



EL 4001

Conversión de la Energía y Sistemas Eléctricos

Clase 19: Generación Eólica

AREA DE ENERGIA

DEPARTAMENTO DE INGENIERIA ELECTRICA

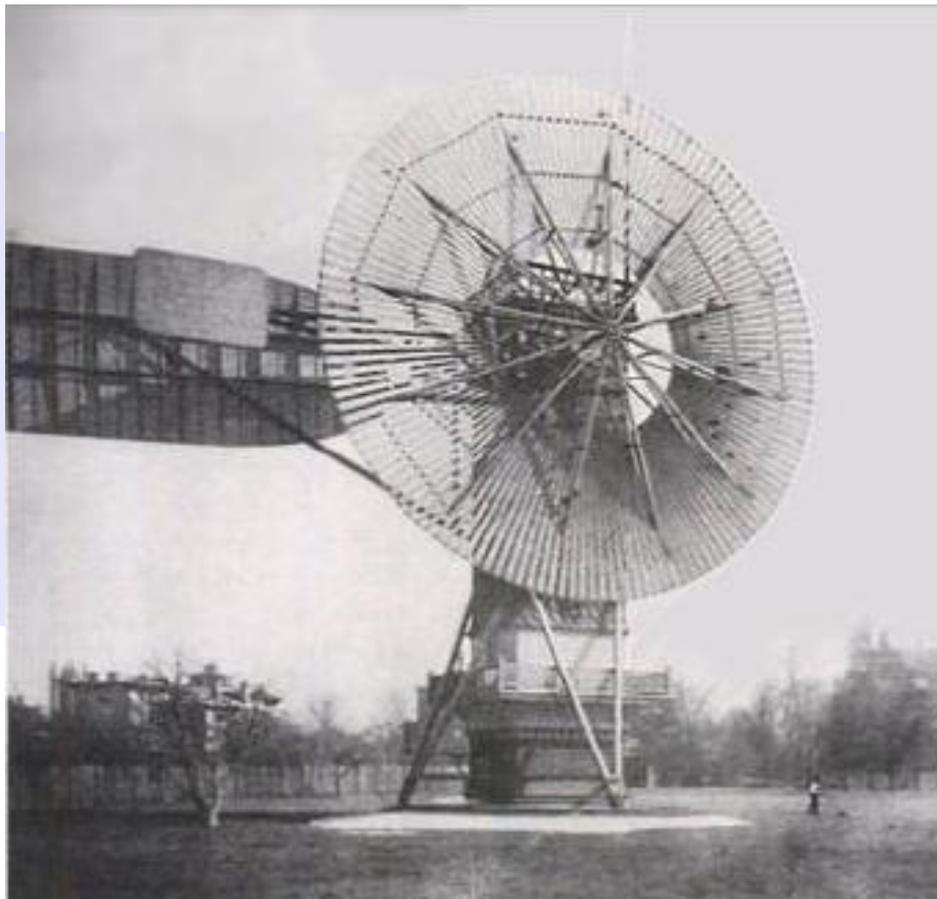


Temas

- Introducción
- Curva de vacío de un alternador (generador sincrónico)
- Conexión de consumos
- Funcionamiento en estado estacionario
- Tipos de operación



Desarrollo Histórico de la Energía



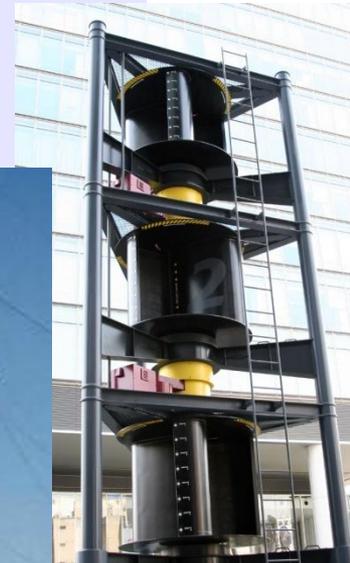
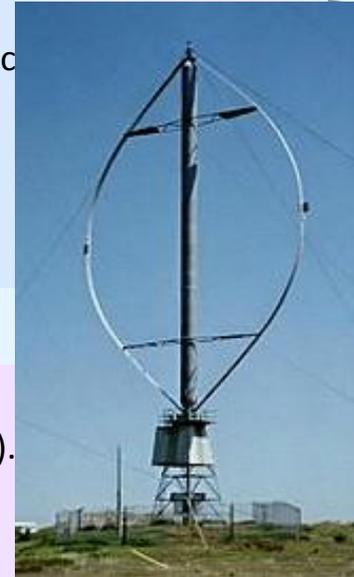
Charles Brush
1888

Energía Eólica – EL6000



Desarrollo Histórico de la Energía Eólica

- **Desarrollo de la Aerodinámica (Principios del Siglo XX).**
 - 1910: Dinamarca tiene una capacidad de generación de 200 MWh.
 - Enfoque aeronáutico se traspa a la generación de energía eléctrica (Década de 1920). Perfiles aerodinámicos de hélices se aplican a las aspas.
 - Operación de primeros túneles de viento.
 - 1919: Límite de Betz (59% de la energía del viento es aprovechable).
 - Tripala, Bipala, Unipala (equilibrado con contrapeso).
 - Menor cantidad de aspas => Mayor velocidad => Mayor eficiencia.
 - 1927: A.J. Dekker (holandés) construye el primer rotor con palas con sección aerodinámica, alcanzando velocidades en punta de pala, 4 o 5 veces superiores la del viento incidente.
- **Turbinas de Eje Vertical Modernas.**
 - En 1925 se crea la turbina eólica de eje vertical Darrieus.
 - Su estudio se retoma en Canadá (1973) y Estados Unidos (1975).
 - Máquinas pequeñas (1 a 60 kW). Conveniencia económica.
 - En 1922 se crea la turbina de eje vertical Savonius.





Desarrollo Histórico de la Energía Eólica

- Aspectos Principales de la Energía Eólica durante el Siglo XX hasta la década de los 90.
 - No existían técnicas para afrontar la irregularidad del viento (primera mitad del Siglo XX)
 - Medios de almacenamiento energético muy limitados (primera mitad del Siglo XX)
 - Bajos precios del petróleo (hasta la Segunda Guerra Mundial).
 - Expansión de la Electricidad como fuente energética principal.
 - Industria se enfoca en dos frentes: baja potencia y alta potencia.
 - Medidas proteccionistas posteriores a la crisis del '29.
 - Entre 1945 y 1973: bajos precios del petróleo.
 - Entre 1973 y 1986: altos precios del petróleo.
 - Extensión de las redes eléctricas: reducción del mercado de baja potencia.
 - Gran número de instalaciones experimentales.
 - fracasos en periodos de puesta en marcha u operación.
 - Escasa interconexión con las redes eléctricas.
- 1957: Johannes Juul crea primera turbina eólica AC.
 - 200 kW, Generador de Inducción, Sistema de Control de Orientación.





Desarrollo Histórico de la Energía Eólica

- Crisis del Petróleo a partir de los años 1973 y 1979
 - Altos precios del petróleo.
 - Desarrollo de la aerodinámica, ciencia de los materiales, electrónica de potencia.
 - Impulsos gubernamentales: Fines estratégicos.
- Parques Eólicos Off-Shore (Costa-Afuera)
 - El primer parque marítimo fue de carácter demostrativo en Vindeby, Dinamarca.
 - Comenzó su producción en 1991, con once turbinas de 450 kW (4,95 MW).
 - Posteriormente: Holanda, Suecia e Inglaterra.
 - El primer parque comercial se instaló en Copenhagen, Dinamarca, en el 2002.
 - Capacidad de 40 MW.
 - Está compuesto por veinte máquinas Bonus de 2 MW.

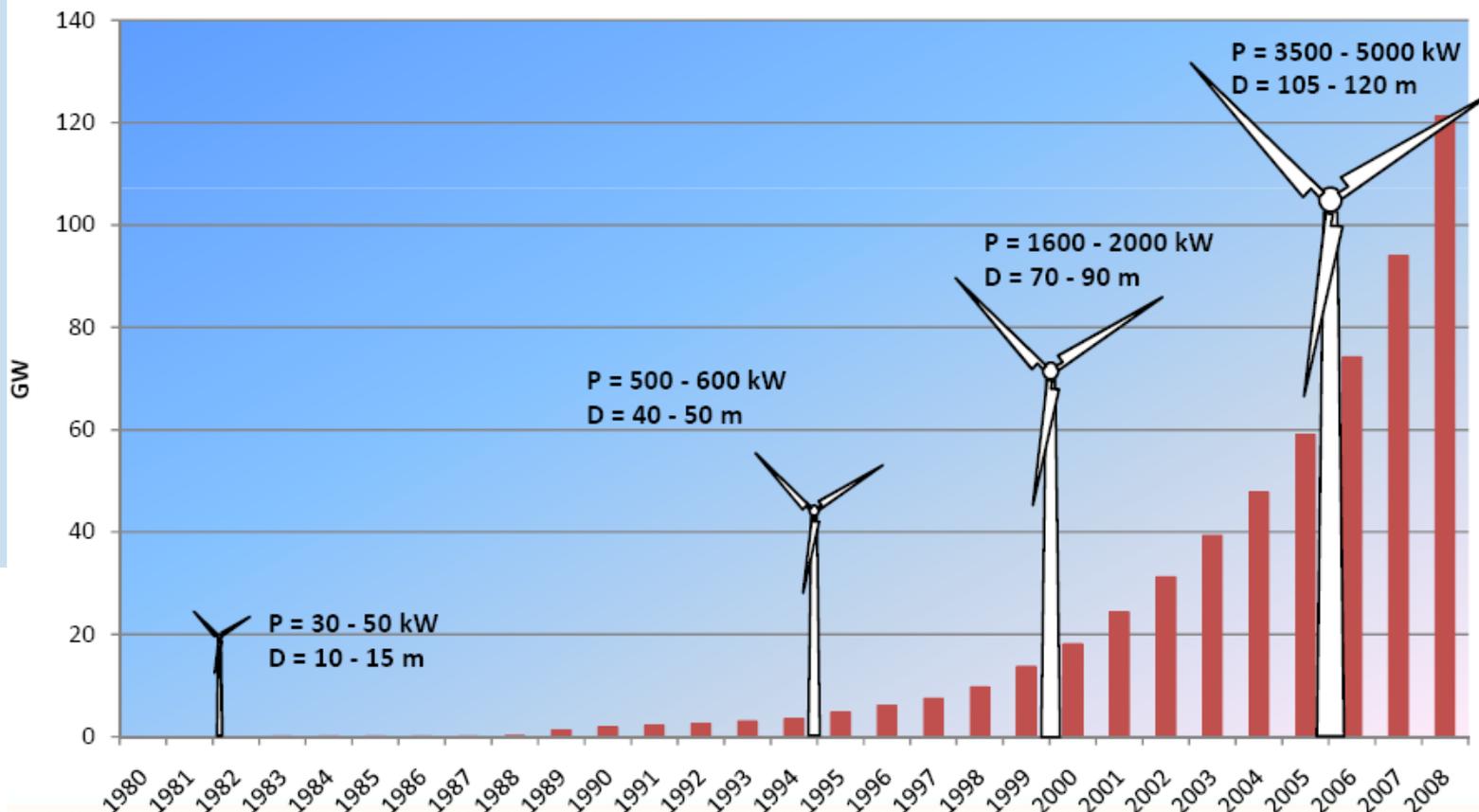


Energía Eólica – EL6000



Desarrollo Histórico de la Energía Eólica

Capacidad Eólica Mundial Instalada



Energía Eólica – EL6000



Desarrollo Histórico de la Energía Eólica



Energía Eólica – EL6000

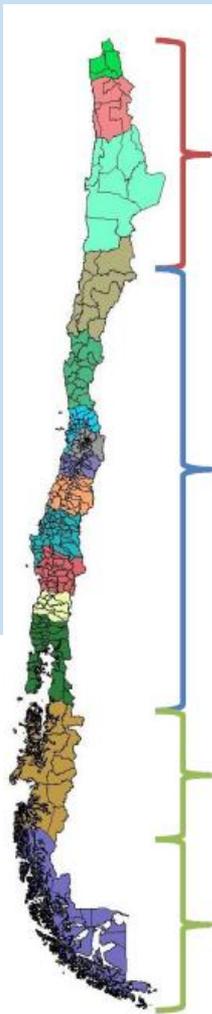


Desarrollo Histórico de la Energía Eólica

Capacidad total de energía eólica instalada						
Posición	País	Capacidad (MW)		Posición	País	Capacidad (MW)
		2009	2009			2009
1	EE.UU.	32.919	11	Canadá	3.301	
2	Alemania	25.030	12	Países Bajos	2.220	
3	China	20.000	13	Japón	1.980	
4	España	(13%) 18.263	14	Australia	1.494	
5	India	10.742	15	Grecia	1.062	
6	Francia	4.655	16	Suecia	1.021	
7	Italia	4.547	17	Irlanda	1.002	
8	Reino Unido	4.015	18	Austria	995	
9	Dinamarca	(20%) 3.384	19	Turquía	635	
10	Portugal	(15%) 3.374	20	Brasil	634	
				Total	140.951	



Energía Eólica en Chile



Sistema Interconectado del Norte Grande (SING)

Potencia Instalada: 4.123 MW

90% Clientes Libres

10% Clientes Regulados

Sistema Interconectado Central (SIC)

Potencia Instalada: 12.675 MW

40% Clientes Libres

60% Clientes Regulados

Sistema Mediano de Aysén

Potencia Instalada: 51 MW

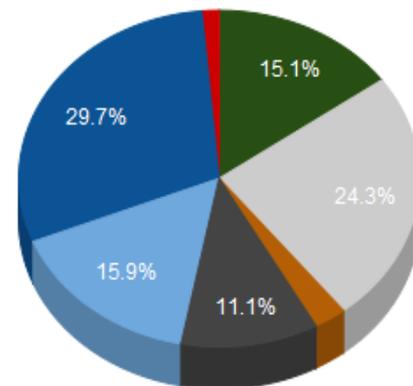
100% Clientes Regulados

Sistema Mediano de Magallanes

Potencia Instalada: 101 MW

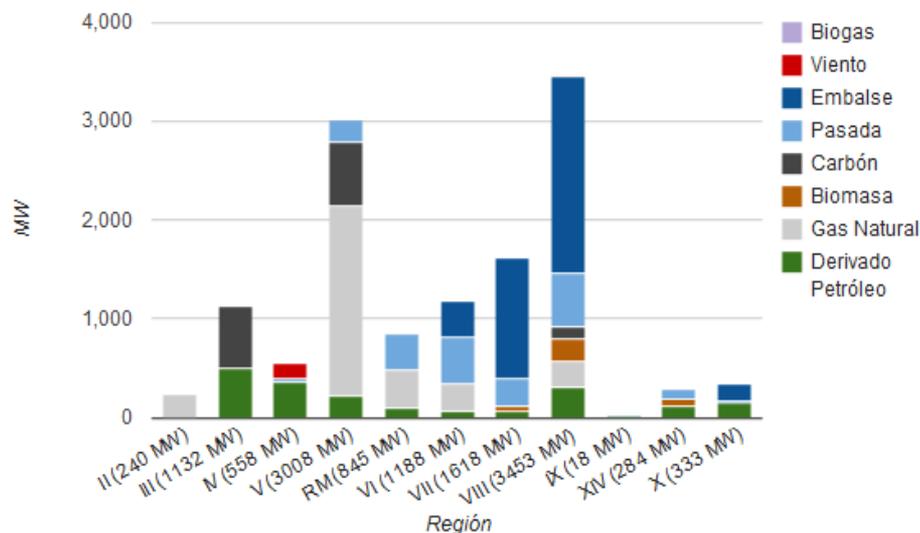
100% Clientes Regulados

SIC: Potencia instalada, según tipo



- Derivado Petróleo (15%, 1908 MW)
- Gas Natural (24%, 3082 MW)
- Biomasa (3%, 332 MW)
- Carbón (11%, 1401 MW)
- Pasada (16%, 2009 MW)
- Embalse (30%, 3000 MW)
- Viento (1%, 174 MW)
- Other

SIC: Potencia instalada, por región y tipo





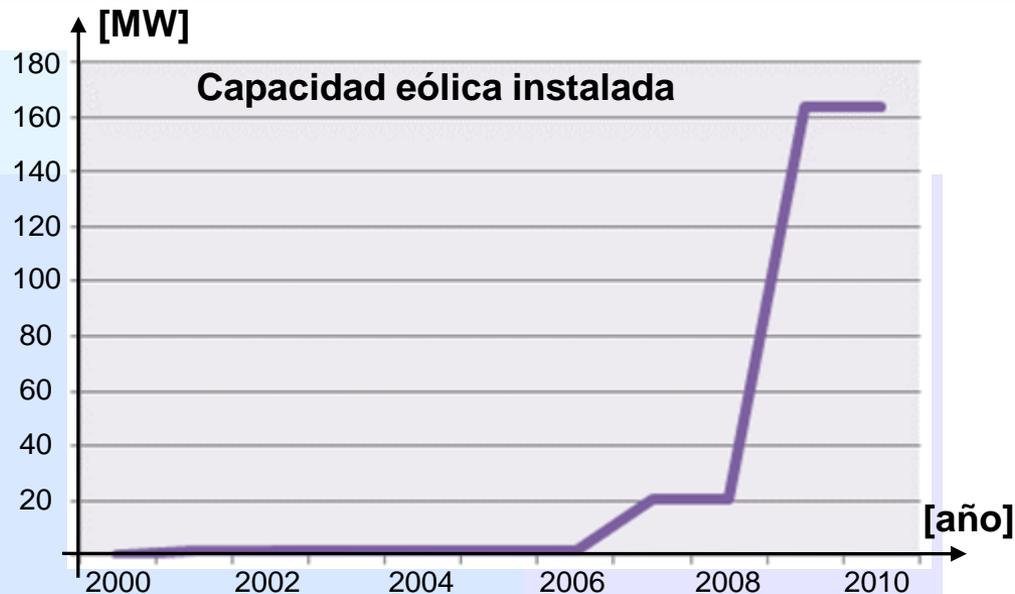
Energía Eólica en Chile

Política

Apoyo político para la integración de energías alternativas (ERNC)

- Estudios de potencial de ERNC
- Impacto en la red
- Desarrollo de normativas
- 5% nueva potencia instalada en base a ERNC

→ **Proyectos eólicos en el SIC hasta el 2015 suman cerca de 1,2 GW**



	Total	En construcción	Aprobados en SEIA	En calificación en el SEIA
Proyectos eólicos	1843	39	1470	334



Energía Eólica en Chile



Sistema Interconectado del Norte Grande (SING)

Potencia Instalada: 4.123 MW
90% Clientes Libres
10% Clientes Regulados

Sistema Interconectado Central (SIC)

Potencia Instalada: 12.675 MW
40% Clientes Libres
60% Clientes Regulados

Sistema Mediano de Aysén

Potencia Instalada: 51 MW
100% Clientes Regulados

Sistema Mediano de Magallanes

Potencia Instalada: 101 MW
100% Clientes Regulados

Parque Eólico Alto Baguales

Año: 2001.
Potencia Instalada: 1,98 MW.
Propiedad: Edelaysén S.A.
Número de Aerogeneradores: 3
Comuna: Coyhaique.
Región: Aysén





Energía Eólica en Chile



Sistema Interconectado del Norte Grande (SING)

Potencia Instalada: 4.123 MW
90% Clientes Libres
10% Clientes Regulados

Sistema Interconectado Central (SIC)

Potencia Instalada: 12.675 MW
40% Clientes Libres
60% Clientes Regulados

Sistema Mediano de Aysén

Potencia Instalada: 51 MW
100% Clientes Regulados

Sistema Mediano de Magallanes

Potencia Instalada: 101 MW
100% Clientes Regulados

Parque Eólico Canela I

Año: 2007.
Potencia Instalada: 18,2 MW.
Propiedad: Endesa S.A.
Número de Aerogeneradores: 11
Comuna: Canela.
Región: Coquimbo.





Energía Eólica en Chile



Sistema Interconectado del Norte Grande (SING)

Potencia Instalada: 4.123 MW
90% Clientes Libres
10% Clientes Regulados

Sistema Interconectado Central (SIC)

Potencia Instalada: 12.675 MW
40% Clientes Libres
60% Clientes Regulados

Sistema Mediano de Aysén

Potencia Instalada: 51 MW
100% Clientes Regulados

Sistema Mediano de Magallanes

Potencia Instalada: 101 MW
100% Clientes Regulados

Parque Eólico Canela II

Año: 2009.
Potencia Instalada: 60,0 MW.
Propiedad: Endesa S.A.
Número de Aerogeneradores: 40
Comuna: Canela.
Región: Coquimbo.





Energía Eólica en Chile



Sistema Interconectado del Norte Grande (SING)

Potencia Instalada: 4.123 MW
90% Clientes Libres
10% Clientes Regulados

Sistema Interconectado Central (SIC)

Potencia Instalada: 12.675 MW
40% Clientes Libres
60% Clientes Regulados

Sistema Mediano de Aysén

Potencia Instalada: 51 MW
100% Clientes Regulados

Sistema Mediano de Magallanes

Potencia Instalada: 101 MW
100% Clientes Regulados

Parque Eólico Totoral

Año: 2009.
Potencia Instalada: 46,0 MW.
Propiedad: SN Power Ltd.
Número de Aerogeneradores: 23
Comuna: Canela.
Región: Coquimbo.





Energía Eólica en Chile



Sistema Interconectado del Norte Grande (SING)

Potencia Instalada: 4.123 MW
90% Clientes Libres
10% Clientes Regulados

Sistema Interconectado Central (SIC)

Potencia Instalada: 12.675 MW
40% Clientes Libres
60% Clientes Regulados

Sistema Mediano de Aysén

Potencia Instalada: 51 MW
100% Clientes Regulados

Sistema Mediano de Magallanes

Potencia Instalada: 101 MW
100% Clientes Regulados

Parque Eólico Lebu

Año: 2009.
Potencia Instalada: 3,54 MW.
Propiedad: Cristalerías Toro S.A.
Número de Aerogeneradores: 5
Comuna: Lebu.
Región: Biobío.





Energía Eólica en Chile



Sistema Interconectado del Norte Grande (SING)

Potencia Instalada: 4.123 MW
90% Clientes Libres
10% Clientes Regulados

Sistema Interconectado Central (SIC)

Potencia Instalada: 12.675 MW
40% Clientes Libres
60% Clientes Regulados

Sistema Mediano de Aysén

Potencia Instalada: 51 MW
100% Clientes Regulados

Sistema Mediano de Magallanes

Potencia Instalada: 101 MW
100% Clientes Regulados

Parque Eólico Cabo Negro I

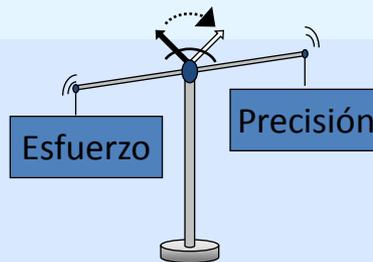
Año: 2010.
Potencia Instalada: 2,55 MW.
Propiedad: Methanex Corp.
Número de Aerogeneradores: 3
Comuna: Punta Arenas.
Región: Magallanes.



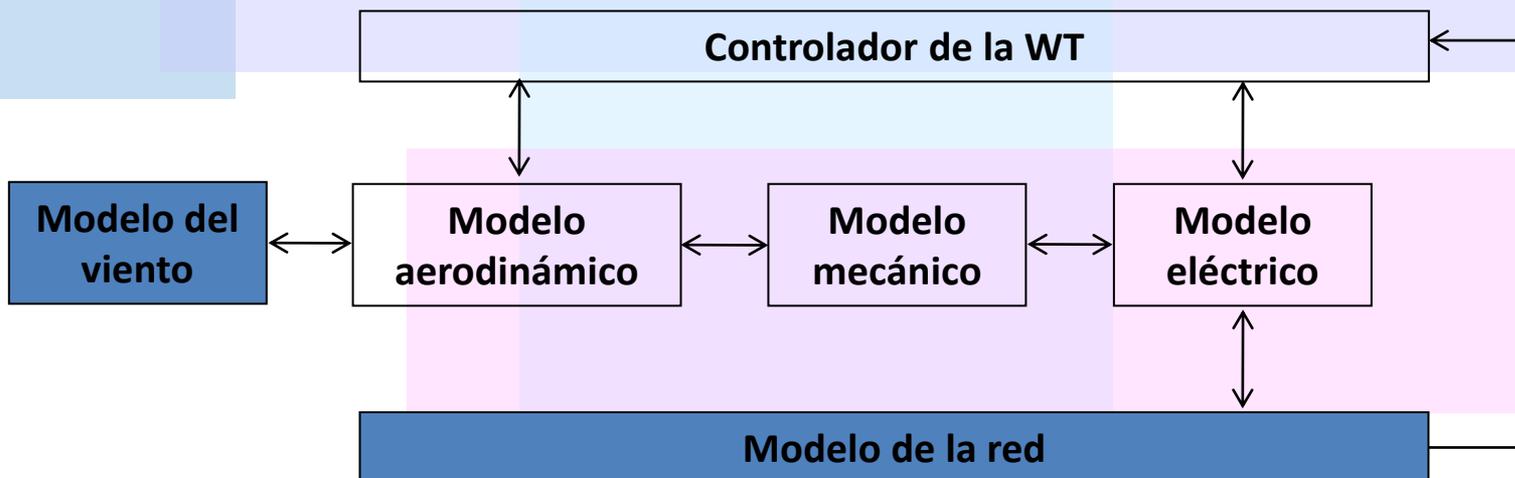


Modelos de los parques eólicos

- Desarrollo de modelos dinámicos de los parques problema con grandes desafíos
 - ◆ Agregación de turbinas
 - ◆ Elección de modelos adecuados



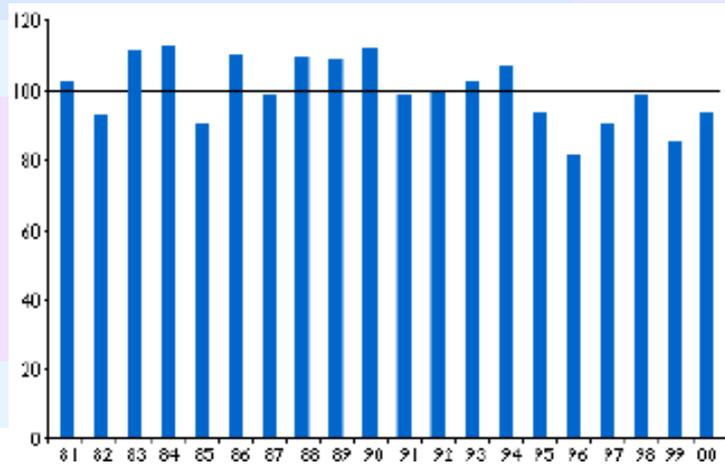
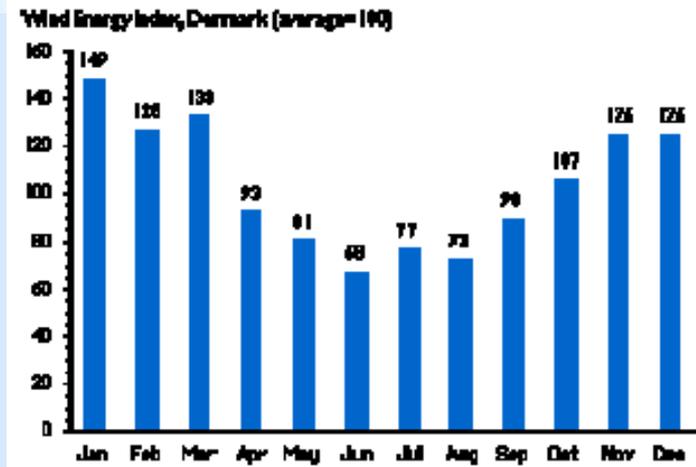
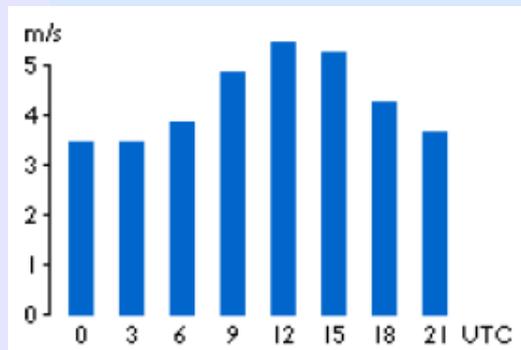
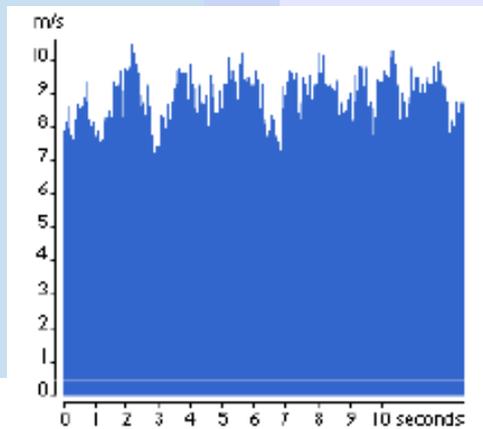
- Modelos involucrados en un parque eólico





Características del Recurso Eólico

- Energía Eólica: Un tipo de Energía Solar.
- Variabilidad.

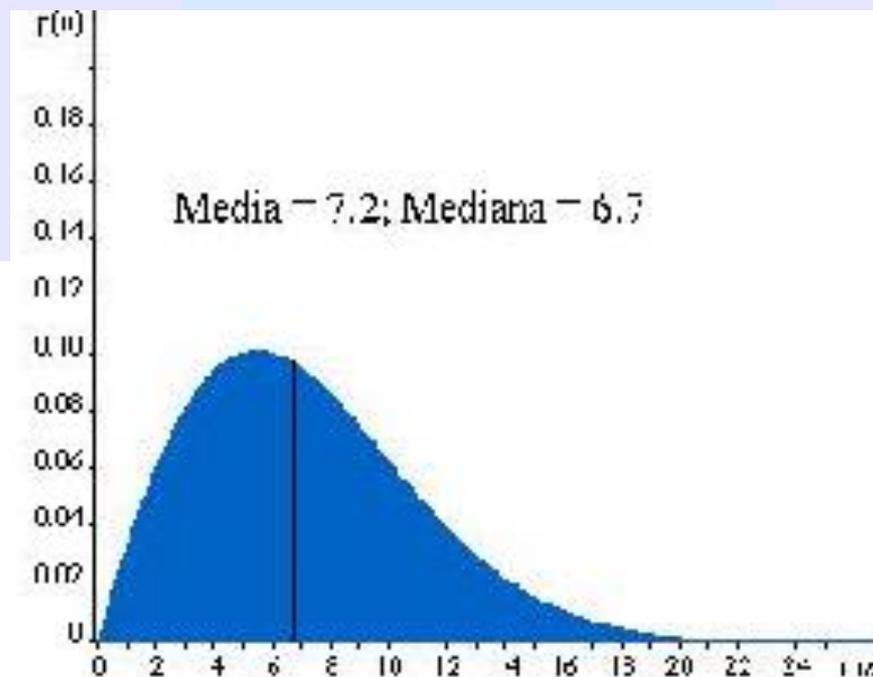




Características del Recurso Eólico

Es importante describir (modelar) la variación de las velocidades del viento, tanto para el diseño de los aerogeneradores, como para estimar la producción de electricidad.

Su comportamiento se modela a través de una *Distribución de Weibull*:





Características del Recurso Eólico

- Distribución de Weibull.

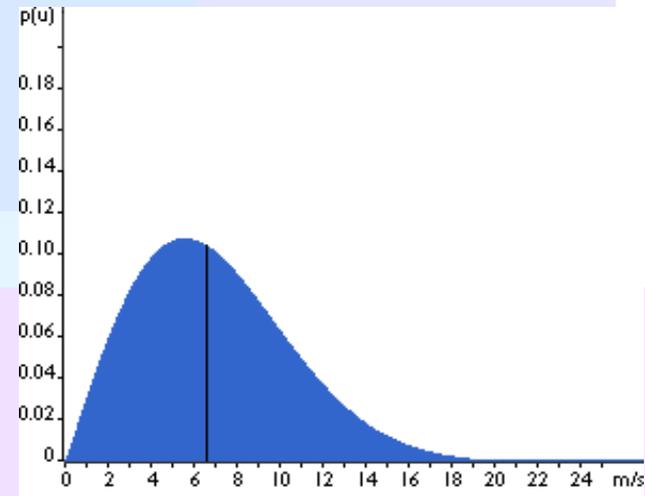
- “Las mediciones de largo plazo muestran que los vientos extremadamente fuertes son poco frecuentes mientras que aquellos moderados y frescos son más comunes.”

$$f(v) = \left(\frac{k}{c}\right) \cdot \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \cdot \exp\left[-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right]$$

- k es el factor de forma de Weibull (adimensional)
- c es el factor de escala de Weibull en m/s.

$$c = \frac{\bar{v}}{\Gamma(1 + 1/k)} \quad k = \left(\frac{\sigma}{\bar{v}}\right)^{-1.086}$$

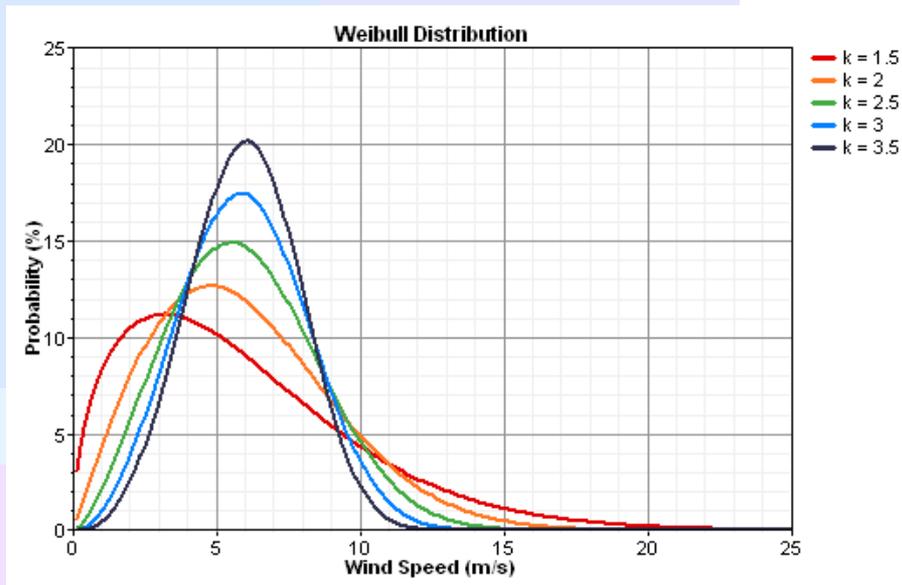
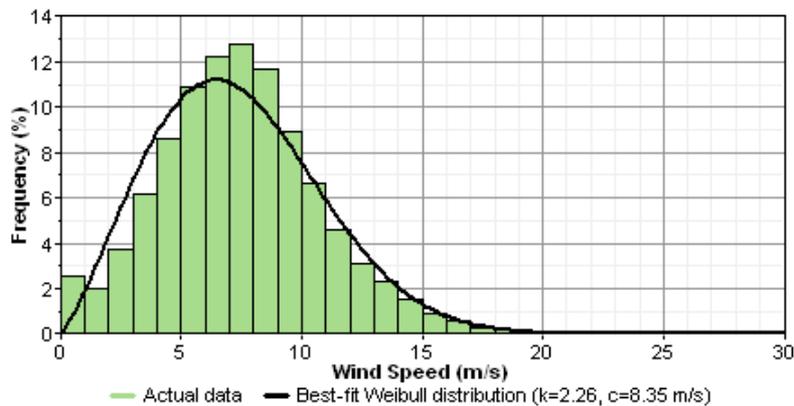
$$\Gamma(y) = \int_0^{\infty} e^{-x} \cdot x^{y-1} \cdot dx$$





Características del Recurso Eólico

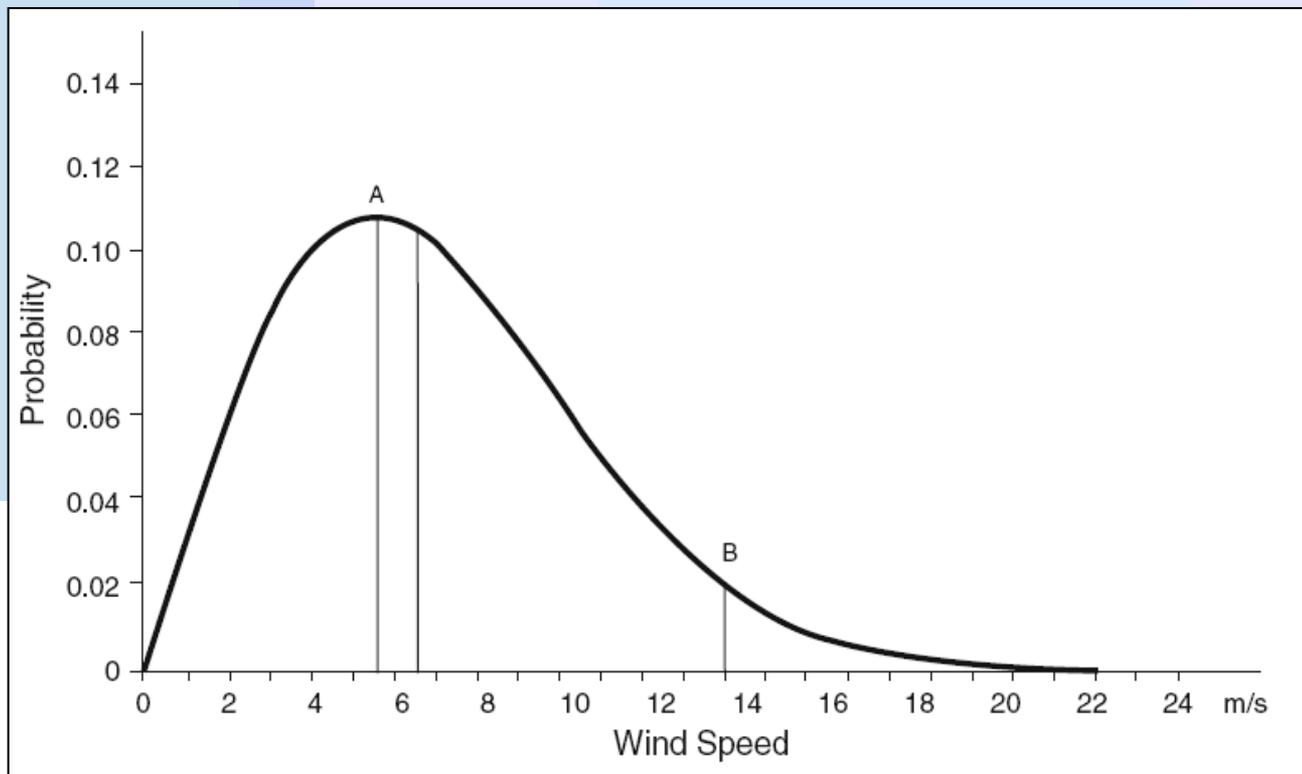
- Distribución de Weibull.
 - Stevens MJM, Smulders PT (1979) The estimation of the parameters of the Weibull wind speed distribution for wind energy utilization purposes, *Wind Engineering*, **3**, 132-145.





Características del Recurso Eólico

- Distribución de Weibull.
- A continuación se muestra una Distribución de Weibull para un sitio en particular con una velocidad de viento promedio de 7 [m/s] y un parámetro de forma igual a 2.



La mitad del área bajo la curva se ubica a la izquierda de 6,6 [m/s] (Mediana). Valor para el cual se espera que la mitad del tiempo el viento sople con valores inferiores a él y la otra mitad con valores superiores.

Velocidad promedio del viento es 7 [m/s].

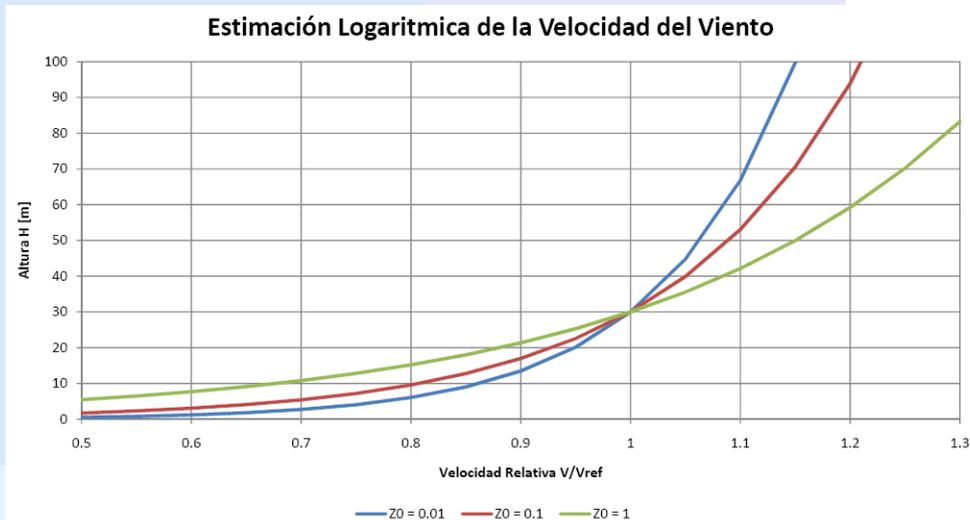
La velocidad más frecuente es 5,5 [m/s] (Moda).



Características del Recurso Eólico

- Rugosidad y Cizallamiento.
 - Variación de la velocidad del viento con la altura sobre el nivel del suelo.

$$v = v_{ref} \cdot \frac{\ln\left(\frac{z}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{z_{ref}}{z_0}\right)}$$



- v : velocidad del viento a una altura z sobre el nivel del suelo en m/s.
- v_{ref} : velocidad a la altura de referencia z_{ref} en m/s.
- z : altura sobre el nivel del suelo de la velocidad deseada en m.
- z_0 : longitud de rugosidad en la dirección del viento actual en m.
- z_{ref} : altura de referencia a la cual se conoce la velocidad del viento v_{ref} en m.



Características del Recurso Eólico

- Rugosidad y Cizallamiento.
- La longitud de rugosidad es la altura sobre el suelo a la que, teóricamente, la velocidad del viento debería ser igual a cero, siendo una evaluación cuantitativa de la aptitud eólica de un determinado tipo de terreno. A mayor longitud de rugosidad mayor es la disminución de la velocidad que experimenta el viento al disminuir la altura.

Clase de Rugosidad	Longitud de Rugosidad (m)	Tipo de Paisaje
0	0,0002	Superficie del agua.
0,5	0,0024	Terreno completamente abierto con superficie suave.
1	0,03	Paisaje agrícola abierto sin rejas, edificios muy aislados y suaves colinas.
2	0,1	Paisaje agrícola con algunas casas y arbustos.
3	0,4	Villas y pequeños pueblos.
4	1,6	Ciudades muy grandes con edificios altos y rascacielos.



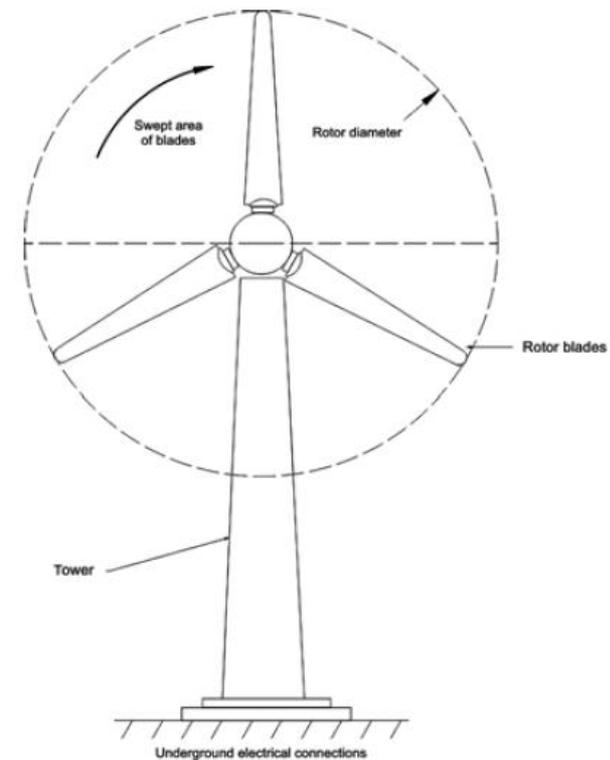
Características del Recurso Eólico

Potencia del Viento

- Un aerogenerador obtiene su potencia de entrada convirtiendo la fuerza del viento en un torque actuando sobre las palas del rotor.
- La cantidad de energía transferida al rotor por el viento depende de la densidad del aire, del área de barrido del rotor y de la velocidad del viento.
- A partir de la relación para la energía cinética de cualquier cuerpo en movimiento se logra determinar la expresión para la potencia del viento que incide en forma perpendicular sobre una superficie circular como la del rotor de los aerogeneradores de eje horizontal típicos:

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

- P : Potencia del viento en $[W]$.
- ρ : Densidad del viento en $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$.
- v : Velocidad del viento en $\left[\frac{m}{s}\right]$.
- A : Área del rotor del aerogenerador en $[m^2]$.





Características del Recurso Eólico

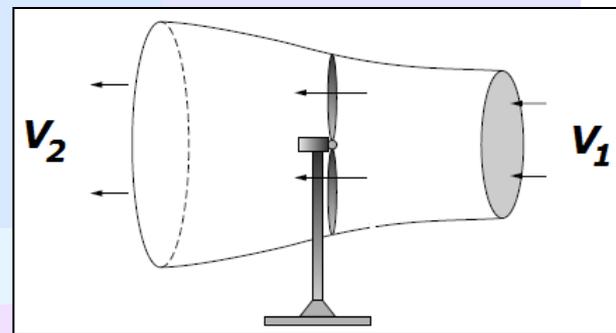
Límite de Betz

- Un aerogenerador desvía el viento que incide en él. El viento incide perpendicularmente desde la derecha a una velocidad v_1 . El aerogenerador frenará el viento al convertir parte de su energía cinética en energía rotacional, lo que implica que el viento tendrá una velocidad menor a la izquierda del plano perpendicular al rotor ($v_2 < v_1$).
- La potencia que extraen las aspas del rotor del viento es igual a la diferencia entre la potencia del viento incidente y la potencia del viento que abandona el aerogenerador:

$$P_0 = \frac{1}{2} \cdot \Delta m \cdot (v_1^2 - v_2^2)$$

Donde:

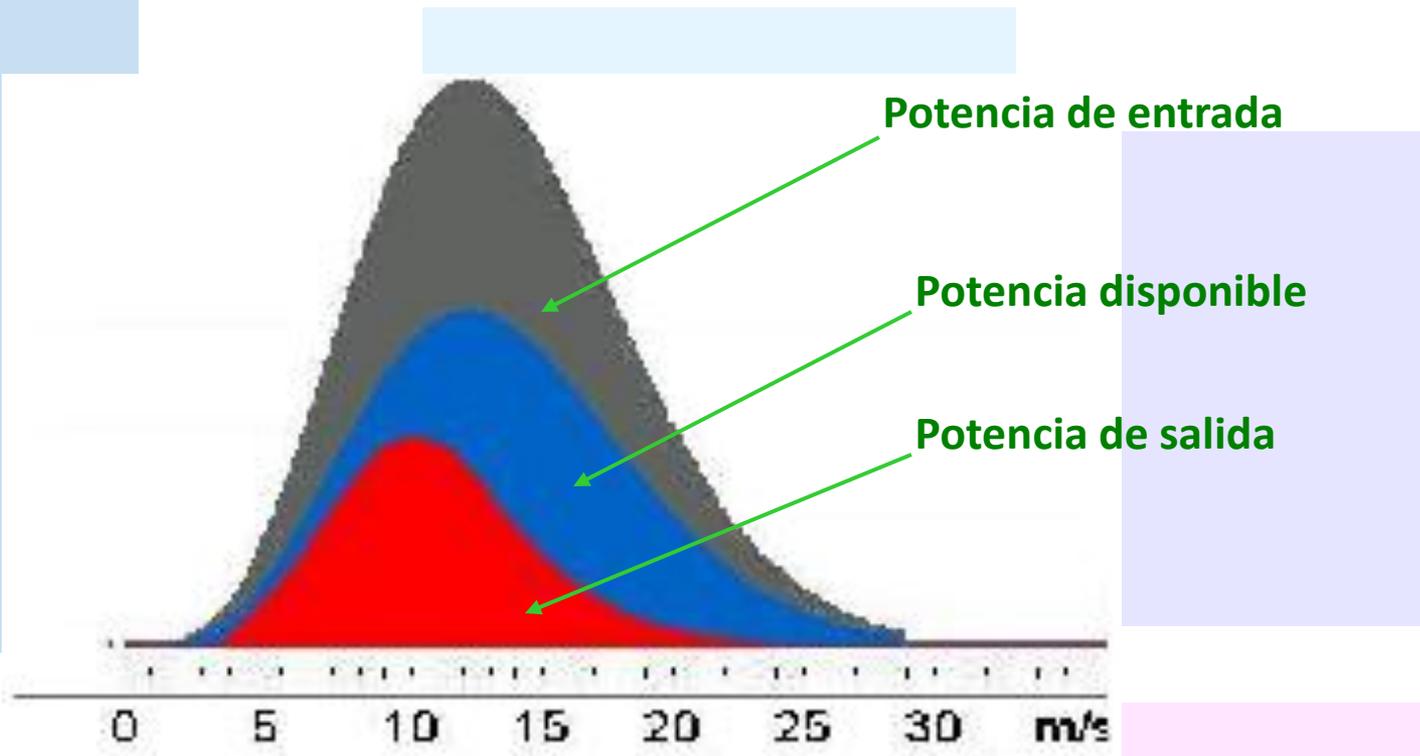
- P_0 : Potencia mecánica extraída por el rotor en $[W]$.
- v_1 : Velocidad del viento que incide en el rotor en $\left[\frac{m}{s}\right]$.
- v_2 : Velocidad del viento que abandona el rotor en $\left[\frac{m}{s}\right]$.
- Δm : Flujo de masa que atraviesa el rotor en $\left[\frac{kg}{s}\right]$.





Características del Recurso Eólico

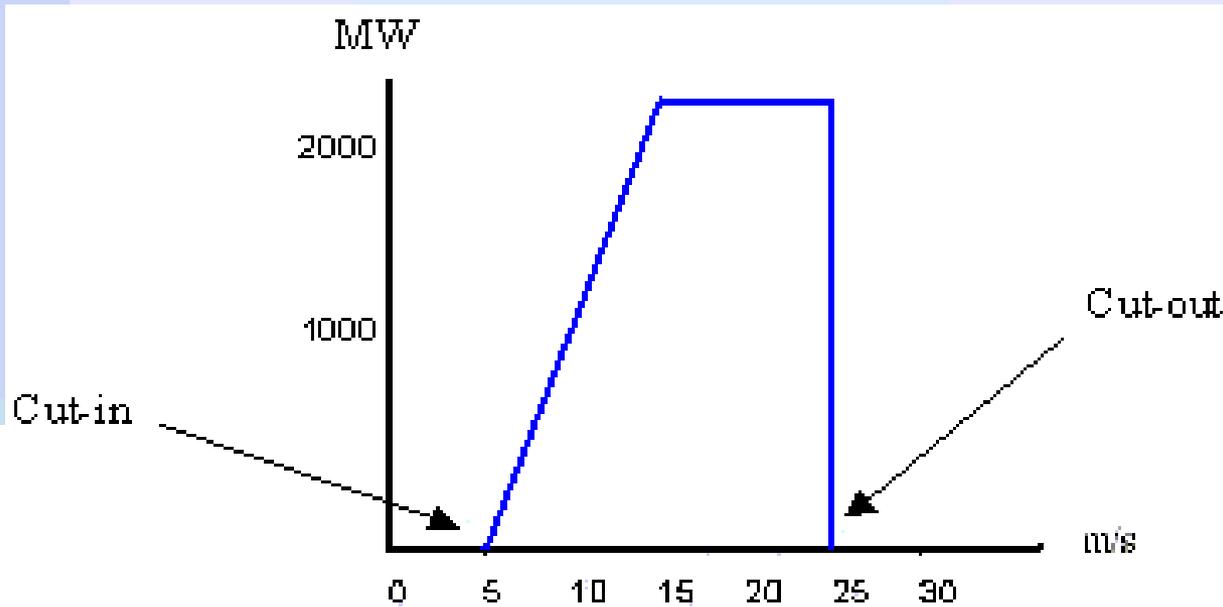
Así:





Características del Recurso Eólico

La *Curva de Potencia del Aerogenerador* es la relación entre la potencia capaz de generar la turbina bajo diversas condiciones de viento.

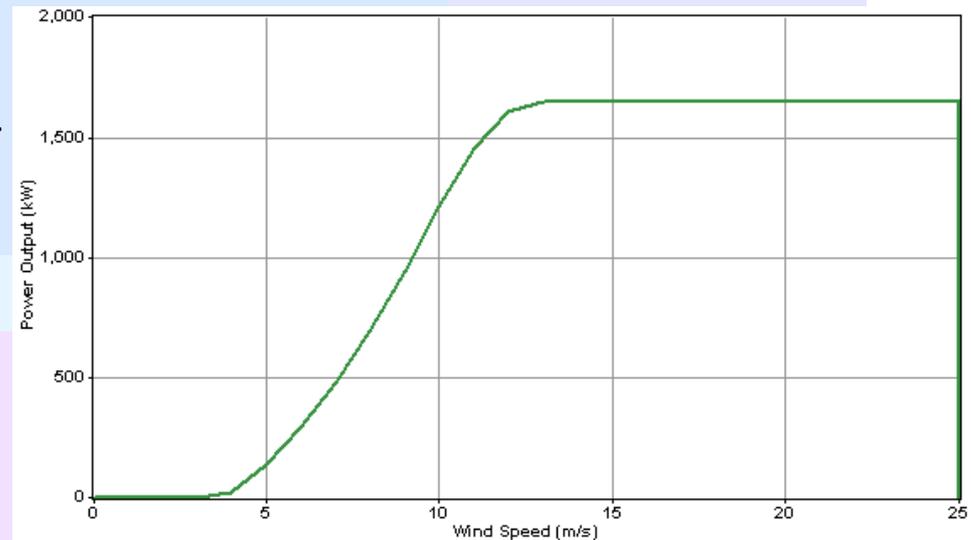




Curva y Control de Potencia

- Medición en terreno: Anemómetro es situado sobre un mástil relativamente cerca del aerogenerador (no sobre el mismo aerogenerador ni demasiado cerca de él).
- Si la velocidad del viento no está variando muy rápidamente, pueden usarse las medidas realizadas con el anemómetro y leer la potencia eléctrica disponible directamente del aerogenerador, y dibujar los dos tipos de valores conjuntamente en un gráfico similar al de la izquierda.

- Curva de Potencia Generador Vestas V82.
- Potencia Nominal: 1.650 kW.
-



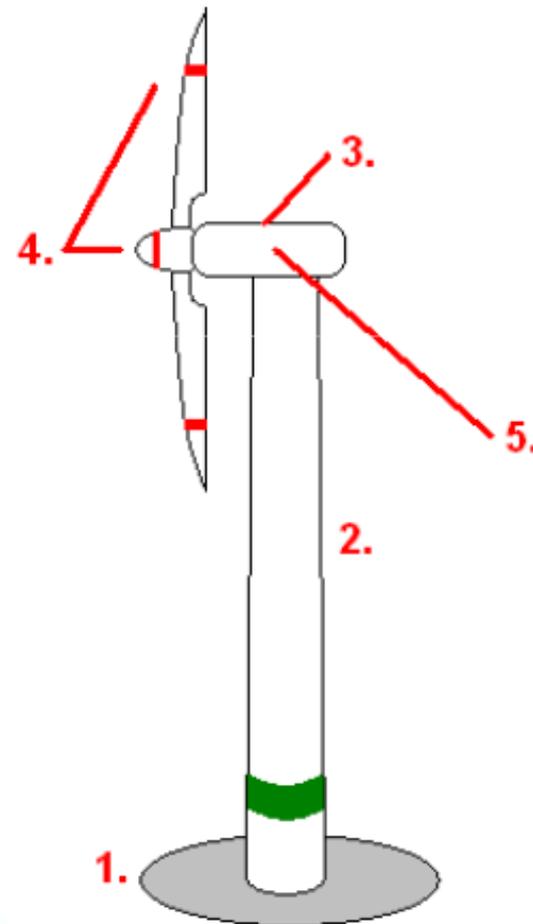


Componentes de Generador Eólico

Turbina Eólica de Eje Horizontal

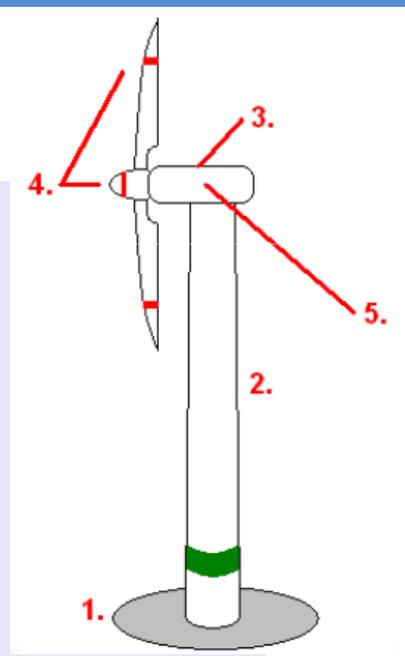
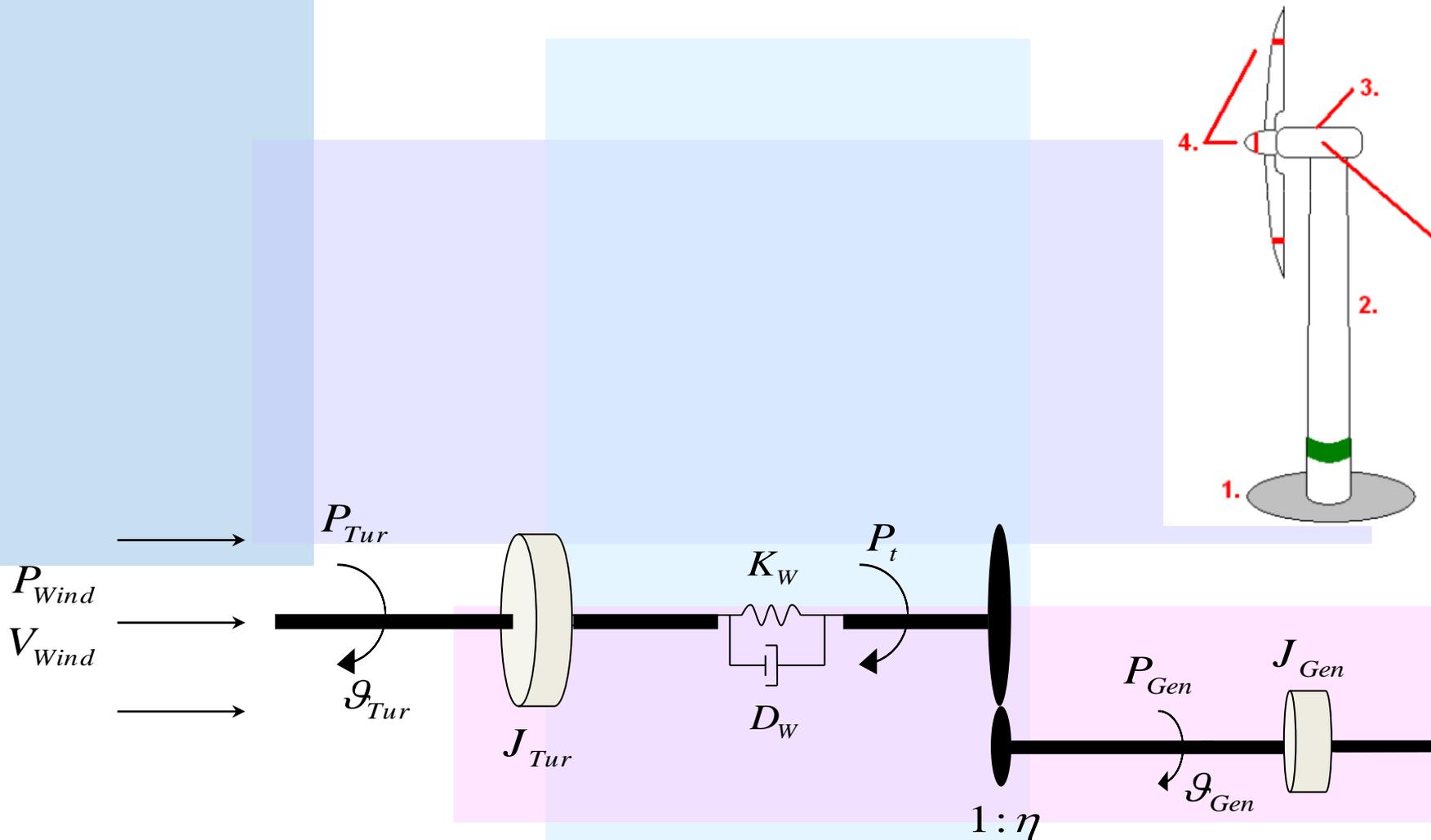
- Componentes Principales:

1. Fundación
2. Torre
3. Cabeza (Nacelle)
4. Rotor y Aspas
5. Generador y Equipos Eléctricos





Componentes de Generador Eólico

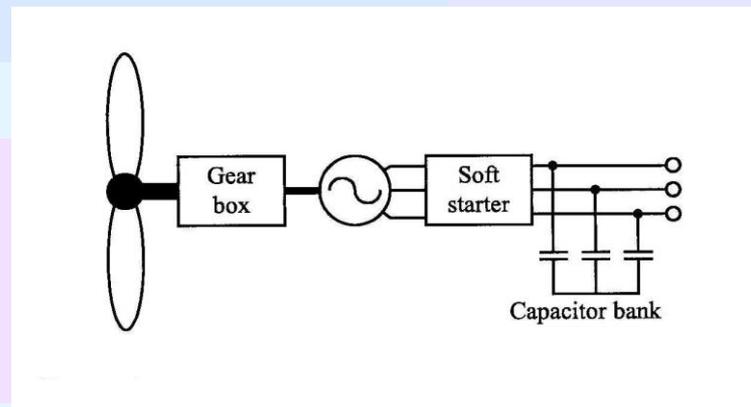


Energía Eólica – EL6000



Generadores de Inducción con Velocidad Fija

- Emplean estrategias de control de pitch control y stall control.
- El sistema requiere de un mecanismo de partida “suave”, un banco de condensadores y una caja de cambios, puesto que la velocidad rotacional de la turbina es considerablemente menor a la velocidad del generador.
- Problema de regulación de voltaje en régimen permanente: incapacidad de controlar el consumo de reactivos a través de generador, por lo cual el voltaje en el punto de acoplamiento está determinado por la potencia activa entregada a la red.
- Variaciones dinámicas del voltaje: Dependen de la eficiencia del pitch y stall control.
- Problema con la conexión y desconexión del banco de condensadores que regula el consumo de reactivos del generador (Conmutación por pasos).

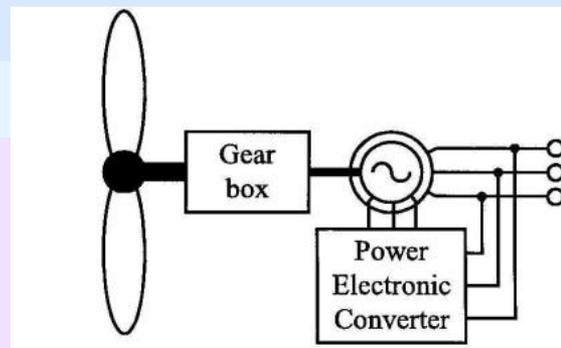


Energía Eólica – EL6000



Generadores de Inducción a Velocidad Variable

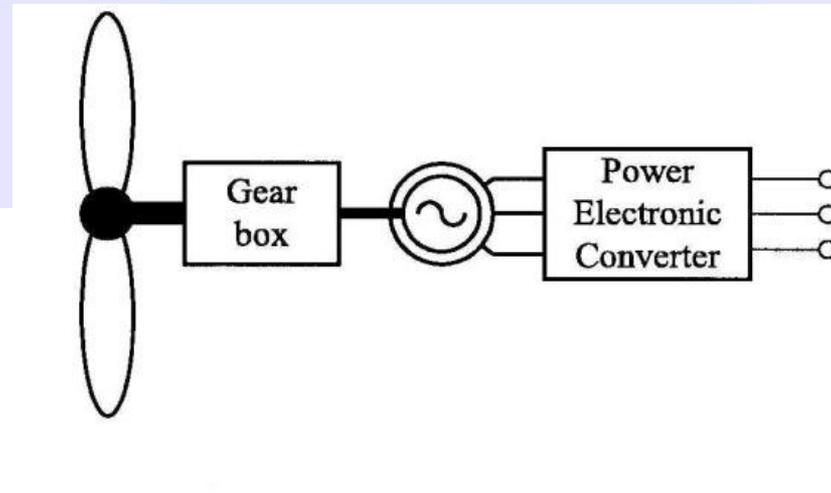
- **Generador de Inducción con Control sobre la Resistencia del Rotor:**
 - El estator de la máquina va directamente conectado a la red, en tanto que los devanados del rotor se encuentran equipados con interruptores y resistencias.
 - El control de la velocidad del generador se consigue variando la resistencia rotórica.
- **Generador de Inducción con Convertidor en el Rotor:**
 - Consiste en conectar los anillos rozantes del rotor de la máquina a un convertidor que se encarga de regular la velocidad del eje a través de la frecuencia de las corrientes del rotor.
 - Esta configuración permite un control sobre los reactivos consumidos por el generador.





Generadores de Inducción a Velocidad Variable

- **Generador de Inducción Tipo Jaula de Ardilla:**
- El control sobre la potencia inyectada a la red se lleva a cabo conectando el generador de inducción a la red a través de un convertidor (rectificador-inversor).
- No existe imposición sobre la velocidad del eje.
- Control natural de la potencia reactiva





Generadores Eólicos

Tipo de turbina	Perturbación al conectar a la red	Regulación de Voltaje	Flicker	Distorsión armónica	Control de reactivos
Velocidad fija / generador de inducción con stall- control	Moderado	No controlado	Moderado	-	Banco de condensadores
Velocidad fija / generador de inducción con pitch- control	Moderado	No controlado	Alto	-	Banco de condensadores
Velocidad variable / generador de inducción con control de resistencia rotórica	Moderado	Controlado	Moderado	-	Banco de condensadores
Velocidad variable / generador de inducción con convertidor en el rotor	Moderado	Controlado	Bajo	Moderado	Controlado
Velocidad variable / generador sincrónico conectado a través de un convertidor de potencia	Bajo	Controlado	Bajo	Moderado- Alto	Controlado



Control de un parque con generadores de inducción doblemente alimentados

