

Introducción al control de aerogeneradores

Joaquín Mur Amada
Dpto. de Ingeniería Eléctrica
Universidad de Zaragoza
Joaquin.Mur@unizar.es

Control de aerogeneradores

- Funcionamiento seguro y fiable
- Monitorización de componentes y variables
- Comprobar variables en rango admisible
- Detección y predicción de fallos

¿Cómo se puede controlar un aerogenerador?

- A través de las señales de control
- Ajustando los valores de referencia
- Cambiando el estado de funcionamiento
- Regulación pasiva: diseñar el sistema para que la propia dinámica del sistema haga innecesario sistemas de control adicionales (materiales aeroelásticos, sistemas mecánicos centrífugos, contrapesos, etc). *Aerogeneradores pequeños*.

Compromiso entre la producción de energía y bajos esfuerzos mecánicos

Pequeños aerogeneradores (para sistemas aislados).

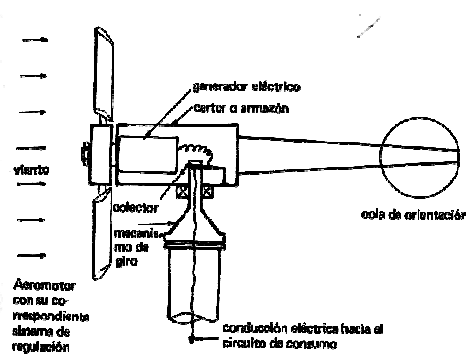


Figura 8. Aerogenerador con aeromotor "cara al viento".

barlovento
(cara al viento)

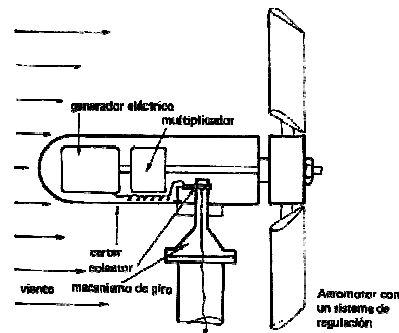


Figura 9. Aerogenerador con aeromotor "de espaldas al viento".

sotavento
(de espaldas al viento)

Regulación de pequeños aerogeneradores (sistemas aislados).

- *Sin regulación.* En la que el aerogenerador se diseña para poder soportar las cargas que se produzcan en todas las condiciones de operación.
- *Regulación por desorientación,* en el que el eje del rotor está desalineado con el plano horizontal respecto a la dirección del viento incidente.
- *Regulación por cabeceo,* similar al anterior, pero en el que la desalineación se produce en el plano vertical.
- *Regulación por cambio de paso* con sistemas pasivos, en los que la variación del ángulo de ataque de las palas se produce mediante sistemas centrífugos, raíz aeroelástica...
- *Regulación por pérdida aerodinámica.*

Orientación mediante la cola del aerogenerador. (Disposición a barlovento)

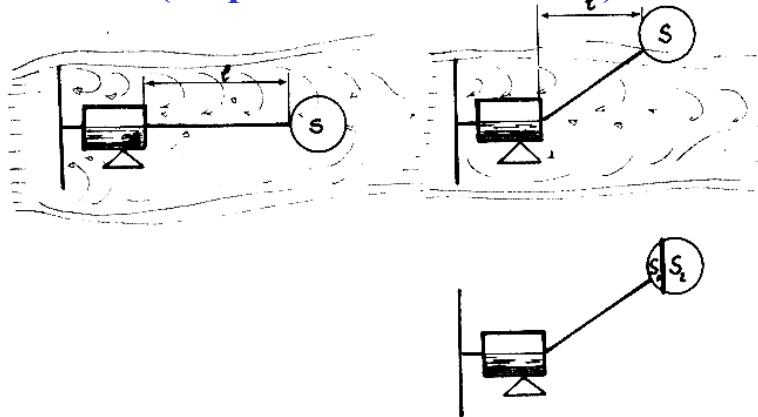
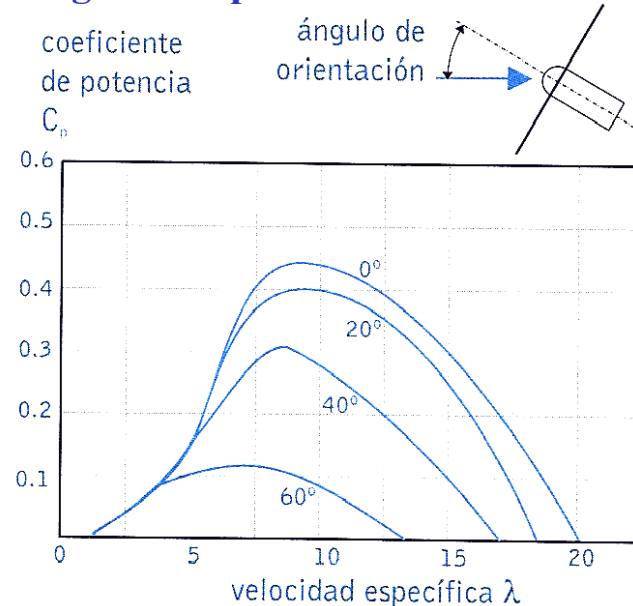


Figura 52: Dispositivo de orientación para aeromotores que funcionan contra el viento

Imagen tomada del libro: Aeromotores y Aerogeneradores.

Guy Cuntz. Signatura biblioteca: Electrot 169

Regulación por desorientación



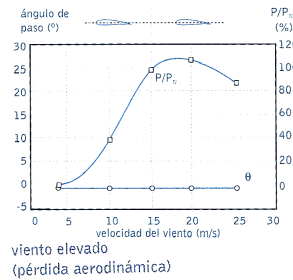
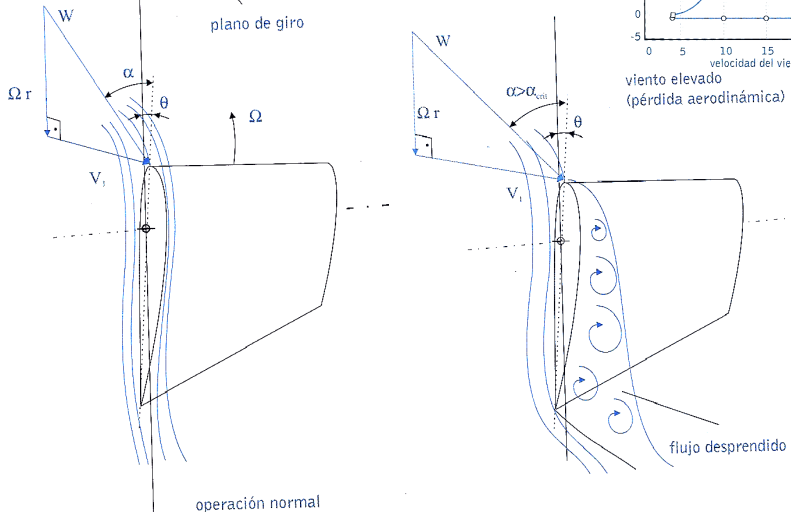
Se desorienta respecto
al viento gracias a la
pala reguladora

Este diagrama ilustra el funcionamiento de un sistema de bombeo hidráulico de rotor múltipala. El componente principal es el **rotor múltipala**, un disco con ocho paletas radiales que gira sobre un eje central. Una **cola orientadora** (ala) está montada en el eje para dirigir el viento. El rotor está conectado a un **vástago que transmite energía** que desciende a través de una **guía** (estructura de soporte). En la superficie, una **pala reguladora** controla la velocidad de rotación. El vástago transmite la energía a un **tubo de descarga** que eleva el agua hacia un **depósito**. El sistema también incluye un **racor de unión de 2 tramos de tubería** y un **racor de la barra de transmisión**, ambos *siempre decalados para evitar enganches*. En el pozo, el agua es aspirada a través de un **tubo de aspiración** que contiene un **émbolo** y un **cilindro del émbolo**. El **nivel mínimo del agua en el pozo** está marcado, así como la **Aspiración máxima 7 m**. El **filtro** se encuentra en la base del tubo de aspiración. La **Altura manométrica total** (HMT) se indica como la altura total que el sistema debe superar.

Cuando la velocidad del viento es superior al umbral de "regulación" el aeromotor entero gira y disminuye la sección que ofrece al viento.

- El coste del control es una pequeña parte del parque eólico → el coste no es un factor determinante.
- El parque tiene personal especializado → mantenimiento regular. La eficiencia prima sobre la sencillez y robustez.
- Los problemas estructurales son importantes y no se pueden sobredimensionar como en el caso de pequeños aerogeneradores.

Entrada en pérdidas ("stall")



Ángulos

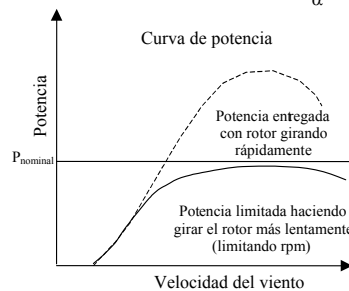
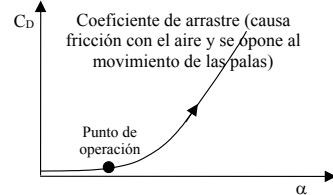
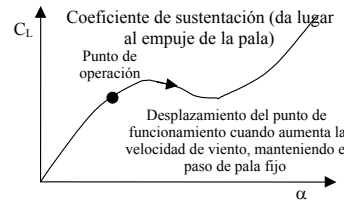
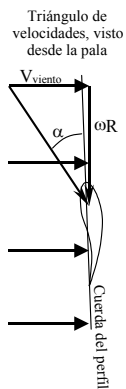
α = ángulo de ataque = ángulo entre la cuerda de la pala y la dirección del aire "que ve la pala" (movimiento del aire desde una referencia fija a la pala).

α se calcula a través del triángulo de velocidades.

θ = ángulo entre la cuerda de la pala y el plano de rotación.

θ se controla con servomecanismos.

Cuerda de la pala: se toma una línea que aproximadamente une los bordes de ataque y de salida

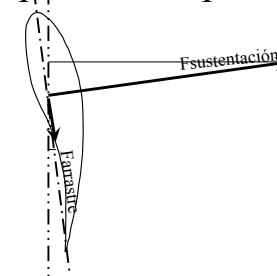


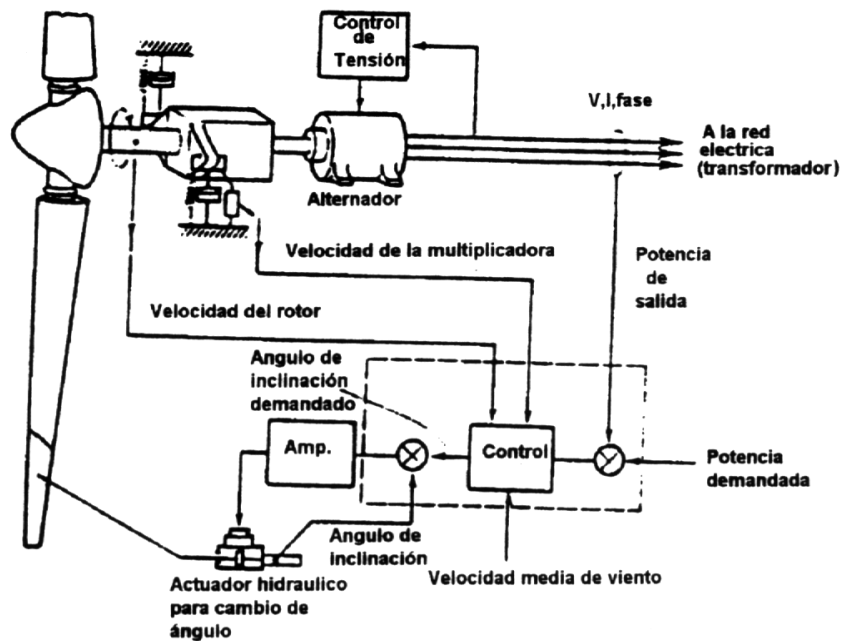
Limitación de potencia por entrada en pérdidas (stall):

$\alpha \uparrow$ { cuando $v_{viento} \uparrow$
cuando $\omega \downarrow$

Regulación por entrada en pérdidas (α aumenta y a partir de cierto valor se desprende flujo)

- Mientras que la fuerza de sustentación apenas aumenta...
- La fuerza de arrastre ("rozamiento aerodinámico") aumenta mucho al iniciarse flujo turbulento → ésta es la causa de la pérdida de potencia turbinada





Esquema de un AE de paso variable (o con aerofrenos) y velocidad fija. (Figura tomada de “Principios de conversión de la Energía Eólica”. CIEMAT, 97).



Paso de pala variable (ángulos θ positivos)

Posición de las palas, vistas desde la base de la torre, mirando hacia arriba

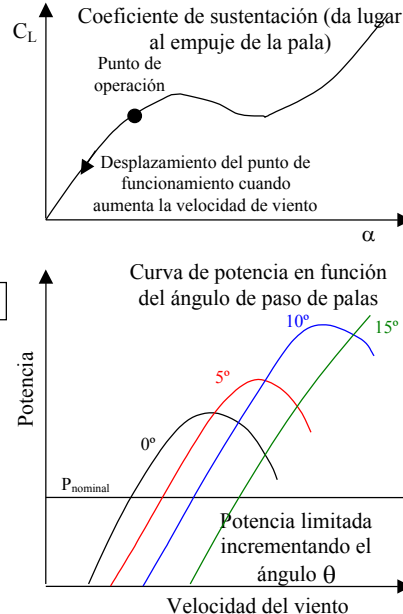
Dirección del viento →

Posición de **bandera**
(durante una parada manual o por excesivo viento, en donde la pala ofrece la mínima resistencia al aire)

Posición durante funcionamiento a velocidades superiores a la nominal

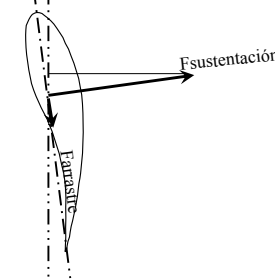
Posición durante funcionamiento **normal** ($v \leq v_{\text{nominal}}$). El ángulo de las palas se mantiene bastante cercano al óptimo, el sistema sólo necesita variar algunos grados las palas para controlar la potencia de la turbina.

Posición de **arranque**, para aumentar el par de la turbina a muy pocas revoluciones ($<10\%$ de la velocidad normal de giro) y vencer la resistencia inicial a la rodadura –rotor parado–. También se utiliza para ir **parando** la máquina –frenado aerodinámico–.

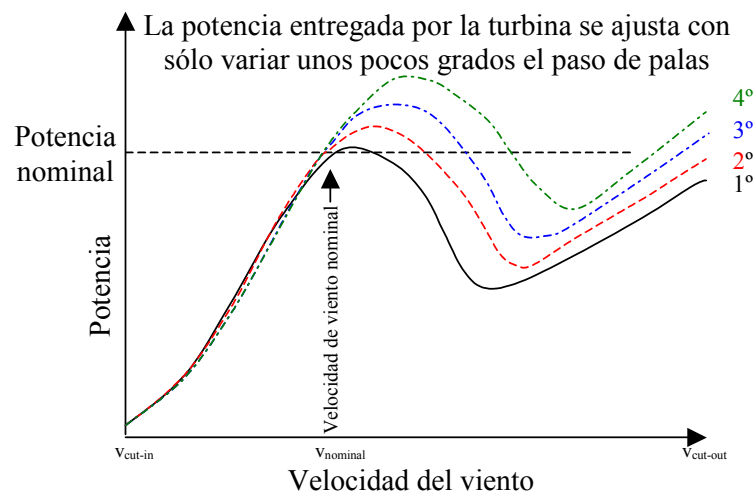


Regulación por “pitch” (disminuyendo α)

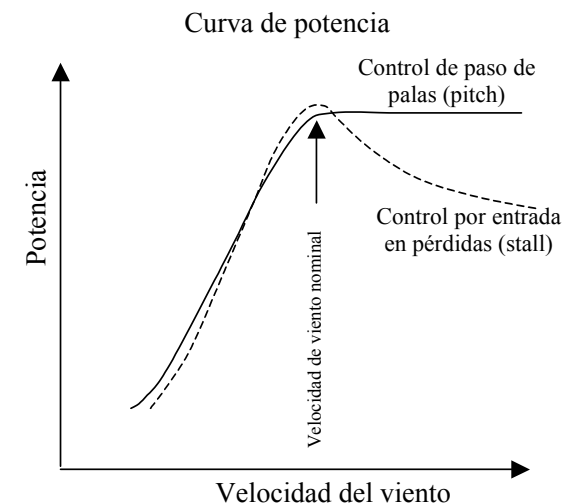
- Mientras que la fuerza de arrastre apenas aumenta...
- La fuerza de sustentación (con una componente que acelera las palas) disminuye cuando $\alpha \downarrow$ → pérdida de potencia turbinada



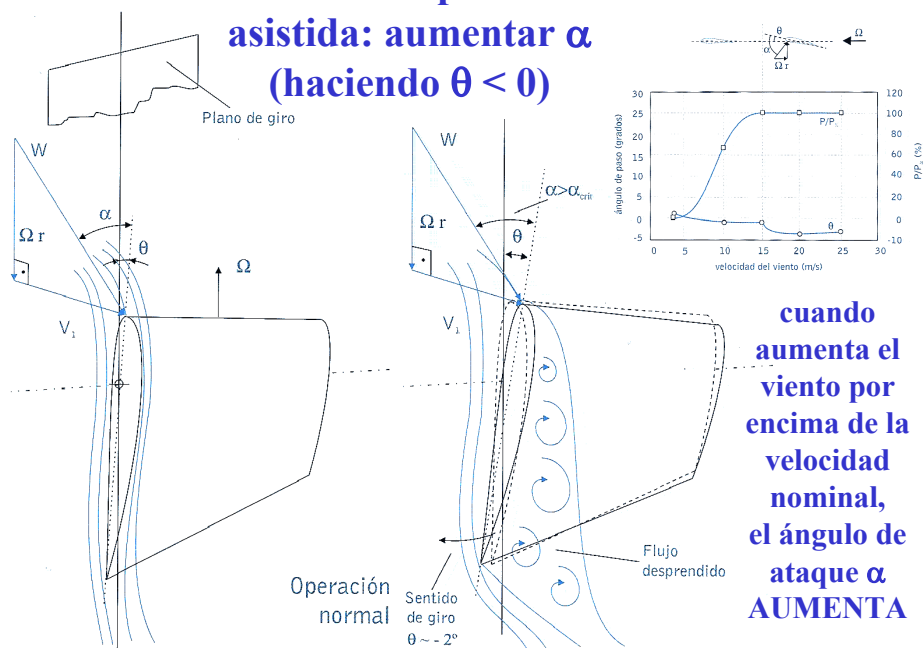
Curva de potencia de un aerogenerador, para distintos ángulos de paso de pala positivos



Comparación de la regulación del paso de palas variable y por entrada en pérdidas.



Entrada en pérdidas asistida: aumentar α (haciendo $\theta < 0$)



Paso variable (entrada en pérdidas asistida)

Posición de las palas, vistas desde la base de la torre, mirando hacia arriba

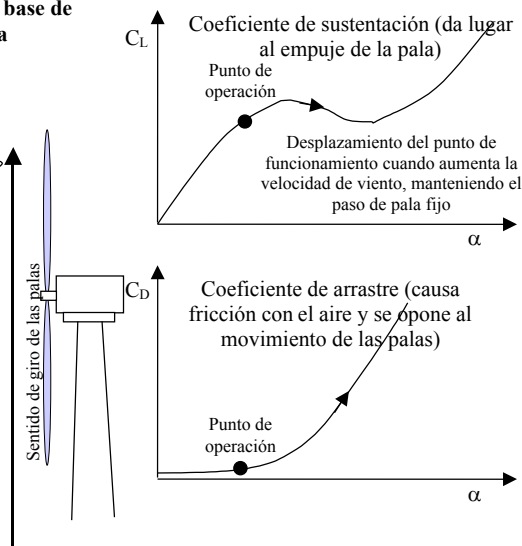
Dirección del viento

Posición de **bandera** (entrada total en pérdidas), durante una parada manual o por excesivo viento, en donde la pala ofrece la mínima resistencia al aire

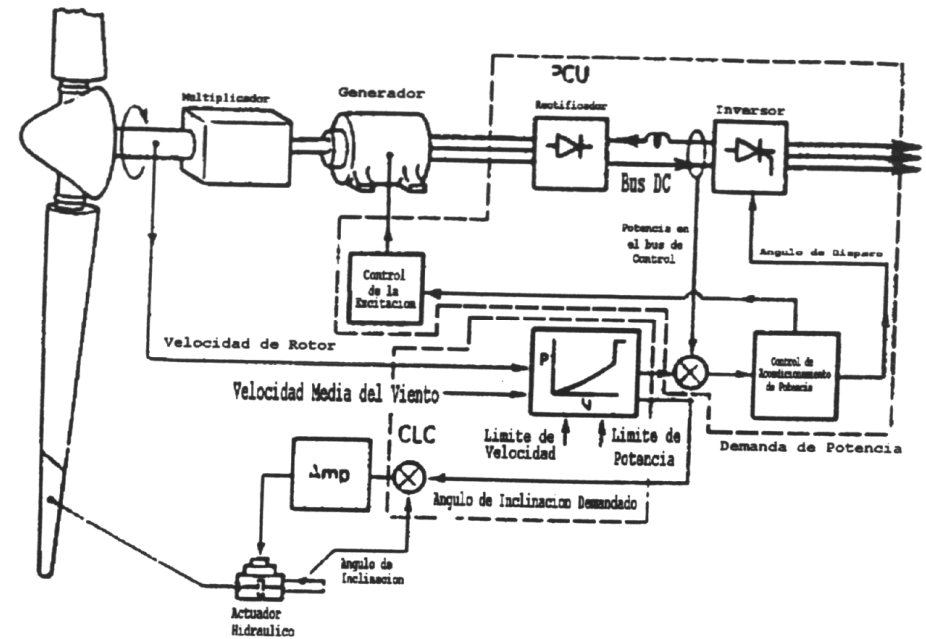
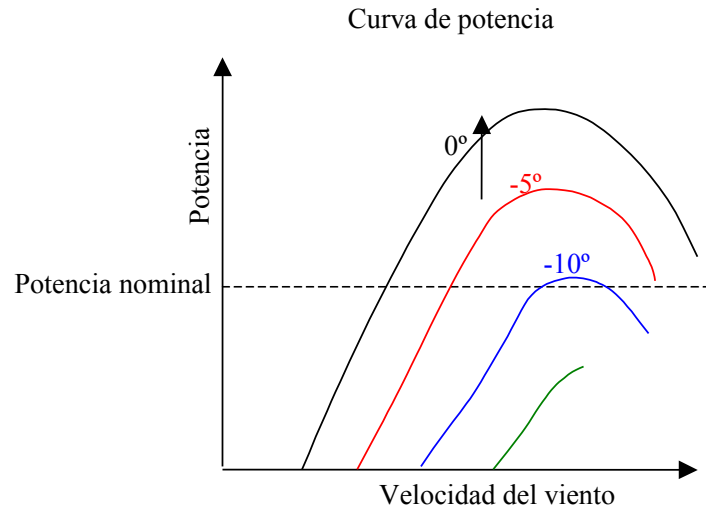
Posición durante $v > v_{nominal}$. Entrada parcial en pérdidas. Los esfuerzos mecánicos son superiores al control por pitch pero el sistema de regulación puede ser más lento y se necesita variar menos grados el paso.

Posición durante funcionamiento **normal** ($v \leq v_{nominal}$).

Posición de **arranque**, para aumentar el par de la turbina a muy pocas revoluciones ($< 10\%$ de la velocidad normal de giro) y vencer la resistencia inicial a la rodadura –rotor parado–. También se utiliza para ir **parando** la máquina –frenado aerodinámico–.

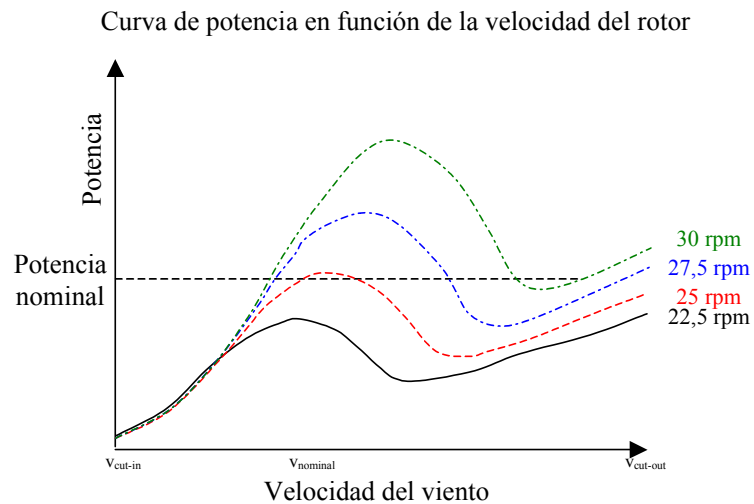


Curva de potencia de una turbina con paso de pala variable (entrada en pérdidas asistida – ángulos de paso θ negativos-).

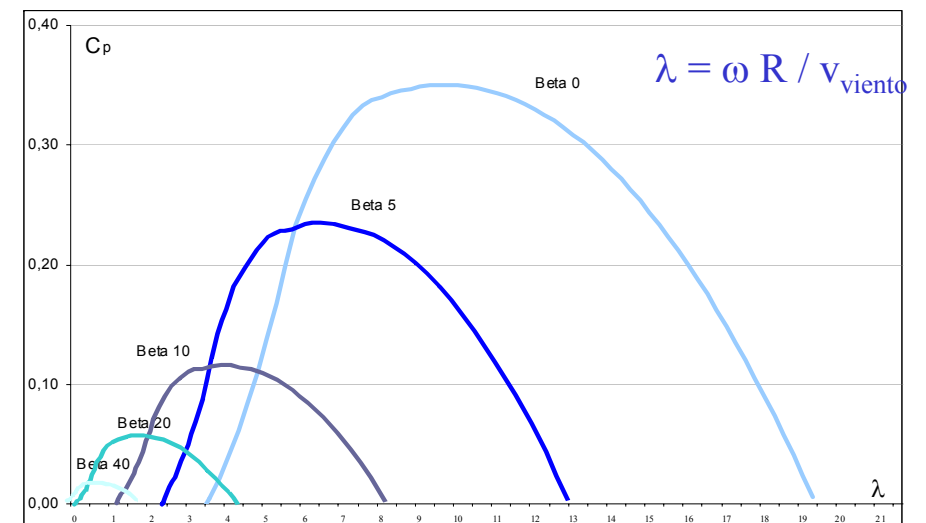


Esquema de un AE de paso y velocidad variables. (Figura tomada de “Principios de conversión de la Energía Eólica”. CIEMAT, 1997).

Efecto de la velocidad de la turbina en la curva de potencia.



Influencia del paso de palas θ y la velocidad del rotor ω





Algunas animaciones en respuesta a preguntas sobre generadores

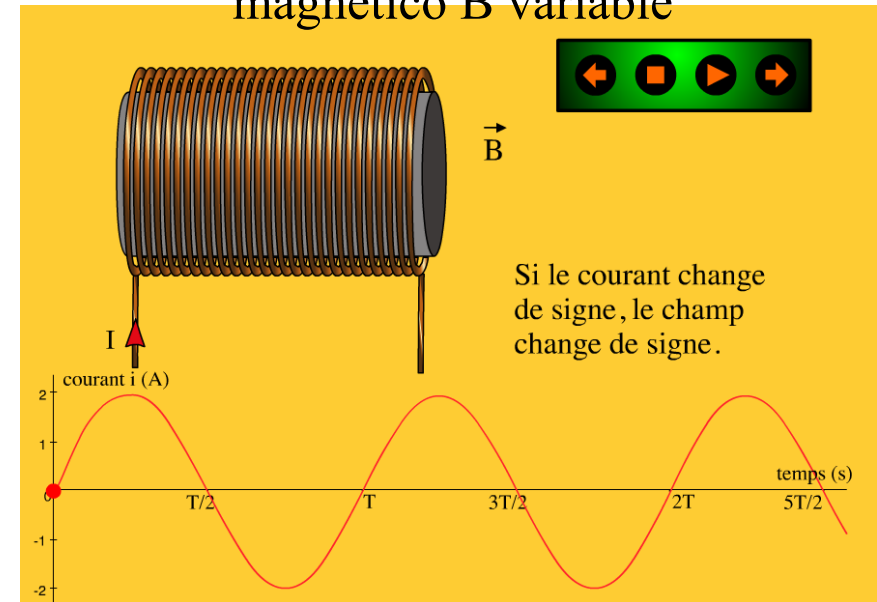
Animación de un motor DC

<http://www.ieee-virtual-museum.org/exhibit/exhibit.php?taid=&id=159249&lid=1&seq=3&view=>

Animation by [IEEE Virtual Museum](#)

29

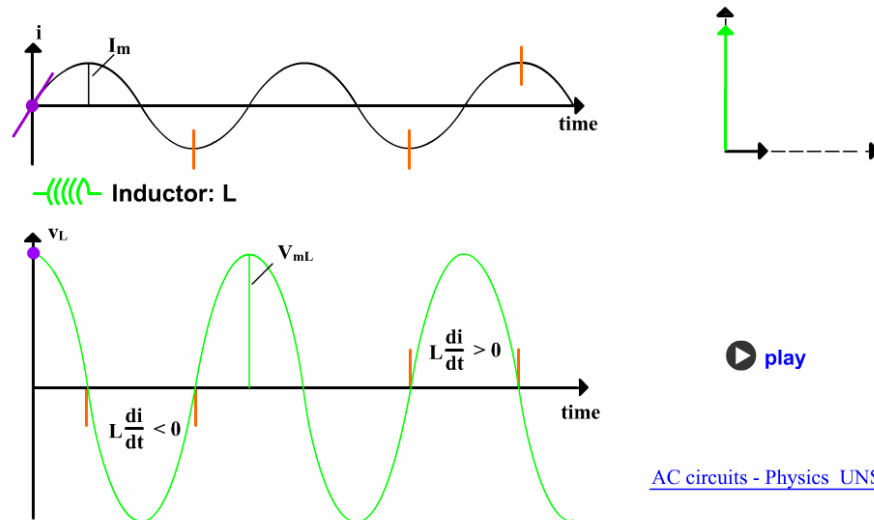
Una corriente senoidal crea un campo magnético B variable



30

Bobina conectada a una fuente AC

31



$fem_{bobina} = L \times (\text{pendiente de la gráfica de la corriente})$

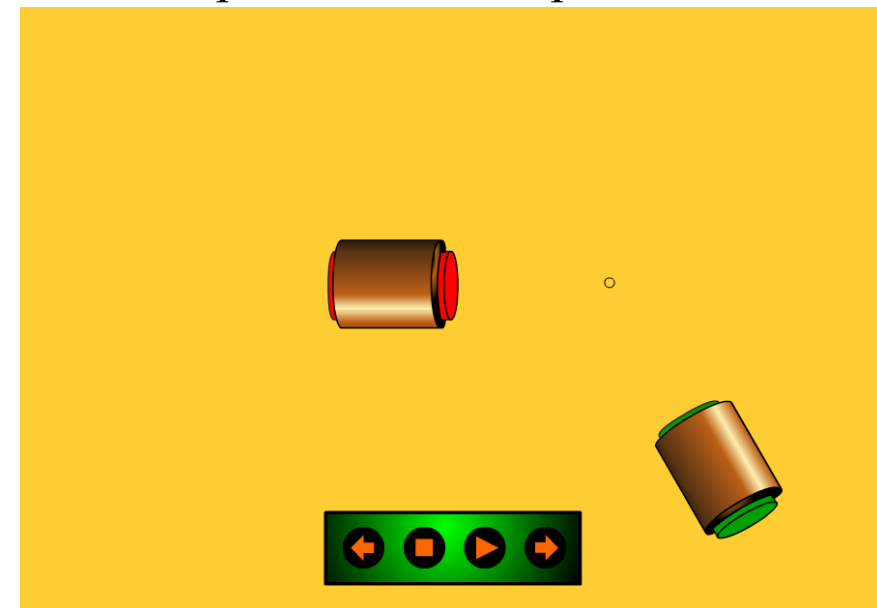
La corriente se hace máxima $\frac{1}{4}$ de ciclo después que la tensión.

<http://www.phys.unsw.edu.au/~jw/AC.html#inductors>

[AC circuits - Physics UNSW](#)

Composición de campos vectoriales

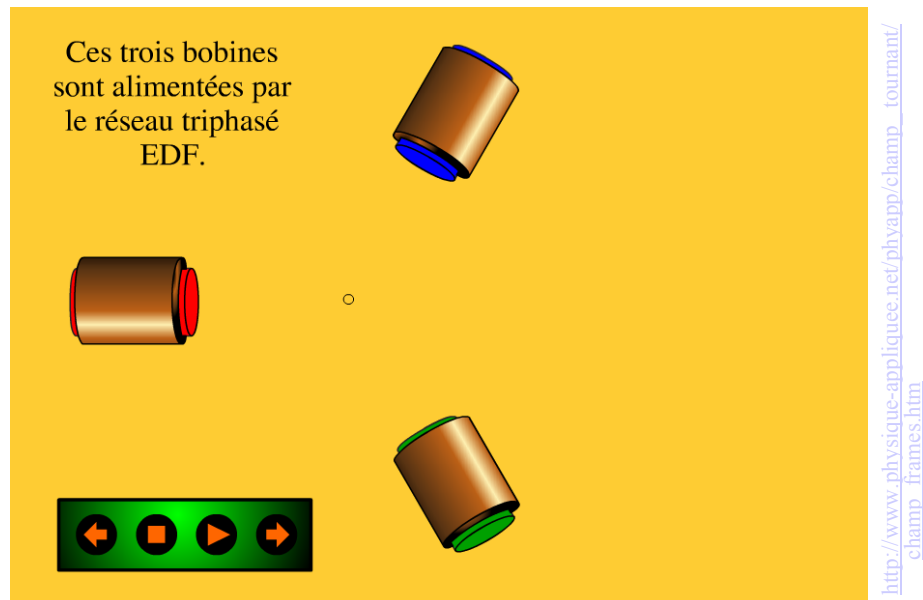
32



http://www.physique-appliquee.net/physapp/champ_tourant/champ_frames.htm

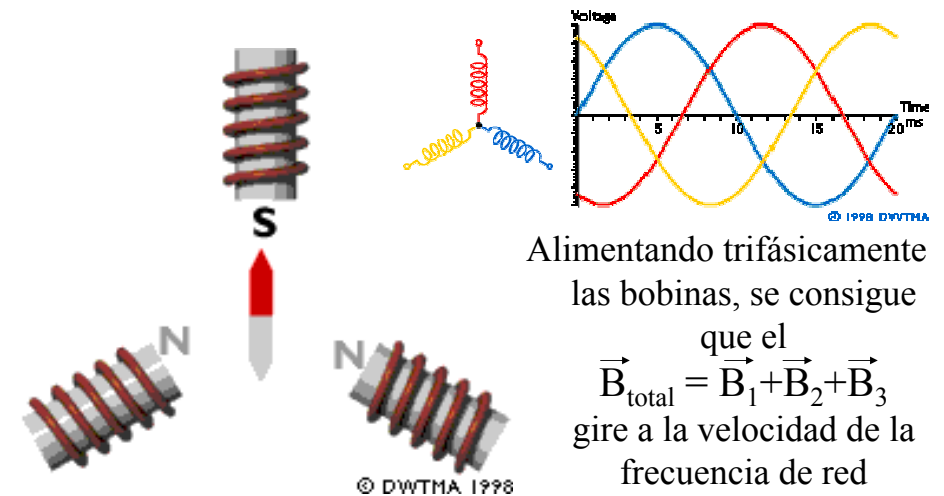
Bobinas conectadas en trifásica

33



Motor trifásico síncrono

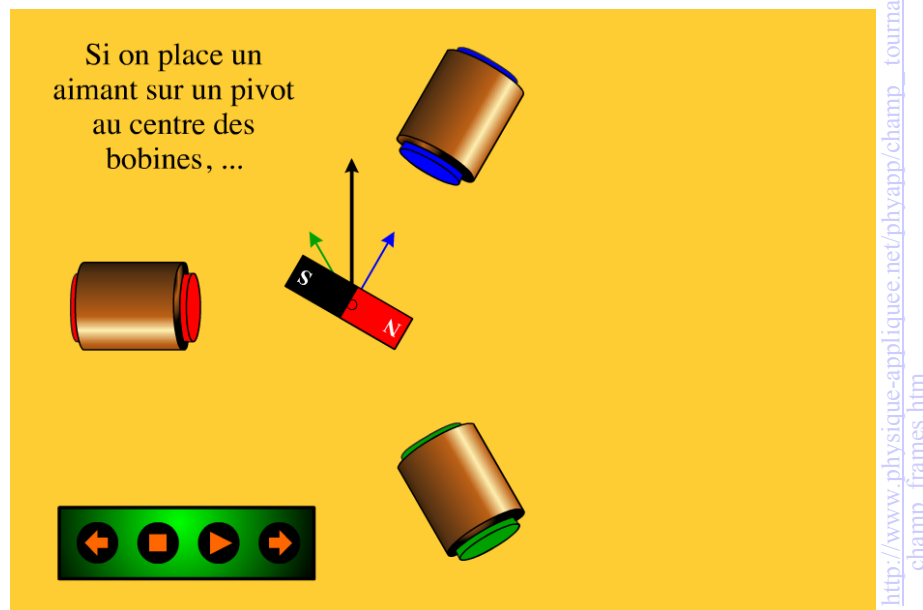
34



<http://www.windpower.org/en/tour/wtrb/syncgen.htm>

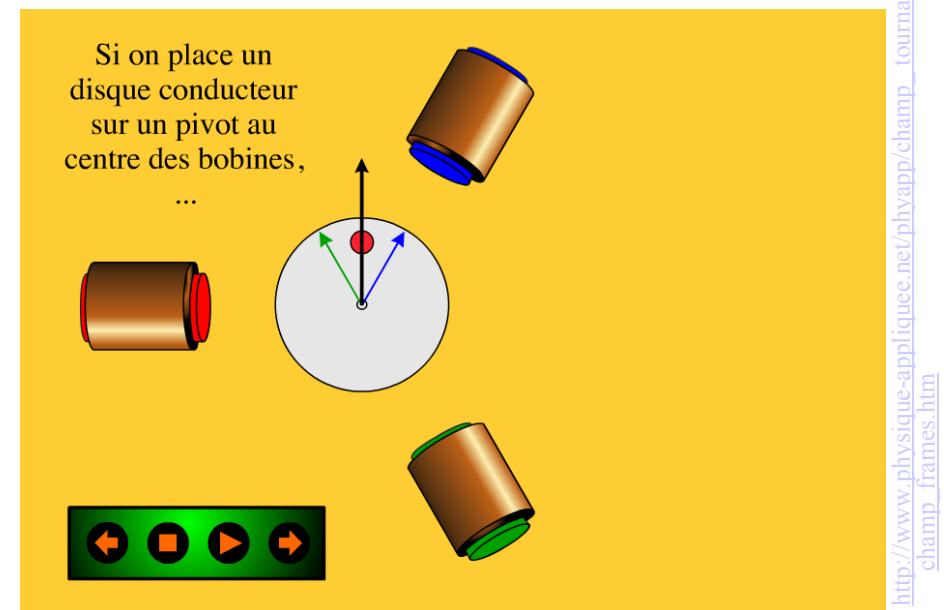
Fundamento del motor síncrono

35



Fundamento del motor asíncrono

36



Fundamento del motor de inducción o asíncrono

37



Las tres fases del estator y las inducidas en el rotor están representadas esquemáticamente.

En el estator se generan corrientes inducidas de baja frecuencia

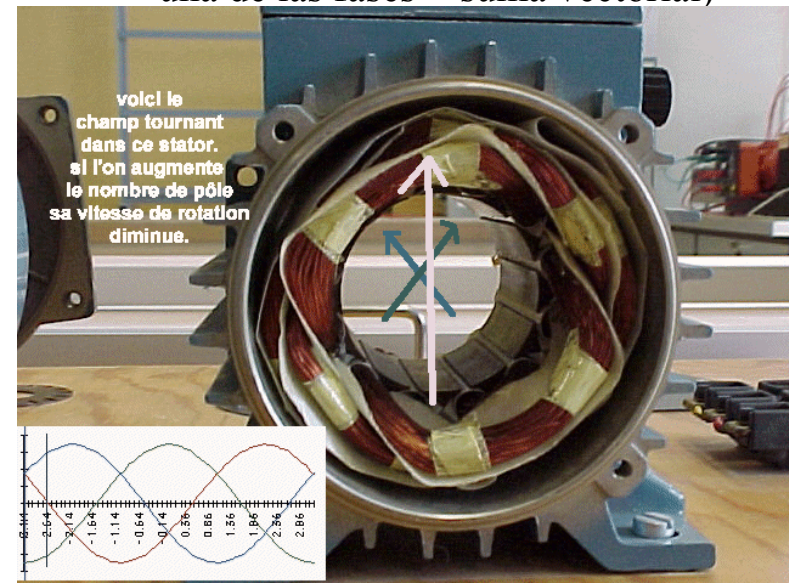
La velocidad de giro del rotor + la frecuencia de las corrientes inducidas en el rotor = velocidad de giro del campo magnético creado por el estator.

<http://www.ewh.ieee.org/soc/es/Nov1998/08/INDMOTOR.HTM>

http://www.physique-appliquee.net/phyapp/champ_tournant/champ_frames.htm

Campo magnético creado por un estator trifásico (cada una de las fases + suma vectorial)

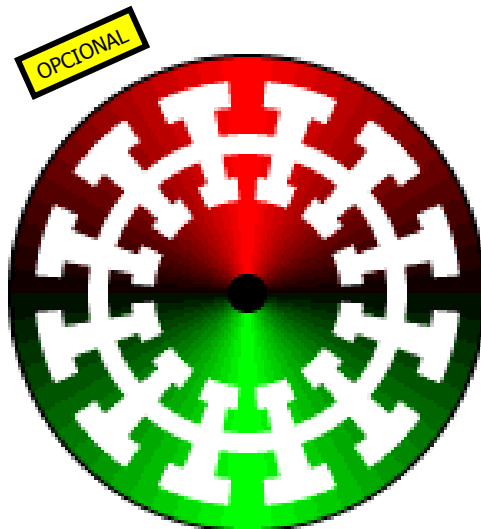
38



<http://www.epsic.ch/pagesperso/schneider/Apelm/Moteu/Champ.htm>

Motor de inducción (AC)

39



El estator se bobina de forma que al conectarlo a un sistema trifásico, genera un campo magnético rotativo.

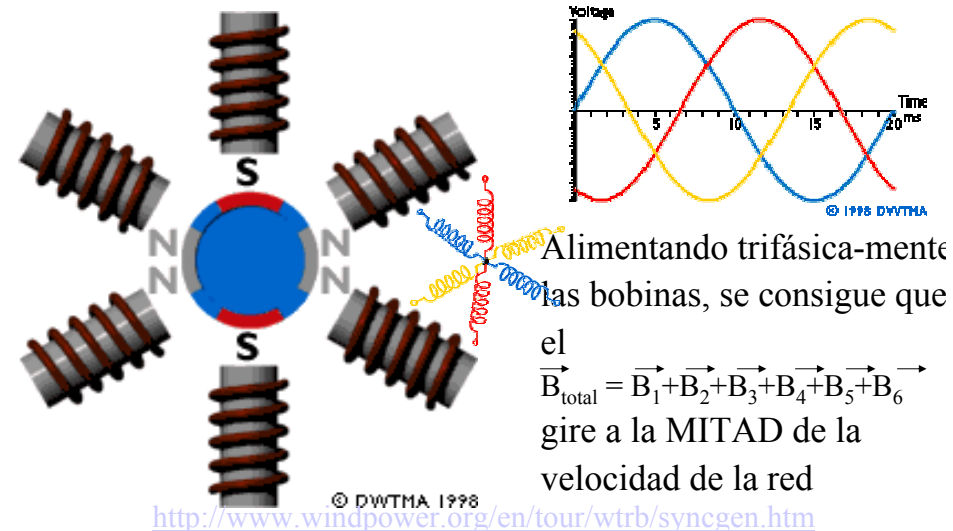
Se inducen corrientes por el rotor para mantener el flujo constante.

La fuerza sobre los conductores produce un par de giro cuando el rotor gira más lentamente que el campo magnético.

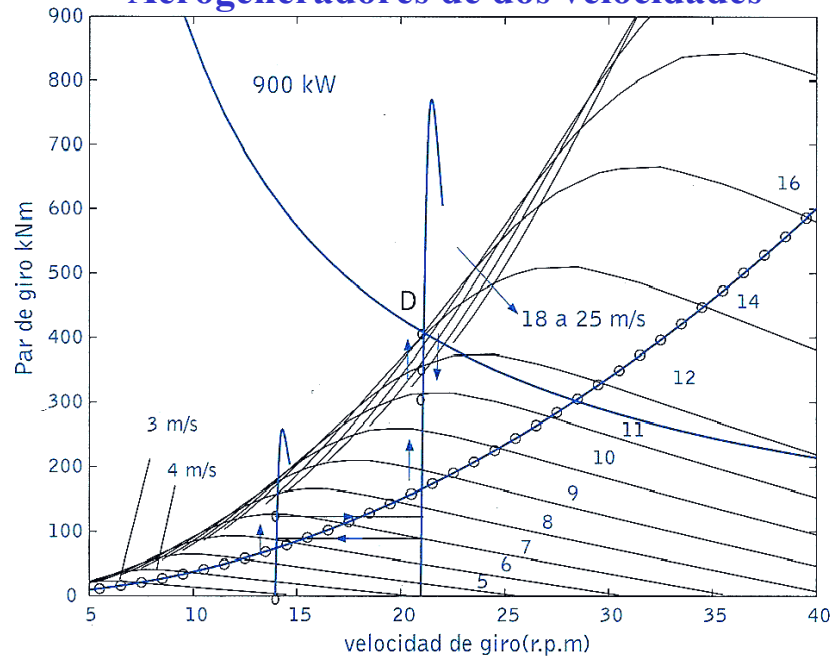
http://www.freescale.com/files/microcontrollers/doc/train_ref_material/MOTORBLACTUT.html

¿Y si ponemos el doble de bobinas e imanes?

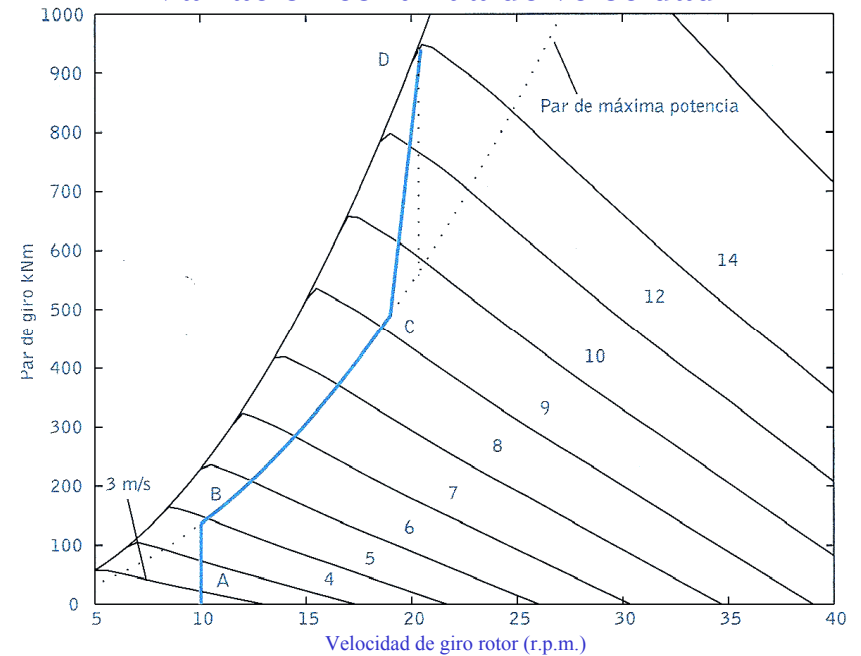
40



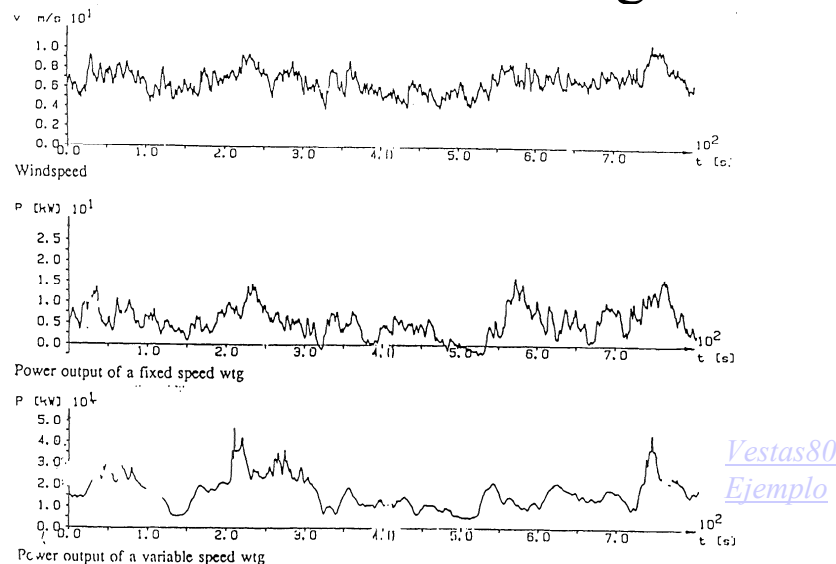
Aerogeneradores de dos velocidades



Variación continua de velocidad



Almacenamiento de energía en las masas rotantes de un aerogenerador



Los parámetros límite que el sistema supervisa de modo continuo para evitar situaciones de emergencia suelen ser los siguientes:

- Errores internos en el sistema de control.
- * Transmisión de datos, volcado de programa, etc.
- * Problemas en la lectura/escritura en memoria.
- * Fallo en alimentación.
- Parámetros de red.
 - * Frecuencia de red máxima y mínima.
 - * Tensión de red máxima y mínima. Sobretensión.
 - * Corrientes asimétricas.
 - * Sobrecarga en el generador. (Normalmente se definen dos niveles de sobrecarga).
 - * Corriente máxima.

Variables supervisadas:

• Velocidad del viento

- * Velocidad mínima para arranque (normalmente denominada $V_{cut\ in}$).
- * Velocidad mínima para parada (cuando hay una disminución del viento en producción, velocidad algo menor que $V_{cut\ in}$).
- * Velocidad máxima para parada (cuando hay excesivo viento para un funcionamiento seguro de la turbina, $V_{cut\ off}$).
- * Velocidad máxima para nuevo arranque (cuando se ha producido una desconexión hace poco, la velocidad debe ser algo superior a $V_{cut\ in}$ para que no se produzcan muchas conexiones y desconexiones -algo así como una estrategia de control de histéresis-).

Variables supervisadas:

• Potencia de salida.

- * Detección de fallo en anemómetro.
 - * Potencia anormalmente baja para un determinado viento.
- Velocidad de giro del rotor.
 - * Sobrevelocidad en rotor de baja.
 - * Sobrevelocidad en rotor de alta.
 - * Velocidad para actuación de freno eléctrico.
 - * Máxima velocidad con fallo de freno.

Variables supervisadas:

• Control de temperaturas.

- * Temperatura máxima de los devanados del generador eléctrico.
- * Temperatura máxima del aceite de la caja multiplicadora.
- * Temperatura máxima de los dispositivos electrónicos.
- * Temperatura en el sistema de orientación y en el freno de emergencia.

Variables supervisadas:

• Sensores comparadores.

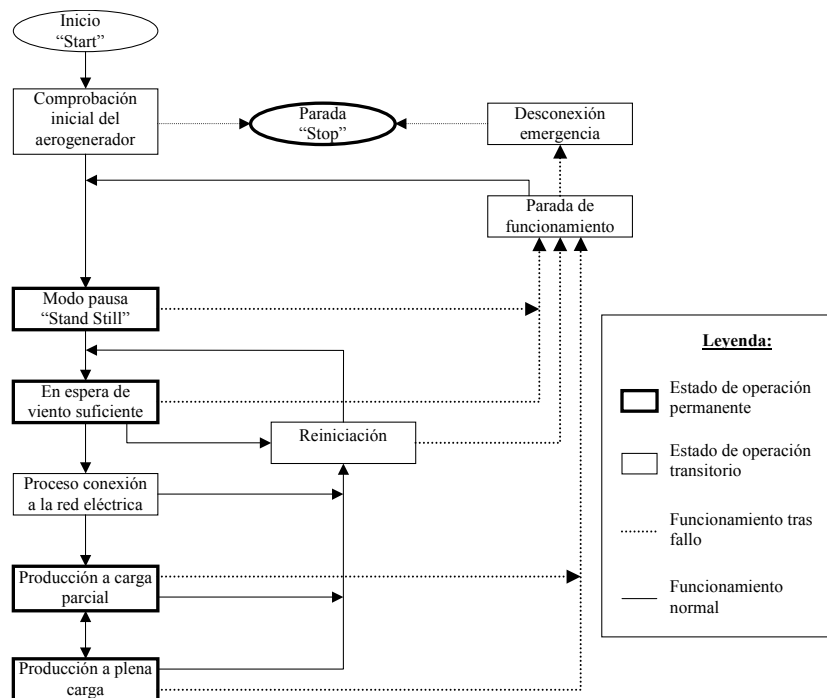
- * Relación de revoluciones eje alta/baja.
 - * Enrollado/desenrollado de cables.
- * Detección de retraso en la comparación de sensores (cuando la medida de sensores la realiza otro módulo que se comunica con el autómata principal).
 - Sistemas hidráulicos.
 - Bajo nivel de aceite.
 - Excesivas conexiones/desconexiones.

Estado de funcionamiento de un aerogenerador

- Cada estado tiene una misión encomendada y corresponde a un modo de funcionamiento característico
- Los estados pueden tener una duración limitada o pueden corresponder a un funcionamiento permanente.

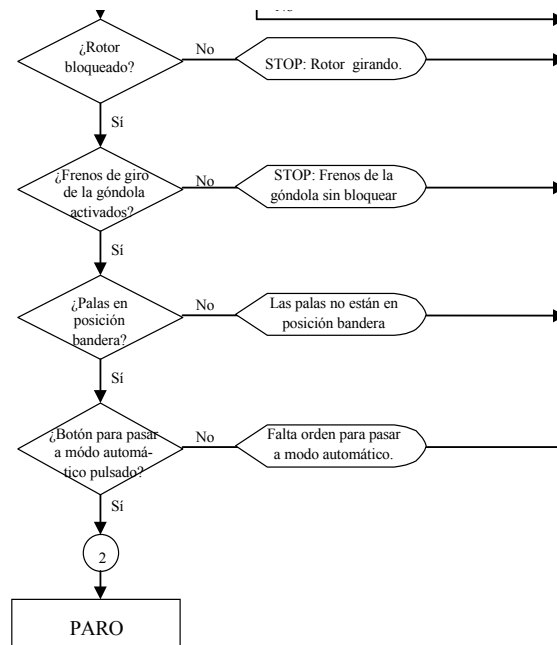
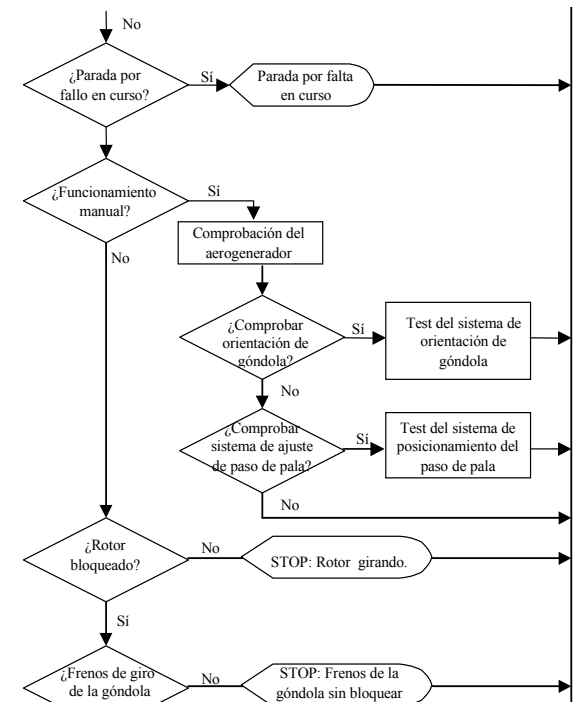
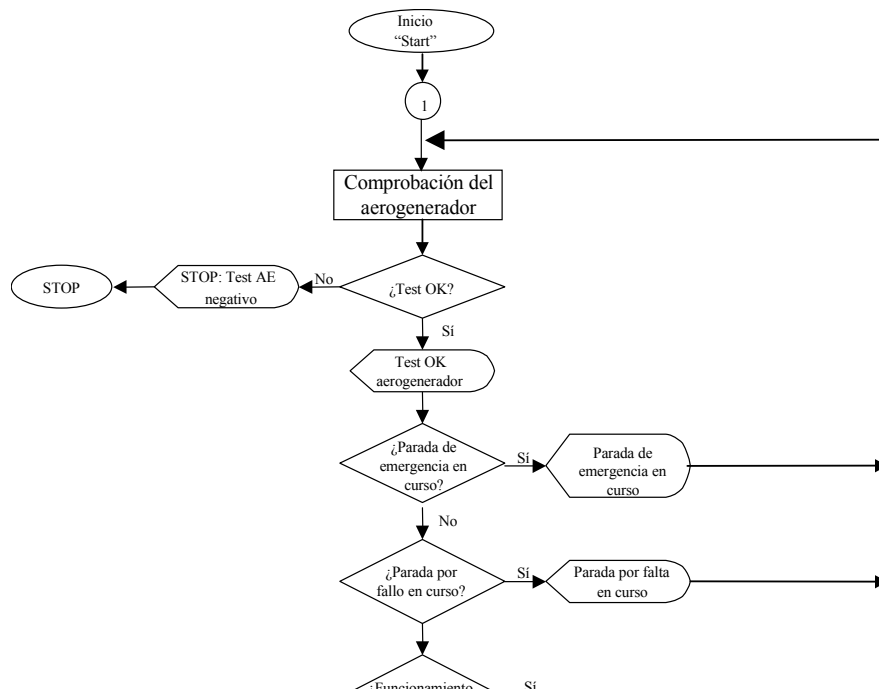
Estado de funcionamiento de un aerogenerador

- El AE puede pasar automáticamente de un estado a otro o puede requerir la confirmación de un operario.
- Operación manual o semi-automática durante el mantenimiento y puesta en servicio.
- Un cambio en una condición puede provocar el paso de un estado a otro.



Comprobación del AE

- Después de la puesta en tensión del sistema.
- Comprueba las variables.
- Test de los componentes: se activan y se mide su respuesta.
- Temperaturas dentro de límites.
- Si hay algún error, se detiene el proceso y se tiene que desbloquear manualmente.
- "System OK"



Estado de pausa

- Rotor bloqueado y frenos activados.
- Palas en posición bandera / aerofrenos activados.
- Generador desconectado.
- La góndola puede girar para desenrollar los cables u orientarse.
- Si se cumplen las condiciones necesarias para producir, pasa al siguiente estado.

En espera de viento suficiente

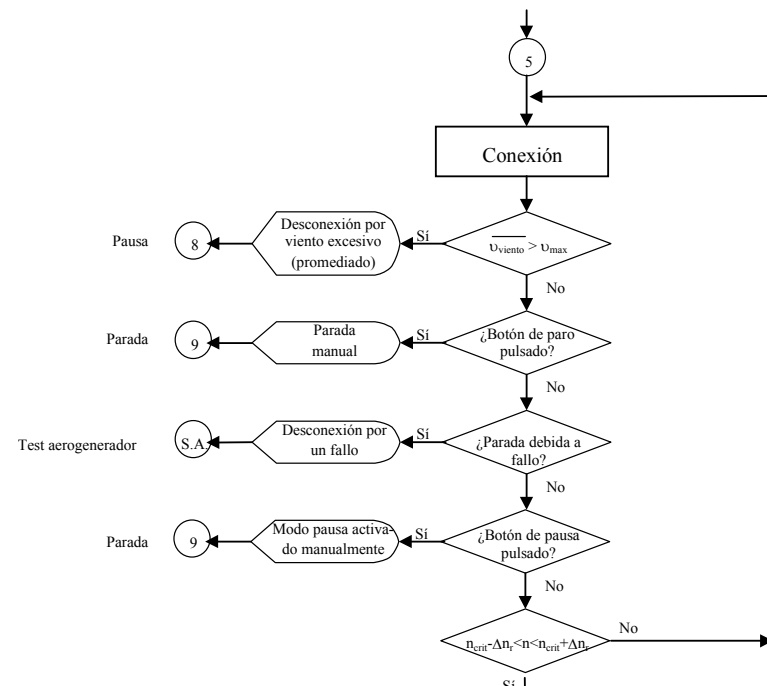
- Las palas comienzan a moverse por acción del viento.
- Durante el arranque, el paso de las palas varía para aumentar el par de giro.
- Todos los componentes están listos para producir energía.
- Al igual que en el resto de estados, las condiciones de fallo y emergencia se monitorizan.

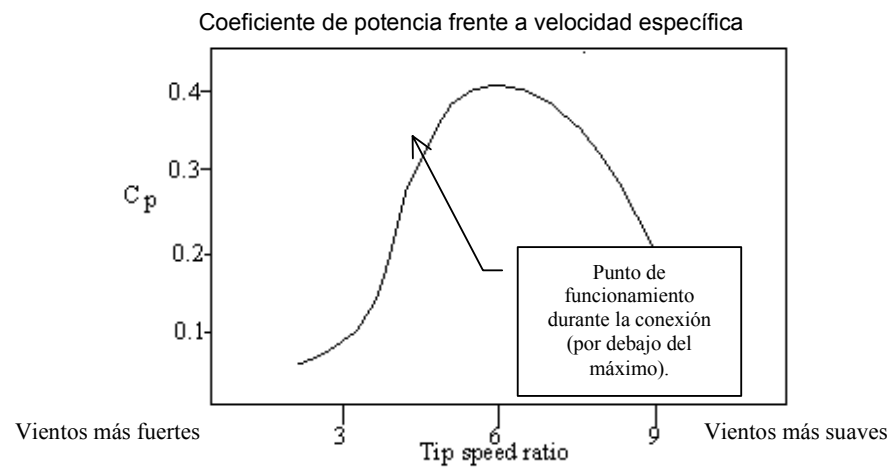
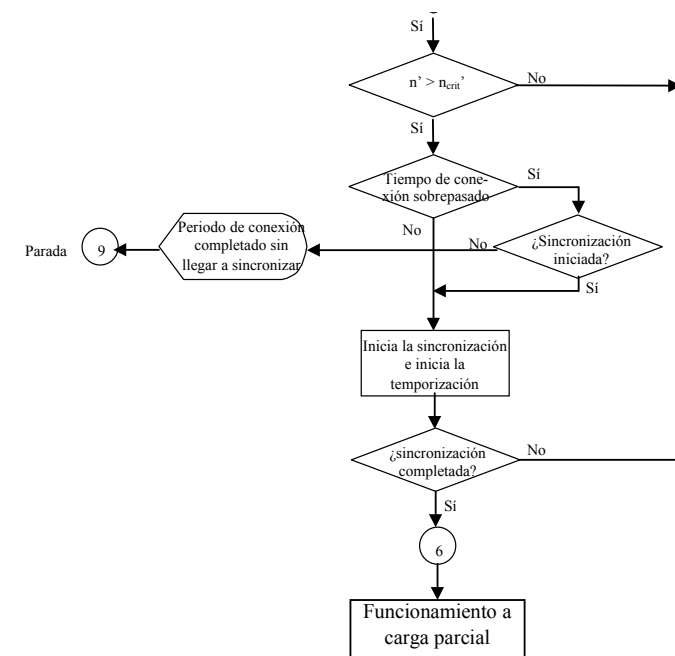
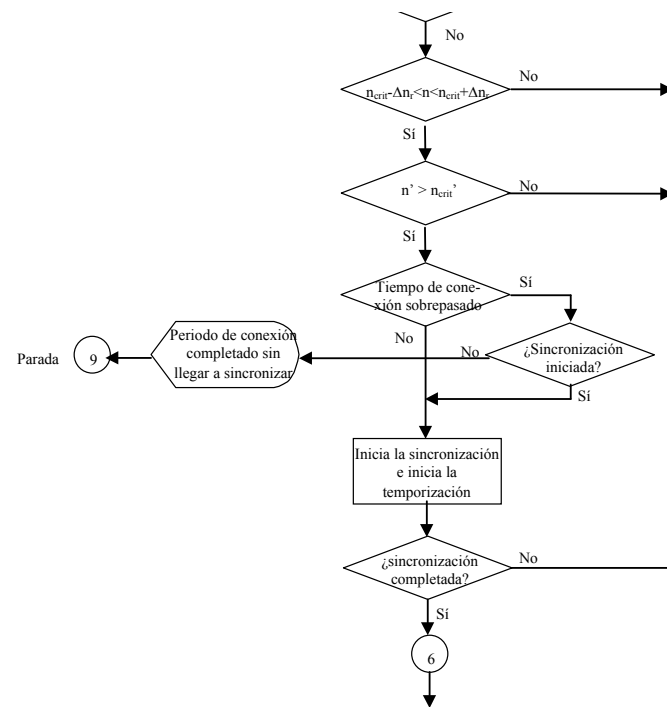
En espera de viento suficiente

- La velocidad del rotor está dentro del margen para la conexión, gracias al control de paso de palas.
- Si se alcanza una velocidad mínima, se procede a la conexión a la red eléctrica.
- Si la espera es muy larga, se vuelve a comprobar el AE.
- Orientación automática del AE.

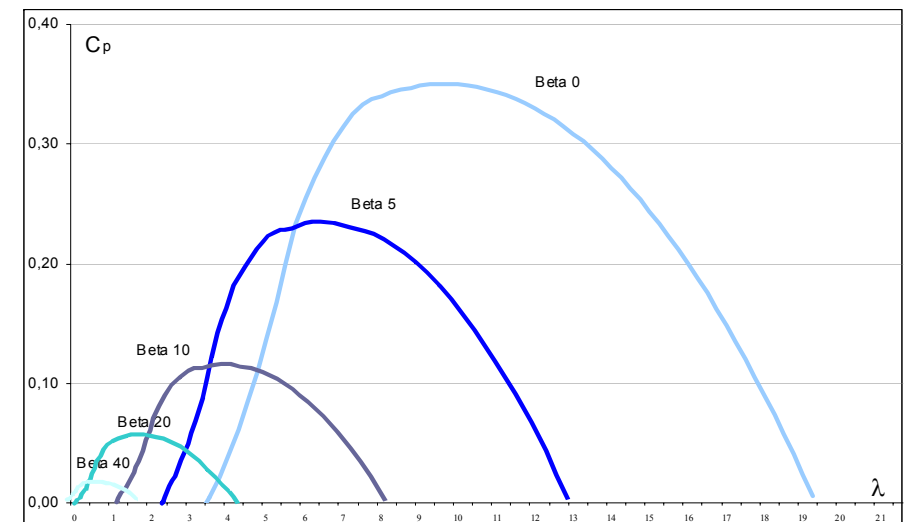
Conexión del generador

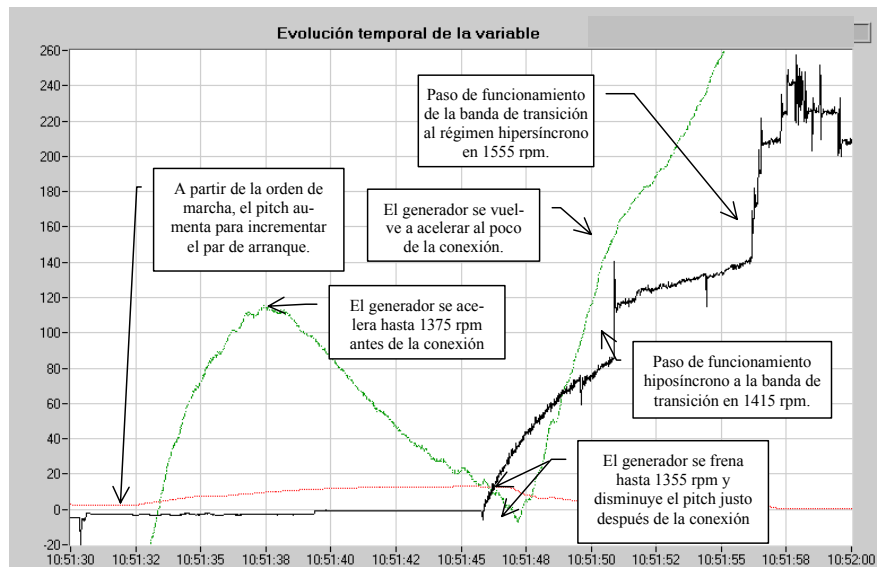
- Cuando la velocidad de viento es suficiente.
- Velocidad de giro del rotor adecuada, controlada por el paso de pala.
- Comprobación adicional del convertidor electrónico.
- Cuando la velocidad alcanza el óptimo, se produce la conexión y el generador empieza a producir energía.



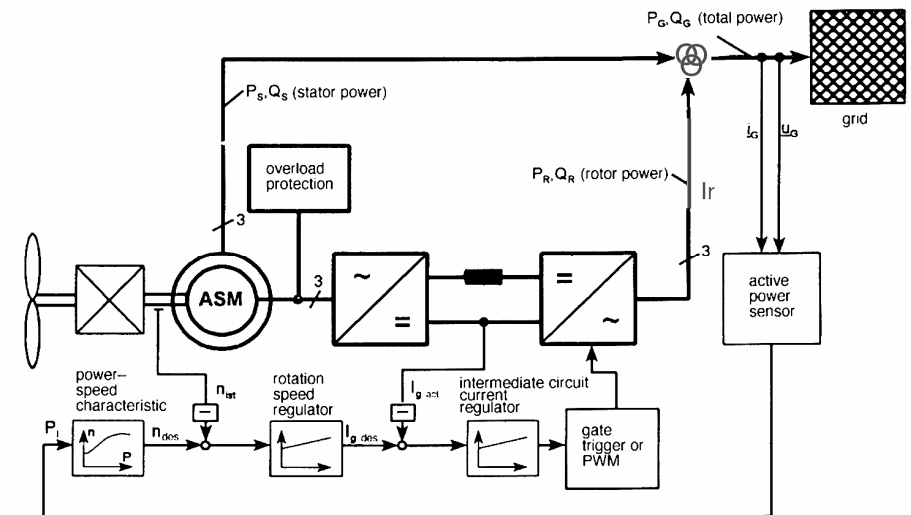


Influencia del paso de palas en el coeficiente de potencia

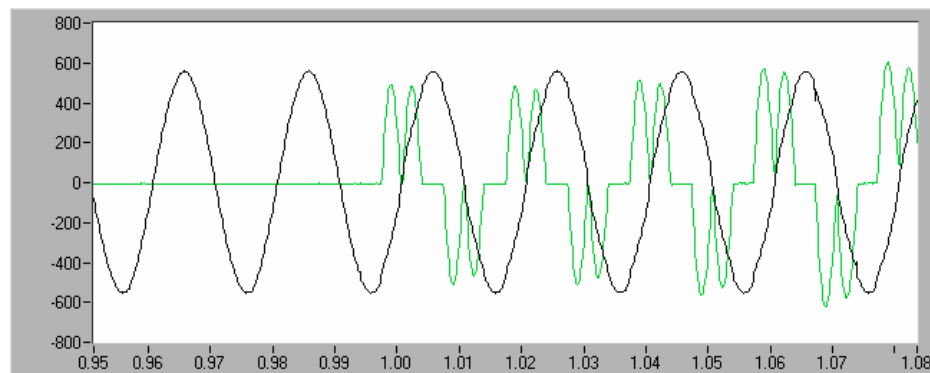




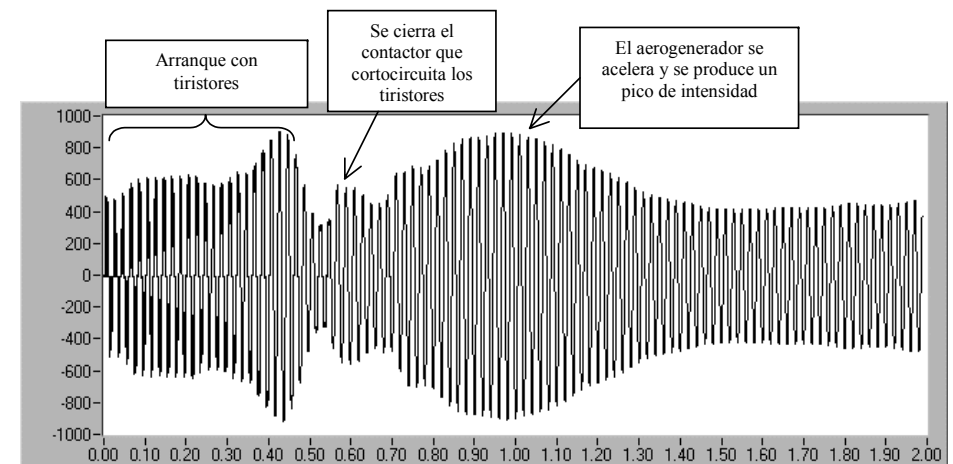
Regulación del generador doblemente alimentado



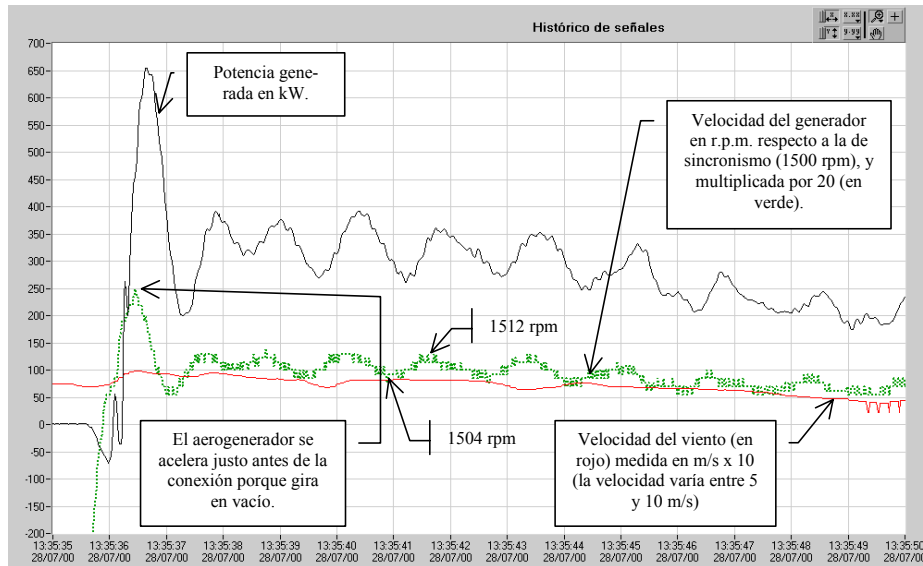
Intensidad de la turbina durante la conexión mediante tiristores



Proceso de conexión gradual mediante tiristores



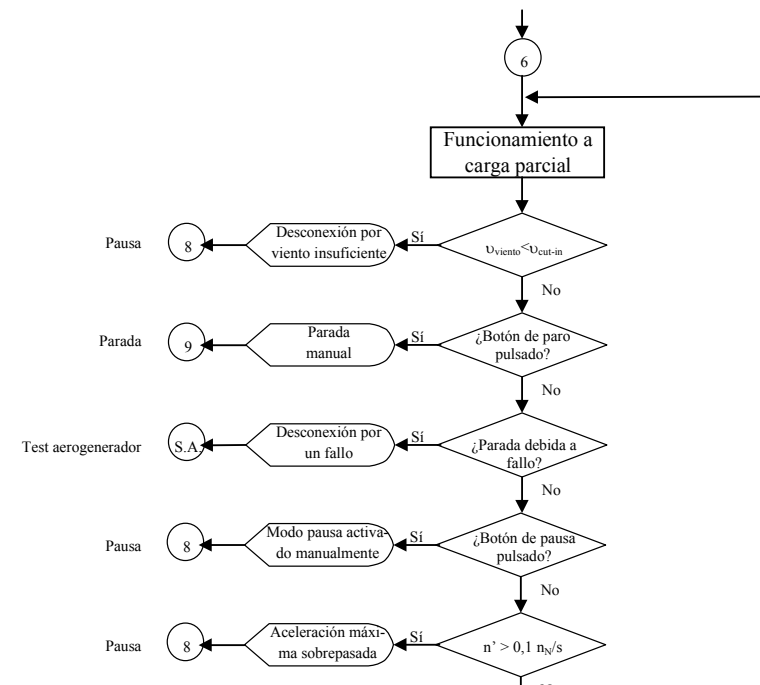
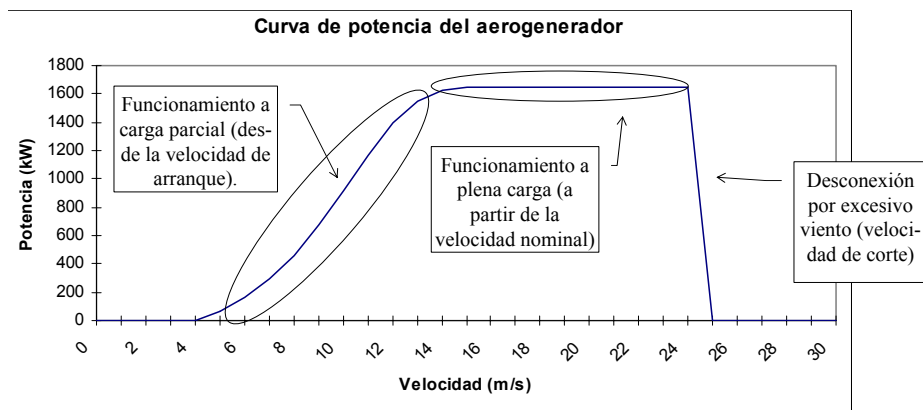
Potencia y velocidad del generador durante una conexión

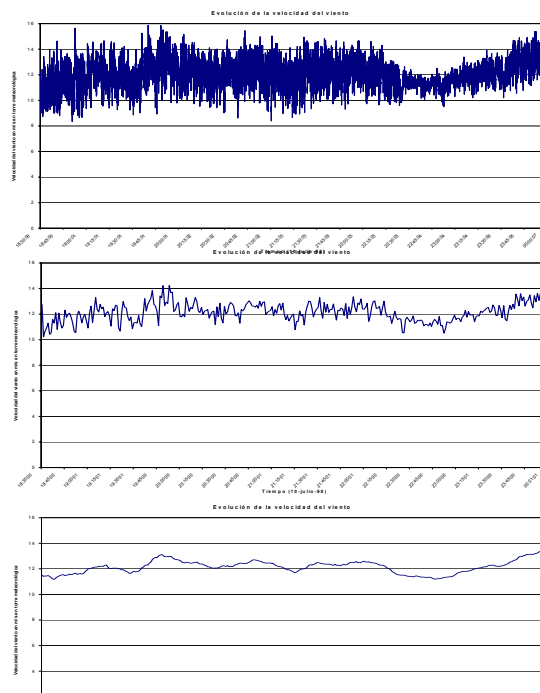
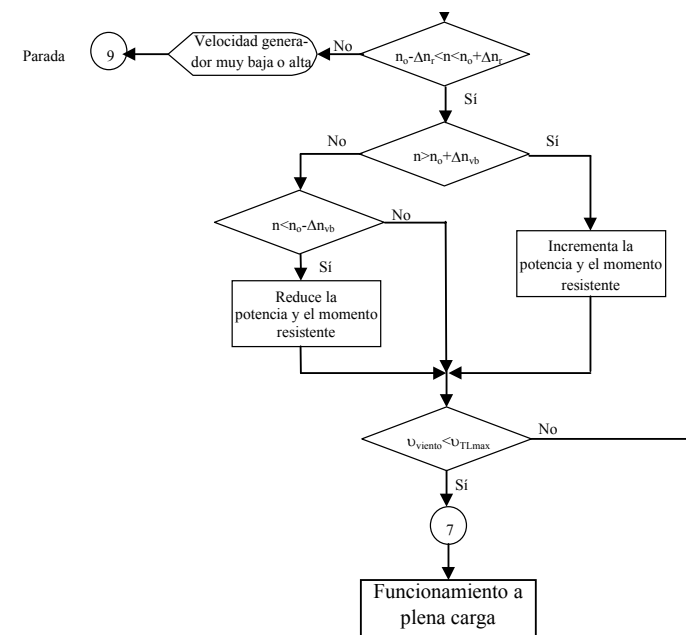
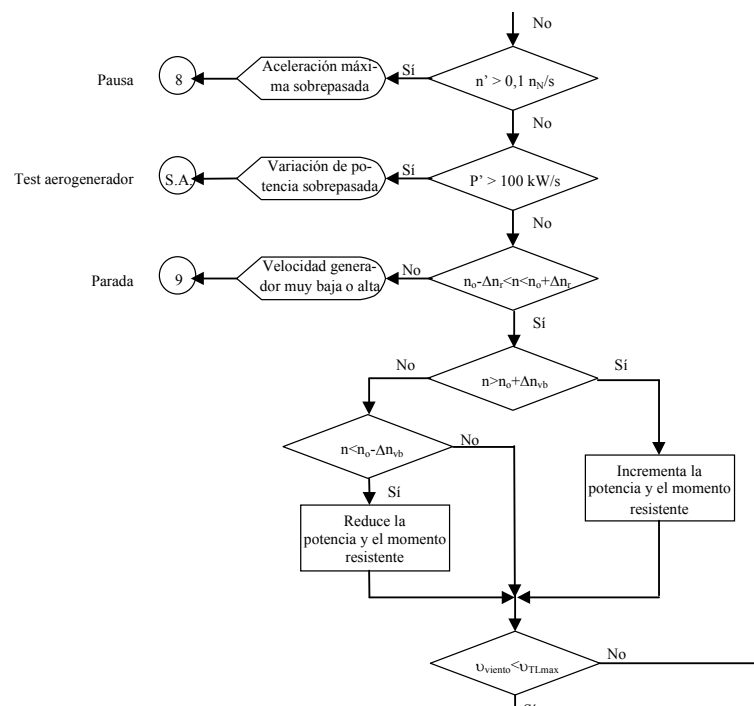


Funcionamiento a carga parcial

- El generador vierte energía a la red.
- Paso de pala óptimo.
- La potencia a generar se calcula en función de la velocidad de giro del rotor.
- La velocidad y la potencia se regula a través del convertidor electrónico según la curva característica potencia/velocidad.
- Orientación automática.

Curva de potencia típica de una máquina de paso variable



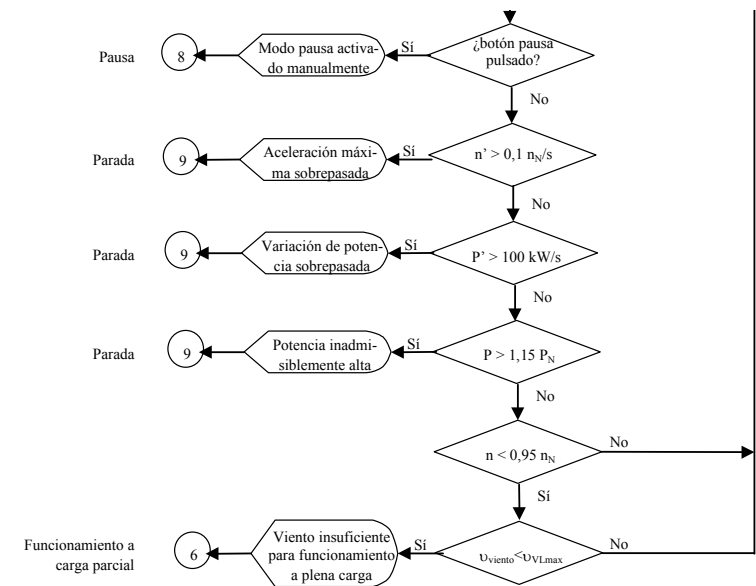
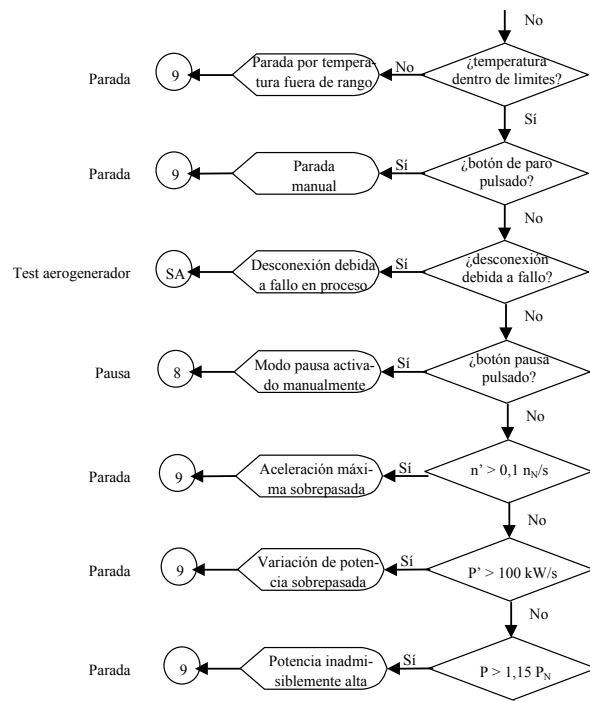
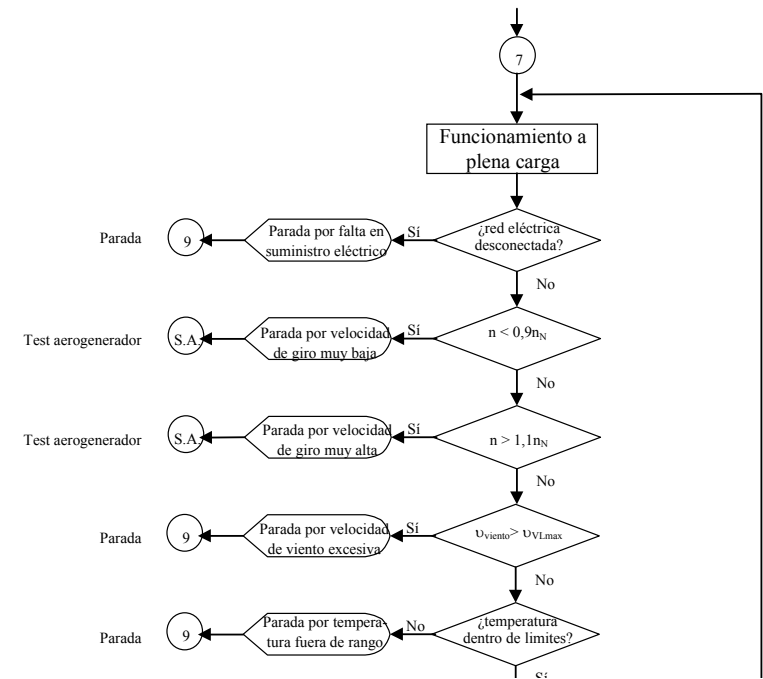


Funcionamiento a plena carga

- Cuando la velocidad de viento es elevada
- Velocidad de giro nominal +/- margen de fluctuación.
- Potencia generada = nominal +/- margen de fluctuación
- Control principal (lento pero muy efectivo para limitar potencia turbina): paso de palas.
- Control secundario: convertidor de frecuencia (rápido gracias a la electrónica)..

Funcionamiento a plena carga

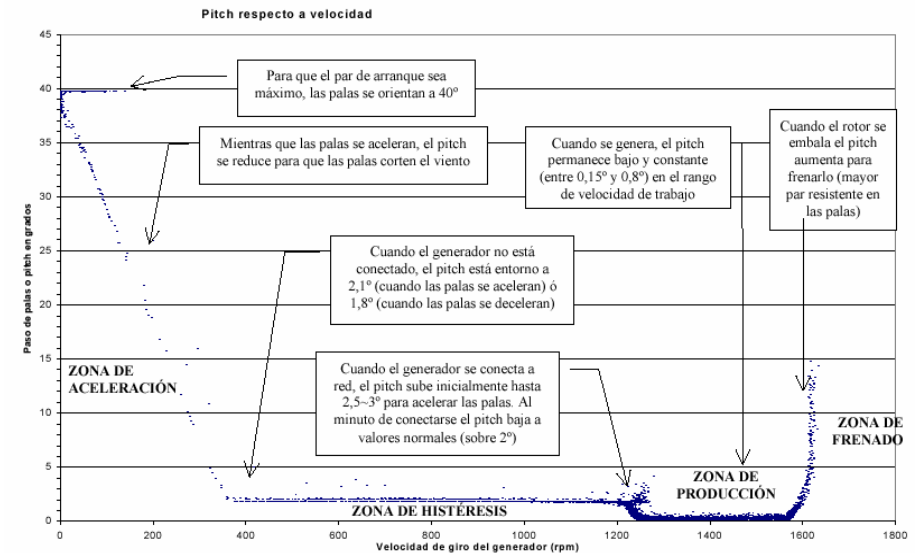
- Posibles sobrecargas de pequeña duración.
- Límite de sobrecarga principalmente por sobretemperaturas.
- Rachas de viento.
- Si se reduce el viento, paso a carga parcial.
- Gestión de fallos y emergencias, como en el resto de estados.



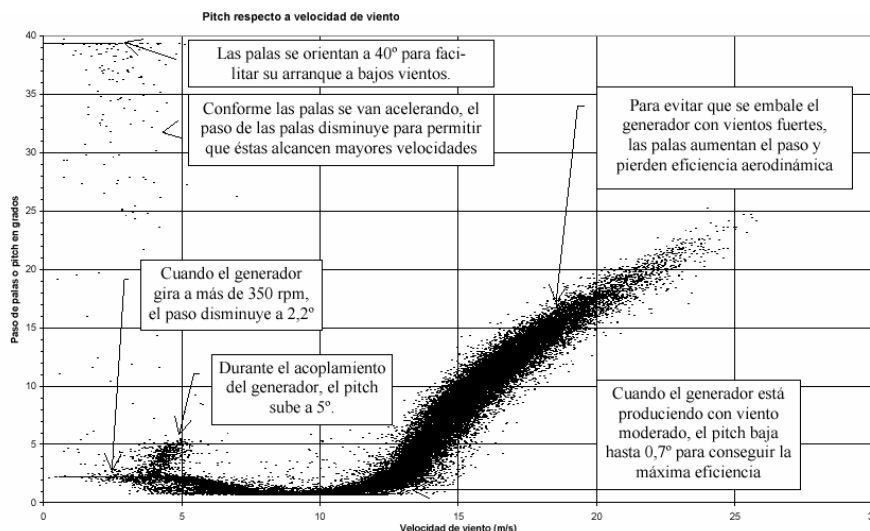
Desconexión a modo pausa

- “Desconexión suave” del generador desde cualquier estado.
- Se reduce gradualmente la velocidad de giro
- Palas van girando hasta posición bandera
- Después de una pausa, el sistema evoluciona al estado espera.

Paso de palas (pitch) frente a velocidad de giro del rotor



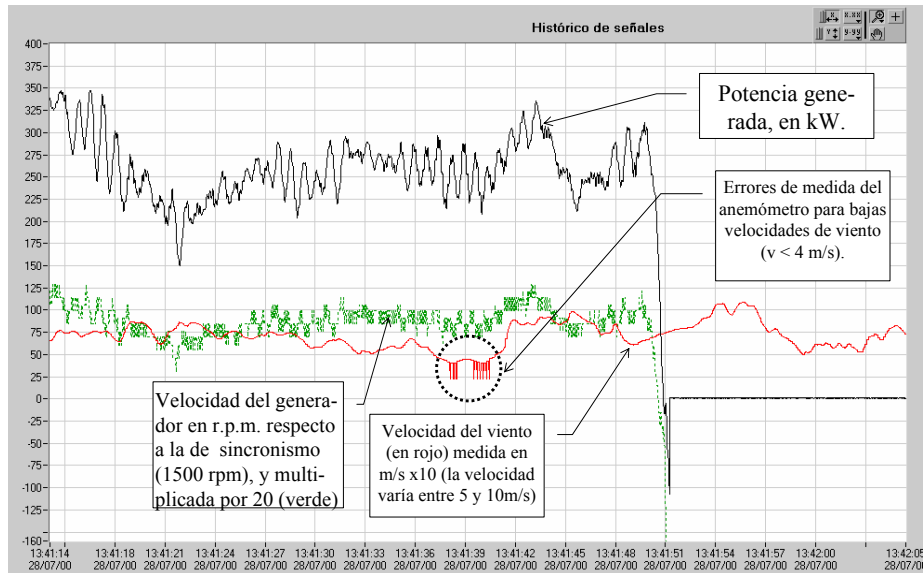
Paso de palas (pitch) frente a velocidad de viento



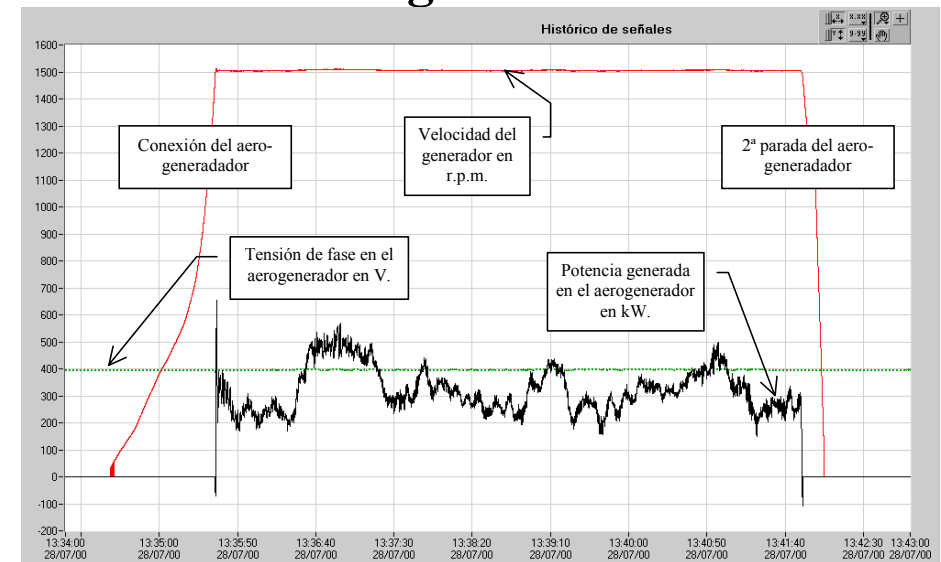
Desconexión a modo parada

- Similar a la desconexión en modo pausa, salvo que las acciones son más enérgicas.
- Desconectar y detener el generador.
- Rotor frenado y giro de la góndola bloqueado.
- Después de la parada, paso al estado de paro.

Potencia y velocidad del generador durante una desconexión



Conexión y desconexión de un aerogenerador



Desconexión debida a fallo

- Es una parada más rápida y enérgica

Desconexión de emergencia

- Cuando un paro normal no es posible
- Ante una emergencia
- Tiempo de desconexión: el más corto posible.
- El más exigente con los sistemas de frenado.
- Mayores esfuerzos mecánicos.

Diseño seguro

- Servomecanismo del paso de palas/aerofreno.
- Frenos con resortes
- Ordenador redundante para detectar fallos
- Fallos eléctricos. Detección de fusibles.

Cortocircuitos

- Intensidades muy elevadas.
- => Interrumpir el circuito
- => Disparo de interruptores automáticos
- => Detección fallos dentro del convertidor o del generador.
- => Provocan desconexión por fallo instantáneo.

Sobrevelocidad

- Margen de regulación => seguridad
- Si el sistema pierde el control => embalamiento => actúa el sistema de seguridad => paro de emergencia.

Sobretemperaturas

- Rango de temperaturas de trabajo
- Sobrecalentamiento => fallo
- Aceite de los engranajes de la multiplicadora
- Generador
- Frenos del rotor
- Transformador

Monitorización

- Anemómetros
- Sensores de vibración
- Vigilancia de la red eléctrica
- Protección contra rayos
- Telemando y vigilancia
- Predicción de fallos

