

Configuraciones de generadores eléctricos para pequeños aerogeneradores con mínimas condiciones tecnológicas de fabricación

Electrical generator configurations for small wind turbines with minimal technological manufacturing conditions

Alejandro Pérez Herrera^{I,*}, Hector Eugenio Baracaldo Alba^{II}, Sergio Lazar Jauregui Rigo^I, Ernesto Yoel Fariñas Wong^I

^IUniversidad Central “Martha Abreu” de las Villas, UCLV, Cuba

^{II}Universidad de Sancti Spíritus, Cuba

*Autor de correspondencia: alejandrol.perez@nauta.cu

Recibido: 2 de marzo de 2023

Aprobado: 4 de junio de 2023

Este documento posee una [licencia Creative Commons Reconocimiento-NoComercial 4.0 internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)



RESUMEN/ABSTRACT

Esta investigación presenta una revisión de las tendencias existentes en el desarrollo de generadores eléctricos para pequeños aerogeneradores. En la actualidad, los sistemas de energía eólica funcionan a velocidad variable o fija, utilizando el principio de generadores de corriente directa, generadores de inducción que utilizan un sistema con caja multiplicadora y los generadores sincrónicos, que funcionan a bajas velocidades del viento sin caja multiplicadora, siendo estos los más utilizados en pequeños aerogeneradores a nivel comercial. Se discuten tanto las fortalezas como las debilidades de las configuraciones existentes, se investigan las tecnologías emergentes en generadores eléctricos a baja velocidad y se realiza un análisis comparativo de los mismos. Se cumple el objetivo de seleccionar cual es el generador o generadores más adecuados para su construcción en talleres de mínimas condiciones tecnológicas para ser usados en sistemas eficientes de energía eólica pequeños, y se presenta una muestra de los aerogeneradores comercialmente disponibles.

Palabras clave: pequeños generadores eléctricos, generador sin caja multiplicadora, bajas velocidades, mínimas condiciones tecnológicas, aerogeneradores comercialmente disponibles.

This research presents a review of existing trends in the development of electrical generators for small wind turbines. At present, wind power systems operate at variable or fixed speed, using the principle of direct current generators, induction generators using a gear box system, and synchronous generators, which operate at low wind speeds without a gear box. ,being these the most used in small commercial wind turbines. Both the strengths and weaknesses of existing configurations are discussed, emerging technologies in low-speed electric generators are investigated, and a comparative analysis of the misperformed. The objective of selecting the most suitable generator or generators for its construction in workshops with minimal technological conditions to be used in efficient small wind energy systems is fulfilled, and a sample of commercially available wind turbines is presented.

KeyWords: small electric generators, gear box less generators, low speeds, minimal technological conditions, commercially available wind turbines.

INTRODUCCIÓN

Durante décadas, el suministro de energía eléctrica ha dependido en gran medida de los combustibles fósiles. La contaminación ambiental, las fuentes limitadas de estos combustibles y la progresiva demanda de energía han originado preocupaciones a nivel mundial [1, 2]. En esta investigación se hace una revisión de la literatura sobre las configuraciones de los generadores eléctricos para ser usados en aerogeneradores eólicos en zonas urbanas, estableciendo las ventajas y desventajas para cada uno y se muestran los aerogeneradores comercialmente disponibles en el mercado que reúnen las características deseadas.

Cómo citar este artículo:

Alejandro Pérez Herrera y otros. Configuraciones de generadores eléctricos para pequeños aerogeneradores con mínimas condiciones tecnológicas de fabricación. Ingeniería Energética. 2023. 44 (2), mayo/agosto. ISSN: 1815-5901.

Sitio de la revista: <https://rie.cujae.edu.cu/index.php/RIE/index>

Las limitaciones más marcadas desde el punto de vista ingenieril, son el rendimiento energético de los generadores [3, 4] y el impacto de la calidad de la energía que estos sistemas inyectan a la red [5, 6]. Puesto que, el sistema de generación va a ser utilizado para la carga de baterías, la calidad de la energía va a ser controlada por la electrónica de potencia correspondiente a cada caso. Debido a los elevados costos de instalación y operación de pequeños aerogeneradores [3, 7], y con el objetivo de llevarlos más cerca del cliente final, para aumentar la participación de esta clase de generación en la matriz energética, es necesario lograr de ellos su máximo rendimiento con la construcción en un taller de capacidades tecnológicas básicas. Con este inconveniente planteado, se considera como objetivo, el estudio analítico de los diferentes tipos de generadores eléctricos, a fin de determinar cuáles son los que pueden construirse en estos talleres, logrando un óptimo rendimiento y considerando su impacto sobre el sistema de potencia con la calidad requerida de la energía.

DESARROLLO

En la bibliografía consultada de generadores eléctricos para la producción de energía, se aprecian tradicionalmente tres grupos [8-10]:

- Generadores de corriente directa
- Generadores de inducción o asíncronos de corriente alterna
- Generadores síncronos de corriente alterna

Para su utilización en la energía eólica, no existe consenso entre los académicos y la industria, acerca de cuál es la mejor opción para la misma [11, 12]. En principio, cada uno puede operar a velocidad variable o fija. Debido a la naturaleza de las fluctuaciones del viento, es ventajoso operar con un generador de velocidad variable, reduciendo el estrés físico de las aspas de la turbina y que mejora la eficiencia aerodinámica del sistema y los comportamientos transitorios del par [10, 12]. A continuación, se describen cada una de las clasificaciones antes mencionados, con la finalidad de encontrarla mejor eficiencia energética, peso ligero, bajo par de arranque, bajo mantenimiento, bajo nivel de ruido, fácil instalación y mayor rendimiento eléctrico en el generador, para ser construido en talleres de mínimas condiciones tecnológicas.

A. Generador de corriente directa

En las máquinas de corriente continua convencionales, el campo está en el estator (inductor) y la armadura (inducido) está en el rotor. El estator comprende un número de polos que se excitan o bien por imanes permanentes o por campos de bobinas de corriente continua [12]. Un modelo representativo de un sistema de generador eólico de corriente continua, se muestra en la figura 1, se compone de un rotor eólico, un generador de corriente continua, un inversor (con su debido control automático), un transformador y una red eléctrica. En un generador de corriente continua en derivación, la corriente de campo (y por lo tanto el campo magnético) aumenta con la velocidad de operación, mientras que la velocidad real de la turbina eólica está determinada por el equilibrio entre el par motor de la turbina eólica y el par de carga [4].

El rotor incluye conductores de inducción en una armadura que están conectados a un conmutador de anillo partido. La energía eléctrica se extrae a través de las escobillas que conectan al conmutador que se utiliza para rectificar la alimentación de corriente alterna generada en una salida de corriente continua [12]. Debido a este funcionamiento los mismos requieren un alto nivel de mantenimiento, redundando en un alto costo en la utilización de escobillas y conmutadores.

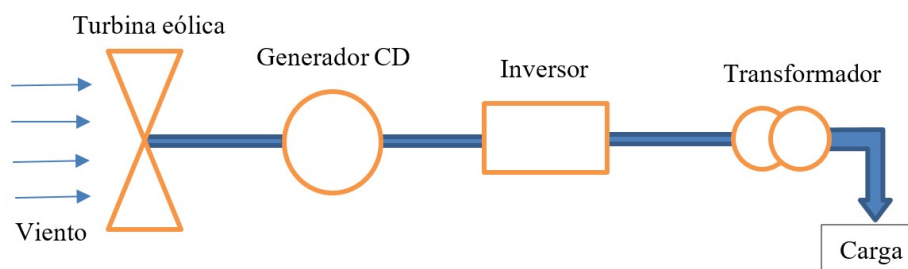


Fig. 1. Componentes de un sistema de generador eólico de corriente continua. Fuente: Propia

Para la utilización de estos generadores para cargar baterías, el uso de estos generadores también se considera inadecuado debido a la mala eficiencia en comparación con los generadores de corriente alterna y el uso de componentes mecánicos. No es conveniente su utilización para los objetivos propuestos en esta investigación.

B. Generador asíncrono de corriente alterna

En el segundo grupo de generadores encontramos el generador de inducción o generador asíncrono, el cual consume energía reactiva que conduce a un bajo factor de potencia de la máquina. El factor de potencia en pequeñas máquinas de inducción es muy inferior comparado con grandes máquinas [13]. El consumo de energía reactiva es penalizado en muchas compañías eléctricas del mundo y Cuba no está exenta de esta situación, provocando pérdidas en la red.

Algunas soluciones son vistas como la instalación de banco de capacitores, estas soluciones incrementan los costos de producción. Existen dos prototipos de generadores de inducción que son más utilizados en las turbinas eólicas, los de velocidad fija con jaula de ardilla y los doblemente alimentados [14, 15], los cuales se detallan a continuación.

Generador de inducción con jaula de ardilla(GIJA)

Las turbinas eólicas de velocidad fija, se usaron en la década de 1980 cuando la energía eólica comenzaba a implementarse debido a su sencillez, bajo costo y confiabilidad. En esta configuración, se conecta una caja multiplicadora de tres etapas, con una relación de transmisión de alrededor de 100, a un generador de inducción de jaula de ardilla convencional, figura 2. Posteriormente, el generador se conecta directamente a la red eléctrica a través de un transformador, donde la velocidad del aerogenerador debe determinarse con cuidado [16, 17]. Para mejorar el rendimiento y limitar las perturbaciones en la red, se introduce un banco de capacitores para compensar la potencia reactiva consumida por la máquina de jaula de ardilla, mientras que se utiliza un sistema de arranque suave para reducir la corriente de arranque [18].

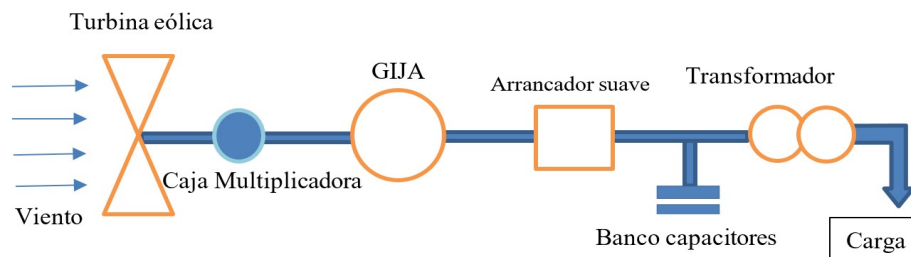


Fig. 2. Estructura de un sistema de velocidad constante con caja multiplicadora de un generador de inducción de jaula de ardilla de tres etapas. Fuente: Propia

Entre las ventajas que describen los autores [15, 19] en esta configuración se tiene:

- ✓Baja complejidad del sistema de recolección de energía.
- ✓Reducción de los costos de puesta en marcha y operación debido a su componente barato, arrancador suave de bajo costo.
- ✓Operación estable debido a que no se requiere convertidor de potencia.

Y las desventajas que presentan según [19, 20] son:

- ✓Capacidad de recolección de energía eólica insuficiente debido a la escala de velocidad limitada (1%).
- ✓Las características de intermitencia de la velocidad del viento dan como resultado fluctuaciones en la frecuencia de la red.
- ✓Las perturbaciones de la red generan un alto estrés en sus subsistemas mecánicos.

Generador de inducción doblemente alimentado (GIDA)

Para obtener velocidades variables con pequeños generadores y de bajo precio, se introdujeron los *GIDA*, como se muestra en la figura 3. Representa una solución satisfactoria debido a la naturaleza de la velocidad del viento. Esta configuración, se ha vuelto popular en las turbinas eólicas comerciales [21, 22]; es probable que sea uno de los sistemas de turbinas eólicas de mayor uso en la actualidad.

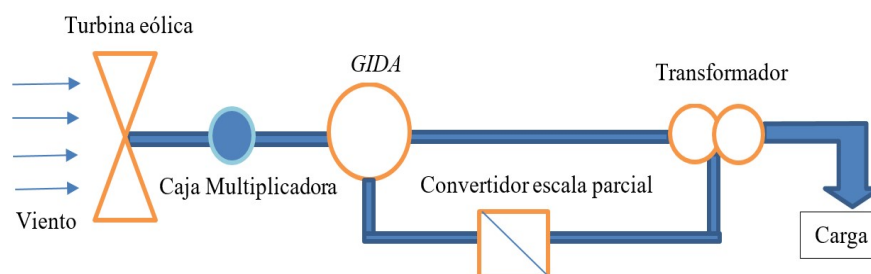


Fig. 3. Estructura de un sistema de un generador de inducción doblemente alimentado con un convertidor de potencia de potencia de escala parcial. Fuente: Propia

Consiste en una máquina de inducción de rotor bobinado acoplada con una caja multiplicadora en un lado de una o tres etapas y un convertidor de frecuencia de escala parcial en el otro lado. Los generadores *GIDA* entregan energía a la red a través del rotor y el estator, de ahí el nombre que reciben. Mientras que el estator del generador de inducción está conectado directamente a la red, el rotor está conectado a través de anillos deslizantes y escobillas a un convertidor (Corriente Alterna/Corriente Continua/Corriente Alterna) y luego a la red, que controla el velocidad y frecuencia del rotor [22].

El convertidor en el circuito del rotor está diseñado para gestionar completamente la potencia de deslizamiento; por lo tanto, la eficiencia de conversión de este sistema está limitada al 30% de la potencia real del generador eléctrico [10, 23]. Así mismo, debido a que la potencia nominal del convertidor para ambos GIDA con caja multiplicadora de una y tres etapas es solo el 30% de los sistemas, esto presenta ventajas especiales en términos de inversión inicial y rendimiento de recolección de energía en comparación con las tecnologías con los convertidores de potencia de rango completo. Por otro lado, debido al único nivel de maximización de velocidad, la velocidad del generador es considerablemente baja, mientras que el par es considerablemente alto y, por lo tanto, el generador de una etapa debe diseñarse con un diámetro y un entrehierro cada vez superiores. Como resultado se tienen la generación de una corriente de magnetización importante y pérdidas de potencia considerables [23, 24].

Las principales ventajas de los *GIDA* se resumen a continuación [22, 24]:

✓ Los convertidores de potencia permiten el transporte de potencia bidireccional en el circuito del rotor. La velocidad del generador se puede sincronizar un 30% más o menos que la velocidad síncrona. Por lo tanto, la capacidad de captación de energía es elevada y las cargas de fatiga en los subsistemas mecánicos son insignificantes.

✓ La frecuencia eléctrica generada puede mantenerse constante con respecto a los cambios en las velocidades del viento mediante la modulación de entrada de la corriente.

✓ El convertidor de potencia funciona como una solución de suavizado para la integración de la red y la reserva de energía reactiva del lado de la red. Por lo tanto, no se requieren arrancadores suaves ni bancos de capacitores.

✓ Además, el convertidor de potencia ofrece una capacidad dinámica y confiabilidad superiores al aliviar las inestabilidades del sistema de potencia en contraste con *GIIA*.

Entre las desventajas que tienen los mismos se describen en [25, 26] como:

✓ Alto par en la máquina en condiciones de fallo.

✓ Aumento de la inversión en la instalación del sistema y su complejidad de diseño por la incorporación del convertidor de electrónica de potencia.

✓ Incompatible con las industrias eólicas marinas debido al requisito de mantenimiento constante de los anillos colectores y las escobillas en *GIDA* con la caja multiplicadora de tres etapas.

✓ Se requiere demasiado control para limitar la corriente de arranque.

En el generador de inducción con jaula de ardilla y el doblemente alimentado se encuentra el uso de la caja multiplicadora, lo que nos encarece la inversión y genera un nivel de ruido en el ambiente cercano. Los dos, necesitan su sistema de control correspondiente para limitar la corriente de arranque, lo que nos hace tener más elementos en el sistema eólico. A pesar de que el generador doblemente alimentado trajo consigo unas mejoras en relación con el de jaula de ardilla, con respecto al control de la frecuencia, el uso de banco de capacitores para el manejo de la energía reactiva y mayor estabilidad en el sistema de potencia, el mismo no es capaz de cumplir los objetivos planteados en esta investigación, al usar una caja multiplicadora, anillos deslizantes y escobillas en el rotor, y un complejo nivel de fabricación.

C. Generador sincrónico de corriente alterna

En el tercer grupo de generadores usados en aerogeneradores se encuentran las máquinas sincrónicas donde los devanados de campo están sobre el rotor, creando los polos magnéticos. Estos polos magnéticos pueden ser construidos salientes o no salientes [21, 24, 27]. El rotor de polos magnéticos salientes se diseña y construye proyectando los polos hacia afuera de la superficie del rotor, son utilizados para sistemas de baja velocidad. Mientras que los rotores de polos no salientes, poseen un rotor construido con sus polos al mismo nivel de la superficie del rotor y son utilizados para turbinas de vapor y gas, a altas velocidades [27]. La forma en que estos generadores inducen la tensión puede ser diferente, en dependencia del tipo de rotor, se distinguen el de rotor bobinado y el de imanes permanentes, siendo analizados en subepígrafos siguientes.

Generador sincrónico de rotor bobinado (GSRB)

Los generadores sincrónicos de rotor bobinado sin caja multiplicadora, mostrado en la figura 4, están construidos con un rotor bobinado excitado por una fuente de corriente continua que utiliza anillos deslizantes y escobillas, que son el tipo más común para los generadores de turbinas eólicas [27], o un excitador sin escobillas con un rectificador giratorio [28]. El suministro de corriente continua conduce a pérdidas de calor resistivas añadidas, y las escobillas van a requerir mantenimiento en el tiempo. Además, el campo de excitación en el rotor gira a la velocidad síncrona y, por lo tanto, se requiere una gran cantidad de polos. Sin embargo, estos generadores al no contar con la caja multiplicadora se encuentran limitados por el paso polar, al tener que ser construida con suficiente espacio para alojar el devanado del rotor [27, 29]. El voltaje inducido pulsante del devanado del rotor hará que la máquina sufra una ondulación de corriente de campo alta e incluso deteriorará el rendimiento de control de la máquina [30].

Para este tipo de generador, la ondulación de corriente causada por el voltaje inducido del devanado del rotor en el devanado del estator y el del propio rotor deteriorará la calidad de la potencia de salida y el rendimiento del control dinámico, lo que incluso influirá en el funcionamiento estable a alta velocidad. Por lo tanto, es importante tener en cuenta la tensión inducida del devanado del rotor durante la etapa de diseño inicial. Con el uso de un convertidor de escala completa, se encarecen los costos al transportar toda la energía a través de él, afectando la eficiencia de la máquina.

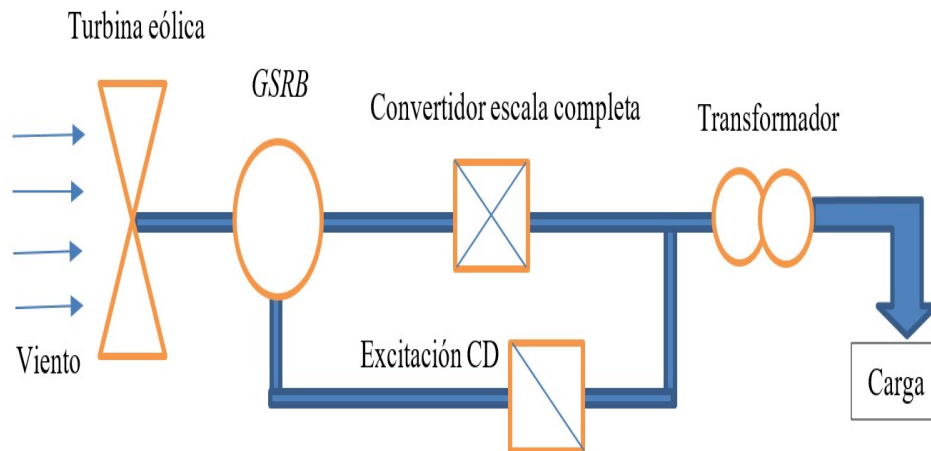


Fig. 4. Estructura de un sistema de un generador sincrónico de rotor bobinado con un convertidor de potencia completo. Fuente: Propia

Entre las ventajas que describen los autores[28, 31] de mayor relevancia son:

- ✓ La corriente de excitación es regulable, lo que ocasiona que la tensión en el inducido también lo sea, lo que permite controlar completamente la frecuencia y la amplitud del voltaje en el lado de la máquina.
- ✓ Genera relativamente alta potencia eléctrica en comparación con los generadores de inducción doblemente alimentados.
- ✓ Produce un ruido reducido debido a que no tiene caja multiplicadora.

Los inconvenientes que se encuentran en esta configuración según [31-33] se tiene:

- ✓Costo considerable del sistema a nivel de instalación debido al uso de componentes electrónicos costosos.
- ✓Requiere la aplicación de una fuente de corriente continua, con escobillas y anillos rozantes para la excitación del devanado del rotor.
- ✓Mayor tamaño al usarse mayor número de polos y, por ende, gran peso del generador.

En el generador sincrónico de rotor bobinado, encontramos mejoras en comparación con el doblemente alimentado analizado anteriormente al lograrse un mayor aprovechamiento de la potencia, junto a un menor ruido al no poseer caja multiplicadora, pero el mismo requiere de una excitación exterior para su funcionamiento, la cual va a generar pérdidas resistivas en la máquina, el uso de escobillas que van a requerir de mantenimiento periódico, y en sentido general, un peso mayor del generador, quedando con la desventaja de no ser posible su construcción en talleres de mínimas condiciones tecnológicas.

Generador sincrónico de imanes permanentes (GSIP)

El funcionamiento del generador de imanes permanentes, figura 5, para bajas velocidades no requiere caja multiplicadora al no tener una corriente de rotor con una velocidad mínima de rotación [34]. Al no tener estos engranajes, las turbinas eólicas pueden ser instaladas cerca del consumidor con una alta eficiencia a bajo costo de mantenimiento. El generador sincrónico de imanes permanentes genera la inducción del estator mediante imanes que producen el campo magnético. La utilización de este tipo de generador sincrónico elimina los anillos rozantes y las pérdidas en el devanado del rotor [35].

En los generadores de inducción doblemente alimentados, en los que el convertidor de potencia está vinculado al circuito del rotor para generar energía de deslizamiento, los generadores con imanes permanentes utilizan un convertidor de potencia entre los terminales del estator del generador eólico y la red eléctrica para hacer funcionar toda la energía eléctrica generada [36]. Por lo tanto, la eficiencia del convertidor de potencia aumenta del 30% al 100%.

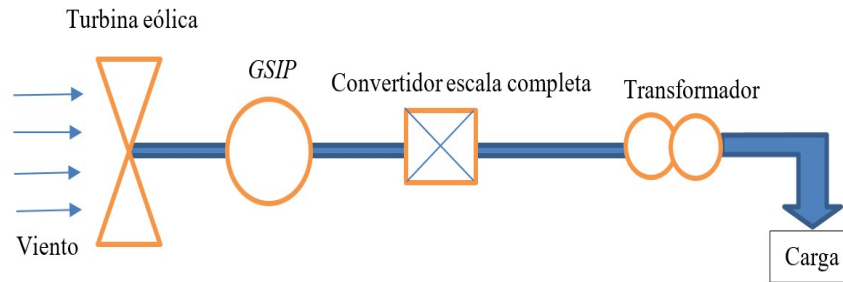


Fig.5. Estructura de un sistema de un generador sincrónico de imanes permanentes con un convertidor de potencia completo.

Fuente: Propia

Varios autores [34-36] señalan las ventajas que se encuentran en estos generadores entre las que se encuentran que:

- ✓ Debido a que no existe caja multiplicadora el costo por mantenimiento se reduce.
- ✓ Se eliminará la posibilidad de fallas en los generadores al no existir caja multiplicadora ni cojinetes, por lo tanto, produce una mayor fiabilidad.
- ✓ Peso mínimo que produce mayor rendimiento energético.
- ✓ El ruido acústico es casi nulo.

Y entre las limitaciones que presentan los mismo los autores [34,36] señalan que:

- ✓ Comparado con el generador de inducción con jaula de ardilla, el diámetro exterior del generador sincrónico de imanes permanentes es casi el doble de grande.
- ✓ El costo de los imanes es considerable.

El generador sincrónico de imanes permanentes no requiere de una fuente externa de energía para producir un campo magnético, reduciendo la complejidad del sistema y aumenta la eficiencia. El mismo no requiere de caja multiplicadora, anillos rozantes, ni escobillas, lo que redundará en un bajo mantenimiento o casi nulo, y un nivel de ruido casi imperceptible. Además, los imanes permanentes tienen una vida útil más larga que los electroimanes y no requieren mantenimiento regular, lo que reduce los costos de operación y aumenta la confiabilidad del sistema.

Los generadores de imanes permanentes cumplen a mayor cabalidad la exigencia de construcción en talleres de mínimas condiciones tecnológicas, a continuación, se exponen las principales características de los mismos según la construcción interna de estos, siendo esta característica la principal para la fabricación de los mismos en talleres de mínimas condiciones tecnológicas. La clasificación más utilizada, según [12, 37, 38], en estos generadores eléctricos de imanes permanentes, en dependencia de la orientación del campo magnético en relación a las coordenadas geométricas. Se distinguen tres tipos: radial, axial y transversal.

a) Generadores de imanes permanentes de flujo axial

La primera clasificación que tenemos son las máquinas de flujo axial (MFA) que está determinada cuando el campo magnético resultante de la máquina rota concéntrico a su eje. En las MFA, el estator tiene forma de anillo y el rotor (o los rotores) de disco, con sus caras activas paralelas, cumpliéndose que sus diámetros activos interior y exterior (longitud activa), son iguales respectivamente [39, 40]. Un tipo especial de generador de flujo axial es la máquina de estator de toroidal, figura 6. En la figura 7, se observan el generador del flujo axial con estator doble y bobinados en el rotor.

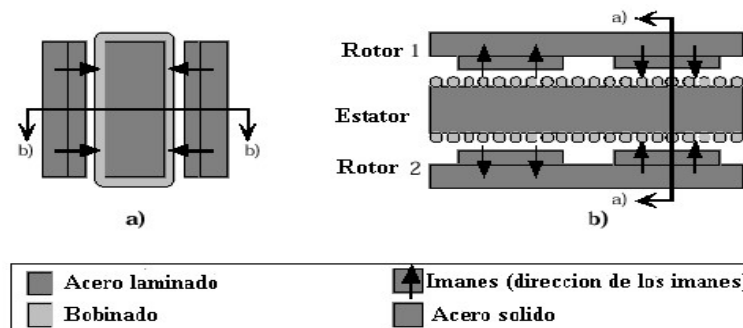


Fig.6. Generador del flujo axial con estator toroidal e imanes montados en la superficie del rotor. a) la vista Tangencial b) la vista Radial.

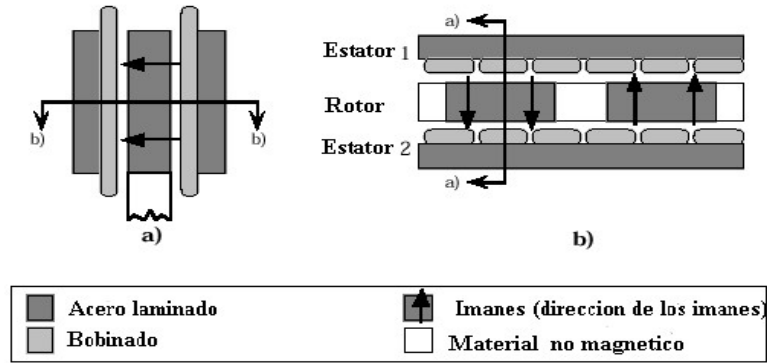


Fig.7. Generador del flujo axial con estator doble y bobinados en el rotor
a) vista Tangencial b) vista Radial.

Las principales ventajas según [39-41], que presentan son:

- ✓ Si se emplean dos entrehierros, las fuerzas de atracción entre el rotor y el estator se equilibran y no hay carga axial sobre los rodamientos.
- ✓ El calor producido por el bobinado estático aparece en el exterior del generador, siendo relativamente fácil de eliminar.
- ✓ Los imanes tienen dos caras planas, aunque lo habitual es que se requiera de una forma arqueada.
- ✓ No hay hierro en la espalda del rotor.
- ✓ El entrehierro es ajustable durante el ensamblaje.
- ✓ El estator es relativamente fácil de bobinar puesto que está abierto y plano.

Y las desventajas según [41,42], se define que:

- ✓ Si no tiene muchos polos magnéticos o el radio exterior es grande, entonces, las longitudes de las cabezas de bobinas pueden tener importancia respecto a la dimensión de la ranura. De modo que se puede obtener una pobre utilización del bobinado.
- ✓ El espacio en el que se alojan las cabezas de bobinas de los conductores en el radio interior tiene un volumen limitado. En cambio, los radios de cabeza del radio exterior tienen un volumen muchísimo mayor.
- ✓ El sesgo o inclinación lineal no elimina el par de *cogging*, este es función cuadrática del radio.

b) Generadores de imanes permanentes de flujo radial

El generador radial consiste en un cilindro que gira alrededor de su eje, y los imanes se sitúan en la superficie lateral, creando un campo magnético perpendicular al eje de giro, estos se conocen como de flujo radial con imanes superficiales, en ellos el rotor puede ser interior o exterior al estator, es muy empleada esta tipología en sistemas aislados [38]. Por otra parte, cabe destacar que los generadores de flujo radial de flujo concentrado con imanes embutidos en el rotor solo son utilizados en aplicaciones de alta velocidad. Las máquinas de flujo radial son las más convencionales de las alternativas existentes en el mercado, se utilizan con referencia para las comparaciones.

La disposición de los imanes en los distintos tipos de generadores puede verse de las figuras 8 y 9:

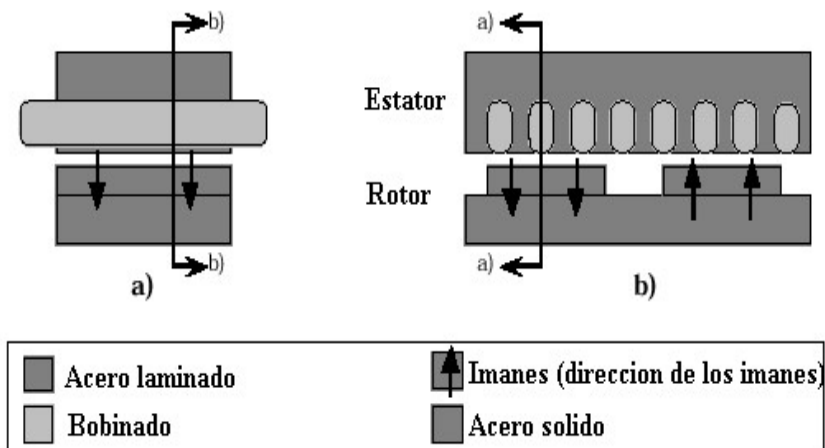


Fig.8. Generador de flujo radial con imanes montados en la superficie. a) vista Tangencial y b) vista Axial

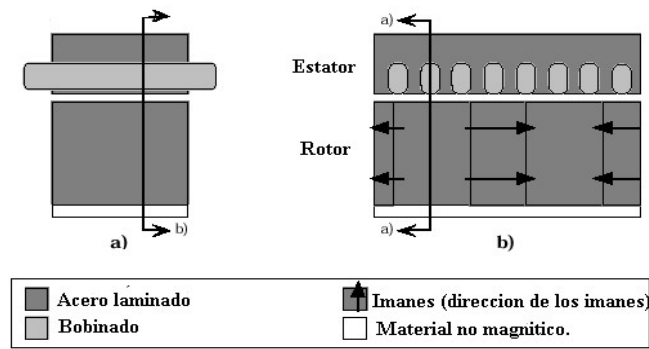


Fig.9. Generador de flujo radial con concentración de flujo y imanes ferrita. a) vista Tangencial y b) vista Axial

Sus principales ventajas [38, 43] son las siguientes:

- ✓ Las fuerzas de atracción entre el rotor y el estator son equilibradas alrededor del rotor, por lo tanto, no existe fuerza radial neta en el rotor.
- ✓ El calor producido por el bobinado situado en el estator es fácilmente evacuado debido a la superficie exterior del yugo de acero.
- ✓ El rotor es mecánicamente rígido y tiene facilidad de soporte en ambos extremos.
- ✓ El rotor y el estator son uniformes en la dirección axial excepto por la inclinación o sesgado, ya sea de los conductores que se alojan en las ranuras o bien, por la inclinación de los imanes.

Entre las desventajas según [43, 44] se encuentran que:

- ✓ Los imanes que se encuentran sobre el rotor o sobre el estator deben tener una superficie arqueada no pudiendo ser rectangulares.
- ✓ Se debe tener en cuenta si el generador opera a altas velocidades se requerirá de algún medio para sostener los imanes al rotor. Esto tiene que sumarse a la longitud de separación en el entrehierro.

c) Generadores de imanes permanentes de flujo transversal

La tercera clasificación tenemos la máquina de flujo transversal que es diferente de los otros dos tipos de máquinas analizadas, y es difícil de hacer cualquier comparación simple entre ellas. La diferencia mayor entre la radial o máquinas de flujo axial y la máquina de flujo transversal, es que el concepto utilizado en la de flujo transversal permite un aumento en el espacio entre los bobinados sin disminuir el espacio disponible para el flujo principal; esto permite pérdidas de cobre muy bajas [45]. La figura 10, muestra la estructura de este tipo de generador.

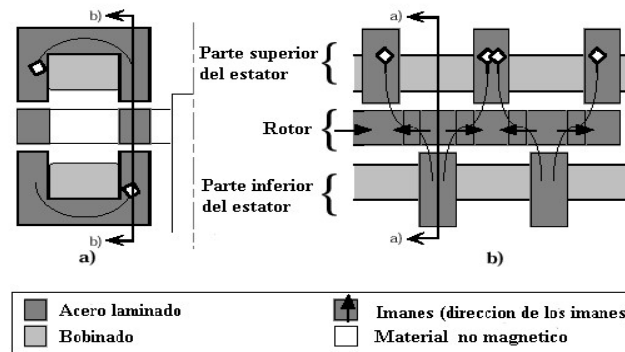


Fig.10. Generador de flujo tangencial. a) vista Tangencial y b) vista Radial

La máquina de flujo transversal también puede hacerse con un diapasón de polos muy pequeño comparado con los otros tipos. Estas diferencias hacen la máquina de flujo transversal capaz de producir una densidad de fuerza más alta en la distancia entre las bobinas y el estator que los otros tipos de máquinas [46]. Desgraciadamente, la estructura electromagnética es más compleja que para los generadores de tipo convencional que pueden hacer más cara su construcción. El desacoplamiento eléctrico y magnético de estas máquinas de flujo transversal es otra ventaja de estas máquinas, que aumentará la tolerancia a fallas [47] y aumentará la confiabilidad como generador.

Algunos de los problemas generales que se pueden encontrar en la mayoría de las máquinas de flujo transversal son la falta de utilización completa de los imanes permanentes en el circuito magnético activo de la máquina [48], alta fugas de flujo y bajo factor de potencia [49], estructura doblemente saliente de polos y alto par de *cogging* [50,51], la imposibilidad de utilizar laminaciones de acero eléctrico en algunas estructuras debido a la existencia de campo magnético tridimensional [52] y su compleja estructura. La tarea del diseñador es encontrar un compromiso entre la fuga de flujo y la densidad de torsión de la máquina.

Algunos de estos inconvenientes afectan a los costes de producción, y otros dificultan su justificación como aerogenerador. En las tres configuraciones presentadas según la construcción interna de los generadores de imanes permanentes, la de flujo transversal, no es posible la construcción del mismo en talleres de mínimas condiciones tecnológicas, a pesar de tener una densidad de flujo mayor y con ello más eficiencia, al tener su estructura electromagnética muy compleja, y se dificulta su construcción. Además, poseen un bajo factor de potencia que requeriría de un sistema para la compensación del mismo, también siendo un punto desfavorable un alto par de *cogging* por lo que no es recomendable para bajas velocidades del viento.

Por otro lado, se encuentran, las máquinas de flujo axial y radial, las cuales presentan mejores características, en cuanto a tamaño compacto, bajo mantenimiento, bajo nivel de ruido, bajo par de *cogging*, y facilidad de construcción. En consecuencia, con las necesidades específicas que se proponen en esta investigación, los generadores de imanes permanentes de flujo axial con respecto a los de flujo radial, son más adecuados para su desarrollo bajo las condiciones tecnológicas descritas al tener una ligeramente mayor eficiencia energética, pueden funcionar a velocidades de rotación más altas, lo que significa que pueden generar energía eléctrica incluso en condiciones de viento más bajas, menor peso, menor costo, los imanes pueden tener una forma rectangular que en el caso del de flujo radial tienen que ser arqueados, y debido a su estructura electromagnética son más fáciles de construir.

D. Comparación de los generadores eléctricos

En esta sección se presenta la tabla 1, donde se realiza un resumen de la comparación que comprende las ventajas y desventajas de los generadores eléctricos usados en los aerogeneradores de pequeño tamaño.

Tabla 1. Comparación de los diferentes tipos de pequeños generadores eléctricos para su uso en la energía eólica

	Ventajas	Desventajas
Generador de corriente directa	<ul style="list-style-type: none"> • No requieren control para obtener corriente directa 	<ul style="list-style-type: none"> • Requieren controlador electrónico complejo • Uso de escobillas, redundando en un alto mantenimiento. • Eficiencia energética baja
Generador de inducción de jaula de ardilla	<ul style="list-style-type: none"> • Baja complejidad del sistema de recolección de energía. • Reducción de los costos de puesta en marcha y operación debido a su componente barato, arrancador suave de bajo costo. • Operación estable al no utilizar convertidor de potencia. 	<ul style="list-style-type: none"> • Capacidad de recolección de energía eólica insuficiente debido a la escala de velocidad limitada (1%). • Las características de intermitencia de la velocidad del viento dan como resultado fluctuaciones en la frecuencia de la red. • Las perturbaciones de la red generan un alto estrés en sus subsistemas mecánicos.
Generador de inducción doblemente alimentado	<ul style="list-style-type: none"> • Rango límite de velocidad desde -30% a 30% de la velocidad sincrónica • Controlador de pequeña capacidad y menos costoso • La potencia activa y reactiva son controladas completamente 	<ul style="list-style-type: none"> • Necesidad del uso de anillos rozantes • Caja multiplicadora necesaria
Generador sincrónico de rotor bobinado	<ul style="list-style-type: none"> • Puede evitarse la caja multiplicadora • La potencia activa y reactiva son controladas completamente 	<ul style="list-style-type: none"> • Convertidores de potencia AC/DC/AC son necesarios. • Es necesarios muchos polos en caso de no tener caja multiplicadora
Generador imanes permanentes flujo axial	<ul style="list-style-type: none"> • Simple bobinado • Bajo par de <i>cogging</i> y ruido (en máquinas sin ranuras) • Pequeña longitud axial • Alta relación torque/volumen 	<ul style="list-style-type: none"> • Baja relación torque/masa • Diámetro exterior grande
Generador imanes permanentes flujo radial	<ul style="list-style-type: none"> • Alta relación torque/masa • Diámetro exterior pequeño • Poca cantidad de imanes permanentes 	<ul style="list-style-type: none"> • Dificultad del bobinado • Alto par de <i>cogging</i> y ruido (en máquinas sin ranuras) • Larga longitud axial • Baja relación torque/volumen
Generador imanes permanentes flujo transversal	<ul style="list-style-type: none"> • Mayor densidad de fuerza • Bajas pérdidas de cobre 	<ul style="list-style-type: none"> • Alto flujo de escape que trae un bajo factor de potencia • Proceso de fabricación complejo

E. Aerogeneradores comercialmente disponibles

En la tabla 2, se muestran siete aerogeneradores tomados al azar, sin inclinación a algún precio o modelo, que tiene valores de potencia desde 600 W hasta 3 kW, que están disponibles a la venta en internet.

Tabla 2. Características de generadores disponibles en el mercado

Aerogenerador	Potencia Nominal	Velocidad de arranque (viento)	Peso
Smarttwister ST-1000	1 kW	1,0 m/s	33,7 kg
Enair 30PRO	3 kW	2 m/s	125
Aeolos	0,6 kW	1,5 m/s	18 kg
Aeolos	1 kW	1,5 m/s	28 kg
WinPower FSV-1000	1 kW	2,5 m/s	45 kg
Swift (RenewableDevices, Scotland)	1,5 kW	2,3 m/s	-
Gusto2kW (Gusto Energy, New Zealand)	2 kW	3,5 m/s	-

En comparación con peso y velocidad de arranque, el aerogenerador Aeolos, de potencia de 1kW, se presenta como una alternativa muy viable para tener de referencia en la realización de un futuro diseño para su construcción en talleres de mínimas condiciones tecnológicas, y el cual puede servir como base para su implementación en lugares con bajas velocidades del viento.

CONCLUSIONES

Debido al hecho de que las máquinas de velocidad variable tienen una demanda que produce menor estrés mecánico y mayor captura de potencia, los generadores de inducción doblemente alimentados juegan un papel clave en el mercado actual en comparación con el resto de las turbinas eólicas de velocidad variable, los generadores de inducción doblemente alimentados tienen la ventaja de que solo el 30% de la energía generada pasa a través del convertidor, lo que conduce a una ventaja de reducción de costos razonable en comparación con el costo de convertidores de mayor potencia. La posibilidad de que ocurran fallas es mayor en los generadores de inducción doblemente alimentados debido a los grandes picos de corriente, y los generadores de inducción con jaula de ardilla sufren problemas con la corriente de arranque y estabilidad en la frecuencia.

Se encontró que los generadores de corriente directa tienen una eficiencia energética baja y requieren de un controlador electrónico complejo para su uso en las turbinas eólicas. Los generadores sincrónicos de rotor bobinado tienen una eficiencia energética alta y pueden funcionar a velocidades de rotación variables, pero su mantenimiento es costoso debido a la necesidad de reemplazar las escobillas del rotor. Tras la comparación y el análisis, en consideración de parámetros de eficiencia general, durabilidad, confiabilidad y disponibilidad en el mercado para su construcción, el generador de imanes permanentes en pequeñas turbinas eólicas sin la caja multiplicadora es el más adecuado.

Los generadores de flujo radial se consideran más económicos para aplicaciones de accionamiento directo de gran velocidad y ofrecen un mejor rendimiento, aunque las diferencias de rendimiento son mínimas. Mientras que los generadores de flujo axial, son más adecuados para aplicaciones de accionamiento directo a bajas velocidades. El proceso de construcción de los generadores de flujo axial en pequeñas industrias es relativamente simple, resultando en un diseño más compacto en comparación con el de flujo radial con un diseño cilíndrico más grande. Entre los generadores comercializados a nivel mundial, la firma Aeolos tiene aerogeneradores con excelentes características que distinguen para su utilización en zonas con bajas velocidades del viento.

REFERENCIAS

- [1]. Lazkano, I.; Nøstbakken, L.; Pelli, M. "From fossil fuels to renewables: The role of electricity storage". *Eur. Econ. Rev.* 2017, vol. 99, p. 113–129. Disponible en: <http://doi.org/10.1016/j.euroecorev.2017.03.013>
- [2]. Obeidat, F., "A comprehensive review of future photovoltaic systems," *Solar Energy*, 2018 vol. 163, p.545-551, ISSN:0038-092X. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0038092X18300719>
- [3]. Ruslan Tsgoev, Temirkhan Isaev, "Energy Efficiency of Wind Electrical Plant Models Localized in the Russian Federation on the Repeatability Function of Wind Speed", *2022 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM)*, 2022, p.176-180. Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9787268/>

- [4]. V. G. Petko, *et al*, "Improving the energy efficiency of wind turbines for charging batteries", *Agricultural Science Euro-North-East*, 2023, vol.24, n.2, p.317. Disponible en: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2023.24.2.317-326>
- [5]. Charabi, Y., Abdul-Wahab, S. "Wind turbine performance analysis for energy cost minimization". *Renewables*, 2020, vol. 7, p. 5. Disponible en: <https://doi.org/10.1186/s40807-020-00062-7>
- [6]. Mohsen Rahimi, "Improvement of energy conversion efficiency and damping of wind turbine response in grid connected DFIG based wind turbines", *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2018, vol. 95, p. 11-25, ISSN: 0142-0615. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2017.08.005>
- [7]. Bidaoui, H.; El Abbassi, I.; El Bouardi, A.; Moumen, D. "Wind Speed Data Analysis Using Weibull and Rayleigh Distribution Functions, Case Study: Five Cities Northern Morocco". *Procedia Manuf.* 2019, vol. 32, p. 786–793. Disponible en: <http://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.02.286>
- [8]. C.C. Pavel, *et al*, "Substitution strategies for reducing the use of rare earths in wind turbines", *Resour. Policy*, 2017, vol. 52, p. 349-357. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301420717300077>
- [9]. Song, J. Yang, *et al*, "Wind estimation with a non-standard extended Kalman filter and its application on maximum power extraction for variable speed wind turbines," *Appl. Energy*, 2017, vol. 190, p. 670–685, Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.12.132>
- [10]. Peng, X.; Liu, Z.; Jiang, D. "A review of multiphase energy conversion in wind power generation. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2021, vol. 147, p. 1–14. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032121004615>
- [11]. Zhiguo Zhang, *et al*, "Overview of the development and application of wind energy in New Zealand", *Energy and Built Environment*, 2022, p. 2666-1233. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.enbenv.2022.06.009>
- [12]. Madani, N. "Design of a permanent magnet synchronous generator for a vertical axis wind turbine". Master Thesis, KTH. 2011. Disponible en: <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:470652/fulltext01>
- [13]. Habyarimana, M.; Dorrell, D.G.; Musumpuka, R. "Reduction of Starting Current in Large Induction Motors". *Energies* 2022, vol. 15, p. 3848. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/en15103848>
- [14]. Liserre, M.; *et al*. "Overview of Multi-MW Wind Turbines and Wind Parks". *IEEE Trans. Ind. Electron.* 2011, vol. 58, p. 1081–1095. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1109/TIE.2010.2103910>
- [15]. Vázquez-Hernández, C.; Serrano-González, J.; Centeno, G. "A Market-Based Analysis on the Main Characteristics of Gearboxes Used in Onshore Wind Turbines". *Energies*, 2017, vol. 10, p. 1686. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/en10111686>
- [16]. J.-E. Camacho-Quintana, J.-E. Salamanca-Cespedes, and A.-P. Gallego-Torres, "Induction Generator Characterization for a Medium and Low Wind Power Generator", *Revista Facultad de Ingeniería*, 2020, vol. 29 (54), e10900. Disponible en: <https://doi.org/10.1905301211129.v29.n54.2020.10900>
- [17]. De Kooning, J.D.M.; *et al*. "Digital Twins for Wind Energy Conversion Systems: A Literature Review of Potential Modelling Techniques Focused on Model Fidelity and Computational Load". *Process.* 2021, vol. 9, p. 2224. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/pr9122224>
- [18]. Devadason, J.; Moses, P.S.; Masoum, M.A.S. "Stability Domain Analysis and Enhancement of Squirrel Cage Induction Generator Wind Turbines in Weak Grids". *Energies* 2021, vol. 14, p. 4786. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/en14164786>
- [19]. Ramkumar, M., and M. Ramasamy. "Enhancement of wind energy harvesting scheme over wide wind velocity using induction generator and variable speed drive." *Journal of the Chinese Institute of Engineers*, vol. 45, n. 4, 2022, p. 293-303. Disponible en: <https://doi.org/10.1080/02533839.2022.2053788>
- [20]. Y. Zou, "Induction Generator in Wind Power Systems", *Induction Motors - Applications, Control and Fault Diagnostics*. In Tech, Nov. 18, 2015. Disponible en: <https://doi.org/10.5772/60958>
- [21]. Khazdozian, H.A.; Hadimani, R.L.; Jiles, D.C. "Size Reduction of Permanent Magnet Generators for Wind Turbines with Higher Energy Density Permanent Magnets". In *Proceedings of the 2014 North American Power Symposium (NAPS)*, Pullman, WA, USA, 7–9 September 2014; p. 1–6. Disponible en: <https://doi.org/10.1109/NAPS.2014.6965439>
- [22]. Cardenas, R.; Pena, R.; Alepuz, S.; Asher, G. "Overview of Control Systems for the Operation of DFIGs in Wind Energy Applications. *IEEE Trans.* Ind. Electron. 2013, vol. 60, p. 2776–2798. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1109/TIE.2013.2243372>
- [23]. Domingos S.L. *et al*, "Advances in Renewable Energies and Power Technologies", Elsevier, 2018, p. 461-490, ISBN: 9780128129593, Disponible en: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812959-3.00015-0>
- [24]. Mwaniki, Julius, Hui Lin, and Zhiyong Dai. "A condensed introduction to the doubly fed induction generator wind energy conversion systems." *Journal of Engineering* 2017. Disponible en: <https://doi.org/10.1155/2017/2918281>
- [25]. Ihedrane, Yasmine, *et al*. "Control of power of a DFIG generator with MPPT technique for wind turbines variable speed." *Modeling, Identification and Control Methods in Renewable Energy Systems*, 2019, p. 105-129. Disponible en: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-981-13-1945-7_5
- [26]. Bhutto, Darya Khan, *et al*. "Wind energy conversion systems (WECS) generators: A review." 2019 2nd international conference on computing, mathematics and engineering technologies (iCoMET). IEEE, 2019. Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8673429>

- [27]. Zhang, W.; *et al.* “Analysis of DC Winding Induced Voltage in Wound-Rotor Synchronous Machines by Using the Air-Gap Field Modulation Principle”. *World Electr. Veh. J.* 2022, vol. 13, p. 215. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/wevj13110215>
- [28]. Behrooz Zaker, Abolfazl Khodadadi, Mehdi Karrari, “A new approach to parameter identification of generation unit equipped with brushless exciter using estimated field voltage”, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2022, vol.141, p. 108122, ISSN: 0142-0615, Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2022.108122>
- [29]. Zhang, W.; *et al.* “Analysis of DC Winding Induced Voltage in Wound-Field Flux-Switching Machine With Air-Gap Field Modulation Principle”. *IEEE Trans. Ind. Electron.* 2021, vol. 69, p. 2300–2311. Disponible en: <https://doi.org/10.1109/TIE.2021.3068684>
- [30]. Fallows, D.; Nuzzo, S.; Galea, M. “Exciterless Wound-Field Medium-Power Synchronous Machines: Their History and Future”. *IEEE Ind. Electron. Mag.* 2021. Disponible en: <https://doi.org/10.1109/MIE.2021.3093024>
- [31]. Wu, Z.Z.; *et al.* “Reduction of Open-Circuit DC-Winding-Induced Voltage in Wound Field Switched Flux Machines by Skewing”. *IEEE Trans. Ind. Electron.* 2018, vol. 66, p. 1715–1726. Disponible en: <https://doi.org/10.1109/TIE.2018.2838106>
- [32]. Hussain, A.; *et al.* “Wound Rotor Synchronous Motor as Promising Solution for Traction Applications”. *Electronics* 2022, vol. 11, p. 4116. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/electronics11244116>
- [33]. Di Gioia, *et al.*, "Design and Demonstration of a Wound Field Synchronous Machine for Electric Vehicle Traction With Brushless Capacitive Field Excitation," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, 2018, vol. 54, n. 2, p.1390-1403. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1109/TIA.2017.2784799>
- [34]. M. Abdelrahem, C. Hackl, R. Kennel, “Robust predictive control scheme for permanent-magnet synchronous generators based modern wind turbines”, *Electronics*, 2021, vol. 13 p. 1596. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/electronics10131596>
- [35]. W. Wang, *et al.*, “Sensitivity analysis and optimal design of a stator coreless axial flux permanent magnet synchronous generator”, *Sustainability*, 2019, vol. 15, p. 1414-1432 Disponible en: <https://doi.org/10.3390/su11051414>
- [36]. G. Mohan Krishna, A Prasada Rao, “Performance of multiple wind turbines interfacing PWM current source-based DC transmission”, *Int. J. Eng. Res.*, 2017, vol. 6. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.17577/IJERTV6IS070098>
- [37]. Economics, T. “Neodymium”. *Trading Economics*. 2021. Disponible en: <https://tradingeconomics.com/commodity/neodymium>
- [38]. Reza Yazdanpanah, *et al.*, “Analytical design of a radial-flux PM generator for direct-drive wind turbine renewable energy application”, *Energy Reports*, 2022, vol. 8, p. 3011-3017, ISSN: 2352-4847, Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352484722001214>
- [39]. Abdeljalil D, *et al.* “Design and optimization of permanent magnet synchronous generator dedicated to direct-drive, high power wind turbine”. *Wind Engineering*. 2022, vol. 46, p. 737-758. Disponible en: <https://doi.org/10.1177/0309524X211046379>
- [40]. Dehshiri, M, Ketabi, A. “A coreless axial flux-switching generator for micro-wind turbine application”. *Energy Sci Eng.* 2022; vol.10, p. 4804- 4813. Disponible en: <https://doi.org/10.1002/ese3.1309>
- [41]. Habib, A., *et al.* A systematic review on current research and developments on coreless axial-flux permanent-magnet machines”. *IET Electr. Power Appl.* 2022, vol. 16, p. 1095– 1116. Disponible en: <https://doi.org/10.1049/elp2.12218>
- [42]. Wu, Danqiet *al.* “Axial-Flux Permanent-Magnet Synchronous Generator with Coreless Armature and Non-Integral Coil-Pole Ratio”. *IET Renewable Power Generation*, 2019. Disponible en: <https://doi.org/10.1049/iet-rpg.2018.5311>
- [43]. Sitheswaran, Bhuvanewari *et al.* “Performance Analysis of Radial Flux and Axial Flux Permanent Magnet Generators for Low-Speed Wind Turbine Applications”. 1 Jan. 2021, p. 129 – 147. Disponible en: <https://content.iospress.com/articles/international-journal-of-applied-electromagnetics-and-mechanics/jae190150>
- [44]. M. R. Faqih, S. Sutedjo and E. Wahjono, "Design and Fabrication of a Radial Flux Permanent Magnet Synchronous Generator," 2019 International Electronics Symposium (IES), Surabaya, Indonesia, 2019, p. 644-649, Disponible en: <https://doi.org/10.1109/ELECSYM.2019.8901620>
- [45]. AghilGhaheeri, Ebrahim Afjei, Hossein Torkaman, “Design optimization of a novel linear transverse flux switching permanent magnet generator for direct drive wave energy conversion”, *Renewable Energy*, 2022, vol. 198, p. 851-860, ISSN: 0960-1481, Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148122012241>
- [46]. Husain, T., *et al.* “Design of a modular E-core flux concentrating transverse flux machine”. *IEEE Trans. Ind. Appl.* 2018, vol. 54, p. 2115–2128. Disponible en: <https://doi.org/10.1109/tia.2018.2794376>
- [47]. El-Refaie, A.M. “Fault-tolerant permanent magnet machines: a review”. *IET Electr. Power Appl.* 2011, vol. 5, p. 59–74. Disponible en: <https://doi.org/10.1049/iet-epa.2009.0117>
- [48]. Pourmoosa, A.A., Mirsalim, M. “A transverse flux generator with a single row of permanent magnets: analytical design and performance evaluation”. *IEEE Trans. Ind. Electron.* 2019, vol. 66, p. 152–161. Disponible en: <https://doi.org/10.1109/tie.2018.2831179>

- [49]. Anglada, J.R., Sharkh, S.M. “An insight into torque production and power factor in transverse-flux machines”. IEEE Trans. Ind. Appl. 2017, vol. 53, p. 1971–1977. Disponible en: <https://doi.org/10.1109/tia.2017.2665344>
- [50]. Ueda, Y., Takahashi, H. “Transverse-flux motor design with skewed and unequally distributed armature cores for reducing cogging torque”. IEEE Trans. Magn. 2017, vol. 53, n. 11, p. 1–5. Disponible en: <https://doi.org/10.1109/tmag.2017.2703087>
- [51]. Husain, T., *et al.* “Cogging torque minimization in transverse flux machines”. IEEE Trans. Ind. Appl. 2019, vol. 55, p. 385–397. Disponible en: <https://doi.org/10.1109/tia.2018.2868541>
- [52]. Liu, C., *et al.* “Design considerations of PM transverse flux machines with soft magnetic composite cores”. IEEE Trans. Appl. Supercond. 2016, vol. 26, p. 1–5. Disponible en: <https://doi.org/10.1109/tasc.2016.2531982>

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES:

Alejandro Pérez Herrera: <https://orcid.org/0009-0006-5424-4221>

Desarrollo del estudio, estudio de la bibliografía, diseño del artículo, redacción del texto del artículo, análisis de los resultados, revisión crítica del contenido y aprobación final.

Hector Eugenio Baracaldo Alba: <https://orcid.org/0000-0002-9117-7965>

Desarrollo del estudio, estudio de la bibliografía, redacción del texto del artículo, análisis de los resultados, revisión crítica del contenido y aprobación final.

Sergio Lazar Jauregui Rigo: <https://orcid.org/0000-0001-7637-2781>

Participó en el análisis de los resultados, redacción del borrador del artículo, la revisión crítica de su contenido y en la aprobación final.

Ernesto Yoel Fariñas Wong: <https://orcid.org/0000-0002-8798-0114>

Participó en el análisis de los resultados, redacción del borrador del artículo, la revisión crítica de su contenido y en la aprobación final.