

Selección de un Generador Eléctrico para un Aerogenerador de Baja Potencia

Programa	Fuentes Alternas de Energía y Generación Distribuida
Acrónimo del proyecto	FAEyGD
Tipo (nivel de distribución)	Público con reservas
Fecha de Entrega	Julio 2009
Reporte Número	Eolo2-4
Estatus y Versión	Borrador, 1.00
Número de Páginas	20
Supervisor	Francisco M. González-Longatt
Autor	Alejandro J. Carantoña O.

Tabla de Contenido

Contenido	Pag.
Tabla de Contenido.....	2
Índice de Figuras.....	3
Índice de Tablas.....	4
Introducción.....	5
Tipos de Generadores Eléctricos usados en Aerogeneradores.....	6
Generadores de Corriente Continua (Dinamo).....	6
Generadores de Corriente Alterna.....	7
Generadores Sincrónicos.....	7
Generador Sincrónico de Corriente Alterna.....	7
Generadores Sincrónicos Multipolares.....	10
Generadores Sincrónicos Multipolares con Imanes Permanentes.....	10
Generadores Asincrónicos.....	13
Generador de Corriente Alterna Asincrónico o de Inducción.....	13
Consideraciones Importantes para la Selección del Generador.....	16
Conclusiones.....	20
Referencias Documentales.....	21

Índice de Figuras

Figura 1. Esquema de un Dinamo.....	6
Figura 2. Curva Característica de un Alternador.....	8
Figura 3. Esquema Electrico Basico de un puente rectificador de u alternador.....	9
Figura 4. Generador síncrono de imanes permanentes de flujo Radial.....	12
Figura 5. Generador síncrono de IP de flujo axial con devanado estatórico toroidal e imanes incrustados en los dos rotores	12
Figura 6. Curva torque - velocidad de un motor asincrónico.....	14
Figura 7. Diagrama fasorial de la máquina de inducción en la condición de motor.....	15
Figura8. Diagrama fasorial de la máquina de inducción en la condición de generador.....	15

fplongatt.org.ve

Índice de Tablas

Tabla 1. Clasificación de las Turbinas Eólicas de acuerdo a la Potencia.....	10
Tabla 2. Ventajas y Desventajas de diferentes generadores.....	14

flongatt.org.ve

Introducción

El diseño y construcción de un aerogenerador involucra un proyecto multidisciplinario; asociado a fenómenos aerodinámicos, mecánicos, eléctricos, etc. En particular, un elemento importante en el aerogenerador es la selección del generador eléctrico apropiado.

El generador es el elemento encargado de transformar la energía mecánica que entra en el eje en energía mecánica. La energía mecánica proveniente de la turbina de viento, como consecuencia de la conversión de la energía cinética del viento a través de las palas. El generador eléctrico, debe ser cuidadosamente seleccionado a fin de que las características electromecánicas de operación de la maquina, correspondan en la mejor forma posible a la energía extraíble del viento.

El presente reporte de investigación se presenta una forma simple de selección de un generador eléctrico a ser usado en un aerogenerador de baja potencia y eje horizontal. Además presenta una introducción a los diferentes tipos de generadores eléctricos susceptibles a ser empleados en la cadena de generación de un aerogenerador de baja potencia: características, ventajas, desventajas, fabricantes y costos que estos poseen según sea la aplicación (conectado a la red o de manera aislada). Y por último, se presenta un cuadro comparativo donde se resaltan los puntos fuertes y débiles de los generadores eléctricos que se pueden utilizar en aerogeneradores.

fongatt.org

Tipos de generadores eléctricos empleados en aerogeneradores

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

Generadores de corriente continua (dinámo)

Aunque existen máquinas de corriente continua con imanes permanentes, lo normal es que el campo magnético esté creado por bobinas inductoras dispuestas en el estator alrededor de los polos principales. Según la fuente de alimentación de estas bobinas, se distinguen dos tipos de excitación: (i) *excitación independiente* y, (ii) *autoexcitación* [1].

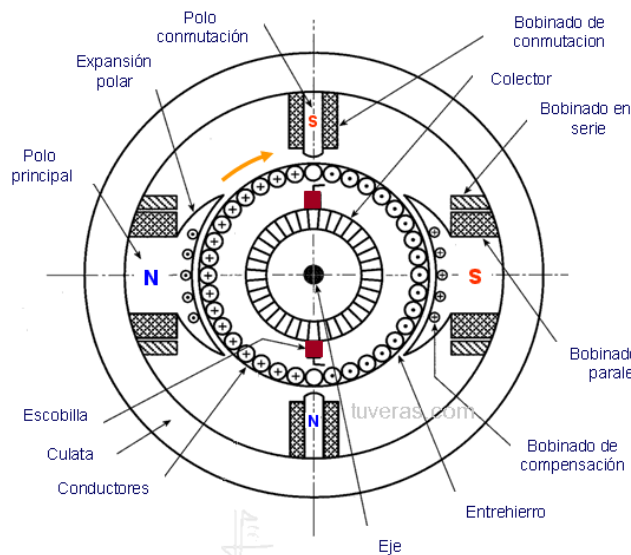


Figura 1. Esquema general de un dinamo [2]

La *excitación independiente* significa que la corriente continua que alimenta el devanado inductor procede de una fuente independiente de la máquina, como una batería de acumuladores, un rectificador conectado a una red alterna, o bien un generador de corriente continua rotativo. En este último caso, si el generador va montado sobre el propio eje de la máquina, la excitación independiente se denomina excitación propia [2].

La *autoexcitación* significa que la corriente continua que excita las bobinas inductoras procede de la misma máquina generatriz. Para obtener la autoexcitación, es preciso que exista un pequeño flujo en el circuito magnético, flujo que es posible producir y mantener gracias al fenómeno de histéresis magnética [1].

Gracias a este flujo remanente, al hacer girar el inducido se inducirá en él una pequeña f.e.m. que aplicada al circuito inductor, con la polaridad conveniente, genera una débil corriente que refuerza el magnetismo remanente y la f.e.m. inicial debida al flujo remanente se incrementará. A mayor f.e.m., corresponderá mayor corriente, con el refuerzo consiguiente del flujo, luego se produce un nuevo aumento de la f.e.m. y así sucesivamente hasta alcanzar un equilibrio o estabilidad de la tensión en bornes que se traducirá en una constancia de la corriente de excitación y por tanto del flujo. A esta estabilidad se llega por causa de otra propiedad característica de los materiales magnéticos, la de saturación [1].

El dinamo presentaba problemas tanto en bajas como en altas velocidades de giro de la máquina; en bajas revoluciones, requiere una cierta velocidad para (casi 1500 r.p.m.) para comenzar a generar energía, como consecuencia con la máquina a ralentí no generaba corriente eléctrica; una solución era hacer girar a

mas revoluciones mediante una transmisión con mayor multiplicación pero esto tiene el inconveniente de: que a altas revoluciones la dinamo tiene la limitación que le supone el uso de escobillas y colector [1].

Los aerogeneradores con generador eléctrico de corriente continua o dinamos están totalmente descartados para máquinas de gran potencia (entre 50 y 850 kW), ya que sólo se pueden conectar a la red eléctrica mediante convertidores electrónicos que conviertan la corriente continua a alterna [1].

Únicamente, en aplicaciones aisladas de baja potencia, en las cuales el sistema de acumulación eléctrica utilizado sea una batería se han considerado. Pero el alto precio de la máquina y el alto costo de mantenimiento (cambio de escobillas, colectores 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 [2].

Generadores de corriente alterna

Una clasificación de los generadores de corriente alterna se puede considerar: *generadores autoexcitados (generador 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 (*generadores asíncronicos*).

Generadores síncronos

Generador síncrono de corriente alterna

El generador síncrono de corriente alterna también es conocido como Alternador e igual que la antigua dinamo, es un generador de corriente eléctrica que transforma la energía mecánica que recibe en su eje en energía eléctrica, el cual es utilizado principalmente en vehículos ya que además de cargar la batería, para proporcionar corriente eléctrica a los distintos consumidores del vehículo como son el: el sistema de alimentación de combustible, el sistema de encendido, las luces, los limpiaparabrisas etc. [3]

Curva característica del alternador

La intensidad de corriente que puede proporcionar un alternador girando a distintas revoluciones a que es sometido por parte del motor de combustión, se representa generalmente por medio de curvas características que están en función del régimen de giro, las cuales están referidas siempre a una temperatura definida y una tensión constante. En estas curvas se destacan algunos puntos que son de particular importancia en cuanto a las características del alternador [3].

nO: velocidad de rotación (aprox. 1000 rpm) a la que el alternador alcanza la tensión nominal sin suministrar corriente.

nL: velocidad de rotación del alternador cuando el motor de combustión alcanza el régimen de ralentí. En el diagrama de la curva se representa como una zona, ya que el valor exacto depende cual sea la relación de desmultiplicación fijada respecto con el motor de combustión. A esta velocidad, el alternador debe suministrar como mínimo la corriente necesaria para los consumidores de conexión prolongada, El correspondiente valor se indica en la designación de tipo del alternador. La velocidad (nL) suele estar comprendida entre 1500 y 1800 r.p.m. según sea el tipo de alternador.

IL: intensidad que suministra el alternador al ralentí.

nN: velocidad de rotación nominal, a la que el alternador entrega su corriente nominal, esta establecida en $nN = 6000$ rpm. La corriente nominal debería ser superior a la que requiere la potencia conjunta de todos los consumidores eléctricos. Esta corriente se indica también en la designación de tipo.

IN: intensidad nominal que suministra el alternador a la velocidad de rotación nominal.

n_{max} : velocidad de rotación máxima del alternador que se ve limitada por los rodamientos, escobillas y anillos colectores, así como por el ventilador. Esta velocidad según sea el tipo de alternador utilizado va desde las 8000 r.p.m. (vehículos industriales) hasta las 20.000 r.p.m. (automóviles).

I_{max} : intensidad que proporciona el alternador a la velocidad de rotación máxima

n_A : velocidad de rotación inicial. A esta velocidad, el alternador comienza a entregar corriente cuando aumenta por primera vez la velocidad de rotación.

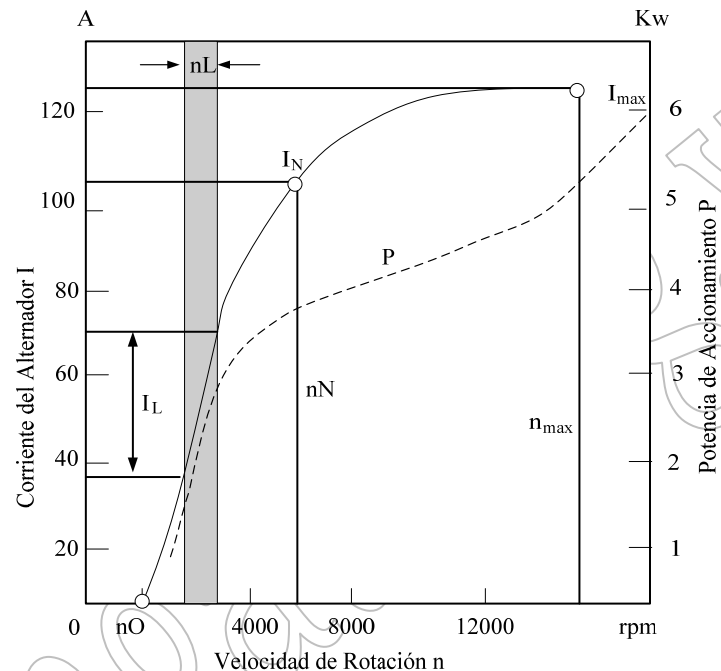


Figura 2. Curva Característica de un Alternador [3].

Este tipo de generador se utiliza en turbinas de viento con régimen de operación a 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 [3].

Si se desea usar este tipo de generador en aerogeneradores, debe tenerse en cuenta que entre el rotor eólico y el alternador debe ser incluido lo que se conoce como una caja multiplicadora de velocidades. Esto se debe a que los rotores eólicos poseen bajas rpm del orden de 100 a 500, mientras que el alternador comienza a generar a 500 rpm y alrededor de 14000 rpm produce su máxima potencia (Figura 2). Al utilizar un alternador de vehículo, este funcionará a un máximo de 20% o 30 % de toda su capacidad [3].

Sistema de rectificación de corriente

La corriente generada por el alternador trifásico es alterna y no es adecuada para la batería ni tampoco para la alimentación de los consumidores del un vehículo. Es necesario rectificarla. Para cuando se desea usar un alternador en aerogeneradores de aplicación aislada a la red, en donde toda la energía producida será almacenada en un banco de baterías también debe ser rectificada la corriente. Una condición importante para la rectificación es disponer de diodos de potencia aptos para funcionar en un amplio intervalo de temperatura [3].

El rectificador esta, formado por un puente de 6 o 9 diodos de silicio, puede ir montado directamente en la carcasa al lado de los anillos rosantes o en un soporte (placa) en forma de "herradura", conexas a cada una de las fases del estator, formando un puente rectificador, obteniéndose a la salida del mismo un voltaje a corriente continúa.

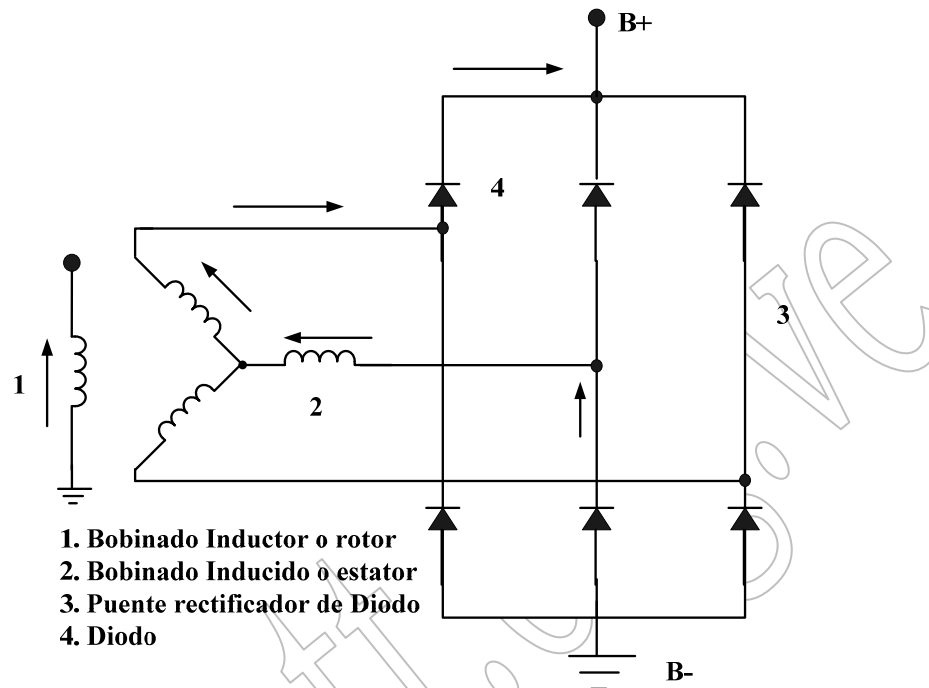


Figura 3. Esquema eléctrico Básico de un puente rectificador de un alternador [3]

Los diodos se montan en esta placa de manera que tres de ellos quedan conectados a masa por uno de sus lados y los otros tres al borne de salida de corriente del alternador, también por uno de sus lados. El lado libre de los seis queda conectado a los extremos de las fases de las bobinas del estator [3]. En la Figura 3 se muestra un esquema eléctrico para un puente rectificador.

Sistema de regulación de voltaje

Además de colocar un puente rectificador de diodos el alternador debe ir acompañado de un regulador de tensión que se encargara de estabilizar el voltaje que proporciona en un valor fijo, es decir, permite al alternador producir un voltaje máximo especificado. Este valor puede variar de 12.0 a 14.7 voltios dependiendo del fabricante [3].

Esta regulación se puede llevar a cabo por medio de reguladores de voltaje electromagnéticos o reguladores de tensión electrónicos. La regulación del alternador presenta dos ventajas muy importantes [4]:

- La corriente queda limitada en función del voltaje obtenido, no se necesita la implementación de un regulador de intensidad.
- Por la característica de que los diodos no dejan pasar la corriente en sentido contrario, no es necesario emplear un disyuntor, por lo tanto, en si no hay errores en bajo ninguna circunstancia (teniendo una conexión adecuada), la corriente de la batería regresará al alternador, aún cuando la tensión de este sea muy elevada.

La regulación de voltaje se logra graduando la corriente de alimentación de la bobina inductora que se encuentra en el interior del rotor. Cuando el valor de voltaje es bajo, la corriente que pasa al arrollamiento del rotor es alta, debido a la poca resistencia que opone el circuito interno del regulador, aumentando nuevamente el voltaje de salida. Cuando el voltaje aumenta demasiado, el regulador disminuye la corriente que manda al rotor, con lo que disminuye el voltaje hasta el valor normal; este proceso sucede continuamente en cuestión de segundos [4].

Las características esenciales del alternador trifásico son las siguientes [3]:

- Los diodos además de convertir la corriente alterna en corriente continua, evitan que la tensión de la batería se descargue a través del alternador estar detenido o no genere corriente (avería).
- Mayor aprovechamiento eléctrico (es decir, a igualdad de potencia, los alternadores son más ligeros que las dinamos).
- Si se utilizan alternadores diseñados para vehículos estos son más resistentes, ya que se fabrican en versiones sin anillos colectores, bien sea con posibilidades de relubricación o provistos de cojinetes con cámaras con reserva de grasa.
- Son insensibles a influencias externas tales como altas temperaturas, humedad, suciedad u vibraciones.
- Pueden funcionar en ambos sentidos de giro sin requerir medidas especiales, siempre que la forma del ventilador que lo refrigera, sea adecuado al sentido de giro correspondiente.

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

Los principales fabricantes de estos equipos en el mundo son: *Bosch, ISKRA, Siemens y Mastervolt*. Los costos son variados en Europa oscilan entre 70-200€[5]; mientras que en el caso particular de Venezuela se encuentran entre los 600-2000 BsF. [6]. La variación de los precios en los equipos se debe a la cantidad de potencia que pueden generar y al valor de la corriente nominal.

Generadores sincrónicos 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 de potencia del aerogenerador [2].

El incremento del costo no es significativo, pero es un elemento que en algunos aerogeneradores ha sido fuente de graves problemas. Por ello, se utilizan cada vez más, sobretodo en aerogeneradores de velocidad variable, generadores sincrónicos con alto número de polos bien sean electroimanes o imanes permanentes [2].

Generadores sincrónicos multipolares con imanes permanentes

En aerogeneradores de pequeña potencia (menor a 50kW, según Tabla 1) se utilizan mayormente generadores sincrónicos de imanes permanentes.

Tabla 1. Clasificación de las Turbinas Eólicas de acuerdo a la Potencia [7], [8].

<i>Tipo</i>	<i>Potencia generada</i>	<i>Características</i>
Micro	< 3kW	<ul style="list-style-type: none"> • Diámetro del rotor entre 1 y 5m • Eje Horizontal • Velocidad lineal en la punta de la pala entre 100 y 120 m/s
Pequeño	< 50kW	<ul style="list-style-type: none"> • Abastecimiento de núcleos de población aislados • Se usan en sistemas híbridos • El generador debe funcionar a un velocidad 50 veces mayor a la de la turbina
Grande	< 850kW	<ul style="list-style-type: none"> • Diámetro de rotor entre 25 y 55m • Velocidad lineal en la punta de la pala entre 65 y 70 m/s
Comercial	1 y 3MW	<ul style="list-style-type: none"> • Diámetro de rotor entre 50 y 90m • Generalmente utilizados en instalaciones marinas

Los generadores sincrónicos de imanes permanentes son empleados en aplicaciones consideradas pequeñas debidos 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 más 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 [2]

- *Alnico*: Estos imanes están fabricados por fundición o sinterización. Poseen el mejor comportamiento a temperaturas.
- *Ferrita*: Este tipo de imanes se obtienen sobretodo por sinterización. Son los más utilizados por su relación calidad/precio. Existen muchas calidades diferentes. Presentan buena resistencia a la desmagnetación.
- *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.
- *Samarium-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.

En éste tipo de generadores el voltaje 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.

Topologías de Generadores de Imanes Permanentes

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 [3].

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 más flexible, desde 2 a 30 en generadores de pequeña potencia, debido a su geometría. Hay que tener en cuenta que un mayor número de imanes ofrece un mayor par para el mismo nivel de corriente [1].

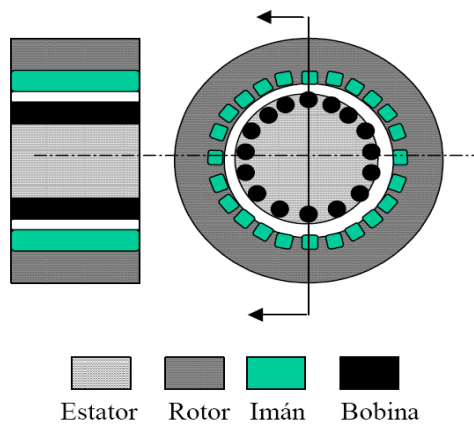


Figura 4. Generador síncrono de imanes permanentes de flujo Radial [1].

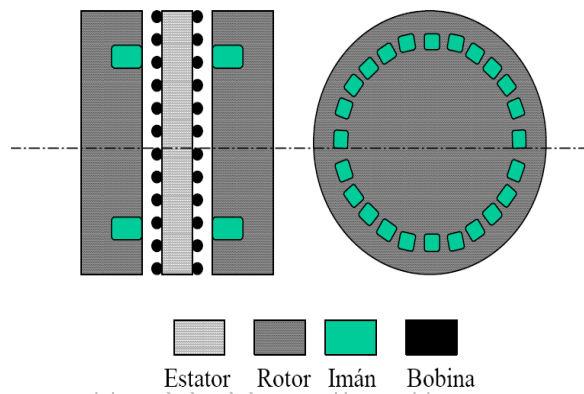


Figura 5. Generador síncrono de imanes permanentes de flujo axial con devanado estatórico toroidal e imanes incrustados en los dos rotores [1]

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

$$T = kD^2L \tag{1}$$

Siendo

- T: Torque [N.m]
- k : Constante
- D: Diámetro del rotor [m]
- L: Longitud axial del rotor [m]

Este tipo de generadores no son muy comerciales en el mercado venezolano ya que por ser importados de Europa su costo es elevado, entre 1000-1300€[9]

Generadores asincrónicos

Generador asincrónico de corriente alterna o de inducción

En las máquinas asincrónicas, a diferencia de las demás máquinas, no existe corriente conducida en uno de los arrollamientos. La corriente que circula por el rotor, generalmente, se debe a la f.e.m. inducida por la acción del flujo del otro (*máquina de inducción*). También recibe el nombre de *máquina asincrónica* debido a que la velocidad del rotor es distinta a la velocidad de la red [2].

En una máquina de inducción existe un factor muy importante a considerar conocido como *deslizamiento*. Este término se refiere a la velocidad relativa entre el campo magnético por las corrientes en el estator y la velocidad mecánica del rotor, permitiendo así, determinar la cercanía de la velocidad de giro de la máquina a su velocidad sincrónica.

$$n_{des} = n_{sinc} - n_m \quad (2)$$

Donde:

n_{des} : Velocidad de deslizamiento de la máquina [r.p.m]

n_{sinc} : Velocidad de los campos magnéticos [r.p.m]

n_m : Velocidad mecánica del eje de la máquina [r.p.m]

Otra forma de representarla es a través una fracción de la unidad ó un porcentaje:

$$s = \frac{n_{sinc} - n_m}{n_{sinc}} \times 100\% \quad (3)$$

Así como también, en términos de la velocidad angular ω en radianes por segundo, de la siguiente manera:

$$s = \frac{\omega_s - \omega_m}{\omega_{sinc}} \times 100\% \quad (4)$$

Dependiendo del estado de operación de la máquina se tienen varios valores de deslizamientos que van desde -1 a 1, cada uno de estos límites determinan la velocidad del campo magnético. Por ejemplo, cuando $s=0$, la velocidad relativa entre el flujo giratorio y el rotor es cero, ya que la velocidad mecánica es igual a la sincrónica. Por lo tanto, cuando $s=0$ no se induce fuerza electromotriz en los arrollados del rotor; la corriente del rotor es cero y la potencia mecánica es cero [10].

Para valores de s mayores que cero y menores que 1, la potencia mecánica permanece positiva, ya que la velocidad sincrónica es mayor que la mecánica. Por su parte, cuando $s=1$, la velocidad mecánica es cero ya que el rotor se encuentra en estado estacionario [10].

Por otra parte, cuando la velocidad mecánica es mayor que la sincrónica, entonces s tiene un valor negativo. Ya que la máquina al girar como motor no puede alcanzar la velocidad uniforme ($n_{sinc} = n_m$), debe ser otra máquina la que lleve el rotor a una velocidad superior a la de sincronismo, esta condición implica que la potencia mecánica sea negativa, lo cual significa que a velocidades por encima de la sincrónica, el rotor no proporciona potencia mecánica sino que la consume, funcionando de esta forma como generador [10].

Dependiendo del valor que se obtenga del deslizamiento, se distinguen dos zonas que caracterizan dos modos de funcionamiento tales como motor y generador [10]

Régimen como motor: Corresponde al rango de deslizamientos positivos (entre 0 y 1). Las siguientes características indican cuando la máquina está trabajando como motor [10].

Características:

- La potencia mecánica interna es positiva, esto implica que se transmite energía mecánica al eje.
- La potencia en el entrehierro es positiva, lo cual indica un torque electromagnético positivo.
- El tener potencia positiva en el entrehierro significa que se transfiere potencia en el sentido estator-rotor.

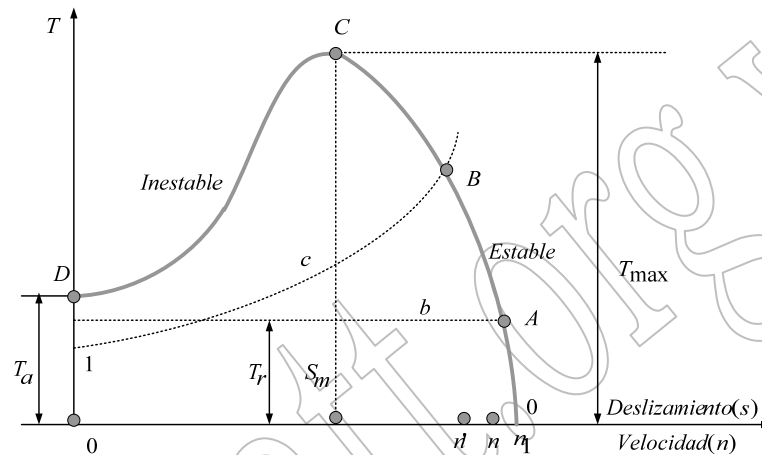


Figura 6. Curva torque - velocidad de un motor asíncrono [10].

La curva anterior muestra la característica torque – velocidad bajo el régimen de motor, dentro de los puntos más importantes se tienen los siguientes [10]:

- *Punto 0.* Funcionamiento en sincronismo: Se tiene un deslizamiento y un torque de cero; en este caso la velocidad de rotación es la del sincronismo. El torque electromagnético es cero, por lo que la máquina no podría superar los torques resistentes de rozamiento.
- *Punto A.* Régimen asignado o nominal: Este punto posee un deslizamiento y torque nominal, los cuales corresponden a la velocidad determinada y representan a su vez, las velocidades cercanas a las de sincronismo.
- *Punto C.* Funcionamiento con torque máximo: Este punto se encuentra representado por el torque máximo ó crítico del motor, se produce para deslizamientos entre el 15 y 30%.
- *Punto D.* Régimen de arranque. Para este caso la velocidad es cero, y ésta corresponde al torque de arranque.

En la Figura 6 se puede observar que el torque máximo divide la curva en dos partes: una que es estable ($0 < s < s_m$) y otra inestable ($s_m < s < 1$); la zona estable corresponde a la parte de la curva en donde se tiene un aumento del torque al disminuir la velocidad del motor. En la zona estable, el motor expone una característica rígida; es decir, que la velocidad disminuye muy poco con el torque por lo que se puede afirmar que estas máquinas giran a una velocidad asíncrona prácticamente constante [10].

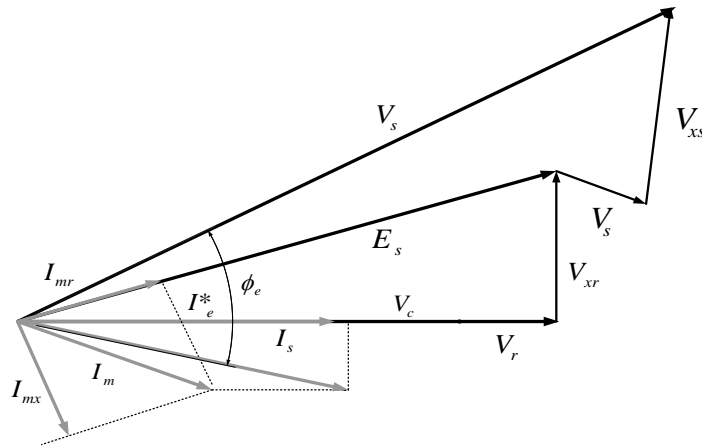


Figura 7. Diagrama fasorial de la máquina de inducción en la condición de motor [10]

Régimen como generador: Para este régimen, el sentido de rotación del flujo respecto al secundario de la máquina se invierte con relación al motor, lo cual trae como consecuencia la inversión en el sentido de la fuerza electromotriz del rotor, lo cual influye en el cambio de sentido de la corriente y en el torque [10].

La máquina asincrónica trabaja como generador recibiendo energía mecánica de un motor externo que gira a la velocidad de sincronismo, entregando energía eléctrica a la red por el estator; bajo este régimen se tiene un deslizamiento negativo bajo las siguientes características [10].

- La potencia mecánica interna se hace negativa, la máquina absorbe potencia mecánica por el eje que es suministrada por el motor primario que lo mueve a una velocidad superior a la de sincronismo.
- La potencia en el entrehierro se hace negativa, lo cual influye en el torque electromagnético al cambiar de signo (si se toma como referencia el comportamiento del motor).

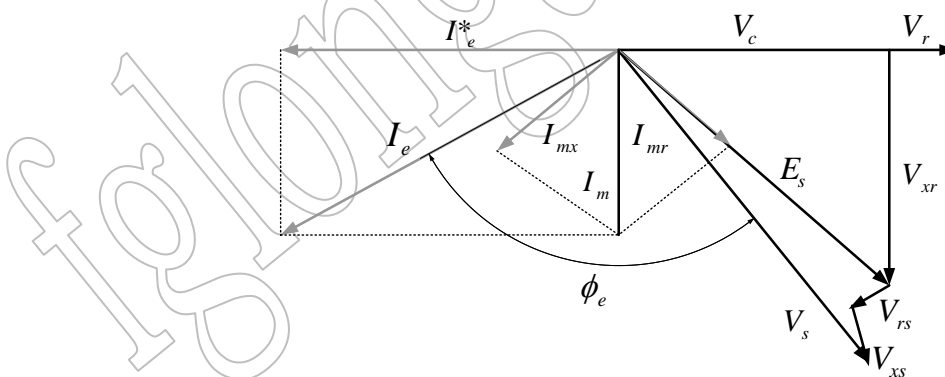


Figura 8. Diagrama fasorial de la máquina de inducción en la condición de generador [10].

Este tipo de generador, se emplea, generalmente, en parque eólicos, dónde las velocidades de viento son muy dispares y porque no necesita regulación de voltaje debido a que ésta viene ya impuesta por la red externa. La mayoría de turbinas eólicas del mundo utilizan un generador asíncrono trifásico (de jaula bobinada), también llamado *generador de inducción*, para generar corriente alterna [10].

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 [2].

Uno de los principales problemas de este tipo de máquinas, es que su factor de potencia es relativamente bajo, alrededor de 0,8 a 0,9 en plena carga y este factor de potencia disminuye a menor carga [10].

El problema más serio que presenta el generador de inducción en su operación aislada es que el voltaje es inestable ante los cambios de la carga, ya que no cuenta con una corriente de campo que le permita mantener estable su magnetismo residual. Este problema de inestabilidad de voltaje no se presenta en el generador de inducción conectado a la red, debido a que su voltaje en terminales se mantiene por medio del sistema de potencia externa al cual está conectado, y obligatoriamente, su frecuencia de operación es la correspondiente al sistema en el que se encuentra [10].

La principal ventaja del generador asíncrono, reside en su sencillez, no necesita un circuito independiente para su excitación y no tiene que girar a una velocidad fija, basta que su velocidad sea superior a la de sincronismo [2].

Los Principales fabricantes de este tipo de generadores en el mundo son: *ABB, Dutchi Motors, MGM, Siemens y Franklin Electrics*, [11]. En relación a costos suelen ser variados, para el caso de Venezuela oscilan entre 300-1500 Bsf. [12], mientras que en Europa los precios oscilan entre 50-250€ [13]. La variación de los costos dependerá del número de polos y de la potencia que estos puedan generar.

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 [14].

Hay varias formas para obtener la operación a doble velocidad [14]:

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 más utilizada. (ABB, SIEMENS)

Las principales características que deben tener los generadores de inducción para aplicaciones en aerogeneradores son [13]:

- 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.

Consideraciones para la selección del generador

En aerogeneradores de baja y pequeña potencia (entre 100 y 5000 W), generalmente se utilizan los generadores de corriente continua (dínamos) pero existe la posibilidad de incorporar generadores de alterna sincrónicos (alternadores), debido a su mayor rendimiento, sin embargo, éstos requieren de la instalación de un elemento rectificador que permita utilizar corriente continua para almacenar la energía en baterías y a la salida de éstas un inversor para poder pasar la corriente continua a alterna [2].

En la mayoría de los casos cuando se selecciona un generador eléctrico para aerogeneradores, este debe realizarse bajo ciertos requerimientos. Estas consideraciones pueden ser entre otras, velocidad de régimen, para los rotores rápidos entre 100 y 500 rpm [4]. Además deben ser pequeños y de poco peso.

En tal sentido, para el aerogenerador se deben considerar las siguientes restricciones:

- El generador debe aprovechar toda la potencia eólica posible, en un rango muy amplio de funcionamiento (velocidades).
- El generador debe requerir el menor mantenimiento posible.
- Lo más importante es que los elementos constructivos sean de fácil construcción y de bajo costo.

Selección del generador

En este reporte se está interesado en la selección de un aerogenerador de baja potencia (<5000 W), empleando turbina de viento de velocidad variable con regímenes de operación entre 100 y 400 rpm. Este aerogenerador en aplicación aislada, emplea una cadena ac-dc-ac con sistema de almacenamiento de energía.

A partir de las consideraciones efectuadas en la sección anterior y tomando en cuenta las características de los diferentes generadores anteriormente descritos, se elabora la Tabla 2, donde se muestran las ventajas y desventajas de los generadores para luego poder realizar una escogencia en base a los requerimientos necesarios.

Tabla 2. Ventajas y Desventajas de diferentes generadores

<i>Generador</i>	<i>Ventaja</i>	<i>Desventaja</i>
Imanes Permanentes	<p>No se requiere de corriente de excitación para crear el campo inductor, pues este es proporcionado por los imanes. Esto hace innecesaria la lectura de la velocidad de giro del rotor para controlar la conexión del generador a las baterías solo cuando se alcanzan las revoluciones por minuto de generación.</p> <p>Dado el diseño particular del generador de imanes permanentes, no se requiere emplear una caja multiplicadora, puesto que su acoplamiento con el rotor es directo. De este modo se consigue generar a bajas velocidades de giro.</p>	<p>Su construcción puede ser complicada.</p> <p>Requieren cierto maquinado.</p>
Asíncrono o de Inducción	<p>No necesita un circuito independiente para su excitación y no tiene que girar a una velocidad fija, basta que su velocidad sea superior a la de sincronismo.</p>	<p>Necesita recibir potencia reactiva para mantener el campo magnético de su estator, de tal manera que no puede trabajar como un generador aislado de la red a no ser que se le provee de condensadores que le suministren la corriente magnetizante necesaria.</p>
Alternador de Automóvil	<p>Son económicos y generalmente se presentan armados.</p> <p>Son fáciles de regular ya que la intensidad magnética puede ser cambiada modificando la potencia de los campos.</p> <p>Poseen un rectificador de corriente ya incluido dentro de su estructura.</p> <p>Fáciles de conseguir y su variedad de precios permite que sean mas accesibles</p>	<p>Se han diseñado para trabajar a altas velocidades que son imposibles lograr con corrientes de viento, lo que implica el uso de multiplicadores lo cual implica pérdida de potencia debido a la fricción y ser una solución más cara.</p>
Motor de Inducción trabajando como Alternador	<p>Son baratos y relativamente sencillos de convertir. Poseen buena eficiencia a baja velocidad</p>	<p>La capacidad de generación la limita la resistencia interna, son ineficientes a altas velocidades y requieren cierto maquinado.</p>

Teniendo en cuenta las consideraciones anteriores, se descarta al generador de imanes permanentes ya a pasar que se evita el uso de una caja multiplicadora de velocidades, por su particularidad de trabajar a bajas rpm, además este tipo de generador no se encuentra comercialmente disponible en Venezuela.

Con respecto al generador de inducción presenta el problema de que su factor de potencia es relativamente bajo y disminuye con la carga, además de que no posee corriente de campo para mantener

magnetismo residual, lo que implica que generen inestabilidades en el voltaje, esto cuando se utiliza en aplicación aislada. Debido a que el control de voltaje en aplicación aislada de ésta máquina está íntimamente relacionado con el fenómeno de autoexcitación, y el cual es sumamente complicado de manejar, se descarta el uso del generador de inducción.

Finalmente se ha decidido seleccionar el uso de un alternador convencional de vehículo, esto motivado a que, tiene la ventaja de que posee incorporado dentro de su estructura un rectificador, que permitirá convertir la corriente ac que se genera en dc para alimentar las baterías. También incluye un sistema de regulación de tensión y por ultimo son fáciles de adquirir (por se muy comerciales), ofreciendo así una variedad de fabricantes, y los costos del equipo no soy muy elevados según los requerimientos de potencia.

fongatt.org.ve

Conclusiones

La selección del generador eléctrico a ser usado en un aerogenerador requiere considerar una gran cantidad de factores, como son: el tipo de aplicación (aislada o conectada a la red), el régimen de viento (variable o fijo), disponibilidad de equipos, es decir, si son de fácil adquisición con los diferentes fabricantes y por su puesto el costo.

En lo reporte se indicó ciertas nociones básicas que brinden una perspectiva más clara, al momento de dicha selección, donde se hace énfasis en mostrar las diferentes características, estructuras, ventajas y desventajas de todos los posibles generadores que pudiesen utilizarse para un determinado aerogenerador.

fglongatt.org.ve

Referencias Documentales

- [1] Monterrubio Juan y De Marco Ibáñez, Natxo. *Especificación técnica para la réplica en la UPC de un aerogenerador de baja potencia destinado a la cooperación para el desarrollo humano*. Universidad Politécnica de Catalunya, año 2006.
- [2] José Ignacio Estopiña. *Estudio de Viabilidad de un grupo Eólico*. Escuela Técnica Superior de Ingeniería. Departamento de Eléctrica y Electrónica. Año 2003.
- [3] Alternadores y Reguladores de Tensión. Documento en línea disponible en www.mecanicaviectual.ispana.es/alternador-regulador.html
- [4] Uribe G. y L. Rodríguez P. “*Diseño y Construcción de un Prototipo Académico de Generación Eólica para Instalación en el Laboratorio de máquinas de la escuela de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Carabobo.*” (Año 2008).
- [5] Fabricantes de alternadores (online) Available at: <http://www.directindustry.es/fabricante-industrial/alternador>
- [6] Venta de Alternadores en Venezuela. (online) Available at: www.carros.mercadolibre.com.ve/repuestos-alternadores/
- [7] Hatziargyriou, M. Donnelly, S. Papathanassiou, J.A. Pecos Lopes, M. Takasaki, H Chao, J. Usaola, R. Lasseter, A. Efthymiadis, K. Karoui S. Arabi. “*Cigre Technical Brochure on modeling new forms of generation and storage TF 38.01.10.*” November 2000.
- [8] F. González Longatt, “Fuentes de Energía Distribuidas: Tecnologías Disponibles”, Conferencia Magistral y artículo en las memorias de las II Jornadas de Ingeniería Eléctrica 2003, Puerto Ordaz, Estado Bolívar, Venezuela.
- [9] Fabricante de generadores de imanes permanentes (online) Available at: www.precilec.com/PMG
- [10] Ríos A. y Strauss A. (2007) “*Evaluación del comportamiento de una máquina de inducción de rotor tipo jaula de ardilla como generador para ser empleado en un sistema de conversión de energía del viento.*” Tesis para optar al título de Ingeniero Electricista. Universidad Nacional Experimental de la Fuerza Armadas. Aragua.
- [11] Fabricantes de Motores de inducción en el mundo (online) Available at: http://www.telecable.es/personales/albatros1/asin/motores_electricos.htm#cfaeu
- [12] Costo de un motor de inducción en Venezuela. (online) Available at: www.mercadolibre.com.ve/motores/
- [13] Fabricantes de motores. (online) Available at: <http://www.directindustry.es/fabricante-industrial/motores>
- [14] Martínez Miralles; Tesis de *Diseño de un Aerogenerador de baja Potencia*. Universidad de Catalunya, España. Año 2005.