de tres a cuatro vueltas de alambre galvanizado, en el ojillo, asegurándolo con entorchado de ambos extremos del alambre, se dispondrá así de una gaza para sujeción del gancho de los tensores.

2. Localice el sitio adecuado para colocar el anemómetro, señale el punto de apoyo del mástil con un pedazo de tabla o piedra laja. Clave las anclas espaciadas 120° sobre una circunferencia de 5.20 m de radio.

5.1.5.2 Instalación

3. Coloque los anillos de retención sobre las secciones correspondientes según el diámetro y asegure a éstos los vientos de alambre según lo siguiente:

ANILLO DE RETENCION	ALTURA DE COLOCACION	LONGITUD DE VIENTOS
1	3 mts.	7 mts.
2	6 mts.	9 mts.
3	9 mts.	12 mts.

4. Coloque el mástil en el piso y ajuste a que éste mida 10 metros y revise que los tornillos del mástil aprisionen perfectamente las secciones internas, con el objeto de evitar deslizamientos de las mismas de cada uno de los vientos.

5. Retenga la extensión tubular de aluminio mediante la abrazadera en la parte superior del mástil e inserte aprisionando perfectamente la veleta y las copas en cada uno de sus extremos.

6. Haga las conexiones eléctricas entre los transductores y el registrador, así como batería-registrador, verificando que éstas se encuentren hechas correctamente y que el equipo opere bien.

7. El cable de los transductores debe estar unido al mástil mediante anillos de cinta aislante, con el fin de evitar movimientos del mismo con el viento, y abrasión del cable.

8. Entre dos personas, se deberán tomar dos vientos superiores y levantar el mástil, entre tanto otra persona jala y asegura el tercer viento al ancla correspondiente.

9. Asegure correctamente los nueve vientos, tensándolos de manera tal que el mástil quede vertical y recto, pasando el alambre por el ojillo del tensor completamente abierto.

10. Coloque el mástil en posición vertical y tensados los alambres, se procederá a hacer el entorchado en las qazas que los unen a los tensores, haciendo el ajuste fino de verticalidad y rectitud accionando los tensores.

5.1.5.3 Operación e inspección

El rollo de papel sensible, con una velocidad de arrastre de una pulgada por hora, permite registro continuo por un mes, al cabo del cual deberán realizarse las siguientes operaciones.

1. Cambio de batería por una recién cargada.
2. Sopleteado con perilla de aire y limpieza con brochita, para remover polvo y resíduos del papel sensible.
3. Cambio de rollo de papel.

Las inspecciones periódicas de ser posibles, consistirán en lo siguiente:

1. Verificar avance del papel registrador
2. Voltaje y firmeza de conexiones en la batería
3. Conexiones al registrador

Una recomendación importante al realizar la instalación, retiro o inspección diaria del equipo es marcar una raya horizontal en el papel registrador, indicando la hora y la fecha. Esto es conveniente ya que los mecanismos de arrastre de papel no tienen precisión cronométrica, adelantándose o atrasándose al avance nominal de una pulgada/hora, de esta manera se tienen referencias periódicas para la corrección a la escala de tiempo.

Por cuanto a operaciones de mantenimiento del equipo, habrá que remitirse a sus manuales de operación y servicio, proporcionados por el fabricante.

5.2 PROCESAMIENTO DE DATOS

5.2.1 Descripción de la Hoja de Distribución de Velocidades

Una forma de visualizar el comportamiento del viento en un lugar es mediante las curvas de distribución de velocidades. Estas consisten en la distribución a lo largo del día de las velocidades promedio observadas cada 15 minutos, encontradas a partir del gráfico de distancia recorrida.

Son además el historial del comportamiento del viento en un lugar determinado, del cual se parte para la evaluación energética y el establecimiento de los criterios para la utilización de algún sistema de conversión de energía eólica. La Figura 32 del Capítulo 3, nos muestra una curva de distribución de velocidades diarias.

5.2.2 Digitalización de las Hojas Diarias, Método y Hojas de Datos Intermedios

Una vez que se cuenta con la curva de distribución de velocidades, se procede a medir los intervalos de duración para cada velocidad, comenzando desde 0 m/seg, hasta la velocidad promedio máxima observada. La medición la hacemos directamente sobre la curva de distribución, contando el tiempo de concurrencia de esa velocidad o el tiempo en que esta no existió y este valor lo restamos a 24 horas; cualquiera de los dos procedimientos nos dará el tiempo de ocurrencia de una cierta velocidad. Los valores que se obtengan se registrarán en una forma como la que se muestra en la Figura 42. Normalmente se analizan las velocidades cada 0.2 m/s.

día	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31
H(J)																															
J V(J)																															
1	0	0																													
2	0.2	19.5																													
3	0.4	19.0																													
4	0.6	18.5																													
5	0.8	16.7																													
6	1.0	14.7																													
7	1.2	14.2																													
8	1.4	13.5																													
9	1.6	12.2																													
10	1.8	11.2																													
11	2.0	11.0																													
12	2.2	11.0																													
13	2.4	11.0																													
14	2.6	11.0																													
15	2.8	10.7																													
16	3.0	10.7																													
17	3.2	10.7																													
18	3.4	10.2																													
19	3.6	10.2																													
20	3.8	9.0																													
21	4.0	9.0																													
22	4.2	9.0																													
23	4.4	8.5																													
24	4.6	8.2																													
25	4.8	8.2																													
26	5.0	8.2																													
27	5.2	8.0																													
28	5.4	8.0																													

Figura 42 — Registro de los Intervalos de Duración de Velocidad del Viento

5.2.3 Hoja de Datos y Procedimientos

Una vez registrados los datos de duración de velocidades, se procede a hacer la hoja de datos que se muestra en la Figura 43, la cual contiene la información necesaria para alimentar una serie de programas de computación para así evaluar las características del viento en un lugar. La forma en que se realizan las hojas de datos es la siguiente:

—Primero se observa hasta que velocidad su duración es de 24 horas y se coloca el número de datos que le corresponde: en seguida se coloca las horas de duración velocidad por velocidad.

—En el caso de que algún día exista calma, se anotará un cero al comienzo del día; para ambos casos el día deberá terminar en cero.

HOJA: _____ DE _____

ESTACION ANEMOGRAFICA: "El Cordero"

MES: Abril DE 19 80

CONSTANTE K= 0.2

EA: _____

D A T O S

300 DATOS 0, 19.5, 19.0, 18.5, 16.7, 14.7, 14.2, 13.5, 12.2, 11.2, 11.0, 11.0, 11.0, 11.0, 10.7, 10.7

310 DATOS 10.7, 10.2, 10.2, 9.0, 9.0, 9.0, 8.5, 8.2, 8.2, 8.2, 8.0, 8.0

DATOS

DATOS

DATOS

DATOS

DATOS

DATOS

DATOS

DATOS

DATOS

DATOS

DATOS

DATOS

DATOS

DATOS

DATOS

DATOS

DATOS

DATOS

DATOS

DATOS

El procesamiento de la información contenida en las hojas de datos se llevará a cabo con los siguientes programas, que calculan lo siguiente:

"VIENTO"

Energía total
Energía aprovechable
Potencia media total
Potencia media aprovechable

"WINDCA"

Energía total
Potencia media total
Velocidad media
Desviación estandar

5.2.4 Programas: Viento y Windca

A continuación se agrega la información correspondiente a los programas "Viento" y "Windca", codificados en BASIC, organizada de la siguiente manera:

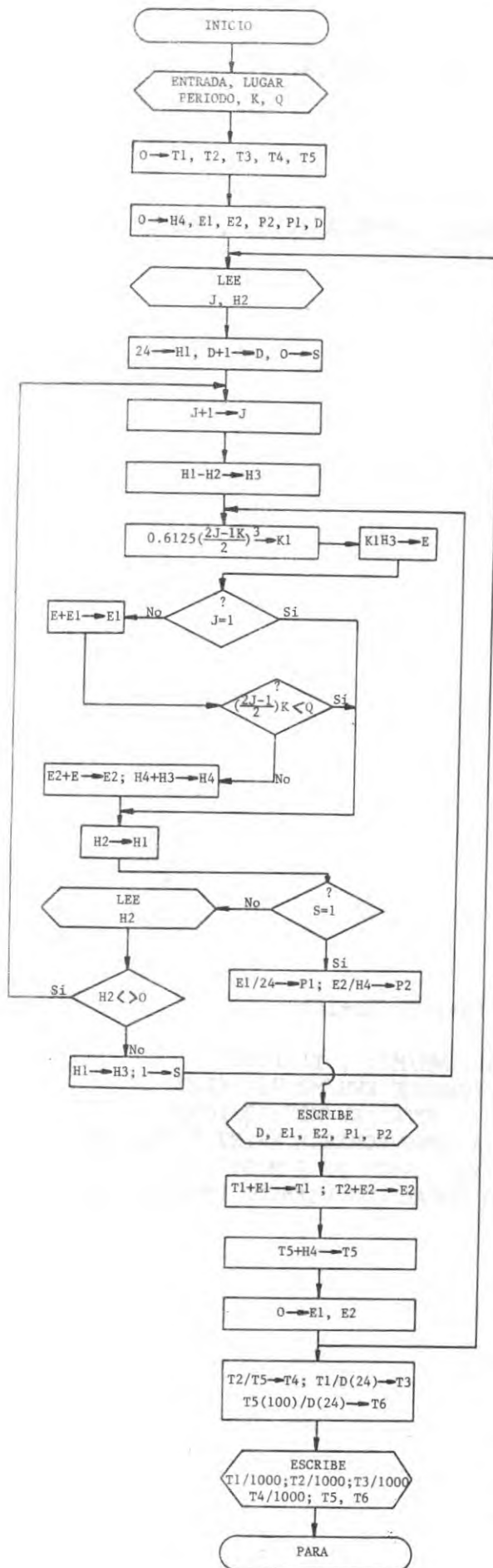
1. Lista de identificación de variables
2. Diagrama de flujo
3. Listado del programa
4. Hoja de resultado

"VIENTO"

LISTA DE VARIABLES

K	=	Incremento de velocidad de 0.2 m/s
Q	=	Umbral de velocidad para vientos aprovechables
T1	=	Energía total acumulable en Watts hora/m ²
T2	=	Energía aprovechable acumulable en Watts hora/m ²
T3	=	Potencia media total en Watts/m ²
T4	=	Potencia media aprovechable en Watts/m ²
T5	=	Horas al mes con vientos aprovechables
H4	=	Horas al día con vientos aprovechables
E1	=	Energía total diaria en Watts hora/m ²
E2	=	Energía aprovechable diaria en Watts hora/m ²
P1	=	Potencia media total diaria en Watts/m ²
P2	=	Potencia media aprovechable diaria en Watts/m ²
D	=	Número de días
J	=	Número de dato
H2	=	Duración de una cierta velocidad $\geq$ velocidad media de la clase en horas
S	=	Variable alternativa para el cambio de fecha
K1	=	Factor para el cálculo de la energía
E	=	Energía total en Watts hora/m ²
H1	=	Variable para el cálculo de las horas de duración de una cierta velocidad
H3	=	Horas de duración de una cierta velocidad media de clase

PROGRAMA 'VIENTO' - DIAGRAMA DE FLUJO



DESCRIPCION

Nombre del sitio del cual se extrajo la Información, mes, incremento de velocidad y umbral de velocidad para vientos aprovechables.

Inicialización de variables

Lectura de datos

Iteración para el cambio de la velocidad media de la clase

Cálculo de la energía Watts hora/m²

Cálculo de la energía total Watts hora/m²

Criterio para el cálculo de la energía aprovechable diaria Watts hora/m²

Lectura de datos

Cálculo de la potencia media total, y potencia media aprovechable diaria Watts/m²

Alternativa para el cambio de fecha

Impresión de resultados diarios

Cálculo acumulativo de la energía total, la energía aprovechable watts hora/m² y horas con viento > 5 m/s

Cálculo mensual de la potencia medio aprovechable, la potencia media total Watts/m² y el porcentaje del tiempo total con vientos útiles.

Impresión del resumen mensual en KWh/m² para energía y en KW/m² para potencia.

```

VIENTO 17:22          16-May-80
5!   CALCULO DE ENERGIA DEL VIENTO
10   INPUT "DISTRIBUCION DE ENERGIA EOLICA EN";A$
15   INPUT "MES";B$
17   INPUT "K=";K
18   INPUT " UMBRAL ";Q
20   PRINT
25   PRINT , " E N E R G I A " , " P O T E N C I A "
30   PRINT "DIA","TOTAL","APROVECHABLE","MEDIA TOTAL","MEDIA APROV."
35   PRINT,"W-H","W-H","WATTS","WATTS":PRINT
40   T1,T2,T3,T4,T5,T6=0
45   H4,E1,E2,P1,P2,D=0
50   !PRINCIPIA ITERACION DIARIA
55   READ J,H2 : ON ERROR GO TO 200
56   H4=0.0001
60   H1=24 :D=D+1 : S=0
70   ! PRINCIPIA ITERACION HORARIA
80   J=J+1
90   H3=H1-H2
100  K1=0.6125*(((2*J-1)/2)*K)**3
110  E=K1*H3
115  IF J=1 THEN 140
120  E1=E1+E
130  IF ((2*J-1)/2)*K < Q THEN 140
135  E2=E2+E : H4=H4+H3
140  H1=H2
145  IF S=1 THEN 170
150  READ H2
160  IF H2 <> 0 THEN 80
165  H3=H1 : S=1 : GO TO 100
170  P1=E1/24 : P2=E2/H4
180  PRINT D,E1,E2,P1,P2
185  T1=T1+E1:T2=T2+E2
187  T5=T5+H4
189  E1,E2=0
190  GO TO 55
200  PRINT:PRINT:PRINT:PRINT
205  T4=T2/T5: T3=T1/(D*24):T6=(T5*100)/(D*24)
210  PRINT "RESUMEN:";B$
220  PRINT: PRINT "ENERGIA TOTAL KWH/M2:"; T1/1000
230  PRINT:PRINT "ENERGIA APROVECHABLE KWH/M2:";T2/1000
240  PRINT: PRINT "POTENCIA MEDIA TOTAL KW/M2";T3/1000
250  PRINT:PRINT "POTENCIA MEDIA APROVECHABLE KW/M2:";T4/1000
260  PRINT: PRINT "HORAS DE VIENTO MAYOR DE 5 M/S:";T5
270  PRINT: PRINT "% DEL TIEMPO TOTAL CON VIENTOS UTILES:";T6
280  PRINT:PRINT DATE$(0)
32767 END

```

Ready

PROGRAMA "VIENTO"

DISTRIBUCION DE ENERGIA EOLICA EN ACAPULCO, GRO
MES MARZO-ABRIL DE 1980

K=? 0.2

UMBRAL ? 5

DIA	E N E R G I A		P O T E N C I A	
	TOTAL W-H	APROVECHABLE W-H	MEDIA TOTAL WATTS	MEDIA APROV. WATTS
1	4433.46	4037.56	184.728	734.088
2	6927.35	6767.53	288.64	697.676
3	5685.59	5570.72	236.9	773.701
4	6341.04	6257.03	264.21	812.591
5	964.122	714.187	40.1717	476.093
6	571.398	277.144	23.8083	102.642
7	3153.04	2944.86	131.377	516.634
8	4813.88	4697.94	200.578	652.483
9	1461.34	1199.23	60.8891	444.142
10	6926.76	6760.05	288.615	965.708
11	3493.64	3277.68	145.568	595.931
12	4477.38	4346.86	186.558	668.737
13	764.011	493.067	31.8338	154.079
14	3857.84	3745.45	160.743	604.096
15	6685.67	6560.92	278.569	852.056
16	4582.89	4453.75	190.954	618.567
17	4150.23	3896.81	172.926	779.345
18	3795.13	3662.76	158.13	563.493
19	6032.53	5952.58	251.356	725.916
20	7574.81	7490.31	315.617	881.203
21	6825.56	6713	284.398	789.755
22	8326.19	8227.07	346.925	1003.29
23	7710.5	7573.15	321.271	923.543
24	6541.54	6365.88	272.564	1026.74
25	1732.83	1432.14	72.2013	340.976
26	6155.39	5971.07	256.475	728.17
27	5624.18	5408.62	234.341	676.069
28	5046.03	4914.55	210.251	534.184
29	1899.21	1699.18	79.1335	261.408
30	2573.55	2221.72	107.231	694.266

RESUMEN: MARZO-ABRIL DE 1980

ENERGIA TOTAL KWH/M2: 139.127

ENERGIA APROVECHABLE KWH/M2: 133.633

POTENCIA MEDIA TOTAL KW/M2: .193232

POTENCIA MEDIA APROVECHABLE KW/M2: .696719

HORAS DE VIENTO MAYOR DE 5 M/S: 191.803

% DEL TIEMPO TOTAL CON VIENTOS UTILES: 26.6393

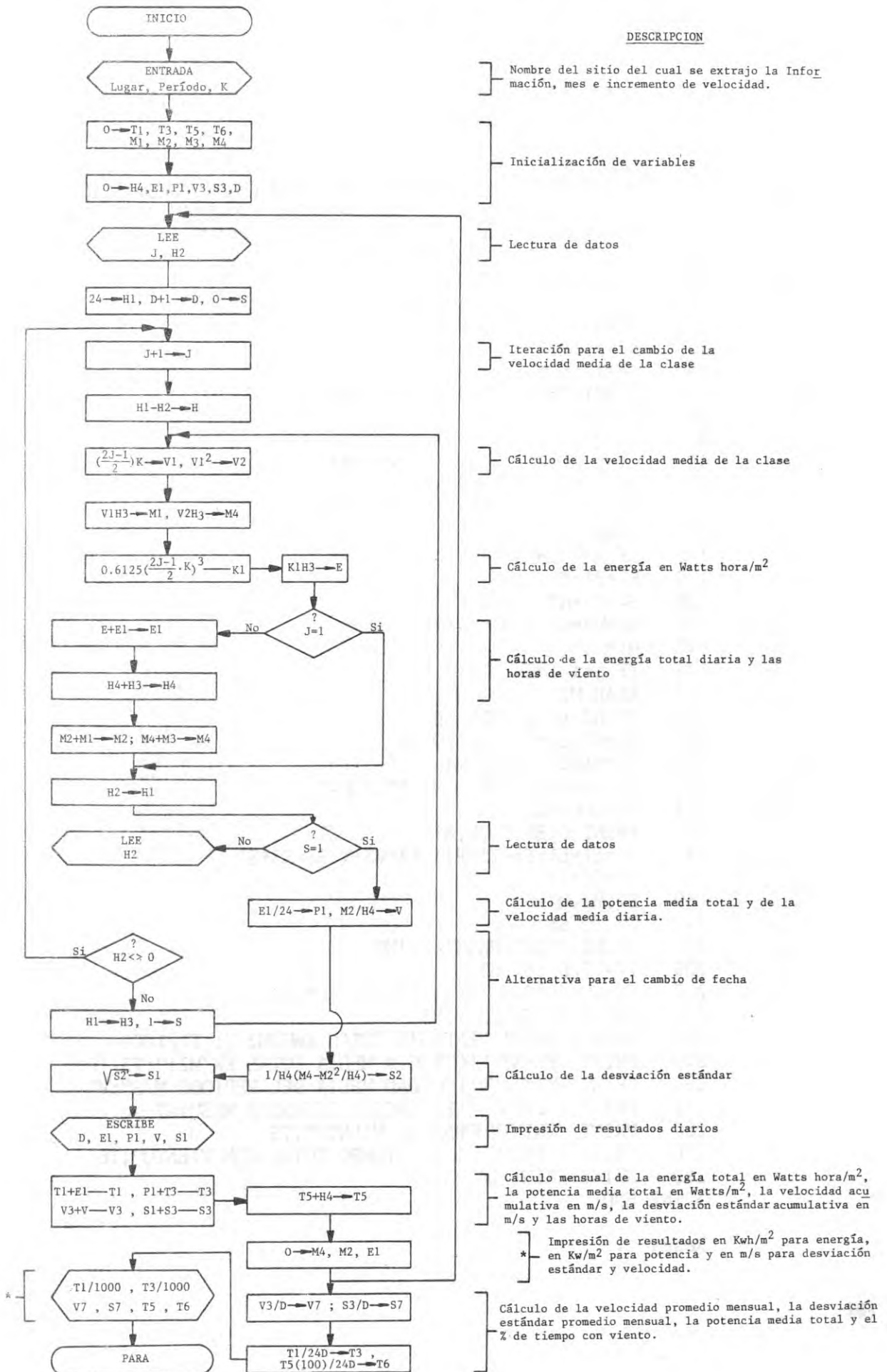
16-May-80

Ready

"WINDCA"

LISTA DE VARIABLES

K	=	Incremento de velocidad de 0.2 m/s
T1	=	Energía total acumulable en Watts hora/m ²
T3	=	Potencia media total acumulable en Watts/m ²
T5	=	Horas al mes con vientos
T6	=	Porcentaje mensual con viento en o/o
M1, M2,		
M3, M4	=	Factores para el cálculo de la desviación estándar
H4	=	Horas al día con viento
E1	=	Energía total diaria en Watts hora/m ²
P1	=	Potencia media total diaria en Watts/m ²
V3	=	Velocidad acumulativa mensual en m/seg
S3	=	Desviación estándar acumulativa mensual en m/s
J	=	Número de dato
H2	=	Duración de una cierta velocidad $\geq$ velocidad media de la clase en horas
D	=	Número de días
S	=	Variable alternativa para el cambio de fecha
H3	=	Horas de duración de una cierta velocidad media de clase
H1	=	Variable para el cálculo de las horas de duración de una cierta velocidad
V1	=	Velocidad media de la clase en m/s
V2	=	(Velocidad media de la clase) ²
V	=	Velocidad promedio diaria en m/s
S2	=	Factor para el cálculo de la desviación estándar
S1	=	Desviación estándar diaria en m/s
V7	=	Velocidad media mensual en m/s
S7	=	Desviación estándar promedio mensual en m/s



```

WINDCA 17:26 16-May-80
2! CARACTERIZACION DEL VIENTO
5! CALCULO DE ENERGIA DEL VIENTO
10 INPUT "DISTRIBUCION DE ENERGIA EOLICA EN";A$
15 INPUT "PERIODO";B$
17 INPUT "K=";K
20 PRINT
25 PRINT,"ENERGIA","POTENCIA","VELOCIDAD","DESVIACION"
30 PRINT "DIA","TOTAL","MEDIA TOTAL","MEDIA","ESTANDAR"
35 PRINT,"W-H","WATTS","M/S","M/S" : PRINT
40 T1,T3,T5,T6,M1,M2,M3,M4=0
45 H4,E1,P1,V3,S3,D=0
50 !PRINCIPIA ITERACION DIARIA
55 READ J,H2 : ON ERROR GO TO 200
56 H4=0.0001
60 H1=24 :D=D+1 : S=0
70 ! PRINCIPIA ITERACION HORARIA
80 J=J+1
90 H3=H1-H2
95 V1=((2*J-1)/2)*K : V2=V1**2
96 M1=V1*H3 : M3=V2*H3
100 K1=0.6125*(((2*J-1)/2)*K)**3
110 E=K1*H3
115 IF J=1 THEN 140
120 E1=E1+E
130 H4=H4+H3
135 M2=M2+M1 : M4=M4+M3
140 H1=H2
145 IF S=1 THEN 170
150 READ H2
160 IF H2 <> 0 THEN 80
165 H3=H1 :S=1 : GO TO 95
170 P1=E1/24 :V=M2/H4
172 S2 =(1/H4)*(M4-((M2)**2)/H4)
174 S1=SQR(S2)
180 PRINT D,E1,P1,V,S1
185 T1=T1+E1:T3=T3+P1: V3=V3+V:S3=S3+S1
187 T5=T5+T4
189 E1,M2,M4=0
190 GO TO 55
200 PRINT:PRINT:PRINT:PRINT
205 V7=V3/D :S7=S3/D
207 T3=T1/(D*24) :T6=(T5*100)/(D*24)
210 PRINT "RESUMEN:";B$
220 PRINT: PRINT "ENERGIA TOTAL KWH/M2:"; T1/1000
240 PRINT: PRINT "POTENCIA MEDIA TOTAL KW/M2:";T3/1000
250 PRINT:PRINT "VELOCIDAD MEDIA DEL PERIODO M/S";V7
255 PRINT : PRINT "DESVIACION ESTANDAR M/S";S7
260 PRINT: PRINT"HORAS DE VIENTO";T5
270 PRINT : PRINT "%DEL TIEMPO TOTAL CON VIENTO";T6
280 PRINT:PRINT DATE$(0)
32767 END

```

Ready

PROGRAMA "WINDCA"

DISTRIBUCION DE ENERGIA EOLICA EN ACAPULCO, GRO
PERIODO MARZO-ABRIL DE 1980
K=? 0.2

DIA	ENERGIA TOTAL W-H	POTENCIA MEDIA TOTAL WATTS	VELOCIDAD MEDIA M/S	DESVIACION ESTANDAR M/S
1	4433.46	184.728	4.77487	3.35399
2	6927.35	288.64	5.6022	4.19859
3	5685.59	236.9	4.80529	4.37714
4	6341.04	264.21	5.26241	4.56996
5	964.122	40.1717	2.84696	1.93494
6	571.398	23.8083	2.79453	1.50387
7	3153.04	131.377	3.97487	3.21969
8	4813.88	200.578	5.13184	4.09413
9	1461.34	60.8891	3.03421	2.42277
10	6926.76	288.615	4.92931	4.53381
11	3493.64	145.568	4.2073	3.49721
12	4477.38	186.558	4.79648	4.21512
13	764.011	31.8338	3.09242	1.88461
14	3857.84	160.743	4.2817	3.85437
15	6685.67	278.569	5.32924	4.52617
16	4582.89	190.954	4.55944	3.80655
17	4150.23	172.926	4.34855	3.70572
18	3795.13	158.13	4.09653	3.54809
19	6032.53	251.356	5.45787	4.44631
20	7574.81	315.617	6.10852	4.72717
21	6825.56	284.398	5.68151	4.52074
22	8326.19	346.925	5.77282	5.10757
23	7710.5	321.271	5.32131	4.63002
24	6541.54	272.564	4.73346	4.3821
25	1732.83	72.2013	3.34694	2.5025
26	6155.39	256.475	5.39563	4.18153
27	5624.18	234.341	5.10835	3.96902
28	5046.03	210.251	5.46039	3.87586
29	1899.21	79.1335	4.33876	2.70147
30	2573.55	107.231	3.72465	2.84831

RESUMEN: MARZO-ABRIL DE 1980

ENERGIA TOTAL KWH/M2: 139.127

POTENCIA MEDIA TOTAL KW/M2: .193232

VELOCIDAD MEDIA DEL PERIODO M/S:4.61065

DESVIACION ESTANDAR M/S:3.70164

HORAS DE VIENTO:623.303

% DEL TIEMPO TOTAL CON VIENTO:86.5699

16-May-80

Ready

5.3 CURVAS DE DISTRIBUCION DE PROBABILIDAD DE VELOCIDADES DE VIENTO

5.3.1 Introducción

De los estudios estadísticos de distribución de velocidades del viento, se ha observado un patrón típico al que es posible aplicar una función matemática de densidad de probabilidad. Esta función es el modelo de distribución de Weibull que tiene la siguiente forma general.

$$P(V) = (K/C) (V/C)^{K-1} \exp \left[- (V/C)^K \right]$$

donde C es un factor de escala en unidades de velocidad y K un factor de forma adimensional. La figura 44 ilustra una familia de curvas de este tipo.

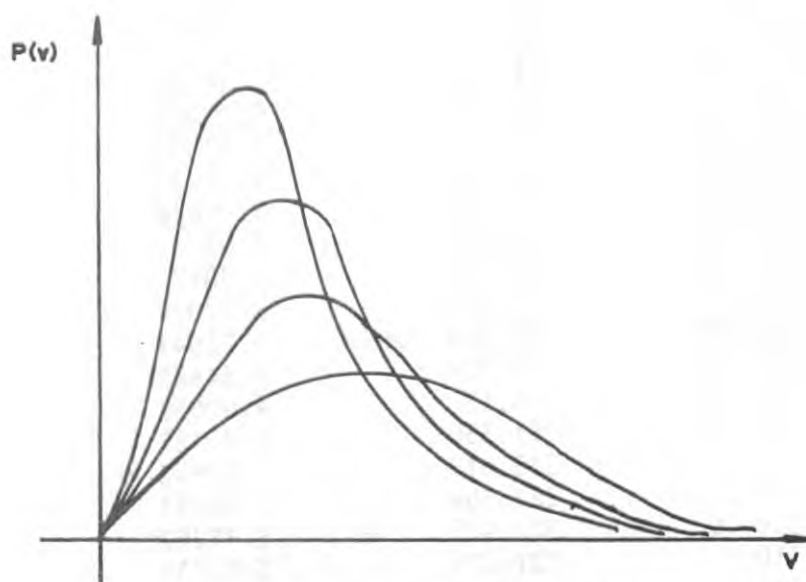


Figura 44 — Curvas de Distribución de Probabilidad de Velocidades de Viento

El poder aplicar un análisis de distribución teórica de velocidades a un sitio, requiere conocer únicamente la velocidad media y la desviación estándar del período de análisis.

Esta herramienta es importante, básicamente por dos razones:

1. Reduce el tiempo necesario de utilización de anemocinemógrafos en los sitios bajo estudio, al permitir pronosticar el histograma de velocidades esperadas de un período largo (anual, por ejemplo) a partir de períodos relativamente cortos de medición (tres meses), contando con información regional que permita hacer las correcciones estacionales a la medida observada.

2. Esta distribución teórica permite hacer simulaciones computacionales de energía generada por un SCEE considerando la función de conversión de energía, y valores límites de velocidad de viento, de operación del SCEE (inicial, o de arranque, de régimen de potencia nominal y de salida de operación por vientos excesivos). Esto permite pronosticar la energía producida total en un período anual y obtener así costos totales anuales y por unidad de energía, para los estudios económicos de factibilidad del aprovechamiento de la energía eólica en un sitio determinado.

5.3.2 La Función de Densidad de Probabilidad.

La distribución de Weibull es un caso especial de la distribución Gamma generalizada.

Un caso específico de esta distribución es la de Rayleigh, en que $K = 2$ (distribución Chi con 2 grados de libertad), y que se correlaciona bien con curvas de distribución de medias horarias.

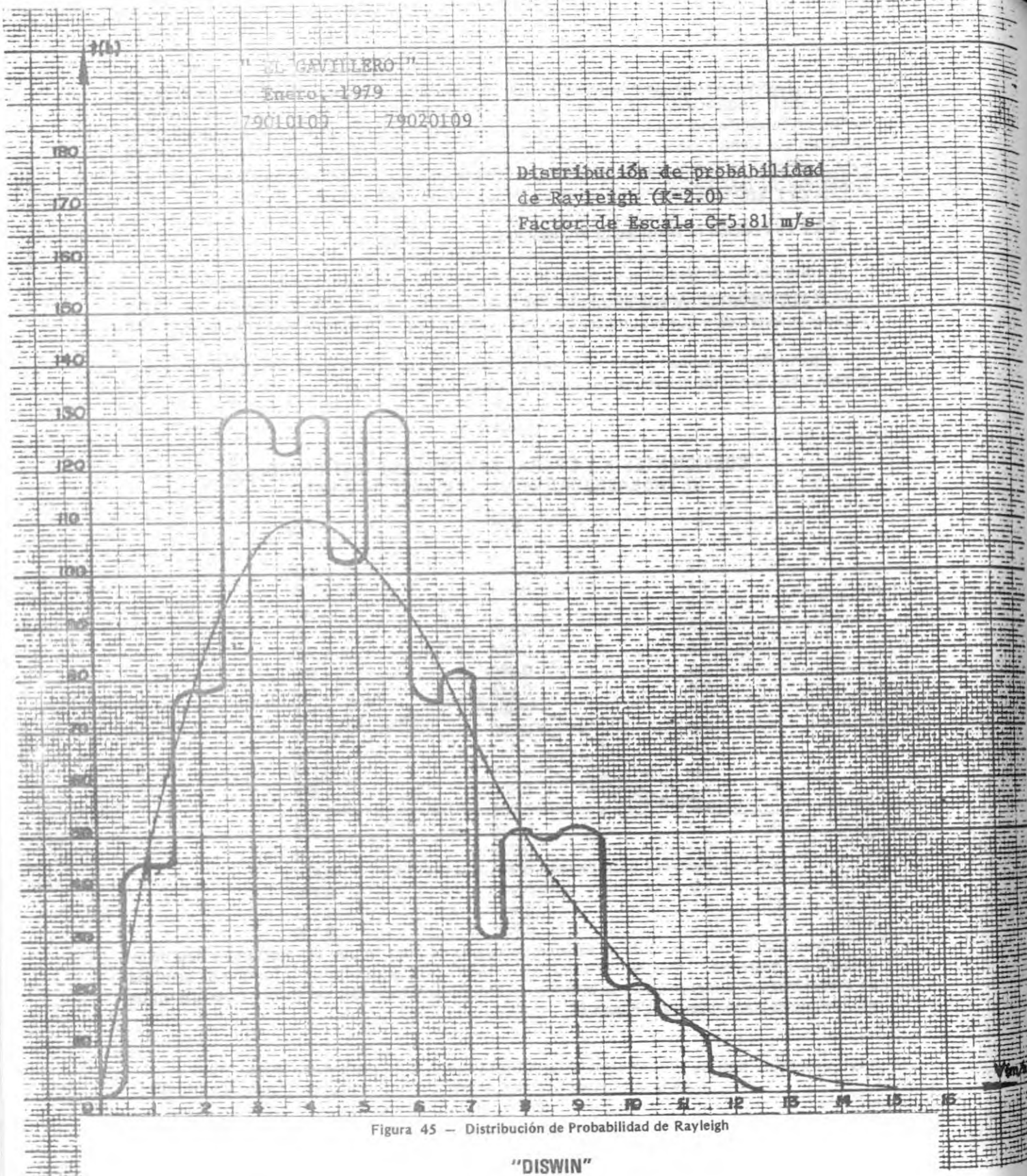
A partir de la velocidad media $\bar{V}$ y la desviación estándar σ de un período de análisis y la siguiente tabla, es posible determinar los valores de los coeficientes K y C .

TABLA 5

COEFICIENTES K Y C PARA LAS CURVAS DE DISTRIBUCION DE PROBABILIDAD DE VELOCIDADES DE VIENTO

K	$\bar{V}/C$	$\sigma/\bar{V}$
1.2	0.941	0.837
1.4	0.911	0.724
1.6	0.897	0.640
1.8	0.889	0.575
2.0	0.886	0.523
2.2	0.886	0.480
2.4	0.886	0.444
2.6	0.888	0.413
2.8	0.890	0.387
3.0	0.893	0.363
3.2	0.896	0.343
3.5	0.500	0.316
4.0	0.906	0.281
5.0	0.918	0.229
6.0	0.928	0.194
7.0	0.935	0.168
8.0	0.942	0.148
9.0	0.947	0.133
10.0	0.951	0.120

A continuación se anexa lista de variables, diagrama de flujo, listado del programa y hoja de resultados del programa "DISWIN", codificado en BASIC para el cálculo de la función de densidad de probabilidad y disponer así de la distribución teórica de velocidades del viento, esperadas en un sitio de interés como muestra la Figura 45.

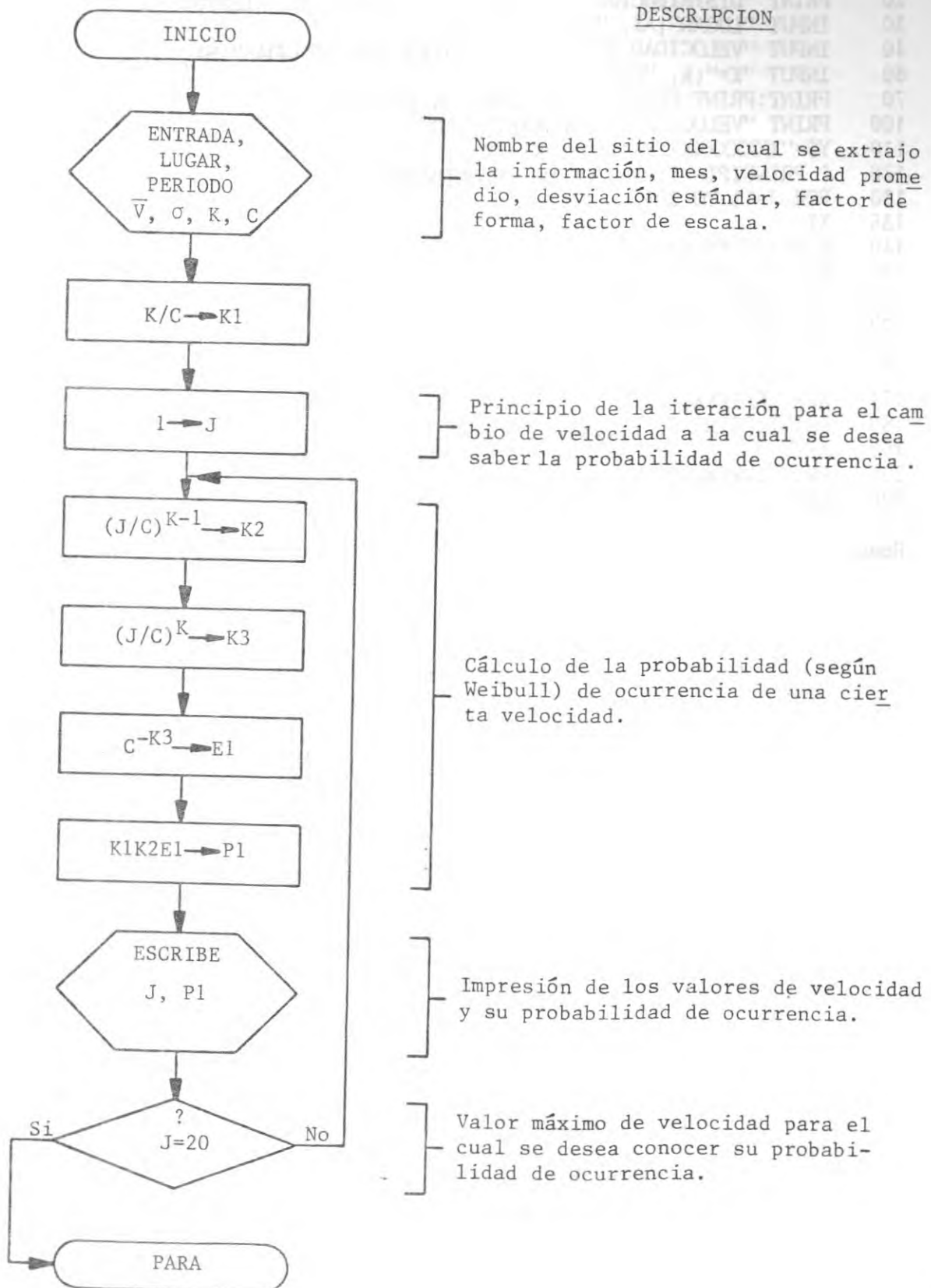


"DISWIN"

LISTA DE VARIABLES

- $\bar{V}$ = Velocidad promedio mensual en m/s
- σ = Desviación estándar promedio mensual en m/s
- K = Factor de forma (adimensional)
- C = Factor de escala en m/s
- J = Velocidad para la cual se desea saber la probabilidad de ocurrencia
- K1, K2, K3, E1 = Factores para el cálculo de la probabilidad de ocurrencia de una cierta velocidad.
- P1 = Probabilidad de ocurrencia de una cierta velocidad.

PROGRAMA "DISWIN" - DIAGRAMA DE FLUJO



```

DISWIN 12:48          28-May-80
5!   DETERMINACION DE LA DISTRIBUCION TEORICA DE VELOCIDAD DEL VIENTO
15!  DISTRIBUCION DE WEIBULL
20   PRINT "DISTRIBUCION TEORICA DE VELOCIDAD DEL VIENTO"
30   INPUT "LUGAR";A$, "PERIODO";B$
40   INPUT "VELOCIDAD MEDIA";V1,"DESVIACION ESTANDAR";S1
60   INPUT "K=";K, "C=";C
70   PRINT:PRINT:PRINT, "DISTRIBUCION TEORICA"
100  PRINT "VELOCIDAD", "PROBABILIDAD"
110  Y$="XXXXXXXXXXXXXXXXX" : K1=(K/C)
120  ! PRINCIPIA ITERATION DE VELOCIDADES
130  FOR J=1% TO 20%
135  X$=""
140  K2=(J/C)**(K-1)
150  K3=(J/C)**K
155  ON ERROR GO TO 200
160  E1=EXP((-1)*K3)
170  P1=K1*K2*E1
172  X2=INT(P1*60)
174  X$= LEFT(Y$,X2)
180  PRINT:PRINT J, P1,,X$
190  NEXT J
200  PRINT:PRINT:PRINT DATE$(0)
300  END

```

Ready

PROGRAMA "DISWIN"

DISTRIBUCION TEORICA DE VELOCIDAD DEL VIENTO
 LUGAR? GAVILLERO
 PERIODO? ENERO DE 1979
 VELOCIDAD MEDIA? 5.15
 DESVIACION ESTANDAR? 1.06
 K = ? 2
 C = ? 5.81

VELOCIDAD	DISTRIBUCION TEORICA PROBABILIDAD	
1	.575191E-1	XXX
2	.105256	XXXXXX
3	.136147	XXXXXXXX
4	.147532	XXXXXXXX
5	.141256	XXXXXXXX
6	.122367	XXXXXX
7	.971311E-1	XXXXX
8	.711812E-1	XXXX
9	.483951E-1	XX
10	.306275E-1	X
11	.180853E-1	X
12	.998169E-2	
13	.515614E-2	
14	.249538E-2	
15	.113239E-2	
16	.482158E-3	
17	.192731E-3	
18	.723563E-4	
19	.255228E-4	
20	.846143E-5	

10-Oct-79

Ready

APEE/ /EE PEND FEBE
 ?End of file on device

Ready

RUNNH

CAPITULO 6 – CARACTERIZACION DEL VIENTO

6.1 TURBULENCIA

6.1.1 Concepto sobre la Turbulencia

El análisis del sistema de ecuaciones hidrodinámicas para la determinación de los campos de velocidad, temperatura, presión y humedad, el cual se puede resolver si conocemos el flujo de calor como función del tiempo y de las coordenadas, nos da la visión general para definir el concepto de turbulencia.

Los principios generales de la mecánica de la atmósfera se pueden formular de acuerdo a las tres leyes de conservación: de masa, de cantidad de movimiento y de energía. Estos principios se pueden describir por medio de cinco ecuaciones escalares, la sexta que completa el sistema, es la ecuación de estado del aire.

La utilización de estas ecuaciones para describir las variaciones espaciales y temporales de los elementos meteorológicos, está supeditada, sin embargo, a la determinación de serias dificultades derivadas del carácter turbulento de los movimientos atmosféricos.

Para aclarar la importancia de esta dificultad, analicemos primero la definición y particularidades principales de los flujos turbulentos.

Movimiento turbulento es aquel movimiento, cuyas características cambian en el espacio y en el tiempo en forma irregular y caótica aunque no cambien las condiciones ambientales.

El carácter aleatorio de la variación de los parámetros es la principal particularidad de las corrientes turbulentas, diferenciándose así de los movimientos laminares, cuyas propiedades pueden ser determinadas exactamente en cualquier momento de tiempo por medio de las condiciones externas.

Sobre el carácter turbulento de los movimientos atmosféricos podemos constatar por los registros en las variaciones en el tiempo y en el espacio de los elementos meteorológicos (velocidad del viento) y obtenidos por medio de registradores especiales con una inercia muy pequeña. En la Figura 46 como ejemplo, se presenta el registro de la variación con el tiempo de la componente horizontal de la velocidad del viento V_h , obtenidos en condiciones ambientales determinadas. En esa curva se observa la cantidad de oscilaciones con diferentes períodos y amplitudes, lo que nos muestra la compleja estructura interna de los movimientos atmosféricos.

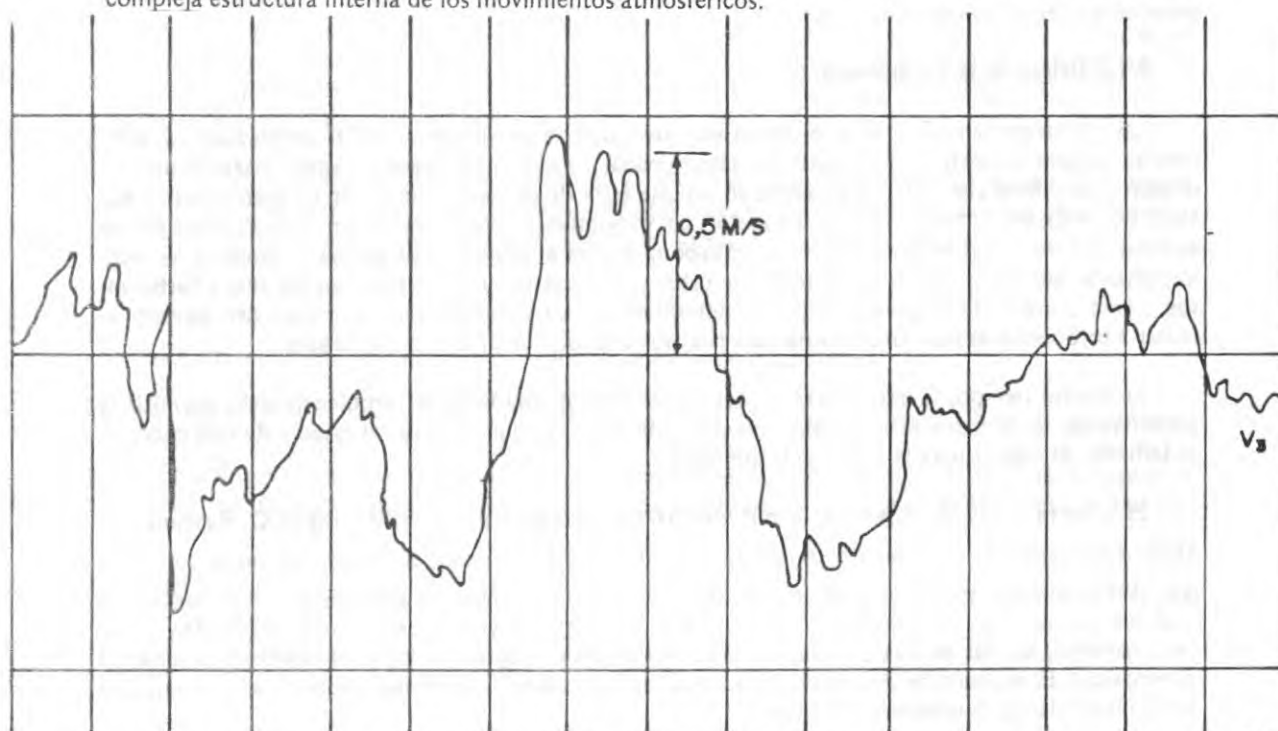


Figura 46 — Registros Típicos de la Variación Temporal de la Componente Horizontal de la Velocidad del Viento

Los movimientos atmosféricos no son los únicos ejemplos de corrientes turbulentas. La mayoría de las corrientes que encontramos en la naturaleza y en las técnicas, son turbulentas. En determinadas circunstancias, las corrientes en los océanos, mares, ríos, alcantarillas, acueductos, y oleoductos, son turbulentos, así como el movimiento del aire en las capas bajas. Las causas principales que difieren la turbulencia atmosférica es la diferencia de escalas y la influencia de la estratificación.

Como veremos adelante, el régimen turbulento aparece como resultado de que, en ciertas circunstancias, el movimiento se vuelve inestable con relación a pequeñas perturbaciones. Esto significa que las variaciones aleatorias e incontrolables de las condiciones iniciales o marginales, conllevan a variaciones principales del campo de la velocidad, de tal forma que la evaluación del campo es de carácter aleatorio y los valores instantáneos del vector de la velocidad son imposibles de determinar con antelación. Como consecuencia de lo anterior, la descripción matemática de las corrientes turbulentas y laminares debe ser en principio, diferente. En el caso del régimen laminar, el sistema de ecuaciones de la hidrodinámica permite determinar el valor de todas las características en cualquier momento, de acuerdo a los valores iniciales y en determinadas condiciones, límites. En el régimen turbulento, las condiciones iniciales de las características correspondientes, también determinan sus valores consiguientes. Sin embargo, estos valores dependen de las perturbaciones incontrolables en las condiciones iniciales y limitantes, las cuales son imposibles determinar exactamente; por eso la interpretación de las correspondientes ecuaciones diferenciales que describen las realizaciones instantáneas de los campos turbulentos, es prácticamente imposible.

Pueden darse solamente las distribuciones probabilísticas de estos campos y no los valores exactos. Por esto, en el caso de corrientes turbulentas, las ecuaciones de la hidrotermodinámica pueden ser utilizadas solamente para determinar las correspondientes distribuciones probabilísticas o las características medias de los campos aleatorios determinados por estas distribuciones. De esta manera, solamente es posible la descripción estadística de los movimientos turbulentos, que consiste en el análisis de las regularidades estadísticas, que son características para un conjunto de corrientes que se encuentran en determinadas condiciones ambientales.

La situación que se crea en el régimen turbulento del movimiento, es similar a la teoría cinética de los gases, que estudia el sistema de una gran cantidad de moléculas que se mueven y actúan recíprocamente. La descripción exacta del movimiento de una molécula prácticamente es imposible; por esto se analizan las propiedades estadísticas medias del conjunto.

A pesar de que entre el movimiento de una gran cantidad de moléculas en los gases y el movimiento turbulento hay una cantidad de diferencias, existen ciertas analogías que son útiles en la descripción del movimiento turbulento.

6.1.2 Origen de la Turbulencia

Las corrientes laminares y turbulentas son dos tipos de movimientos cuyas propiedades se diferencian sustancialmente, y los cuales en determinadas condiciones, pueden transformarse el uno en el otro. Las diferencias entre ellas aparecen en una serie de procesos que tienen un gran interés práctico. Es conocido el hecho de que, la acción del movimiento turbulento de un líquido o gas en los cuerpos que se encuentran alrededor es mayor que para el movimiento laminar, asimismo, es muy importante que los procesos de difusión de calor y mezclas son más intensas en los flujos turbulentos; como consecuencia de lo anterior, la determinación de las condiciones del paso del régimen laminar a turbulento es muy importante para resolver una serie de problemas aplicados.

Al mismo tiempo, la determinación del mecanismo aparición de la turbulencia debe permitir la comprensión de la naturaleza del movimiento turbulento, es por esto que el estudio de esta cuestión es también de interés para la física de la atmósfera.

El criterio sobre el origen de la turbulencia fue obtenido por el físico inglés O. Reynolds en 1883, estudiando el movimiento de los líquidos en tubos circulares de vidrio, Reynolds demostró que el movimiento laminar se convierte en turbulento cuando el número adimensional $Re = \frac{UL}{\nu}$, el cual fue llamado con su nombre, se vuelve mayor que un valor crítico determinado Re_c (U y L respectivamente, son las escalas características de velocidad y longitud, ν es el coeficiente de viscosidad cinemática). El número de Reynolds, caracteriza el papel relativo de la fuerza de la inercia y la viscosidad molecular en la dinámica del fluido.

La fuerza de la inercia, cuyo papel consiste en el traslado espacial de la cantidad de movimiento, permite la aparición de perturbaciones en el flujo. La fuerza de la viscosidad, por el contrario, suaviza la aparición de estas irregularidades. Cuando el número Re es pequeño, es decir, que la fuerza de la viscosidad alcanza a opacar las perturbaciones en el flujo, que surgen como resultado de la acción de la fuerza de la inercia, el movimiento es laminar; cuando Re es grande, predomina la fuerza de la inercia, en el flujo surgen perturbaciones, las características del flujo adquieren variaciones irregulares y el movimiento es turbulento. Las ilustraciones anteriores explican, por qué el número de Reynolds sirve como criterio del origen de la turbulencia.

Los valores críticos de Re (Rec) han sido establecidos experimentalmente para diferentes tipos de corrientes turbulentas. Se estableció que el valor Rec depende principalmente del grado de perturbaciones en el flujo laminar (turbulencia inicial de la corriente); mientras mayor sea la turbulencia inicial, Rec es menor.

El enfoque teórico del problema sobre el origen de la turbulencia se fundamenta en las siguientes concepciones. De acuerdo con la definición, las corrientes laminares estacionarias se describen por medio de soluciones fijas de las ecuaciones hidrodinámicas en condiciones ambientales. Se puede suponer en principio que esas soluciones deben existir para cualquier número de Reynolds. Al mismo tiempo, de la experiencia, sabemos que las corrientes laminares tienen lugar cuando $Re < Rec$. Esto da la base para pensar que las soluciones correspondientes a movimientos realmente obtenidos, deben satisfacer las ecuaciones de la hidrodinámica y ser además estables. Para lograr la estabilidad del movimiento es necesario que las perturbaciones desaparezcan con el tiempo. Si es inevitable la aparición de perturbaciones, así sean pequeñas, éstas van a aumentar con el tiempo conllevando a cambios fundamentales en el movimiento inicial; este tipo de movimiento se llama inestable. Debido a que el régimen turbulento aparece cuando $Re > Rec$, entonces se podría pensar que Rec caracteriza las condiciones de pérdida de la inestabilidad. Por eso, el análisis teórico del origen de la turbulencia se centra en el análisis matemático del asunto, es decir la estabilidad de las soluciones de las ecuaciones de la hidrodinámica.

El estudio sobre la teoría matemática de la estabilidad de las corrientes laminares, es de por sí, un problema aparte muy importante, al cual se le han dedicado una serie de investigaciones. Analizaremos ahora, solamente la parte cualitativa de la cuestión y examinaremos algunos momentos principales, basándonos en las ideas expresadas por Landau.

La investigación matemática de la estabilidad del movimiento, en relación con perturbaciones menores, se realiza de acuerdo al siguiente esquema:

En el movimiento principal estable, con una distribución de velocidades $V_{io}(x)$ se introduce una perturbación pequeña $V_{il}(x,t)$, donde $V_{il}(x,t) \ll V_{io}(x)$, la cual se determina de tal manera que el movimiento resultante $V_i(x,t) = V_{io}(x) + V_{il}(x,t)$, satisfaga las ecuaciones de movimiento y de continuidad.

La perturbación del campo de velocidad $V_{il}(x,t)$ satisface un sistema de ecuaciones lineales diferenciales con coeficientes, que no dependen del tiempo. La solución general de estas ecuaciones puede ser presentado en la forma de una suma de soluciones parciales del tipo:

$$V_{il}(x,t) = A(t) \cdot f(x)$$

donde $A(t)$ es la amplitud que cambia periódicamente con el tiempo.

De tal manera la inestabilidad, cuando $Re > Rec$, conlleva a la aparición de un movimiento periódico no estacionario. Para valores grandes de Re , cercanos a Rec , este movimiento puede ser representado en forma de superposición con el movimiento estacionario $V_{io}(x)$ del movimiento periódico $V_{i1}(x,t)$ con una pequeña, pero limitada amplitud, el valor de la cual, cuando $t \rightarrow \infty$ crece proporcionalmente a $\sqrt{Re - Rec}$.

Es necesario destacar la siguiente e importante particularidad de la solución periódica inestable $V_{11}(x,t)$. En la ecuación que determina el valor absoluto de la amplitud, la fase del movimiento periódico es indeterminada y depende de las condiciones aleatorias iniciales. De esta manera, el movimiento periódico considerado no se define únicamente por las condiciones limitantes. Se puede decir que este movimiento posee un grado de libertad (a diferencia del movimiento laminar estacionario, que se determina por las condiciones en los límites y que no posee grados de libertad).

De esta manera, la presencia de una perturbación pequeña conlleva, conjuntamente con un número de Reynolds (Re) grande pero cercano al valor crítico Re_c , a la aparición del movimiento periódico inestable, en el cual uno de los componentes con una frecuencia determinada es inestable. En el sucesivo aumento del número Re , llega un momento cuando el movimiento se vuelve inestable con relación a la pequeña perturbación $V_{12}(x,t)$ y al movimiento periódico estacionario $V_{10}(x) + V_{11}(x,t)^*$. La investigación de la inestabilidad en este caso se lleva a cabo de igual manera que la anterior. Para la perturbación $V_{12}(x,t)$ de nuevo se obtiene una ecuación lineal diferencial, cuyos coeficientes van a depender no solamente de las coordenadas sino también del tiempo, ya que la corriente inicial no es estacionaria. Como resultado, aparece un movimiento pseudoperiódico, que se caracteriza por dos períodos diferentes y dos grados de libertad (ya que ahora hay dos fases libres).

Cuando continúa aumentado Re , aparecen nuevas y nuevas oscilaciones aleatorias, con diferentes períodos y fases indeterminadas, es decir, el movimiento adquiere un carácter complejo e irregular con un gran número de grados de libertad, este movimiento es turbulento; en este caso se podría pensar que los intervalos entre los valores críticos correspondientes Re , que generan nuevas oscilaciones, las cuales se hacen cada vez menores y consecuentemente las oscilaciones que aparecen serán de más alta frecuencia y de menor escala. Por lo tanto, para valores grandes de Re , aparece un movimiento turbulento desarrollado, que es la superposición de movimientos de diferentes períodos y escalas. El movimiento de una escala o período dado, se llama vórtice turbulento (o campo turbulento).

De esta manera, obtenemos un modo visual de la aparición del movimiento turbulento. Todas estas conclusiones se relacionan con corrientes que poseen una densidad constante.

Existe otro procedimiento que permite investigar las condiciones de existencia del régimen turbulento, la esencia de este método, consiste en el análisis del balance energético de la perturbación de la vorticidad de escala correspondiente y en determinadas condiciones, en las cuales la energía de la perturbación dada no va a hacerse menor con el tiempo (es decir puede existir largo tiempo).

Analizaremos la utilización de este método con una situación típica en la atmósfera. Supongamos que en una corriente homogénea horizontal aparece una perturbación de escala ℓ , con una velocidad V_1 y una temperatura potencial T_p , diferente de la temperatura del medio circundante. El tiempo característico de existencia en este vórtice es $\tau_1 \sim \frac{\ell}{V_1}$. En este caso, de la energía cinética de la corriente principal (o de la vorticidad de mayor escala) para la formación de energía cinética del movimiento turbulento, del cual se resta por unidad de tiempo la energía $R_1 \ell$.

La energía cinética de la vorticidad se gasta en el trabajo R contra la fuerza de la viscosidad. Esta fuerza se describe por medio del último miembro de la ecuación de movimiento. El trabajo realizado contra la fuerza de la viscosidad en la unidad del tiempo es $R_2 \ell$.

Además, en una corriente estratificada y estable, la vorticidad realiza un trabajo contra la fuerza de Arquímedes, el trabajo realizado en la unidad de tiempo será $R_3 \ell$.

Para que esta perturbación de escala ℓ no desaparezca con el tiempo; es decir, que la variación de la energía cinética aumente con el tiempo, en la atmósfera estratificada estable se debe cumplir la condición:

* Esto indica, que se puede introducir el número de Reynolds no solamente para todo el flujo, sino también para el movimiento de frecuencia dada. La inestabilidad del movimiento debe llegar cuando $Re > Re_c$. Como se ve, Re sobrepasará más rápidamente Re_c en tanto sea mayor la escala, es decir, que en primer orden, pierde más estabilidad el movimiento de mayor escala.

$$R_1 l > R_2 l + R_3 l$$

Si el papel de la estratificación es pequeño ($R_3 l \ll R_2 l$) entonces la anterior condición se reduce a la exigencia de que:

$$R_1 l > R_2 l \quad \text{Es decir: } Re l > 1.$$

Si por el contrario $R_3 l \gg R_2 l$, entonces obtenemos:

$$Re l < 1$$

En este caso, $Re l$ es el número de Reynolds para la vorticidad de la escala l . De esta manera, para mantener la turbulencia de escala l , es necesario que el número de Reynolds sea suficientemente grande.

En una estratificación inestable, el trabajo de la fuerza de Arquímedes R_3 es una fuerza complementaria de energía y para el mantenimiento de la escala l se debe cumplir la desigualdad:

$$R_1 l + R_3 l > R_2 l$$

6.1.3 Turbulencia Vertical

El problema de los movimientos verticales en el aire es uno de los principales en la metodología. Bajo la influencia de estos movimientos ocurren variaciones temporales y espaciales de muchos elementos meteorológicos (temperatura, presión, humedad y otros). La presencia de corrientes verticales presenta además un interés práctico, por cuanto influyen en la difusión de contaminantes atmosféricos, así como en el régimen de vuelo de aviones, etc.

Dependiendo de las dimensiones horizontales características, todos los movimientos verticales que se observan en la atmósfera, se pueden dividir en tres tipos:

—Velocidades verticales caóticas

Las dimensiones horizontales características en este caso, pueden variar desde algunos centímetros hasta centenas de metros; la velocidad vertical característica en estas corrientes es del orden de algunos metros por segundo. La influencia de estas velocidades verticales en la transferencia y distribución de diferentes propiedades físicas (calor, humedad, cantidad de movimiento y otros) se describen con ayuda de los conceptos sobre turbulencia.

—Corrientes verticales convectivas

Que se presentan en volúmenes de aire con dimensiones horizontales de varios kilómetros (no más de 20–30 Km), los valores característicos de la velocidad vertical son del orden de algunos m/seg; son originados bajo la influencia de irregularidades de la superficie activa y la circulación orográfica.

—Corrientes verticales regulares

Abarca zonas con dimensiones horizontales del orden de miles de kilómetros, la velocidad vertical es del orden de 2 m/seg.

Las corrientes verticales de tipos II y III se describen por medio de la ecuación de movimiento y la ecuación de transferencia.

De la ecuación de continuidad, se puede obtener la expresión para la velocidad vertical y nos muestra que las corrientes verticales en la atmósfera resultan por acción de tres factores: fuerza de rozamiento, inestabilidad, e inercia del movimiento.

Como se observaba anteriormente, la atmósfera siempre se encuentra en estado turbulento, en la atmósfera ocurre un proceso continuo de mezcla de los vórtices turbulentos. Los vórtices turbulentos inestables de gran escala conforman vórtices con características dimensionales y velocidades menores (intervalo de inercia de la turbulencia). Este proceso continúa hasta que la influencia de la viscosidad no permite la formación de vórtices más pequeños, por la disipación de la energía de turbulencia en energía calorífica (intervalo de viscosidad).

Dependiendo de la causa de aparición de la turbulencia se pueden considerar tres tipos: térmica (convectiva), dinámica y mecánica.

6.2 GRADIENTE VERTICAL

6.2.1 Capa cercana de la Superficie.

Ley Logarítmica de la Distribución Vertical de la Velocidad del Viento.

El análisis dimensional del orden de los valores de los miembros en las ecuaciones de movimiento (si se integra de acuerdo a la altura en relación con la ecuación del flujo de calor) nos muestra que en la capa cercana a la superficie, todos estos factores se reducen y con suficiente precisión (cerca del 10 o/o) pueden ser expresados así:

$$K\rho \frac{dc}{dz} = \tau_0 ; \frac{U}{V} = \text{Tg } \alpha = \text{const.} \quad (1)$$

donde: $C = \sqrt{U^2 + V^2}$, es el módulo de la velocidad del viento; τ_0 , es la tensión de la fricción superficial; α el ángulo de desviación del viento de las isobaras; U y V , las proyecciones de la velocidad del viento en los ejes X y Y (en este caso, el eje X está orientado por la tangente de la isobara y el eje Y , por la normal a la isobara hacia el lado de menor presión).

Las ecuaciones (1) nos muestran que la tensión de la fricción superficial y el ángulo de desviación del viento en esta capa son constantes con la altitud. De acuerdo al orden de los miembros de las ecuaciones (1) esta afirmación es cierta hasta los 50–100 metros.

El sabio alemán Prandtl en 1932, introdujo el concepto de trayectoria del desplazamiento ℓ , el cual también se llama escala de turbulencia.

En base a razonamientos fundamentales de la teoría de la dimensionalidad, obtenemos que ℓ y el coeficiente de turbulencia K están relacionados por la fórmula:

$$K = \ell^2 \frac{dc}{dz} \quad (2)$$

entonces la primera ecuación de la expresión (1) se convierte en:

$$\ell \frac{dc}{dz} = U^* \quad (3)$$

considerando un elemento nuevo $U^* = \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}}$, que se llama velocidad de fricción o velocidad dinámica.

Con estratificaciones de la capa en mención, cercana a la indiferente ($Ri \simeq 0$, $g = g_a$), las trayectorias del desplazamiento dependen solamente de la altura. Por cuanto ℓ , posee las unidades de longitud y fundamentados en la teoría de la semejanza, podemos escribir la fórmula de Prandtl de la siguiente forma:

$$\ell = \gamma (Z + Z_0)$$

donde Z , es la altura sobre la superficie; Z_0 , es el valor que caracteriza el significado de ℓ en la superficie terrestre (cuando $Z = 0$) y se llama parámetro de rugosidad; $\gamma = 0.38$, constante de Karman.

Integrando la ecuación (3) dentro de los límites de $Z = 0$, donde la velocidad del viento bajo la influencia de la adhesión se convierte en cero ($C = 0$), hasta una altura cualquiera Z , donde la velocidad del viento es $C(Z)$, obtenemos la expresión de la ley logarítmica de distribución de la velocidad del viento en la capa inferior:

$$C(Z) = \frac{U^*}{\gamma} \left(\ln \frac{Z + Z_0}{Z_0} \right) \quad (5)$$

si medimos en una altura Z_3 la velocidad del viento C , entonces:

$$C(Z_3) = \frac{U^*}{\gamma} \left(\ln \left[\frac{Z_3 + Z_0}{Z_0} \right] \right) \quad (6)$$

utilizando esta fórmula podemos determinar el valor de U^* . Descartando de (5) y (6) la velocidad de fricción, obtenemos:

$$C(Z) = C(Z_3) \cdot \frac{\left[\ln \left(\frac{Z + Z_0}{Z_0} \right) \right]}{\left[\ln \left(\frac{Z_3 + Z_0}{Z_0} \right) \right]} \quad (7)$$

Si diferenciamos la ecuación (7) y utilizamos las relaciones (2) y (4) obtenemos:

$$K(Z) = \gamma^2 \cdot \frac{C(Z_3)}{\ln \left(\frac{Z_3 + Z_0}{Z_0} \right)} (Z + Z_0) \quad (8)$$

la dependencia de K de la altura, la expresó Prandtl en la siguiente forma:

$$K(Z) = K_0 + aZ \quad (9)$$

de las ecuaciones (8) y (9), obtenemos que:

$$a = \gamma^2 \frac{C(Z_3)}{\ln \frac{Z_3 + Z_0}{Z_0}} \quad \text{y} \quad K_0 = aZ_0 \quad (10)$$

De esta manera, la afirmación sobre la dependencia lineal de K y Z , nos lleva a confirmar la dependencia lineal de K y Z .

El análisis de una gran cantidad de observaciones en diferentes zonas de la tierra, han demostrado que la ley logarítmica de la fórmula (5), se cumple aceptablemente, si la estratificación térmica de la capa no se diferencia mucho de la estratificación indiferente. En la figura 47 se ha esquematizado la distribución de la velocidad del viento con la altura, obtenida por datos de mediciones de gradiente en una zona semidesértica. En este gráfico se han utilizado los ejes semilogarítmicos de coordenadas, en uno de los ejes está el logaritmo de la altura ($\lg Z$), en el otro, la velocidad del viento medida en diferentes alturas (C) en la escala lineal. Este gráfico nos muestra que a las 08:00, cuando la estratificación está cerca a la indiferente, la distribución de la velocidad del viento es logarítmica; todos los puntos experimentados que satisfacen la fórmula (5) se distribuyen cerca de la recta.

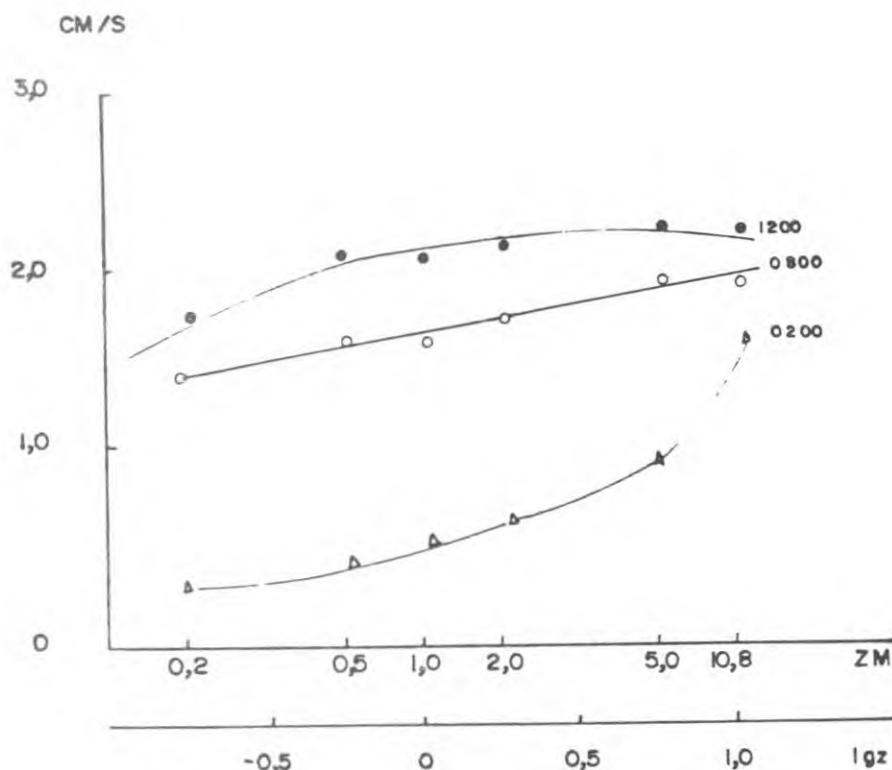


Figura 47 — Distribución de la Velocidad de Viento en Altura en condiciones de Estratificación Indiferente (0800), Inestable (1200) y Estable (0200) de la Capa Inferior de la Atmósfera. Arz, República de Kazajstan - URSS, 27 Agosto 1945

Al mismo tiempo, cuando la inestabilidad es marcada (12:00) y especialmente cuando se presenta estratificación estable (02:00), la distribución del viento en los ejes de coordenadas ($\lg Z, C$) posee una curvatura bien marcada: de un signo para estratificación inestable y de otro para estratificación estable (de inversión). En comparación con el caso, cuando $C \sim \lg Z$, la velocidad del viento crece con la altura más lentamente para $g > g_a$ (número de Richard $Ri < 0$) y más rápido para $g < g_a$ ($Ri > 0$).

La cuestión sobre la distribución del viento en altura en condiciones no uniformes ($|g| \gg g_a$) en los últimos años, ha sido objeto de varias investigaciones.

Las más nombradas han sido las fórmulas presentadas por MONIN—OBUJOV, obtenidos en base a la teoría de la similitud y dimensional.

El análisis de los valores dimensionales que forman parte de las ecuaciones determinantes de la variación de la temperatura y velocidad del viento en altura, en la capa cercana, ha permitido hacer las siguientes conclusiones: la temperatura adimensional (es decir la relación T/T^*) y la velocidad del viento (relación C/U^*) son funciones universales de relación adimensionales del parámetro de estabilidad estática:

$$B = \frac{Z}{L^*} \quad (11)$$

donde L^* es la escala de altura de MONIN—OBUJOV y es igual a:

$$L^* = \frac{U_*^2}{\gamma b T^*} \quad (12)$$

donde en su orden U_* , es la velocidad de fricción o velocidad dinámica (escala de la velocidad), T^* es la escala de la temperatura determinada por la fórmula:

$$T^* = \frac{Q_0}{\gamma C_p \rho_0 U_*} \quad (13)$$

$b = \frac{G}{T}$ parámetros de ARQUIMEDES (G, aceleración de la caída libre); γ la constante de KARMAN.

La fórmula para la distribución de la velocidad del viento en la capa inferior de la atmósfera, de acuerdo a la teoría de la similitud, es la siguiente:

$$C(Z) - C(Z_1) = \frac{U^*}{\gamma} \left[f_c(B) - f_c(B_1) \right] \quad (14)$$

donde $f_c(B)$ es una función universal de la variable h . Esta función ha sido determinada por medio de una serie de observaciones, realizadas en diferentes condiciones y en varias zonas del mundo. Como resultado se ha obtenido que:

$$f_c(B) = \begin{cases} \ln B + 10 B & \text{para } B > 0 \\ \ln B & \text{para } 0.07 \leq B \leq 0 \\ 0.25 + 1.2 B^{-1/3} & \text{para } B < -0.07 \end{cases} \quad (15)$$

6.2.2 Capa Límite Atmosférica

Anteriormente se hizo un análisis teórico acerca del comportamiento de la turbulencia atmosférica.

También cuando analizamos la aproximación geostrófica mencionamos que se despreciaba en la ecuación de movimiento el efecto de la fricción. Esta aproximación es válida en la denominada **atmósfera libre**, o sea desde el primer kilómetro hacia arriba. Por debajo de la misma, es decir, en la capa en contacto con la superficie terrestre, se debe tomar en cuenta los efectos de fricción y a esta capa se le denomina **capa límite atmosférica**.

Se le puede caracterizar como aquella región de la atmósfera, cercana a la superficie terrestre, directamente afectada por el efecto de fricción de la misma. Como ya expresamos, si bien su altura es variable, para latitudes medias puede tomarse un valor aproximado de 1 km. La Figura 48, muestra un esquema de la capa límite atmosférica con sus subdivisiones.

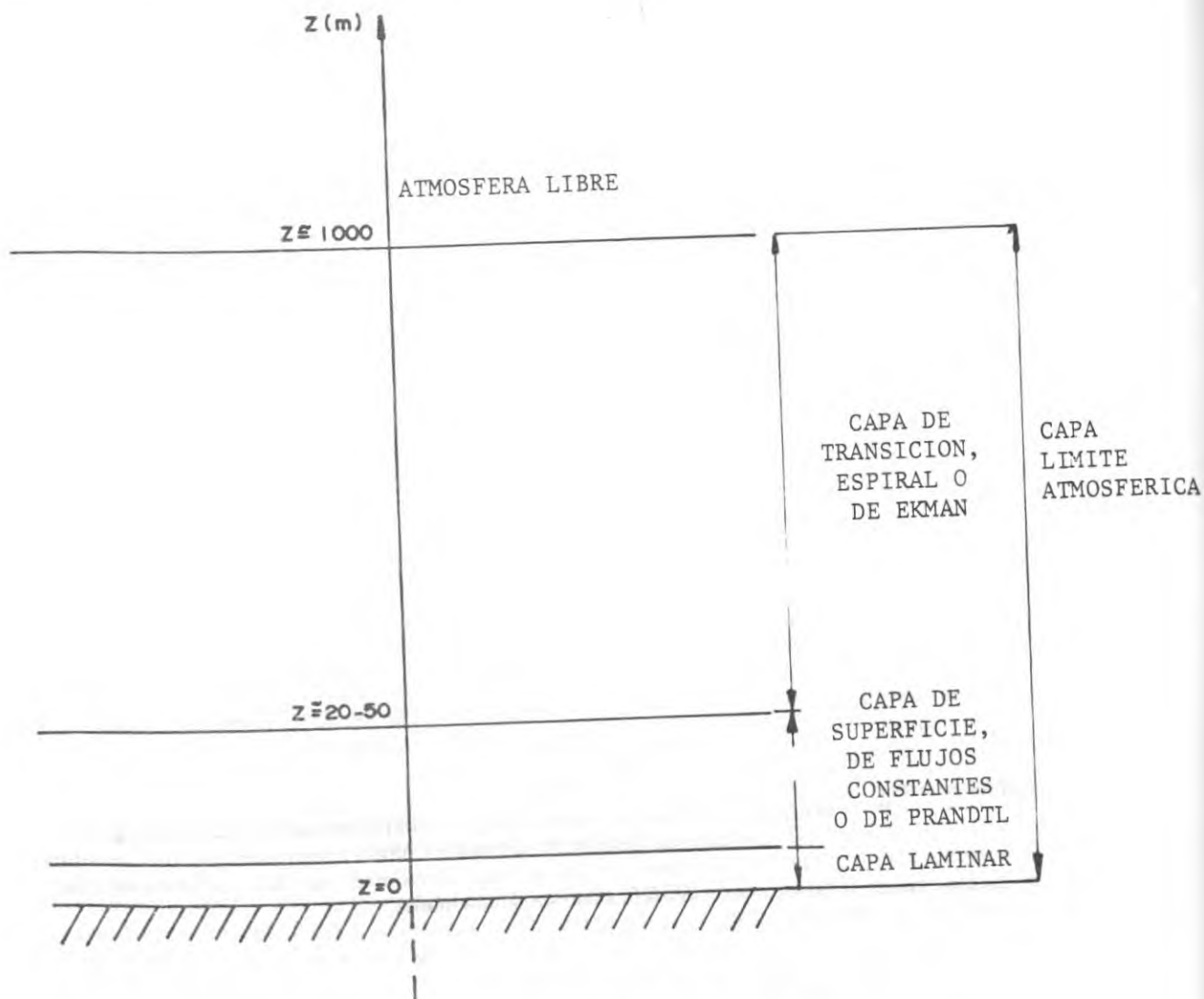


Figura 48 — Capa Límite Atmosférica y sus Subdivisiones

6.2.2.1 Capa de superficie

También se le denomina capa de flujos constantes o de Prandtl. Usualmente se le define como la parte inferior de la capa límite atmosférica en contacto con la superficie terrestre, caracterizada por la constancia de los flujos turbulentos con la altura (en realidad las mediciones determinan variaciones que oscilan alrededor de un 10 o/o). La interacción con la superficie terrestre es muy fuerte y el ajuste de su estructura a las condiciones de superficie es relativamente rápido; de aquí que se puede asumir dentro de la misma un estado cuasi-estacionario. Su altura es variable y puede darse como representativo un valor entre 20 y 50 m.

En el tratamiento realizado en los ítems 6.1 y 6.2.1 se vieron ya las diferentes consideraciones del tratamiento para identificar su estructura, en lo que sigue señalaremos como se comportan las expresiones útiles para caracterizar la distribución del viento con la altura y mostrar ciertas dependencias de valor.

Para condiciones adiabáticas (cuando el gradiente de temperatura potencial es cero, o el gradiente de temperatura aproximadamente de $1^{\circ}\text{C} / 100 \text{ m}$) suponemos válida la expresión logarítmica:

$$u(Z) = \frac{u^*}{k} \cdot \ln \frac{Z}{Z_0} \quad (16)$$

u , es el valor del módulo del viento y Z es la altura, k y Z_0 fueron definidos anteriormente.

Esta expresión se torna útil si se conoce valor de u en un dado nivel, por ejemplo: $u(h)$ (h podría ser el nivel anemométrico).

$$\text{Entonces: } u(Z) = \frac{u_*}{k} \cdot \ln \frac{Z}{Z_0}$$

$$u(h) = \frac{u_*}{k} \cdot \ln \frac{h}{Z_0}$$

$$\text{de donde: } \frac{u(Z)}{u(h)} = \frac{\ln(Z/Z_0)}{\ln(h/Z_0)} \quad (17)$$

Se ve claramente la utilidad de esta expresión ya que en la misma no aparece u_* y permite conocer, dentro de la región en cuestión, la distribución $u(Z)$ a partir de $u(h)$.

Se ve que el único parámetro que afecta a la distribución bajo condiciones adiabáticas es el parámetro de rugosidad Z_0 .

Se dan a continuación algunas mediciones de Z_0 , para terrenos típicos.

Descripción del Terreno	Z_0 (cm)
Liso	0,001
Arena	0,03
Superficie con nieve: nieve lisa sobre pasto corto	0,005
Sobre pradera	0,1
Nieve vieja	0,5-1,0
Pasto corto	1-4
Pasto largo	4-8
Pinos (hasta 10 m)	50-100
Océano (dependiendo de la velocidad del viento)	0,001-0,5

Supongamos $h = 10$ m, entonces la relación $u(40 \text{ m}) / u(10 \text{ m})$ varía desde 1,12 a 1,30 para rango de Z_0 entre 0,01 cm a 10 cm. Cuando el terreno "viento arriba" es de menor Z_0 , el principal incremento del viento ocurre por debajo de los 10 m (por experiencia). Cuando más suavizada es la superficie terrestre, mayor es el viento en los niveles bajos. Esto sugiere que a constancia de los demás factores intervinientes, es preferible ubicar un aerogenerador en un lugar de poca rugosidad, lejos de lugares con obstáculos. Si es inevitable ubicarlo en un terreno rugoso se le colocará a alturas mayores que en el caso de terreno suavizado (poca rugosidad).

Si las condiciones atmosféricas son de inestabilidad (o sea, cuando la temperatura con la altura decrece a valores mayores que $1^\circ\text{C}/100 \text{ m}$) como es el caso en condiciones de altos valores de insolación, la ecuación anterior para $u(Z)$ no es válida y entonces hay que recurrir a diversas técnicas que predicen dicha distribución bajo condiciones no adiabáticas, por ejemplo podemos mencionar el tratamiento de Monin-Obujov (ya señalado) que para valores pequeños del parámetro $\beta Z/L$ expresa:

$$u(Z) = \frac{u_*}{k} \left(\ln \frac{Z}{Z_0} + \beta \frac{Z}{L} \right) \quad (18)$$

donde β es una constante que oscila entre 4 a 7, y

$$L = - \frac{u_*}{k} \frac{C_p T}{g H} \quad (19)$$

siendo: H = flujo turbulento de calor

Cuando la atmósfera es inestable ($\frac{\delta \theta}{\delta Z} < 0$ ó $\frac{\partial T}{\partial Z} < -1^\circ\text{C}/100 \text{ m}$) entonces $L < 0$.

Para condiciones inestables se tiene que $u(Z)$ aumenta con Z más lentamente que en condiciones adiabáticas (observar en la expresión que $\beta \cdot Z/L < 0$). O sea, bajo estas condiciones el aerogenerador obtendrá el mismo rendimiento que en condiciones adiabáticas tan solo a mayor altura.

Si la atmósfera tiene condiciones estables (o sea, $\frac{\partial T}{\partial Z} > -1^\circ\text{C}/100\text{ m}$) (se incluyen obviamente la condición isotérmica), $H < 0$ (o sea, dirigido hacia el suelo) y el viento se incrementa con la altura más fuertemente que bajo condiciones adiabáticas, pero bajo estas condiciones es preferible usar una expresión empírica:

$$u(Z) = u_* \left(\frac{Z}{Z_0} \right)^\alpha \quad (20)$$

$$\text{o} \quad \frac{u(Z)}{u(h)} = \left(\frac{Z/Z_0}{h/Z_0} \right)^\alpha \quad (21)$$

El valor de α fluctúa entre 0,25 y 0,35 correspondiendo valores más altos a condiciones de mayor estabilidad.

Es interesante señalar algunas recomendaciones:

—Bajo condiciones neutrales o levemente inestables, el viento queda determinado por la ley logarítmica hasta alturas de 100 m sobre el suelo.

—Bajo condiciones sinópticas detectadas en experiencias en Texas y Holanda, sobre terrenos de bajos valores de Z_0 , el incremento de u con la altura sobre dicho nivel no tiene consecuencias importantes para la instalación de aerogeneradores en condiciones diarias.

—Hay sí, un incremento bastante marcado bajo condiciones estables y tan solo por esas condiciones, resultaría interesante instalar aerogeneradores a alturas del suelo relativamente altas.

—Las inversiones de temperatura son un caso especial de condiciones de estabilidad y por ende una climatología de las mismas para un dado comportamiento sinóptico en una región, resulta de interés económico.

6.2.2.2 Subcapa laminar

A pesar de la altura que esta subcapa tiene, no existe un interés en el conocimiento de la distribución de $u(Z)$ dentro de la misma para fines eólicos. Haremos una breve descripción de esta.

En ciertos casos, cuando Z_0 es pequeño, o sea, para aquellas superficies suavizadas, el valor del coeficiente de difusividad turbulenta $K_m = k \cdot u_* \cdot Z_0$, puede llegar a ser del mismo orden de magnitud que ν . Entonces, cuando ello ocurre se debe tomar:

$$(K_m + \nu) \frac{\partial u}{\partial Z} = u_*^2 \quad (22)$$

Aún más, cuando:

$$K_m = k u_* Z_0 \ll \nu$$

la estructura de la capa de superficie está dominada por los efectos de la viscosidad molecular y la transferencia turbulenta es despreciable. Esta condición permite la denominación de "flujo aerodinámicamente suave".

La teoría muestra que cuando:

$$Re = \frac{Z_0 u_*}{\nu} > 2,5$$

entonces es lícito no considerar ν en (22).

Se tiene que cuando

$$\nu \frac{\partial u}{\partial z} = u_*^2$$

de donde:

$$u(z) = \nu^{-1/2} \cdot u_*^2 \cdot z \quad (23)$$

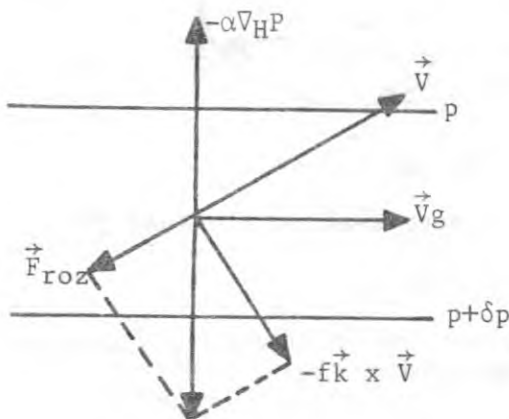
6.2.2.3 Capa de transición

En esta capa el efecto de la fuerza de fricción será tal, que producirá un retardo en la velocidad del viento, en el caso en que el movimiento sea balanceado, esto es:

$$0 = -f \vec{k} \times \vec{V} - \alpha \nabla_H P + \vec{F}_{roz}$$

Los esquemas que se presentan en los dos hemisferios, en el caso de isobaras rectas, se presenta en la Figura 49.

H. N.



H. S.

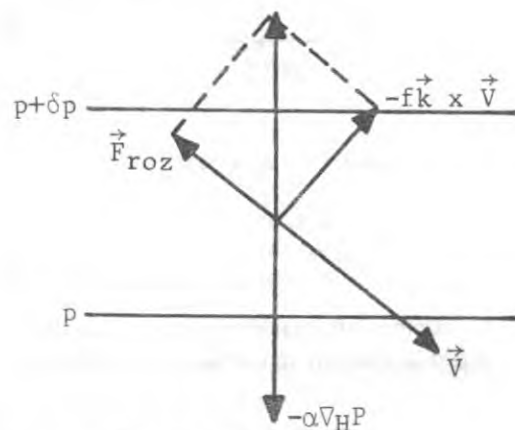


Figura 49 — Efecto de la Fuerza de Fricción en la Capa de Transición

De aquí se puede sacar las siguientes conclusiones:

- Que un efecto de la fricción es el de disminuir el viento.
- Que el viento real ha girado en el hemisferio Norte hacia la izquierda y en el hemisferio Sur a la derecha del viento geostrófico; o sea, en ambos casos hacia las bajas presiones.

Los expuesto surge al considerar la fuerza de Coriolis: $-f \vec{k} \times \vec{V}$, que tendrá que actuar perpendicularmente a $\vec{V}$, hacia la derecha en el hemisferio Norte y hacia la izquierda en el hemisferio Sur; y la fuerza de fricción deberá actuar en la misma dirección y sentido contrario a $\vec{V}$.

Ekman atacó el problema teórico de como gira el viento con la altura, reduciendo la ecuación del movimiento a una ecuación de segundo orden, en la que la variable dependiente es el vector velocidad y la variable independiente es la altura.

Esto es posible, porque la fuerza F_{roz} puede ser expresada por:

$$F_{roz} = \nu \frac{\partial^2 |\vec{V}|}{\partial z^2}$$

Para resolver la ecuación que da la variación del viento con la altura en la capa de fricción supuso:

- Que la fuerza de presión horizontal y por ello el viento geostrófico, tienen la misma dirección y magnitud en todos los niveles.

b) Que el volumen específico es independiente de la altura. Esta última condición, no es una violación tan seria a las condiciones reales como parecería, por cuanto el efecto de fricción está confinado a las capas más bajas.

c) Que la viscosidad es independiente de la altura. Con esta suposición obtuvo como resultado que la hodógrafa del movimiento es una espiral (Figura 50); de tal modo que el viento real gira con la altura en el hemisferio Norte, en el sentido de las agujas del reloj, y en el hemisferio Sur en el sentido contrario, aumentando en ambos casos la velocidad con la altura. El nivel en el cual el viento real tiende a ser paralelo con las isobaras, suele ser considerado como el representativo del viento geostrófico o gradiente.

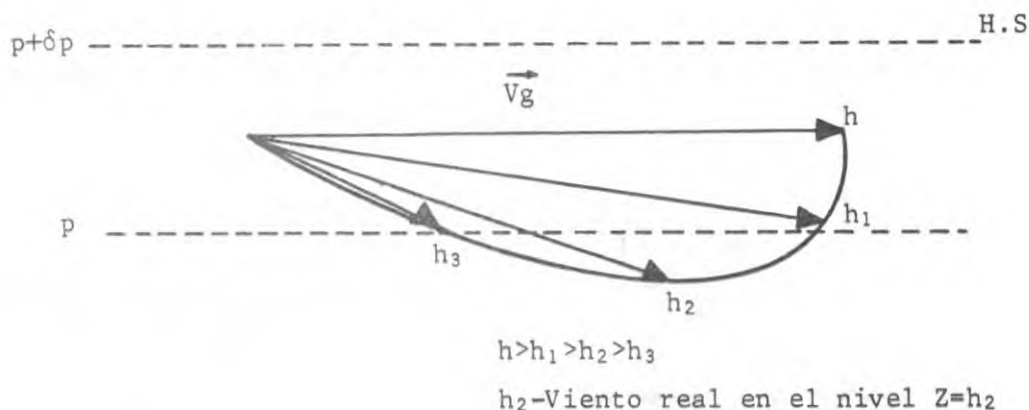


Figura 50 - Espiral de Ekman

Como información se dan las expresiones de las componentes horizontales u y v del viento, según la solución de Ekman (ver por ejemplo Wiin Nielsen, 1974):

$$\begin{aligned} u &= V_g + \sqrt{2} V_g \sin \alpha_0 e^{-Z/H_*} \cos \left(\alpha_0 + \frac{3\pi}{4} - \frac{Z}{H_*} \right) \\ v &= \sqrt{2} V_g \sin \alpha_0 e^{-Z/H_*} \sin \left(\alpha_0 + \frac{3\pi}{4} - \frac{Z}{H_*} \right) \end{aligned} \quad (24)$$

donde:

$$\begin{aligned} V_g &= \text{módulo del viento geostrófico} \\ \alpha_0 &= \text{ángulo entre el viento real y el geostrófico en } Z = 0 \\ H_* &= \frac{\sqrt{2} \cdot K_m}{f} \end{aligned}$$

6.3 RACHAS Y TORMENTAS

Cuando se habla de variaciones de la velocidad del viento es preciso distinguir cuidadosamente entre rachas y turbonadas.

Una racha es un aumento brusco del viento con respecto a su velocidad media, tomada en cierto intervalo de tiempo. Su duración es menor que la de una turbonada y va seguida de un debilitamiento o reducción del viento.

La turbonada es un viento fuerte que se inicia bruscamente, dura algunos minutos y después se calma también rápidamente, se le define con más precisión como un incremento brusco de la velocidad del viento desde 8 m/seg al menos, alcanzando 11 m/seg como mínimo y una duración de por lo menos 1 minuto.

En la Figura 51, se muestra un ejemplo del registro de una turbonada y algunas rachas.

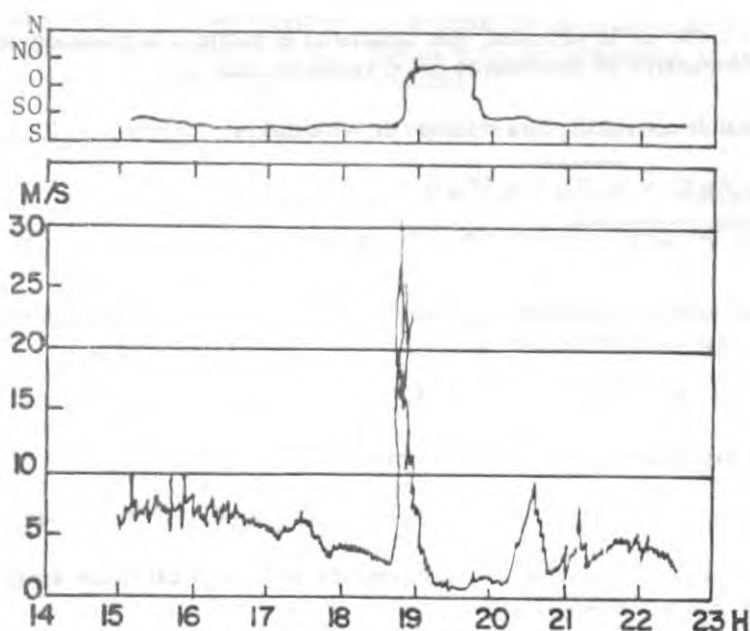


Figura 51 — Variación de la Dirección y Velocidad del Viento cuando se presenta una Turbonada

Las tormentas son un fenómeno meteorológico bastante complejo, que se desarrollan en la atmósfera con una estratificación bastante inestable. Una de las características de las tormentas es la presencia de vientos fuertes (turbonadas y en rachas). Las tormentas generalmente duran poco tiempo (dos horas).

El viento fuerte en las tormentas, de acuerdo a la escala de Beaufort, es de 10 (25–28 m/seg) alcanzando hasta 11 (29–32 m/seg).

6.3.1 Características Espectrales del Campo Turbulento de Velocidad

Para muchos problemas prácticos, no tiene tanta importancia la descripción de los conocimientos irregulares de una corriente turbulenta, como lo hemos analizado, sino las características que describan más detalladamente la estructura de los campos turbulentos.

En particular, para la utilización de la energía eólica, es importante destacar las características de las fluctuaciones de la dirección del viento.

Ya se analizó la estructura compleja del movimiento turbulento, que se destaca en la presencia de fluctuaciones de diferentes períodos y frecuencias. Esto nos permite presentar el movimiento turbulento como una suposición de movimientos de torbellino de diferentes escalas. Para calcular la distribución de la energía de los torbellinos de diferentes dimensiones, es necesario distribuir el movimiento en sus componentes, lo cual es fundamentado físicamente, ya que la suma de la energía de los diferentes componentes debe ser igual a la energía total de turbulencia B.

Este método consiste en la presentación del campo de velocidad en forma de la integral de Fourier, en vectores de onda que son inversamente proporcionales a la escala de los torbellinos y pueden ser diferentes en distintas direcciones. Así, representamos la pulsación de velocidad en el punto A, en la forma de la integral de Fourier:

$$u'_j(X_a, t) = A_j(\gamma, t) e^{i \gamma X_a} d\gamma, \quad (1)$$

$$A_j(\gamma, t) = \frac{1}{8\pi^3} \int u'_j(X_a, t) e^{-i \gamma X_a} dX_a \quad (2)$$

es la componente Fourier de la velocidad, que caracteriza el aporte, a la pulsación de la velocidad $u_j^*(X_A, t)$, de la componente del movimiento con el vector de onda γ .

El tensor espacial de correlación para el campo de velocidad es:

$$R_{ij}(X_A, X_B, t) = \overline{u_i(X_A, t) u_j(X_B, t)} = \int A_j(\gamma, t) A_i(\gamma'; t) e^{i\gamma X_A} e^{i\gamma' X_B} dX_A dX_B \quad (3)$$

En el campo turbulento homogéneo, el tensor de correlación va a depender solamente de la diferencia $D = X_A - X_B$; esto tendrá lugar si:

$$A_j(\gamma, t) A_i(\gamma'; t) = \int F_{ij}(\gamma, t) B(\gamma - \gamma')$$

Reemplazando esta expresión en la ecuación (3) obtenemos:

$$R_{ij}(n, t) = \int F_{ij}(\gamma, t) e^{i\gamma n} d\gamma \quad (4)$$

donde $F_{ij}(\gamma, t)$ es el coeficiente de la transformación de Fourier del tensor espacial de correlación, llamado tensor de correlación espectral.

Haciendo en (4) $n = 0$ e $i = j$, obtenemos:

$$R_{ii}(0, t) = \int F_{ii}(\gamma, t) d\gamma = 2\beta \quad (5)$$

el tensor $F_{ii}(\gamma, t)$, que describe el aporte de los torbellinos con el vector de onda en la energía de turbulencia, se llama tensor espectral de energía.

Teniendo en cuenta que es más cómodo analizar una función que dependa de un valor escalar, entonces tomamos la densidad espectral de energía de turbulencia $E(\gamma, t)$, que es igual a la integral de $F_{ii}(\gamma, t)$ en la superficie $d\sigma$ de la esfera de radio:

$$R = \sqrt{\gamma_1^2 + \gamma_2^2 + \gamma_3^2}$$

$$E(\gamma, t) = \frac{1}{2} \oint_{\gamma_1^2 + \gamma_2^2 + \gamma_3^2 = \gamma^2} F_{ii}(\gamma, t) d\sigma \quad (6)$$

de la fórmula (5) se deduce que:

$$\beta = \frac{1}{2} \int F_{ii}(\gamma, t) d\gamma = \frac{1}{2} \int_0^\infty d\gamma \left(\oint_{\gamma_1^2 + \gamma_2^2 + \gamma_3^2 = \gamma^2} F_{ii}(\gamma, t) d\sigma \right) = \int_0^\infty E(\gamma, t) d\gamma \quad (7)$$

La densidad espectral de energía $E(\gamma, t)$ caracteriza el aporte en la energía total de turbulencia de las componentes del movimiento con el número de onda independientemente de la dirección del vector de onda.

En el caso más sencillo para el análisis, es considerar la situación de un campo isotrópico turbulento, es decir, el campo en el cual las características del movimiento turbulento son idénticos en todas las direcciones. Todas las funciones escalares promedios, que describen la estructura estadística de tal campo, permanecen invariable en la rotación o cuando se proyecta imaginariamente el sistema de coordenadas. Así, por ejemplo, el espectro $F_{ii}(\gamma, t)$ del campo homogéneo isotrópico puede ser función solamente de la longitud del vector γ , donde ésta es la única invariable con relación a la rotación del elemento. Para el campo isotrópico, de (7) y pasando al sistema de coordenadas esféricas, encontramos la relación entre $E(\gamma, t)$ y $F_{ii}(\gamma, t)$ en la forma:

$$E(\gamma, t) = 4\pi\gamma^2 F_{ii}(\gamma, t) \quad (8)$$

Las fórmulas (5) y (7) nos muestran que la condición de igualdad de la suma de energía de todas las componentes del movimiento, a la energía total de turbulencia, se cumple utilizando la transformación de funciones para el campo de velocidad.

6.4 ROSA DE LOS VIENTOS

Una parte de la energía de radiación solar que llega a la tierra se transforma finalmente en energía cinética de los gases de la atmósfera, cuyas moléculas están, consecuentemente, siempre en movimiento.

El viento es el movimiento natural del aire atmosférico. En meteorología, esta palabra se refiere en general a un movimiento de conjunto del aire cerca de la superficie terrestre o en altitud. El presente capítulo está dedicado al movimiento horizontal del aire sobre la superficie de la tierra.

El movimiento del aire raramente es regular. Por lo general es turbulento, con torbellinos de forma y dimensiones variadas, que se desarrollan en el aire y perturban su flujo. El efecto de la turbulencia cerca de la superficie terrestre es la producción de variaciones rápidas e irregulares de la velocidad y de la dirección del viento. Estas fluctuaciones de frecuencia elevada son independientes unas de otras.

En este capítulo se verá como se realiza la medida del viento en superficie y se estudiarán sus principales características.

6.4.1 Principios Generales de la Medida del Viento en Superficie

El viento puede ser considerado como un vector definido por una magnitud, la velocidad del viento, y una dirección. La dirección del viento es la de su procedencia.

El viento sufre generalmente fluctuaciones rápidas. El grado de perturbación aportado por estas fluctuaciones se expresa con el término turbulencia.

La velocidad, la dirección y la turbulencia del viento se miden preferentemente con la ayuda de instrumentos, pero cuando es imposible, se les pueden evaluar por estimación. Esto es, por ejemplo, lo que ocurre cuando la velocidad del viento es inferior a dos nudos, pues con velocidades débiles los instrumentos son poco sensibles y dejan de ser precisos. CALMA, es la ausencia de todo movimiento perceptible del aire.

6.4.2 Dirección del Viento en Superficie — Unidades

La dirección del viento se define como aquella de donde sopla. Se expresa en grados, contados en el sentido de las agujas del reloj a partir del norte geográfico o utilizando los rumbos de la rosa de los vientos.

Sin embargo, para los mensajes cifrados, la dirección del viento debe expresarse en la escala 00—36. La tabla No. 6 da las cifras de la clave y su equivalente exacto en grados correspondientes a los 32 rumbos de la rosa de los vientos.

TABLA No. 6
DIRECCION DEL VIENTO

EQUIVALENCIA EN LOS RUMBOS DE LA ROSA DE LOS VIENTOS

Dirección en la rosa de los vientos	Equivalente exacto en grados	Cifras de la clave	Dirección en la rosa de los vientos	Equivalente exacto en grados	Cifras de la clave
Calma	—	00	S cuarto SW	191,25	19
N cuarto NE	11,25	01	SSW	202,5	20
NNE	22,5	02	SW cuarto S	213,75	21
NE cuarto N	33,75	03	SW	225	23
NE	45	05	SW cuarto W	236,25	24
NE cuarto E	56,25	06	WSW	247,5	25
ENE	67,5	07	W cuarto S	258,75	26
E cuarto N	78,75	08	W	270	27
E	90	09	W cuarto NW	281,25	28
E cuarto SE	101,25	10	WNW	292,5	29
ESE	112,5	11	NW cuarto W	303,75	30
SE cuarto E	123,75	12	NW	315	32
SE	135	14	NW cuarto N	326,25	33
SE cuarto S	146,25	15	NNW	337,5	34
SSE	157,5	16	N cuarto NW	348,75	35
S cuarto SE	168,75	17	N	360	36
S	180	18	Variable	—	99

6.4.3 Medida de la Dirección del Viento en Superficie

En general, la dirección del viento se mide con la ayuda de una veleta. Para que esta funcione correctamente, debe girar sobre su eje con un mínimo de rozamiento. Debe estar equilibrada con relación a este eje.

Es necesario vigilar con especial cuidado que el eje de la veleta esté perfectamente vertical y que la orientación de la veleta con respecto al norte verdadero sea precisa.

Para las observaciones sinópticas, hay que determinar la dirección media del viento durante el intervalo de los 10 minutos anteriores a la hora de la observación. Es conveniente para ello utilizar una veleta registradora.

Para la aviación y otros fines, es preferible a menudo, utilizar una transmisión a distancia y la veleta debe reaccionar a los cambios rápidos de dirección. Se utiliza con frecuencia una transmisión eléctrica entre la veleta y el registrador.

También suele ser necesario estimar la dirección del viento en ausencia de instrumentos o cuando el viento es demasiado débil. En efecto, la mayor parte de las veletas dejan de ser sensibles a la dirección del viento cuando su velocidad es inferior a dos nudos.

6.4.4 Velocidad del Viento en Superficie — Unidades

La velocidad del viento se expresa en nudos; un nudo es igual a una milla marina por hora ó 0.51 metros por segundo.

Durante un intervalo de tiempo, por corto que sea, la velocidad del viento en superficie, rara vez es constante; en general varía rápida y continuamente. La turbulencia del viento produce variaciones que son irregulares en período y amplitud.

Se ha convenido que hay calma cuando la velocidad del viento es inferior a un nudo.

La velocidad del viento se puede medir de distintas maneras. La más sencilla es la observación directa del efecto del viento en la superficie terrestre sin utilizar instrumentos. La escala Beaufort, establecida en 1905 por el almirante Sir Francis Beaufort, con objeto de estimar la velocidad del viento en el mar, ha sido más tarde adoptada para ser utilizada en tierra. Después se le añadieron equivalencias en velocidad del viento para cada clase de efectos observados.

Los instrumentos de medida y registro de la velocidad del viento han reducido considerablemente la utilización de la escala Beaufort, particularmente para las estaciones terrestres. Sin embargo, constituye un medio cómodo para estimar la velocidad del viento a falta de otros procedimientos.

6.4.5 Medición y Registro de la Dirección del Viento

El coeficiente de retardo de un instrumento para determinar la dirección del viento debe ser menor o igual a 1 segundo para registrar el 63 o/o de un cambio brusco de dirección.

Los métodos prácticos de indicar o de registrar la dirección, comprende los tipos puramente mecánicos (tales como el modelo a doble pluma, frecuentemente adaptado a los anemómetros tubulares de presión) y los tipos de transmisión eléctrica. Estos últimos son los más convenientes para indicación a distancia, generalmente constituidos por repetidores autosincronizados a corriente alterna o continua. Con tales sistemas es posible obtener una precisión de $\pm 2^\circ$ de la dirección.

6.4.6 Estimación de la Dirección del Viento

La mayoría de las veletas no responden a los cambios de dirección cuando la velocidad del viento es menor de 3 nudos (1.4 m/seg.), en este caso la dirección debe estimarse observando por ejemplo la dirección del humo de una chimenea alta, el movimiento de las hojas, etc., en un sitio descubierto.

La determinación de la persistencia del viento, que es el valor resultante de la relación entre la velocidad vectorial y la escalar, la cual nos indica el cuadrante de donde sopla el viento con mayor frecuencia, tiene gran interés tanto práctico como científico, para análisis climatológicos, estudios de contaminación y difusión de contaminantes, planeación, etc.

Si el viento sopla todo el tiempo de un mismo cuadrante, la velocidad vectorial y la escalar coinciden y la persistencia será de 100 o/o, en cambio, si el viento sopla del lado contrario con igual frecuencia, la persistencia del viento será cero.

Se utilizan diversos métodos para el cálculo de la persistencia del viento, aunque ninguno ha demostrado confiabilidad exacta para fines específicos.

Cuando se utilizan 4 y 8 rumbos de la rosa de los vientos, y de acuerdo al fin específico de utilización de la forma, teniendo en cuenta que la dirección del viento es una variable continua y no discreta, es necesario encontrar un factor de corrección para determinar por medio de las frecuencias relativas el ángulo que indica el punto medio del cuadrante con mayor frecuencia relativa en porcentaje de vientos que soplan de dicho cuadrante.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

1. Necco, G.V.: Curso de Cinemática y Dinámica de la Atmósfera, EUDEBA, Ed. Previa, Bs.As., 1980 (se adaptaron los numerales 1.2.1 y 1.2.2.1)
2. Eldridge, F.R.: Wind Machines, National Science Foundation, Division of Ad. Energy and Resources, Oct. 1975.
3. CAPRI: Problemas del Aprovechamiento de la Energía Eólica en la República Argentina, Revista Electrotécnica, B.A. 1952.
4. Holton, J.R.: An Introduction to Dynamic Meteorology, Academic Press, 1972.
5. Petterssen, S.: Introducción a la Meteorología, 4ta. Ed., Espasa Calpe, Madrid, 1968.
6. Golding, E.W.: The Generation of Electricity by Wind Power, Editorial John Wiley & Sons. U.S.A., 1976.
7. Natural Power Inc.: Información de Equipos, U.S.A. (Catálogo)
8. Natural Power Inc.: Anemometer and Wind Direction Recording Systems. U.S.A. (Catálogo).
9. Weather Measure Corp.: Scientific Instruments and System Catalog., U.S.A., 1978 (Catálogo).
10. Natural Power Inc.: Operating Manual for Wind Data Compiler III. U.S.A. (Manual).
11. Baumeister & Marks: Manual del Ingeniero Mecánico de Marks. Uthea, 6a. Edición, 1967. México.
12. Palmer Cosslett Putnam: Power from the Wind. Van Nostrand Reinhold Co., U.S.A., 1948.
13. Electrical Research Association.: Reports on Wind Power Published by ERA. U.S.A.
14. American Wind Energy Association: Proceedings National Conference, Fall 1978. Editado por West Texas State University, Febrero 1979.
15. Hardy, Donald M.: Wind Power Studies Initial Data and Numerical Calculations. Lawrence Livermore Laboratory, U.S.A., 1976 (Reporte).
16. Kerrigan, T.C.: A Verification Statistic for Numerical Wind Models. Pacific Northwest Laboratory. U.S.A. 1978.
17. R.I. Harris, B.A.: On the Spectrum and Autocorrelation Function of Gustiness in High Winds.
18. Justus, C.G.: Winds and Wind System Performance. The Franklin Institute Press, 1978.
19. B. Wolf, H. Meyer: Wind Energy. The Franklin Institute Press, 1979.
20. J.V. Ramsdell: Estimates of the Number of Large Amplitude Gust. Battelle Pacific Northwest Laboratories, U.S.A. 1978.
21. T.C. Kerrigan: Spectral Estimates of a Wind Fluctuation Statistic Pertaining to Wind Energy Generators. Pacific Northwest Laboratory, U.S.A. 1978.
22. W.C. Cliff: Wind Direction Change Criteria for Wind Turbine Design. Pacific Northwest Laboratory, 1979. U.S.A.
23. Aiello, J.L.: Nuevos Desarrollos en la Simulación Numérica de la Capa Límite Atmosférica con Modelos Estacionarios Bidimensionales, Tesis Doctoral, Dpto. de Meteorología, F.C.E. y N., U.B.A., C.N.I.E., Bs. As., 1980.

24. Martínez C., y Rivero, O.: Apuntes del Curso de Pronosticadores: Cinemática y Dinámica de la Atmósfera, Depto. de Meteorología. Fac. Cs. Exactas y Naturales, U.B.A.
25. Matveev, L.T.: Curso de Meteorología General. Física de la Atmósfera. Hidrometeoizdat. Leningrado 1976. (Inglés y Ruso).
26. Gicina, F.A., y otros: Meteorología Dinámica. Meteorología Teórica. Hidrometeoizdat. Leningrado 1976. (Inglés y Ruso).
27. Busch, N.E., Tennekes, H., Panofsky, H.A.: Turbulence Structure in the Planetary Boundary Layer. "Boundary Layer Meteorology". 1973, Vol. 4.
28. Kuo, H.L.: Planetary Boundary Layer Flow of a Stable Atmosphere over the Globe. Journal Atmospheric Science, 1973. Vol. 30. No.1.
29. T.C. Kerrigan: A Technique for Analyzing the Structure of Atmospheric Turbulence. Pacific Northwest Laboratory. (U.S. Department of Energy). U.S.A., 1978.
30. Wiin Nielsen, A.: Compendio de Meteorología, Vol., Parte 1 – Meteorología Dinámica, O.M.M., Ginebra, Suiza, 1974.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Al I Curso Seminario Latinoamericano sobre Prospección, Evaluación y Caracterización de la Energía Eólica, asistieron técnicos de Argentina, Bolivia, Colombia, Ecuador, El Salvador, Guatemala, México, Nicaragua, Panamá, Perú, República Dominicana y Venezuela, para analizar y discutir aspectos relacionados con la problemática que se presenta en el aprovechamiento del viento como fuente alterna de energía en América Latina.

Se intercambiaron ideas sobre los lineamientos básicos requeridos para realizar la evaluación preliminar del recurso eólico de la Región, llegándose a las siguientes conclusiones:

1. Es necesario unificar los criterios en todos los países Latinoamericanos para el procesamiento de todo tipo de información climatológica, para los fines propuestos.
2. Se requiere establecer a través de OLADE, un mecanismo de intercambio de las diferentes tecnologías y experiencias meteorológicas de todos los países Latinoamericanos.
3. Con miras a la realización a corto plazo de los mapas zonales de Energía Eólica, es indispensable centralizar la información disponible sobre viento en un organismo competente, de fácil acceso a todos los países de la Región.
4. Siendo la Organización Meteorológica Mundial el organismo rector de las actividades meteorológicas, se estimó conveniente utilizar su estructura operativa y de difusión para cuantificar y valorar la información disponible requerida.
5. Se debe realizar un inventario a nivel regional de la red meteorológica existente.

En base a las anteriores conclusiones, se sugiere lo siguiente:

1. Dirigir por intermedio de OLADE, a los Gobiernos de sus Estados Miembros, una encuesta para conocer las instituciones y Organismos que poseen información meteorológica y que realizan actividades concernientes a la problemática de la utilización de la Energía Eólica.
2. Solicitar de las Instituciones y Organismos del numeral anterior, el envío de la información requerida.
3. Recomendar a los Estados Miembros de OLADE, que se refuerce la coordinación interna de las Instituciones y Organismos que trabajan en el aprovechamiento de la Energía Eólica.

Cuernavaca, Mor., Mayo 30 de 1980

LISTA DE PARTICIPANTES

ARGENTINA

Dr. José Luis Aiello
Centro Espacial San Miguel
Director Científico

Ing. Jorge Luis Marchi
Centro Espacial San Miguel
Analista Sinóptico Grupo Lucha Antigranizo

BOLIVIA

Ing. Jorge Ismael Zárate Sanabria
Instituto Nacional de Electrificación Rural (INER)
Ingeniero de Planificación

COLOMBIA

Ing. Met. Jorge Ivan Valencia Franco
Instituto Colombiano de Hidrología, Meteorología y
Adecuación de Tierras (HIMAT)
Jefe Sección de Climatología

ECUADOR

Ing. Luis Amato Zurita Freire
Instituto Ecuatoriano de Electrificación (INECEL)
Ingeniero

EL SALVADOR

Met. Gelio Tomás Guzmán Lopez
Servicio Meteorológico del Ministerio de Agricultura
y Ganadería
Jefe Proyectos Agrometeorología y Aprovechamiento
de la Energía

GUATEMALA

Ing. Ricardo Antonio García Martínez
Instituto Centroamericano de Investigación
Tecnológica e Industrial (ICAITI)
Coordinador Proyecto Secado Solar de Granos

MEXICO

Ing. Enrique Caldera Muñoz
Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE)
Jefe Area de Energía Eólica

Ing. Marco Antonio Borja Díaz
Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE)
Investigador Asistente

Ing. Ricardo Saldaña Flores
Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE)
Investigador Asistente

NICARAGUA

Ing. Javier López Medina
Instituto Nacional de Recursos Naturales y
del Medio Ambiente (IRENA)
Responsable de Estudios Hidrológicos

PANAMA

Ing. Ramón Oscar Argote Ramos
Instituto de Recursos Hidráulicos y
Electrificación (IRHE)
Jefe Departamento de Energía y Tarifas

PERU

Ing. Emilio Javier Mayorga Navarro
Instituto de Investigación Tecnológica Industrial
y de Normas Técnicas (ITINTEC)
Jefe Area de Energía Eólica

REPUBLICA DOMINICANA

Ing. Alberto Llenas Morel
Comisión Nacional de Política Energética
Jefe Proyecto de Energía Eólica

VENEZUELA

Ing. Alberto Salima
Ministerio de Energía y Minas - Dirección de
Investigación y Desarrollo
Asesor en Asuntos Energéticos

OLADE

Ing. Luiz Augusto Marciano da Fonseca
Organización Latinoamericana de Energía
Jefe de Hidrocarburos y Eólica

Prospección, evaluación y caracterización de
la energía eólica/I Curso-seminario
Latinoamericano sobre Prospección,
Evaluación y Caracterización de la Energía
Eólica

333.92 C977p Ej.1

CATALOGADO POR: HELP FILE LTDA

FECHA PEDIDO	PRESTADO A	FECHA DEVUELTO
-----------------	------------	-------------------