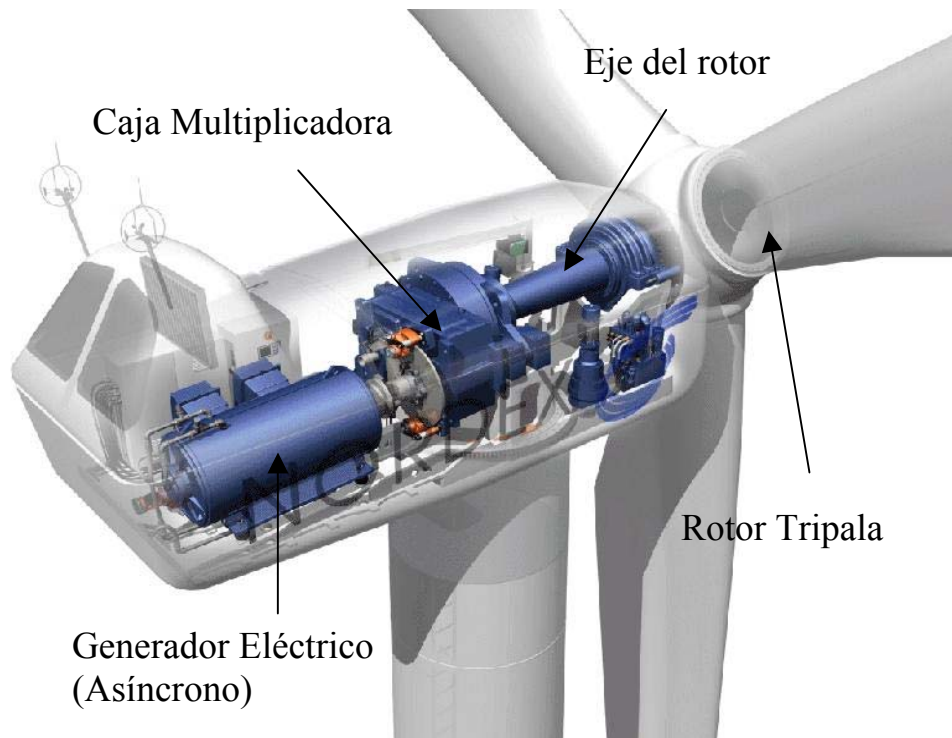


## **GENERADORES ELÉCTRICOS**

### **1. Generalidades de la conversión de energía eléctrica en mecánica.**

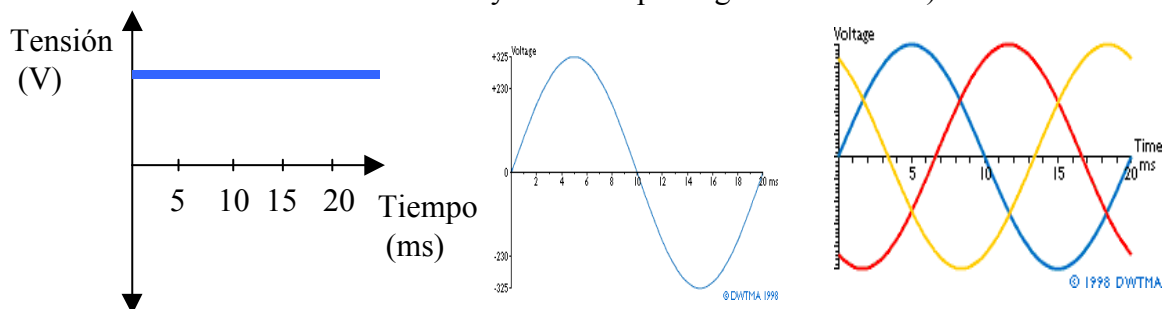
En un aerogenerador se transforma energía cinética del viento en energía mecánica mediante el giro del rotor eólico. Esta energía mecánica que aparece en el eje de éste rotor en forma de par y vueltas por unidad de tiempo, se transforma en energía eléctrica mediante una máquina eléctrica, que opera en modo generador de energía eléctrica, gracias al giro del eje del rotor del aerogenerador, provocado por la acción del viento sobre las palas.



**Figura 1. Esquema general de un aerogenerador con detalle del generador eléctrico, en éste caso asíncrono o de inducción.**

La máquina eléctrica puede ser de distinto tipo dependiendo del tipo de aerogenerador y su modo de operación (operación a velocidad de rotación del rotor cuasi-constante o a velocidad de rotación variable). La velocidad de rotación típica del rotor de un aerogenerador se encuentra en el rango de 20 a 100 rpm para aerogeneradores de gran potencia y de entre 100 y 400 rpm para aerogeneradores de pequeña potencia. Las máquinas eléctricas convencionales (con bajo número de polos) suelen tener velocidades de sincronismo de entre 750 y 3000 rpm. La solución de acoplamiento pasa por utilizar una transmisión o caja multiplicadora que acople la relación par/vueltas del rotor de la turbina y del generador eléctrico o utilizar generadores eléctricos específicos que tengan velocidades de sincronismo bajas equivalentes al rango de velocidades de rotación del rotor (generadores con gran número de polos). La generación de energía eléctrica se hace normalmente con máquinas que generan corriente eléctrica alterna (doble polaridad) descartándose totalmente hoy en día las máquinas de corriente continua.

La señal de la red eléctrica es de tensión y frecuencia fijas. La tensión viene representada por la amplitud de una señal sinusoidal y la frecuencia es el número de veces por segundo que la señal pasa por cero. (Los valores de éstos parámetros en nuestras viviendas son 220 voltios y 50 ciclos por segundo o Hercios).



**Figura 2. (a) Señal de tensión continua (frecuencia = 0), (b) señal alterna sinusoidal monofásica (Tensión eficaz: 220 voltios, Periodo: 20 ms, frecuencia. 50 Hz) . (c) Señal de tensión trifásica compuesta por 3 señales alterna monofásicas desfasadas 120°.**

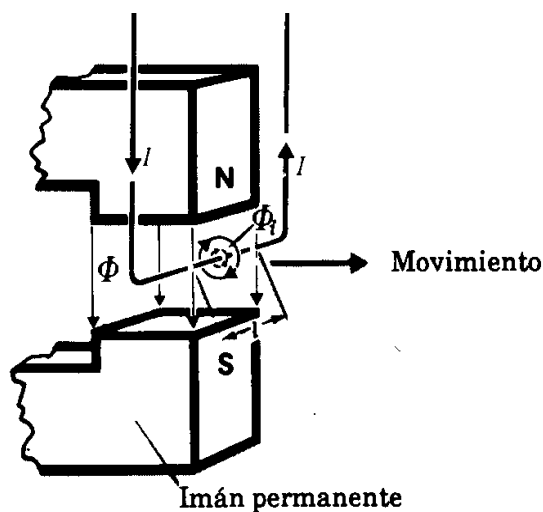
En la figura 2 a modo de comparación, se muestran una señal continua y otra alterna de una sola fase (monofásica). La mayoría de los generadores generan en sistemas polifásicos, mayormente trifásicos (en redes de distribución y transporte), aunque también hay generadores hexafásicos o dodecafásicos (generadores acoplados a la red eléctrica a través de convertidores de señal, normalmente electrónicos).

El principio de funcionamiento de los generadores eléctricos se basa en la acción que se establece entre la corriente eléctrica y el campo magnético.

A modo de explicación de éste fenómeno se tiene que si por un hilo conductor se hace pasar una corriente eléctrica, en sus inmediaciones se crea un campo magnético. Este campo magnético se representa por líneas concéntricas respecto al eje conductor, cuyo sentido, según convenio, es el horario cuando se mira en el mismo sentido del paso de la corriente. (Ver figura 3)

A la cantidad de líneas de campo obtenidas, se le denomina flujo magnético y a éste por unidad de superficie se le denomina inducción magnética.

Si se desea aumentar el flujo magnético, en principio se puede aumentar la corriente que pasa por el conductor o aumentar la longitud del conductor. Una manera de aumentar la longitud del conductor es arrollarlo formando varias espiras (bobina). Cuando se hace pasar una corriente por la bobina, ésta se



**Figura 3. Corriente inducida y reacción magnética obtenida en un conductor al moverlo dentro del campo magnético.**

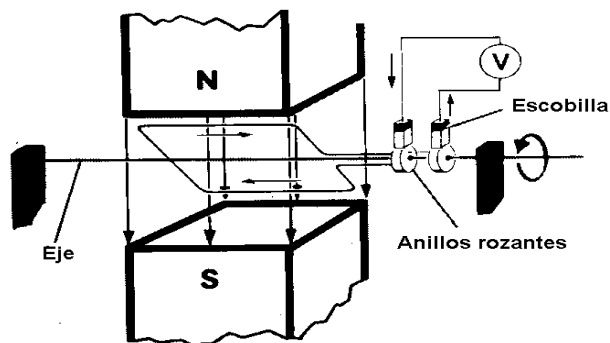
comporta como un imán permanente. El punto de salida del campo magnético será el polo norte (N) y el de entrada, el polo sur (S).

El aire es un mal conductor magnético, pero existen materiales denominados ferromagnéticos (hierro, acero, etc.) con muy buena conductividad magnética. Si se introduce un material de éste tipo en el interior de la bobina, se aumenta la magnitud del campo magnético obtenido. El dispositivo obtenido se denomina electroimán y perderá sus propiedades magnéticas (salvo un pequeño magnetismo remanente) al anular la corriente que pasa por el conductor. En el caso de producir el campo magnético con un imán permanente, se mantendrían estas propiedades aún con la máquina parada. Como ya se verá adelante, electroimanes o imanes permanentes serán los polos que sirven para excitar los generadores de corriente continua y alterna.

Si mediante un electroimán se genera un campo magnético y se atraviesan sus líneas de campo por un conductor en movimiento, la variación del flujo magnético que atraviesa ese conductor induce una tensión en el mismo denominada fuerza electromotriz. Si se cierra el circuito del conductor, la fuerza electromotriz inducida dará origen a una corriente inducida, la cual al pasar por el conductor origina un nuevo campo magnético que influye al campo creado por el electroimán.

Si se varía la velocidad de movimiento del conductor, variará el flujo magnético que le atraviesa y, por lo tanto, el valor de la fuerza electromotriz inducida en él. Además, si como ya se ha hecho en el electroimán, aumentamos la longitud del conductor haciendo espiras, el valor de la fuerza electromotriz, inducida en el conductor aumentará.

Moviendo el conductor en la misma dirección que las líneas de campo, no se genera tensión en el conductor por no variar el flujo magnético cortado. Por ello, básicamente el método utilizado para transformar la energía mecánica en eléctrica es mover el conductor (espira) girándolo dentro del campo magnético. El flujo cortado por el conductor varía al modificarse el ángulo que éste forma con las líneas de campo. Este flujo magnético cortado será nulo cuando el conductor se encuentre a  $0^\circ$  ó  $180^\circ$  y máximo cuando se forme  $90^\circ$  ó  $270^\circ$ . La señal de la tensión inducida en el conductor será igualmente variable y su frecuencia dependerá de la velocidad con que se mueva el conductor.



**Figura 4. Representación de la espira girando dentro del campo magnético. A través de los anillos rozantes se extrae la corriente inducida.**

## **2. Tipos de generadores eléctricos.**

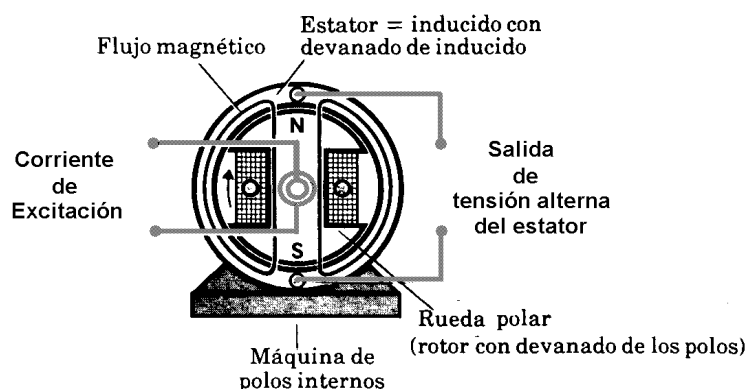
Los generadores eléctricos se pueden clasificar básicamente de acuerdo al tipo de señal eléctrica que producen: continua o alterna.

Los aerogeneradores con generador eléctrico de corriente continua o dinamos están totalmente descartados para máquinas de alta potencia, ya que sólo se pueden conectar a la red eléctrica mediante convertidores electrónicos que conviertan la corriente continua a alterna. Únicamente, en aplicaciones aisladas de baja potencia, en las cuales el sistema de acumulación eléctrica utilizado sea una batería se han utilizado. El alto precio de la máquina y el alto coste de mantenimiento (cambio de escobillas, etc) hacen también que su uso sea marginal y hayan sido sustituidos por alternadores síncronos de imanes permanentes que junto a un puente rectificador son muy útiles para aplicaciones en corriente continua.

Dentro de los generadores de corriente alterna se puede establecer una clasificación de acuerdo a los generadores autoexcitados (síncronos) bien sea con corriente eléctrica continua inyectada en las bobinas del rotor o excitados mediante imanes permanentes y excitados a partir de la red eléctrica conectada a las bobinas del estator de la máquina (asíncronos)

### **Generador de corriente alterna síncrono**

Si mantenemos los conductores o espiras en reposo (estator) y hacemos que sea el campo magnético el que experimente un movimiento giratorio relativo respecto al conductor, mediante el giro de un rotor con múltiples polos, obtenidos mediante espiras por las que pasa una corriente continua de excitación o por imanes permanentes, se produce una fuerza electromotriz inducida en los conductores que están en reposo, cuya amplitud dependerá del nivel de corriente de excitación y su frecuencia de la velocidad mecánica de giro del rotor.



**Figura 5. Esquema básico de un generador síncrono con 2 polos excitados mediante corriente continua.**

La ventaja que se obtiene estriba en que la corriente alterna se puede extraer de los bornes fijos y no de las escobillas sometidas continuamente a rozamiento. La corriente inducida se produce en este caso en los devanados con núcleo de hierro, que están en reposo y se encuentran distribuidos en la parte interior del estator, de manera que la tensión y la corriente inducidas sean perfectamente sinusoidales.

Los electroimanes en unos casos o los imanes, también llamados polos generadores del campo magnético se encuentran en la parte giratoria -rotor- del generador eléctrico. Los polos se realizan sobresaliendo de la superficie de rotor para máquinas de más de cuatro polos o a ras de superficie para máquinas de 2 ó 4 polos. Estos polos, compuestos por electroimanes, dispondrán de corriente continua de excitación suministrada desde el exterior, mediante anillos rozantes y escobillas o interna, mediante corriente continua obtenida a partir de una dinamo o mediante un pequeño alternador situado sobre el mismo eje del generador, rectificando la corriente obtenida.

Normalmente, los generadores síncronos son trifásicos. Un generador síncrono trifásico dispone de tres devanados iguales en el estator, dispuestos de forma que queden desplazados entre sí 120°. Durante una vuelta del rotor, los polos Norte y Sur pasan frente a los tres devanados del estator. Por ello, se habla de campo magnético giratorio. Durante éste proceso, en cada uno de los devanados se genera una tensión alterna monofásica. Las tres tensiones alternas monofásicas tienen el mismo ciclo en el tiempo, pero desplazadas entre sí en la tercera parte de una vuelta, por lo que se dice que tienen la misma "fase de oscilación".

Por coincidir siempre el desplazamiento del campo magnético giratorio con el desplazamiento del rotor (rueda polar) es por lo que se denominan generadores síncronos.

En los generadores síncronos la velocidad de rotación del rotor que genera el campo magnético y la frecuencia de la señal eléctrica inducida están relacionadas a través de la ecuación:

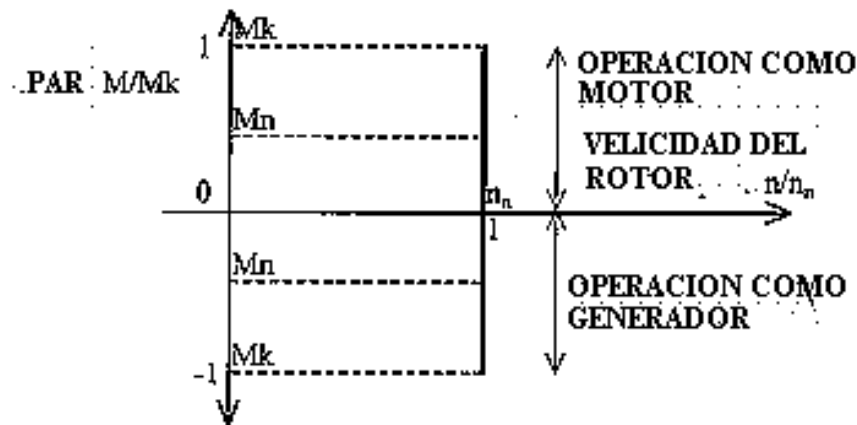
$$f = \frac{p \cdot n}{60}$$

siendo el número "p" el número de pares de polos que generan el campo magnético, "n" el número de revoluciones por minuto que da el eje del rotor del generador y "f" la frecuencia de la señal eléctrica de salida (ciclos/s o Hercios).

En nuestro país la frecuencia de la tensión de red es 50 ciclos/segundo (Hz), por lo tanto, si se desea conectar a la red un generador síncrono compuesto por dos pares de polos en su rotor, la velocidad de sincronismo será 1500 rpm, a ésta velocidad girará siempre el rotor mientras el generador esté conectado a la red, ya que se supone que la red es de potencia infinita frente a la potencia del generador conectado a ella.

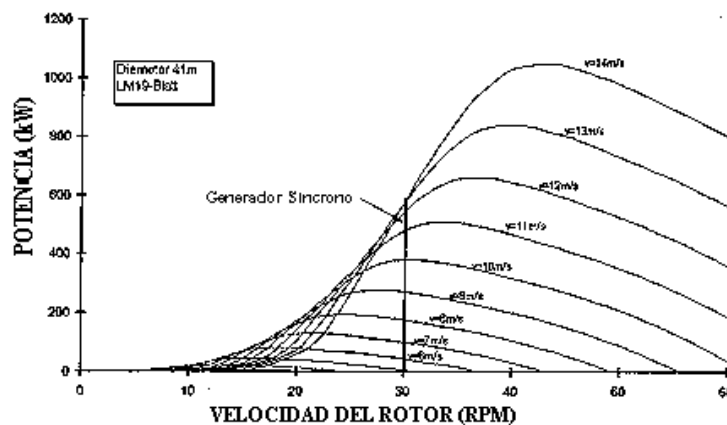
Es evidente que si un aerogenerador de eje horizontal de rotor rápido, por ejemplo un tripala de 40 metros de diámetro se diseña para girar, cuando está acoplado a la red a 30 rpm deberá de disponer de una caja multiplicadora de relación de transformación 1:50, que haga el acoplamiento entre el eje de la pala y el eje de generador eléctrico.

Si el eje de la aeroturbina está solidariamente unido con el eje del generador, las bajas vueltas de la aeroturbina obligan a diseñar el rotor del generador con muchos polos. Este tipo de generadores con gran número de polos (hasta 90 o más) se utilizan en aerogeneradores de velocidad variable de gran potencia. (Enercon, Lagerwey).



**Figura 6. Característica Par-velocidad de una máquina síncrona conectada a la red eléctrica.**

El generador síncrono presenta una característica de potencia–frecuencia recta al estar conectado a una red de potencia infinita con frecuencia y tensión constantes, la velocidad de giro de las palas se mantiene constante, ante variaciones de la velocidad del viento. Los incrementos de velocidad del viento se transmiten a la red mediante un incremento de la potencia activa suministrada por el generador, pero a velocidad de giro constante. Para altas velocidades de viento, por encima de la nominal el generador síncrono puede soportar sobrecargas instantáneas de hasta el 150 y el 250%. Para la conexión de un generador síncrono directamente a la red eléctrica es necesario realizar un proceso de sincronización bastante complejo que asegure que la tensión generada y la tensión de la red son idénticas en frecuencia, amplitud y fase, esto además de las fluctuaciones de potencia de salida y las mayores cargas mecánicas comparando con las máquinas asíncronas, junto con su alto precio y el incremento de los costes de mantenimiento hacen que éste tipo de generador no se utilice en aerogeneradores de velocidad constante con conexión directa a red.



**Figura 7. Característica Par - Velocidad de una máquina eléctrica síncrona conectada a la red eléctrica, superpuesta con las familias de curvas Par - Velocidad de un determinado rotor eólico para distintas velocidades de viento. El sistema se supone con caja multiplicadora para acoplar el régimen de vueltas del rotor y de la máquina eléctrica**

Este tipo de generador se utiliza en aerogeneradores de velocidad variable, bien sean de pequeña potencia para carga de baterías a través de un rectificador - cargador electrónico o aerogeneradores de velocidad variable de media y gran potencia. En ambos casos son generadores de baja velocidad de sincronismo mediante un alto número de polos.

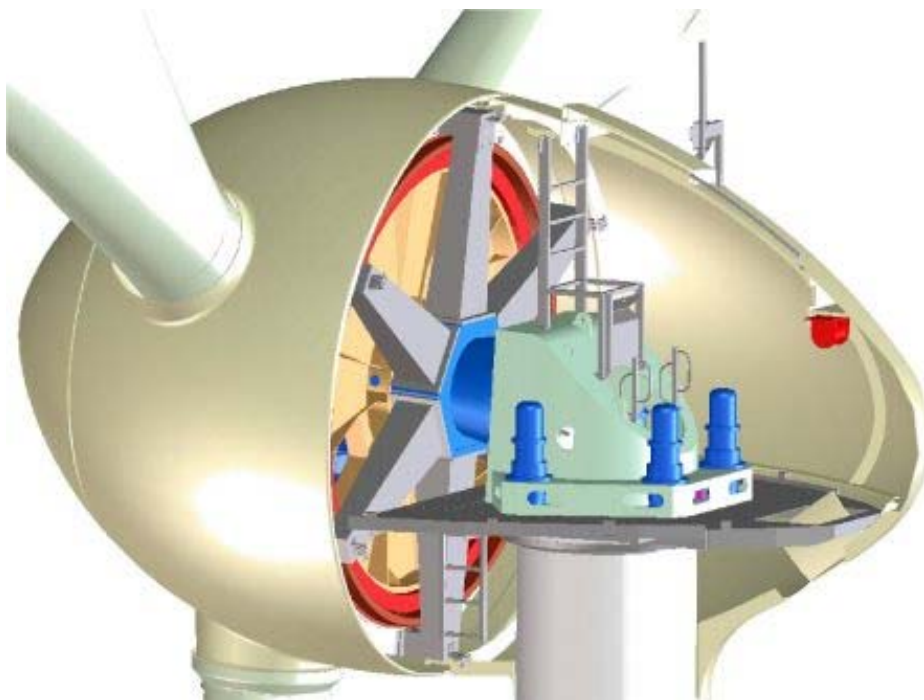
En el caso de sistemas autónomos, los generadores síncronos son muy útiles debido a la posibilidad de controlar la energía reactiva. Tanto la generación como el consumo de energía reactiva es posible mediante la variación de la corriente de excitación. Además se pueden cambiar los niveles de tensión y frecuencia.

### **Generadores síncronos multipolares.**

El inconveniente principal del uso de generadores de bajo número de polos (2, 4, 6 etc.), es la necesidad de implementar una caja multiplicadora, la cual incrementa el peso razonablemente, genera ruido, demanda un mantenimiento regular e incrementa las pérdidas del aerogenerador. El incremento del coste no es significativo, pero es un elemento que en algunos aerogeneradores ha sido fuente de graves problemas. Por ello se utilizan cada vez mas sobretodo en aerogeneradores de velocidad variable, generadores síncronos con alto número de polos bien sean electroimanes o imanes permanentes.

### **Generador síncrono multipolar excitado eléctricamente.**

Este tipo de generador evita el uso de caja multiplicadora debido a que al disponer de un gran número de polos, su velocidad de sincronismo es baja y perfectamente compatible con la velocidad del rotor del aerogenerador.



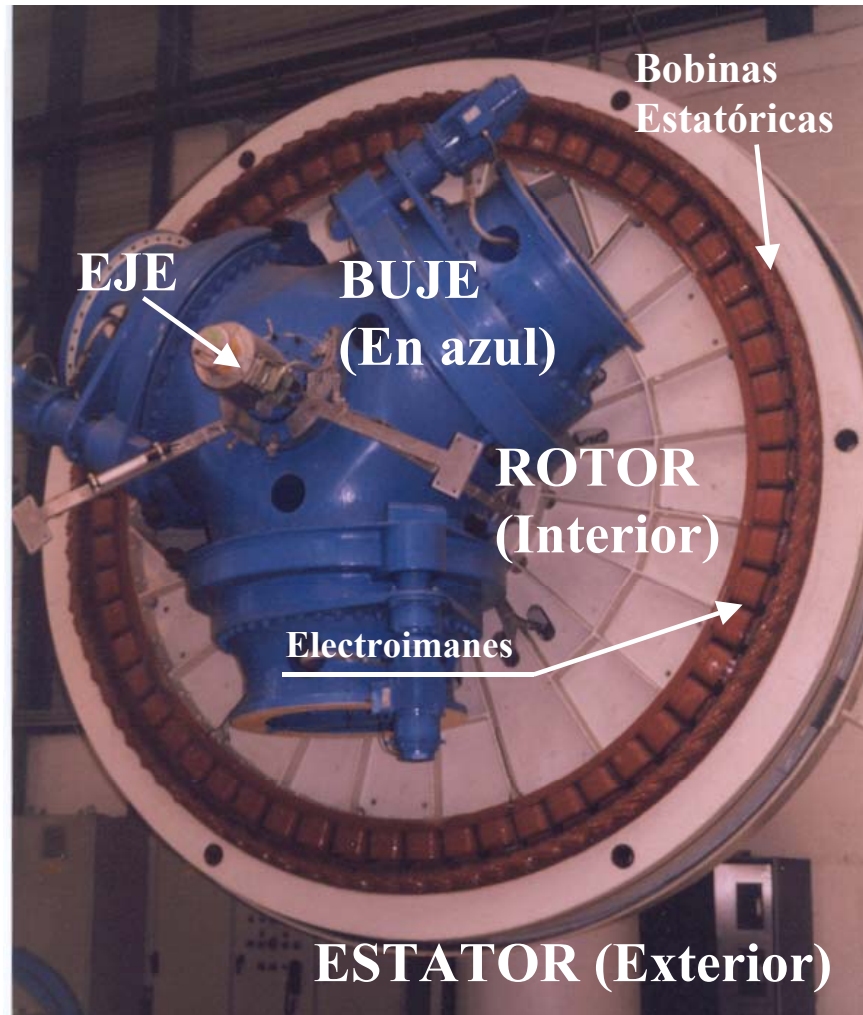
**Figura 8. Vista de la góndola de un aerogenerador con generador síncrono multipolo con electroimanes excitados desde el exterior.**

Este tipo de generadores disponen de polos compuestos por electroimanes, lo cual hace que sean muy pesados y voluminosos, pero sean capaces de regular la tensión de salida mediante la variación de la corriente continua de excitación. Para inyectar la corriente de



excitación disponen normalmente de escobillas que son uno de los puntos débiles desde el punto de vista de mantenimiento.

Se utilizan en sistemas de velocidad variable ya que la frecuencia de la señal de salida debe acoplarse mediante convertidores electrónicos a la señal de red.



**Figura 9. Vista interior de un generador síncrono multipolo con excitación exterior**

#### **Generadores síncronos multipolares con imanes permanentes.**

En aerogeneradores de pequeña potencia (hasta 12 kW) se utilizan mayormente generadores síncronos de imanes permanentes. Esto es debido principalmente a su robustez y su bajo mantenimiento, evitan el uso de cajas multiplicadoras, aunque su precio es algo mayor. Este tipo de generadores se está utilizando cada vez mas en aerogeneradores de gran potencia debido a lo reducido de su peso y volumen al utilizar imanes de alto magnetismo. Existen múltiples tipos de materiales para sintetizar los imanes siendo los más importantes los siguientes:

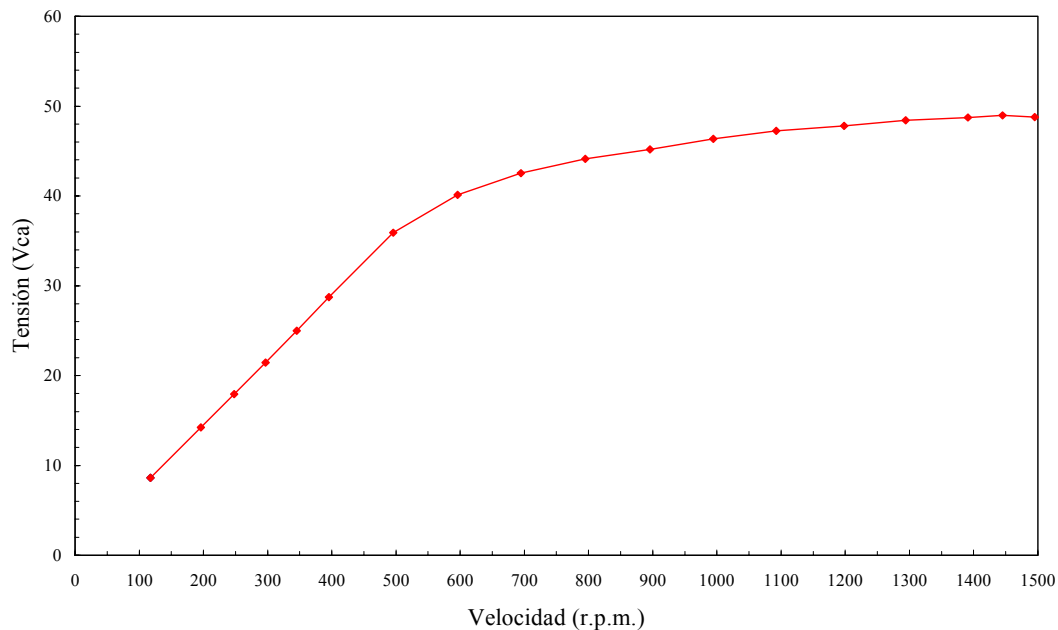
- Alnico: Estos imanes están fabricados por fundición o sinterización. Poseen el mejor comportamiento a temperaturas elevadas. Tienen una elevada remanencia, pero su coercitividad es bastante baja.



- Ferrita: Este tipo de imanes se obtienen sobretodo por sinterización. Son los mas utilizados por su relación calidad/precio. Existen muchas calidades diferentes. Presentan buena resistencia a la desimantación.
- Neodimio-Hierro-Boro: Son los imanes con las mejores características magnéticas existentes en la actualidad. Su comportamiento en función de la temperatura ha mejorado bastante. Se pueden utilizar para aplicaciones de hasta 150°C.
- Samario-Cobalto: Estos imanes están fabricados a partir de elementos de la familia de las tierras raras. Sus características magnéticas permiten reducir sus medidas. Su producto de energía es considerablemente elevado Tienen un comportamiento muy bueno a temperaturas elevadas.

| Tipos de materiales  | Símbolo | Remanencia (Gauss) | Pr. Energía BH max (MGOe) | Densidad (g/cm <sup>3</sup> ) | Tmax °C |
|----------------------|---------|--------------------|---------------------------|-------------------------------|---------|
| Alnico               | Al      | 6500-12500         | 5                         | 7.3                           | 425     |
| Ferrita              | Fe      | 2000-4000          | 3.7                       | 5                             | 250     |
| Neodimio-Hierro-Boro | NdFeB   | 10500-11500        | 35                        | 7.5                           | 80-150  |
| Samario-Cobalto      | Sa-Co   | 9000-10500         | 28                        | 8.3                           | 250     |

En éste tipo de generadores la tensión de salida depende únicamente de la velocidad de giro del rotor, al no poder variar la corriente de excitación del circuito inductor. Para una determinada velocidad de rotación el generador se saturará. Ver característica de vacío (fig 10).

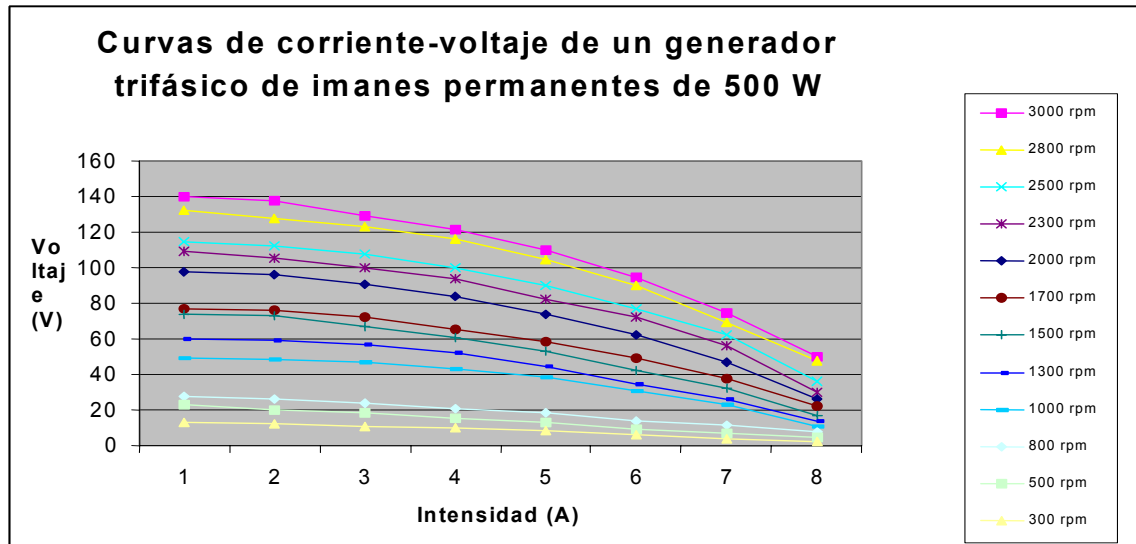


**Figura 10. Característica voltaje-Velocidad de rotación de un generador de imanes permanentes de 24 voltios.**

Existen distintas topologías de generadores de imanes permanentes. La mayor diferencia estriba en el camino de flujo magnético. Este puede ser radial (normalmente en generadores de pequeña potencia) o axial.

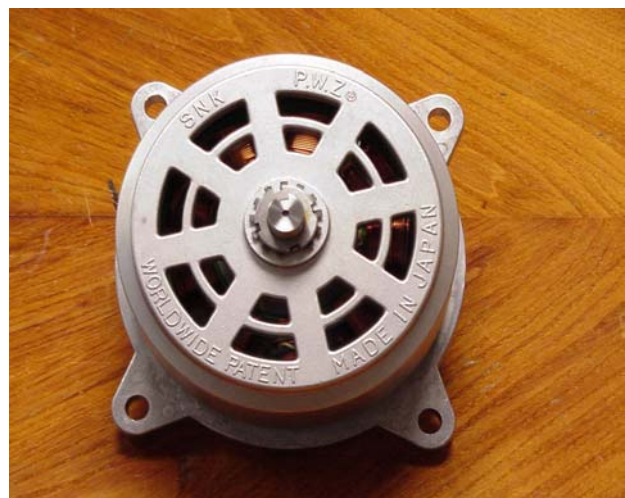
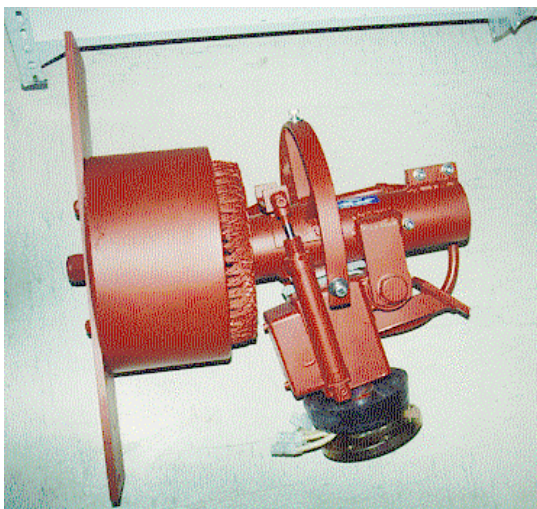
Los imanes giraran frente a las bobinas que componen los distintos polos e inducirán una fuerza electromotriz de frecuencia variable. El imán tenderá a alinearse con el polo, evitando cualquier variación de posición.

El cambio de alineación entre el polo y el imán provocara un par senoidal que dependerá de la geometría y de las propiedades del material. Este par, denominado de reluctancia no es deseado. .

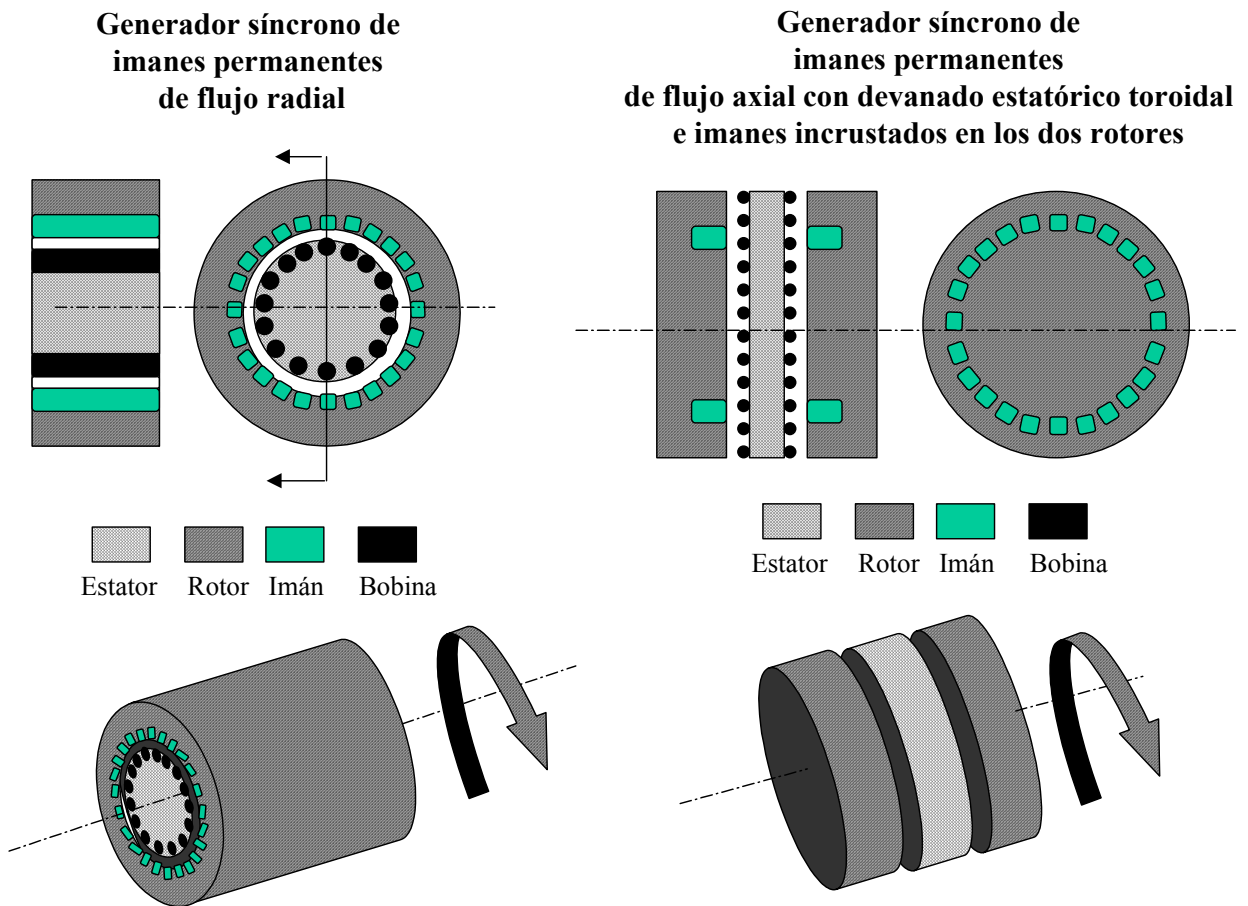


**Figura 11. Familia de Curvas Voltaje-Corriente para distintas revoluciones en un generador de Imanes Permanentes**

Es típico ver generadores de imanes permanentes de dos, de tres y de hasta seis o más fases. Sin embargo el número de imanes es mucho mas flexible, desde 2 a 30 en generadores de pequeña potencia, debido a su geometria y de hasta 90 imanes en generadores de gran potencia. Hay que tener en cuenta que un mayor número de imanes ofrece un mayor par para el mismo nivel de corriente. Por otro lado, un mayor número de imanes implica un menor sitio para implementarlo. El número ideal de imanes dependerá de la geometría del generador y de las propiedades de los materiales utilizados.



**Figura 12. Generadores de imanes permanentes de flujo radial**



Se puede establecer una relación entre el par de un generador de imanes permanentes y la geometría de éste a través de la siguiente fórmula:

$$T = k D^2 L$$

Siendo T: Par [Nm], k : Constante, D: Diámetro del rotor [m], L: Longitud axial del rotor [m]



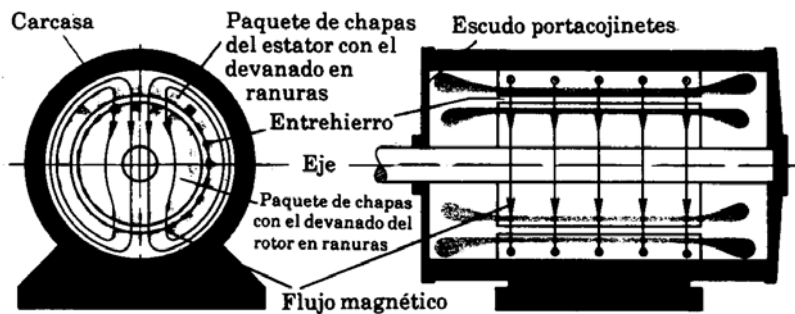
**Figura 13. Aerogenerador con generador síncrono de imanes permanentes de flujo radial de 660 kW de potencia (GENESYS) y axial de 750 kW (JEUMON J48)**

### **Generador de corriente alterna asíncrono o de inducción**

La utilización de la máquina asíncrona o de inducción en generación de energía eléctrica mediante aerogeneradores es actualmente mayoritaria

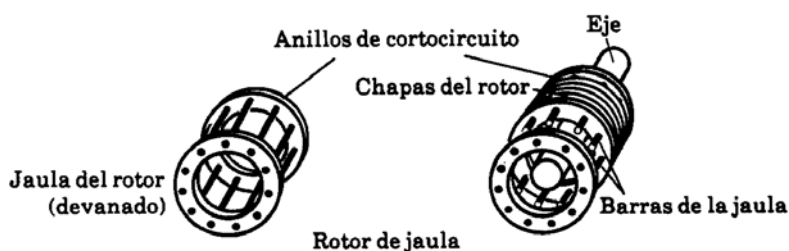
En este tipo de máquina eléctrica, el campo magnético giratorio se crea a través del

estator, cuyos devanados deberán estar conectados a una fuente exterior de tensión alterna. Esta es la razón básica por la que la máquina asíncrona es consumidora de energía reactiva, ya que al ser el bobinado una carga inductiva, para generar el campo



magnético consumirá corriente desfasada de la tensión.

Si partimos de una máquina asíncrona con el rotor en reposo, la acción del campo magnético giratorio sobre las bobinas de rotor induce una fuerza electromotriz en las mismas. Esta fuerza electromotriz inducida motiva el paso de corrientes por las bobinas del rotor, las cuales normalmente están cerradas en cortocircuito (máquina de jaula de ardilla) presentando apenas resistencia. El campo giratorio ejerce fuerzas sobre los conductores recorridos por una corriente eléctrica, originándose un par de giro que pone en movimiento al rotor en el mismo sentido que el campo magnético giratorio. El rotor irá girando cada vez más rápido reduciéndose la diferencia de velocidades de giro entre el campo magnético y el rotor. Al disminuir la diferencia de velocidad, las tensiones inducidas, al igual que las corrientes en el rotor decrecen llegando a ser nulas cuando el rotor alcanza casi la velocidad de rotación del campo giratorio, denominada velocidad de sincronismo.



La velocidad de sincronismo vendrá definida al igual que en las máquinas síncronas por la frecuencia de la señal eléctrica externa y por el número de pares de

polos alojados en este caso en el estator.

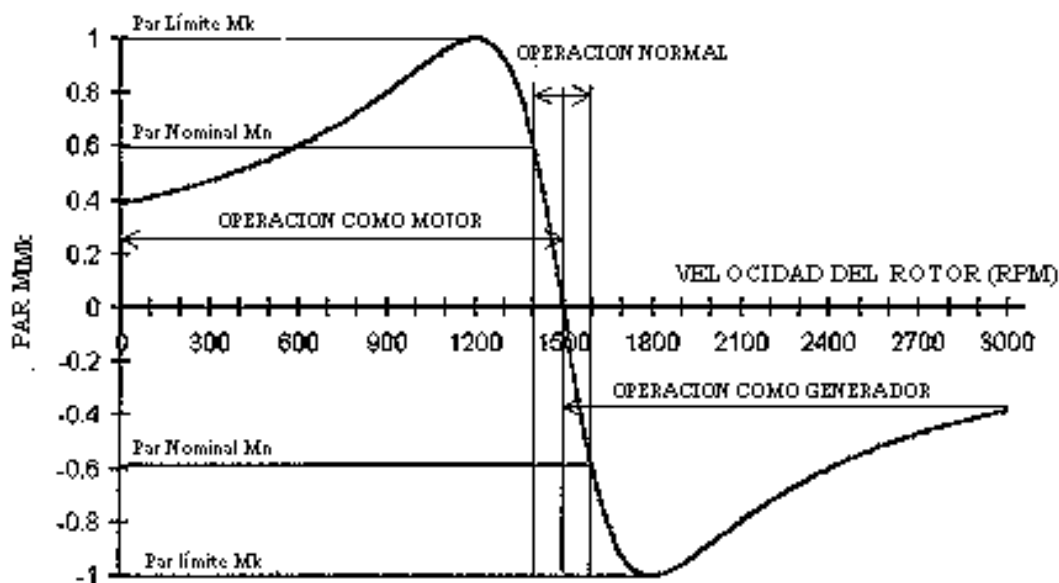
A la diferencia entre la velocidad de giro del campo magnético y del rotor se le denomina deslizamiento (S).

Hasta este punto se ha descrito el funcionamiento de la máquina asíncrona como motor, ya que se ha utilizado energía eléctrica para mover un rotor - energía mecánica.

Pero que ocurre si mediante una aeroturbina acoplada a esta máquina hacemos girar el rotor en el mismo sentido del campo giratorio, a una velocidad superior a la de sincronismo. El deslizamiento cambiará de signo, el sentido de la fuerza electromotriz inducida en la fase del rotor se invierte, al igual que la corriente que ésta determina, ambas tendrán una frecuencia correspondiente a la diferencia de velocidades y la máquina pasará a funcionar como generador, cediendo a la red a la que está conectada la potencia que desarrolla la aeroturbina.

Tal circunstancia, evidentemente, no se da si en la máquina no existe previamente un campo magnético giratorio, lo cual exige que la red suministre a la máquina de inducción la corriente magnetizante que excite el campo magnético. Por ello, el generador asíncrono se define como no autoexcitable.

A medida que aumenta la diferencia de velocidad de giro entre el rotor y el campo magnético producido por el estator, se produce una mayor tensión en el rotor y, consiguientemente crece la corriente que circula por él. Con mayor corriente, el campo magnético debido al rotor también crece y el flujo de potencia activa hacia la red eléctrica será mayor, al igual que el consumo de potencia reactiva por parte de la máquina. Esta tendencia se mantendrá hasta llegar al par resistente máximo del generador.



**Figura 16. Característica Par-Velocidad de un generador asíncrono.**

Dentro de un rango limitado la potencia y el par son proporcionales al deslizamiento, obteniéndose una característica ligeramente inclinada. En este tramo la energía reactiva consumida es capaz de mantener el flujo magnético necesario para que el generador presente un par resistente creciente, pero a partir de un determinado deslizamiento (entre el 5 y el 10%, según la máquina) el incremento de la corriente en el rotor hace que las pérdidas debido a la resistencia del mismo (pérdidas Joule), disminuyan el par resistente y, por lo tanto, se puede producir el embalamiento del rotor. Además, el excesivo aumento de

las pérdidas produce un sobrecalentamiento del rotor, que por radiación puede afectar también al estator.

Este último inconveniente puede reducirse en parte dependiendo del modo de ventilación utilizado y de su propia construcción, ya que si todos los detalles del diseño son conocidos se pueden aplicar límites más ajustados mediante el cálculo cuidadoso de los transitorios térmicos que puedan aparecer.

Por las anteriores razones, no es recomendable operar en el rango cercano al deslizamiento máximo, aunque también se puede incrementar el deslizamiento para un par dado, aumentando la resistencia de las barras del rotor, pero el producto del par y el deslizamiento creciente representa mayores pérdidas, disminuyendo el rendimiento del generador.

A la hora de seleccionar un determinado generador asíncrono se deberá tener en cuenta el par máximo en tanto por ciento, ya que el coste del generador guarda cierta relación con la raíz cuadrada del par máximo del mismo.

Como recomendación en el proceso de selección, una vez conocida la potencia de la turbina a utilizar, el rango de velocidades de viento en el emplazamiento determinado y la característica par - velocidad del generador, solo queda valorar la garantía y el precio. Normalmente, se dan pocos casos en los cuales una velocidad de viento excesiva haga que el par de la turbina pueda exceder del par máximo del generador, no obstante se debe programar en el control la desconexión de la línea, si la potencia máxima se supera durante 10 segundos. Posteriormente, el generador podrá volverse a conectar a la línea en el momento en que la velocidad de la turbina esté por debajo de la velocidad máxima del generador. Por el contrario, con velocidades de viento muy bajas, la velocidad de la turbina puede llevar a funcionar al generador a velocidades por debajo de la velocidad de sincronismo, invirtiéndose el par generador y poniéndose la máquina a funcionar como motor. Si esta situación se da durante un intervalo de tiempo determinado, la máquina deberá ser desconectada de la línea.

El aerogenerador con generador asíncrono o de inducción sólo tiene, al igual que el basado en generador síncrono una velocidad de viento óptima, para la cual da la potencia nominal. Por debajo de esa velocidad su rendimiento baja mucho, aunque se ajusta mejor al par ofrecido por el rotor eólico gracias a la capacidad de disminuir un poco su velocidad (deslizamiento).

Otra característica del generador de inducción es su factor de potencia, el cual varía con la carga. Una excesiva demanda de potencia reactiva es peligrosa, ya que causa caídas de tensión en la línea y en los transformadores. Recordemos que parte de esa corriente reactiva demandada se utiliza como corriente magnetizante para obtener un flujo magnético. La corriente de magnetización para carga máxima varía desde el 20% para generadores de 4 y 6 polos y el 40% para los generadores de 10 polos o más. Respecto al porcentaje que representa la potencia reactiva demandada por el generador sobre su potencia máxima, éste suele suponer entre el 15 y el 20%.

Para pequeños generadores, el consumo de potencia reactiva no es muy importante, pero para grandes máquinas hay que tenerlo en cuenta sobre todo para efectuar la compensación de corriente reactiva en vacío. Esta compensación se realiza mediante baterías de

condensadores en paralelo con la línea de salida del generador. La regulación de estas baterías se hace por tensión mediante un relé, el cual desconectará los condensadores si la tensión supera el valor de 1.15 p.u. de la tensión nominal. Esta protección suele estar ajustada para que abra a los 15 ciclos de detectar que la corriente del condensador supera a la de magnetización, o la tensión sube demasiado.

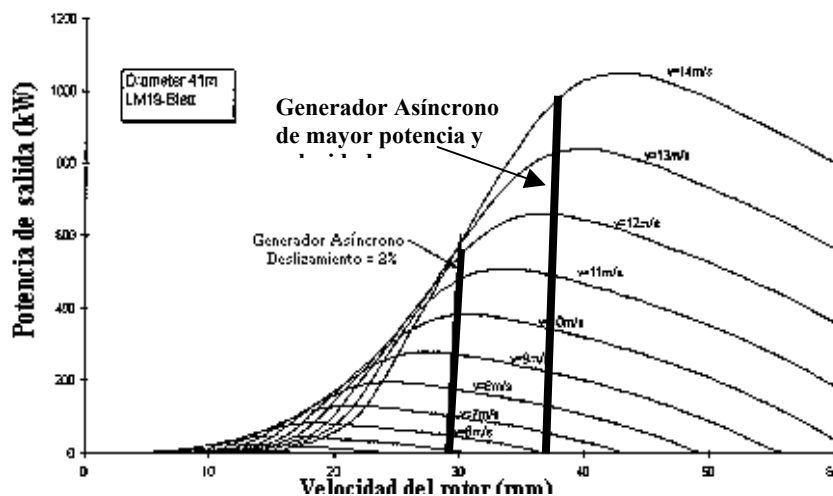
El alto par motor que presentan las máquinas asíncronas en el momento de su conexión a una red eléctrica hace que absorban corrientes muy superiores a la nominal (hasta 6 veces). Para evitar estas corrientes habitualmente se instalan los denominados sistemas de arranque suave (soft-start) compuestos por dos dispositivos semiconductores en antiparalelo, por fase que limitan la corriente de conexión, evitando variaciones de tensión en la red que afecten a la calidad de suministro. Este hecho se hace mas palpable en sistemas eólico-diesel o aerogeneradores conectados a redes débiles.

Ya se ha dicho que la solución del generador asíncrono para aerogeneradores conectados a red bien sean redes de gran potencia o débiles (sistemas eólicos - diesel o redes en antena) es la mas extendida por su fiabilidad, sencillez de operación y mantenimiento y coste. Con respecto a la eficiencia del aerogenerador de velocidad fija, cuando el aerogenerador opera bajo vientos con velocidades inferiores a la nominal o de diseño (la velocidad de viento a la que el aerogenerador alcanza su potencia nominal suele encontrarse entre 10 y 14 m/s normalmente) su eficiencia baja bastante por no poder acoplar las velocidad de rotación a las variaciones de la velocidad del viento.

Para mejorar el rendimiento del aerogenerador con generador de inducción (velocidad constante), la mayoría de los fabricantes diseñan el sistema de generación con dos velocidades de sincronismo, de forma que el sistema opere a una velocidad de rotación menor para bajas velocidades de viento y mayor para altas velocidades de viento.

Hay varias formas para obtener la operación a doble velocidad:

1. Caja multiplicadora dos doble eje de salida con distinta relación Par/vueltas.
2. Dos generadores de distinta potencia y número de polos instalados sobre el mismo eje y sistema de conmutación de las conexiones.
3. Generador de doble bobinado, la mas utilizada. (ABB, SIEMENS etc.)



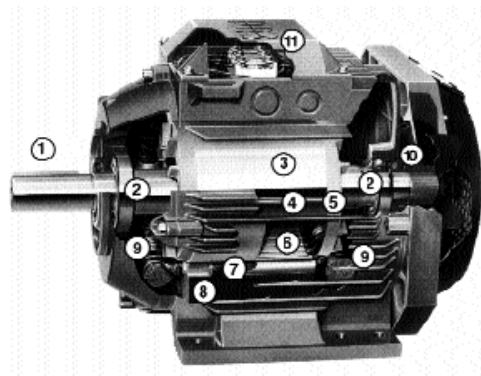
**Figura 17. Representación de las características de un generador de inducción de doble bobinado.**



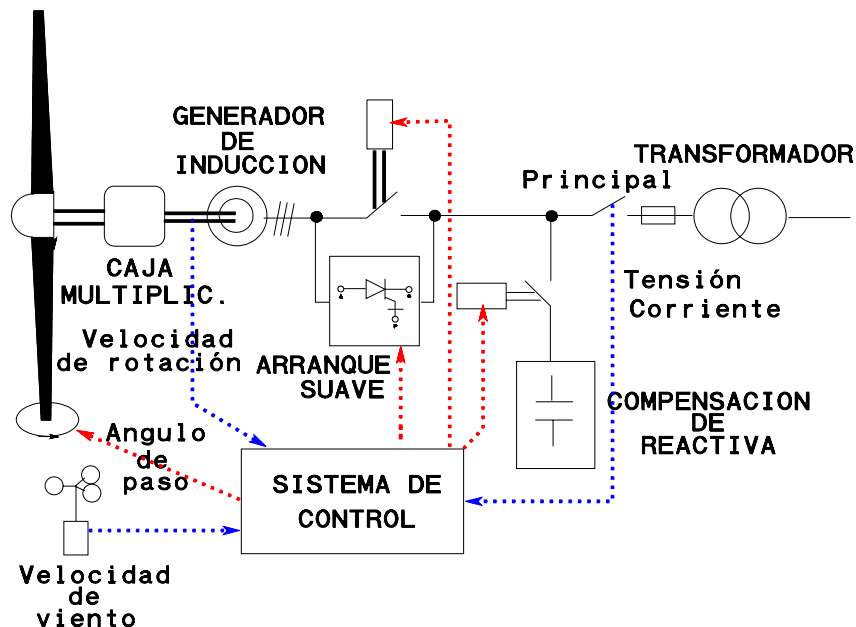
## **SISTEMAS DE GENERACIÓN ELECTRICA PARA AEROGENERADORES**

Las principales características que deben tener los generadores de inducción para aplicaciones en aerogeneradores son:

- Capacidad de operar a dos velocidades de sincronismo.
- Buen rendimiento a carga parcial.
- Buena relación potencia/peso.
- Gran capacidad de sobrecarga instantánea.
- Bajo consumo de potencia reactiva.
- Alta calidad de bobinado de los devanados especialmente en unidades de gran potencia.



**Figura 18. Generador de inducción o asíncrono. 1.Eje. 2.Rodamientos de bolas. 3.Rotor. 4.Pernos de aluminio. 5. Aro de aluminio. 6. Tuerca del estator con bobinas. 7. Estator. 8. Carcasa. 9. Bobinas. 10. Ventilador. 11. Caja de conexiones.**

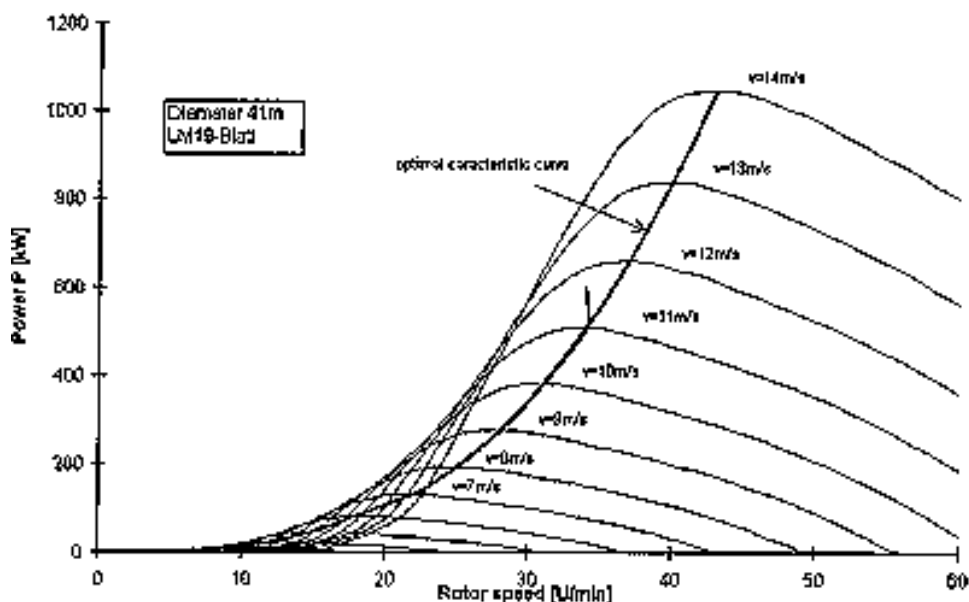


### Sistemas de velocidad variable con generador de inducción

Un aerogenerador con convertidor de potencia en el circuito principal puede operar de forma óptima en todo el rango de velocidades de viento.

Si el aerogenerador opera con velocidad de rotación variable, la frecuencia eléctrica del generador varía y por lo tanto puede ser desacoplada de la frecuencia fijada por la red. Esto se realiza mediante un convertidor de frecuencia o cicloconvertidor compuesto por tres etapas.

En la primera etapa, la corriente alterna (c.a.) de frecuencia variable procedente del generador eléctrico es convertida en corriente continua (c.c.) (ver figura 10). La segunda etapa consiste en una etapa de filtrado que hace que la tercera etapa o inversor se comporte como una fuente de corriente, en la cual la corriente de salida se suaviza mediante una inductancia (bobina), o en el caso de comportarse como una fuente de tensión, las variaciones de la tensión de salida se verán suavizadas mediante una capacidad en paralelo (condensador).

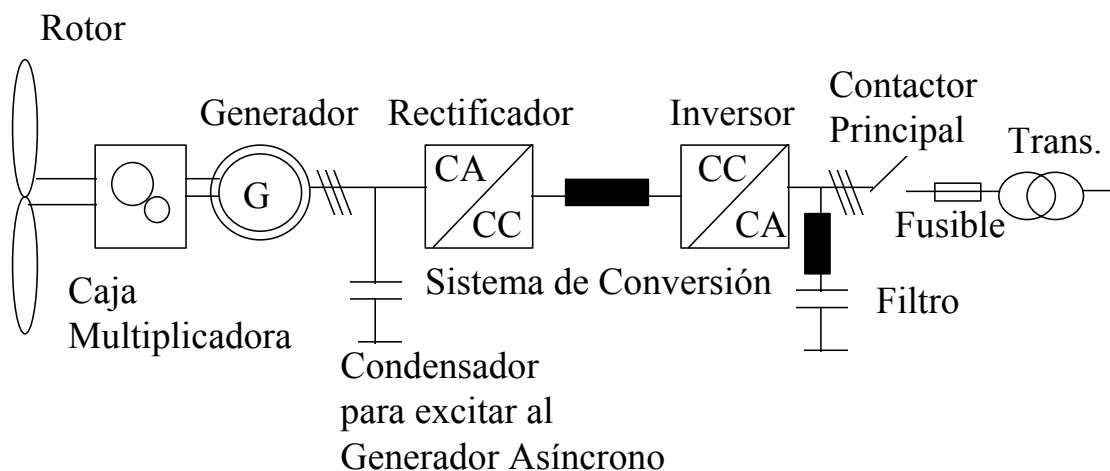


**Figura 19. Característica de Potencia-Velocidad de rotación para un aerogenerador de velocidad variable**

El tamaño de la bobina o del condensador determina la efectividad del desacoplo entre el generador eléctrico y la red. En el caso de utilizar un inversor fuente de corriente, la tercera etapa del convertidor de potencia consiste en un puente de tiristores, que invierte la corriente continua en corriente alterna. En el caso de implementar un inversor fuente de tensión, el puente estará compuesto por dispositivos de conmutación del tipo IGBT (transistor bipolar con puerta aislada). Estos transistores tienen la característica principal de conmutar a altas frecuencias, obteniendo señales sinusoidales de salida casi perfectas, con bajo contenido armónico.

El inversor es capaz de controlar la potencia de salida del generador por ello también la velocidad de rotación del rotor. Midiendo la velocidad del viento y la velocidad de

rotación del generador, se puede controlar el aerogenerador de forma que opere en el máximo valor del coeficiente de potencia  $C_p$ , de esta manera se puede extraer la máxima potencia en todas las condiciones de velocidad del viento



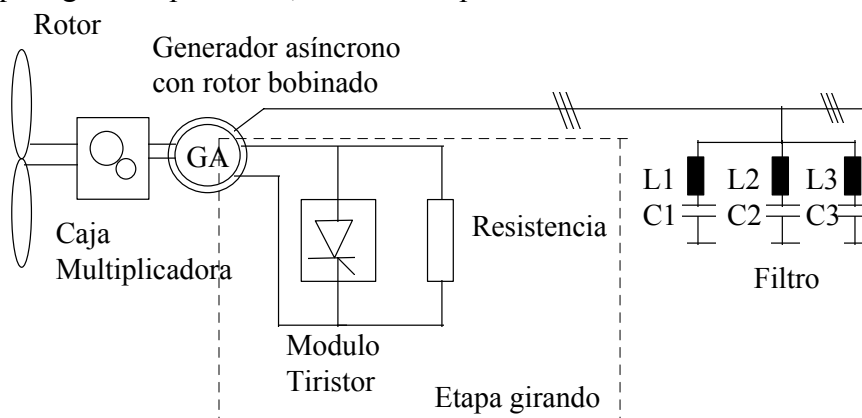
**Figura 20. Diagrama de bloques de un aerogenerador con convertidor de corriente en el circuito principal**

#### **GENERADOR ASÍNCRONO CON CONTROL DE DESLIZAMIENTO VARIABLE.**

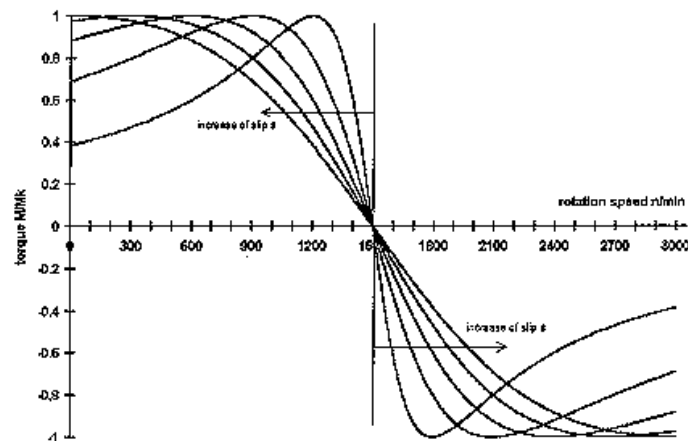
Un generador asíncrono con control de deslizamiento variable es un nuevo desarrollo a partir del generador asíncrono normal con acoplamiento a la red a velocidad fija. El generador tiene los mismos componentes en el circuito principal. La diferencia estriba en que el rotor bobinado del generador se conecta en paralelo a una resistencia y a un módulo compuesto por un tiristor.

Los componentes pueden ser instalados en el eje, por ello no es necesario un contacto eléctrico-mecánico entre el rotor y el estator.

El resultado de esta resistencia controlable es una característica par-velocidad mas suave. Para pequeñas fluctuaciones del viento la energía se almacena como velocidad de rotación, así la energía obtenida se presenta con variaciones suaves y las cargas en los componentes mecánicos son menores. El control normalmente se diseña para un rango de energía pequeño, ya que un deslizamiento mayor causa una pérdida de energía que se presenta como calor. Este calor se debe extraer del generador. Si el módulo del tiristor se diseña para grandes potencias, se deberá implementar también un filtro de armónicos.



**Figura 21. Diagrama de bloques de un generador asíncrono con control de deslizamiento variable.**

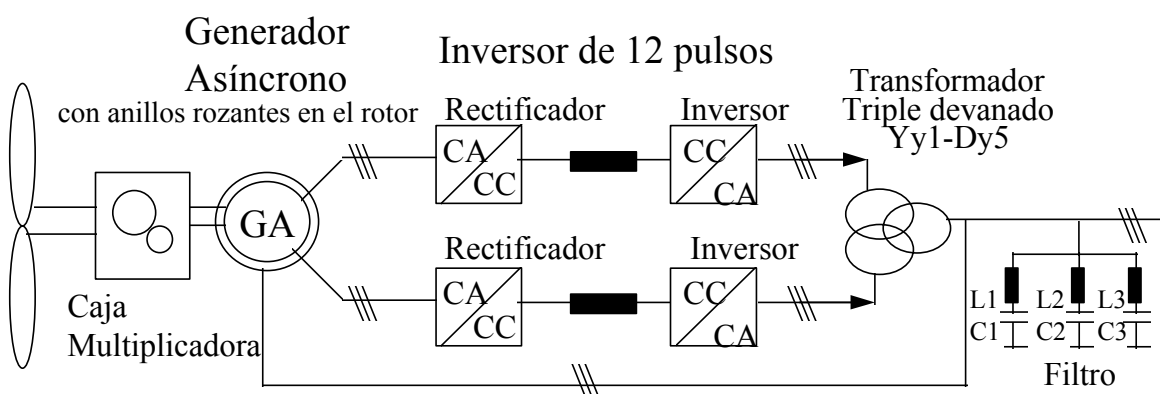


**Figura 22. Característica de un aerogenerador con control de deslizamiento variable**

### GENERADOR ASÍNCRONO CON CASCADA HIPERSÍNCRONA O SUBSÍNCRONA

La característica par-deslizamiento de una máquina asíncrona depende directamente del valor de la resistencia de su rotor. Mediante el incremento de esta resistencia la pendiente de la característica par-deslizamiento disminuye, por lo que si el par resistente del generador se mantiene constante, éste cederá más energía por su rotor y aumentará su velocidad de giro.

Utilizando un generador asíncrono de rotor bobinado y conectado a través de sus anillos rozantes una resistencia variable externa se podría realizar la generación a velocidad variable, pero se aumentarían las pérdidas, disminuyendo el rendimiento.



**Figura 23. Diagrama de bloques de un aerogenerador con inversor de 12 pulsos**

Mediante un equipo convertidor electrónico, se puede realizar el efecto de la resistencia, pero además recuperando la energía extraída. Este equipo estaría compuesto por un rectificador de diodos, una bobina de alisado y un inversor trifásico conmutado por red o autoconmutado similar al analizado en el generador de velocidad variable con máquina síncrona.

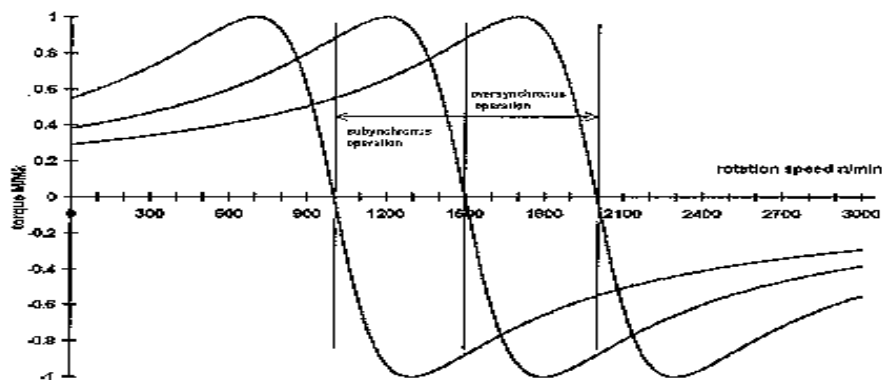
Mediante el control del inversor se incrementa la tensión en el circuito de continua, el rotor del generador se acelera para que al aumentar el deslizamiento aumente la fuerza

electromotriz inducida y polarice en sentido directo los diodos del rectificador, de ésta manera podrá circular la intensidad necesaria para crear par. La corriente solo podrá ir desde el rotor en dirección al inversor, ya que el rectificador de diodos hace que el sistema sea unidireccional. Por lo tanto, para que esta corriente pueda circular, el rotor deberá girar siempre a velocidad superior a la de sincronismo. Por esta razón se denomina a este sistema "cascada hipersíncrona o supersíncrona".

Mediante este sistema no se puede efectuar ninguna compensación de potencia reactiva, por lo cual estos sistemas necesitan, al igual que los generadores asíncronos a velocidad constante, una batería de condensadores que compense la potencia reactiva demandada en vacío.

En función del margen de velocidades que se quieran regular, se seleccionará la potencia de los equipos convertidores, siendo el valor más normal el 50% de la potencia nominal del generador asíncrono. Al manejar potencias más pequeñas que en el sistema de generación a velocidad variable con máquina síncrona, es más integrable el inversor autoconmutado (puente de IGBT's), aún siendo más caro que el inversor conmutado por red (puente de tiristores).

Con este sistema se pueden alcanzar deslizamientos del 20%, ya que el margen de velocidad de giro superior se establece por consideraciones mecánicas y económicas.



**Figura 24. Característica de Par de un aerogenerador con cascada hiper o subsíncrona**

### **Generadores de reluctancia conmutada**

La máquina de reluctancia conmutada aplicada en modo generador en aerogeneradores presenta múltiples ventajas frente a los demás tipos de generadores, siempre que la operación del aerogenerador sea a velocidad variable.

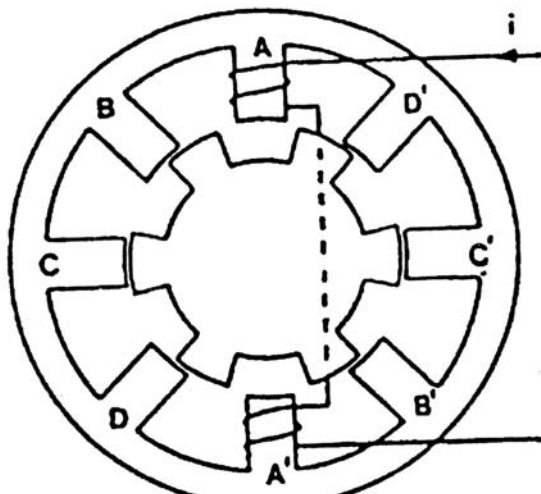
Esta máquina presenta una sencillez, robustez y bajo peso similar a la máquina de inducción de jaula de ardilla. Además, su control es simple, mediante el uso de electrónica de potencia y su rango de velocidades de operación puede ser grande sin ningún problema.

Hasta hoy en día solo se han realizado prototipos de este sistema (20 kW 120 r.p.m) optimizados mediante métodos analíticos, aunque el más avanzado de ellos está a punto de salir en firma comercial. Este tipo de máquina se utiliza como motor en múltiples

aplicaciones pero no como generador, debido probablemente al ruido que produce y a su bajo factor de potencia.

Este tipo de motor tiene por ejemplo la configuración que se puede observar en la figura 1. El rotor es sencillamente una masa metálica laminada con múltiples polos salientes (en éste caso 6) y un estator que puede ser de múltiples fases, constituidas por varios polos también salientes (8 polos en éste caso). La máquina propuesta es una máquina de reluctancia conmutada 6/8. La excitación de ésta máquina se realiza a través de los bobinados del estator. En la figura se puede ver una sección de una máquina de reluctancia conmutada. La máquina dispone de bobinas en los polos del estator, estando las bobinas diametralmente opuestas conectadas en serie formando los bobinados de cada fase.

El principio de operación es simple. Si se energizan los polos D-D', la reacción del rotor

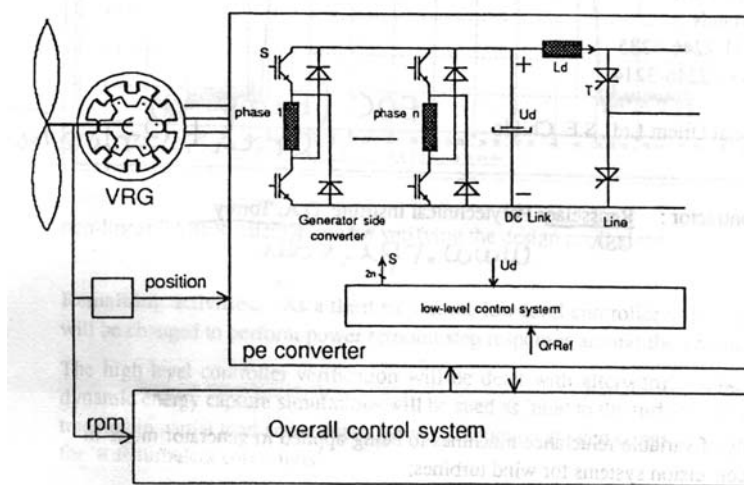


**Figura 25. Sección de una máquina de reluctancia conmutada**

será tendente a girar en el sentido de las agujas del reloj en línea con el eje del campo magnético. Si ahora energizamos los polos A-A', el rotor continuará girando en la misma dirección. La máquina estará actuando como motor convirtiendo energía eléctrica en movimiento. La operación como generador se obtiene simplemente cambiando la posición angular, en la cual se aplica la tensión, a los bobinados de cada fase. Si el rotor se está moviendo en el sentido de las agujas del reloj y partiendo de la situación propuesta anteriormente, energizando los polos B-B' se obtendrá un determinado par. Este modo de operación se consigue controlando los tiempos de conexión de la alimentación a los bobinados. Si nos fijamos en la fase C-C' los pares de polos del estator y del rotor están perfectamente alineados. Si pasa corriente a través de ésta fase, no se produce par alguno. Si el rotor se desalinea con respecto al estator como ocurre en la fase B-B' o D-D', aparece un par resistente que tiende a alinear los polos. En la posición de alineamiento, la inductancia está en su máximo valor, en éste caso la reluctancia magnética del camino del flujo magnético es susceptible de saturación con valores de corriente normales, especialmente en el estator y en el laminado del rotor, debido a la baja reluctancia del entrehierro. Cuando el hueco interpolar del rotor está alineado con el polo del estator se dice que la máquina está en posición de desalineamiento. Esta situación se ve en la fase A-A'. Cuando la corriente pasa por esa fase no se produce par, si el rotor se mueve en cualquier sentido, aparece un par que atrae al rotor a una posición de alineamiento. En la posición de desalineamiento, la

inductancia de fase es mínima ya que la reluctancia magnética en el camino del flujo esta en su mayor valor. Asimismo, en la posición de desalineamiento, el camino del flujo no es susceptible de saturarse a no ser que las corrientes de fase superen el valor de diseño. Entre la posición de alineamiento y desalineamiento, existen distintas posiciones con distintos valores de la inductancia. Se afirma que el valor de la inductancia es directamente proporcional a la posición relativa de los polos. Esta afirmación solo es valida en análisis con modelos simplificados de la máquina ya que las curvas de flujo reales no son lineales.

Para producir par motor se hace pasar corriente por la fase del bobinado, mientras el valor de la inductancia está creciendo (el polo del rotor va camino de alinearse con el del estator). Para producir par generador, se energizarán las bobinas cuando el valor de la inductancia decrece (el polo del rotor se aleja de la posición de alineamiento con el polo del estator).



**Figura 26. Esquema de aerogenerador con generador de reluctancia conmutada.**

El accionamiento de éste tipo de maquinas requiere por tanto algun tipo de sensor que informe al control del convertidor sobre la posición del rotor y la fase que debe ser activada. El par electromagnético atiende a la siguiente fórmula:

$$T = \frac{1}{2} (\delta L / \delta \theta) I^2$$

Donde L es la inductancia de la fase,  $\theta$  el ángulo girado e I la corriente en la fase. Por tanto, para producir par motor la fase deberá energizarse durante la rampa de subida de la inductancia y para obtener par generador durante la rampa de bajada. El convertidor de potencia deberá generar pulsos de corriente necesarios en cada fase para generar el par solicitado, ya sea variando los instantes de encendido y apagado o bien el nivel de corriente. El convertidor esta compuesto por dos convertidores, uno esta en el lado de la red, es un inversor VSI con IGBT's, de entrada, controlado en corriente por bandas de histeresis, un circuito intermedio CC con condensador y un inversor de accionamiento de la máquina denominado de medio puente, que alimenta a las fases de la máquina de reluctancia conmutada.



## **SISTEMAS DE GENERACIÓN ELÉCTRICA PARA AEROGENERADORES**

El convertidor del lado motor está constituido por cuatro IGBT's y cuatro diodos que sean capaz de suministrar y/o absorber energía de la máquina. Cada rama del inversor alimenta de forma independiente a cada fase del motor, si bien los disparos de cada una de ellas irán sincronizados con la posición del rotor de la máquina.

Para describir de forma mas detallada el funcionamiento de éste convertidor, en la figura 17 se muestra con mas detalle. El disparo de los IGBT's de la misma rama S aplica toda la tensión de  $U_d$  a la fase 1, produciendo una corriente que pasa por la bobina entrando de arriba abajo según el dibujo. Si conduciendo esta fase en ese sentido se apagan los IGBT's de la rama S la corriente se conmutará a los diodos aplicando tensión  $-U_d$  a la fase 1, pudiendo de ésta forma invertir el sentido de la corriente en el lazo de continua y por tanto el sentido de la transferencia de potencia. De ésta forma en la rampa creciente de la inductancia se dispararán dos IGBT's de esa rama para producir par motor, mientras que para producir par de frenado (generador) se energiza la fase en el último tramo de la zona de inductancia creciente y rápidamente se apagan los dos IGBT's conduciendo los diodos en la zona decreciente y devolviendo energía al condensador del bus de continua intermedio.

### **Comparación entre los distintos sistemas de generación.**

| Tipo de generador eléctrico                                                                              | Nivel de Aplicación                                                                                                                              |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Generador asíncrono de rotor de jaula de ardilla                                                         | Aplicado en la mayoría de las máquinas antiguas.                                                                                                 |
| Generador asíncrono con rotor de jaula de ardilla con doble bobinado                                     | Aplicado en la mayoría de las máquinas actuales de media y gran potencia                                                                         |
| Generador asíncrono con rotor bobinado y sistema de conversión electrónica .                             | Este concepto está utilizado en máquinas de velocidad variable, siendo mayoritario su uso a medida que se incrementa la potencia de las máquinas |
| Generador síncrono de bajo número de polos con control de excitación y sistema de conversión electrónica | Solo algunos prototipos                                                                                                                          |
| Generador síncrono multipolar con control de excitación y sistema de conversión electrónica              | Este concepto está utilizado en máquinas de velocidad variable, siendo mayoritario su uso a medida que se incrementa la potencia de las máquinas |
| Generador síncrono multipolar de imanes permanentes y sistema de conversión electrónica                  | Utilizado para máquinas de pequeña potencia normalmente en aplicaciones aisladas.y sistema de gran potencia (actualmente en prototipos).         |
| Generador síncrono de reluctancia conmutada                                                              | Actualmente solo en prototipos.                                                                                                                  |

**BIBLIOGRAFIA.**

- [1] “Convertidores Electromecánicos de Energía”. G. Herranz. Ed. Marcombo. Boizareau Editores.
- [2] “Brushless Permanent Magnet Motor Design”. Duane C. Hanselman. Ed McGraw – Hill Inc.
- [3] “Curso Moderno de Máquinas Eléctricas Rotativas” Tomos I,II,III,IV y V. M Cortes Cherta. Editorial Técnicos Asociados.
- [4] “Power Electronics”. Mohan, Undeland, Robbins. Ed. John Wiley and Sons.