



Generación de Energía Eléctrica con Fuentes Renovables EL-6000

Modulo Energía Eólica

**Semestre Primavera 2010
Ing. Keith Watt Arnaud**



4. Tecnologías de Generación



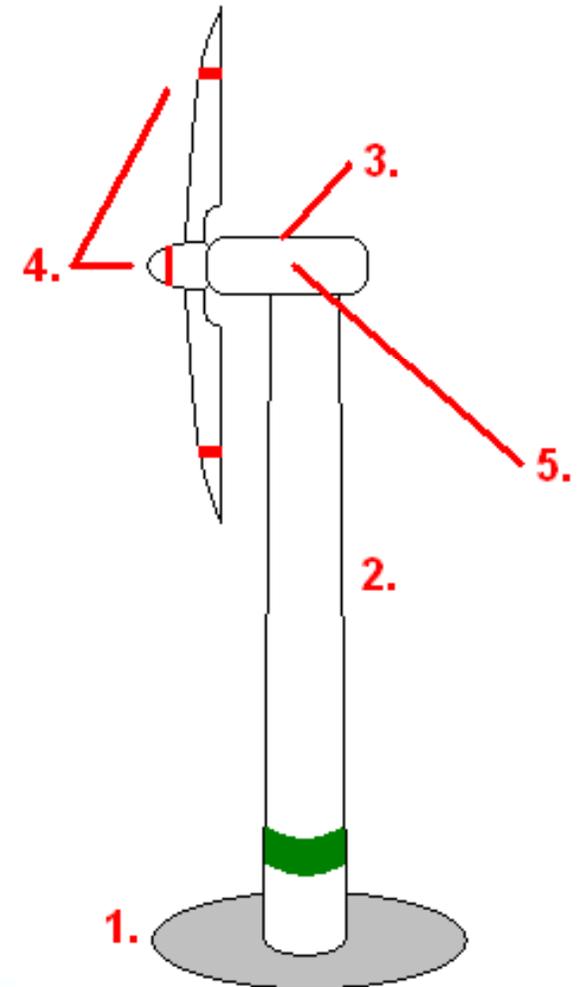
Tipos de Turbinas

- Eje Horizontal
 - Mayor eficiencia aerodinámica
 - Aprovechamiento del mejor perfil de velocidades a alturas mayores
 - Diseño permite maximizar coeficiente de poder
 - Fuerza de arranque (Lift)
- Eje Vertical
 - Multi-direccionalidad
 - Fuerza de Arrastre (Drag)
- Mayoría de turbinas modernas son de eje horizontal.



Componentes de la Turbina

- Componentes de una Turbina Eólica de eje horizontal
 1. Fundación
 2. Torre
 3. Cabeza (Nacelle)
 4. Rotor y Aspas
 5. Generador y Equipos Eléctricos



La Fundación

- Es el elemento que fija la torre a la tierra ofreciendo estabilidad estructural a esta.
 - **Fundaciones Superficiales (Shallow)**
 - Las más comunes
 - Para suelos mas rígidos
 - **Fundaciones Pile**
 - En suelos más blandos
 - » De mayor costo
 - **Simétricas o Asimétricas**
 - Diseño circular permite un diseño más la turbina



La Torre

- Gran Costo (15-20% del costo total del proyecto)
- Dilema entre altura vs generación.
 - Torres más altas son más caras
 - Torres más altas generan más energía
- Amplia Gamma de Tecnologías
 - Torre Metálicas
 - Torres de Hormigón
 - Torres de Acero Tubular
- Turbina de 1500 kW y 80 m
 - ~ 310.000 €
 - 207 €/kW



La Cabeza (Nacelle)

- Es la casa de máquinas de la Turbina

- Alberga los equipos eléctricos

- Controladores aerodinámicos
- Controladores Electrónica de Potencia

- Motores de Control

- Motores de giro de las aspas (Blade Control)
- Motores de giro de la cabeza (Yaw control)

- Eje Acoplador

- Eje de Rotación de la Turbina
- Caja Acopladora de Velocidad
- Eje de Rotación del Generador
- Freno Mecánico

- Generador

- Equipos de Electrónica de Potencia

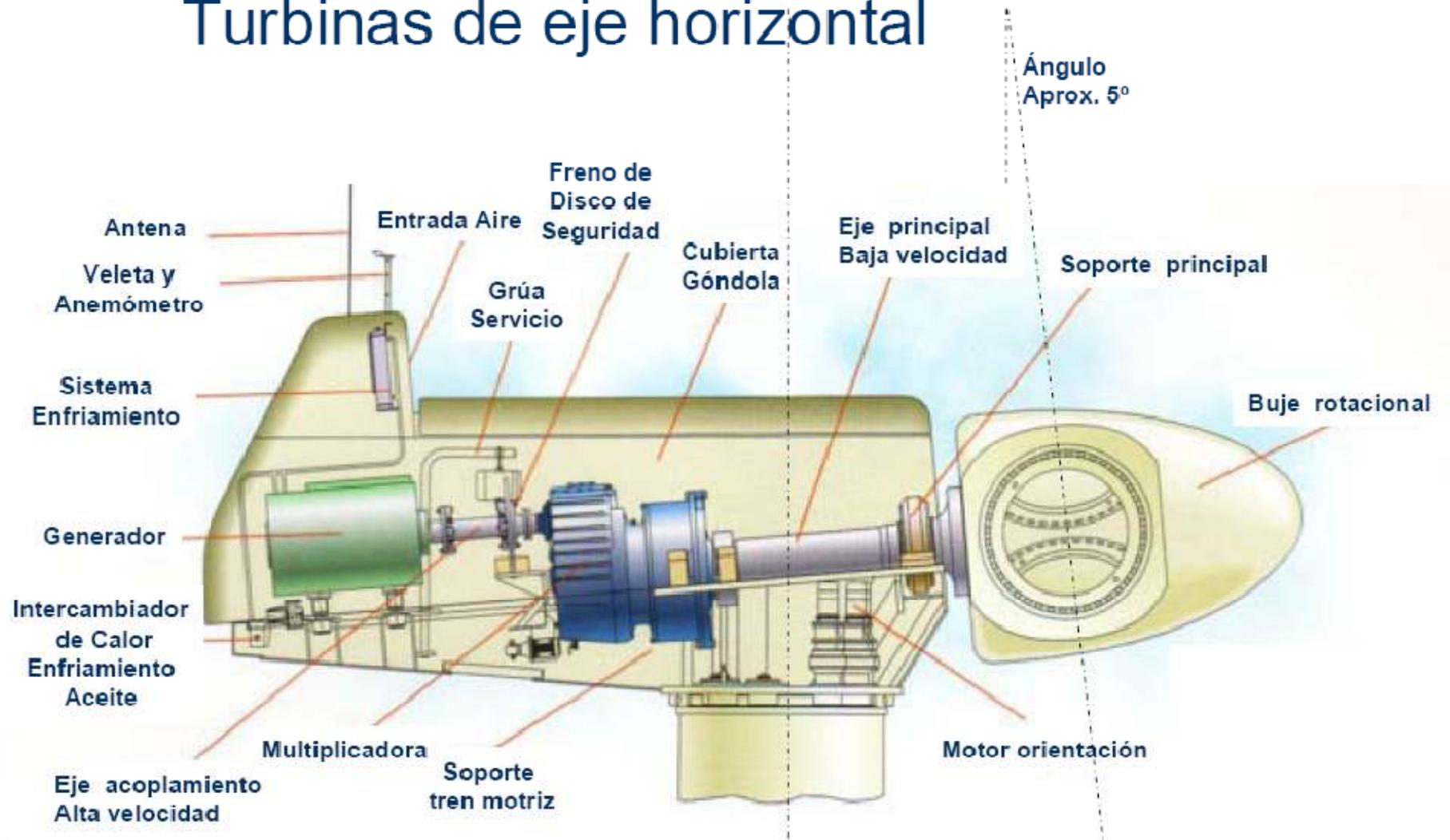
- Transformador

- Pueden pesar decenas de Toneladas



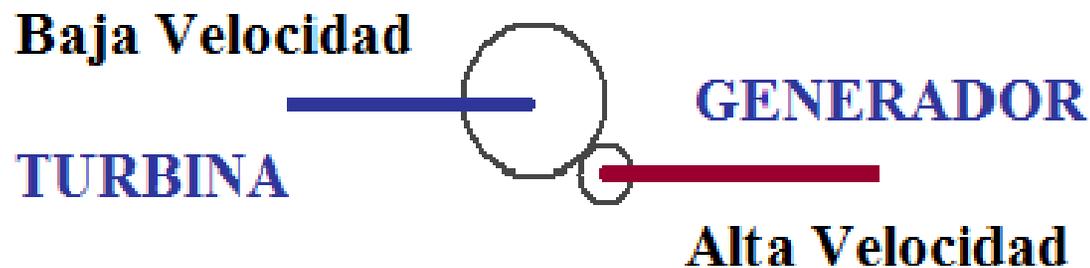
La Cabeza (Nacelle)

Turbinas de eje horizontal



La Cabeza (Nacelle)

- La Caja de Engranajes
 - Equipo que acopla eje de baja velocidad (Turbina) con el eje de alta Velocidad (Generador)



- Común en Aerogeneradores de Inducción y Doblemente Alimentado

La Cabeza (Nacelle)

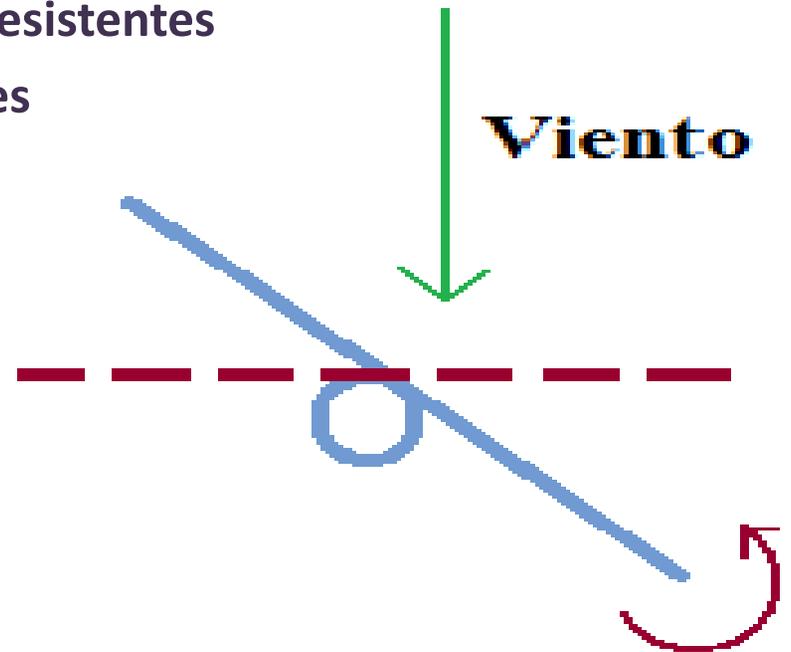
- Generadores Directos al Buje
 - Generador de Varios Polos
 - Mayor Tamaño
 - Ahorro en Caja de Velocidad



- Común en Aerogeneradores Sincrónicos de Imanes Permanente
 - Gran rango de velocidad de 18-39 [rpm]

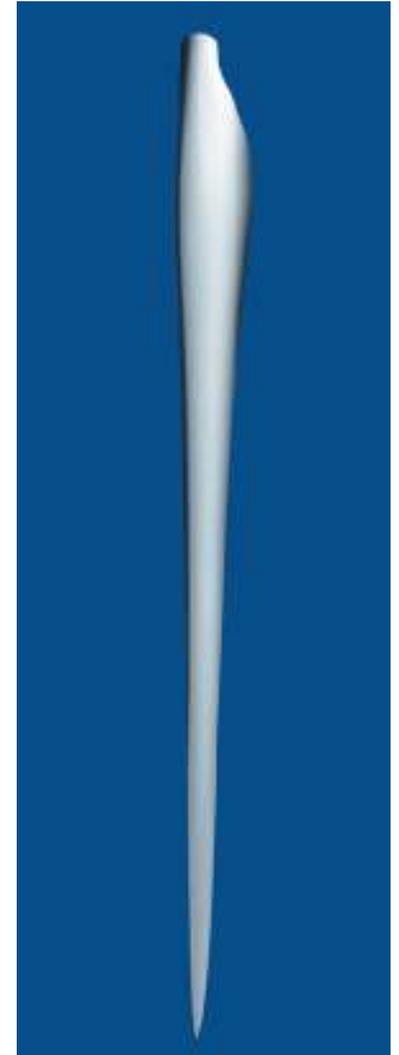
La Cabeza (Nacelle)

- Control de Direccionalidad
 - Viento no es Unidireccional
 - **Puede tener múltiples direcciones**
 - Necesidad de girar turbina para maximizar generación de energía
 - Mayores Costos de Inversión
 - » **Materiales más livianos & resistentes**
 - » **Motores Eléctricos eficientes**



Rotor y Aspas

- Encargado en transformar la energía cinética en mecánica
 - Mediante la fuerza de Arranque (Lift)
 - Similar al funcionamiento de un avión
- Turbinas Modernas emplean 2 o 3 aspas
 - 3 aspas es el concepto más usado
- Amplia gamma de materiales
 - Fibra de vidrio y Fibras de carbono (más liviano y flexible)
 - Madera (más rígido, mayor mantención, reciclable)
- Pueden pesar Varias Toneladas
 - Rotor modelo Vestas V90 \approx 37 toneladas



Rotor y Aspas

- Existen tres conceptos principales de Control de la Potencia

- Stall Control

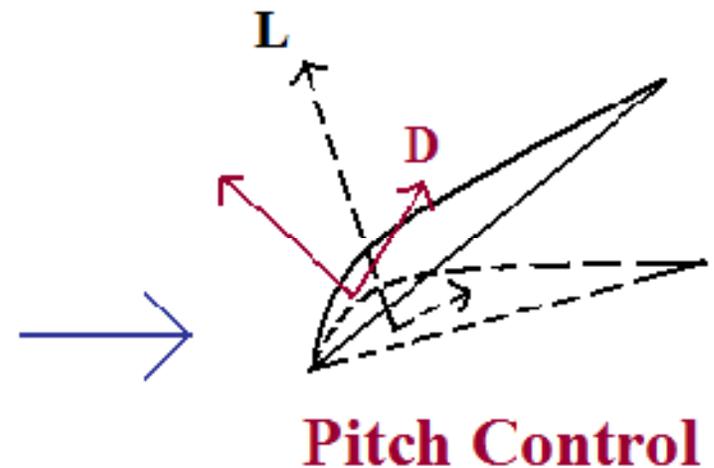
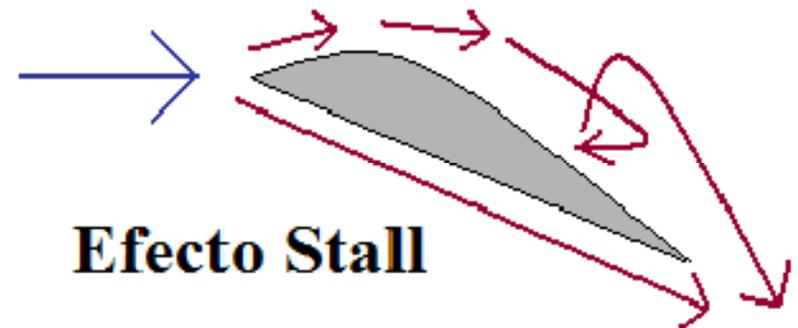
- Aspas diseñadas con ángulo fijo tal de crear turbulencia a altas velocidades

- Active Stall Control

- Angulo de Incidencia de las aspas se giran hacia el Viento creando turbulencias

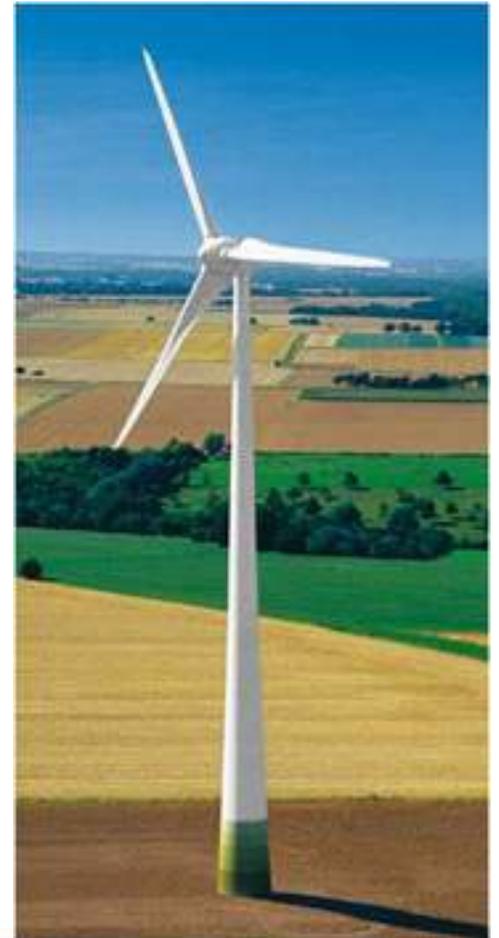
- Pitch Control

- Angulo de incidencia de las aspas se gira en contra del viento disminuyendo las fuerzas de Arranque.



Generador & Equipos Eléctricos

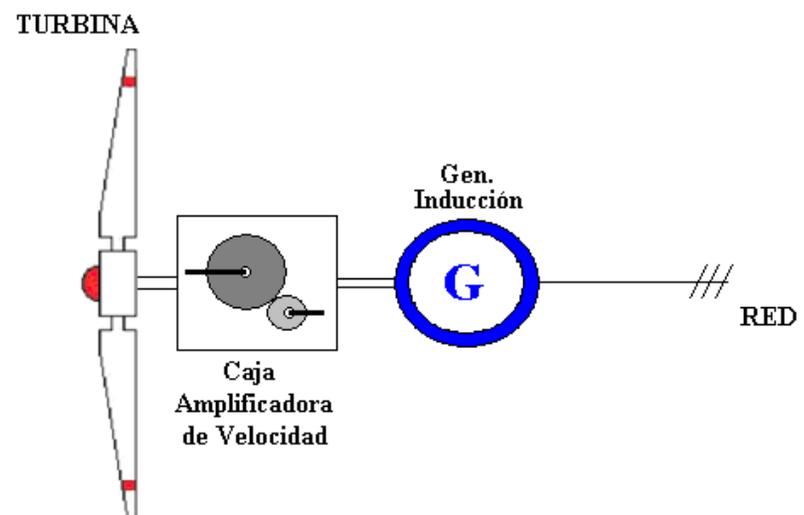
- Generador puede ser
 - Inducción
 - Inducción Doblemente Alimentado
 - Sincrónico
 - Otras.
- Equipos Eléctricos
 - Para la conexión a la red.
 - Transformadores elevadores
 - Equipos de Electrónica de Potencia (Rectificadores e Inversores)
 - Equipos de Compensación



Generador & Equipos Eléctricos

- Velocidad Fija

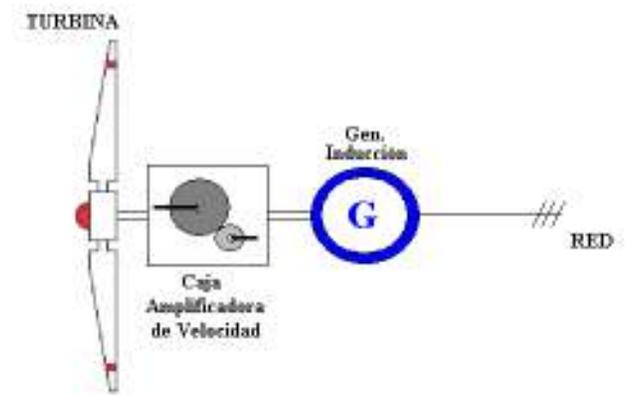
- Maquina de inducción directamente conectada a la red
- Absorbe Potencia Reactiva
- Necesidad de Instalación de Equipos de Compensación
- Estrategia de Control Simple
 - **No tiene capacidad de Regulación de Potencia Activa y Reactiva**
- Velocidad mayor que la sincrónica
- Rango pequeño de operación
- Rápida conexión a la red
- Menor Costo de Inversión
- Menor Costo de Mantenimiento



Generador & Equipos Eléctricos

- Velocidad Fija

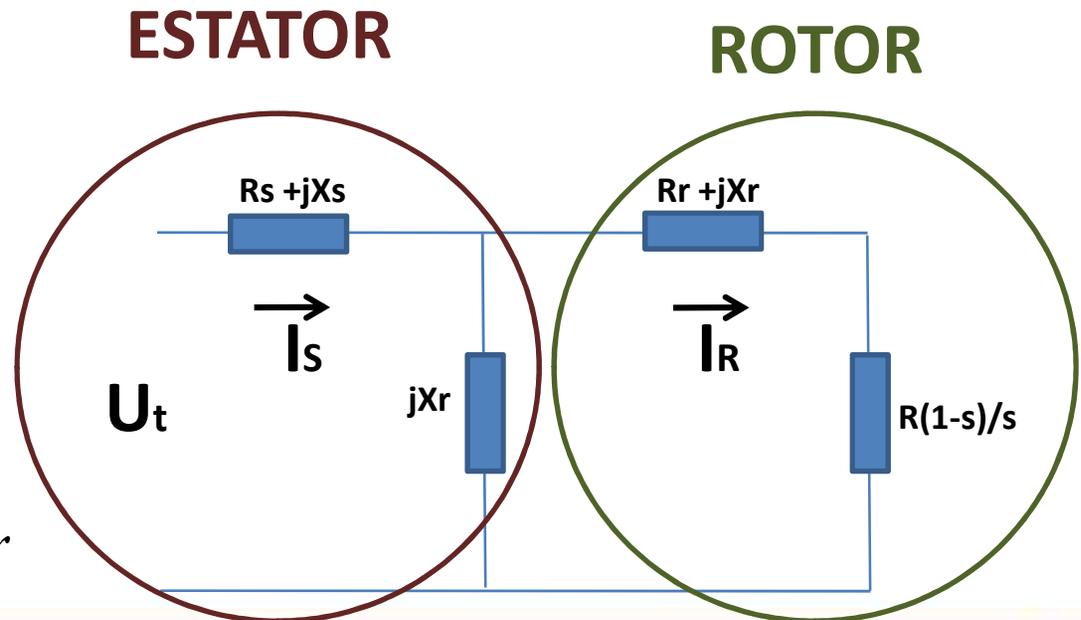
- U_t : Tensión en bornes de la Máquina
- I_s : Corriente en el Estator
- I_r : Corriente en el Rotor



$$P_{Mec} = R_r \left(\frac{1-s}{s} \right) I_r^2$$

$$s > 0 \Rightarrow P_{Mec} > 0 \Rightarrow \text{Motor}$$

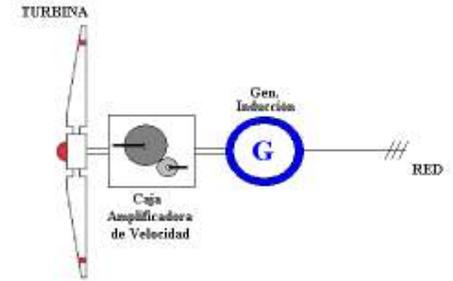
$$s < 0 \Rightarrow P_{Mec} < 0 \Rightarrow \text{Generador}$$



Generador & Equipos Eléctricos

- Velocidad Fija

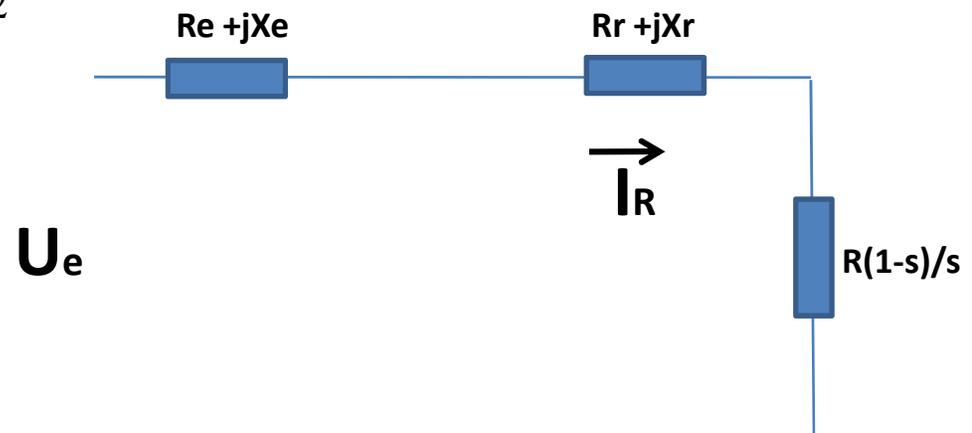
- U_e : Tensión Equivalente en Estator
- I_r : Corriente en el Rotor
- T_{ele} : Torque Electromagnético



$$U_e = \frac{jX_m U_t}{R_s + j(X_s + X_m)}$$

$$R_e + jX_e = \frac{jX_m (R_s + jX_s)}{R_s + j(X_s + X_m)}$$

$$T_{ele} = \frac{3P_{Mec}}{\omega_{Mec}} = 3R_r \left(\frac{1-s}{s} \right) I_r^2$$



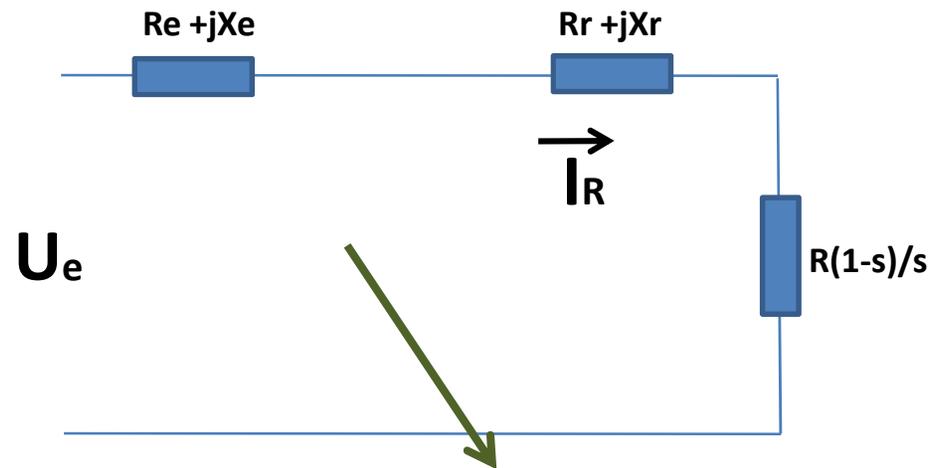
Generador & Equipos Eléctricos

- Velocidad Fija

- P: Numero de polos Rotor
- ω_{mec} : Velocidad mecánica Rotor

$$\omega_{Mec} = \omega_s (1 - s) \frac{2}{p}$$

$$T_{ele} = \frac{3P_{Mec}}{\omega_{Mec}} = 3 \frac{p}{2} \left(\frac{R_r}{\omega_s s} \right) I_r^2$$



$$I_r = \frac{U_e}{\left(R_e + \frac{R_r}{s} \right) + j(X_e + X_r)}$$

$$T_{ele} = 3 \frac{p}{2} \left(\frac{R_r}{s \omega_s} \right) \frac{U_e^2}{\left(R_e + \frac{R_r}{s} \right)^2 + (X_e + X_r)^2}$$

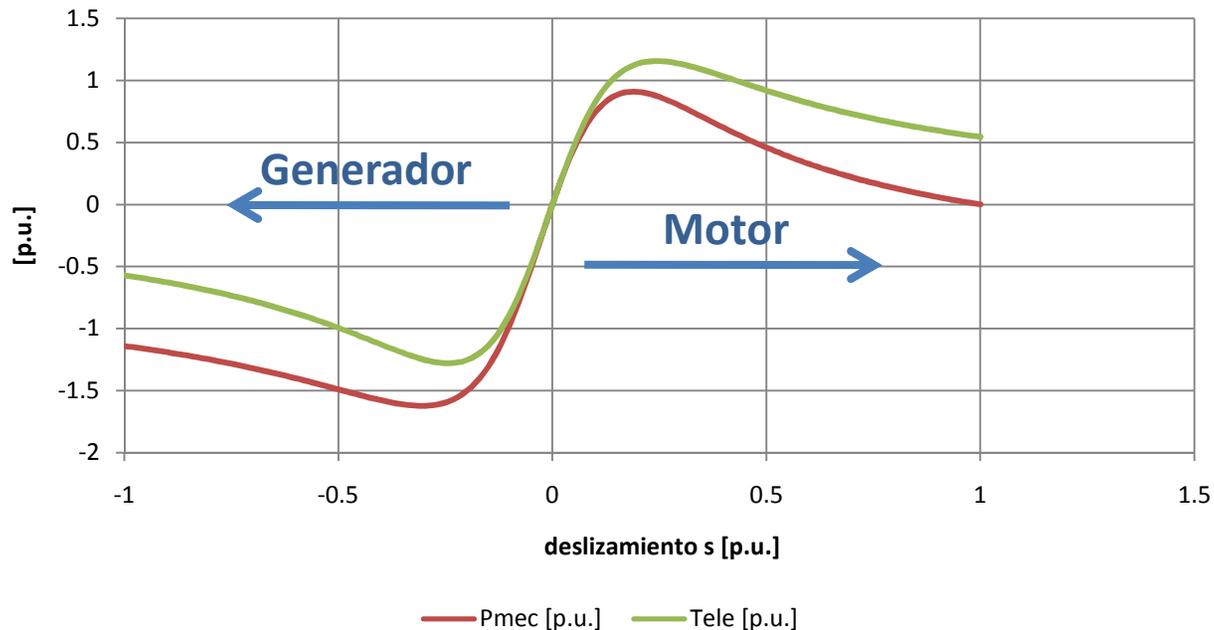
Generador & Equipos Eléctricos

- Velocidad Fija

- $\omega_{mec} > \omega_s \rightarrow s < 0$ Gen.
- $\omega_{mec} < \omega_s \rightarrow s > 0$ Motor

$$T_{ele} = 3 \frac{p}{2} \left(\frac{R_r}{s \omega_s} \right) \frac{U_e^2}{\left(R_e + \frac{R_r}{s} \right)^2 + (X_e + X_r)^2}$$

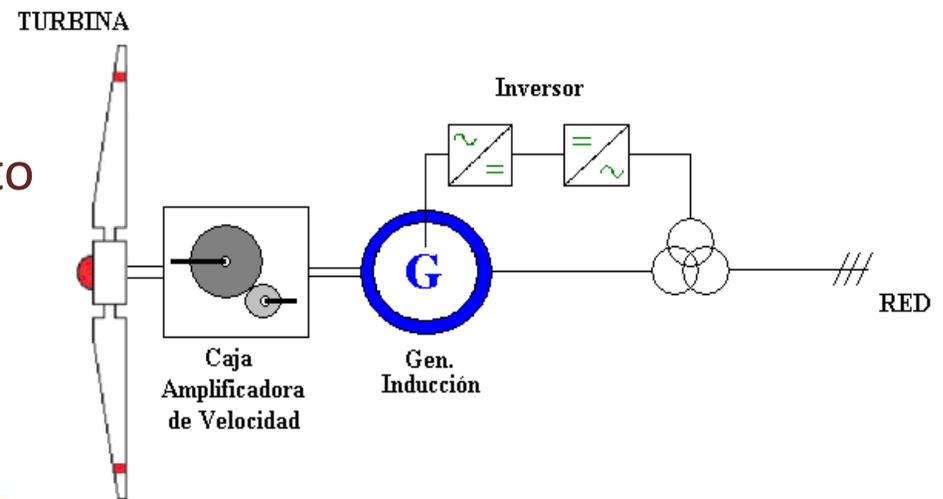
Torque y Potencia vs deslizamiento



Generador & Equipos Eléctricos

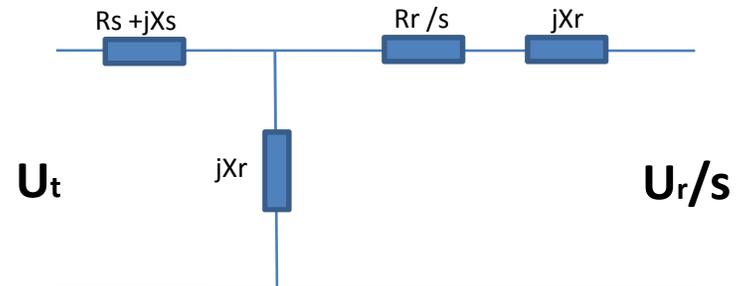
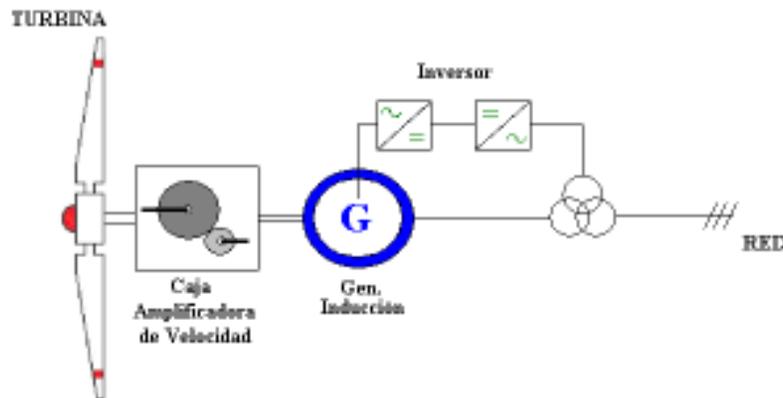
- Doblemente Alimentado

- Velocidad Controlable (Gran rango de operación)
- Control de la tensión en el rotor mediante etapa Rectificador – Inversor (AC-DC-AC)
 - Del orden del 20 al 40 % de la capacidad del aerogenerador
- Capacidad limitada de Aporte de reactivos
- Esquema de Control de mayor Complejidad
- Mayores costo de Inversión
 - Esquemas de Control
 - Rectificador e Inversor
- Mayores costos de Mantenimiento



Generador & Equipos Eléctricos

- Doblemente Alimentado
 - El conversor AC-DC-AC Controla la Tensión Alternada del Rotor
 - Se puede Controlar el Nivel de Potencia Activa y Reactiva que se genera
 - Producto del deslizamiento de la máquina
 - Tensión alterna del rotor debe tener frecuencia del rotor
 - Este concepto necesita de un control de la velocidad del rotor
 - Control más Sofisticado

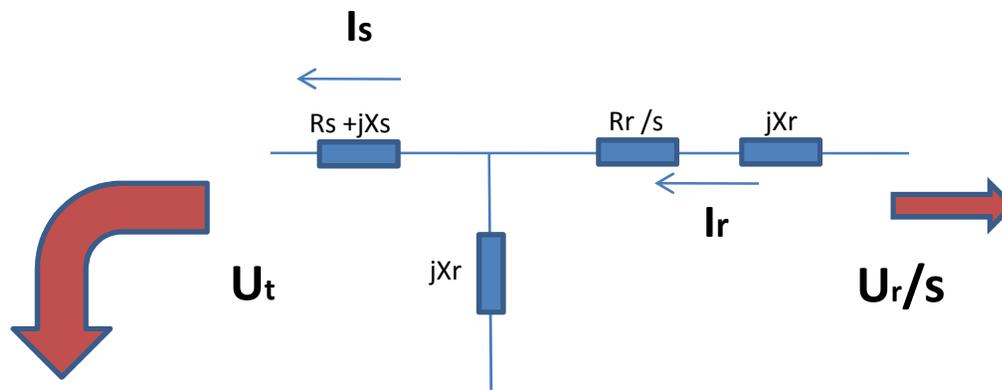
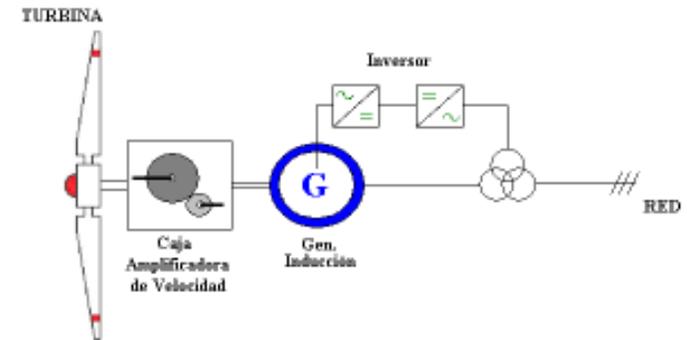


Generador & Equipos Eléctricos

- Doblemente Alimentado

- El conversor AC-DC Lado de la Red.
 - Mantiene tensión DC constante
- Conversor DC-AC Lado del Rotor
 - Controla Tensión del Rotor

» Permite Controlar la potencia Activa y Reactiva inyectada por la máquina.



$$P_{rotor} = U_r I_r \cos(\angle U_r - \angle I_r)$$

$$Q_{rotor} = U_r I_r \sin(\angle U_r - \angle I_r)$$

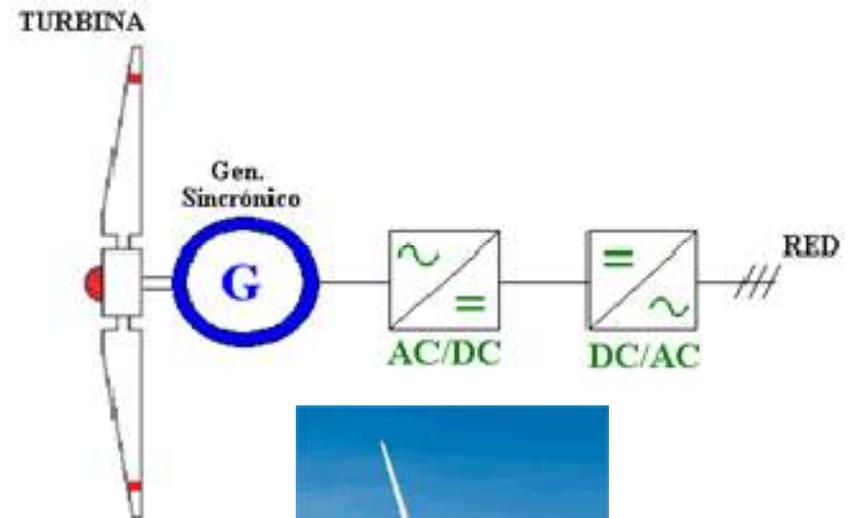
$$P_{estator} = U_t I_s \cos(\angle U_t - \angle I_s)$$

$$Q_{estator} = U_t I_s \sin(\angle U_t - \angle I_s)$$

Generador & Equipos Eléctricos

- Generador Síncronico

- Velocidad Variable
- Completamente desacoplado del sistema
- Posibilidad de controlar Aporte de Potencia Activa y Reactiva
- Mayor flexibilidad de Operación
- Generación de corrientes armónicas
- Necesidad de Sincronizar Inversor con la Red
 - Control más sofisticado
- Mayor Inversión
 - Rectificador e Inversor de 100% de la Capacidad del Generador



Generador & Equipos Eléctricos

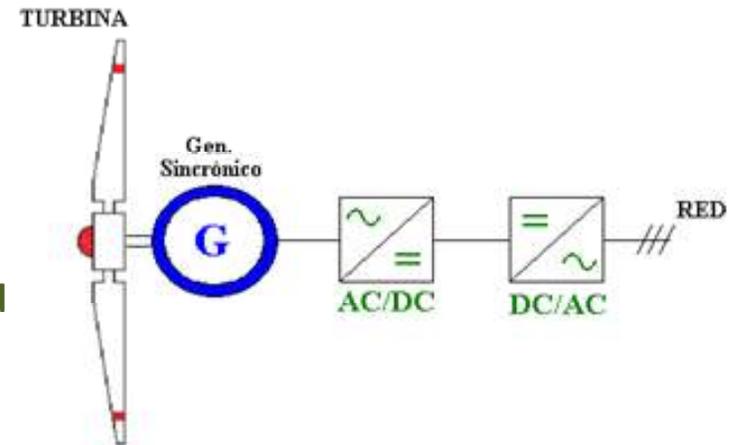
- Generador Sincrónico

- Generador Sincrónico

- Genera una Tensión a $f \neq 50$ Hz

- Inversor

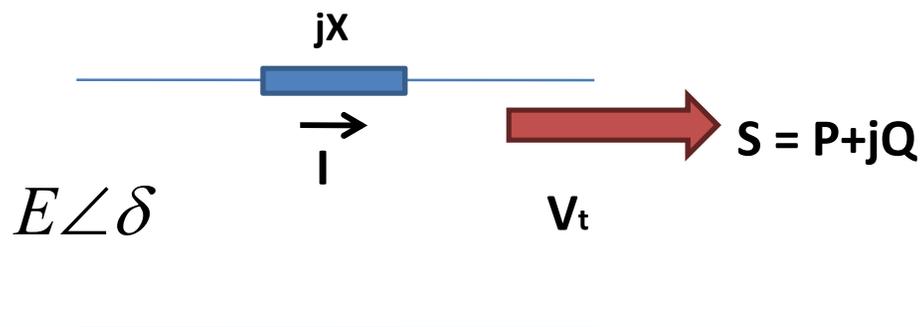
- Permite inyectar la Potencia del generador a la red de 50 Hz



$$E \angle \delta = V_t + jXI$$

$$I = \frac{E \angle \delta - V_t}{jX} = \frac{E \cos(\delta) + jE \sin(\delta) - V_t}{jX}$$

$$I = \frac{E \sin(\delta)}{X} - j \frac{E \cos(\delta) - V_t}{X}$$



$$S = VI^* = P + jQ$$

$$P = \frac{EV \sin(\delta)}{X}$$

$$Q = \frac{EV_t \cos(\delta) - V_t^2}{X}$$

Electrónica de Potencia

- Componentes

- Compuestos de Válvulas semiconductoras

- Diodos

- No permiten un control en el momento de la rectificación

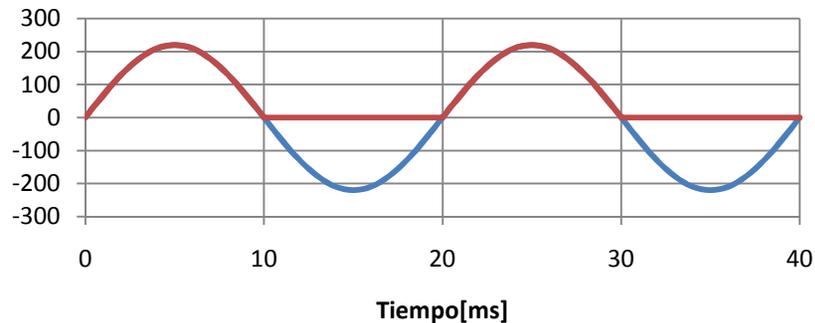
- Tiristores

- Mediante la señal de compuerta se puede controlar el momento de conducción

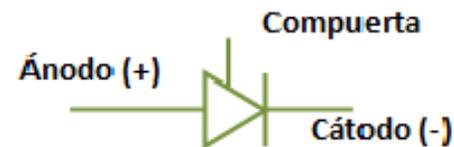


Diodo

Tensiones

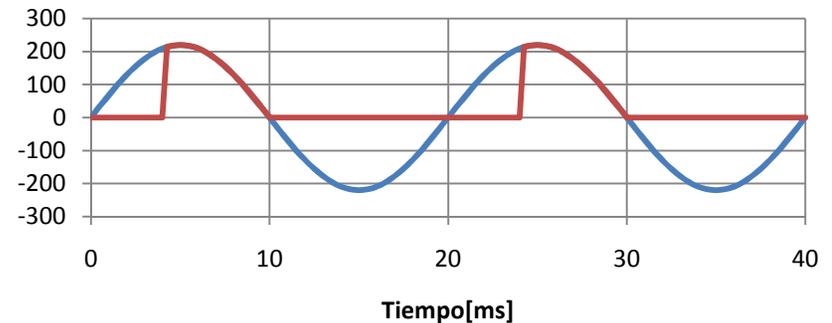


— Entrada — Diodo



Tiristor

Tensiones



— Entrada — Tiristor

Electrónica de Potencia

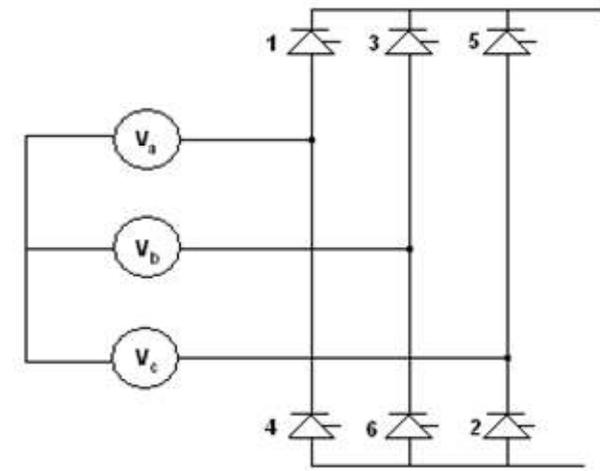
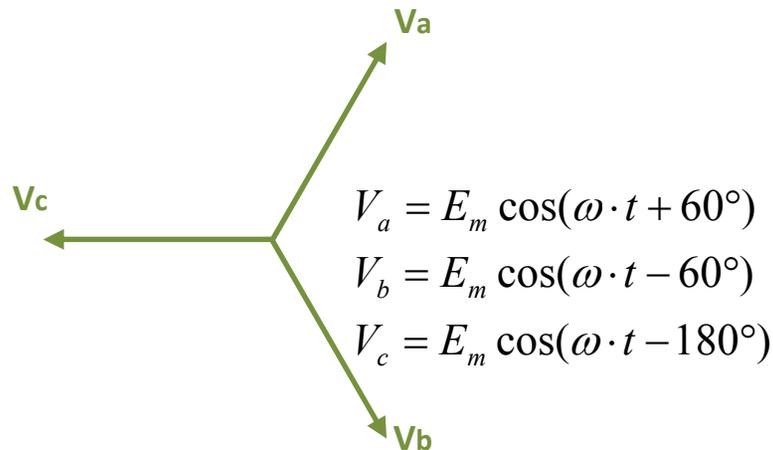
• Rectificadores

- Modifican la tensión de alterna a continua
- Compuestos de
 - Puentes rectificadores

$$V_{ac} = \sqrt{3}E_m \cos(\omega \cdot t + 30^\circ)$$

$$V_{ba} = \sqrt{3}E_m \cos(\omega \cdot t - 90^\circ)$$

$$V_{cb} = \sqrt{3}E_m \cos(\omega \cdot t - 150^\circ)$$



Tensiones

