

Consejo Nacional de Operación CNO

Bogotá D.C., 5 de marzo de 2012

Doctor
GERMAN CASTRO FERREIRA
Director Ejecutivo
Comisión de Regulación de Energía y Gas
Ciudad

CREG 6 MAR2012 15:58

COMISIÓN DE REGULACIÓN DE ENERGÍA Y GAS (CREG)
No. RADICACION: E-2012-001876 05/Mar/2012-16:33:35
MEDIO: CORREOS No. FOLIOS: 1 ANEXOS: ARCHIVOS
CREG
ORIGEN CONSEJO NACIONAL DE OPERACION -CNO-
DESTINO German Castro Ferreira

Asunto: Definición Energía Firme Plantas Eólicas - Protocolo cálculo del k.
Resolución 148 de 2011.

Respetado doctor Castro:

En el párrafo 1 del artículo 1 de la Resolución CREG 148 de 2011 se prevé que: *"El Consejo Nacional de Operación, CNO, deberá expedir el protocolo para la estimación del Factor de Conversión (factor k), Capacidad Efectiva Neta (CEN), y Velocidad Media Mensual del Viento, en un plazo no mayor a seis (6) meses contados a partir de la publicación en el Diario Oficial de la presente resolución."*

En atención al mandato antes mencionado, el Consejo Nacional de Operación creó un grupo de trabajo integrado por profesionales de Isagen, EPM y Emgesa para la elaboración del protocolo previsto en la Resolución 148 de 2011.

Como resultado del análisis de este grupo, el cual fue validado por el Comité de Operación y el Consejo Nacional de Operación, presentamos a continuación las siguientes conclusiones, que son el resumen de la presentación que adjuntamos a la presente comunicación:

1. Respecto al literal a. del Artículo 1 Numeral 2. de la Resolución 148 de 2011 que establece:

"Estimar la energía para cada mes de registros históricos de viento con la siguiente ecuación:

$$E = \min (24*1000*k*v^3, 24*1000*CEN*(1-IHF))$$

donde:

Consejo Nacional de Operación

CNO

E: Energía (kwh/día)
k: Factor de conversión medio de plantas eólicas, considerando el número de aerogeneradores que la conforman
v: Velocidad Media Mensual del Viento en metros por segundo (m/s)
IHF: Indisponibilidad Histórica Forzada
CEN: Capacidad Efectiva Neta (MW)"

Esta ecuación no permite estimar la producción energética real de un parque, dado que si bien la potencia instantánea de un aerogenerador es proporcional al cubo de la velocidad, la energía mensual de un parque eólico en la práctica es directamente proporcional a la velocidad promedio mensual; por lo tanto la ecuación más adecuada para calcular la energía es:

$$E = \min (1000*(k*v+A)/\#días \text{ mes}, 24*1000*CEN*(1-IHF))$$

donde:

E: Energía (kWh/día)
k: Pendiente de la regresión lineal
v: Velocidad Media Mensual del Viento en metros por segundo (m/s)
A: Constante
IHF: Indisponibilidad Histórica Forzada
CEN: Capacidad Efectiva Neta (MW)

Los parámetros k y A consideran las características propias y específicas de cada proyecto como son: las condiciones del sitio del proyecto, la distribución de los aerogeneradores en el área, la curva de potencia específica del aerogenerador, entre otros.

Por lo anterior, el Consejo considera prioritario solicitar a la Comisión un espacio para que el grupo de profesionales del con, presente de forma amplia y detallada a la Comisión los resultados del análisis llevado a cabo, los cuales son respaldados por experiencias a nivel internacional sobre el tema.

Cordialmente,



ALBERTO OLARTE AGUIRRE
Secretario Técnico del CNO

Adjunto presentación

CO-CNO

**PROPUESTA DE METODOLOGÍA PARA
DEFINICIÓN DE LA ENFICC DE
PARQUES EÓLICOS**

Resolución 148 de 2011

Febrero 23, 2012

EMGESA, EPM, ISAGEN,

AGENDA

- Antecedentes
- Situación actual
- Dificultades de la resolución
- Detalle parque eólico y variables que diferencian cada proyecto
- Variables que influyen en la producción de energía de parques eólicos
- Estimados energéticos para parques eólicos
- Propuesta para contenido de protocolo
- Conclusiones y recomendaciones

ANTECEDENTES

◆ **Ausencia de regulación para remuneración**

- Imposibilidad de participar en el MEM excepto plantas menores (Jepirachi de 19.5 MW)
- Desde 2008 se viene hablando de la importancia de definir ENFICC para parques eólicos
- En 2010 Banco Mundial presenta "Wind Energy in Colombia. A Framework for market entry"
 - Demuestra complementariedad y aportes de firmeza en operación conjunta
 - Propone EF = Emedia
- CREG: «No está completamente demostrada la complementariedad ni los aportes de firmeza que por tal razón la eólica daría al Sistema de Generación de Colombia»
- Algunos agentes: Que se estudie en detalle y se remunere lo que realmente pueda aportar un parque a la firmeza del país

SITUACIÓN ACTUAL

◆ **Resolución CREG 148 de 2011 por la cual se define la metodología para determinar la energía firme de plantas eólicas**

- Plantas con menos de 10 años de registro: FC según historia de Jepirachi:
 - Energía Firme Base (100%) = Equivalente a un factor de planta del 6%
 - Energía Firme del 95% = Equivalente a un factor de planta del 7,3%
 - Plantas con 10 o más años de registro:
 - Obtener series de Energías mensuales con :
 - $E = \min (24 \cdot 1000 \cdot k \cdot v^3, 24 \cdot 1000 \cdot \text{CEN} \cdot (1 - \text{IHF}))$
es decir $E = k \cdot (V_{\text{mes}})^3$
- Obtener ENFICC's como las Emes con 100% y 95%PSS.
- **Parágrafo 1.** El Consejo Nacional de Operación, CNO, deberá expedir el protocolo para la estimación del Factor de Conversión (factor k), Capacidad Efectiva Neta (CEN), y Velocidad Media Mensual del Viento, en un plazo no mayor a seis (6) meses contados a partir de la publicación en el Diario Oficial de la presente resolución (Dic 12, 2011).

DIFICULTADES DE LA RESOLUCIÓN

1. Representatividad del modelo matemático $E=f(V)$

La ecuación no permite estimar la producción energética real de un parque, dado que si bien, la potencia instantánea de un aerogenerador es proporcional al cubo de la velocidad, la energía mensual de un parque eólico no es proporcional al cubo de la velocidad promedio mensual:

• Aunque P es proporcional a V^3 , la E mensual no lo es a la $(V_{mes})^3$ Ej:

• $V_1 = 0, V_2 = 10 \rightarrow V_{prom} = 5 \rightarrow (V_{prom})^3 = 125 \rightarrow E = k * 125$

• Pero $(V_1)^3 = 0, (V_2)^3 = 1000 \rightarrow (V^3)_{prom} = 500 \rightarrow E = k * 500$

La energía mensual E no puede expresarse mediante una función del tipo $E = k * (V_{mes})^3$
El factor de proporcionalidad K no debe aplicarse al cubo de la velocidad promedio mensual

DIFICULTADES DE LA RESOLUCIÓN

2. No existe un factor de proporcionalidad k aplicable a todos los parques eólicos

Cada parque eólico es un caso particular y su energía dependerá, además de la velocidad promedio del viento, de otros factores:

- **Naturaleza del sitio:**

Variación temporal del viento (Distribución de frecuencia de velocidades diezminutales), Variación temporal de las direcciones del viento (Rosa), temperatura, densidad del aire, topografía y rugosidad del terreno (cobertura vegetal, usos del suelo, obstáculos).

- **Características del Parque:**

Tipo de aerogenerador, su número y su distribución espacial

De existir un factor de proporcionalidad, este será diferente para cada parque eólico

DETALLE PARQUE EÓLICO Y VARIABLES QUE DIFERENCIAN CADA PROYECTO



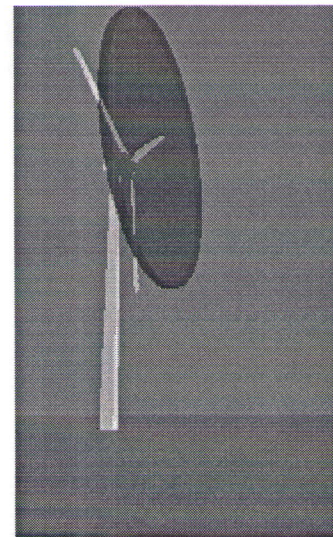
VARIABLES QUE INFLUYEN EN LA PRODUCCIÓN DE ENERGÍA DE PARQUES EÓLICOS

POTENCIA EÓLICA

- Energía cinética del aire que atraviesa perpendicularmente una superficie por unidad de tiempo:

$$P = (1/2) \rho A V^3$$

- P = Potencia eólica en Watios
- ρ = Densidad del aire [kg/m³]
- A = Area normal a la dirección del viento [m²]
- V = Velocidad del viento [m/s]



© 1998 www.WINDPOWER.org

La potencia varía con la velocidad del viento en forma proporcional al cubo de la velocidad
Sólo si la velocidad permanece constante durante un período, la Energía podría estimarse en
función de V^3

También depende de la densidad del aire (importan T° y Humedad del sitio)

VARIABLES QUE INFLUYEN EN LA PRODUCCIÓN DE ENERGÍA DE PARQUES EÓLICOS

EXTRACCIÓN DE POTENCIA MEDIANTE UN AEROGENERADOR

- Se obtiene potencia convirtiendo la fuerza del viento en un par (torque) que actúa sobre las palas del rotor

$$P = \rho/2 \cdot c_p \cdot \eta \cdot A \cdot v_1^3$$

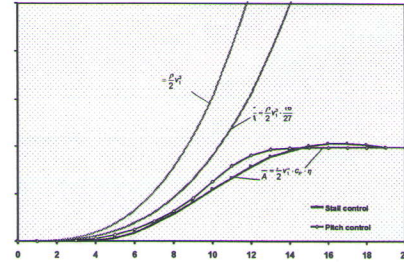
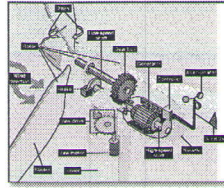
ρ = Densidad del aire [kg/m³]

c_p = Coeficiente de potencia

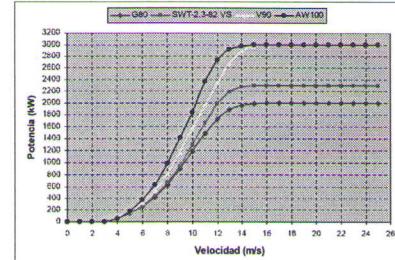
η = Eficiencia electro - mecánica

A = Area del rotor [m²]

V = Velocidad del viento [m/s]



- En la práctica, un aerogenerador no "captura" toda la energía del viento (eficiencia, pérdidas, etc.)
- La potencia que un aerogenerador brinda dependerá de sus características, y estará especificada en función de la velocidad del viento mediante una Curva de Potencia, para una densidad del aire específica



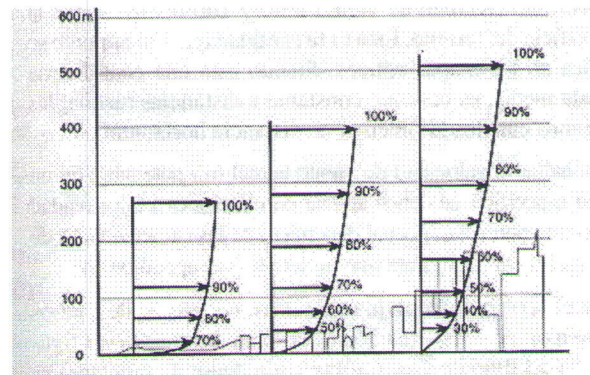
La potencia de un aerogenerador varía con la velocidad del viento hasta la potencia nominal
Si la densidad del aire es menor que la estándar, la curva de potencia no es representativa → ajuste
Para un buen rango de velocidades, la potencia es proporcional a la velocidad, $E = k \cdot (V)$

VARIABLES QUE INFLUYEN EN LA PRODUCCIÓN DE ENERGÍA DE PARQUES EÓLICOS

VARIACIÓN DE LA VELOCIDAD DEL VIENTO CON LA ALTURA

- Perfil de velocidades del tipo parabólico
- Una de las aproximaciones teóricas:
- $V(z) = V_0 (z/z_0)^a$

- V = Velocidad del viento a una altura z
- z = Elevación sobre el terreno
- V_0 = Velocidad a una elevación z_0
- a = Exponente f (rugosidad, velocidad).
Varía entre 0,09 y 0,2

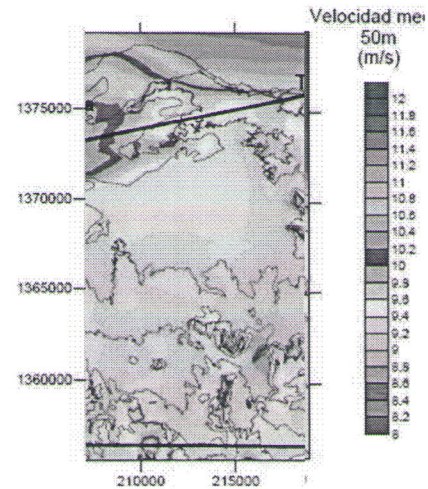


A mayor altura, la velocidad del viento será mayor
El perfil de velocidad del viento en cada punto, dependerá de las características del terreno
En terrenos planos y despejados, mayores velocidades a menores alturas (mar es caso ideal)

VARIABLES QUE INFLUYEN EN LA PRODUCCIÓN DE ENERGÍA DE PARQUES EÓLICOS

VARIACIÓN ESPACIAL DE LA VELOCIDAD DEL VIENTO EN UN ÁREA

- Los parques eólicos constan de aerogeneradores distribuidos espacialmente en un área considerable
- La velocidad del viento en cada sitio de los aerogeneradores, tendrá diferentes perfiles de velocidad con la altura, dependiendo de la topografía y de las condiciones del terreno (rugosidad).

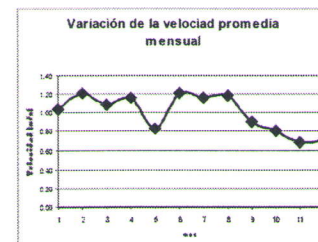
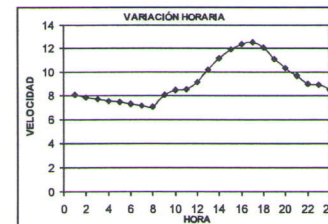
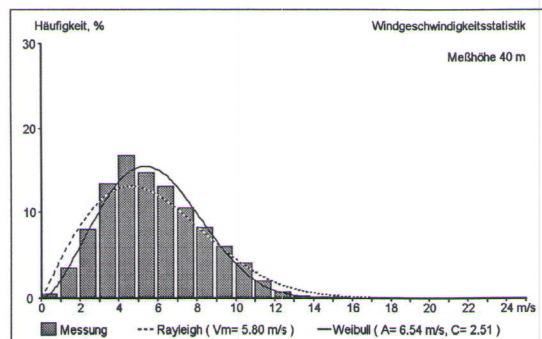


En un instante dado, la velocidad del viento es diferente en cada uno de los aerogeneradores del parque eólico y estos estarán produciendo energías diferentes

VARIABLES QUE INFLUYEN EN LA PRODUCCIÓN DE ENERGÍA DE PARQUES EÓLICOS

VARIACIÓN TEMPORAL DE LA VELOCIDAD DEL VIENTO

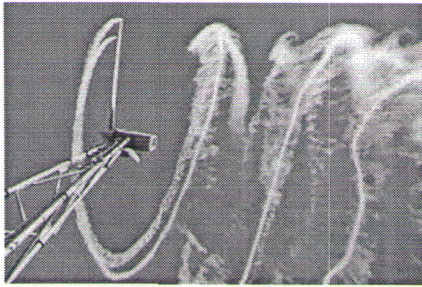
- La velocidad del viento es intermitente y puede presentar variaciones continuas



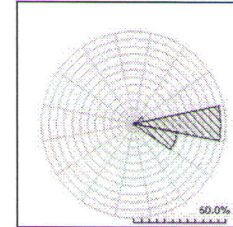
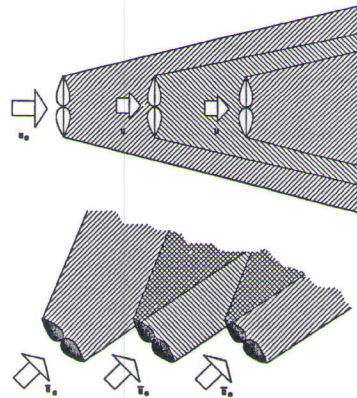
La producción energética de un parque eólico estará variando continuamente con el tiempo. En la práctica, se considera adecuado usar series de velocidad del viento "diez minutales". El ajuste de la serie a una distribución de frecuencias simplifica los cálculos

VARIABLES QUE INFLUYEN EN LA PRODUCCIÓN DE ENERGÍA DE PARQUES EÓLICOS

ESTELA Y EFECTO PARQUE O SOMBRA



Fuente: Winpower.dk



- "Cola" turbulenta y con menos energía
- Pérdida de potencia del parque
- Mayores esfuerzos mecánicos

Pérdida de energía de los aerogeneradores localizados en la zona de influencia.

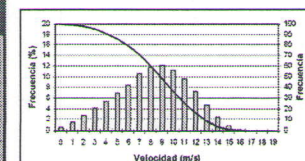
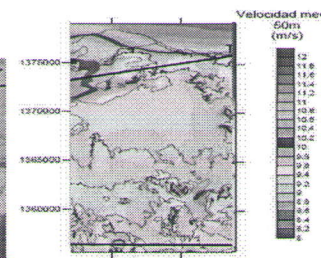
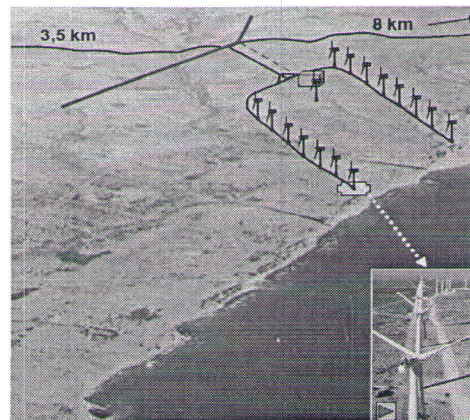
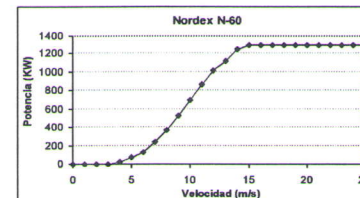
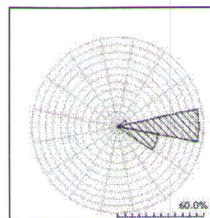
Importancia de dirección del viento y distribución de turbinas.

Los estimados energéticos deben realizarse para cada dirección del viento

VARIABLES QUE INFLUYEN EN LA PRODUCCIÓN DE ENERGÍA DE PARQUES EÓLICOS

SÍNTESIS

- Variación temporal del viento
- Variación temporal de las direcciones
- Temperatura
- Densidad del aire
- Topografía
- Rugosidad del terreno (cobertura vegetal, usos del suelo, obstáculos).
- Tipo de aerogenerador
- Número de aerogeneradores
- Distribución espacial de aerogeneradores



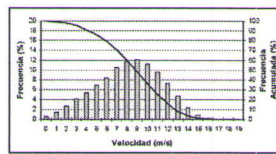
Cada proyecto debe encontrar su factor de proporcionalidad

ESTIMADOS ENERGÉTICOS PARA PARQUES EÓLICOS

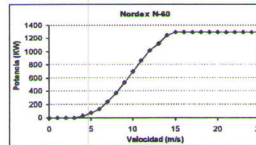
ANÁLISIS TÍPICOS A NIVEL MUNDIAL

AEROGENERADOR AISLADO CON DATOS DE VIENTO A LA ALTURA DEL ROTOR (VELOCIDADES CADA 10 MIN)

1. Estimación de energías diezminutales con base en la curva de potencia y agregación de energías a nivel mensual o anual
 2. Histograma de frecuencias o curva de duración de velocidades, integración de curva de duración de energías para producción anual
 3. Ajuste de serie diezminutal a Función de Distribución de Probabilidades
- Distribución de frecuencias Curva de potencia



+



=

ENERGÍA ANUAL

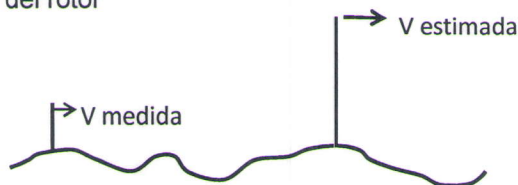
- Es el método estándar a nivel mundial
- Distribución típica: Weibull, parámetros A y k
- Implica una primera aproximación dependiendo de la bondad del ajuste de la serie a la distribución Weibull
- Se enfoca a estimados de producción anual.

ESTIMADOS ENERGÉTICOS PARA PARQUES EÓLICOS

ANÁLISIS TÍPICOS A NIVEL MUNDIAL

AEROGENERADOR SIN DATOS DE VIENTO MEDIDOS A LA ALTURA DEL ROTOR

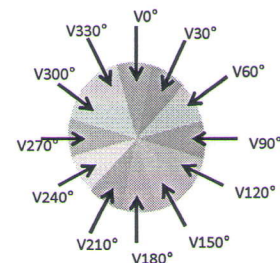
- Extrapolación espacial de los datos de viento para el sitio específico de la turbina y altura del rotor



V estimada depende de:

- Dirección
- Topografía
- Rugosidad del terreno en la dirección
- Altura del aerogenerador

- Modelación del campo de vientos (software especializado)
- Modelos del flujo a partir de datos de viento y características topográficas y físicas alrededor de cada posición.
- Se estiman velocidades a la altura del aerogenerador para 12 direcciones del viento (sectores de 30°)
- Para cada sector se determinan los parámetros de ajuste a la Distribución Weibull, A y k
- Con curva de potencia y distribución Weibull se determina E anual

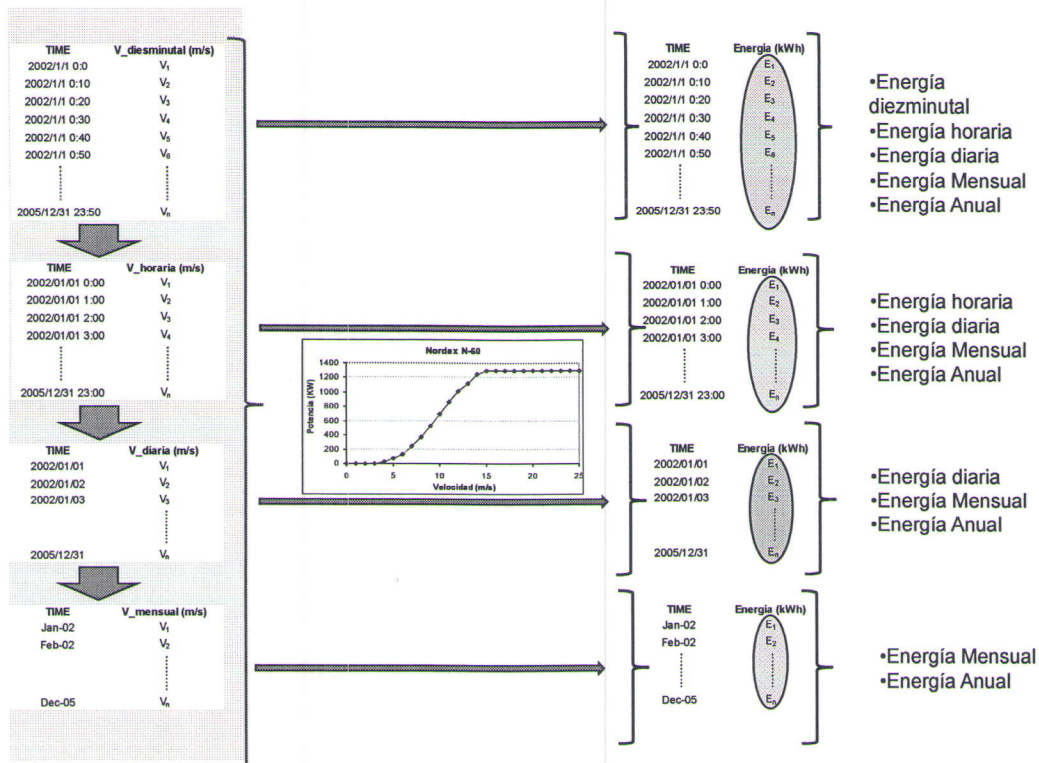


• PARQUES EÓLICOS

- Se modela el campo de vientos para cada sitio y altura de aerogenerador
- Se introducen ajustes por efecto sombra según direcciones de viento y posición de AG
- En la práctica, para el diseño de parques eólicos, además de los parámetros de Weibull, se determinan otras variables de importancia como presión atmosférica, intensidad de turbulencia, valores extremos, inclinación de flujo, flujo vertical, coeficiente de fricción, etc.

ESTIMADOS ENERGÉTICOS PARA PARQUES EÓLICOS

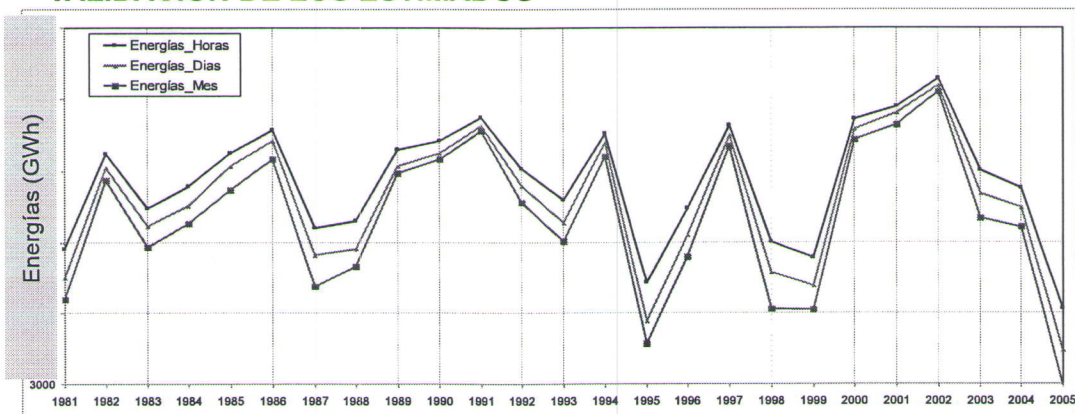
INFLUENCIA DEL NIVEL DE AGREGACIÓN



ESTIMADOS ENERGÉTICOS PARA PARQUES EÓLICOS

INFLUENCIA DEL NIVEL DE AGREGACIÓN

VALIDACIÓN DE LOS ESTIMADOS



- Para el cálculo de energías es fundamental disponer de series detalladas de velocidades de viento diezminutales
- Los errores inducidos por el uso de series horarias son aceptables
- Estimados con datos diarios o mensuales conducen a errores significativos

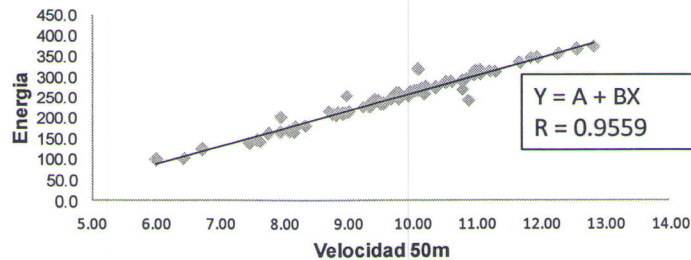
ESTIMADOS ENERGÉTICOS PARA PARQUES EÓLICOS

RELACIÓN ENTRE ENERGÍA Y VELOCIDAD

CORRELACIÓN ENTRE ENERGÍAS Y VELOCIDADES PROMEDIAS MENSUALES PARA UN PARQUE EÓLICO EN LA ALTA GUAJIRA

- Energías estimadas con base en velocidades diezminutales
- Se dispone de 7 siete años de registro de velocidades diezminutales a 50 m de altura
- Se estimaron energías mensuales según metodología propuesta al CNO (estándares internacionales **pero a nivel mensual**)

Energía vs Velocidad 50m (2002-2009)



Se verifica hipótesis de una alta correlación lineal entre las Energías mensuales netas del parque y las velocidades promedias mensuales

PROPUESTA METODOLÓGICA

La energía mensual de un parque eólico en la práctica es directamente proporcional a la velocidad promedio mensual

$$E = \min (1000 \cdot (k \cdot v + A) / \# \text{días mes}, 24 \cdot 1000 \cdot CEN \cdot (1 - IHF))$$

donde:

E : Energía (kWh/día)

k : Pendiente de la regresión lineal $\left[\frac{\text{MWhmes}}{\text{m/s}} \right]$

v : Velocidad Media Mensual del Viento en metros por segundo (m/s)

A : Constante [MWhmes]

IHF : Indisponibilidad Histórica Forzada

CEN : Capacidad Efectiva Neta (MW)

PROPUESTA PARA CONTENIDO DE PROTOCOLO

◆ Información técnica del Proyecto

- Localización del proyecto
- Localización de las estaciones de medición
- Topografía del área del proyecto
- Usos del suelo
- Rugosidad del emplazamiento.

◆ Mediciones meteorológicas en el sitio del proyecto

- La altura mínima de medición deberá ser 20 m
- Mediciones meteorológicas principales:
 - Velocidad horizontal del viento: resolución cada diez (10) minutos
 - Dirección promedia para periodos de diez minutos
 - Desviación estándar de los datos del periodo de diez minutos
 - Temperatura y presión atmosférica promedio horaria
 - Velocidad vertical; preferiblemente a la máxima altura de la estación
- Longitud de la serie de registros (años).

PROPUESTA PARA CONTENIDO DE PROTOCOLO

◆ Revisión, depuración y complementación de las series de viento

- Metodología de revisión y depuración de los datos.
- Metodología para la complementación y extensión de la serie al periodo requerido
- Metodología de transposición de datos al sitio
- Extrapolación de datos a la altura de buje del aerogenerador

◆ Análisis estadísticos de las series meteorológicas.

- Serie diezminutal definitiva y estadísticos principales a resolución de cálculo de energía.
- Parámetros de ajuste a distribución de probabilidad
- Rosa de vientos a altura de medición (sin extrapolar)
- Curvas de Intensidad de turbulencia
- Ciclo diario de variación de la velocidad del viento y dirección.
- Ciclo anual de velocidad del viento y dirección
- Serie agregada a nivel mensual.

PROPUESTA PARA CONTENIDO DE PROTOCOLO

♦ Información del proyecto eólico para la estimación de producción energética

- Características de los aerogeneradores
 - Tipo de aerogenerador
 - Potencia nominal en kW.
 - Altura de buje
 - Diámetro de las aspas
 - Curva de potencia y eficiencia del aerogenerador (especificada por el fabricante).
- Distribución espacial de aerogeneradores

♦ Producción energética media anual estimada

- Modelo o software seleccionado para la estimación de producción energética
- Resultados de energías brutas estimadas mensualmente
- Pérdidas por estelas.
- Energías a nivel mensual con pérdidas por estelas
- Criterios para establecer los porcentajes de otras pérdidas (%):
Disponibilidad, temperaturas, incumplimiento de la curva de potencia y eléctricas.
- Serie de energías medias mensuales netas

PROPUESTA PARA CONTENIDO DE PROTOCOLO

♦ Modelo de ajuste de Energía mensual = $f(V_{\text{mensual}})$

- Presentar el ajuste lineal entre las energías mensuales estimadas y la velocidad promedia mensual de viento (parámetros k y A).

♦ Calculo de la ENFICC con las ecuaciones definidas

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- La CREG ha propuesto la remuneración de eólicas a través de su inclusión dentro del mercado con base en la ENFICC
- La propuesta metodológica de la CREG presenta dificultades asociadas a la representatividad de los estimadores propuestos
- El Grupo de Trabajo considera que cada parque es una situación particular y única y por tanto debe calcular sus producciones energéticas de acuerdo con los estándares mundiales y las características del proyecto.
- Para varios parques eólicos estudiados se ha encontrado una alta correlación lineal entre las velocidades mensuales y las energías mensuales de manera rigurosa con series diezminutales.

Gracias