

EO - 221

(3002)

O I A D F  
Organización Latinoamericana de Energía  
CENTRO DE INFORMACIÓN

**METODOLOGIA SINTETICA PARA LA EVALUACION  
DEL RECURSO ENERGETICO EOLICO**

ENERGIA EOLICA // METODOLOGIA // EVALUACION DE RECURSOS  
IDLPO.

# I N D I C E

	Pag.
INTRODUCCION GENERAL.....	7
Antecedentes.....	7
Posibilidades de Uso en América Latina.....	7
Papel de OLADE y seguimiento para el Desarrollo de su Uso en América Latina.....	8
1. CONSIDERACIONES TECNICO-ECONOMICAS PARA LA DEFINICION DEL RECURSO ENERGETICO EOLICO.....	11
1.1 Consideraciones Generales.....	11
1.2 Consideraciones Técnicas Respecto a la Conversión del Recurso.....	13
1.2.1 La Energía Eólica.....	13
1.2.2 Consideraciones Técnicas.....	15
1.2.3 Eficiencia de Conversión.....	16
2. LINEAMIENTOS GENERALES PARA LA EVALUACION DEL RECURSO.....	20
2.1 Etapas para la Evaluación.....	20
2.2 Actividades de Prospección, Evaluación y Caracterización de la Potencialidad Eólica....	22
2.2.1 Prospección Indirecta.....	23
2.2.2 Prospección Directa.....	24
2.3 Selección de Sitios Prioritarios.....	28
3. ORIENTACIONES METODOLOGICAS PARA LA PROSPECCION DIRECTA.....	34
3.1 Encuesta.....	34
3.2 Mediciones del Viento con la Escala de Beaufort.....	39
3.3 Mediciones In Situ.....	41
3.3.1 Selección de Sitios.....	41
3.3.2 Altura de Medición.....	42
3.3.3 Mediciones.....	43
3.3.4 Laboratorios Móviles para Climatología Eólica.....	44

	Pág.
4. EVALUACION DEL RECURSO ENERGETICO EOLICO.....	45
4.1 Consideraciones Generales.....	45
4.2 Determinación del Factor Específico de Conversión Eoloenergética.....	48
Apéndice I Instructivo para la Consignación de Información sobre Velocidad del Viento según la Escala de Beaufort.....	55
Apéndice II Instructivo para el Procesamiento de Datos de Velocidad de Viento, obteni dos según la Escala de Beaufort.....	63

**PROGRAMA REGIONAL DE ENERGIA EOLICA DE OLADE**

**METODOLOGIA SINTETICA PARA  
LA EVALUACION DEL RECURSO  
ENERGETICO EOLICO**

**1984**

## PROLOGO

La Organización Latinoamericana de Energía se complace en difundir la Metodología Sintética para la Evaluación del Recurso Energético Eólico, cuyo objetivo es orientar los trabajos de evaluación del recurso, en forma sistemática y priorizada, tanto por su potencial energético, así como por su posible impacto económico y social.

Con estos trabajos se da un nuevo avance en la evaluación eólica en América Latina, al empezar a integrar inventarios nacionales de sitios y zonas con potencial aprovechable.

El Atlas Eólico Preliminar de América Latina y El Caribe, compilado en la Secretaría Permanente y realizado con el apoyo y cooperación de los países de la Región, constituyó una primera iniciativa para dar una visión general de las posibilidades de este recurso en América Latina. Pasar de esta primera etapa, con un mayor significado cualitativo que cuantitativo, a una segunda de inventarios nacionales hasta los niveles de estudios de factibilidad y proyectos demostrativos, requiere de una amplia cooperación Latinoamericana. Es responsabilidad de OLADE promover esa cooperación y coordinar, de manera de utilizar la capacidad técnica de la región para llevar adelante con nuestros propios recursos esta tarea, la misma nos permite además, poder estar en condiciones de aprovechar exitosamente en proyectos demostrativos viables y reproducibles, los ofrecimientos de equipos y tecnología que en un marco de cooperación técnica, países de otras regiones y agencias internacionales brinden a OLADE

Con este documento se espera puedan agilizarse estas actividades y avanzarse, en la cuantificación y caracterización de este recurso energético.

Ulises Ramírez O.  
Secretario Ejecutivo

## INTRODUCCION GENERAL

### Antecedentes

El Programa Regional de Energía Eólica de OLADE, aprobado y en ejecución desde abril de 1980, en que formalmente se constituyó el Grupo Asesor de Energía Eólica de OLADE, contempla varias etapas en su desarrollo.

Las primeras dos tenían por objetivo el realizar un inventario y diagnóstico del estado de la tecnología de conversión de energía eólica en América Latina y la recabación de la información disponible en los Servicios Meteorológicos Nacionales, para confeccionar el Atlas Eólico Preliminar de América Latina y el Caribe.

Habiéndose cumplido esta fase, la etapa siguiente corresponde a una profundización en la evaluación del Potencial eólico en la Región, a través de un reconocimiento e inventarios de aquellas regiones de interés detectadas en cada país, que de acuerdo a las políticas energéticas propias, puedan ser llevados hasta estudios de factibilidad y proyectos de desarrollo.

### Posibilidades de uso en América Latina

América Latina y el Caribe tiene una extensión geográfica de 20.5 millones de km<sup>2</sup>, de los cuales el 40% corresponde a territorios con clima tropical húmedo, y el resto a territorios con una estación seca en que las actividades agrícolas requieren agua de riego. La extensión de la frontera agrícola de un país requiere entre otras cosas, de proporcionar agua de riego a las zonas no aprovechadas agrícolamente. El bombeo de agua, con energía eólica, para fines de riego tiene así una gran importancia.

La capacidad instalada de generación eléctrica en América Latina, es en la actualidad, del orden de cien mil MW. De estudios preliminares, se considera que: dependiendo de la climatología eólica (patrones diarios y turbulencia) así como disposición de la capacidad instalada, la penetración (% de capacidad eólica) en un sistema eléctrico, varía como máximo de un 10 a 20%, sin que introduzca problemas de estabilidad.

De estas cifras, se deduce que el mercado potencial actual es del orden de 10 a 20 mil MW. Dada la alta tasa de crecimiento histórico del Sector (del orden del 6 al 12%) es de esperarse un mercado creciente.

Si por cuanto al sector eléctrico se puede hablar de un rango de penetración del 10 al 20%, de capacidad instalada acoplada a la red; el porcentaje correspondiente a sistemas aislados híbridos, es decir, respaldados por otra fuente energética, requiere de una evaluación más detallada por país.

Por lo que respecta al sector agrícola, es de hacer notar que su participación en el consumo de energía, es un promedio de 3.5% de la energía comercial de un país, de la cual, los consumos in situ corresponden al 1%. Esta energía es la usada en la maquinaria agrícola y bombeo de agua. Aún cuando la participación de FNRE en general en el contexto general de un país represente una cifra marginal (< al 10%) de la oferta total de energía, dado su carácter distribuido y su incidencia básica en el sector agrícola y rural, tiene prácticamente la característica de una revolución tecnológica.

#### Papel de OLADE y seguimiento para el desarrollo de su uso en América Latina

A través de diseminación de información y asesoría a los organismos responsables del Sector Energético, es necesario desarrollar la capacidad de asimilación de este recurso energético, a través de fortalecer a las instituciones nacionales

involucradas tanto en investigación y desarrollo de estas tecnologías, así como aquellas instituciones avocadas a promover su utilización masiva.

Este fortalecimiento de sus propias infraestructuras de I y D como de diseminación de tecnologías, comprende básicamente el reforzamiento de los siguientes aspectos:

- i. Información básica Científico-Técnica
- ii. Capacitación y entrenamiento de recursos humanos
- iii. Equipamiento para I y D e instalación, operación y mantenimiento
- iv. Programa congruentes de desarrollo tecnológico y de diseminación de la tecnología
- v. Marco general de política energética, que dé el énfasis requerido para el desarrollo de cada recurso energético.

El Programa Regional de Energía Eólica de OLADE, fijó como actividades iniciales, la evaluación de este recurso en América Latina y el Caribe.

Las primeras actividades estuvieron enfocadas hacia:

1. Atlas Eólico preliminar de América Latina y el Caribe.  
Docto. D Place N° 8 Quito, 1983
2. Manual de Meteorología Eólica, que constituye una herramienta metodológica para las actividades de prospección, evaluación y caracterización energética de los sitios de interés, hasta llegar inclusive al diagnóstico de comportamiento y pronóstico de energía producida de equipos comerciales; y,
3. Guía de Diseño, habilitación y operación de estaciones móviles de Climatología Eólica que describe requerimientos, instrumentación y procedimientos para la realización de los estudios de campo.



Estos documentos culminan una primera parte del programa, y dan las bases metodológicas para iniciar una nueva etapa de trabajo de campo, orientada a la evaluación de este recurso, como energía aprovechable en aplicaciones aisladas, o como energía eléctrica aportada al sistema eléctrico, y evaluada en términos de reservas probadas, probables y posibles en GWh/año.

Esta guía metodológica está abocada a orientar los trabajos de prospección, caracterización y evaluación de sitios, con el objeto de integrar inventarios nacionales de sitios con potencial eólico que permitan evaluar este recurso en términos de reservas y permitir una planeación nacional para el desarrollo de este recurso energético.

El planteamiento metodológico aquí desarrollado orienta un proceso que se realiza por etapas, de costo y complejidad creciente, pero que al jerarquizar y priorizar, sitios y decisiones permitirá un óptimo aprovechamiento de los recursos disponibles.

Respecto de la evaluación de las dos fuentes de energía difusa: solar y eólica, se propagó el mito de que su evaluación correcta dependía de la instalación de extensas redes de medición con cobertura nacional.

Este planteamiento, verdadero a medias, desalentó las actividades de evaluación del recurso, al asociarsele un costo muy elevado, contra las expectativas marginales de producción de energía de estas fuentes.

La falacia de este planteamiento, alentado por aquellos interesados en la venta del equipamiento meteorológico, radica en que esa cobertura nacional sea simultánea, cuando el camino realista y viable, es efectuarse a través de un proceso, en etapas y selectivo en base a prioridades, que a fin de cuentas lleva a un estudio de cobertura nacional.

# 1 CONSIDERACIONES TECNICO-ECONOMICAS PARA LA DEFINICION DEL RECURSO ENERGETICO EOLICO

## 1.1 Consideraciones Generales

Basados en la energía cinética contenida en el viento, puede ser hecha la siguiente división, al igual que con todos los demás potenciales energéticos:

- Potencial de energía eólica técnicamente utilizable
- Potencial de energía eólica económicamente utilizable

La primera se refiere al grado de desarrollo de la tecnología de conversión energética, que en el caso de la eólica tiene básicamente la limitación teórica de la ecuación de Betz. Por cuanto al potencial económico, existen dos grandes aspectos:

1. El precio del equipamiento en \$/kW nominal a precios del distribuidor
2. Los costos de instalación del equipamiento, considerando desde la prospección de sitios, la evaluación y caracterización del recurso, el desarrollo de la infraestructura necesaria (caminos y ramales de distribución, etc.), transportación, seguros, montaje y pruebas. Todo lo cual conforma un costo por kW instalado, que determina la viabilidad económica del proyecto en términos de costo por kWh producido.

Tratándose de sistemas de riego o drenaje agrícola, la evaluación de costos se determinará en función de \$/m<sup>3</sup> bombeado.

La primera limitación, la de carácter técnico, se refiere a la imposibilidad teórica y práctica de recuperar toda la energía cinética de un flujo de viento. La segunda limitación, de carácter económico, se refiere al hecho de que para diferentes aplicaciones y/o diferentes sitios no toda la energía técnicamente aprovechable es económicamente viable.

Si bien este punto está influenciado fuertemente por los dos conceptos antes mencionados, la climatología eólica del sitio del posible aprovechamiento es determinante ya que ello limita la cantidad de energía producida en un período contra la capacidad instalada, es decir, un concepto equivalente al de Factor de Planta.

Conforme se va adquiriendo experiencia operativa de los SCEE, es posible ir estableciendo parámetros de confiabilidad, coeficientes de seguridad para el diseño de los diferentes elementos estructurales y mecánicos, mejoras a los diseños, etc. que permitan reducir costos por kW nominal, de manera paralela a la reducción de costos por procesos de fabricación en mayor escala.

## 1.2 Consideraciones Teóricas Respecto a la Conversión del Recurso

### 1.2.1 La Energía Eólica

Por energía eólica se entiende el contenido de energía cinética de las capas bajas de la atmósfera, debido a su desplazamiento horizontal, que se denomina viento.

Al registrar en forma continua la velocidad del viento con un instrumento de medición de este parámetro meteorológico, encontramos que corresponde a una serie de tiempo, con estas componentes:

1. Una componente estacional
2. Una componente de ciclo diario
3. Una componente de ruido (turbulencia)

El viento resulta pues, una variable aleatoria dentro del rango de su variabilidad estadística, propia en cada sitio o región dada la mecánica del viento específico de ese sitio o región.

Dado que las normas meteorológicas establecen la medición del viento a 10 m sobre el suelo, su caracterización energética se expresa en kWh/m<sup>2</sup> en una superficie virtual, con centro a 10 m del suelo y perpendicular al flujo, para cada mes, estación y año.

Esta evaluación energética puntual se realiza a partir de histogramas de velocidades para un período mensual, para el punto de medición. De esta manera, para todo el espectro de velocidades observadas, se tiene el dato de tiempo acumulado para cada intervalo de velocidad, así:

$$E/A = \frac{1}{2} \rho \sum_{i=0}^n V_i^3 t_i \text{ para un período } T = \sum_{i=0}^n t_i$$

por tanto  $\bar{P}/A = (E/A)/T \text{ (w/m}^2\text{)}$

El aprovechamiento óptimo de la energía eólica en un sitio, se da, cuando el equipo conversor diseñado para extraer energía dentro de un rango específico de velocidades del viento:  $V_i \leq v \leq V_s$  se acopla al rango de velocidades energéticas de ese sitio, como se ilustra en la figura 1.

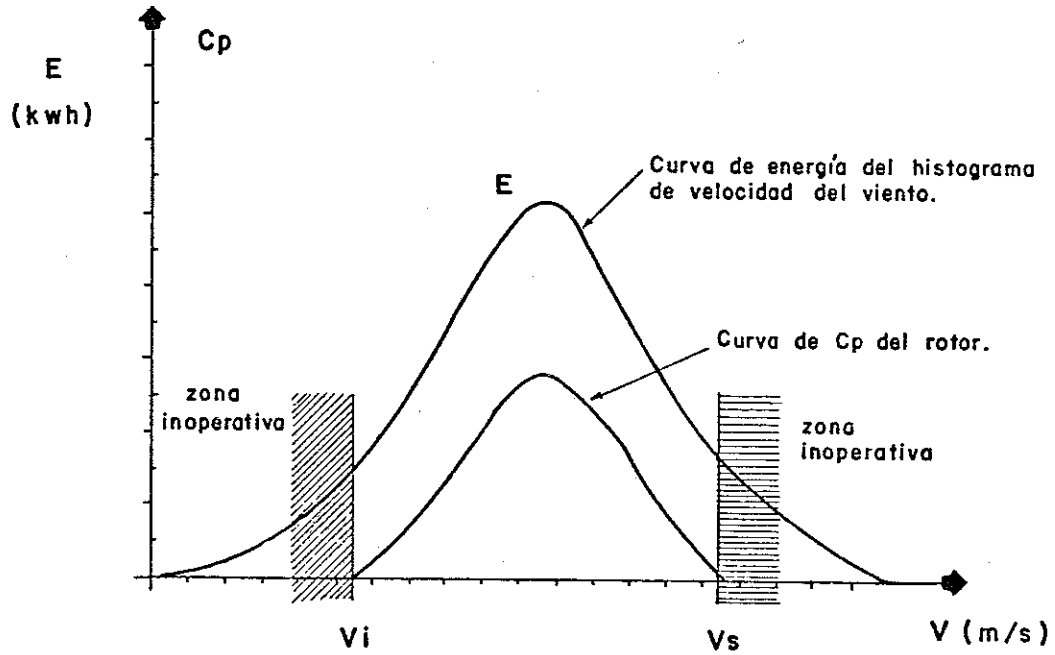


Figura Nº 1

Dado que el viento es consecuencia de la radiación solar y la diferencia de respuesta térmica de las superficies que la reciben, y esta es una constante sujeta a una variación estacional, aunque el viento se presenta como una variable "aleatoria" en su velocidad, su contenido energético es muy consistente y pronosticable.

Considerando esta consistencia energética, es posible la simulación matemática de los histogramas de velocidades, a través de la función de Densidad de Probabilidad de Weibull. Esta función definida por dos parámetros, uno de escala  $c$  (m/s) ligeramente mayor que la velocidad media  $\bar{V}$  del sitio, y un factor de forma  $k$  (adimensional) relativo a la dispersión del espectro de velocidades, puede ser establecida para un sitio, utilizando varios métodos de tratamiento de datos, o de mediciones cortas y poder así integrar histogramas teóricos, que permitan evaluaciones energéticas, con errores inferiores al 10%.

### 1.2.2 Consideraciones Técnicas

La conversión de la energía eólica a una forma útil como energía mecánica, térmica o eléctrica tiene básicamente tres limitaciones: La primera, es la imposibilidad de extraer toda su energía cinética ya que esto significaría detener el flujo; el análisis teórico de este problema lleva a un coeficiente óptimo de  $16/27$  o 59.3% de extracción de energía. La segunda limitación es que la máquina convertidora tiene un rango específico de velocidades de operaciones: una velocidad de arranque  $V_i$ , a menos de la cual el sistema no responde, una velocidad de salida de operación  $V_s$ , arriba de la cual el equipo no debe operar por razones de seguridad, dada la potencia en la flecha y las cargas axiales y centrífugas a que se sujeta el rotor. La tercera, se refiere a la eficiencia aerodinámica del rotor en el rango de velocidades de operación.

### 1.2.3 Eficiencia de Conversión

La energía cinética que el flujo de viento transfiere al rotor de un SCEE\*, es necesariamente una fracción de la que contiene puesto que recuperar teóricamente toda la energía, implicaría detener el flujo.

Si la potencia P contenida en un flujo libre de aire con velocidad v a través de una sección A es:

$$P = \frac{1}{2} \rho A v^3$$

Considerando la teoría de momento axial, la ecuación de Bernoulli y la primera ley de la termodinámica, Betz en 1926 llegó a establecer la siguiente relación:

$$\frac{P}{\frac{1}{2} \rho A v^3} = 4a (1-a)^2$$

Que determina la relación existente entre la potencia transferida P a un rotor de sección A, donde el coeficiente a definido como factor de interferencia axial, determina un máximo de potencia cuando  $a = \frac{1}{3}$ , así

$$\frac{P \text{ max}}{\frac{1}{2} \rho A v^3} = \frac{16}{27} = 0.593$$

Para un SCEE, la potencia transferida al rotor es:

$$P = \frac{1}{2} \rho A v^3 C_p$$

Donde  $C_p$ , denominado coeficiente de potencia será siempre inferior a 0.593, determinado como máximo teórico.

---

\* = SCEE - Sistema Conversor de Energía Eólica.

En condiciones reales, el  $C_p$  no es una constante sino una función  $C_p(V)$  para el rango de velocidades de viento, en que por especificaciones de diseño la máquina debe proporcionar potencia.

Esta función  $C_p(V)$  presenta un valor máximo que para rotores bien diseñados y construídos, es del orden del 0.45

Por otra parte, dadas las características espectrales de velocidades del viento en el sitio donde se instala el SCEE, se condiciona también la recuperación de energía, dependiendo de las frecuencias relativas de ciertas velocidades de viento y de la eficiencia con que se efectúa la conversión para cada una de ellas. De esta forma, para un SCEE y en un sitio dado; la potencia media  $\bar{P}$  recuperada en un período dado es:

$$\bar{P} = \frac{1}{2} \rho A \int_0^{\infty} P(V) C_p(V) V^3 dv \quad \delta$$

$$\bar{P} = \frac{1}{2} \rho A \bar{V}^3 \bar{C}_p$$

Donde  $P(V)$  es la función de densidad de probabilidad de Weibull que modela al histograma de velocidades de viento esperadas durante un período dado en un sitio determinado.

Este coeficiente de potencia  $\bar{C}_p$  puede ser expresado como un coeficiente de eficiencia media que define la fracción de energía aprovechable en un período, un sitio, un rango de velocidades y una máquina, que va del 0.20 a 0.35 para un equipo bien diseñado y buena adecuación al régimen de vientos donde está instalado. Esta adecuación se mide por el factor de generación específica dado por la relación:

$$FGE = \frac{(\text{kWh}) \text{ Producidos anualmente}}{\text{kW instalado}}$$

Que define la viabilidad económica en un sitio de un determinado Sistema Conversor de Energía Eólica (SCEE).



Esta cifra debe ser mayor de 1500 kWh/kW, y los costos asociados a cada tecnología de SCEE determina los umbrales de factibilidad económica de ellas mismas, de ahí la importancia de una adecuada selección del SCEE a utilizarse en cada sitio específico.

Los aprovechamientos puntuales de energía eólica, sea en forma de aerobombas aisladas o pequeños aerogeneradores para fines de señalización, telecomunicaciones, protección catódica de oleoductos y gasoductos, uso doméstico o fuerza motriz, etc; son importantes, no en términos de la energía aportada, sino en función de usos finales y de significar alternativas viables y económicas.

En términos de una aportación masiva de energía útil, a la red de energéticos de un país, es a través de su utilización en grandes conjuntos para suministrar energía eléctrica al Sistema Eléctrico; o en menor escala, para operaciones masivas de bombeo de agua con fines de irrigación o drenaje. De esta forma, la utilización de SCEE para generación eléctrica integrada, presenta otros aspectos de orden técnico y económico, que contribuyen a determinar la viabilidad técnico-económico de este recurso energético, de ellos los factores importantes son el uso del suelo, la existencia o no de caminos de acceso y de circuitos primarios de distribución eléctrica en la proximidad.

Resumiendo, en términos generales, el aprovechamiento de la energía eólica dado su carácter distribuido y su tecnología de conversión, tiene tres prioridades:

- 1ra. Sector Agrícola: Riego y Drenaje Agrícola por bombeo eólico.
- 2da. Sector Rural: Sistemas aislados respaldados por otra fuente de energía para comunidades y agro-industria.
- 3ra. Sector Eléctrico: Generación eléctrica alimentada al sistema.

Estas prioridades se derivan de constituir las aplicaciones más viables desde el punto de vista técnico-económico ya que también representan los mercados más amplios y que posibilitan la producción industrial en serie de este equipamiento y por tanto su reducción de costos.

La utilización de FNRE en la generación de electricidad en América Latina, presenta varios aspectos importantes referentes a:

1. Sustitución de hidrocarburos en generación de electricidad y posible ahorro de divisas.
2. Diversificación de fuentes primarias y uso de recursos naturales propios.
3. Una mayor aportación de recursos humanos, tecnológicos e industriales de la propia región.

El desarrollo de la energía eólica para fines de generación eléctrica en la región, significa una opción importante por varias razones:

1. La existencia de zonas de buen potencial eólico en la región.
2. La relativa dispersión de los circuitos primarios de distribución en áreas rurales y su posible efecto benéfico en la regulación de voltaje.
3. La aportación neta de energía y capacidad al sistema.
4. El ya indicado de una mayor contribución Nacional y Regional en el uso de esta tecnología.

## 2. Lineamientos Generales para la Evaluación del Recurso

### 2.1 Etapas para la Evaluación

La determinación del Potencial Eoloenergético de un país o una región, obedece a un proceso de compilación de información que se debe incrementar en términos cuantitativos y cualitativos.

Este proceso se desarrolla en varias etapas, que en general, las podemos enumerar de la siguiente forma:

- 1a. Atlas Eólico Preliminar, basado en la información eólica recabada por los Servicios Meteorológicos Nacionales.
- 2a. Catálogos preliminares de sitios, en base a un trabajo de exploración inicial fundamentado en topónimos, inspección visual de evidencia ecológica, encuestas y evaluaciones preliminares en escala de Beaufort.
- 3a. Catálogos de sitios con evaluación y caracterización preliminar del potencial energético eólico, derivados de períodos cortos de medición anemométrica con estaciones móviles.
- 4a. Inventario a nivel de estudios de prefactibilidad, que comprenden estudios topográficos y anemométricos, orientados a la estimación del potencial eoloenergético del sitio, en términos de capacidad instalable, energía y aportación de capacidad.
- 5a. Estudios de factibilidad, en que además se define equipamiento, su número, desarrollo de la infraestructura, costos de inversión y de energía producida, que permitan evaluar la viabilidad técnico-económica del proyecto.

De esta manera, a través de un trabajo de gabinete y campo, con profundización gradual y selectiva en base a prioridades, se van cubriendo cuatro etapas en la evaluación y desarrollo del recurso, a saber:

- I. Estimación
- II. Inventario
- III. Factibilidad
- IV. Desarrollo

En forma semejante a los recursos energéticos primarios convencionales, tratándose de la energía eólica es posible establecer valores de reservas posibles en base a la estimación, reservas probables con el inventario y reservas probadas en base a los estudios de factibilidad que han demostrado viabilidad económica.

## 2.2 Actividades de Prospección, evaluación y caracterización de la potencialidad eólica

Las actividades exploratorias del recurso energético eólico, se inician con los Atlas Eólicos preliminares derivados de la información recabada por los Servicios Meteorológicos Nacionales. Dado que la información sobre el viento así recopilada, proviene de una red anemométrica que no fue establecida con fines energéticos, la importancia de esta información es que establece un marco general que muestra las zonas de mayor interés así como proporcionar información específica de estacionalidad, rumbos dominantes, etc. que son de vital importancia al hacer mediciones in situ por períodos cortos, que pueden extrapolarse en el tiempo conociendo este comportamiento estacional, para hacer estimaciones en base estacional y anual.

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

### 2.2.1 Prospección Indirecta

La elaboración de catálogos preliminares de sitios con potencial eólico interesante, se inician con actividades de prospección indirecta, consistente básicamente en:

1. Análisis cartográfico de regiones donde se consigna la información existente del viento, de velocidades y rumbos, con el objetivo de discriminar inicialmente si esos vientos observados corresponden a características muy específicas del sitio o son representativas de una situación más general.
2. Esta información debe complementarse con una investigación de topónimos en la región, así como de una sencilla encuesta con personal de la empresa eléctrica y otras instituciones que realizan actividades de campo, que proporcionarán valiosa información sobre la existencia y localización de lugares ventosos.

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 las zonas rurales, puede ser una fuente de información de mucho valor.

A partir de este trabajo se deben confeccionar unos catálogos preliminares de sitios, sea porque se tienen referencias de ellos o del análisis cartográfico se dispone de

elementos para suponer la existencia de vientos significativos en otros. Bajo determinados criterios de priorización se selecciona un conjunto de sitios o zonas en los que se pasa a una segunda fase exploratoria, a través de un proceso de prospección directa.

### 2.2.2 Prospección directa

Esta actividad realizada directamente en el campo, a través de encuestas más amplias, con cuestionarios ad hoc, con inspección visual de los efectos ecológicos del viento, como son la deformación permanente de la vegetación, la erosión eólica y la orientación y movimiento de dunas, etc., permitirán depurar los catálogos iniciales, así como establecer un orden de importancia a los sitios, considerando la potencialidad eólica observada, la extensión del sitio y el nivel de desarrollo de cierta infraestructura.

#### 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.

#### Evidencia Ecológica

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.

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 éste 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.

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

- Cepillado
- Deformado
- Tendido o alfombrado

El primer efecto consiste en el simple roce del viento con la vegetación, vientos con velocidad media anual entre 2.7 y 4.5 m/s. El segundo consiste en la deformación con



tendencia al viento dominante entre 3.5 y 8.5 m/s, y por último el tendido que es básicamente una deformación extrema a solo una escasa distancia del suelo con 10 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 m/s en el páramo andino.

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.

Hasta este punto, se dispone ya de un catálogo preliminar de sitios con potencial eólico interesante a partir de un primer nivel de información pasándose a una tercera fase en que se inician las mediciones del viento propiamente.

#### Mediciones del Viento

La fase de mediciones en los sitios de interés, es la que representa los mayores costos, tanto por la inversión en instrumental y equipo, como por los viajes y horas-hombre involucrados en instalaciones, inspección, mantenimiento y recuperación de datos, como también por las horas-hombre y horas-computador para procesar los datos y evaluar la información resultante.

De esto se deriva la necesidad de establecer una estrategia para abordar esta fase, que minimize la inversión en equipos como en horas-hombre y se logre el óptimo aprovechamiento de los recursos disponibles.

Una primera etapa de mediciones, sin la necesidad de instrumentos se puede realizar por medio de la escala de Beaufort, utilizando los adecuados formatos de consignación de datos y procedimientos de análisis estadísticos, como se consigna en el Manual de Meteorología Eólica con observaciones hechas por los propios pobladores del lugar, previamente a la decisión de cuales lugares deberán ser medidos con equipos anemométricos.

La utilización de estaciones móviles, para la realización de estas primeras mediciones, constituye una opción ventajosa desde varios puntos de vista, tanto técnicas como económicas, al poder realizar mediciones simultáneas de varios parámetros meteorológicos, por tres o cuatro días los que al correlacionar entre si indican su nivel de representatividad en una escala de tiempo mayor.

Posteriormente, la instalación de estaciones básicas, que por un período de tres meses efectúan mediciones anemográficas, permitirán, junto con datos de observatorios o estaciones cercanas hacer la evaluación y caracterización energética preliminar del sitio de interés.

Disponiendo de esta evaluación y caracterización preliminar, en aquellos lugares de mayor interés, se procederá a un estudio topográfico con el objeto de definir la extensión del terreno potencialmente aprovechable eoloenergéticamente y traducir así la densidad de energía eólica en un potencial eoloenergético bruto de superficie PEEB en GWh/año para el sitio en cuestión.

### 2.3 Selección de Sitios Prioritarios

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 preguntas 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.

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.

Además de las velocidades medias, 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 éstos 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.

#### ETAPA 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

b) Mapas topográficos de la zona en estudio

ETAPA 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

ETAPA 3. Prospección del Recurso Eólico en un Area 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, ésto se hará con una red de anemómetros de relativo bajo costo.

ETAPA 4. Verificación de Area

Habiendo localizado los lugares de interés, se procederá a caracterizar el viento en ellos. 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.

#### ETAPA 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 permitirán 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.

#### ETAPA 6. Investigación sobre el Comportamiento y Eficiencia del SCEE.

Esta última etapa, está destinada a simular el comportamiento del 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.

De esta manera se dispondrá de inventarios a nivel de estudios de prefactibilidad de sitios con potencial eoloenergético, la tabla 1, ilustra una forma para la elaboración del inventario de sitios a nivel de estudios de prefactibilidad, que en su conjunto equivalen al inventario de reservas probables de energía eólica.

A partir de este nivel de información, se procederá a los estudios de factibilidad, que implican la determinación espacial del flujo de viento en el sitio, del gradiente vertical de velocidades, estudios de rugosidad y turbulencia, selección de sitios de instalación de SCEE, selección de equipos y pronóstico de su comportamiento, anteproyecto del conjunto y de obras civiles y eléctricas asociadas, así como el análisis técnico-económico que determine su viabilidad y poder pasar así a la etapa de desarrollo.

Esta última etapa, se inicia con los trabajos de ingeniería de detalle y culmina con las pruebas y puesta en operación del conjunto.

## CONCLUSION

De la metodología apuntada en términos muy generales, para la evaluación del recurso energético eólico, aún cuando los resultados cuantitativos preliminares, del inventario de sitios a nivel de prefactibilidad, puedan tener un nivel de confianza discutible, de alguna manera constituye una figura de mérito, para la selección de sitios y desarrollo de proyectos.

No es en el corto plazo cuando la energía eólica cumplirá un papel importante en el balance energético en las aportaciones de energía primaria a la generación eléctrica. Su importancia en el mediano plazo se deriva del efecto acumulativo de proyectos pequeños y medianos, que muy lejos de la espectacularidad de los grandes proyectos hidroeléctricos, geotérmicos o termoeléctricos, permiten el desarrollo de una capacidad instalada sin grandes endeudamientos, con períodos más cortos de recuperación, así como de concepción, proyecto, desarrollo y puesta en operación.

TABLA 1

POTENCIAL EOLOENERGETICO ESTIMADO, BASADO EN EL POTENCIAL BRUTO DE SUPERFICIE  
(GWh/año)

Provincia o Estado: \_\_\_\_\_

Municipio o Cantón	Lugar	Sup. utilizable ha	$\bar{v}$ m/s anual	VAR ( $\sigma^2$ ) A M B	$\bar{P}$ W/m <sup>2</sup>	E kWh/m <sup>2</sup>	Coef. Area util (m <sup>2</sup> /ha)	Potencial bruto de superficie (GWh/año)	Potencial eoloenergético estimado		
									Potencia instalable MW	Energía Media GWh/año	Aportación de capacidad MW
xxx	X	276	6.3	A	324	2838	90	70.5	5.75	17.625	1.15
	Y	45	5.2	A	203	1778	90	7.2	0.587	1.8	0.117
	Z	83	7.2	M	353	3092	140	35.9	2.928	8.975	0.585



### 3. ORIENTACIONES METODOLOGICAS PARA LA PROSPECCION DIRECTA

#### 3.1 Encuesta

La primera actividad de prospección directa que involucra un trabajo de campo, de recabación sistemática de información, es la encuesta.

Para esta actividad las preguntas que surgen de inmediato son:

¿Quién puede ser el encuestado?

¿Qué debe preguntar y observar en el sitio?

Para la primera pregunta, la respuesta es simple: es todo aquel personal de Instituciones Públicas o Gubernamentales que por sus actividades tienen acceso al medio rural, como por ejemplo, trabajadores de Empresas Públicas (Electricidad, Teléfonos); Extensionistas Gubernamentales (Agricultura, Salud) e incluso estudiantes en Servicio Social de Escuelas de Ingeniería.

Respecto a la segunda cuestión, sus preguntas y observaciones están avocadas a verificar la existencia de vientos intensos en el sitio, periodicidad estacional y diaria, la ocurrencia y frecuencia de las calmas, una estimación de su velocidad por la escala de Beaufort, así como establecer sus rumbos dominantes.

A continuación se muestra, un formato propuesto para la realización de la encuesta por personal entrenado en el manejo del cuestionario, la estimación de velocidad según escala de Beaufort e identificación de la evidencia ecológica (Manual de Meteorología Eólica, OLADE 1984).

PROSPECCION PRELIMINAR DE ENERGIA EOLICA

Encuesta sobre el viento local

1 de 3

Encuestador \_\_\_\_\_ Fecha \_\_\_\_\_

Lugar \_\_\_\_\_ ASNM \_\_\_\_\_

Municipio o Cantón \_\_\_\_\_ Provincia o Estado \_\_\_\_\_

Distancia aprox. a la Cabecera Municipal \_\_\_\_\_ km.

- Camino  Pavimentado \_\_\_\_\_ km (asfaltado)  
 Terracería \_\_\_\_\_ km (afirmado)  
 Brecha \_\_\_\_\_ km (trocha)

Indique con una x la respuesta, procurando contestar únicamente aquellas de las que se esté seguro, si hay más de una respuesta indíquelas todas. No es estrictamente necesario llenar el cuestionario.

Patrón Estacional

1. Meses con mayor intensidad de viento

\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

2. Meses con menor intensidad de viento

\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

3. Durante los meses con más viento el rumbo dominante la mayor parte del tiempo es:

Norte \_\_\_\_\_ Este \_\_\_\_\_ Sur \_\_\_\_\_ Oeste \_\_\_\_\_  
Cambia constantemente \_\_\_\_\_

4. Durante los meses con menor viento, viene del:

Norte \_\_\_\_\_ Este \_\_\_\_\_ Sur \_\_\_\_\_ Oeste \_\_\_\_\_  
Cambia constantemente \_\_\_\_\_

Lugar \_\_\_\_\_ Fecha \_\_\_\_\_

Patrón Diario

**Durante los meses ventosos**

5. Períodos del día en que hay viento

De madrugada \_\_\_\_\_

Por la mañana \_\_\_\_\_

A medio día \_\_\_\_\_

Por la tarde \_\_\_\_\_

Por la noche \_\_\_\_\_

6. Período del día en que es más fuerte

De madrugada \_\_\_\_\_

Por la mañana \_\_\_\_\_

A medio día \_\_\_\_\_

Por la tarde \_\_\_\_\_

Por la noche \_\_\_\_\_

Pueden ser a cualquier hora del día \_\_\_\_\_

7. Rumbos de donde provienen los vientos mas intensos

Norte \_\_\_\_\_ Este \_\_\_\_\_ Sur \_\_\_\_\_ Oeste \_\_\_\_\_

Cambia constantemente \_\_\_\_\_

8. Según la escala de Beaufort que magnitud se aplica a los vientos fuertes persistentes \_\_\_\_\_

9. Número de horas al día, estimadas con vientos intensos \_\_\_\_\_

Los períodos de calma corresponden a:

La madrugada \_\_\_\_\_

Por la mañana \_\_\_\_\_

A medio día \_\_\_\_\_

Por la tarde \_\_\_\_\_

Por la noche \_\_\_\_\_

No hay un período definido \_\_\_\_\_

Encuesta sobre viento local (Cont.)

Lugar \_\_\_\_\_ Fecha \_\_\_\_\_

Evidencia Ecológica

11. Presencia de evidencia ecológica. Si \_\_\_\_\_ No \_\_\_\_\_

Si la hay, indicar los efectos observados

Arboles con tronco inclinado \_\_\_\_\_

Arboles con follaje "cepillado" \_\_\_\_\_

Matorrales o árboles completamente deformados \_\_\_\_\_

Vegetación compuesta solamente por plantas y matorrales pequeños \_\_\_\_\_

Únicamente existe vegetación rastrera \_\_\_\_\_

Rumbo de vientos indicados por la deformación \_\_\_\_\_

12. Si existen vientos fuertes en lugares cercanos indique su nombre y haga una breve descripción de como llegar a ellos.

---

---

---

---

---

---

---

---

RESUMEN DE LA ENCUESTA

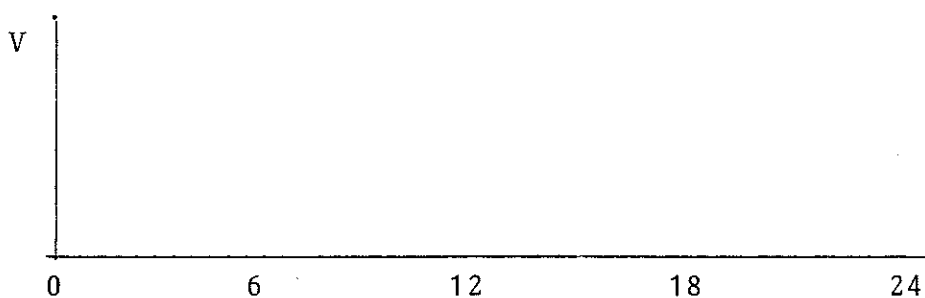
Lugar: \_\_\_\_\_

Número de encuestas realizadas: \_\_\_\_\_

Se detecta la existencia de un patrón de distribución diario

Si  No

Tipo de patrón diario detectado



Dirección dominante del viento: \_\_\_\_\_

Intensidad según la escala de Beaufort que se considera alcanzan los vientos fuertes \_\_\_\_\_

Horas al día de viento \_\_\_\_\_

Se detectó estacionalidad referida a la magnitud del viento

Si  No

Tipo de patrón estacional detectado



### 3.2 Mediciones del viento con la Escala de Beaufort

Cuando los árboles, el humo, banderines, etc., están sujetos a la acción del viento, dependiendo de la intensidad de éste, son los efectos observados; así por ejemplo, el humo se levanta verticalmente en condiciones de calma, en tanto que en condiciones ventosas, puede llegar a desplazarse horizontalmente desde la boca de una chimenea o la fogata que lo produce. En los árboles, una brisa leve agita apenas las hojas y las pequeñas ramitas, en tanto que un viento intenso lo hace mecerse completamente.

La escala de Beaufort consiste en una clasificación de los efectos visibles del viento, según rangos de velocidades del viento. En base a esta escala es posible, sin requerir ningún tipo de instrumento, sino únicamente observaciones del entorno, efectuar estimaciones del rango de velocidad del viento, y realizando periódicamente estas observaciones a lo largo del día, a horas fijas, y durante varias semanas, se dispondrá de suficientes datos para ser procesados estadísticamente y, obtener así, una velocidad media del viento para el período de observaciones, con una buena aproximación al dato que pudo haberse obtenido, si se dispusiera de un instrumento de medición del viento; un anemógrafo.

Las observaciones en Escala de Beaufort, constituyen un siguiente paso en la depuración de los Catálogos de Sitios con potencial eólico interesante.

De una selección de los sitios ventosos, catalogados a través de la encuesta, se determinan aquellos a evaluar con un nivel mayor de confiabilidad en la información, sujetándolos a una estimación preliminar de sus velocidades de viento, utilizando las estimaciones sistemáticas por escala de Beaufort.

Estas observaciones periódicas, sistemáticas, en los sitios de interés seleccionadas, debe efectuarlas personal entrenado y cuyas actividades le permiten seguir, más o menos con constancia, un horario establecido de observaciones y un número fijo de estas por día.

Maestros rurales, sacerdotes, extensionistas agrícolas, vigilantes en instalaciones públicas: Graneros, subestaciones Eléctricas, presas, observatorios forestales, estaciones de aforo fluvial, etc. pueden desempeñar satisfactoriamente esta tarea, con el adecuado entrenamiento para su realización.

En el Apéndice I, se incluyen el Instructivo y formatos para las estimaciones en base a la escala de Beaufort, así como el instructivo y formatos para el procesamiento de los datos.

### 3.3 Mediciones In Situ

#### 3.3.1 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 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



oceáno. Las brisas de valles y montañas son causadas por los mismos efectos locales y en un día tibio y soleado, los vientos pueden destacarse fuertemente del fondo del 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 del 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.

### 3.3.2 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 no sólo 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 turbulencias 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.

### 3.3.3 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-adómetro) 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 factible 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.

#### 3.3.4 Laboratorios móviles para climatología Eólica

En las secciones anteriores se han mencionado algunos lineamientos generales para la medición anemométrico del viento, sin embargo, la problemática específica de efectuar mediciones en lugares aislados, carentes de energía y en ocasiones de las mínimas condiciones de resguardo y aprovisionamiento de satisfactores indispensables, han determinado la necesidad de habilitar estaciones meteorológicas móviles, que además de proporcionar el equipamiento requerido para todas las mediciones a efectuar, provee de la movilidad necesaria y además cobijo y resguardo al personal que se desplaza a lugares apartados, llevando también provisiones y utensilios para la preparación de alimentos y equipo para pernoctar en el sitio.

La Guía de Diseño, Habilitación y Operación de Laboratorios Móviles para Climatología Eólica, OLADE, 1984; proporciona las orientaciones metodológicas para su diseño conceptual, construcción, operaciones de campo y proceso de datos, describiéndose en detalle los procedimientos y tipo de Instrumentación requerida.

Como complemento a la Guía mencionada, el Manual de Meteorología Eólica, OLADE, 1984; que contiene en detalle todos los aspectos relativos a la prospección, caracterización y evaluación energética del viento, constituye el manual metodológico para el personal involucrado en estas actividades.

#### 4. EVALUACION DEL RECURSO ENERGETICO EOLICO

COLECCIÓN  
de Informes de  
INFORMACIÓN

##### 4.1 Consideraciones Generales

Evaluar el recurso energético eólico de un país o de una región, tiene similitudes metodológicas, con la evaluación del potencial hidroeléctrico. En este caso la magnitud y topografía de una cuenca, así como el régimen pluvial imperante, determina las disponibilidades de agua, que permiten estimar, dada la particular topografía del cauce en estudio, la capacidad instalable y la energía producida.

Tratándose de la energía eólica hay un proceso similar, en el que ubicada una área con buenas condiciones de exposición al viento, donde el potencial eólico en  $W/m^2$  y  $kWh/m^2$  es interesante, se estima también la capacidad instalable y la energía producida.

Un valle, una loma perpendicular a vientos prevaletientes, un paso ó una meseta, ahí donde la topografía encajona y acelera al viento, equivale al punto en el cauce de un río, donde el desnivel es propicio para aprovechar esa corriente.

La extensión del área útil para el aprovechamiento del viento, lo que determina la cantidad de SCEE que pueden ser ubicados ahí, determina el flujo o "gasto" aprovechable, en función del área total, representada por la suma de las áreas barridas por todos los rotores de los SCEE, potencialmente instalables.

De esta manera es posible estimar, para una zona y sitio en particular, en base a la evaluación y caracterización de su potencial eólico y del número de SCEE que es posible instalar ahí, la capacidad instalable en MW y su aportación de energía firme y media.

Esta aportación energética está determinada tanto por la climatología eólica del sitio en cuestión, así como por las

características operacionales del SCEE, que deben significar un buen acoplamiento a esas características eólicas del sitio.

Un determinado SCEE no constituye por si mismo una buena o mala elección, no son sus características nominales o el prestigio del fabricante, lo que determina una buena elección. Haciendo renglón aparte de las características deseables de confiabilidad y calidad del equipo; es la producción de energía por kW instalado el factor principal en la decisión y esto depende del acoplamiento entre las características operacionales del SCEE y la climatología eólica del sitio.

Afortunadamente es sencillo simular el comportamiento de un SCEE bajo distintas condiciones de viento, en base a los histogramas de velocidades observadas y su representación matemática con la distribución de densidad de probabilidad de Weibull correspondiente.

El Manual de Meteorología Eólica, OLADE, 1984, presenta la metodología específica para esta evaluación técnico-económica de SCEE, en diferentes condiciones de climatología eólica.

A continuación se muestra una tabla, que ejemplifica la forma en que se va integrando el inventario nacional de sitios con potencial eólico interesante y aprovechable, evaluando de esta manera este recurso energético en términos de energía media aportada al sistema eléctrico aislado o interconectado, o de energía hidráulica aportada a un sistema de riego o drenaje agrícola, bombeo de agua potable, ó rebombeo en pequeñas centrales hidroeléctricas.

La siguiente sección, analiza en detalle la metodología propuesta para evaluación del recurso, al combinar las características eólicas del sitio, con su extensión, características topográficas y de uso del suelo, que permitan determinar la capacidad instalable, en términos del número y características de SCEE que es factible instalar.

La energía eólica puede ser en el largo plazo, y a través de un proceso de agregación paulatina, un aporte importante del balance de energía primaria para generación eléctrica. El iniciar estos estudios ahora construyendo la infraestructura para afrontar este reto, es una tarea vital para diversificación en el aprovechamiento de fuentes de energía primaria.

#### 4.2 Determinación del factor específico de superficie de conversión eoloenergética

Los estudios anemométricos de los sitios de interés, nos llevan a establecer la evaluación preliminar y caracterización energética del sitio, en términos de:

1. Velocidades medias, factores de escala y forma de la distribución de densidad de probabilidad de Weibull calculada, y calificación de varianza de la distribución observada.
2. Potencia media por unidad de area, o densidad de potencia media, expresada en  $W/m^2$ , en un plano vertical a 10m de altura sobre el suelo, en base mensual, estacional y anual.
3. Energía por unidad de area, o densidad de energía, en  $kWh/m^2$ , en un plano vertical a 10m de altura sobre el suelo, en base mensual, estacional y anual.
4. Patrones de distribución de velocidades diario, la frecuencia de rumbos y ocurrencia de calmas, en base mensual.

Esta evaluación y caracterización energética del viento en el sitio de interés, permite, considerando el tipo de aplicación, las características técnicas del posible equipamiento a utilizar y el número de éstos a instalar, traducir la potencialidad del viento en ese sitio en un potencial de aprovechamiento eoloenergético del sitio, expresado en una estimación de potencial eoloenergético bruto de superficie en GWh/año para ese lugar y sus correspondientes capacidad instalable en MW, energía en GWh/año y aportación de capacidad en MW.

La metodología para convertir la potencialidad energética del viento en potencial eoloenergético bruto de superficie,

PEEB, para un sitio determinado, se enfoca en determinar una sección teórica acumulada en el plano vertical en  $m^2$ , que define un área útil de aprovechamiento del viento, para una extensión de terreno dada, donde se ha identificado la posible instalación de un conjunto de SCEE. Esto permite traducir la densidad de Energía en  $kWh/m^2$  año en energía media aprovechable para el sitio en  $GWh/año$ .

Para un sitio de aprovechamiento potencial, existe un área, definida como superficie,  $S$ , dada en hectáreas, dentro de la cual es posible ubicar una cantidad  $n$  de SCEE. Este conjunto de  $n$  sistemas, tiene una distribución espacial cuya topología obedece a varios factores.

El principal de ellos es la existencia o no de rumbos dominantes. Los otros aspectos a considerar son la topografía y la rugosidad del terreno, así como la localización de la infraestructura existente o prevista de caminos de acceso, subestaciones eléctricas, ramal de enlace, edificaciones, etc.

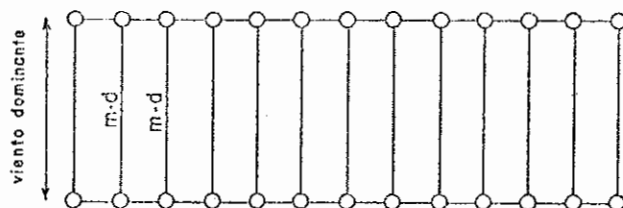
Una cuestión de fundamental importancia, es la separación entre sistemas, considerando la estela de perturbación del flujo de viento, que como "sombra" se proyecta a sotavento del equipo, de tal suerte que si otro sistema está localizado "atras", al alcanzarlo el viento, la perturbación residual sea despreciable y no demerite la energía aprovechada.

Esta separación se establece en múltiplos del diámetro del rotor. De estudios de campo como en túnel de viento, las separaciones recomendables van de 8 a 12 veces el diámetro, dependiendo de topografía y rugosidad, así como del grado de turbulencia ya existente en el flujo de viento libre.

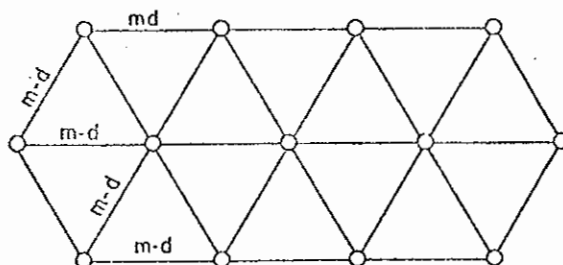
En condiciones ideales podemos considerar básicamente dos esquemas: para viento dominante bien definido, una distribución "lineal" en un eje perpendicular al viento, como



se muestra en la Fig. 2 (a). Donde no existe un rumbo dominante, una distribución "Romboidal" a base de triángulos equiláteros, como se muestra en la Fig. 2(b)



2 (a) Distribución Lineal "L"



2 (b) Distribución Romboidal "R"

Fig. 2

Para fines de estimación del recurso, considerando el peor de los casos, asumimos una distribución romboidal. En esta distribución espacial de SCEE, la superficie S que ocupa un conjunto de n sistemas es:

$$S(n, md) = n (md)^2 \frac{\sqrt{3}}{2} \quad \text{--- (m}^2\text{) --- (1)}$$

Si el area A circunscrita por un rotor de diámetro d está dada por:

$$A = \frac{\pi d^2}{4}$$

el area equivalente de aprovechamiento de viento  $A_{ut}$  para un conjunto de n rotores es:

$$A_{ut} = nA = n \frac{\pi d^2}{4}$$

La relación  $S/A_{ut}$  es por tanto:

$$\frac{S}{A_{ut}} = \frac{n \frac{(\pi d)^2}{4}}{n \frac{\pi d^2}{4}} = \frac{2 \sqrt{3} \pi m^2}{\pi}$$

de donde resulta que:

$$A_{ut} = \frac{\pi S}{2 \sqrt{3} \pi m^2} = C_A S \text{ ----- (2)}$$

Donde  $C_A$  factor específico de area de conversión eólica, igual a  $\pi/(2\sqrt{3} \pi m^2)$  está determinado únicamente por el múltiplo de separación en diámetros de rotor m.

Si la superficie utilizable S está expresada en hectáreas, los valores que adquiere  $C_A$  son aproximadamente.

$$140 \text{ m}^2/\text{ha} \quad \text{para } m = 8$$

$$90 \text{ m}^2/\text{ha} \quad \text{para } m = 10$$

$$63 \text{ m}^2/\text{ha} \quad \text{para } m = 12$$

Es a partir de estos factores específicos de area de conversión eólica, como la potencialidad del viento en un sitio de interés, expresado como densidad de potencia media en  $W/m^2$

y densidad de energía en kWh/m<sup>2</sup> para un período anual, se convierte en potencial energético eólico bruto de superficie, dado en GWh/año para el sitio en cuestión.

Para ejemplificar el procedimiento, consideremos el caso de la zona de "La Ventosa", Oax. en México. La región sur del Istmo de Tehuantepec en México, está sujeto a un viento de superficie de tipo monzónico, determinado por la diferencia de temperaturas entre el Golfo de México al norte y el Océano Pacífico al sur. El viento predominante sopla en dirección norte-sur, siendo viento del norte el 85% del tiempo, alcanzando las intensidades mayores en invierno.

Este viento de varianza media, con una velocidad media anual del orden de 6.5 m/s, presenta una densidad de energía del orden de 2,400 kWh/m<sup>2</sup>-año. La extensión de superficie sujeta a este régimen de vientos, se ha estimado inicialmente, de un reconocimiento cartográfico así como de exploración en la zona, en aproximadamente 1500 km<sup>2</sup>, o sean 150,000 hectáreas. Considerando la presencia de una dirección dominante asumiendo un  $C_A = 140 \text{ m}^2/\text{ha}$ , tenemos que el potencial eoloenergético bruto de superficie en la zona de La Ventosa es:

$$\text{PEBB} = 150,000 \times 140 \times 2.4 \times 10^6 = 50.589 \text{ TWh/año}$$

Obviamente todo este potencial no es aprovechable, por la presencia de asentamientos humanos, campos de cultivo, vías de comunicación, etc. Si del análisis detallado de uso potencial del suelo, el 20% de esa superficie fuera posible aprovechar para la instalación de conjuntos de aerogeneradores, el potencial eoloenergético bruto de superficie aprovechable sería:

$$\text{PEBB} = 30,000 \times 140 \times 2.4 \times 10^6 = 10.117 \text{ TWh/año}$$

Del que si consideramos una eficiencia global de conversión del conjunto de 20%, representa una aportación neta

anual de energía de 2.023 TWh/año equivalente a una capacidad instalada de 577.5 MW operando con un factor de planta de 40%

En resumen, las actividades de exploración del recurso energético eólico, a través de prospección indirecta y directa, de mediciones para su evaluación y caracterización, así como de la determinación de superficies utilizables para la instalación de conjuntos, van conformando los estudios que determinan las reservas posibles, probables y probadas del recurso energético eólico para fines de generación eléctrica.

APENDICE I

INSTRUCTIVO PARA LA CONSIGNACION DE INFORMACION SOBRE  
VELOCIDAD DEL VIENTO SEGUN LA ESCALA DE BEAUFORT

INSTRUCTIVO PARA LA CONSIGNACION DE INFORMACION SOBRE VELOCIDAD  
DEL VIENTO SEGUN LA ESCALA DE BEAUFORT\*

Introducción

El aprovechar la energía del viento para bombear agua, generar electricidad o proporcionar energía mecánica a diversas aplicaciones, requiere evaluar en principio, si en el lugar donde queremos utilizar al viento, este será en verdad útil. Para hacer esta determinación requerimos conocer primero:

- a). Si el viento sopla con la suficiente intensidad, para ser económicamente útil.
- b). Como se distribuye la velocidad del viento durante el día, los meses y el año.
- c). Cuáles son las duraciones probables de los vientos fuertes, su periodicidad, así como de los períodos de calma.
- d). La naturaleza de los vientos dominantes.

Ya que la fuerza del viento depende de su velocidad, según la aplicación a estudiar, solo son útiles aquellos que sobrepasan un determinado valor. De estos vientos nos interesa saber el promedio de tiempo que soplan al día. Nos interesa saber además como varían estos promedios a lo largo de las estaciones del año.

Esto nos permitirá saber, probabilísticamente, cuanta energía es posible aprovechar del viento, durante cada mes o todo el año. Si lo que pretendemos es bombear agua, este dato lo podemos convertir a metros cúbicos por día, mes o año. Si pretendemos generar electricidad, lo sabremos en kWh/mes o año.

\*Elaborado por el Dpto. Fuentes No Convencionales, División Fuentes de Energía Instituto de Investigaciones Eléctricas, México, 1981.

## Indicadores de Velocidad y Rumbo

La forma de "Registro semanal de velocidades de viento", consta de 7 grandes renglones, uno para cada día de la semana, los que contienen a su vez 18 columnas, una para cada hora, de las 5 de la mañana hasta las 10 de la noche (22 horas). 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 cms. de largo, en el extremo superior de un palo, el que se colocará en una posición alta (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. La Tabla II muestra las letras a utilizar para indicar el rumbo de DONDE sopla el 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.

Dependiendo de la importancia económica, es decir de su magnitud, así como de la complejidad tecnológica del posible aprovechamiento del viento en un lugar, es el grado de precisión con que se mide el viento y se caracteriza su comportamiento. Esta caracterización del viento es también un proceso de varias etapas, ascendente en complejidad e instrumentación.

El objeto de este instructivo es ilustrar el procedimiento visual para una cuantificación preliminar del viento, que constituye el primer paso para el proceso de caracterización.

### Características del Viento

El viento se define como la componente horizontal del movimiento del aire atmosférico, y se expresa por su velocidad y su rumbo. La velocidad se mide en m/s, km/hr, milla/hora o nudos. El rumbo es la dirección, según la rosa de los vientos, de donde sopla el viento.

Ya que la velocidad del viento no es constante, y puede no ser uniforme su dirección durante el día, la velocidad de este se indica como promedio y el rumbo como el dominante para ese lugar.

La velocidad del viento no solo es fluctuante, presenta rachas fuertes y luego lapsos de viento suave o calmas; también puede ser que existan algunas horas del día, en que -en general- sopla más fuerte, así como otras en que predomine la calma. Esto nos dice como se distribuye el viento durante el día.

Una forma sencilla de cuantificación preliminar del viento, es observando el efecto de este sobre la vegetación, la superficie del agua en lagos y océanos, las olas, el humo, banderas, etc. El siglo pasado, el almirante Beaufort de la Armada Inglesa, estableció una escala -que lleva su nombre- para dar un valor cuantitativo a la velocidad del viento, según sus efectos. Analice la Tabla I que se adjunta, para que se familiarice con ella.



A continuación se ilustra, como queda el registro al tener anotadas las observaciones.

"Registro Semanal de Velocidad del Viento según la Escala de  
BEAUFORT "

Lugar: San Juan Formuló: J López

Domingo 14 de Agosto al Sábado 20 de Agosto de 19 83

DIA	ESCALA	HORA DEL DIA																	
		5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
DOMINGO	7																		
	6																		
	5													E	E				
	4												E			E			
	3										E	E					E		
	2									E	E							E	
	1				N		N	E											
	0																		--
LUNES	7																		
	6														E				
	5													E		E			
	4												E				E		
	3										E	E						E	
	2									E	E								
	1				E		NE											E	
	0			-		-													-
7																			
6																			
5																			

Recomendaciones Finales

Si bien, están indicadas 18 columnas para lecturas horarias, no es indispensable que se tomen todas estas lecturas, lo que se recomienda es que quien va a indicar las observaciones, establezca el horario que se adapte a sus actividades y procure respetarlo. Es preferible 5 ó 6 lecturas diarias a la misma hora, que mayor cantidad de lecturas diarias, a horas diferentes de un día para otro.

Para aquellos días, en que los vientos fuesen tan fuertes que el número 7 sea insuficiente, se anotará junto a las siglas del rumbo el número correspondiente. Por último, no olvide indicar claramente el lugar, señalando municipio y estado; quien formula y las fechas de la semana a que corresponden las observaciones.

ESCALA BEAUFORT

No. Beaufort	Nombre en tierra	Equivalencia de la vel. a una altura de 10 m. sobre un terreno plano y descubierto				Características para la estimación en tierra	Altura de las olas del mar  (m)	Nombres en mar
		Nudos	m/s	km/h	M.P.H.			
0	Calma	0.1	0-0.2	1	1	El humo se eleva verticalmente	0	Calma
1	Ventolina	1-3	0.3-1.5	1-5	1-3	El se revela por el movimiento del humo, pero no por las veletas.	0-0.1	Rizada
2	Flojito	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.	0.1-0.5	Marejadilla
3	Flojo	7-10	3.4-5.4	12-19	8-12	Hojas y ramitas agitadas constantemente, el viento despliega las banderolas.	0.5-1.0	Marejada
4	Bonancible	11-16	5.5-7.9	20-28	13-18	El viento levanta polvo y hojitas de papel, ramitas agitadas.	1.0-1.25	Marejada
5	Fresquito	17-21	8-10.7	29-38	19-24	Los arbustos con hojas se balancean se forman olitas con crestas en los estanques.	1.25-2.5	Marejada fuerte
6	Fresco	22-27	10.8-13.8	39-49	25-31	Las grandes ramas se agitan, los hilos telegráficos silban, el uso de paraguas se hace difícil.	2.5-4.0	Mar Gruesa
7	Frescachón	28-33	13.9-17.1	50-61	32-38	Los árboles enteros se agitan, la marcha en contra del viento es penosa.	4.5-5.0	Mar muy gruesa
8	Duro	34-40	17.2-20.7	62-74	39-46	El viento rompe las ramas, es imposible la marcha contra el viento.	5.7-7.5	
9	Muy duro	41-47	20.8-24.4	75-88	47-54	El viento ocasiona ligeros daños en las viviendas (arranca cañerías, chimeneas y tejados)	7.6-10.0	Arbolada
10	Temporal	48-55	24.5-28.4	89-102	55-63	Raro en los continentes, árboles arrancados importantes daños en las viviendas.	10.0-12.5	Montañosa
12	Huracán	63	32.7	118	73		14.0	De enorme peligro

**"Registro Semanal de Velocidad del Viento según la Escala de  
BEAUFORT "**

Lugar: \_\_\_\_\_ Formuló: \_\_\_\_\_  
 Domingo \_\_\_\_\_ de \_\_\_\_\_ al Sábado \_\_\_\_\_ de \_\_\_\_\_ de 19 \_\_\_\_\_

DIA	ESCALA	HORA DEL DIA																					
		5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22				
DOMINGO	7																						
	6																						
	5																						
	4																						
	3																						
	2																						
	1																						
	0																						
LUNES	7																						
	6																						
	5																						
	4																						
	3																						
	2																						
	1																						
	0																						
MARTES	7																						
	6																						
	5																						
	4																						
	3																						
	2																						
	1																						
	0																						
MIERCOLES	7																						
	6																						
	5																						
	4																						
	3																						
	2																						
	1																						
	0																						
JUEVES	7																						
	6																						
	5																						
	4																						
	3																						
	2																						
	1																						
	0																						
VIERNES	7																						
	6																						
	5																						
	4																						
	3																						
	2																						
	1																						
	0																						
SABADO	7																						
	6																						
	5																						
	4																						
	3																						
	2																						
	1																						
	0																						

T A B L A I I

CODIFICACION PARA LA DIRECCION DEL VIENTO

LETRAS DE REGISTRO	DIRECCION QUE SEÑALA LA CINTA DE TELA
N	Norte
NE	Entre Norte y Este
E	Este
SE	Entre Sur y Este
S	Sur
SO	Entre Sur y Oeste
O	Oeste
NO	Entre Norte y Oeste

APENDICE . II

INSTRUCTIVO PARA EL PROCESAMIENTO DE DATOS DE VELOCIDAD  
DE VIENTO, OBTENIDOS SEGUN ESCALA DE BEAUFORT

INSTRUCTIVO PARA EL PROCESAMIENTO DE DATOS DE VELOCIDAD  
DE VIENTO, OBTENIDOS SEGUN ESCALA DE BEAUFORT

La forma "Procesamiento cálculo  $\bar{V}$  según escala de Beaufort", presenta secuencialmente el cálculo de  $\bar{V}$  y  $\sigma$  para un período dado.

El procesamiento se ejemplifica con una hoja de "Registro semanal de velocidad del viento según la escala de Beaufort", en la que han sido indicadas las observaciones, en la que incluso durante un día, no se efectuó observación alguna.

Como se observa en dicha hoja, queda indicada el patrón diario de velocidad del viento. Contando la ocurrencia, o número de veces que aparece cada rango de velocidad, se procede al cálculo de  $\bar{V}$  y  $\sigma$ .

La secuencia de operaciones numéricas está dada por los incisos a) hasta el i). El inciso e) corresponde a la determinación de  $\bar{V}$  y el i) a la de  $\sigma$ .

Finalmente utilizando el valor medio en m/s para cada rango de Beaufort, éste se traduce a velocidad en m/s.

Ejemplo.- La velocidad  $\bar{V}$  obtenida por escala de Beaufort es 1.918 ¿a qué valor corresponde en m/s?

Solución.- El rango 2 de Beaufort, denominado "Flojito" va de 1.6 a 3.3 m/s. Su valor medio es  $(1.6+3.3)/2=2.45$  por tanto; si 2 es a 2.45 m/s

$$1.918 \text{ es a } x; \text{ en donde: } x = \frac{1.918 \times 2.45}{2} = 2.349 \text{ m/s}$$

$$\text{Res. } \bar{V} = 2.349 \text{ m/s}$$

La hoja para el procesamiento de los datos de rumbo se explica por si sola. El ejemplo siguiente muestra el resultado final.

PROCEDIMIENTO CALCULO  $\bar{V}$  SEGUN ESCALA DE BEAUFORT

LUGAR \_\_\_\_\_ FORMULO \_\_\_\_\_  
 PERIODO: DOMINGO \_\_\_\_\_ DE \_\_\_\_\_ AL SABADO \_\_\_\_\_ DE \_\_\_\_\_

VELOCIDAD (BEAUFORT)	CONTEO	FRECUENCIA $n_i$	DESVIACION $d_i$	$n_i d_i$	$n_i d_i^2$
7					
6					
5					
4					
3					
2					
1					
0					
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)  $\bar{V} = M.S. + \frac{\sum n_i d_i}{N} = 4 + \frac{\quad}{\quad} = \quad$

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

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

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

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

RESUMEN EN:  $\bar{V} =$  \_\_\_\_\_ BEAUFORT  
 $\sigma =$  \_\_\_\_\_

"Registro Semanal de Velocidad del Viento según la Escala de  
BEAUFORT

Lugar: San Juan Formuló: J Lopez

Domingo 6 de Mayo al Sábado 12 de Mayo de 1989

DIA	ESCALA	HORA DEL DIA																							
		5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22						
DOMINGO	7																								
	6														E										
	5												E												
	4										E														
	3									E											E				
	2								E																
	1				N																				
	0		-																					-	
LUNES	7																								
	6																								
	5												E		E										
	4										E		E								E				
	3								E																
	2																								
	1				E																		NE		
	0		-																						
MARTES	7	<i>No se tomaron datos</i>																							
	6																								
	5																								
	4																								
	3																								
	2																								
	1																								
	0																								
MIERCOLES	7																								
	6											E		E											
	5														E										
	4										E														
	3								E												E				
	2																								
	1				NE																		E		
	0		-																						
JUEVES	7																								
	6														E										
	5																E								
	4											E		E											
	3																					E			
	2									E															
	1				N																				
	0		-																				-		
VIERNES	7																								
	6													E		E		E							
	5																								
	4																					E			
	3									E															
	2																								
	1				E																		E		
	0		-																						
SABADO	7																								
	6														E										
	5																				E		E		
	4												E		E										
	3									E															
	2																								
	1				E																				
	0		-																				-		



PROCEDIMIENTO CALCULO  $\bar{V}$  SEGUN ESCALA DE BEAUFORT

LUGAR San Juan FORMULO J. López  
 PERIODO: DOMINGO 6 DE Mayo AL SABADO 12 DE Mayo 1984

VELOCIDAD (BEAUFORT)	CONTEO	FRECUENCIA $n_i$	DESVIACION $d_i$	$n_i d_i$	$n_i d_i^2$
7		—	—	—	—
6	/// III	8	+2	+16	32
5	/// II	7	+1	7	7
4	/// III I	11	0	0	0
3	/// III	8	-1	-8	8
2	///	2	-2	-4	8
1	/// IIII	9	-3	-27	81
0	/// IIII	9	-4	-36	144
TOTALES:		54		-52	280

a) Número de casos  $N = 54$

b) Media supuesta M.S. = 4

c)  $\sum n_i d_i = -52$

d)  $\frac{\sum n_i d_i}{N} = \frac{-52}{54} = -0.963$

e)  $\bar{V} = M.S. + \frac{\sum n_i d_i}{N} = 4 + (-0.963) = 3.037$

f)  $\sum n_i d_i^2 = 280$

g)  $\frac{\sum n_i d_i^2}{N} = 5.185$

h)  $\left(\frac{n_i d_i}{N}\right)^2 = 1.077$

i)  $\sigma = \sqrt{g) - h)} = 2.026$

RESUMEN EN:  $\bar{V} = 3.037$  BEAUFORT  
 $\sigma = 2.026$

ROSA DE LOS VIENTOS

Lugar: San Juan      Formuló: J López  
 Semana: de 6 al 12 de Mayo 1984

RUMBO	C O N T E O	FRECUENCIA	PORCENTAJE
N	//	2	3.7
NE	//	2	3.7
E		41	75.9
SE	—	—	0.0
S	—	—	0.0
SO	—	—	0.0
O	—	—	0.0
NO	—	—	0.0
Calmas		9	16.6
TOTAL:		54	

