

fcfm

Generación de Energía Eléctrica con Fuentes Renovables

EL-600

Modulo Energía Eólica



Semestre Primavera 2009

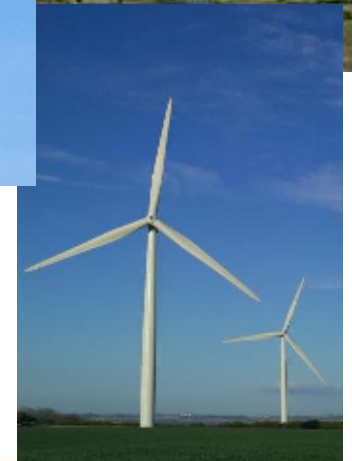
Ing. Keith Watt Arnaud



4. Tecnologías de Generación

Tipos de Turbinas

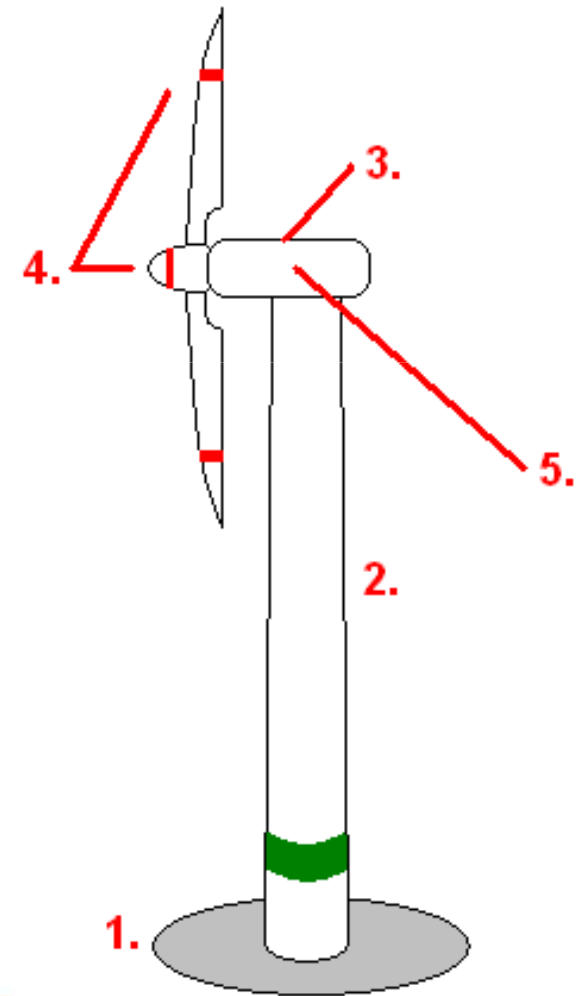
- Eje Horizontal
 - Mayor eficiencia aerodinámica
 - Aprovechamiento del mejor perfil de velocidades a alturas mayores
 - Diseño permite maximizar coeficiente de poder
 - Fuerza de arranque (Lift)
- Eje Vertical
 - Multi-direccionalidad
 - Fuerza de Arrastre (Drag)
- Mayoría de turbinas modernas son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



Componentes de la Turbina

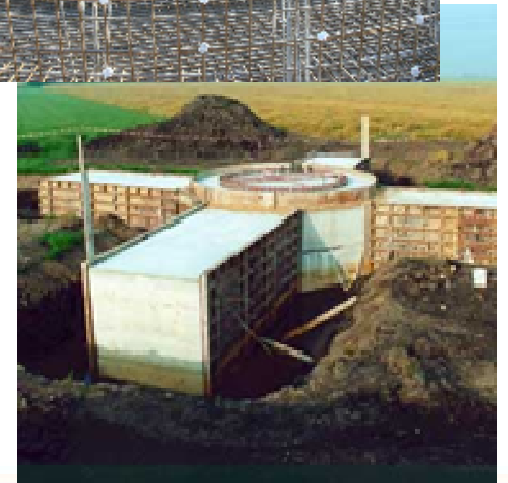
- Componentes de una Turbina Eólica de eje horizontal

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



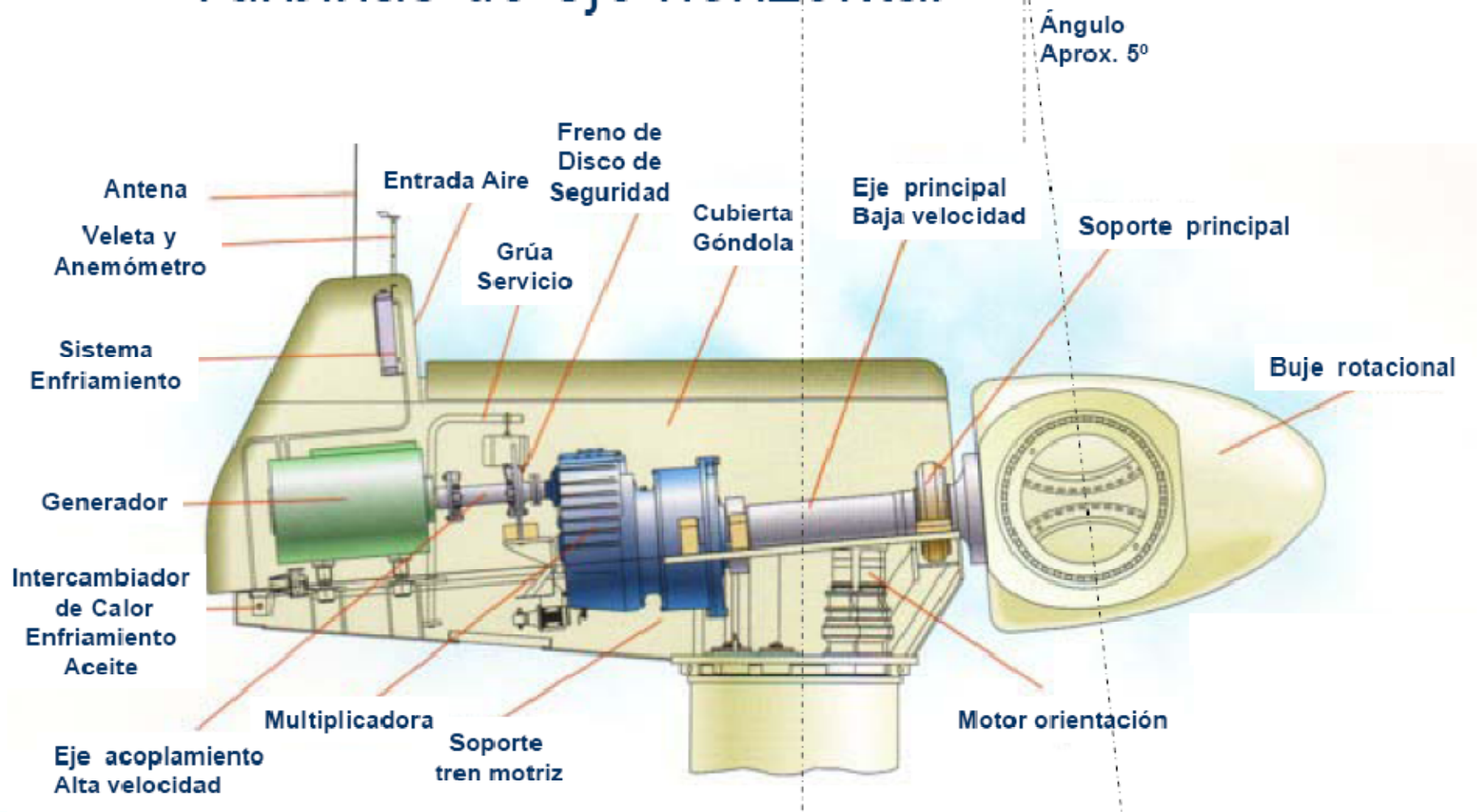
La Cabeza (Nacelle)

- 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



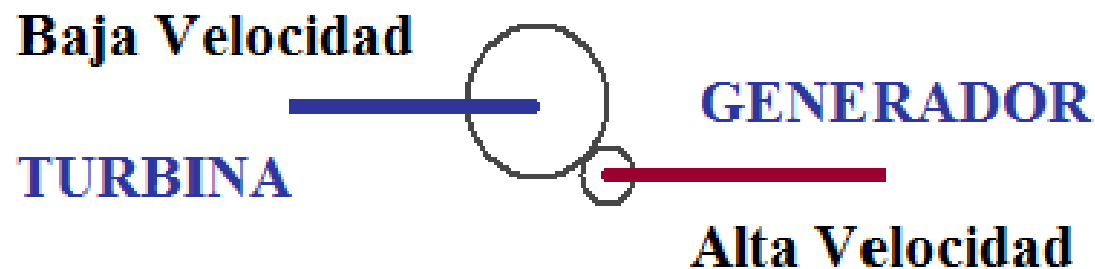
La Cabeza (Nacelle)

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

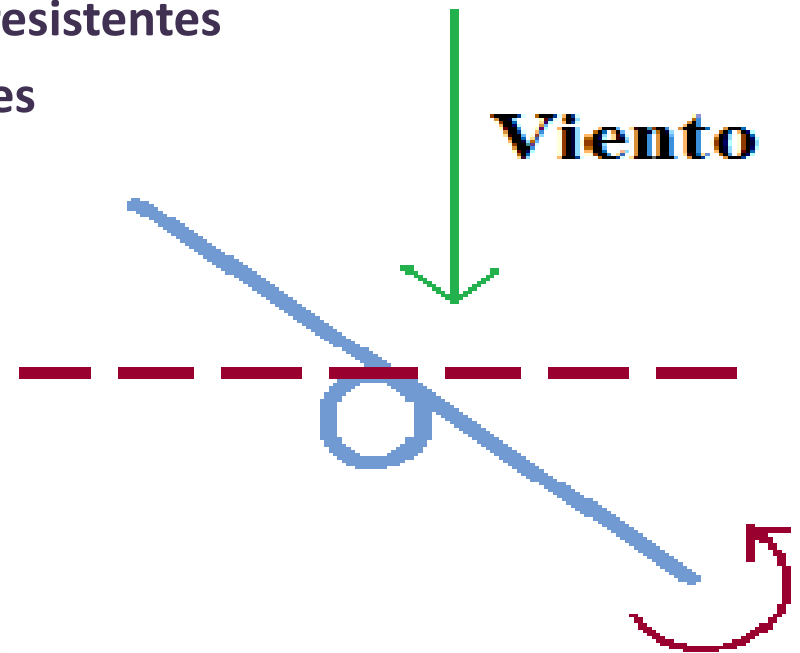


- Común en Aerogeneradores Sincrónicos de Imanes Permanente

- Gran rango de velocidad de 18-39 [rpm]

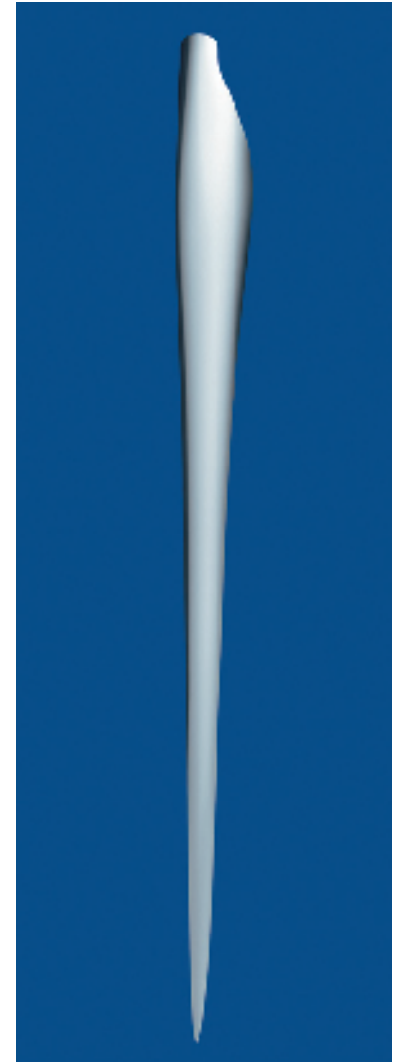
La Cabeza (Nacelle)

- 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**



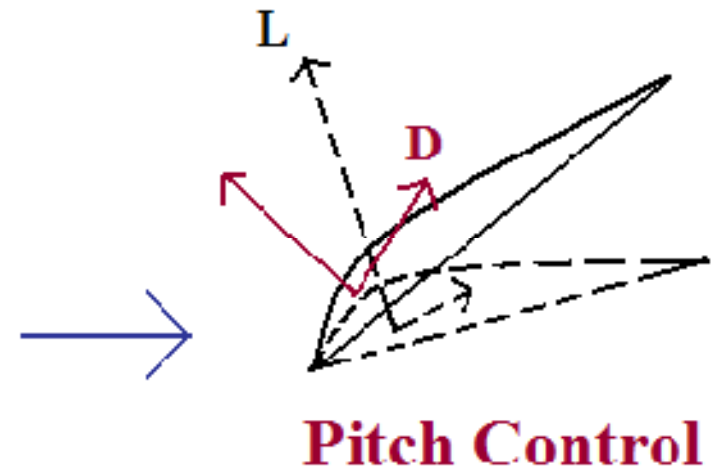
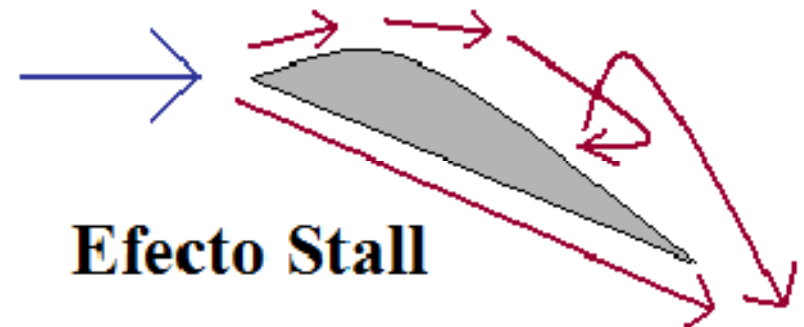
Rotor y Aspas

- 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

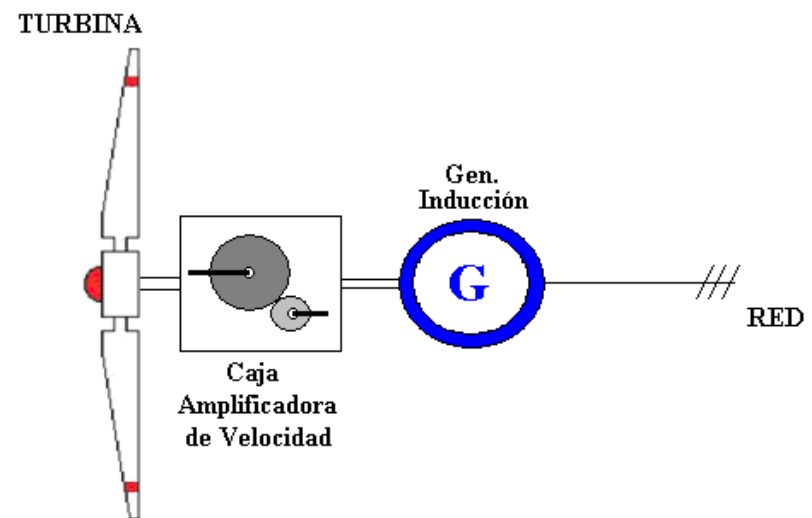
- Generador puede ser
 - Inducción
 - Inducción Doblemente Alimentado
 - Sincrónico
 - Otras.
- Equipos Eléctricos
 - Para la conexión a la red.
 - Transformadores elevadores
 - Equipos de Electrónica de Potencia (Rectificadores e Inversores)
 - Equipos de Compensación



Generador & Equipos Eléctricos

- Velocidad Fija

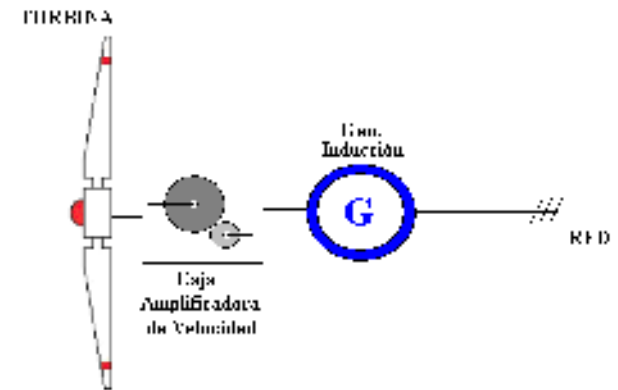
- Maquina de inducción directamente conectada a la red
- Absorbe Potencia Reactiva
- Necesidad de Instalación de Equipos de Compensación
- Estrategia de Control Simple
 - **No tiene capacidad de Regulación de Potencia Activa y Reactiva**
- Velocidad mayor que la sincrónica
- Rango pequeño de operación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



Generador & Equipos Eléctricos

- Velocidad Fija

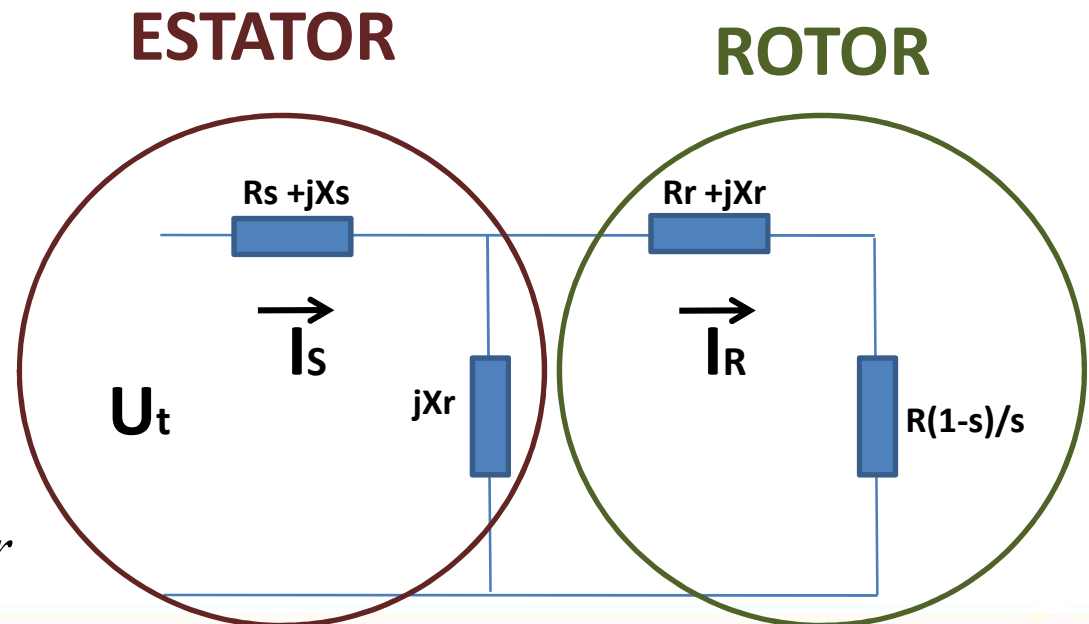
- U_t : Tensión en bornes de la Máquina
- I_s : Corriente en el Estator
- I_r : Corriente en el Rotor



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

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

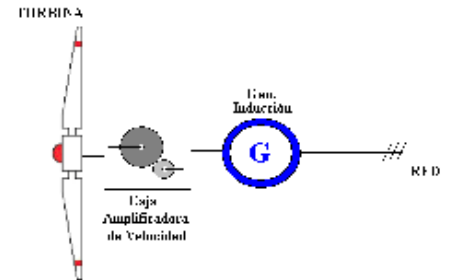
$$s < 0 \Rightarrow P_{Mec} < 0 \Rightarrow \text{Generador}$$



Generador & Equipos Eléctricos

- Velocidad Fija

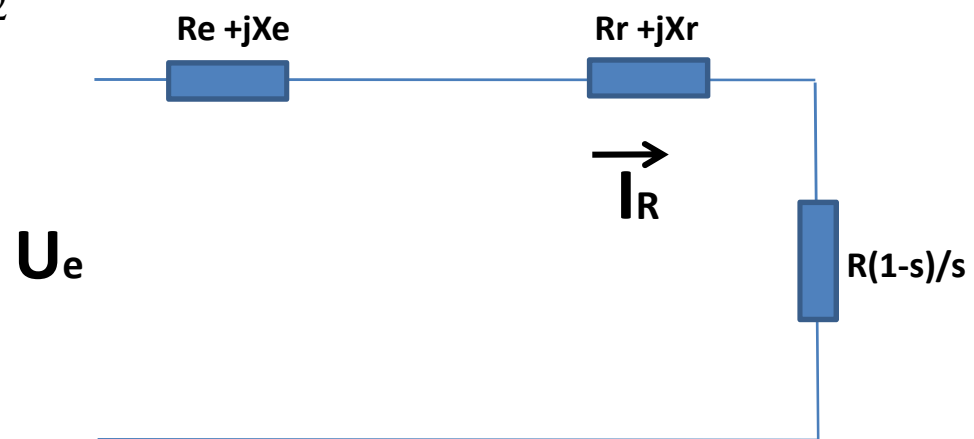
- U_e : Tensión Equivalente en Estator
- I_r : Corriente en el Rotor
- T_{ele} : Torque Electromagnético



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

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

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



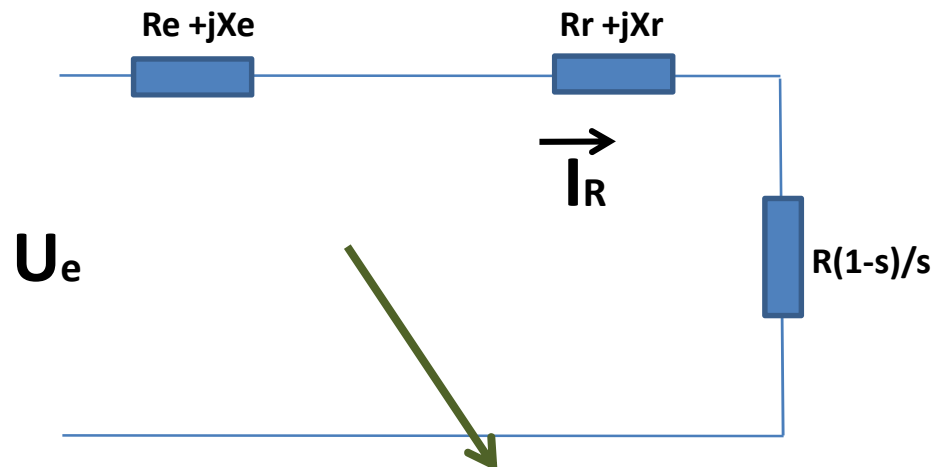
Generador & Equipos Eléctricos

- Velocidad Fija

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

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

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



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

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

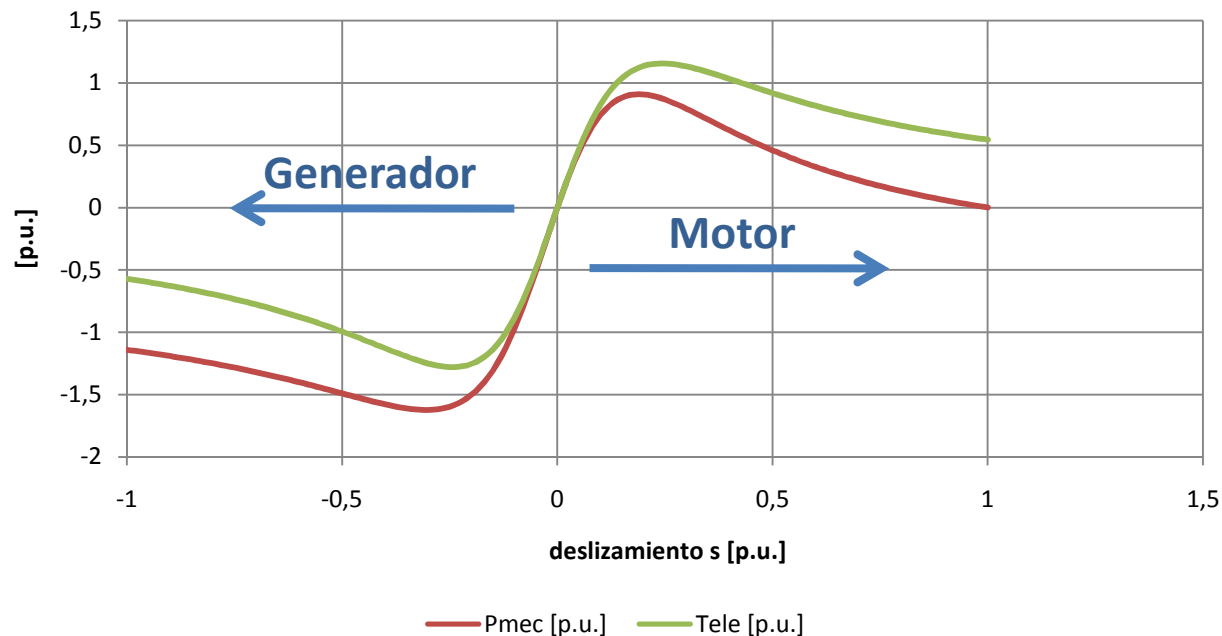
Generador & Equipos Eléctricos

- Velocidad Fija

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

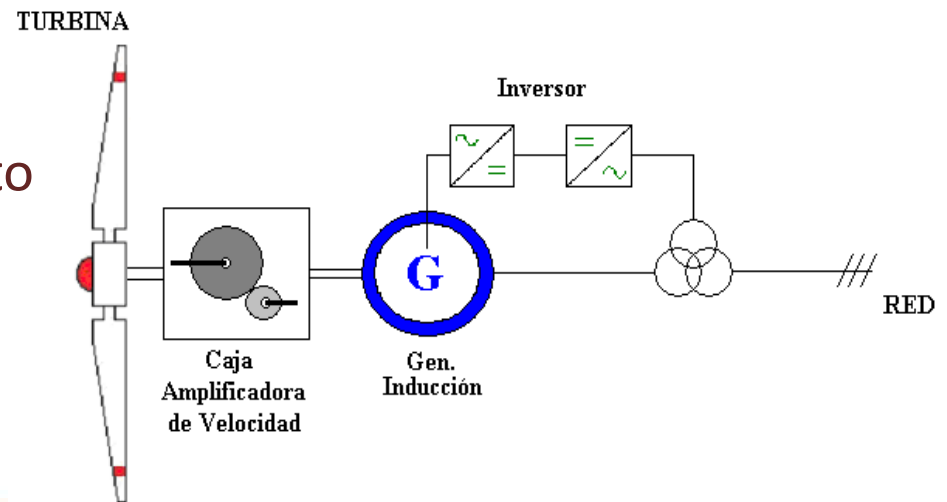
$$T_{ele} = 3 \frac{p}{2} \left(\frac{R_r}{s \omega_s} \right) \frac{U_e^2}{\left(R_e + \frac{R_r}{s} \right)^2 + (X_e + X_r)^2}$$

Torque y Potencia vs deslizamiento



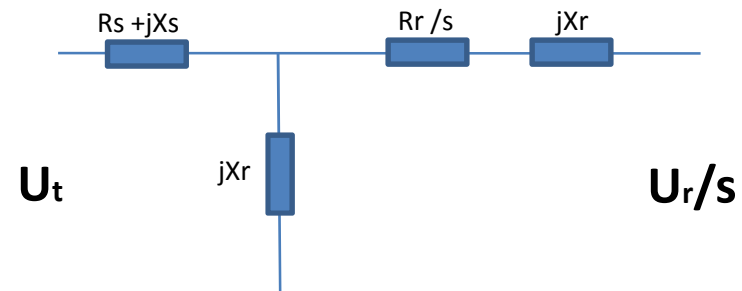
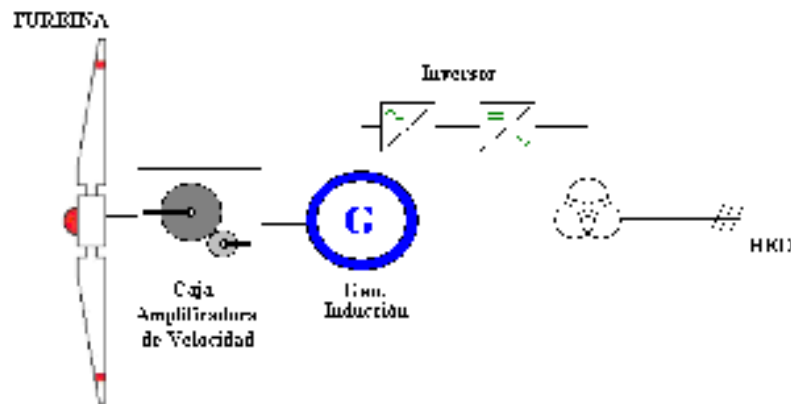
Generador & Equipos Eléctricos

- 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 Alterna 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

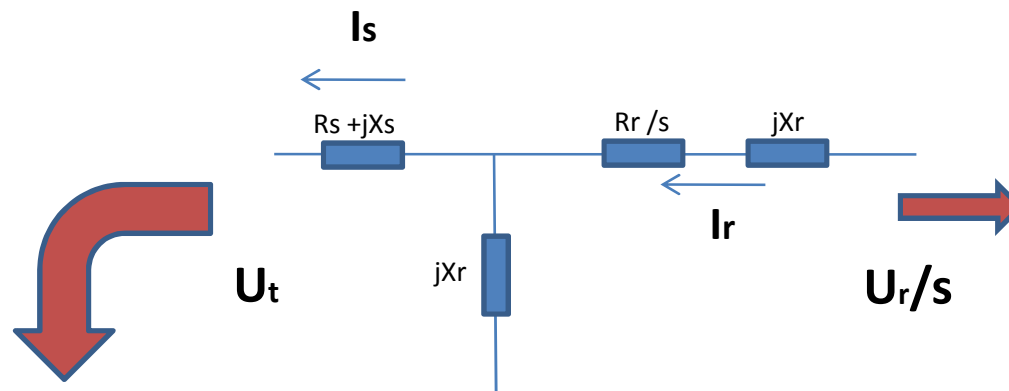
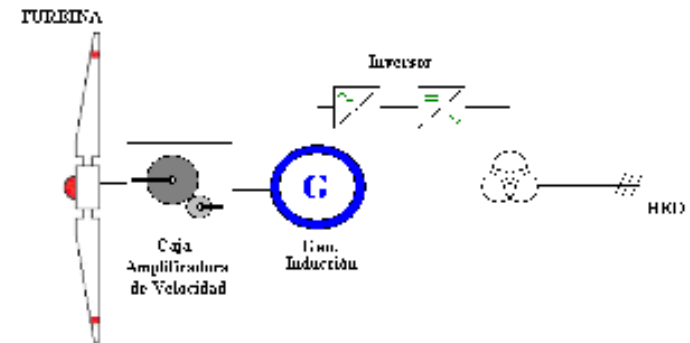
- El conversor AC-DC Lado de la Red.

- 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.



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

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

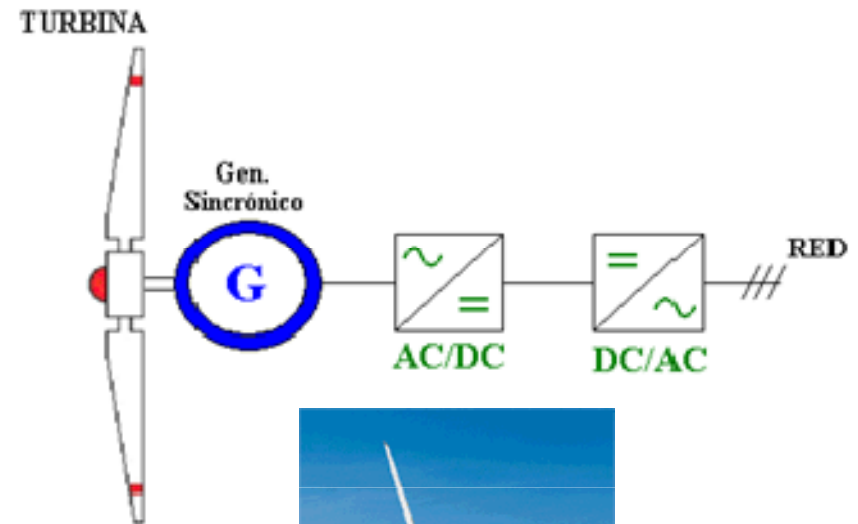
$$P_{estator} = U_t I_s \cos(\angle U_t - \angle I_s)$$

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

Generador & Equipos Eléctricos

- Generador Sincrónico

- 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

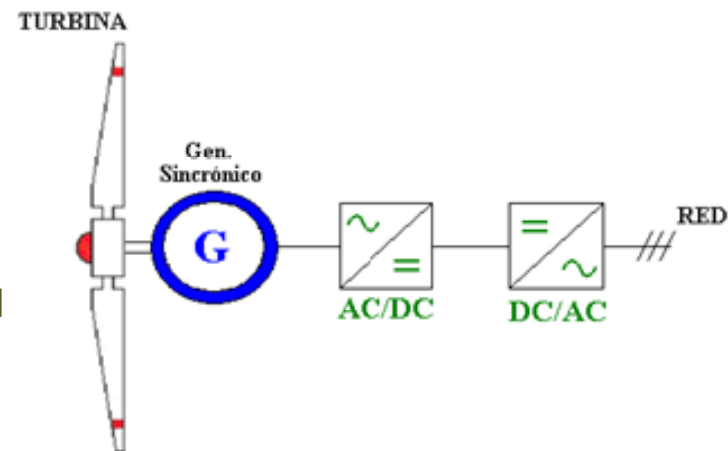
- Generador Sincrónico

- Generador Sincrónico

- Genera una Tensión a $f \neq 50$ Hz

- Inversor

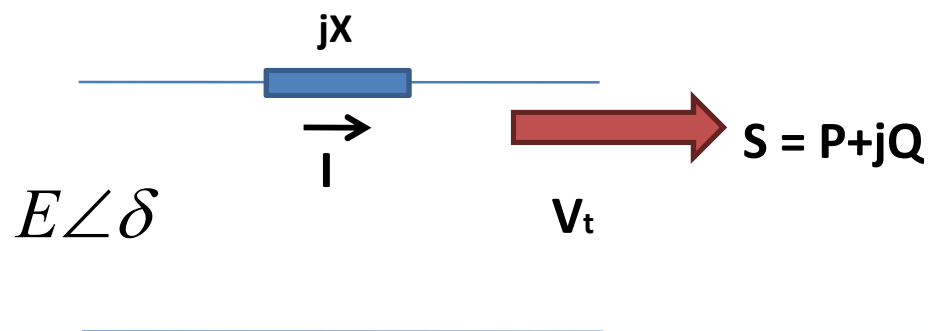
- Permite inyectar la Potencia del generador a la red de 50 Hz



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

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

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



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

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

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