

INDICE

INTRODUCCIÓN AL CONTROL DE AEROGENERADORES	2
1 INTRODUCCIÓN	2
2 EL SISTEMA DE CONTROL	3
Control de pequeños aerogeneradores	4
Sistema de regulación de velocidad	4
Sistema de orientación.....	5
Control de generadores conectados a la red eléctrica	5
2.1 Conexión a Red	10
2.2. Desconexión de Red.....	12
3. DISPOSITIVOS DE REGULACIÓN DE POTENCIA	13
3.1 Paso de pala fijo (regulación por entrada en pérdidas) ...	13
3.2 Paso de pala variable	15
3.3 Velocidad de giro variable.....	21
4 DISPOSITIVOS DE ORIENTACIÓN.....	25
5 TELEMANDO Y VIGILANCIA.....	26
Predicción de fallos	27

INTRODUCCIÓN AL CONTROL DE AEROGENERADORES

1 INTRODUCCIÓN

En esta sesión del Máster en Energías Renovables se dará una visión del sistema de control de los aerogeneradores de eje horizontal conectados a la red eléctrica.

Inicialmente se hará una breve descripción de lo que es un sistema de control de aerogeneradores, sus funciones, las distintas estrategias, los elementos que normalmente lo componen y los parámetros principales de la máquina que deben medirse, supervisarse y controlarse.

A continuación se efectuará un breve análisis de los métodos de regulación de potencia haciendo hincapié en los sistemas de regulación de potencia mediante el cambio de ángulo de paso de la pala. Se describirá de una forma somera los métodos clásicos, hasta llegar a los métodos modernos de regulación electrónica y accionamientos normalmente hidráulico o eléctrico. Se realizará igualmente un sencillo análisis aerodinámico del método de regulación de potencia mediante cambio de ángulo de paso como complemento explicativo de este método de control.

Como ejemplo práctico, se presenta el algoritmo de control y una muestra del funcionamiento máquina comercial con paso de pala variable.

Por último se describirá el sistema de orientación de góndola, su función y los métodos de control del mismo finalizando al igual que en la descripción anterior con el método actual más ampliamente utilizado.

2 EL SISTEMA DE CONTROL

Los objetivos principales de un sistema de control son los siguientes:

- Obtener un funcionamiento automático y fiable del aerogenerador
- Conseguir que la turbina funcione en consonancia con el viento (orientación, control de potencia, etc.).
- Decidir la conexión/desconexión del generador y realizar correctamente los arranques y paradas del aerogenerador.
- Proteger al sistema (frente a sobrevelocidades, vibraciones, sobrecalentamientos, enrollamientos de los cables de interconexión, embalamientos y otros imprevistos).
- Maximizar el rendimiento del sistema.
- Señalizar posibles averías o funcionamientos incorrectos disminuyendo los costes de mantenimiento y los tiempos de reparación.
- Aumentar la vida útil del aerogenerador (minimizando las cargas imprevistas que se puedan presentar).

Todos estos objetivos nos llevan a un tratamiento global, flexible de las estrategias posibles de control sobre todo en grandes máquinas.

Un buen diseño de un aerogenerador puede tener un funcionamiento incorrecto o llegar a destruirse si no se desarrolla un sistema de control adecuado.

El *sistema de control* deberá ser *diferente en función del tamaño del aerogenerador*. Para pequeñas máquinas, el control será simple y normalmente pasivo, por el contrario, para grandes máquinas -media y alta potencia-, el sistema de control será más complicado debido a los múltiples parámetros a medir y el aumento de precisión requerido, pero representará un coste, que aunque sea alto, es pequeño en comparación con el coste total del sistema.

Así, los *controles pasivos* hacen sus medidas de la manera más simple posible y utilizan fuerzas naturales para actuar, mientras que los sistemas de control *activos* utilizan sistemas eléctricos, mecánicos, hidráulicos, neumáticos o combinaciones de los anteriores para alcanzar su propósito.

2.1 Control de pequeños aerogeneradores

Se utilizan en sistemas aislados de la red eléctrica. La mayor parte de los aerogeneradores en el mercado son aerogeneradores de eje horizontal a barlovento, si bien existen modelos comerciales en el mercado de eje horizontal a sotavento, así como de eje vertical (Solavent, Windside).

Normalmente no disponen de multiplicadora, siendo la unión directa del rotor con el generador. Generalmente se utilizan alternadores de imanes permanentes de 4 a 10 polos (Bergey, Westwind, Proven, LMW). En el rango de 3 a 30 Kw a veces se utilizan generadores de inducción (Australian Energy 5 kW, Wenus Inventus, Vergnet). Asimismo existen algunos diseños con generadores de reluctancia variable (A.O.C.).

2.1.1. Sistema de regulación de velocidad

La norma UNE-EN 61400-2 (Seguridad de los aerogeneradores pequeños) indica textualmente: "Deben utilizarse uno o más sistemas de protección si es necesario para mantener el aerogenerador dentro de los límites de diseño. En particular, deben existir medios disponibles para prevenir que se supere la velocidad límite de rotación de cálculo". Existe una gran variedad de soluciones utilizadas para regular la potencia y la velocidad de giro en los pequeños aerogeneradores. Entre ellas se incluyen:

- *Sin regulación.* En la que el aerogenerador se diseña para poder soportar las cargas que se produzcan en todas las condiciones de operación, incluidas las velocidades de giro que puedan presentarse en funcionamiento en vacío.
- *Regulación por desorientación,* en el que el eje del rotor está desalineado con el plano horizontal respecto a la dirección del viento incidente. Existen distintas soluciones para que se produzca esta desorientación del rotor, si bien la más utilizada es mediante un diseño en el que el centro de empuje del rotor no queda alineado con el centro de rodamiento de orientación.
- *Regulación por cabeceo,* similar al anterior, pero en el que la desalineación se produce en el plano vertical.
- *Regulación por cambio de paso.* Similar al utilizado en los aerogeneradores más grandes, aunque en su mayoría se utilizan sistemas de cambio de paso pasivos, en los que la variación del ángulo de ataque de las palas se produce mediante sistemas centrífugos. Actualmente se ensayan soluciones en las que se eliminan los rodamientos en el encastre de las palas diseñando la

raíz de la pala con baja resistencia a torsión, lo que permite que las cargas que actúan sobre la pala sean capaces de producir giro de la misma sobre su eje.

- *Regulación por pérdida aerodinámica*, similar a la utilizada en grandes aerogeneradores.

Los sistemas más utilizados son por cabeceo del aerogenerador debido al empuje, y por cambio de paso.

El punto clave en los pequeños aerogeneradores es conseguir una regulación adecuada mediante sistemas pasivos, puesto que las soluciones con mecanismos activos de paso variable, similar a los empleados en aerogeneradores de mayor tamaño, dan lugar a diseños más complejos, y por tanto, más caros y con mayor labor de mantenimiento.

2.1.2. Sistema de orientación

El sistema de orientación más utilizado para los aerogeneradores de eje horizontal a barlovento es por veleta de cola. El timón-veleta de orientación utilizado es, indistintamente, recto o elevado (con el fin de disminuir la acción de la estela del rotor sobre el timón).

En los aerogeneradores a sotavento la orientación se produce por la acción del viento sobre el rotor, si bien aparecen inestabilidades difíciles de controlar.

2.2. Control de generadores conectados a red eléctrica

En el *control activo* se deberán *medir* múltiples *variables* que darán información sobre el estado del sistema, al control central. Estas señales (velocidad del viento, orientación, velocidad del rotor, ángulo de paso, temperatura del generador, tensión y corriente de salida, etc.) se captarán mediante sensores o transductores que deberán ser suficientemente fiables y precisos, ya que toda la estrategia de control puede ser inútil si las medidas son erróneas. También se deberán proteger los elementos electrónicos y el cableado contra posibles descargas de origen atmosférico o contra interferencias electromagnética que puedan producirse (en las máquinas con convertidores electrónicos, el nivel de ruido electromagnético puede ser considerable y habrá que proteger las señales más sensibles).

El sistema de control deberá diseñarse para proteger a todo el sistema, pero de forma que la instalación de múltiples protecciones, no interfiera en la correcta operación de la máquina haciendo que su funcionamiento sea a veces pesado (continuos arranques y paradas). Esto se consigue haciendo que las *protecciones* del sistema sean

selectivas (deben actuar de acuerdo con el problema detectado) y estén *coordinadas* (cuando se produzca un error, debe actuar la protección que supervisa el sistema que ha fallado). Sólo cuando falla el control normal deberá actuar el sistema de emergencia, que es redundante y que funciona independientemente del sistema de regulación habitual.

Existen múltiples métodos y estrategias de control de aerogeneradores, casi tantos como tipos de máquinas, aquí se expondrá una visión general de los sistemas más utilizados actualmente.

El sistema de control integra los dispositivos necesarios de seguridad para garantizar la parada del aerogenerador en caso de producirse alguna condición anormal (falta de tensión de red, vibración excesiva, calentamiento excesivo de algún componente importante, velocidad del viento o de giro del rotor excesiva, etc.).

Los sistemas de control actuales permiten integrar de forma eficiente todos los subsistemas que intervienen en la correcta operación del aerogenerador, permitiendo además modificaciones de programas por el usuario, centralizado de la comunicación y recogida de datos, telecontrol de varios aerogeneradores en parques eólicos, interconexión con centrales meteorológicas, etc.

De cara a flexibilizar del sistema, los sistemas de control actuales son modulares, incluyendo dispositivos de visualización de todas las variables que intervienen así como las entradas y las salidas, permitiendo incluso la posibilidad de controlar manualmente la operación del aerogenerador. Para garantizar la fiabilidad de las señales de medida y control frente a perturbaciones de origen electromagnético, las entradas se suelen aislar mediante optoacopladores y las salidas mediante relés libres de potencial.

El control suele estar físicamente realizado mediante uno o varios PLC. Un PLC (Control con Lógica Programable, familiarmente denominado "autómata") está compuesto por uno o más microprocesadores que componen la unidad central de proceso, una etapa de memoria donde está el programa de control, un dispositivo de visualización y una etapa con entradas/salidas con sus respectivos convertidores, a través de la cual el sistema de control se comunica con los sensores y los sistemas que se desea gobernar. Asimismo, se puede conectar a un equipo de programación, mediante el cual se puede introducir o modificar el programa de control. Es habitual que al inicio de la operación de un parque se optimicen algunos parámetros del control en función de las características particulares del parque y de la experiencia de los primeros meses de funcionamiento.

El sistema de control del parque a veces se denomina SCADA (*Supervisory Control And Data Acquisition*). El telecontrol puede iniciar, desconectar y supervisar las turbinas de un parque. La transmisión de datos entre el aerogenerador y la subestación se suele realizar fibra óptica (la opción más robusta frente a descargas atmosféricas cerca del parque) o mediante cables conductores (RS-485 u otros protocolos). También es común tener instalado un módem en el ordenador de la subestación, que centraliza los datos del parque eólico. Actualmente se está desarrollando la norma *IEC 64000-25* para normalizar las comunicaciones dentro de un parque eólico.

El programa de control necesariamente debe incluir un subprograma de autocomprobación o diagnóstico que detecte inmediatamente malfuncionamiento tanto en el propio sistema de control como en los demás sistemas del aerogenerador, debiendo parar inmediatamente el aerogenerador y señalar lo más preciso posible la causa del problema. De esta manera se garantiza la seguridad del sistema y se disminuyen los costes de operación y mantenimiento al permitir localizar rápidamente el origen del fallo.

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.
 - * Problemas en la 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 (puede ser de corta duración y sostenida).
 - * Corriente máxima.
 - * Corriente máxima en monitorización.
- Potencia de salida.
 - * Detección de fallo en anemómetro.
 - * Potencia anormalmente baja para un determinado viento.
- 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-).
- 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.
- 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.
- 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 autómatas principal).
- Sistemas hidráulicos.
- Bajo nivel de aceite.
- Excesivas conexiones/desconexiones.

Todas las limitaciones anteriormente descritas que el sistema de control durante su operación puede detectar a través de anomalías, en el caso de que aparezcan, afectarán al aerogenerador de diversas formas. Se suelen programar distintos niveles de alarmas como son las alarmas de parada de máquina, las cuales obligan a inspeccionar la máquina y puesta en operación manual. Otras alarmas permiten a la máquina conectarse automáticamente cuando desaparece la causa de la alarma. Otras solo informan de una anomalía pero sin parar la máquina.

La figura 1 muestra la estructura del sistema de control para un aerogenerador de *velocidad variable con un convertidor electrónico*. Esta figura presenta un esquema con los más importantes estados y evolución entre ellos. En un sistema con las palas fijas o de velocidad fija, el sistema de control se simplifica (no se distingue entre funcionamiento a carga parcial y a plena producción) aunque la filosofía del control sigue siendo la misma. La denominación de cada uno de los estados en el panel del aerogenerador o en el telemando puede variar de un fabricante a otro y normalmente se utiliza los términos en inglés.

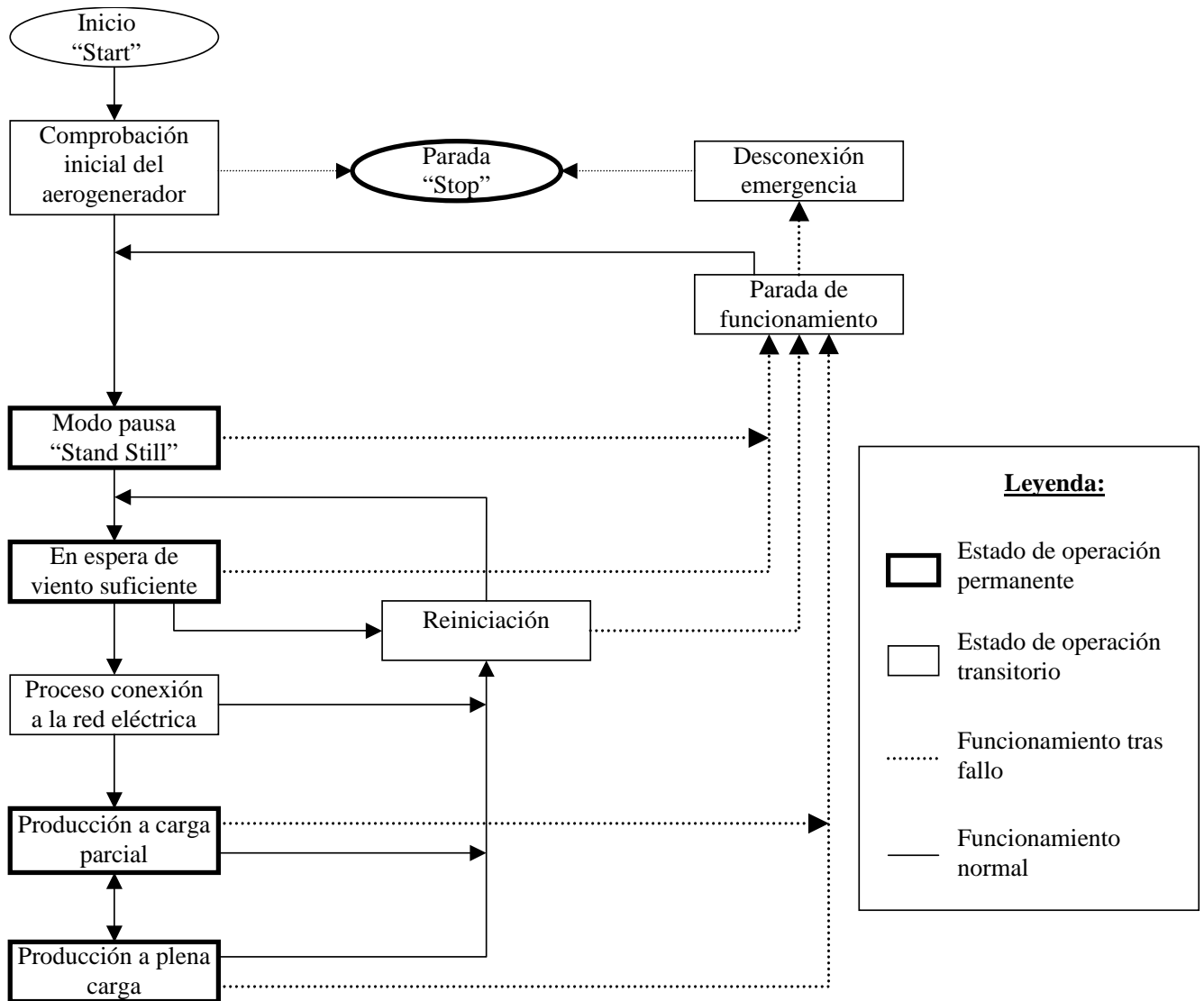


Figura 1: Diagrama de estados típico del sistema de control de un aerogenerador.

Salvo que se produzca una emergencia, el módulo supervisor se caracteriza por acciones a medio o largo plazo debido a cambios en las condiciones de operación. Típicamente, el módulo de supervisión conmuta entre los estados de operación de la turbina (producción, desconexión por bajo viento, etc.), monitoriza la turbina y las condiciones de fallo, inicia y para la turbina ordenadamente y coordina el control dinámico (proporciona las referencias del control como la velocidad deseada de giro).

En contraste, los módulos dinámicos ajustan continuamente y a gran velocidad los componentes para reaccionar a cambios rápidos en las condiciones de operación. Se pueden encargar de ajustar el paso de pala, el control electrónico del generador o controlar la posición de un actuador.

2.2.1 Conexión a Red

El proceso de conexión de un aerogenerador a la red eléctrica difiere según sea el tipo de la máquina, así máquinas de paso fijo y velocidad fija seguirán una estrategia, si disponen de sistema de cambio de paso seguirán otra y por último máquinas con cambio de paso y velocidad variable tendrán otra.

En cualquier caso, todos los sistemas intentarán realizar la operación lo más suave posible para evitar puntas de par, lo menos complejo posible y las menos veces posible. Para ello se deberán implementar sensores de medida adecuados a los parámetros que se miden y deberán seleccionar valores adecuados de esos parámetros para que el control tome decisiones correctas (evitar múltiples conexiones y desconexiones alarga la vida útil de los elementos de la máquina, en especial caja multiplicadora, ejes, rotor, generador, contactores, etc.).

Por ejemplo, la velocidad del generador se debe medir con suficiente precisión y fiabilidad ya que la conexión se debe producir a una determinada velocidad de giro de las palas, si se realiza antes el generador posiblemente funcionará como motor y después hay peligro de embalamiento. Además, en el momento óptimo se minimizan las corrientes de conexión y las oscilaciones de par.

- En el caso de *aerogeneradores con paso fijo y velocidad fija* el proceso de arranque que se sigue es el siguiente:

Una vez que el control ha chequeado todas las variables necesarias y no ha detectado ninguna anomalía, esperará a que se supere el límite mínimo de velocidad de viento para comenzar a generar. Si se cumple esta condición activa el sistema de orientación y una vez orientado libera el freno eléctrico a la vez que coloca las palas en posición de operación (mínimo ángulo) en el caso de máquina de paso variable a los aerofrenos en el caso de paso fijo. El aerogenerador de este manera está ya preparado para efectuar la conexión a red.

El aerogenerador comenzará a girar hasta alcanzar una velocidad mínima de rotación del eje de alta, momento en el cual activa el sistema de arranque suave para que la conexión se produzca sin esfuerzos mecánicos ni corrientes elevadas de conexión. El sistema de conexión suave suele consistir en un puente trifásico de tiristores que van aumentando gradualmente la tensión en bornes del generador hasta que se iguala a la tensión de la red eléctrica. Una vez efectuada la conexión el sistema de control puentea el sistema de arranque suave y conecta las etapas de compensación de reactiva.

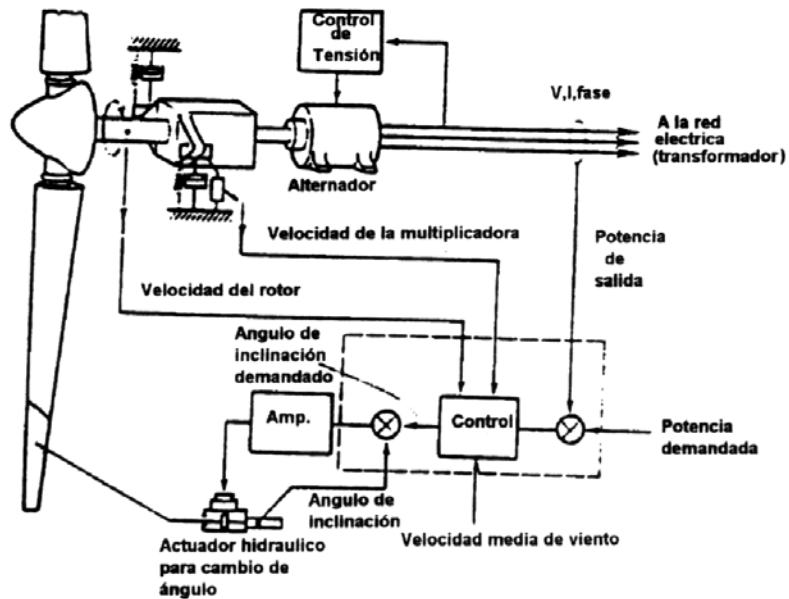


Figura 2: Esquema de un AE de paso variable (o con aerofrenos) y velocidad fija. (Figura tomada de “Principios de conversión de la Energía Eólica”. CIEMAT, 97).

• En el caso de sistemas de *paso variable* y *velocidad variable* el proceso que se sigue es el siguiente:

El sistema mide la velocidad de viento continuamente. Si durante pocos minutos se detecta una velocidad de viento suficiente para el funcionamiento del aerogenerador, se inicia el proceso de arranque automático. Para ello se coloca en una determinada posición se lleva a cabo un chequeo de los sensores entorno a 1 minuto. A continuación se alinea la góndola en la dirección del viento y las palas del rotor se ponen en posición de funcionamiento.

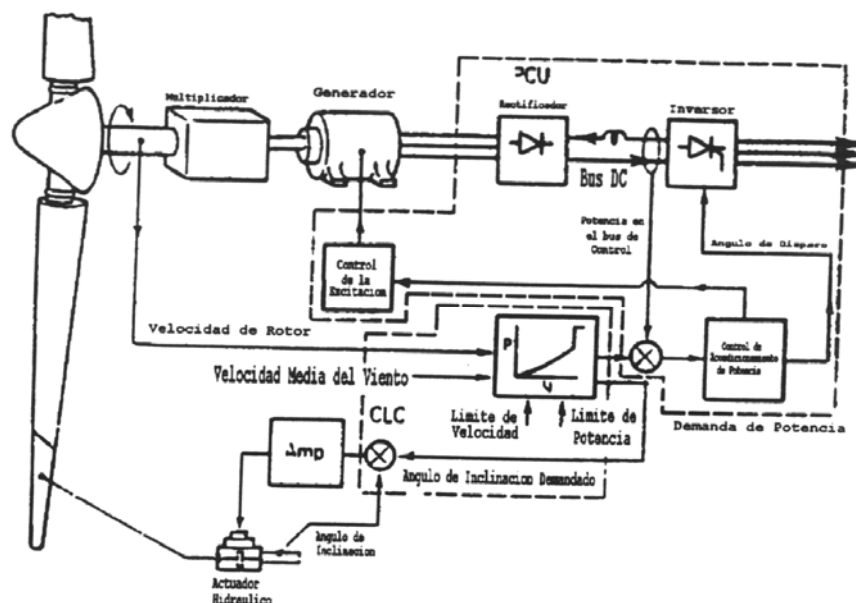


Figura 3: Esquema de un AE de paso y velocidad variables. (Figura tomada de “Principios de conversión de la Energía Eólica”. CIEMAT, 1997).

Al alcanzar el límite inferior de revoluciones el aerogenerador comienza a inyectar potencia a la red (este proceso de conexión eléctrica depende tanto del tipo de generador como del convertidor electrónico empleado).

2.2.2 Desconexión de Red.

El sistema de control está continuamente supervisando las revoluciones del rotor de alta, si las revoluciones disminuyen por debajo de un valor mínimo, se desconecta la compensación de reactiva y a continuación el aerogenerador de la red.

En sistemas de paso fijo, en el caso de que se alcance el límite superior de revoluciones, *se deberá actuar con el frenado de emergencia mediante aerofrenos en el primer momento hasta bajar un número de revoluciones suficiente, pero sin desconectar de la red al aerogenerador, con el fin de no perder el par resistente del generador y evitar embalamientos.* El aerogenerador se podrá desconectar de red cuando la velocidad de giro del rotor sea como máximo la de sincronismo. Por último y ya a bajas revoluciones se puede aplicar el *freno eléctrico* para efectuar la parada total.

En sistemas de paso variable, por encima de la velocidad nominal se mantienen las revoluciones del rotor, mediante la regulación del ángulo de paso de las palas. Para parar el máquina ya sea de forma manual o por control se aumenta el ángulo de las palas y con ello se reduce para el viento la superficie de incidencia efectiva de las mismas, hasta que el aerogenerador reduce su velocidad hasta casi la parada total. Existen sistemas de paso variable con palas independientes entre sí pero que actúan siempre sincrónicamente, en este tipo de sistemas se prevé que si falla una, las otras dos son suficientes para cambiando el ángulo de paso frenar la máquina.

Un problema en los aerogeneradores son las paradas por pérdida de red o salida de los límites de operación. En este caso los sistemas de paso fijo deben actuar con los aerofrenos y en el caso de paso variable deben colocar inmediatamente las palas en bandera, ya que se pierde el par resistente del generador. El sistema de control deberá detectar rápidamente cualquier situación de este tipo. En el caso de sistemas de velocidad variable, la desconexión de la red es inmediata, en cuanto se ha superado algún límite de red.

Actualmente, la legislación para productores en régimen especial obliga a instalar en la subestación del parque eólico protecciones para desconectar automáticamente cuando la red eléctrica presenta un funcionamiento atípico (tensiones por debajo o por encima del valor nominal, funcionamiento en isla, frecuencia fuera de rango, tensiones no simétricas, etc).

3. DISPOSITIVOS DE REGULACIÓN DE POTENCIA

La potencia entregada por una turbina eólica se debe limitar para no sobrecargar ciertos componentes (especialmente generador, transformador y multiplicadora). La potencia normalmente se regula mediante tres métodos:

- Regulación por entrada en pérdida de la pala.
- Regulación por variación del ángulo de paso de pala.
- Regulación por cambio de ángulo de paso de la velocidad de giro.

3.1 Paso de pala fijo (regulación por entrada en pérdidas)

En el primer caso, el perfil aerodinámico de las mismas palas consigue que cuando la velocidad del viento supere la velocidad del viento nominal, a la cual extrae la potencia nominal, comience a entrar en pérdida de manera que limite la potencia a extraer.

Este tipo de regulación se utiliza generalmente en máquinas de velocidad constante con generador asíncrono. Actualmente muchos aerogeneradores tripala de media potencia (por debajo de 1 MW) regulan la potencia eléctrica de salida de esta manera. Este sistema obliga a utilizar aerofrenos para evitar posibles embalamientos ya sea por excesiva velocidad de viento o mal funcionamiento. Los aerofrenos son dispositivos situados en la punta de la pala, accionados normalmente por un sistema hidráulico y se colocan a 90° de la cuerda de la pala cuando se abren, ofrecer la resistencia aerodinámica suficiente para reducir la velocidad de giro a un nivel seguro (para que los frenos mecánicos puedan actuar sin que la zapata o el disco se sobrecaliente).

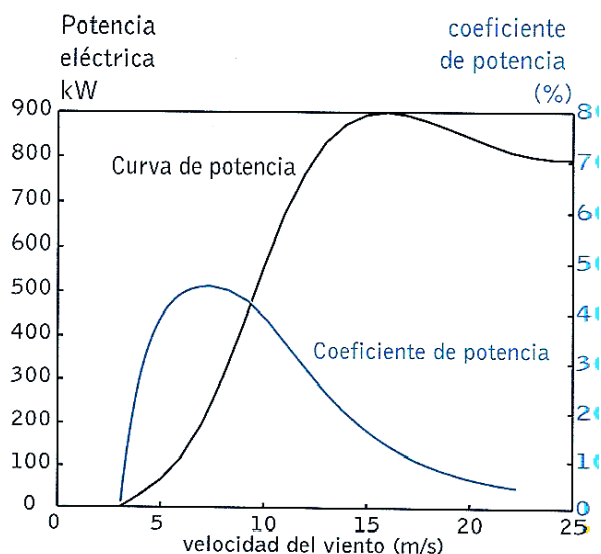
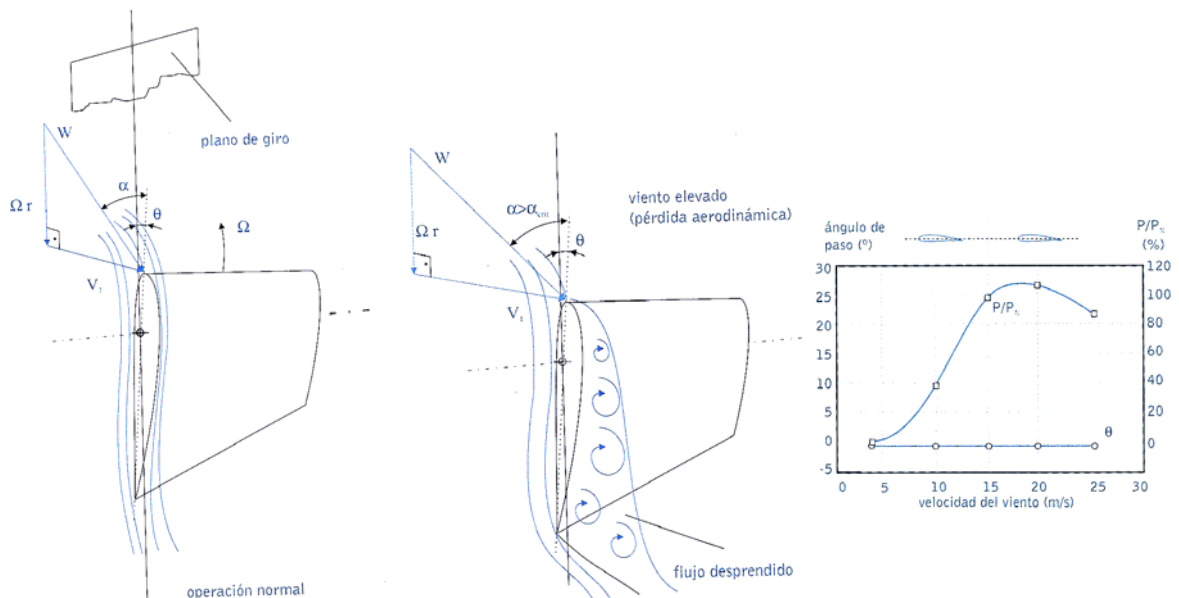


Figura 5: Curva y coeficiente de potencia para un AE de velocidad y paso fijos. (Figura tomada de “Sistemas Eólicos de producción de Energía Eléctrica”, p. 199).

En cualquier caso las ventajas de este tipo de regulación son la ausencia de potentes sistemas hidráulicos o eléctricos y grandes partes móviles, con el consiguiente aumento de fiabilidad y disminución de costes. Este sistema permite además el diseño de bujes más sencillos, ya que la raíz de la pala se ancla fija al rotor. No obstante, se tiene que prever una ventana o portezuela a mitad de la torre del aerogenerador para poder hacer acceder al aerofreno durante el mantenimiento.

Como inconvenientes está la obtención de una curva de potencia menos regular para valores de viento superiores al nominal si comparamos con sistemas de regulación de paso variable (esto puede producir un decremento de producción para vientos bastante fuertes). Las palas, al no poderse alinear con el viento, sufren una carga estática mayor. Estas turbinas también necesitan más viento para que las aspas empiecen a girar, ya que el par de arranque es bajo (por tanto tienen menor producción con vientos suaves). La amortiguación de oscilaciones aerodinámicas es pobre, por lo que presenta problemas de fatiga con turbinas de más de 50 m de radio o 1 MW de potencia. Por tanto, habrá que estudiar el potencial eólico del emplazamiento y los costes de mantenimiento para determinar el ahorro de coste y mantenimiento de estas turbinas frente a una ligera pérdida de producción con vientos suaves (cerca de la velocidad de conexión) y fuertes (más de 3 m/s por encima de la velocidad nominal).



Efecto del desprendimiento de la capa límite (entrada en pérdidas) en una pala. (Figura tomada de “Sistemas Eólicos de producción de Energía Eléctrica”, p. 195).

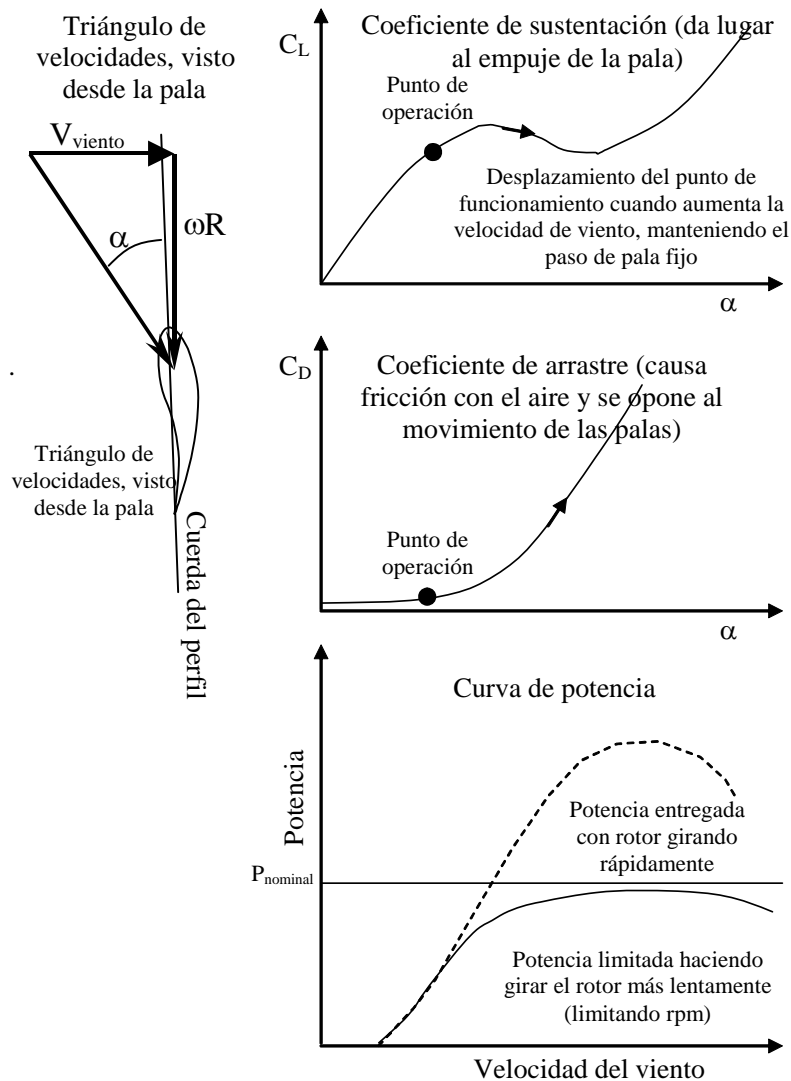


Figura 6: Efecto de entrada en pérdida en un AE de velocidad y paso fijos (coeficiente de sustentación, coeficiente de arrastre y curva de potencia para una turbina con λ –velocidad específica- alta y λ baja).

3.2 Paso de pala variable

Los sistemas de regulación por cambio del ángulo de paso de la pala, también denominados de paso variable, tienen la posibilidad de girar las palas a lo largo de su eje longitudinal para controlar la potencia según las condiciones del viento, maximizando la eficiencia aerodinámica del rotor.

Este sistema permite una extracción de potencia nominal para velocidades de viento superiores a la nominal, permitiendo además contar con un sistema de seguridad contra vientos con alta velocidad. Como inconvenientes es necesario reseñar que requieren un diseño de buje más complicado y la incorporación de actuadores mecánicos, hidráulicos o electrónicos con suficiente potencia para mover las palas.

Además en el caso de utilizar sistemas de cambio de paso variable mediante motores eléctricos deben disponer de autonomía en el caso de desconexiones súbitas. Para ello dispondrán de una batería de emergencia o de un pequeño generador de continua en el eje de alta que conecte éste al servomotor de modo que se puedan llevar las palas hasta el ángulo de parada (90°) hasta que el rotor pierda totalmente su velocidad.

Control pasivo del paso de palas

Mediante tecnología mecánica existen varios sistemas de regular el ángulo de ataque de las palas. Actualmente, este tipo de regulación, basada en la fuerza centrífuga, sólo se utiliza en máquinas pequeñas, para sistemas aislados de la red. Mediante unas pesas se logra cambiar el ángulo de ataque de las palas arrancando con un ángulo grande y según va aumentando la velocidad, las pesas producen un momento que hace que el ángulo de paso se sitúe en posición de marcha. Si la velocidad sobrepasa el límite para el cual el aerogenerador se ha diseñado, las pesas continúan cambiando el ángulo de ataque hasta que producen un par de frenado, reduciendo la velocidad del rotor. Otra forma de control pasivo bastante utilizado son las agujas centrífugas (turbina Jacobs). En este sistema son las propias palas, las que efectúan el frenado situándose según aumenta la velocidad del viento en ángulos de ataque mayores.

En los sistemas regulados centrífugamente los generadores se desconectan cuando aparecen velocidades altas de viento, consecuentemente el rotor deberá ser controlado para evitar su posible destrucción. Existen dos filosofías distintas al respecto: una se basa en la creencia de que es preferible mantener el rotor girando y aprovecharse de su robustez centrífuga reduciendo los posibles esfuerzos longitudinales de la pala y ayudar a evitar problemas en la torre. La otra se basa en parar el rotor asumiendo que los esfuerzos dinámicos debido al efecto del giro de las cargas inducidas serán mayores que las cargas debidas al viento.

Control activo del paso de palas

Respecto a los sistemas de regulación activos, los hay de varios tipos, todos ellos basados en la utilización de un sistema de control basado en ordenador o PLC. Actualmente los sistemas de cambio de paso más utilizados son los hidráulicos y los eléctricos.

Mediante el ordenador se puede determinar el estado de operación del aerogenerador, y las acciones a tomar a partir de ese momento. El sistema de control electrónico recibe mediante sensores que monitorizan las variables más importantes como son la velocidad del viento, las revoluciones por minuto del eje, las vibraciones que puedan aparecer, la potencia generada, el ángulo de paso de la pala, etc. A

partir de estas entradas, el ángulo de paso de la pala óptimo se obtendrá mediante un algoritmo grabado en el sistema de control basado en un regulador tipo PI (proporcional-integral), a partir del cual se envía una orden adecuada a los actuadores. Esta técnica controla las vueltas del rotor en todo el rango de operación.

En los sistemas diseñados para conservar la velocidad específica, también denominados de velocidad variable, logran que el valor de la velocidad del rotor sea óptima para cada velocidad del viento. Por tanto, son capaces de extraer siempre la máxima potencia, hecho importante sobretodo a velocidades de viento bajas (donde más horas de producción suele haber). Al poder ajustar dos parámetros de la turbina (velocidad de giro y paso de palas) pueden trabajar con rendimientos aerodinámicos mayores.

La limitación de la potencia captada por una turbina eólica se produce porque sus palas funcionan en un punto donde sus eficiencias aerodinámicas son menores. Esto se puede hacer aumentando o disminuyendo el paso de palas respecto a su valor óptimo.

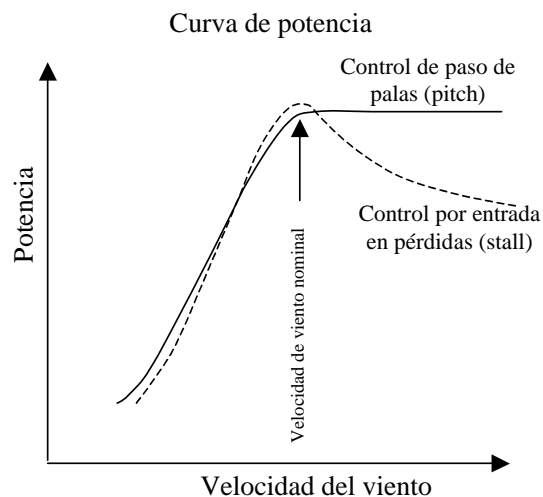
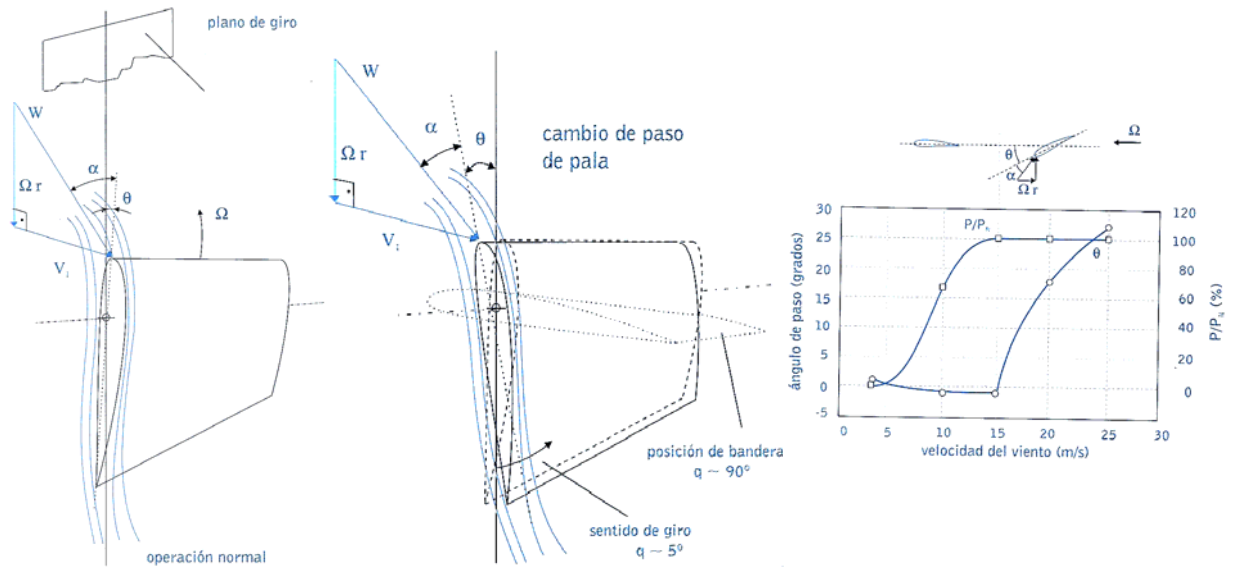


Figura 7: Comparación de la regulación del paso de palas variable y por entrada en pérdidas (con paso de palas fijo).

Regulación aumentando el ángulo de paso cuando también aumenta viento (**regulación por pitch con ángulos positivos**)

En turbinas comerciales cada vez se utiliza más la regulación del paso de palas, aumentando el ángulo de paso cuando aumenta el viento, ya que las cargas mecánicas sobre las palas se reducen cuando aumenta el viento. Además, este sistema amortigua mejor las oscilaciones aerodinámicas y proporciona un par de arranque mayor que cuando el paso de palas es fijo. Los esfuerzos mecánicos se disminuyen, pues al reducir el ángulo de ataque α también se disminuye la sustentación (principal fuerza aerodinámica).



Principio del control de paso de palas (utilizando ángulos de paso positivos – “regulación por pitch”–). (Figura tomada de “Sistemas Eólicos de producción de Energía Eléctrica”, p. 194).

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–.

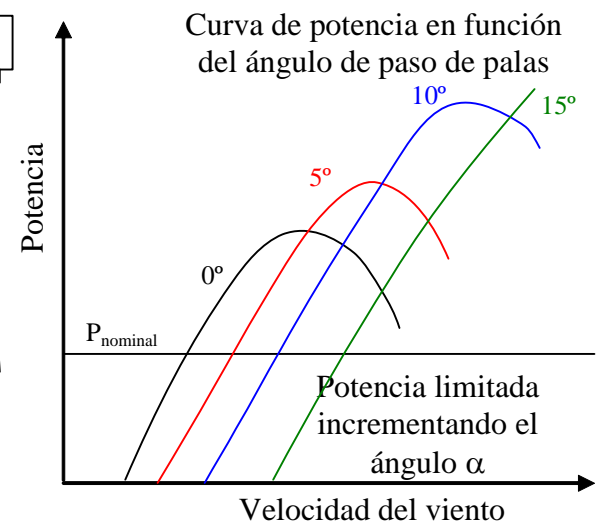
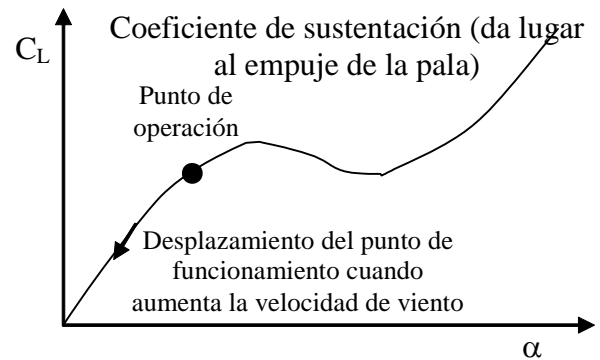
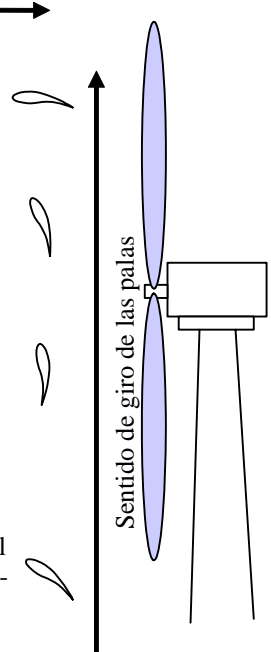


Figura 8: Coeficiente de sustentación y curva de potencia para una turbina según el paso de pala (el ángulo de ataque α se disminuye para vientos fuertes utilizando ángulos de paso θ positivos – “regulación por pitch”–).

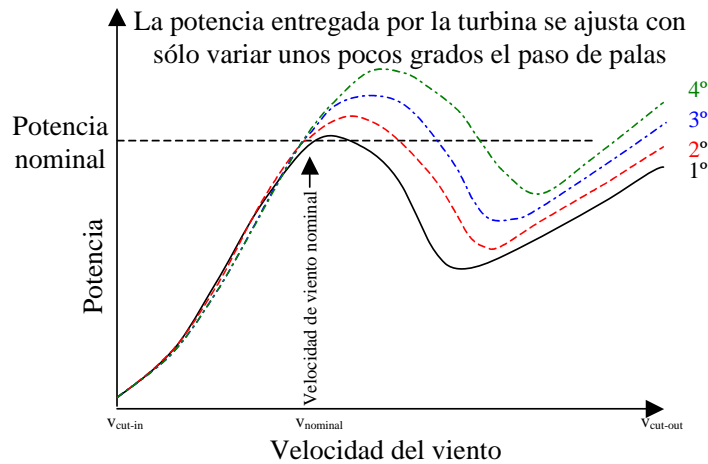
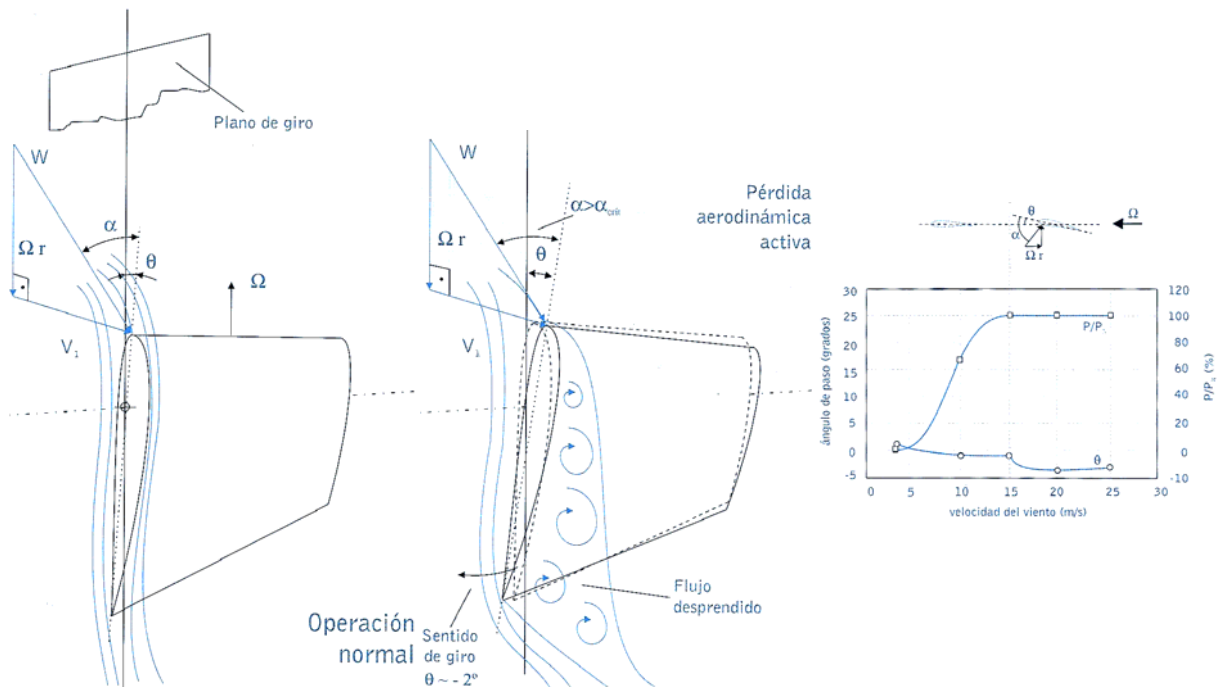


Figura 9: Curva de potencia de un aerogenerador, para distintos ángulos de paso de pala positivos.

Regulación del ángulo de paso, disminuyendo el paso cuando aumenta el viento para entrar en pérdidas (stall activo o **entrada en pérdidas asistida, con ángulos negativos**)

En comparación con los sistemas de entrada en pérdida convencionales, la pérdida aerodinámica activa tiene la ventaja de limitar la potencia a un valor determinado, independientemente de agentes externos como variaciones de la densidad del aire, polvo, insectos o hielo que puede modificar la rugosidad de la pala.



Principio del control de entrada en pérdidas asistida. (Figura tomada de “Sistemas Eólicos de producción de Energía Eléctrica”, p. 195).

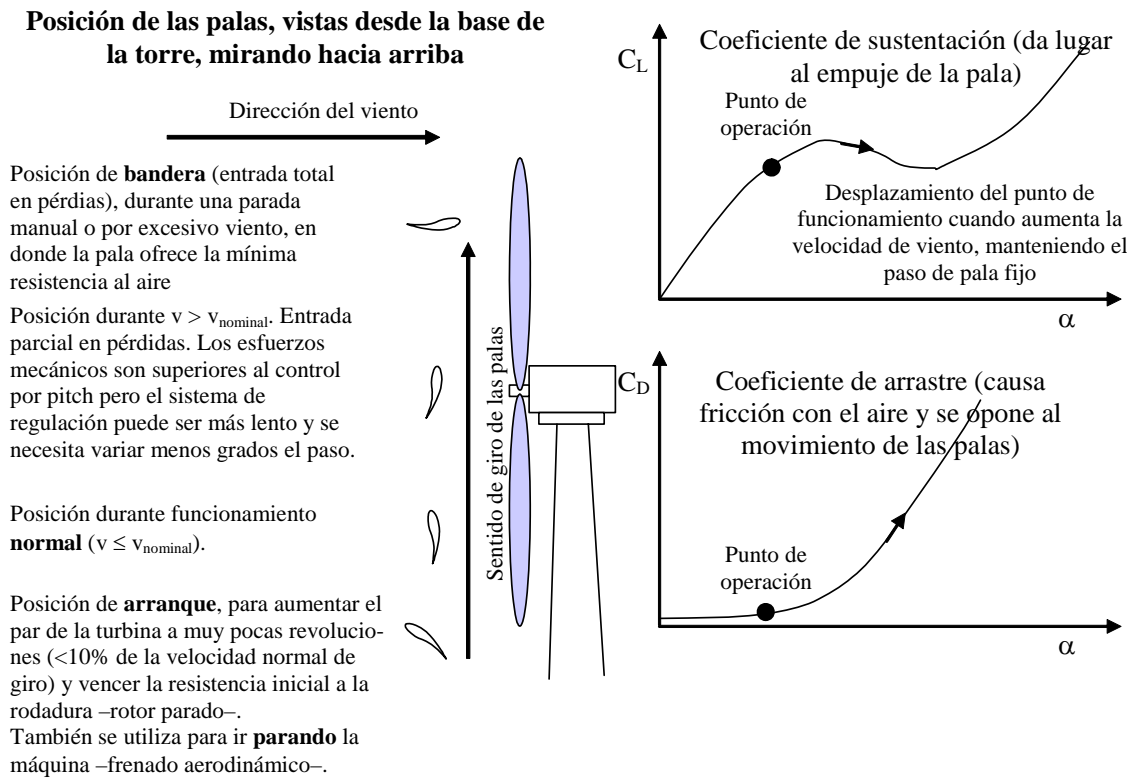


Figura 10: Coeficiente de sustentación y coeficiente de arrastre para una turbina con paso de pala variable (entrada en pérdidas asistida –ángulos de paso θ negativos-).

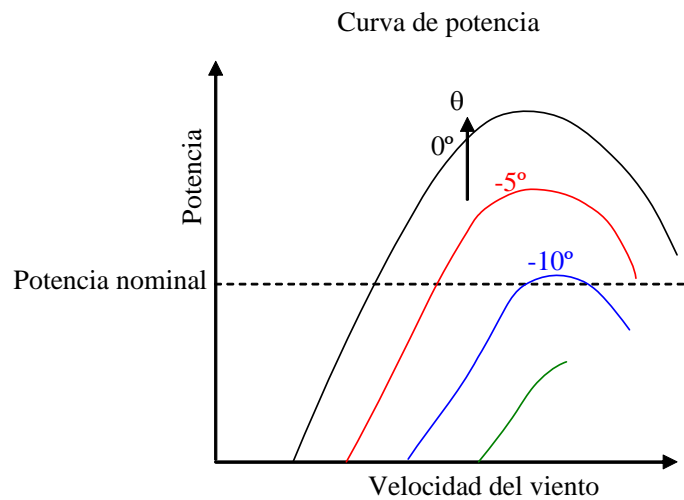


Figura 11: Curva de potencia de una turbina con paso de pala variable (entrada en pérdidas asistida –ángulos de paso θ negativos-).

En este sistema se limita la potencia utilizando ángulos paso de pala negativos. De esta forma, el sistema de control puede forzar a que las palas entren en pérdida, sin tener que utilizar perfiles especiales diseñados para que esto se produzca a una determinada velocidad (la limitación de potencia es mejor que en el caso con paso fijo y se pueden escoger perfiles de pala que produzcan menos ruido y que tengan un rendimiento ligeramente superior).

Los sistemas de pérdida aerodinámica activa frente a los sistemas de cambio de paso tradicionales presentan la ventaja de ser más sensibles en cuanto a la regulación se refiere, un pequeño cambio de ángulo de paso en la dirección opuesta a la velocidad del viento produce reducciones significativas de potencia, esto hace que la pala se gire menos veces y ángulos más pequeños, lo cual aumenta significativamente la vida útil del mecanismo de paso. Dada la elevada sensibilidad del control de potencia este tipo de sistemas se pueden utilizar con generadores de velocidad fija.

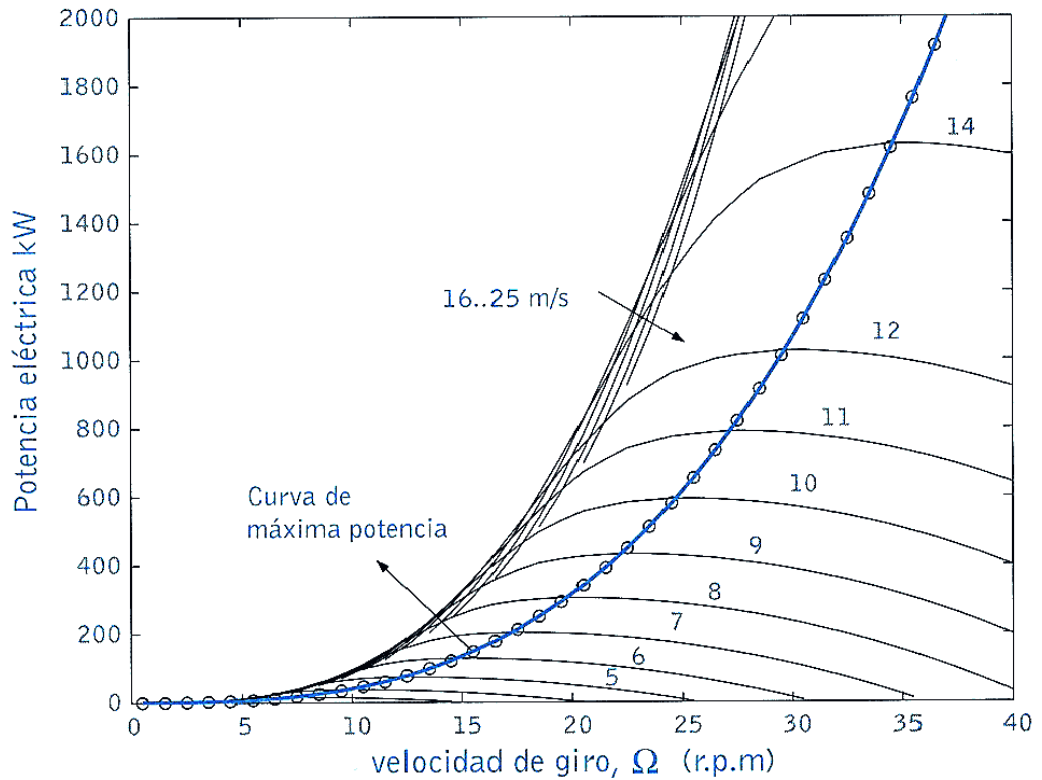
En la actualidad varios fabricantes de grandes aerogeneradores (BUNUS, NEGMICON, etc.) utilizan este tipo de sistemas. No obstante, la entrada en pérdidas activa (regulación con pasos de palas negativos) tiene una pobre amortiguación de las oscilaciones aerodinámicas (al entrar el perfil en pérdidas, se producen mayores turbulencias en las palas y por tanto, mayores problemas de fatiga en ellas).

Para finalizar, recordar que también existen algunos aerogeneradores que implementan sistemas de cambio de paso en punta de pala. Este sistema se suele usar en máquinas con doble generador o sistema de generación eléctrica que permitan variar la velocidad de giro algo más de lo normal.

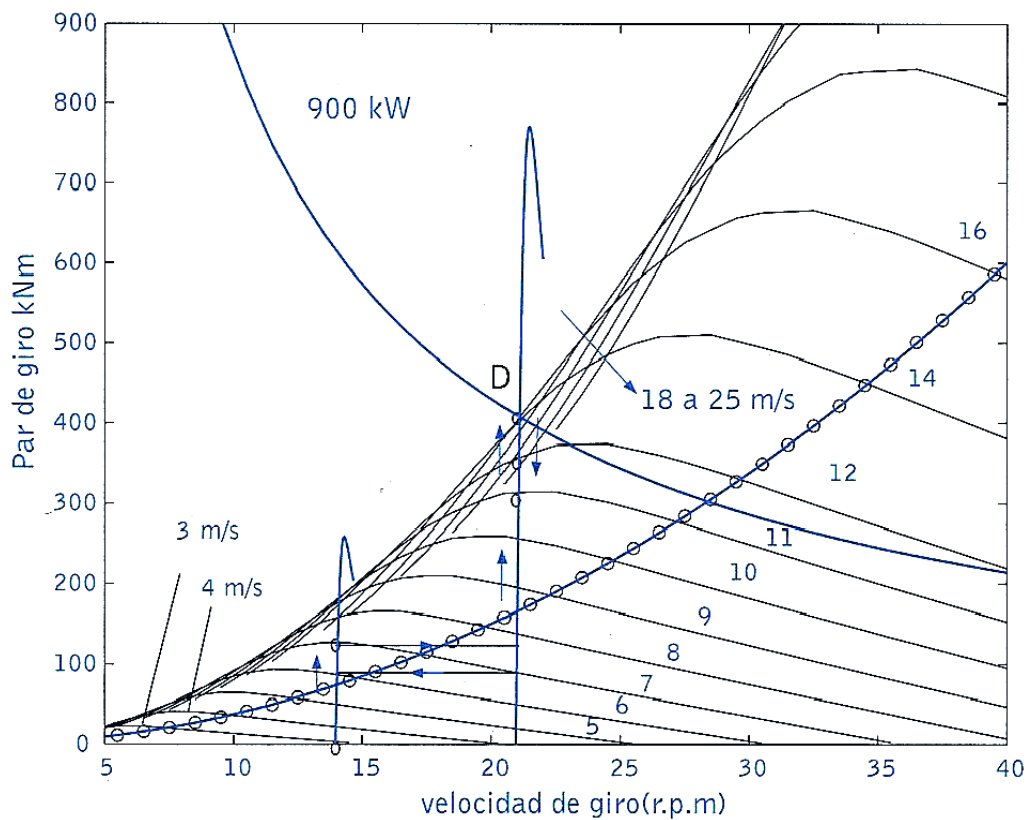
Las ventajas de este tipo de sistemas aparecen a la hora de realizar el diseño del encastre, ya que al desplazar del lugar de cargas máximas (raíz de la pala) la posición de los cojinetes de giro se pueden dimensionar encastres más eficientes como consecuencia, más baratos. Además, la pala puede variar de ángulo más rápidamente, lo cual posibilita el uso de control diferencial, en vez de control proporcional integral. En cuanto a inconvenientes, este tipo de regulación produce altos niveles de ruido aerodinámico debido a la discontinuidad en la pala y existe la posibilidad de que aparezcan inestabilidades debido a las separaciones de la capa límite en la discontinuidad. Como inconveniente está la posibilidad de espacio dentro de la pala, especialmente en rotores de alta velocidad de giro.

3.3 Velocidad de giro variable

Otro sistema de regulación es la variación de la velocidad de giro. Para hacer posible esto, es necesario un equipo electrónico que convierta la frecuencia a la que trabaja el generador (que es variable porque su velocidad de giro es variable) a la frecuencia de la red, que está fijada a 50 Hz en Europa. Este sistema electrónico supone un coste adicional y un incremento en el mantenimiento, que ha de ser estudiado comparando el incremento de producción que puede generar.



Característica potencia-velocidad de giro para diferentes velocidades del viento con el paso de palas óptimo para cada velocidad de viento. (Figura tomada de “Sistemas Eólicos de producción de Energía Eléctrica”, p. 198).



Característica par-velocidad para un sistema de dos velocidades (paso óptimo). (Figura tomada de “Sistemas Eólicos de producción de Energía Eléctrica”, p. 201).

En algunos sistemas comerciales, en vez de disponer de una variación continua de la velocidad, se tiene uno o dos generadores que pueden funcionar a dos velocidades distintas. Para bajos vientos, el funcionamiento es más ventajoso a la velocidad de giro más pequeña y con vientos fuertes se utiliza la velocidad alta. De esta forma se evita tener un equipo electrónico para regular la velocidad, a costa de perder flexibilidad en el control.

En la figura 12 se observa que se puede aumentar la potencia generada por una turbina, para vientos fuertes, aumentando la velocidad de rotación (un aumento en la velocidad de rotación de 33% -de 45 a 60 rpm- produce un aumento de la potencia del 360 % para una velocidad de viento de 16 m/s).

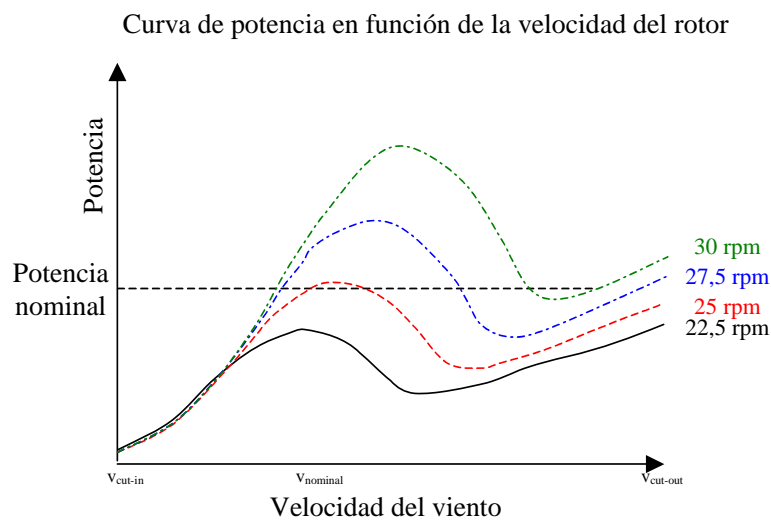
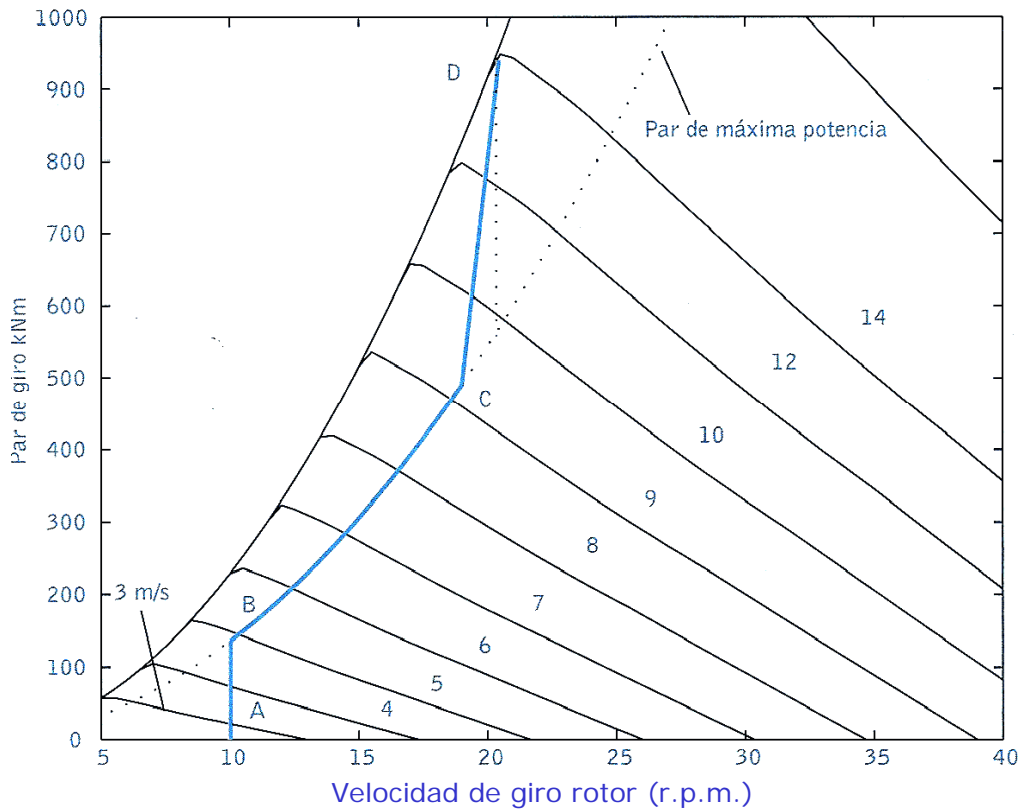


Figura 12: Efecto de la velocidad de la turbina en la curva de potencia. Hay que notar en las máquinas actuales (alrededor de 1 MW o más) giran más lentamente las palas (entre 20 y 30 rpm), pero los resultados son análogos.

En la figura 13 se muestra una comparación entre la producción de una máquina de paso y velocidad fija (gráfica intermedia) frente una de velocidad y paso variable (gráfica de abajo). La primera gráfica muestra la velocidad de viento medida en una torre meteorológica. Aunque las dos máquinas tienen potencia nominal diferente, las gráficas son comparables porque el eje de ordenadas es proporcional a su potencia.

Como conclusión de esta gráfica, podemos decir que la máquina de velocidad y paso variable produce más con vientos pequeños (en los que la máquina de paso y velocidad constante llega a funcionar como motor en breves instantes). Esto se debe a que, a bajas velocidades el perfil puede funcionar con mejor rendimiento si se disminuye la velocidad. De esta forma se hace trabajar a la turbina con paso de pala óptimo y velocidad específica λ óptima, maximizando el rendimiento con vientos suaves (con vientos fuertes, esto no es importante ya que en estos casos precisamente se busca limitar la potencia de la turbina).



Característica mecánica de un aerogenerador de velocidad variable. (Figura tomada de “Sistemas Eólicos de producción de Energía Eléctrica”, p. 212).

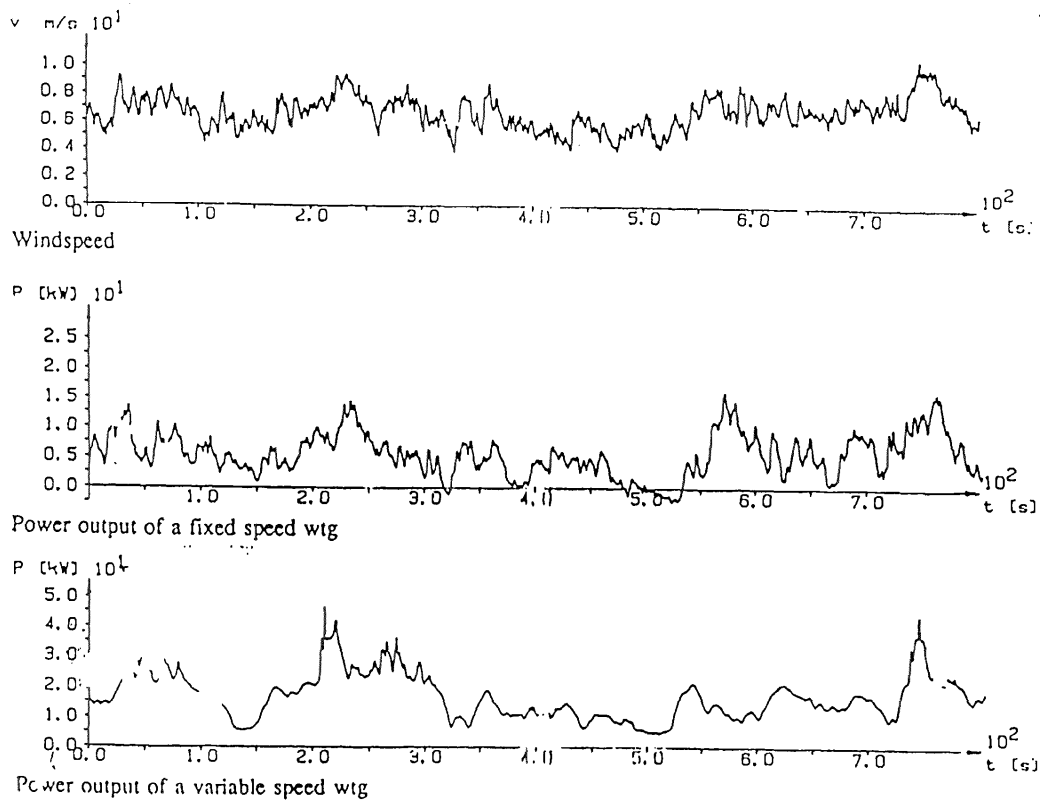


Figura 13: Comparación entre un AE de paso fijo y velocidad fija respecto uno de velocidad y paso variable. (Figura tomada de “Principios de conversión de la Energía Eólica”. CIEMAT).

La mejora de producción con estos sistemas es sólo del orden del 10% porque donde aventajan a los aerogeneradores de velocidad fija es a baja velocidad, cuando el contenido energético del viento es menor. Pero la velocidad variable presenta ventajas adicionales como suavizar las fluctuaciones de potencia generada y reduce la fatiga mecánica del sistema de transmisión del generador. También produce un menor ruido aerodinámico a bajos vientos. Como contrapartida está el decremento en fiabilidad y su mayor coste.

En la figura 13 se puede comprobar que la potencia entregada a la red es más constante, dentro de lo que cabe, en una máquina de velocidad variable, ya que las masas que están girando actúan como sistema de almacenamiento de energía y absorbiendo parcialmente los transitorios (la inercia del rotor y generador actúa como un volante de inercia, mitigando las fluctuaciones). Cuando hay un aumento brusco del par, estas masas se aceleran absorbiendo parte de esta fluctuación.

4 DISPOSITIVOS DE ORIENTACIÓN.

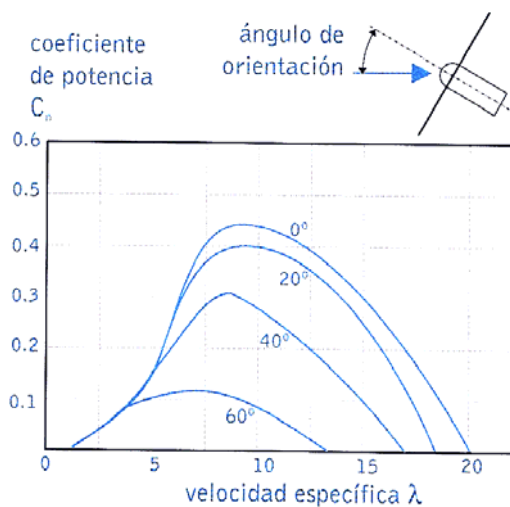
El aerogenerador deberá estar siempre situado en la dirección en la cual la velocidad del viento sea mayor. Para conseguirlo existen diversos métodos, unos más sencillos, normalmente mecánicos y otros más sofisticados en los cuales se aplican elementos activos (servomotores, etc).

En aerogeneradores de pequeña potencia, la solución más adecuada es la denominada por aleta estabilizadora, la cual situada en la parte posterior del aerogenerador, consigue que si las palas no están bien orientadas, la propia acción del viento sobre la aleta haga que el aerogenerador gire hacia la orientación correcta. Este sistema tiene el inconveniente de efectuar el cambio de orientación de una forma brusca.

Actualmente, la orientación cara al viento de la góndola en los aerogeneradores se realiza mediante una veleta electrónica. Esta veleta que va colocada en la parte superior trasera del aerogenerador sobre un eje perpendicular a él, envía una señal digital al control que será de distinto valor (1,0) según la veleta esté desorientada en un sentido de giro o en el otro, con respecto al eje longitudinal de la góndola. En el momento que el sistema de control recibe dicha señal durante un tiempo mínimo, libera el freno de giro de la góndola, que está compuesto normalmente por varias pinzas hidráulicas de muelles colocadas sobre un disco situado en la parte interior de la góndola y concéntrico al rodamiento de la corona, entonces ordena comenzar el proceso de orientación a un motorreductor que gira sobre la corona dentada. Normalmente la presión del freno hidráulico del sistema de

orientación no se libera totalmente con el fin de evitar arrastres no deseados de la góndola con vientos altos.

Es importante hacer mención al sistema de control de enrollado de cables de señal y de potencia que van desde la góndola hasta los cuadros de la base de la torre, ya que debido a sucesivas orientaciones, se pueden alcanzar varias vueltas de enrollado en un mismo sentido, el sistema de control deberá medir esas vueltas y a partir de un valor máximo dar la orden de desenrollado de cables. Si no se alcanza el valor límite de enrollado, a veces se aprovechan los momentos de parada para efectuar el desenrollado. El servomotor alinea la góndola con velocidades en el entorno de 0,5 grados/segundo (1 vuelta cada 12 minutos) para evitar pares giroscópicos elevados.



Variación del coeficiente de potencia en función del ángulo de orientación.

Otro método muy sencillo es colocar la aeroturbina detrás del soporte, orientándose automáticamente en la dirección del viento como si fuera una veleta (el problema de este método es que detrás de la torre el flujo de aire está perturbado y la fatiga de las estructuras es mayor). Por tanto, éste método sólo se utiliza en pequeñas turbinas.

5 TELEMANDO Y VIGILANCIA

Los aerogeneradores se construyen normalmente en emplazamientos remotos. Por tanto, la verificación visual no es siempre posible. Para reducir el tiempo que los parques eólicos o sus aerogeneradores están indisponibles, los sistemas remotos de diagnóstico son necesarios. La comunicación entre el sistema de control de los aerogeneradores y el ordenador remoto depende de las características de cada parque eólico. Dado que el parque suele tener una subestación eléctrica, allí se suele colocar un ordenador que centraliza toda la información de cada uno de los aerogeneradores.

Los aerogeneradores se pueden conectar al ordenador de supervisión (situado en la caseta de la subestación del parque eólico) a través de cables de cobre o de fibra óptica o transmisiones vía radio. Dado que los precios de los sistemas de comunicación por fibra óptica han disminuido mucho su coste, que los equipos de comunicaciones son sensibles a las sobretensiones inducidas en los cables de comunicación y que algunos parques tienen una elevada incidencia de descargas eléctricas atmosféricas, la fibra óptica se está empleando cada vez más dentro del parque.

El ordenador de la subestación, que monitoriza el parque, tiene usualmente una conexión telefónica vía MODEM (esta línea se puede compartir con el fax y con el contador de energía, que tiene también conexión telefónica). Dependiendo del sistema de telemando instalado, se puede acceder remotamente a los datos del parque (datos en tiempo real y fichero histórico) e incluso dar ciertas órdenes.

La monitorización de un parque se puede realizar de varias formas. Dependiendo de la distancia entre los aerogeneradores y el tipo de tecnología utilizada para la comunicación, éstos se pueden conectar individualmente al ordenador del parque o conectarse todos a un bus de comunicaciones. La comunicación entre las turbinas se puede realizar mediante cableado (lo más habitual) o mediante radio (si el coste del cableado es muy elevado –como en el mar- o los aerogeneradores están muy dispersos). Además del aspecto económico y de seguridad, la escalabilidad debe tenerse en cuenta a la hora de la elección –para poder incluir futuras mejoras o añadir más aerogeneradores–.

Predicción de fallos

La predicción de fallos es cada vez más habitual debido a los planes de aseguramiento de calidad y a la cada vez mayor cantidad de variables monitorizadas. La monitorización y análisis de algunas señales puede indicar un futuro fallo antes de que se detecte visualmente o a través del análisis de vibraciones o acústico, y por tanto evitar daños importantes a otros componentes. De esta forma, se pueden evitar daños colaterales y los costes de mantenimiento se reducen, ya que los intervalos de mantenimiento se pueden ajustar mejor al estado del aerogenerador y se puede planificar las reparaciones en periodos de bajo viento. Por tanto el tiempo de indisponibilidad de la máquina se reduce y la fiabilidad y la viabilidad económica se mejora.

Elementos externos al sistema como tormentas, descargas atmosféricas y faltas en la red eléctrica y el afloje de algunos componentes pueden provocar averías. Otras causas de fallos en componentes mecánicos son la fatiga de materiales y el desgaste y el

desapriete de tornillos y tuercas. Cambios observados cuando ocurren dichos defectos, tales como variación del comportamiento de las vibraciones, pueden ser reconocidos antes de que estos defectos se vuelvan críticos.

En los sistemas de predicción de fallos, las señales son continuamente evaluadas y normalmente las variables más relevantes se obtienen mientras la máquina está produciendo energía. La información relacionada con el estado y los fallos se puede obtener de la potencia generada, las corrientes y la velocidad de giro del generador, la aceleración medida por los sensores de vibraciones e incluso el análisis del ruido (tanto dentro del aerogenerador como en el exterior –por ejemplo, provocado por el astillamiento de una pala–).

Los análisis de espectro se pueden utilizar ya que el sistema es excitado con cargas permanentes, aleatorias y periódicas debido al viento y a la rotación de las palas. Para este estudio, las señales se dividen en sus componentes deterministas y aleatorias. Comparando los espectros de frecuencia medidos con los de un aerogenerador sin fallos y otro con determinados defectos, cambios en el comportamiento y la evolución de fallos puede ser monitorizado.

El conocimiento detallado del generador durante el funcionamiento normal y con fallos permite una diagnosis precisa del mismo. Aunque actualmente los sistemas de predicción de fallos sólo se instalan en los aerogeneradores de mayor potencia, en un futuro próximo se espera que se incluyan en la mayoría de las máquinas.

BIBLIOGRAFÍA

Bibliografía recomendada para el control de aerogeneradores

- ***Sistemas Eólicos de Producción de Energía Eléctrica*** (Capítulos 4 y 5). Autores: J.L. Rodríguez Amenedo, J.C. Burgos Díaz, S. Arnalte Gómez. Editorial Rueda S.L., 2003. Disponible en la biblioteca (signatura biblioteca: Electrot 169)
- Wind Energy Explained. Theory, Design and Application (Capítulo 7). Autores: J. F. Manwell, J. G. McGowan, A.L. Rogers. Ed. Wiley, 2002. Disponible en la biblioteca (signatura biblioteca: Electrot 268).
- Heier, Siegfried. "Grid integration of wind energy conversion systems". John Wiley & Sons Ltd. El mejor libro sobre la parte eléctrica de los aerogeneradores.

Bibliografía eólica adicional

- Principios de conversión de la Energía Eólica. Serie ponencias. CIEMAT, 1997. Varios Autores. Libro básico, de referencia, en español.
- Spera, D.A. (May 1994). Wind Turbine Technology: Fundamental Concepts of Wind Turbine Engineering. Fairfield, NJ: American Society of Mechanical Engineers; 700 pp. Libro básico, de referencia, en inglés.
- AWEA Directory of Industry Members. Es un libro con una lista de todas las compañías que se dedican (total o parcialmente) a cualquier aspecto de las energías renovables en EE.UU.
- Guide to UK Renewable Energy Companies. Editorial James & James. ETSU for dTI (Publicado por del Departamento de Comercio e Industria del Reino Unido). Es un libro con una lista de todas las compañías que se dedican (total o parcialmente) a cualquier aspecto de las energías renovables en el Reino Unido.
- Atlas Eólico de Aragón. CIRCE. Colección de Datos Energéticos de Aragón. Edita Gobierno de Aragón, 1995. (Los datos que incluye son aproximados, pues un libro de hace casi 10 años y realizado con recursos disponibles).

El material publicado por la asociación americana de energía eólica (AWEA) se puede obtener a través de la siguiente dirección: <http://www.awea.org/pubs/complimentary.html>. La comunidad europea tiene un directorio dedicado a la energía eólica, http://europa.eu.int/comm/energy_transport/atlas/htmlu/windbib.html (la lista no está muy actualizada). El gobierno de EE.UU. tiene otra lista de publicaciones sobre energía eólica (pero sólo actualizada hasta 1995) en http://info.nrel.gov/research/wind/wind_bib.html.

Bibliografía específica de sensores e instrumentación:

- Curso multimedia de sensores. F.J. Arcega.
- Harry N. Norton, "Sensores y Analizadores" Ed. Gustavo Gili, 1984.
- PALLAS ARENY, R.: Transductores y acondicionadores de señal. Marcombo, 1989.
- PALLAS ARENY, R.: Adquisición y distribución de señales. Marcombo, 1993.
- CREU: Instrumentación Industrial. Ed. Marcombo.
- Pallás, R., Rosell, J.: Interferencias en sistemas de medida. Ediciones UPC, 1995.
- Balcells, J, Daura F, Sparza R., Pallas R. Interferencias electromagnéticas en sistemas electrónicos. Serie Mundo Electrónico. Ed. Marcombo. 1992.

- Catálogos de fabricantes de sensores para la energía eólica.
<http://www.ammonit.de/>
<http://www.thiesclima.com/>
<http://www.campbellsci.com/>
<http://kermit.traverse.com/commerce/rmyoung/rmyprod1.htm>
<http://www.nrgsystems.com/>
<http://www.windspeed.co.uk/>
<http://www.dewi.de/dewi/magazin/18/04.pdf>
<http://www.dewi.de/dewi/magazin/17/02.pdf>
<http://www.winddata.com/>
<http://www.geonica.com/>

Bibliografía básica sobre regulación automática

- K. Ogata: Ingeniería de control moderna (Prentice-Hall) 1993
- K. Ogata: Sistemas de control en tiempo discreto (Prentice-Hall) 1987
- B. Kuo: Sistemas de control automático (Prentice-Hall) 1996
- P. H. Lewis, C. Yang: Sistemas de control en ingeniería (Prentice-Hall) 1999
- K. Dutton, S. Thompson, W. Barraclough: The Art of Control Engineering (Addison Wesley) 1997

Cursos multimedia sobre eólica o energías renovables

- Asociación Danesa de la Energía Eólica. <http://www.windpower.dk>
- Curso de Energías Renovables. UNED e IDAE, 1998. (en CD-ROM)

Otros recursos en internet

Nota: Dado que Internet evoluciona muy rápidamente, algunas direcciones pueden haber cambiado desde la redacción de estos apuntes. En caso de no poder acceder al enlace, el autor recomienda utilizar un buscador (tipo www.google.com, www.yahoo.es o similar) para obtener la dirección actualizada.

- Artículos avanzados sobre el control de aerogeneradores: buscar autores W.E. Leithead y D. J. Leith en la página www.hamilton.may.ie/research.html. La revista IEEE Energy Conversion System, accesible dentro de la universidad en <http://www.ieee.org> o en la hemeroteca, suele incluir artículos científicos sobre energía eólica, enfocados sobretudo desde el punto de vista eléctrico.
- Asociación Americana de la Energía Eólica (AWEA) <http://www.awea.org>
- Ciemat, Centro de Investigaciones Energéticas Medioambientales y Tecnológicas, www.ciemat.es
- CREST, organización que publica una revista sobre energía renovables gratuita (se envía por correo electrónico). <http://solstice.crest.org/>
- DEWI German Wind Energy (hasta hace poco, se podía consultar su revista online) <http://www.dewi.de/dewi/dewi.html>
- Energuía, una web muy buena sobre energía en general, con secciones específicas de energías renovables. http://www.energuia.es/es/bibliografia_gral.aspx
- Enlaces recomendados por la revista Windpower <http://www.wpm.co.nz/windweb.htm>
- Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía <http://www.idae.es/pages/default.asp>

- International Wind Engineering Forum <http://www.tamura.arch.t-kougei.ac.jp/IWEF/guide/index.html>
- LM Glasfiber A-S, probablemente el mayor fabricante de palas de aerogeneradores: <http://www.lm.dk/>
- NWTTC Wind Turbines <http://www.nrel.gov/wind/turbines.html>
- Página personal de Paul Gipe, autor de varios libros sobre energía eólica <http://www.ilr.tu-berlin.de/WKA/personen/paul.html>
- Pequeños aerogeneradores <http://www.ndsu.nodak.edu/ndsu/klemen/>
- Risø- VEA - European Wind Atlas <http://130.226.52.108/>
- Sustainable Energy - WWW Links <http://www.newenergy.org/newenergy/links.html>
- Sustainable Energy Engineering <http://www.egi.kth.se/msc/>
- The Canadian Sustainable Energy Web Site <http://www.newenergy.org/newenergy/>
- The Institute of Energy and Sustainable Development <http://www.iesd.dmu.ac.uk/>
- Universidad Técnica Danesa <http://www.afm.dtu.dk/wind/turbines/gallery.htm>
- Wind Engineering Research Center <http://www.wind.ttu.edu/>
- Wind Powering America <http://www.eere.energy.gov/windpoweringamerica/>
- World Meteorological Organization <http://www.wmo.ch/>

Listas de correo y revistas en formato electrónico

Grupo dedicado a la generación dispersa, es decir, a centrales eléctricas no convencionales, de pequeño tamaño y generalmente conectadas a redes de distribución (no de transporte). Es decir, centrales de cogeneración, eólicas y minihidráulicas.

<http://groups.yahoo.com/group/distributed-generation/>

El grupo a continuación está especializado en energía eólica y está moderado por la asociación americana de energía eólica, AWEA. Además, la AWEA publica la revista Wind Energy Weekly. Una versión reducida se manda por correo electrónico.

<http://groups.yahoo.com/group/awea-wind-home/>

Además, la AWEA publica la revista Wind Energy Weekly. Una versión reducida se manda por correo electrónico y es necesario apuntarse en <http://www.awea.org> o en <http://groups.yahoo.com/group/awea-wind-home>

Red de noticias sobre energías renovables. Para subscribirse a alguna de la listas, hay que enviar un mail a Environmental Review <mailto:er-list@rnn.com>,

Solar Utilities mailto:solar_utilities@rnn.com

Building Energy 2000 - NESEA/Yale <mailto:be2-subscribe@egroups.com>

Solar Energy Industries Association <mailto:seia-subscribe@topica.com>

Green Building Alliance Northeast <mailto:gbane-subscribe@egroups.com>

Energías, una revista en español: <http://www.tecnipublicaciones.com/amdpress/>

Otra revista sobre energías renovables: <http://www.energiasrenovables-larevista.es>