

UCLV
Universidad Central
"Marta Abreu" de Las Villas



FIE
Facultad de
Ingeniería Eléctrica

Departamento de Electroenergética

TRABAJO DE DIPLOMA

Título del trabajo: **Diseño de un generador de imanes permanentes de 1,5 kW, para su aplicación en micro turbinas eólicas en emplazamientos urbanos**

Autor del trabajo: Alejandro Quintana Valdés

Tutores del trabajo: Ing. Alejandro Pérez Herrera

M. Sc. Alberto Andrés Limonte Ruiz

Junio 2019

Santa Clara
Copyright©UCLV

Este documento es Propiedad Patrimonial de la Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, y se encuentra depositado en los fondos de la Biblioteca Universitaria “Chiqui Gómez Lubian” subordinada a la Dirección de Información Científico Técnica de la mencionada casa de altos estudios.

Se autoriza su utilización bajo la licencia siguiente:

Atribución- No Comercial- Compartir Igual



Para cualquier información contacte con:

Dirección de Información Científico Técnica. Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas. Carretera a Camajuaní. Km 5½. Santa Clara. Villa Clara. Cuba. CP. 54 830

Teléfonos.: +53 01 42281503-1419

RESUMEN

En este proyecto se describe el proceso de diseño de un generador síncrono de imanes permanentes de 1,5 kW para su instalación en zonas urbanas de altas turbulencias y bajas velocidades del viento. El generador se ha proyectado para ser implementado en microturbinas eólicas de eje vertical, transmitiendo el movimiento de las palas directamente al rotor sin la necesidad de mecanismos de engranajes, evitando de esta manera las pérdidas mecánicas y su mantenimiento. La característica principal de este generador es su campo magnético constante, el cual se genera debido a sus imanes permanentes de neodimio ubicados en el rotor, estos proporcionan un flujo magnético elevado.

Palabras Clave: generador, imanes permanentes, campo magnético constante.

ÍNDICE

RESUMEN	3
ÍNDICE	4
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO	4
1.1 Introducción.....	4
1.2 Antecedentes de energía eólica.....	4
1.2.1 Recurso eólico en Latinoamérica	6
1.2.2 Potencial eólico cubano	8
1.2.3 Distribución de la matriz energética cubana.....	10
1.2.4 Parques eólicos en funcionamiento y proyecciones.....	12
1.3 Componentes del aerogenerador de pequeña potencia.....	13
1.4 Clasificación de los generadores	16
1.4.1 Según la posición de los ejes de la turbina.....	16
1.4.2 Según la velocidad:.....	18
1.4.3 Según el generador	18
1.5 Tipos de imanes permanentes.....	19
1.6 Tipos de aerogeneradores de imanes permanentes	20
1.7 Ubicación de los aerogeneradores en la red.....	21
1.8 Conclusiones parciales	22
CAPÍTULO 2. DISEÑO DE UN GENERADOR SINCRÓNICO DE IMANES PERMANENTES.	24
2.1 Elementos que afectan el diseño.....	24
2.1.1 Elementos económicos.	24
2.1.2 Materiales	24
2.1.3 Especificaciones	25
2.1.4 Factores especiales.....	25

2.2	Áreas que involucra el diseño de una máquina eléctrica	25
2.2.1	Eléctrica.....	25
2.2.2	Magnéticas.....	25
2.2.3	Dieléctricas.....	25
2.2.4	Térmicas.....	26
2.2.5	Mecánicas.....	26
2.3	Devanados	26
2.3.1	Devanado distribuido.....	26
2.3.2	Devanado concentrado.....	27
2.4	Configuraciones de los imanes permanentes	27
2.4.1	Imanes de montaje superficial.....	28
2.4.2	Imanes de inserción.....	28
2.4.3	Imanes enterrados.....	28
2.5	Comportamiento térmico	29
2.5.1	Consecuencias del aumento de la temperatura.....	29
2.5.2	Teoría de la transferencia de calor.....	30
2.6	Pérdidas en el generador de imanes permanentes	31
2.7	Diseño del Generador sincrónico de imanes permanentes	34
2.7.2	Ventajas.....	35
2.7.3	Principales características del diseño.....	35
2.7.4	Parámetros principales del PMSG.....	36
2.7.5	Cálculo del número de polos.....	36
2.7.6	Imán permanente.....	36
2.7.7	Determinación de las dimensiones básicas de la máquina.....	37
2.7.8	Cálculo del devanado eléctrico y especificación del cable.....	39
2.7.9	Cálculo del voltaje inducido sin carga.....	40
2.7.10	Cálculo de la impedancia de fase.....	41
2.7.11	Cálculo del voltaje a plena carga.....	42
2.7.12	Cálculo de la regulación de voltaje, pérdidas y eficiencia.....	42

2.8 Conclusiones parciales	43
CONCLUSIONES	44
RECOMENDACIONES.....	45
BIBLIOGRAFÍA	46
ANEXOS	48

INTRODUCCIÓN

En la actual situación global, tanto medioambiental como económica, es evidente que se necesitan cambios decisivos en la forma en que tratamos nuestro planeta e interactuamos con él. En lugar de insistir en los problemas del pasado, es conveniente proponer soluciones para futuro, el presente trabajo crea una comprensión de una probada alternativa a la producción de energía que no requiere combustibles fósiles. Aunque un aerogenerador no es capaz de producir a la misma escala que una turbina de vapor en una termoeléctrica, es una tecnología que alarga la vida de los combustibles fósiles.

La energía eólica, como una forma de energía limpia y renovable, es esencial si se desea detener el cambio climático. La generación de energía eléctrica, sin la existencia de procesos de combustión o transformación térmica, proporcionan al medio ambiente un impacto favorable, al no existir problemas de contaminación, originados por los combustibles durante su extracción, transformación, transporte y quema, lo que beneficia la atmósfera, el agua, el suelo, la flora, la fauna, etc.

En las últimas décadas hemos asistido a un desarrollo vertiginoso de grandes instalaciones eólicas conectadas a la red eléctrica convencional, denominadas comúnmente parques eólicos, e incluso hoy en día se trabaja con gran ahínco en la implantación de instalaciones similares, pero en el mar [1]. No obstante, a pesar de este importante desarrollo en la tecnología de generación eléctrica a partir del viento a gran escala, existe otro rango de aplicación a una menor escala que es lo que se suele denominar micro eólica o tecnología eólica de pequeña potencia.

En la norma IEC 61400-2 [2] para el diseño de aerogeneradores de pequeña potencia se presenta una categorización de los rangos comerciales de pequeños aerogeneradores en función de la potencia nominal, desde unos pocos vatios hasta los 100 kW. Los valores que definen los rangos en esta categorización han sido elegidos a partir de las normas que rigen a la subcategoría micro eólica para la cual el valor del área de barrido del rotor de 40 m² fue el límite establecido en la primera edición del estándar IEC-61400-2, donde la potencia nominal va desde 1kW hasta 7kW y es el rango que se prevé actualmente para integración en entorno urbano; el límite de 200 m² fue el establecido en la segunda edición del mencionado estándar en 2006, que incluye aerogeneradores desde 7kW hasta 50kW, e incluye la mayor parte de aplicaciones de mini eólica. El límite de 100 kW, se define con un área de barrido menor a los 300 m² y no tiene definida una subcategoría. Finalmente, el rango de pico eólica se acepta para aerogeneradores de menos de 1 kW.

La energía renovable basada en pequeña escala o sistemas de micro generación están siendo utilizados en diferentes países para la producción de electricidad como sistemas de aerogeneradores montados sobre edificios, paneles solares y mini centrales hidroeléctricas

[3]. En áreas rurales y urbanas de Cuba, la energía solar e hidráulica basada en sistemas de micro generación está utilizándose para superar el déficit de electricidad, sin embargo, la producción de electricidad en micro sistemas de generación basada en el viento todavía se encuentra en sus fases tempranas.

Varias investigaciones se han llevado a cabo en el mundo, especialmente en Europa donde diferentes proyectos de pequeña escala de energía eólica se han instalado en los edificios [4] [5]. Diferentes tipos de turbinas eólicas están siendo usadas en emplazamientos urbanos como son turbinas eólicas en ductos [6] y turbinas eólicas en tejados de un edificio existente [7]. Las condiciones de generación de energía eólica en entornos urbanos son más complejas que en zonas abiertas, o en las cimas de las montañas, ya que la velocidad del viento es más baja y su flujo más turbulento.

Actualmente, la mayoría de los imanes son hechos de neodimio (Nd), contribuyendo a la economía de los materiales. Estos imanes pueden proporcionar muy alto flujo magnético para los nuevos diseños de generadores [8]. En términos de conversión de energía electromecánica, las máquinas de imanes permanentes tienen ciertas ventajas para varias aplicaciones industriales.

Principalmente, los imanes de Nd-Fe-B pueden ser usados en la optimización de máquinas. Los factores, que juegan un papel en la optimización, pueden agruparse en varias clases: la determinación de parámetros, la minimización de pérdidas y el uso de volúmenes de la máquina [8] [9].

Entre las principales tendencias en desarrollo e investigación de los generadores eléctricos en la tecnología micro eólica se encuentra desarrollar generadores con reducido par de rizado estático (cogging), y por otro lado desarrollar generadores con un par alto a velocidad de rotación nominal [6]. Otras características que también se busca en los generadores utilizados para aerogeneradores de pequeña potencia son una alta eficiencia, bajo coste, alta fiabilidad, larga vida útil, bajo o sin mantenimiento, baja emisión de ruido acústico y sobre todo facilidad para alcanzar grandes volúmenes de fabricación.

Cambiar la matriz energética y avanzar en el uso de fuentes renovables de energía es un objetivo declarado del Estado Cubano. En el plan de desarrollo para el 2030 [10], se aspira alcanzar el 24 % de participación de las fuentes renovables de energía en la producción de electricidad, que actualmente es apenas poco más de un 9%.

La problemática de la generación de electricidad en Cuba, adquiere una importancia científico-técnica y económica significativa, dada las necesidades de producción de este tipo de energía y las condiciones en que se acomete la misma en la etapa actual. Como resultado de una línea de desarrollo orientada con bases científicas a partir de estudios realizados en varios centros de investigación de países desarrollados, dan como resultado un trabajo de desarrollo de generadores a partir de imanes permanentes que tendrá una ineludible repercusión social, ya que el desarrollo de estos equipos además de poseer un variado uso industrial están vinculados al Programa Nacional de Ciencia y Técnica, donde el

Partido Comunista de Cuba y los organismos de la Administración Central del Estado centran todo su esfuerzo.

Esta investigación, es un esfuerzo en los estudios dirigidos a la generación de energía eléctrica a través del viento en la UCLV, para así lograr las oportunidades de continuar con la línea de investigación y mejora de los sistemas de producción de energía con el propósito de reducir al máximo el riesgo de contaminación al medio ambiente en general.

En este sentido, basado en lo expuesto anteriormente, puede plantearse como **problema de investigación** de este trabajo: La insuficiente disponibilidad de micro turbinas eólicas en Cuba contribuye a que se desaproveche el recurso energético disponible, mientras que las turbinas comercialmente disponibles son importadas para sectores específicos, situación que puede cambiar a partir del desarrollo de generadores de imanes permanentes para sitios de altas turbulencias y bajas velocidades del viento.

Como **objetivo general** de esta investigación se plantea: Realizar el diseño de un generador de imanes permanentes de 1,5 kW, para micro turbinas eólicas instaladas en emplazamientos de alta turbulencia y baja velocidad del viento; para lo cual se proponen los siguientes **objetivos específicos**:

- Realizar el estudio bibliográfico para el diseño de los generadores de imanes permanentes de baja potencia accionados con energía eólica para vientos de alta turbulencia y bajas velocidades.
- Diseñar un generador de imanes permanentes de 1,5 kW para pequeñas turbinas eólicas que serán instaladas en emplazamientos de alta turbulencia y baja velocidad del viento.

CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO

1.1 Introducción

La energía eólica se considera una forma indirecta de energía solar. Entre el 1 y 2% de la energía proveniente del Sol se convierte en energía cinética dando origen al viento, esto por el calentamiento desigual del aire en distintas regiones, calentamiento que provoca una variación en la densidad del mismo y por tanto diferencias en la presión ejercida por la masa de aire en la superficie terrestre. Luego, son estas diferencias de presión las que producen los movimientos de grandes masas de aire, que son finalmente el viento que nosotros percibimos en la superficie. La energía cinética de estas masas de aire, el viento, puede transformarse en energía mecánica útil.

Una de las características de este recurso es su condición aleatoria y variable, por cuanto, depende de condiciones atmosféricas que no pueden ser controladas ni modificadas. Esto lleva a que se requieran exhaustivas mediciones como condición previa para el desarrollo de proyectos destinados a su aprovechamiento

La energía eólica, transformada en energía mecánica ha sido históricamente aprovechada, pero su uso para la generación de energía eléctrica es más reciente, existiendo aplicaciones de mayor escala sólo desde mediados de la década del 70, en respuesta a la crisis del petróleo y a los impactos ambientales derivados del uso de combustibles fósiles [11] .

La generación de energía eléctrica a partir de la eólica se lleva a cabo a través de un aerogenerador, este consiste en una máquina rotatoria que capta la energía cinética del viento mediante sus palas y rotor y la transforma en energía eléctrica de acuerdo al principio de inducción electromagnética.

1.2 Antecedentes de energía eólica

La energía eólica no es algo nuevo, es una de las energías más antiguas junto a la energía térmica. El viento como fuerza motriz existe desde la antigüedad y en todos los tiempos ha sido utilizado como tal. Así, ha movido a barcos impulsados por velas o ha hecho funcionar la maquinaria de los molinos al mover sus aspas. Pero, fue a partir de los ochenta del siglo pasado, cuando este tipo de energía limpia sufrió un verdadero impulso. La energía eólica crece de forma imparable a partir del siglo XXI. [12]

La referencia más antigua que se tiene es un molino de viento que fue usado para hacer funcionar un órgano en el siglo I. [13]. Los primeros molinos de uso práctico fueron construidos en Sistán, Afganistán, en el siglo VII. Estos fueron molinos de eje vertical con hojas rectangulares. Aparatos hechos de 6 a 8 velas de molino cubiertos con telas fueron usados para moler trigo o extraer agua[14]

En Europa los primeros molinos aparecieron en el siglo XII en Francia e Inglaterra y se distribuyeron por el continente. Eran unas estructuras de madera, conocidas como torres de molino, que se hacían girar a mano alrededor de un poste central para levantar sus aspas al viento. El molino de torre se desarrolló en Francia a lo largo del siglo XIV. Consistía en una torre de piedra coronada por una estructura rotativa de madera que soportaba el eje del molino y la maquinaria superior del mismo. De la parte superior del molino sobresalía un eje horizontal. De este eje partían de cuatro a ocho aspas, con una longitud entre 3 y 9 metros. Las vigas de madera se cubrían con telas o planchas de madera. La energía generada por el giro del eje se transmitía, a través de un sistema de engranajes a la maquinaria del molino emplazada en la base de la estructura. Los molinos de eje horizontal fueron usados extensamente en Europa Occidental para moler trigo desde la década de 1180 en adelante [15].

Charles Francis Brush, nació en Euclid Township, Ohio. Este ingeniero americano inventó la que se piensa es la primera turbina eólica de funcionamiento automático para generación de electricidad, aunque la turbina eólica construida por el danés Poul, en 1891, es en la que se han basado para la construcción de turbinas eólicas como las conocemos en la actualidad. Fue en el invierno de 1887 cuando Charles construyó su turbina. El diámetro del rotor era de 17 m y tenía 144 palas fabricadas en madera de cedro. Funcionó durante 20 años y cargaba las baterías que Charles tenía en el sótano de su mansión. La potencia que podía generar, era de 12 kW. En los años 50's, el constructor alemán Allgainer fabricó los primeros aerogeneradores producidos en masa, utilizados en Alemania en la construcción de sus primeros parques eólicos.

Estos aerogeneradores podían generar 10 kW en las regiones costeras y en el interior del país, eran utilizados aerogeneradores de 6 kW de potencia. El diámetro de los rotores de éstas turbinas era de 10 m. Tenían un sistema tal, que las aspas que componen al rotor podían girar en torno de su eje, de esta manera, las variaciones en el ángulo de las aspas en relación al viento incidente, permitía al aerogenerador regular la potencia extraída del viento. Algunas de estas turbinas operaron hasta la década de los 90's. El constructor danés Gedser, construyó en 1957, un aerogenerador de 200 kW de potencia. El concepto utilizado fue el de una máquina horizontal, con un rotor compuesto por 3 aspas posicionado al frente de la torre, conectado a una red eléctrica de corriente alterna trifásica. A partir de este concepto fueron desarrollados una gran variedad de conceptos, principalmente en Dinamarca y Alemania. En la década de los 60's, el bajo costo de los combustibles fósiles, principalmente el petróleo, hizo a las turbinas eólicas una fuente de generación de energía eléctrica infactible. Las grandes crisis de abastecimiento de energía, principalmente la Segunda Guerra Mundial y la crisis del petróleo en 1973 y 1979, respectivamente, impulsaron el desarrollo de las turbinas eólicas. Alemania, Dinamarca y Estados Unidos de América, realizaron grandes esfuerzos para desarrollar tecnologías que permitieran la construcción de turbinas eólicas de mayor potencia, para aumentar el suministro de energía eléctrica hacia la red eléctrica proveniente de la energía eólica. Las tecnologías de energía eólica crecieron rápidamente en nuevas dimensiones. Para el final de 1989, se tenía turbinas eólicas de 300 kW con un rotor de 30 m de diámetro. Solo 10 años después, turbinas eólicas de 2000 kW con un rotor de 80 m de diámetro, estaban disponibles por algunos

constructores. La energía eólica fue la tecnología que creció más rápidamente durante la década de los 90's. A inicios de esta década, las turbinas eólicas estandarizadas operaban con velocidad fija, esto implica, que las turbinas están acopladas a generadores de inducción de jaula de ardilla (GIJA) conectadas directamente a la red. A partir de 1993 algunos fabricantes reemplazaron el "tradicional" generador síncrono en sus aerogeneradores, introduciendo generadores síncronos de imanes permanentes y generadores asíncronos de rotor bobinado. El desarrollo de la tecnología y el uso avanzado de electrónica de potencia en el diseño de los sistemas de generación eólicos, introdujeron un nuevo concepto de control, llamado aerogeneradores o turbinas eólicas de velocidad variable. (Ing. Cesar Heberto Ochoa Ruiz, Modelado de la generación eólica para estudios en redes eléctricas)

1.2.1 Recurso eólico en Latinoamérica

La energía eólica tiene un enorme potencial en América Latina. Con su relativamente baja densidad de población, grandes distancias y necesidades de energía en lugares remotos, América Latina ofrece un entorno ideal para aprovechar la energía del viento.

Las necesidades de energía en lugares con mucho viento, pero aisladas o remotas, como las islas del Caribe, las montañas y mesetas de los Andes y las cordilleras de Mesoamérica, así como las vastas sabanas de la región (llanos, cerrado, Chaco y pampas), se pueden atender más eficientemente por medio de turbinas eólicas que con cualquier otra alternativa. La energía eólica es más fácil de adaptar a gran escala que la energía solar: en comparación con los paneles solares o concentradores solares, las turbinas eólicas generan más electricidad con respecto al área que ocupan, y esta diferencia es cada vez mayor, a medida que los aerogeneradores aumentan de tamaño y eficiencia. Por lo tanto, la energía eólica puede ser una tecnología más apropiada en zonas aisladas con necesidades energéticas importantes. Si se planifican con cuidado, las instalaciones de turbinas eólicas tienen poco efecto adverso sobre los ecosistemas, y en los grandes espacios deshabitados de la región, pueden tener escasos o nulos impactos estéticos y de sonido. La energía eólica complementa muy bien las redes eléctricas de la región, en las que predomina la generación hidroeléctrica, ya que la generación hidroeléctrica puede responder fácilmente a la intermitencia de los vientos, en contraste con la generación térmica, que es mucho menos flexible en general; y, al menos en algunas partes de la región, los vientos son más fuertes durante la estación seca, precisamente cuando la generación hidroeléctrica es más limitada.

Por último, la condición relativamente accesible de la tecnología eólica significa que puede ser fabricada en la región, a diferencia de otros tipos de tecnologías energéticas. Brasil, por ejemplo, exige el uso de materias primas locales y la fabricación local de instalaciones de energía eólica, y uno de los principales fabricantes de la región es una empresa argentina, IMPSA.

Varias zonas de la región están utilizando cada vez más la energía eólica. El Caribe, de hecho, tiene una larga historia de uso de la energía eólica; muchos molinos de caña de azúcar en las islas fueron accionados por molinos de viento antes de la llegada de las máquinas de vapor de alta eficiencia que podían usar el bagazo de la caña como combustible. Pero con el retroceso de la industria azucarera del Caribe en las últimas décadas, desplazada por los productores altamente competitivos de Brasil y otros países, la

zona enfrenta altos costos de la energía, ya que el archipiélago (a excepción de Trinidad) carece de recursos energéticos tradicionales. Por ello, no es sorprendente que la explotación de los poderosos y constantes vientos alisios se haya convertido una vez más en una propuesta muy atractiva para el Caribe, con un fuerte crecimiento en Jamaica, República Dominicana y Aruba.

México es, después de Brasil, el segundo mayor mercado para la energía eólica en América Latina, sobre todo en la parte sur del país, donde las condiciones del viento son más favorables. Costa Rica, con un fuerte compromiso con las energías renovables, ha instalado el mayor número de turbinas de energía eólica en América Central, seguida de cerca por Honduras. En el Cono Sur, Chile y Argentina están invirtiendo fuertemente en energía eólica, y se espera que ambos países superen a México en cuanto a potencia total instalada en los próximos diez años. Por último, varios nuevos proyectos también están tomando forma en el Perú y Uruguay.

No obstante, la energía eólica sigue siendo un recurso relativamente poco explotado en la región, especialmente en relación con su enorme potencial. Para que este potencial se haga realidad, la política energética tiene que superar la mentalidad que ha dominado el sector en toda su historia en América Latina y el Caribe: la obsesión por la generación hidroeléctrica.

A pesar de los crecientes costos de construcción de grandes represas en lugares cada vez más remotos, de más protestas de las comunidades indígenas afectadas por la construcción de estas represas, y del creciente conocimiento de los costos ambientales de este tipo de instalaciones, muchos gobiernos de la región siguen convencidos de que el aprovechamiento del potencial hidroeléctrico restante es el mejor camino a seguir, y están gastando grandes sumas de dinero en proyectos como el complejo del Río Madeira en Brasil. Esta mentalidad retrógrada también afecta el funcionamiento de las redes nacionales de la región, acostumbrado a la predictibilidad de la generación basada en represas con grandes embalses de agua, en contraposición a la mayor intermitencia a corto plazo de la energía eólica cuando se considera cada instalación por separado—y todo ello a pesar de la realidad del cambio climático, que está alterando los patrones hidrológicos y haciendo que la generación hidroeléctrica sea también menos predecible.

Muchos países de América Latina, después de haber reestructurado sus sectores de electricidad para dar un papel más destacado a la propiedad privada de las instalaciones de generación, también se enfrentan al reto de atraer inversión privada en energía eólica. Las instalaciones de energía eólica se enfrentan a un tipo diferente de riesgo que las tecnologías con una trayectoria más larga. En lugar de los riesgos hidrológicos o la volatilidad de los precios de los combustibles, la energía eólica depende de un recurso, el viento, que es menos conocido en toda la región, y que sigue sus propios patrones. Tal incertidumbre disuade a los inversores privados. Así pues, es necesario desarrollar políticas innovadoras para superar la reticencia de los inversores, tal vez siguiendo el modelo de las empleadas con éxito en Europa, que ofrecen un precio fijo por cada unidad de energía generada.

Aunque los impactos ambientales y sociales son más leves que los de las grandes represas, las ubicaciones idóneas para los parques eólicos pueden encontrarse en tierras indígenas, o

las líneas de transmisión pueden tener que cruzar estas tierras u otras áreas ambientalmente sensibles. Algunos proyectos eólicos en México y en otros lugares ya han experimentado reveses debido a la oposición local. Estos proyectos no son diferentes de otros tipos de extracción de recursos, y como tales requieren la consulta y el consentimiento previo de las comunidades afectadas, lo que a su vez puede implicar la necesidad de compartir algunos de sus beneficios con estas comunidades. Los responsables políticos, promotores privados y financiadores deben ser conscientes de este contexto más amplio y desarrollar protocolos y normas adecuadas para involucrar a estos factores a satisfacción de todos.

En resumen, la energía eólica puede y debe desempeñar un papel importante en el futuro de la energía en América Latina. Corresponde a los responsables políticos y al sector privado hacer de este potencial una realidad. [16]

A continuación, se presenta un listado de países de América Latina que van a la cabeza en la región en la implementación de la energía eólica:

Brasil, el mayor mercado latinoamericano, instaló 1.1 GW en el primer semestre del 2016 y alcanzó una capacidad total de 9.810 MW, con una tasa de crecimiento de 12.5 por ciento.

La capacidad total de Chile en el 2015 fue de 933 MW. En el 2016, se contabilizan un total de 29 parques eólicos en el país. Estos datos ubican al país en la tercera posición en América Latina en producción de energía eólica.

Uruguay es un país sin recursos petroleros y escasos recursos hídricos, por lo que la fuerza de los vientos apareció como la solución para responder a la demanda energética de la nación. En la actualidad cuenta con 38 parques que generan casi 900 MW. En el 2017, el país contaba con 1,450 MW de potencia instalada y 42% de participación en la generación de electricidad total en el país.

Argentina es el tercer mercado energético de América Latina, pero uno de los más atrasados en la provisión eléctrica obtenida de fuentes amigables con el ambiente.

Costa Rica ocupa el lugar 48 de la lista GWEC de países con mayor potencia eólica total instalada (MW), el primero en Centroamérica y la quinta posición en América Latina. La generación de energía eólica pasó del 4.25% en el 2011, al 10% en el 2016 del total de participación en la matriz eléctrica nacional, y es la tercera fuente después de la energía hidráulica y la geotérmica.

1.2.2 Potencial eólico cubano

Para la implementación del uso de la energía eólica, es una prioridad la evaluación del recurso eólico en el país, con la finalidad de conocer el potencial en este recurso, así como los posibles sitios en los cuales es factible el emplazamiento de parques eólicos a mediana y gran escala que puedan tributar al Sistema Electroenergético Nacional (SEN).

Para elaborar el Mapa del Potencial Eólico se creó una base de datos del viento, con la participación de personal técnico y especializado del Instituto de Meteorología y sus dependencias provinciales, y el apoyo en personal y en recursos de los Joven Club de

Computación del país. Esta base contiene los registros trihorarios de velocidad y dirección del viento medido a 10 m de altura en 68 estaciones meteorológicas.

El Mapa del Potencial Eólico de Cuba permite identificar 26 zonas geográficas que revelan potenciales eólicos acordes con las clases 4 (Moderado, M), 5 (Bueno, B), 6 (Excelente, E) y 7 (Excepcional, Excep), con potencias que van desde 500 y 600 W/m², con velocidades entre 6,2 y 6,8 m/s, y más de 1 000 W/m² (> 8,2 m/s) (Excep.).

En línea general puede decirse que los potenciales altos (entre Moderado y Excelente) se hallan desplazados hacia las áreas costeras, con puntos muy notables en zonas montañosas. Estos resultados se corresponden con el carácter insular (isla larga y estrecha) de Cuba, donde la circulación local de brisas en las costas norte y sur desempeña un importante rol, junto a los patrones de gran escala, en la definición del clima del recurso eólico del país.

A partir de la determinación de la extensión en kilómetros cuadrados de las áreas consideradas entre moderadas y excelentes, se determinó el potencial eólico de Cuba, que fluctúa entre 5 000 y 14 000 MW (Tabla 1.1)

Tabla 1.1 Potencial eólico instalable en Cuba

Provincias	Área(T)km ²	Área(E)km ²	Potencial eólico MW	Potencial equivalente con FC=25% MW
Pinar del Río	34	7	35-98	8-24
La Habana	65	13	65-182	16-45
Ciudad de La Habana	13	3	15-42	3-9
Matanzas	21	4,2	3-8	5-15
Villa Clara	0,1	0,02	0,1-0,28	0,02-0,07
Cienfuegos	0	0	0	0
Sancti Spíritus	0,2	0,04	0,2-0,6	0,05-0,14
Ciego de Ávila	110	22	110-308	27-77
Camagüey	313	63	315-882	78-219
Las Tunas	25	5	25-70	6-17
Holguín	766	153	176-2142	191-536
Granma	1184	237	1185-3318	296-828
Santiago de Cuba	734	147	735-2058	183-514
Guantánamo	1555	311	1555-4354	389-1089
Isla de la Juventud	210	42	210-588	52-147
Total	5030	1006	5030-14084	1257-3521

ÁreaT (km²): Área total con densidad de potencia del viento mayor o igual que 400 W/m², velocidad del viento superior a 6,2 m/s y RIX 15%.

ÁreaE (km²): Área aprovechable para el emplazamiento de parques eólicos teniendo en cuenta el uso de 20% del área total (ÁreaT). Se desprecian las áreas ocupadas por

asentamientos humanos, campos de cultivo, unidades militares, centros turísticos, industrias, carreteras, áreas protegidas, etcétera).

FC (%): Factor de capacidad (cociente entre la energía real producida por el aerogenerador y su producción nominal de energía).

RIX (%): Índice que caracteriza el grado de irregularidad de las pendientes (para RIX > 15% se excluyen las zonas montañosas con pendientes abruptas e irregulares) [17].

1.2.3 Distribución de la matriz energética cubana

El plan de electrificación total del país comenzó luego del triunfo de la Revolución en 1959. En Cuba actualmente más del 98% de la población recibe los beneficios del suministro de la energía eléctrica. En las zonas rurales remotas y montañosas, por sus características, la electrificación sólo alcanzó inicialmente al 81% de los lugares posibles.

Actualmente existe una alta dependencia del uso de combustibles fósiles para la generación de energía eléctrica, siendo más del 50 % del combustible utilizado importado, representando el 96,2 % del consumo total nacional. Cuba consume anualmente casi nueve millones de toneladas de combustibles, con un gasto anual de casi 3000 millones de dólares.

El aprovechamiento de las fuentes renovables de energía (FRE) es parte de los programas de desarrollo económico y social del país [18]. Su empleo es una de las principales prioridades para el país e indispensable para el logro de los objetivos siguientes:

- Disminuir la ineficiencia del sistema eléctrico.
- Reducir la dependencia de combustibles fósiles.
- Contribuir a la sustentación medioambiental.
- Modificar la matriz energética de generación y consumo.
- Incrementar la competitividad de la economía en su conjunto.
- Disminuir el alto costo de la energía que se entrega a los consumidores.

Actualmente existen 43 057 instalaciones energéticas que emplean las FRE, aunque no todas se aprovechan debido a un mantenimiento y operación deficientes:

- 4 parques eólicos (11,8 MW).
- 9476 paneles solares en instalaciones aisladas de la red.
- 7 parques fotovoltaicos conectados a la red (11 MW).
- 10 595 colectores solares para el calentamiento de agua.
- 57 centrales azucareros productores de electricidad con residuos de la producción azucarera.
- 827 plantas de biogás.
- 9343 molinos de viento.

- 169 instalaciones hidroeléctricas.
- 90 pequeños aerogeneradores instalados principalmente en el sector agrícola.

En la industria nacional, existen dos fábricas donde se producen molinos a viento IMECA y la EMBA en las provincias de Artemisa y Granma respectivamente con una capacidad de 1800 molinos al año en 3 turnos de trabajo.

Grandes aerogeneradores

* Fabricación de componentes y agregados de los parques eólicos tales como: torres, transformadores de potencia, cables eléctricos, pizarras eléctricas, estructuras metálicas en GESIME.

Pequeños aerogeneradores

* Fabricación de pequeños aerogeneradores de hasta 10 KW en GESIME para su uso generalizado en viviendas y el sector no residencial.

Molinos a Viento

* Cumplimiento del programa de fabricación, con el 90 % de integración nacional, de los más de 20 mil molinos a viento que se estiman como demanda; así como partes y agregados para la sostenibilidad de estas instalaciones.[19]

Según la política económica y social del Estado Cubano (Tabla 1.2), se prevé reducir del año 2013 con un 96,7% a un 76% el uso de combustibles fósiles para el 2030. Por lo que conllevaría a un aumento del uso de fuentes renovables de energía del 4,3% hasta un 24%. Se espera una potencia instalada total de estas fuentes mayor de 2100 MW (Tabla 1.3) y de esta unos 633 MW de energía eólica,

Tabla 1.2 Matriz de generación de electricidad prevista para el 2030

Fuente de energía	2013 %	2030 %
Fuel en motores	18,5	9
Fuel en centrales térmicas	15,1	5
Gas acompañante	9,6	8
GNL	0	1
Eólica	0,1	5
Solar	0	4
Biomasa	3,5	14
Hidráulica	0,7	1
Crudo	48,35	32
Diesel	4,2	1

Tabla 1.3 Potencia instalada esperada en el 2030

Fuente	Potencia Instalada (MW)
Biomasa	755
Eólica	633
Fotovoltaica	700
Hidráulica	56
Biogas	27

1.2.4 Parques eólicos en funcionamiento y proyecciones

Están instalados 4 parques eólicos experimentales con una potencia total de 11,7 MW: uno en Ciego de Ávila (Turiguanó 0,45 MW), dos en Holguín (Gibara I y Gibara II. 5,1 MW y 4,5 MW respectivamente) y uno en Isla de la Juventud (Los Canarreos 1,65 MW). De ellos, los instalados en el norte de Holguín (9,6 MW), han alcanzado un factor de capacidad anual superior al 27 % (Figura 1.2)[19].

En la actualidad han iniciado su construcción dos parques eólicos Herradura 1 y Herradura 2 en la provincia de Las Tunas, para una potencia total de 101 MW, además se encuentra en preparación un tercer parque eólico, Río Seco en la provincia de Holguín con 50 MW, todos mediante la modalidad de Crédito Estatal.



Fig 1.1 Parques eólicos actuales y futuros en Cuba

1.3 Componentes del aerogenerador de pequeña potencia

Las turbinas eólicas convierten la energía cinética del viento en energía mecánica, la cual acciona un generador que produce energía eléctrica limpia. Actualmente, las turbinas eólicas son versátiles fuentes de electricidad. Sus palas tienen un diseño aerodinámico que les permite capturar la mayor cantidad de energía del viento, pues este las hace rotar, accionando una flecha acoplada al generador y así obtener electricidad. Las partes principales de estos aerogeneradores son:

-Rotor

Las palas del rotor, construidas principalmente de fibra de vidrio-polyester, se diseñan para transformar la energía cinética del viento en un momento torsor en el eje del equipo. La tecnología utilizada varía desde rotores de dos palas, hasta rotores de 6 palas, cubriendo todas las soluciones intermedias: 3, 4, 5 y 6 palas. Los más utilizados son los de tres palas (ésta es la opción elegida también para los grandes aerogeneradores), debido fundamentalmente a su mejor comportamiento dinámico (son más sencillos de equilibrar) y a un mayor rendimiento aerodinámico. Sin embargo se han experimentado configuraciones de aerogeneradores de una sola pala (monopalas) y aerogeneradores de dos palas, utilizándose mayor número de palas en los aerogeneradores de potencia nominal inferior a 250W.

-Caja multiplicadora

Puede estar presente o no dependiendo del modelo. Transforman la baja velocidad del eje del rotor en alta velocidad de rotación en el eje del generador eléctrico. Esta consiste en un juego de engranajes capaces de convertir la rotación producida por las palas, es decir, adecua la velocidad de las palas a las especificaciones de rotación del generador. Es importante su uso ya que es poco probable que la turbina gire a la misma velocidad que el generador.

-Sistema de regulación de potencia y de la velocidad de rotación

Existe una gran variedad de soluciones utilizadas para regular la potencia y la velocidad de giro. Entre ellas se incluyen:

“**Sin regulación**”, en la que el aerogenerador se diseña para poder soportar las cargas que se produzcan en todas las condiciones de operación, incluidas las velocidades de giro que puedan presentarse en funcionamiento en vacío.

“**Regulación por desorientación**” en el que el eje del rotor se desalinea en el plano horizontal respecto a la dirección del viento incidente. Existen distintas soluciones para que se produzca esta desorientación del rotor, si bien la más utilizada es mediante un diseño en el que el centro de empuje del rotor no queda alineado con el centro del rodamiento de orientación.

“**Regulación por cabeceo**”, similar al anterior, pero en el que la desalineación se produce en el plano vertical.

“Regulación por cambio de paso”. El cambio de paso activo es la solución utilizada en los aerogeneradores más grandes, pero raramente es usada en mini-eólica, donde en la mayor parte de los casos se utilizan sistemas de cambio de paso pasivos, en los que la variación del ángulo de ataque de las palas se produce mediante sistemas centrífugos pasivos.

“Regulación por pérdida aerodinámica”, similar a la utilizada en grandes aerogeneradores, consiste en una disminución del coeficiente de potencia a partir de cierta velocidad de viento, que ocurre por el comportamiento aerodinámico de las palas, sin necesidad de actuación externa.

El punto clave en la regulación de potencia empleada en pequeños aerogeneradores ha sido tradicionalmente conseguir una regulación adecuada mediante sistemas pasivos, mecánicos, puesto que las soluciones con mecanismos activos, eléctrico-electrónicos, similar a los empleados en los aerogeneradores de mayor tamaño, dan lugar a diseños más complejos, y consiguientemente más caros y con mayor labor de mantenimiento. Por ello esta solución no es comúnmente utilizada hasta la fecha en mini-eólica [20].

-Sistema de Frenado

Existe una cierta indefinición, pues se ha encontrado frecuentemente en la documentación técnica descriptiva de los aerogeneradores, que los fabricantes indican el sistema de control de vueltas como sistema de frenado, lo que de acuerdo con la definición de la norma resultaría correcto, pero que no sería suficiente para detener el aerogenerador en todas las condiciones de funcionamiento.

En los aerogeneradores que sólo llevan un sistema de frenado, la solución mayoritaria es mediante cortocircuito del generador eléctrico. En el caso en que usen dos sistemas de frenado, el primero de ellos es mayoritariamente freno mecánico o aerodinámico mediante posicionamiento de las palas en la posición de “bandera”. Para el segundo sistema se utiliza freno mecánico, aerodinámico o por cortocircuito del generador eléctrico, dependiendo fundamentalmente de la solución utilizada para el primer sistema de frenado.

-Generador

La mayoría de los diseños de pequeña potencia usan conexión directa entre el rotor del aerogenerador y el generador eléctrico, sin existencia de caja de multiplicación, si bien se han localizado algunos diseños con una multiplicadora de dos etapas.

En los aerogeneradores de micropotencia (< 3kW) el tipo de generador utilizado prácticamente en la totalidad de los diseños es un alternador de imanes permanentes (PMG son sus siglas en inglés) de 4, 6, 8 o 10 pares de polos. En el caso de aerogeneradores en el rango de los 3-30 kW, si bien hay una tendencia generalizada al uso de PMG, también se utiliza la opción de generadores de inducción.

-Control electrónico

En los aerogeneradores se utilizan sistemas de regulación electrónicos, activos, que actúan sobre la generación eléctrica a la salida del generador. Por un lado, hay que tener en cuenta

que los generadores eléctricos utilizados hoy en día son trifásicos, de tensión y frecuencia variables, mientras que los sistemas a los que se van a conectar normalmente requerirán suministro en alterna (monofásico o trifásico) a tensión y frecuencia estables. Los elementos comúnmente utilizados para conseguir esta adaptación pueden incluir:

Regulador o controlador de carga. Con objeto de conectar esta salida eléctrica a los sistemas donde van a instalarse, se suele convertir esta salida trifásica en corriente continua, una conversión que se realiza mediante un convertidor electrónico llamado rectificador. La opción más utilizada es la de rectificador no-controlado mediante un puente de diodos. Normalmente ubicado en el mismo cuadro que el rectificador, el regulador de tensión tiene asignadas las siguientes funciones: Desconexión por voltaje alto de la batería protege la batería de la sobrecarga y cargado de la batería. La desconexión por voltaje bajo de la batería, que protege a la batería de sobredescarga, la realiza el inversor en la inmensa mayoría de los casos. Una vez que tenemos la salida en continua, se encuentran disponibles en el mercado principalmente dos modos de regulación electrónica:

- Regulación serie: con capacidad para controlar la potencia generada por el aerogenerador, de forma que trabaje en el punto de máxima potencia, o regulando la generación si el sistema así lo requiere (como por ejemplo en un sistema con batería en el que ésta se encuentre plenamente cargada), o si se ha alcanzado y superado la velocidad nominal del aerogenerador.

-Regulación paralelo: esta regulación limita la tensión en continua a un valor establecido, derivando a una resistencia de disipación toda la potencia excedentaria. Se utiliza fundamentalmente para que el aerogenerador no quede funcionando en vacío en el caso de que el sistema no demande energía alguna. El propósito de la resistencia de disipación es eliminar el exceso de energía convirtiéndola en calor. Las resistencias de disipación pueden emplearse tanto para calentar agua como aire, y esto es especialmente recomendable en el caso de aerogeneradores de más de 5 kW, donde la cantidad de energía a disipar puede ser importante.

-Inversor

Los inversores convierten la energía de corriente continua(CC) a corriente alterna(AC). Este dispositivo es necesario debido a que los módulos, baterías y la generación de la mayoría de los pequeños aerogeneradores se transforma a energía CC, mientras que la mayoría de las aplicaciones y dispositivos corrientes, requieren energía AC. Los inversores generalmente se dimensionan de acuerdo a su producción de energía continua máxima. La mayoría de los inversores, sin embargo, son capaces de manejar energía adicional a su tamaño, pero únicamente por cortos periodos de tiempo. Esta capacidad de pico es útil para satisfacer las ocasionales subidas de carga tales como cuando arranca un motor. El inversor es el encargado de producir el suministro en alterna con la tensión y la frecuencia requeridas para suministrar a la aplicación y, por lo tanto, son diferentes si son para un sistema aislado que si son para un sistema conectado a red [21],[20].

-Sistema de soporte

Sitúa el generador a una mayor altura, donde los vientos son de mayor intensidad y para permitir el giro de las palas, y transmite las cargas del equipo al suelo (en el caso de los de eje horizontal). En los de eje vertical no es necesaria, por lo que su instalación y mantenimiento es más simple.

Respecto al tipo de torre encontramos una amplia dispersión, usándose torres atirantadas o autoportantes, tubulares y de celosía. Es práctica habitual que el fabricante ofrezca diferentes tipos de torres, de acuerdo a las características del emplazamiento. Lo mismo ocurre respecto a la altura de la torre. Así encontramos casos en los que el mismo modelo se ofrece con torres de 6 a 40 metros.

1.4 Clasificación de los generadores

Los generadores que se utilizan en los sistemas de generación eólica son de corriente alterna debido a la necesidad de incrementar las tensiones. Son comercializados por su fácil y relativo mantenimiento, y también se especifican debido a su relación peso-potencia al momento de la construcción de la torre y su acondicionamiento mecánico. Su control, depende esencialmente del tipo de generador que se utilice. En la práctica se emplean generadores con máquinas de inducción tipo rotor bobinado o de jaula de ardilla, máquinas sincrónicas y máquinas de imán permanentes, estos se pueden clasificar como:

1.4.1 Según la posición de los ejes de la turbina

-Turbina de eje vertical (vertical axis wind turbine VAWT):

El eje de rotación de estas turbinas es perpendicular al suelo. Dentro de las aeroturbinas de eje vertical, se pueden encontrar tres tipos de tecnologías: Savonius, Darrieus y Giromill.

Las turbinas con rotores de eje vertical tienen la ventaja fundamental de que no precisan ningún sistema de orientación activo para captar la energía del viento. Presentan la ventaja añadida, con respecto a las turbinas de eje horizontal, de disponer del tren de potencia y el sistema de generación eléctrica a nivel del suelo, lo que facilita enormemente las labores de mantenimiento. Como principales inconvenientes se encuentran la dificultad de realizar la regulación de potencia ante vientos altos en este tipo de turbinas, la fluctuación del par motor en el giro de la aeroturbina, así como el menor rendimiento del sistema de captación respecto a las aeroturbinas de eje horizontal. Estos inconvenientes habían llevado a la práctica extinción de los modelos de eje vertical. Pero en los últimos años esta familia de aerogeneradores ha experimentado una resurrección debido a su posible utilización en entorno urbano, por sus teóricas mejores prestaciones para ser integrados en edificios: producir menor nivel sonoro, menor impacto visual, mejor comportamiento ante flujo turbulento. Son varios los fabricantes que, ante las buenas perspectivas en este campo, se han lanzado al diseño y fabricación de nuevos modelos, algunos de ellos ya disponibles a nivel comercial.[20]



Fig 1.2 Tipos de aerogeneradores de eje vertical

-Turbina de eje horizontal (horizontal axis wind turbine HAWT)

Los rotores de eje horizontal se caracterizan porque hacen girar sus palas en un plano perpendicular a la dirección del viento incidente. Usualmente se ubican en torres de aproximadamente 100 metros de altura y poseen sistemas de orientación de viento asistidos por servomotores por el hecho que necesitan colocarse en el lugar desde donde sopla el viento y lograr captar las ráfagas que se encuentran a grandes alturas. La velocidad de giro de las turbinas de eje horizontal sigue una relación inversa al número de sus palas. Así, las turbinas de eje horizontal se clasifican en turbinas con rotor multipala o aeroturbinas lentas y rotor tipo hélice o aeroturbinas rápidas.

Los rotores multipala se caracterizan por tener un número de palas que puede variar de 6 a 24 y por lo tanto una solidez elevada. Presentan grandes pares de arranque y una baja velocidad de giro. La velocidad lineal en la punta de la pala de estas máquinas, en condiciones de diseño, es del mismo orden que la velocidad del viento. Estas características hacen que la aplicación fundamental de estas turbinas haya sido tradicionalmente el bombeo de agua. No se utilizan en aplicaciones de generación de energía eléctrica debido a su bajo régimen de giro.

Los rotores tipo hélice giran a una velocidad mayor que los rotores multipala. La velocidad lineal en la punta de la pala de estas máquinas varía en un margen de 6 a 10 veces la velocidad del viento. Esta propiedad hace que las aeroturbinas rápidas sean muy apropiadas para la generación de energía eléctrica, Los rotores tipo hélice presentan un par de arranque reducido que, en la mayoría de las aplicaciones, es suficiente para hacer girar el rotor durante el proceso de conexión.



Fig 1.3 Tipos de aerogeneradores de eje horizontal

1.4.2 Según la velocidad:

Se basa en el tipo de giro que ejerce la turbina de viento:

Tipo A. Turbinas de velocidad fija

Tipo B. Turbinas de velocidad parcialmente variables.

Tipo C. Turbinas de velocidad variable con convertidores parciales de frecuencia.

Tipo D. Turbinas de velocidad variable con convertidores completos de frecuencia.

1.4.3 Según el generador

Generador de Inducción:

Es aquel que actúa mediante flujos de corrientes del estator, estos generan un campo magnético rotatorio, que al interactuar con el campo magnético rotatorio originado por las corrientes en el rotor produce par estático. [22] Estos generadores son ventajosos por su robustez y simplicidad mecánica. Sin embargo, su desventaja es que el generador necesita reactivos para su magnetización, los cuales pueden ser reemplazados por sistema de electrónica de potencia. [23]

Generador Sincrónico:

Es un convertidor electro magnético donde la bobina del rotor excita mediante corriente continua la parte fija denominada estator. En el estator circula corriente alterna produciendo un campo magnético rotatorio que gira entre el entrehierro con frecuencia angular de las corrientes de armadura, girando a la misma velocidad el campo magnético rotatorio para que el par eléctrico sea diferente de cero en régimen permanente. [22]

En sistemas eólicos los más utilizados son:

Generadores sincrónicos de imanes permanentes (GSIP): Poseen los enrollados del estator conectados a la red a través de un convertidor de potencia, además que son auto excitados

poseen una operación a mayor factor de potencia y por ende con más eficiencia. Este tipo de generador es utilizado para turbinas de velocidad variable con convertidores completos de frecuencia. [23]

Generadores sincrónicos de rotor bobinado (WRSG): Poseen los enrollados del estator conectados directamente a la red a través de un convertidor. Mientras que, los enrollados del rotor son excitados mediante corriente continua por medio de anillos deslizantes y escobillas o por medio de una excitatriz sin escobillas. Por esta razón no necesita ninguna compensación reactiva extra del sistema, este tipo de generador es utilizado para turbinas de velocidad variable con convertidores completos de frecuencia.

1.5 Tipos de imanes permanentes

Además de la magnetita o imán natural existen diferentes tipos de imanes fabricados con diferentes aleaciones:

- Imanes cerámicos o ferritas.
- Imanes de alnico.
- Imanes de tierras raras.
- Imanes flexibles.
- Otros.

Las características principales de los mismos son las siguientes:

Imanes de alnico

Se llaman así porque en su composición llevan los elementos aluminio, níquel y cobalto. Se fabrican por fusión de un 8 % de aluminio, un 14 % de níquel, un 24 % de cobalto, un 51 % de hierro y un 3 % de cobre. Son los que presentan mejor comportamiento a temperaturas elevadas. Tienen la ventaja de poseer buen precio, aunque no tienen mucha fuerza.

Imanes cerámicos

Se llaman así por sus propiedades físicas. Su apariencia es lisa y de color gris oscuro, de aspecto parecido a la porcelana. Se les puede dar cualquier forma, por eso es uno de los imanes más usados (altavoces, aros para auriculares, cilindros para pegar en figuras que se adhieren a las neveras, etc.). Son muy frágiles, pueden romperse si se caen o se acercan a otro imán sin el debido cuidado.

Se fabrican a partir de partículas muy finas de material ferromagnético (óxidos de hierro) que se transforman en un conglomerado por medio de tratamientos térmicos a presión elevada, sin sobrepasar la temperatura de fusión.

Otro tipo de imanes cerámicos, conocidos como ferritas, están fabricados con una mezcla de bario y estroncio. Son resistentes a muchas sustancias químicas (disolventes y ácidos) y pueden utilizarse a temperaturas comprendidas entre $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $260\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Imanes de tierras raras

Son imanes pequeños, de apariencia metálica, con una fuerza de 6 a 10 veces superior a los materiales magnéticos tradicionales. Los imanes de boro/neodimio están formados por hierro, neodimio y boro; tienen alta resistencia a la desmagnetización. Son lo bastante fuertes como para magnetizar y desmagnetizar algunos imanes de alnico y flexibles. Se

oxidan fácilmente, por eso van recubiertos con un baño de cinc, níquel o un barniz epoxídico y son bastante frágiles.

Los imanes de samario/cobalto no presentan problemas de oxidación pero tienen el inconveniente de ser muy caros. Están siendo sustituidos por los de boro_neodimio.

Es importante manejar estos imanes con cuidado para evitar daños corporales y daño a los imanes (los dedos se pueden pellizcar seriamente).

Imanes flexibles

La cinta magnética es un tipo de imán utilizado por su fácil adaptación en gran variedad de superficies metálicas, gracias a su principal característica, la flexibilidad. Pueden ser magnetizadas de forma permanente.

La cinta magnética es uno de los productos magnéticos más versátiles y adecuados para la señalización u organización de elementos.

1.6 Tipos de aerogeneradores de imanes permanentes

Varias configuraciones de generadores con imanes permanentes para su uso en aerogeneradores han sido adoptadas, ejemplo de ellos son: los de flujo radial, flujo axial y flujo transversal. Esta denominación responde a la distribución de los imanes en el generador [24]

Máquinas de flujo transversal:

En las máquinas de flujo transversal, el plano de la trayectoria del flujo es perpendicular a la dirección del movimiento del rotor. El uso de máquinas de flujo transversal se puede proponer en aplicaciones con requisitos de alta densidad de torsión. Una propiedad atractiva de las máquinas de flujo transversal es que la carga de corriente y la carga magnética se pueden ajustar de forma independiente. Se proponen para sistemas eólicos, generadores de pistones libres para vehículos híbridos y propulsión de buques [25].

Un inconveniente del PMSG transversal es la alta fuga de flujo que resulta en un factor de potencia bajo. Para lograr una menor fuga de flujo, el número de polos debe reducirse, lo que a su vez reduce la densidad del par. La tarea del diseñador es encontrar un compromiso entre la fuga de flujo y la densidad de torsión de la máquina. Además, el principal inconveniente de los rotativos es el proceso de fabricación relativamente difícil. Otro inconveniente más es que, al girar el PMSG transversal, la construcción mecánica es débil debido a la gran cantidad de piezas.

Máquinas de flujo axial:

Cuando el campo magnético resultante de un determinado motor rota concéntrico a su eje, entonces el motor es de flujo axial (MFA). En los 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.

Máquinas de flujo radial:

Cuando el campo magnético resultante de un determinado motor, rota cual infinitas agujas de reloj superpuestas a lo largo del eje, o sea, perpendicular a este, entonces el motor es de flujo radial (MFR). En los MFR la disposición geométrica entre el estator y el rotor es concéntrica, cumpliéndose (para garantizar el entrehierro), que el diámetro externo del dispuesto en el interior es ligeramente menor al diámetro interno del dispuesto en el exterior, con longitudes activas análoga en dirección axial. [26]

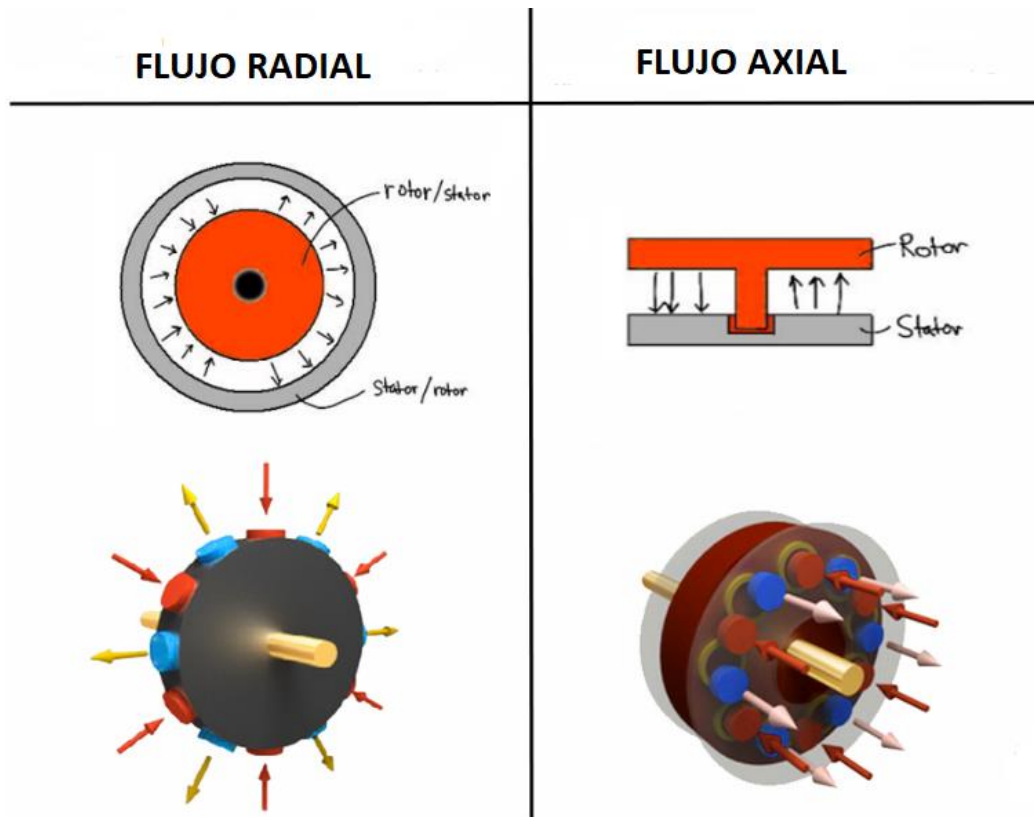


Fig 1.4 Flujo radial y axial

1.7 Ubicación de los aerogeneradores en la red

Existen dos aplicaciones generales de utilizar la energía eléctrica generada a partir de los aerogeneradores de pequeña potencia: instalaciones aisladas e instalaciones conectadas a la red eléctrica.

- Instalaciones aisladas a la red eléctrica

Las pequeñas turbinas eólicas pueden ser fuente económica de electricidad para sitios aislados. La aplicación más común de sistemas aislados es la electrificación de viviendas rurales, para la cual existen diferentes configuraciones.

- a) Sistemas individuales: Generalmente cuentan con un pequeño aerogenerador, una o más baterías para almacenar la energía generada y un regulador que controla la carga y descarga de baterías. Dependiendo de la aplicación, pueden incluir un inversor para transformar la electricidad de corriente continua a alterna. Además de

los usos tradicionales, miles de micro turbinas son utilizadas en barcos. Una de las primeras aplicaciones fue la alimentación de instalaciones remotas de telecomunicaciones. Estas eran habitualmente emplazadas en las cimas de inaccesibles montañas, donde el suministro de combustible era difícil y caro.

- b) Sistemas centralizados: si las viviendas a electrificar se encuentran relativamente próximas entre sí, la opción más apropiada puede ser un sistema eólico centralizado, debido a la concentración de equipos y energía, lo cual ofrece ventajas desde los puntos de vista técnico y económico. Este sistema satisface la demanda energética de una comunidad con electricidad producida, almacenada y transformada en un sistema eólico central y luego se distribuye, a través de líneas eléctricas, hasta cada una de las viviendas y otros sitios. Generalmente cuenta con más de una fuente de generación, para lograr mayor confiabilidad del sistema.
 - c) Sistemas híbridos: muchas veces las configuraciones anteriores debido a las fluctuaciones del viento hacen que no se pueda obtener una producción constante de electricidad. Por esta razón, frecuentemente, se usa una turbina eólica en combinación con otra fuente de generación, por ejemplo, paneles solares o un generador eléctrico a base de diésel. Esto representa una mayor seguridad para la generación.
- Instalaciones conectadas a la red eléctrica.

Estos sistemas pueden conectarse a la red de distribución y pueden reducir la facturación de electricidad que se utiliza para iluminación, algunos aparatos y calefacción. Si la turbina no puede cubrir la cantidad de energía que usted necesita, la compañía eléctrica a la que se conecta cubrirá el faltante. Por otro lado, cuando la turbina eólica produzca más electricidad de la que su hogar requiera, el excedente es vendido a la compañía eléctrica.

Actualmente en Cuba, los sistemas de pequeña potencia solo son instalados aislados de la red, para autoconsumo. Faltan normas jurídicas y nuevas leyes que contemplen la inclusión de estos sistemas para su uso.

1.8 Conclusiones parciales

Las máquinas de flujo radial son el tipo de generador sincrónico de imán permanente convencional. La tecnología de manufactura para estas está bien establecida, lo que hace que su costo de producción sea mucho más bajo que las de flujo axial. Estas son bastante flexibles en su tamaño de construcción, obteniendo una mayor potencia de la máquina al incrementar su longitud.

Por su construcción más compacta, altos valores de par motriz a bajas velocidades, una alta eficiencia y alta densidad de potencia se ha elegido el generador de flujo radial para este proyecto.

Además que son auto excitados los generadores de imanes permanentes poseen una operación a mayor factor de potencia y por ende con más eficiencia.

Las turbinas con rotores de eje vertical tienen la ventaja fundamental de que no precisan ningún sistema de orientación activo para captar la energía del viento. Presentan la ventaja añadida de disponer del tren de potencia y el sistema de generación eléctrica a nivel del suelo, lo que facilita enormemente las labores de mantenimiento. Debido a su configuración poseen mejores prestaciones para ser integrados en edificios, producen menor nivel sonoro, menor impacto visual y mejor comportamiento ante flujo turbulento. Por lo que se propone la utilización del mismo para este diseño.

A partir de este conocimiento, es necesario elaborar una metodología de cálculo que permita el desarrollo de este tipo de máquinas en Cuba, las cuales comienzan a generar corriente eléctrica a bajas velocidades del viento, siendo estos los regímenes predominantes en la Isla.

CAPÍTULO 2. DISEÑO DE UN GENERADOR SINCRÓNICO DE IMANES PERMANENTES.

En este capítulo se plantea lograr el diseño de un pequeño aerogenerador sincrónico de flujo radial basado en el uso de imanes permanentes, que pueda entregar una potencia máxima de 1,5 kW.

2.1 Elementos que afectan el diseño

Hay una serie de elementos que afectan el diseño de una máquina [27], ellos pueden ser clasificados de la forma siguiente:

1. Económicos
2. Materiales
3. Especificaciones
4. Factores especiales

A continuación, se da una descripción de cada uno de ellos.

2.1.1 Elementos económicos.

En muchos casos la consideración económica es la más importante. Ante el igual peso de otros factores, el costo decidirá cuál es la máquina que finalmente será construida. Para que un diseño sea competitivo, la cantidad de material utilizado, así como también el costo asociado a la manufactura deben ser mínimos. El diseño de una máquina debe ser compatible con el equipamiento disponible para su fabricación y ensamble, stock de materiales y no debe involucrar excesivo tiempo o complejos procedimientos que eleven el costo. Mejores desempeños de un diseño suelen ir acompañados a mayores costos de fabricación, sin embargo el mejor diseño es aquel que combina el costo inicial de manufactura y de operación (pérdidas y mantención) a lo largo de su vida útil, tal que el total sea mínimo. El aumento del costo de la energía eléctrica ha traído a la discusión el compromiso que existe entre el costo inicial y los costos de operación de la máquina llevando conceptos como la eficiencia y densidad de energía nuevamente como objetivos de diseño.

2.1.2 Materiales

Las limitaciones técnicas y económicas impuestas por los materiales, generalmente determinan el desempeño y las dimensiones de la máquina. Grandes progresos tecnológicos se han hecho en el área de los materiales magnéticos y aislantes. Estos nuevos materiales han tenido dramáticos efectos en el diseño de máquinas, por ejemplo los imanes permanentes. Todo ello lleva a ampliar las posibilidades de topologías, aumentar los kW/m³, la eficiencia y confiabilidad

2.1.3 Especificaciones

El diseño, el desempeño y los materiales utilizados en la fabricación están sujetos a las especificaciones de cuerpos normalizadores (IEEE u otro organismo). Además, estándares individuales de proveedores de materiales son restricciones a los cuales se debe regir el diseño de una máquina. Entre ellos, el diámetro de los conductores y el espesor de la aislación, asimismo el hierro magnético, entre otros, son valores que se encuentran estandarizados. Salir de estas normas implica un aumento en el costo debido al ajuste especial de las líneas de producción para obtener la dimensión requeridas por el diseñador.

2.1.4 Factores especiales

En algunas aplicaciones específicas, consideraciones especiales pueden sobrepasar todos los factores ya mencionados. Por ejemplo, el diseño de generadores aeronáuticos requiere que la máquina tenga el mínimo peso, pero con máxima confiabilidad. En aplicaciones automotrices el énfasis es en la confiabilidad y fácil servicio. Para aplicaciones en equipos de oficina, se requiere el mínimo de ruido y peso. Asimismo, cuando la máquina va a ser utilizada para mover cargas de gran inercia, es requerido que el torque de partida sea la consideración que se imponga en el diseño.

2.2 Áreas que involucra el diseño de una máquina eléctrica

Conceptualmente se deben considerar 5 ámbitos, para lograr un apropiado diseño de la máquina eléctrica: eléctrico, magnético, dieléctrico, térmico y mecánico.

2.2.1 Eléctrica

De manera de hacer compatible la máquina con la fuente de energía: el voltaje, frecuencia y número de fases deben ser especificados. Además, un factor de potencia razonable a plena carga también puede ser especificado. A partir de esta información el diseñador debe decidir el tipo de conexión, tipo de bobinados y sus parámetros. Igualmente la densidad de corriente y las pérdidas asociadas.

2.2.2 Magnéticas

Dentro de esta categoría deben establecerse las densidades de flujo máxima en los dientes y núcleos de la máquina, con ellos las pérdidas en el hierro pueden ser calculadas. Asimismo, el efecto de la saturación, cálculo de las corrientes de magnetización e inductancias de dispersión o fuga, la determinación de la geometría de las ranuras y dientes, cálculo de los efectos de las armónicas y la estimación de las pérdidas de vacío y torque pulsantes.

2.2.3 Dieléctricas

La influencia de los campos eléctricos tiene también un efecto importante en el diseño de la máquina. Consideraciones acerca del espesor de la aislación entre: hebras de conductores,

entre las bobinas y entre bobina y el hierro que permitan resistir el voltaje nominal de operación, así como los sobrevoltajes producidos por acción de fenómenos externos a la máquina. Además, el apropiado cableado de los bobinados hacia el exterior y la adecuada selección del tipo de terminales imponen restricciones al diseño.

2.2.4 Térmicas

El calor producido dentro de la máquina producto de las pérdidas tanto en el cobre como en el hierro, sin la adecuada ventilación, provocara en el tiempo la destrucción de la misma. La transferencia de calor desde el interior, aunque este tema es un asunto más mecánico que eléctrico, reviste interés de no menor importancia desde el punto de vista del diseño. Consideraciones que involucran la selección del sistema de refrigeración (aire, agua, hidrógeno), la selección del espaciamiento y tamaño de los ductos, cálculo del aumento de temperatura, entre otros afectan las decisiones de diseño.

2.2.5 Mecánicas

Las mayores consideraciones de tipo mecánicas que afectan al diseño de una máquina eléctrica son el cálculo de la velocidad crítica de rotación (o traslación), modos de vibración acústica, esfuerzos mecánicos sobre el eje durante la operación normal y sobre velocidades, determinación del momento de inercia, cálculo de las fuerzas sobre los bobinados, particularmente en la porción de las cabezas de bobinas durante situaciones de cortocircuito. En la práctica todas y cada una de las consideraciones anteriores interactúan, por lo que la experiencia juega un papel relevante en el momento de la toma de decisiones. Mucha de las observaciones no pueden ser simuladas o predichas sino hasta que la máquina está construida. Esto hace del diseño una tarea estimulante y llena de desafíos.

2.3 Devanados.

Los bobinados se pueden dividir en categorías superpuestas y no superpuestas. Los devanados superpuestos se pueden enrollar distribuidos o concentrados. Los devanados no superpuestos se pueden enrollar únicamente de forma concentrada.

El término superposición se suele omitir. Por ejemplo, "bobina distribuida superpuesta" casi siempre se conoce como bobina distribuida. En este texto, por otra parte, "devanado concentrado" significa "devanado no superpuesto concentrado de doble capa".

2.3.1 Devanado distribuido

El devanado distribuido se ha utilizado para máquinas de corriente alterna de escobillas (BLAC) durante décadas. Una de las ventajas del devanado distribuido es que puede dar un alto valor del factor de devanado cuando q es alto y se elige el paso de polo completo.

No obstante, tiene algunos inconvenientes, como por ejemplo sus devanados de extremo largo. Los devanados finales no contribuyen a la inducción de la tensión de fase. El papel de los devanados finales se limita a llevar la corriente de una bobina a la otra. Por lo tanto, los

devanados finales están asociados con pérdidas de cobre y se desea que los devanados finales sean lo más cortos posible. En el devanado distribuido, cuando los lados de la bobina están alejados entre sí, las pérdidas de cobre serán mayores y la longitud axial de la máquina será mayor. De esta manera, el devanado distribuido reduce la eficiencia de la máquina. Si el tamaño de la máquina es un parámetro de diseño crítico, se debe considerar el devanado concentrado.

2.3.2 Devanado concentrado

En el devanado concentrado, los giros de la bobina se concentran alrededor de un diente y, por lo tanto, se beneficiarán de los devanados de extremo corto debido a la propiedad de no solapamiento. Otra ventaja es una mejor conductividad térmica entre el devanado y el diente. Además, es posible la segmentación de los dientes del núcleo del estator [28]. De esta manera, los bobinados se pueden prensar y las bobinas se pueden hacer con forma rectangular, lo que, a su vez, dará un alto factor de llenado de ranura y una alta densidad de torsión.

El devanado concentrado exhibe una alta tolerancia a fallas en los SMPM y se asocia con un aumento de la inductancia de fuga [29]. La implementación del devanado concentrado aumenta la inductancia de fuga, que a su vez limita las corrientes altas en condiciones de cortocircuito. De hecho, en condiciones defectuosas, el campo de excitación de WRSG se reduce para proteger la máquina. Sin embargo, la excitación de PMSG no es controlable. Por lo tanto, la introducción de una mayor fuga de flujo puede ser una ventaja. Además, debido a la propiedad no superpuesta, las bobinas están separadas física y térmicamente de una manera mejor en comparación con los devanados distribuidos. Esto reduce el riesgo de cortocircuito de fase a fase en caso de daños en el aislamiento del bobinado. Además, se reduce la ondulación del par en SMPM con altos polos y devanados concentrados [30]. Una mayor capacidad de debilitamiento del flujo es otra característica del devanado concentrado.

Los MIP (motor de imán permanente) con devanado concentrado tienen una menor densidad de torsión que la del devanado distribuido. El devanado concentrado disminuye la relación de saliencia (Calidad o carácter de saliente, parte en relieve en una superficie lisa; eminencia en la superficie de ciertos objetos; la prominencia, el rebote.) en el MIP y, en consecuencia, el par de resistencia también se reduce. Esto significa que un MIP con devanado concentrado tendrá un par máximo más bajo y también una menor densidad de par. La reducción de la densidad de torque se puede compensar con laminaciones de hierro adicionales en dirección axial a medida que la longitud de la máquina se acorta debido a los devanados concentrados, esto, sin embargo, es costoso [31].

2.4 Configuraciones de los imanes permanentes

El PMSG se puede dividir en diferentes topologías dependiendo de la disposición del imán en el rotor. Estos se introducen a continuación. Sin embargo, debe mencionarse que las configuraciones del rotor no están restringidas a los ejemplos dados, por ejemplo, en imanes interiores se pueden implementar varias configuraciones.

2.4.1 Imanes de montaje superficial

Una topología común es cuando los imanes se montan en la superficie del rotor, a veces se denomina imán exterior, pero, más conocido como máquina de imán permanente montado en superficie (SMPM). Los imanes están pegados y / o vendados a la superficie del rotor para soportar la fuerza centrífuga. Por lo general, los imanes están orientados o magnetizados en dirección radial y más raramente en dirección circunferencial. Las reactancias directas y en cuadratura son casi iguales. La construcción del núcleo del rotor en SMPM es la más fácil entre las diferentes configuraciones de PM debido a la geometría simple del rotor.

2.4.2 Imanes de inserción

En las máquinas de imanes de inserción, el núcleo del rotor de la máquina SMPM se modifica con los polos de hierro. Los interpolos de hierro son protuberancias del núcleo del rotor dondequiera que los imanes no estén presentes en la superficie. Los interpolos causan saliencia y las inductancias en direcciones directas y en cuadratura son diferentes. En estas máquinas, parte del par es el par de reluctancia y la densidad del par es mayor en comparación con SMPM. Los imanes están magnetizados radialmente. La fuga de flujo es mayor en comparación con SMPM, lo que resulta en un factor de potencia más bajo. Por lo tanto, en la aplicación de accionamiento directo, la utilización del inversor es menor en comparación con las aplicaciones de engranajes. Esta topología no es común en sistemas de viento sin engranajes.

2.4.3 Imanes enterrados

En esta configuración, los imanes se colocan dentro del rotor y, por lo tanto, se denomina máquina de imán permanente interior (IPM). Hay muchas maneras diferentes de lograr la configuración del imán interior. Los imanes se pueden magnetizar en dirección radial, así como en dirección circunferencial. El grosor de los puentes de hierro entre los imanes debe diseñarse con cuidado para evitar la saturación. De nuevo, la inductancia en los ejes de cuadratura es diferente de la dirección de los ejes directos.

La principal ventaja de esta configuración de PM es que se puede usar material de PM débil como la ferrita. Otra ventaja es la protección magnética contra condiciones de cortocircuito [32]. Esto se debe a que en condiciones defectuosas, los puentes de hierro entre los imanes se saturan, lo que evita que el campo de desmagnetización inversa alta alcance los imanes. Esta topología se sugiere para aplicaciones de alta velocidad debido a la resistencia mecánica del rotor contra la fuerza centrífuga.

F. Libert estudia dos topologías de imanes enterrados diferentes y concluye que ambas dan lugar a problemas de fabricación. Uno se llama diseño de imán enterrado en forma de V y el otro se llama diseño de imán enterrado tangencialmente magnetizado. El autor también menciona algunos problemas de saturación cuando el número de polos es alto. Este es un problema común para las topologías de imanes enterrados. Si el número de polos aumenta,

la distancia entre los imanes disminuye (cuando el diámetro del núcleo del rotor se mantiene constante). Por lo tanto, los puentes de hierro estrechos se saturan más fácilmente.

2.5 Comportamiento térmico

Existen diferentes fuentes de pérdidas en las máquinas eléctricas, es decir, pérdidas de hierro, pérdidas de cobre, etc. Las pérdidas dan lugar a la temperatura, lo que tiene una influencia dramática en el rendimiento y la vida útil de las máquinas eléctricas. Por lo tanto, el estudio del comportamiento térmico de una máquina eléctrica es vital. El aumento de temperatura en la máquina depende en gran medida de la carga. En los sistemas eólicos, la velocidad y el par son a menudo más bajos en comparación con los valores nominales de la máquina y varían según las condiciones del viento. La ventaja es que el aumento de la temperatura promedio será menor en comparación con el punto de operación nominal. Sin embargo, para garantizar un alto rendimiento y una larga vida útil en cualquier condición de operación, los cálculos térmicos se realizan en función de la operación nominal. En las siguientes subsecciones, se presentan las consecuencias del aumento de temperatura y se discuten diferentes sistemas de enfriamiento.

2.5.1 Consecuencias del aumento de la temperatura

Rendimiento

La carga térmica determina prácticamente la potencia nominal de la máquina eléctrica. Los valores como la densidad de corriente a menudo se limitan a un cierto valor dependiendo de las condiciones de enfriamiento en una máquina eléctrica. Esto limita la carga de corriente y la capacidad nominal de torsión de la máquina eléctrica, respectivamente. En otras palabras, incluso si es posible fabricar máquinas más compactas con densidades de torque más altas, la capacidad de enfriamiento restringe aún más la reducción en el tamaño.

Vida útil

La vida útil de una máquina eléctrica también se ve afectada por el llamado envejecimiento térmico, que influye en el aislamiento. Uno de los requisitos sobre el aislamiento del devanado es transferir el calor y tolerar las tensiones térmicas en condiciones normales y defectuosas. El material de aislamiento disponible comercialmente puede tolerar un aumento limitado de la temperatura. Se espera una vida útil aceptable, si la temperatura de trabajo del material de aislamiento cumple con las condiciones anteriores. Por otro lado, debido a una ley empírica, la vida útil de un material de aislamiento se reduce a la mitad de cada 10 K de aumento de temperatura por encima de la temperatura nominal. La temperatura influye en las características del imán y puede aumentar el riesgo de desmagnetización.

La coercitividad y la densidad del flujo de remanencia disminuyen cuando la temperatura aumenta. La punta de la rodilla también se mueve hacia arriba. El punto de trabajo se desplaza hacia abajo en la línea de trabajo del circuito magnético cuando aumenta la temperatura. Dada una temperatura suficientemente alta y un circuito magnético mal diseñado, el punto de trabajo caerá por debajo del punto de la rodilla, donde el imán pierde

sus propiedades magnéticas. Si la máquina se va a ejecutar de nuevo, PM debe ser remagnetizado, lo cual es una tarea complicada y tediosa. La sobrecarga aumenta el riesgo de desmagnetización. En estas condiciones, la temperatura excede el valor nominal y la densidad de flujo de remanencia del imán disminuye. Si el circuito magnético no está diseñado correctamente, el flujo magnético de PM se reducirá notablemente. Para compensar la reducción del flujo magnético, la unidad de control tenderá a aumentar la corriente en el devanado del estator, ya que el par de carga debería mantenerse igual. Como resultado, las pérdidas de cobre en los devanados aumentan y la temperatura aumenta más en los devanados y, finalmente, en los imanes. Esto conduce a una reducción aún mayor de la densidad de flujo de remanencia. En teoría, la repetición de este ciclo puede eventualmente llevar a la desmagnetización de los imanes. Sin embargo, para evitar la desmagnetización durante condiciones de sobrecarga, se ofrece equipo de protección contra condiciones de sobrecalentamiento. Entre los PMSG, las máquinas de imanes de inserción y los SMPM son más vulnerables y tienen un mayor riesgo de desmagnetización en comparación con su contraparte de MIP. Los puentes de hierro alrededor de los imanes en los IPM se saturan durante condiciones defectuosas y contrarrestan la penetración de un fuerte campo inverso en los imanes. Sin embargo, el aumento de temperatura todavía puede ser alto, porque los imanes están enterrados y el enfriamiento de los imanes es más difícil.

Sistema de enfriamiento

El sistema de enfriamiento facilita la disipación del calor, lo que reducirá el aumento de temperatura en la máquina. Generalmente las máquinas eléctricas son forzadas a enfriarse por aire o agua. En las máquinas enfriadas por aire, un ventilador fuerza el aire a lo largo del espacio de aire. En las máquinas enfriadas por agua, la bomba fuerza el agua a través de los tubos que se encuentran en los conductos. Existen diferentes posibilidades para colocar los conductos dentro de la máquina, ya que se pueden ubicar axialmente o en espiral. Además, pueden ubicarse dentro de la repisa (marco) o en el núcleo del estator. La colocación de conductos en el núcleo del estator proporciona una mejor transferencia de calor, sin embargo, influye en el proceso de fabricación de las laminaciones del estator.

2.5.2 Teoría de la transferencia de calor

La transferencia de calor es el resultado de una diferencia en la temperatura. El calor siempre se transfiere desde la temperatura más alta hacia la temperatura más baja. Ocurre en tres formas diferentes: conducción, convección y radiación.

Conducción

La transferencia de calor a través de una sustancia se define como la conducción. La sustancia puede estar en cualquier estado: gas, líquido o sólido. Para medir la propiedad conductora de un material se introduce conductividad térmica. Por lo general, el valor de la conductividad térmica de los materiales se encuentra en el rango entre 0.026 W / m / K para aire y 427 W / m / K para plata [33]. La conducción está modelada por la ley de Fourier que también se puede aplicar cuando se genera calor dentro del cuerpo. Sin embargo, cuando se considera la variación temporal de la conducción, también se introduce la capacidad térmica

específica del cuerpo, que representa la capacidad térmica. En el análisis de estado estacionario, sin embargo, esto se descuida. En el campo de las máquinas eléctricas, la conducción es la forma más común de transferencia de calor tanto en estado estacionario como en condiciones transitorias.

Convección

La transferencia de calor desde una fuente de calor por medio del movimiento de fluidos se define como convección. El flujo de fluido es causado por una fuerza externa, ya sea en condiciones naturales o forzadas. En el primero, la discrepancia en la densidad del fluido crea la fuerza; En este último la fuerza es causada por una bomba o un ventilador. Para medir la propiedad convectiva de un fluido, se introduce el coeficiente de transferencia de calor. El coeficiente de transferencia de calor promedio de un fluido se encuentra en un rango entre $6 \text{ W / m}^2 / \text{K}$ para convección de aire natural y $120,000 \text{ W / m}^2 / \text{K}$ para condensación de vapor [33]. La estimación de este valor es complicada, ya que depende de muchas variables como la geometría de la superficie, la diferencia de temperatura, las características mecánicas del flujo y las características físicas del fluido, es decir, la viscosidad. La convección es explicada por la ley de enfriamiento de Newton. En el campo de las máquinas eléctricas, la convección es la segunda forma más común de transferencia de calor en estado estable, pero no desempeña un papel importante en condiciones transitorias.

Radiación

La transferencia de calor mediante radiación no necesita ninguna sustancia. La radiación térmica es una función de varios parámetros como la reflectividad, la diferencia de temperatura, la emisividad y la geometría. Está modelado por la ley de Stefan Boltzman. En máquinas eléctricas la cantidad de radiación es despreciable.

2.6 Pérdidas en el generador de imanes permanentes

La función principal de un generador eléctrico es convertir la energía de mecánica a eléctrica. Sin embargo, una parte de la energía se pierde durante este proceso que se conoce como pérdidas. En las máquinas eléctricas, las pérdidas se dividen en dos categorías, es decir, pérdidas normales y pérdidas parásitas. Las pérdidas parásitas son pérdidas adicionales que surgen en una máquina eléctrica aparte de las pérdidas normales consideradas en los cálculos de rendimiento habituales para la eficiencia del motor [32]. La parte principal de las pérdidas por desviación generalmente son causadas por corrientes de Foucault debido a la fuga de flujo. Las pérdidas normales implican pérdidas de cobre en los devanados del estator, pérdidas de hierro en el estator y pérdidas mecánicas como la fricción. Las pérdidas de hierro y cobre son las que más contribuyen a las pérdidas en PMSG. Una ventaja de PMSG sobre el de inducción es la eliminación de las pérdidas de cobre en el rotor, es decir, la pérdida por deslizamiento [34]. La estimación de las pérdidas normales es fácil y el conocimiento correspondiente está bien establecido. Por otro lado, la estimación de las pérdidas parásitas es complicada ya que dependen de muchos parámetros. Esta complicación puede llevar a imprecisiones en los cálculos del

comportamiento térmico de la máquina. Se presenta una discusión exhaustiva de las pérdidas para mejorar una mejor perspectiva sobre la variedad de orígenes de estas. Aquí, las pérdidas por histéresis y corrientes parásitas se introducen primero junto con la prueba de trama Epstein. Luego, se presentan los dos primeros. Finalmente se sugieren medidas contraproducentes. Las corrientes de Foucault son inducidas en el hierro del estator debido a la variación del campo magnético basado en la Ley de Faraday y crean pérdidas basadas en la Ley de Ohm. La cantidad de pérdidas depende de la tasa de tiempo de cambio de la densidad de flujo magnético. Suponiendo una variación sinusoidal de la densidad del flujo magnético, la pérdida de corrientes de Foucault dependerá de las propiedades eléctricas del material y del campo aplicado, incluida la frecuencia y el valor máximo de la densidad del flujo magnético.

Las pérdidas por histéresis son causadas por las propiedades magnéticas del material ferromagnético en un campo magnético variable en el tiempo. La cantidad de estas pérdidas depende principalmente de las propiedades magnéticas del material, pero también del campo aplicado, incluida su frecuencia y el valor máximo de densidad de flujo magnético. Para estimar las pérdidas de hierro en el estator, los resultados de la prueba de trama de Epstein se utilizan en el cálculo analítico. La predicción precisa de las pérdidas de hierro es mucho más difícil en comparación con las pérdidas de cobre. En consecuencia, los fabricantes de acero proporcionan al diseñador de la máquina los resultados de la prueba de marco de Epstein. En esta prueba, se miden las pérdidas de hierro del material de acero, sometidas a varias densidades de flujo magnético (en términos de amplitud y frecuencia). Se desarrollan modelos analíticos simplificados para estimar las pérdidas de hierro en las máquinas eléctricas basadas en los resultados de la prueba de marco de Epstein. Estos métodos analíticos se validan mediante comparación con experimentos en máquinas similares o simulaciones FEM.

La dirección angular del campo magnético es, generalmente, constante en el estator. Pero varía en las regiones del estator donde los dientes y el yugo están conectados entre sí. Esto se traduce en la pérdida de rotación. En la región donde existe, se suma a las pérdidas del núcleo. El exceso de pérdida no es un fenómeno bien conocido. Para incluir el efecto de las pérdidas rotacionales y en exceso, el valor de las pérdidas estimadas del núcleo se suele multiplicar por un factor de corrección. Los resultados calculados de las pérdidas del núcleo pueden diferir de los resultados experimentales por varias razones. Se supone que el campo aplicado en la máquina es uniformemente sinusoidal en diferentes puntos físicos y se supone que las propiedades magnéticas del material son uniformes. Sin embargo, en máquinas reales estas condiciones no prevalecen perfectamente. Una forma de onda de la densidad de flujo magnético es no sinusoidal y no uniforme. La influencia de los armónicos, que resulta en una densidad de flujo magnético no sinusoidal, en las pérdidas del núcleo se presentará más adelante en el texto. Además, la propiedad magnética del material varía cuando se somete a tensiones mecánicas durante la fabricación, por ejemplo golpes.

Hay varias soluciones disponibles para reducir las pérdidas de núcleo. Algunos más comunes son el núcleo laminado con laminación de hierro delgado, alta resistividad y contenidos aleados como el silicio. Estas medidas reducen las pérdidas por corrientes de

Foucault. Otra solución para reducir las pérdidas de hierro es reducir la frecuencia nominal. Sin embargo, la frecuencia es proporcional a la velocidad del rotor y al número de polos. Como la velocidad del rotor está determinada por la aplicación, la frecuencia, por lo tanto, no puede elegirse arbitrariamente. Además, al aumentar el número de polos se reduce el paso de los polos, que en la práctica no se puede elegir demasiado corto. Las laminaciones se recosen después del estampado o corte, para compensar las tensiones de fabricación. Entonces se evita la variación de las características magnéticas en los bordes cortados.

Pérdidas mecánicas

Las pérdidas mecánicas son relativamente pequeñas en comparación con otras pérdidas, especialmente en aplicaciones de baja velocidad. Abarca dos partes, a saber, la resistencia al viento y el rodamiento. Las pérdidas por viento son causadas por la fricción mecánica del aire y la superficie del rotor. Depende de varios parámetros y fenómenos y es bastante complicado de calcular con mayor precisión. Por ejemplo, depende de las propiedades del gas y las características de flujo de gas prevalecientes. En las máquinas eléctricas, el flujo de gas es mayormente turbulento en aplicaciones de alta velocidad y es laminar en aplicaciones de baja velocidad.

Perdidas parásitas

Las pérdidas parásitas se dividen en pérdidas sin carga y pérdidas de carga. Generalmente, el primero se representa por variación de permeancia y el último se representa por flujo de fuga. El origen de los armónicos espaciales se debe a la distribución no sinusoidal de los devanados, la saliencia y el efecto de ranurado en una máquina eléctrica. Los armónicos de tiempo son generados por convertidores de electrónica de potencia operados con máquinas eléctricas. La alta frecuencia de los efectos parásitos resulta en la inducción de corrientes de Foucault en las partes metálicas. El material activo de la máquina, como los conductores del estator, el núcleo del rotor y los imanes permanentes del rotor, es propenso a pérdidas parásitas. En lo que sigue, las pérdidas parásitas se introducen en función de la ubicación de las pérdidas. Se discuten las pérdidas del primer bobinado de CA, se describen las pérdidas del segundo desvío en imanes permanentes y finalmente se mencionan las pérdidas de desvío en el núcleo del rotor.

Devanado del estator

Las corrientes de Foucault se inducen en los devanados del estator en forma pelicular y efectos de proximidad. Si la fuente de variación del campo aplicado es el devanado, el fenómeno se denomina efecto pelicular. Si la fuente de variación del campo aplicado es un origen externo como los imanes del rotor, el fenómeno se denomina efecto de proximidad. Las corrientes de Foucault que se originan en la película y los efectos de proximidad en las máquinas darán lugar a una distribución de densidad de corriente no uniforme dentro del conductor, es decir, menos concentración en el centro y más concentración en la circunferencia. Como consecuencia, el área de sección transversal efectiva para la corriente será menor en comparación con la sección transversal disponible. Esto conduce a una mayor resistencia de CA y mayores pérdidas.

Imanes permanentes

Las pérdidas por corrientes de Foucault pueden inducirse en imanes permanentes en ciertas condiciones. Como se mencionó, ciertas combinaciones de números de polos de ranura en el diseño de bobinado concentrado darán como resultado, armónicos espaciales. Esta influencia es más pronunciada en máquinas de alta velocidad con alta frecuencia. F. Sahin en [35] sugiere una estimación analítica de las pérdidas por corrientes de Foucault en imanes permanentes. Para reducir estas pérdidas, una solución propuesta es la segmentación de imanes. En general, las pérdidas por pérdida de carga causadas por la variación de la permeabilidad pueden reducirse aumentando la longitud del espacio de aire o utilizando cuñas magnéticas.

Estas pérdidas son más pronunciadas en las máquinas de alta frecuencia, pero se debe mencionar que es obligatoria una selección cuidadosa de la combinación del número de polos de ranura en el bobinado concentrado.

2.7 Diseño del Generador sincrónico de imanes permanentes

A continuación, se presenta el diseño de un generador de flujo radial con imanes permanentes para aplicaciones eólicas. El diseño está orientado a que la máquina genere a partir de bajas velocidades del viento y altas turbulencias. Para lograr una mayor potencia del generador se trabaja con ondas de flujo trapezoidal, las que se logran con una adecuada geometría de los imanes permanentes.

2.7.1 Estructura

Para el diseño del generador se han seleccionado diversos materiales para cada una de las partes que lo conforman. El estator está constituido por la chapa eléctrica M250-50 (ver propiedades en el anexo 3) para reducir las pérdidas magnéticas, el rotor está hecho con acero dulce con el objetivo de mantener el campo magnético en el interior del generador y, por último, los imanes estarán hechos de neodimio, ya que tienen muy buenas propiedades magnéticas.



Fig 2.1 Componentes del Generador

2.7.2 Ventajas

Las ventajas del generador de flujo radial versus a las soluciones con máquinas de inducción tradicionales [36], son las siguientes:

- . El flujo es sinusoidal y sólo depende de la magnetización de los imanes escogidos y la velocidad de giro dada por las aspas.
- . Debido a que son imanes permanentes, se elimina la corriente de excitación por lo que la eficiencia de la máquina es superior.
- . Se evitan las conexiones rozantes o sistemas brushless(escobillas), eliminando las pérdidas asociadas a esto.
- . Permite el empleo de un gran número de polos con diámetros reducidos, lo que permite su uso en aplicaciones de baja velocidad y por lo tanto un acoplamiento directo de la turbina al generador, evitando el uso de una caja multiplicadora, eliminando las componentes de ruido, vibración, lubricación y mantenimiento que implica su incorporación al sistema.
- . La configuración de la máquina de flujo radial tiene menor peso que la máquina en configuración tradicional.
- . La configuración de los componentes y estructura permite una fácil mantención, aun cuando ésta es casi nula.
- . Posee una alta relación Potencia/Tamaño.
- . La menor cantidad de componentes y piezas permite tener un equipo más robusto y confiable.
- . Es relativamente simple diseñar unidades de mayor potencia aumentando la longitud de la máquina.
- . La principal ventaja es su simplicidad. La fabricación y montaje del rotor es más barata si se usan imanes. No necesitan mantenimiento ya que no llevan escobillas. Además, la consistencia mecánica de un PMG es muy superior, aparte de no necesitar sistemas para su excitación. Al eliminar la excitación se puede llegar a ahorrar un 20% de energía simplemente por usar imanes.

2.7.3 Principales características del diseño

Los generadores sincrónicos, que generalmente alimentan transformadores elevadores de voltaje, se diseñan para producir tensiones sinusoidales. Con este fin se construyen devanados distribuidos y acortados, con un adecuado biselado de los polos salientes, garantizando una distribución sinusoidal del flujo magnético en el entrehierro.

Luego para tener una tensión inducida casi cuadrada (trapezoidal) se deben tener presente las siguientes condiciones:

- Usar sistemas de excitación de baja permeabilidad, es decir un imán permanente de alta energía interna.
- Los imanes utilizados en la excitación deben tener una forma geométrica deseada.
- El devanado no debe tener acortamiento ni ser distribuido.
- Oblicuamiento mínimo o nulo.
- Las ranuras deben ser abiertas.

Los tres primeros favorecen la generación de una FEM casi cuadrada. Sin embargo, el tener una tensión inducida casi cuadrada en los terminales del generador implica corrientes de la misma índole, favoreciendo la aparición de torques pulsantes. Estos torques se atenúan con el aumento del número de fases y favoreciendo una FEM tipo trapezoidal lo que disminuye el efecto de los armónicos más significativos en relación a una FEM cuadrada. La generación de estas tensiones permite disponer de una máquina con un alto factor de utilización.

2.7.4 Parámetros principales del PMSG

Se establecen los parámetros principales del generador, los cuales son:

Potencia: 1,5 kW

Velocidad: 200 rpm

Voltaje de fase: 72 V/f

Frecuencia: 60 Hz

Número de fases: 3

2.7.5 Cálculo del número de polos

El número de polos se establece inicialmente en dependencia de la frecuencia deseada.

$$p = \frac{120 f_n}{n_n} \quad (1)$$

Donde:

f_n : frecuencia nominal deseada

n_n : velocidad nominal de operación

p : número de polos

Luego se escoge el número de ranuras basado en el número de polos y el arreglo del bobinado. Existe más de una combinación, cada una puede ser simulada y luego comparada para obtener el rendimiento deseado del generador, por ejemplo, para una alta potencia en relación con el volumen, se utiliza la mayor cantidad de ranuras posibles en el estator, y para un bajo par de arranque, se usan las combinaciones 5/6 o 5/4 polo/ranura. [37]

Para este diseño se escoge la relación 5/4 por lo que se toman 54 ranuras para 36 polos.

2.7.6 Imán permanente

El tipo de imán a utilizar en el diseño se selecciona de acuerdo a su disponibilidad en el mercado, su bajo costo, pequeño peso, máxima energía y alta intensidad del campo magnético.

Por sus características se escoge el imán tipo NdFeB N42 de un espesor de 2,5 mm, cuyas características se muestran en la tabla 2.1, con precio en el mercado: 0,10 usd aproximadamente en grandes cantidades (más de 1000).

Tipo de imán	Br(T)	Hc(kA/m)	BHmáx(kJ/m ³)	Tmax(Celsius)
N42	1,28	923	318	80

Tabla 2.1 Características del N42

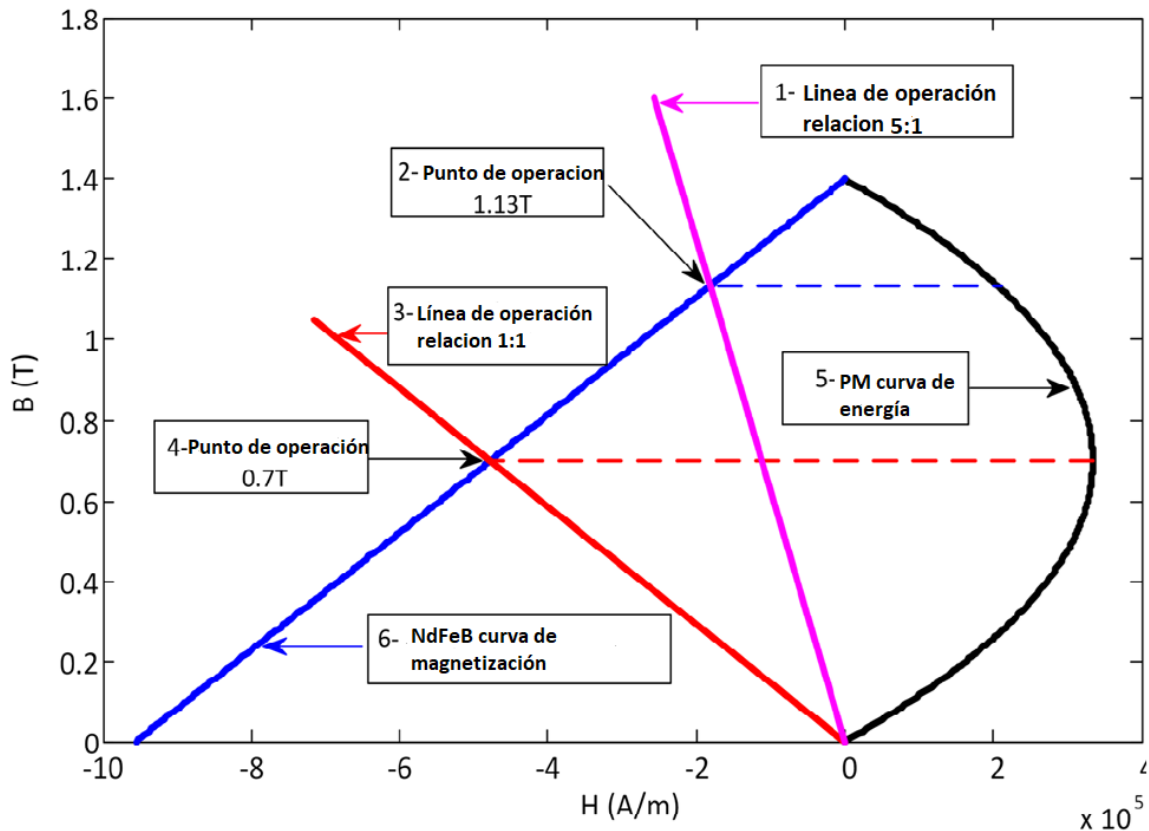


Fig 2.2 Punto de operación en la curva de magnetización del NdFeB N42

En la figura 2.2 se muestra la obtención del punto de operación del generador en la curva de magnetización del N42.

A la relación 1:1 el imán trabaja en el punto de máxima energía magnética, pero este no es el punto donde es producida la mayor potencia del generador.

El punto de operación se toma a relación 5:1 ($B_g = 1,13$ T) ya que a mayor densidad de flujo en el entrehierro (B_g) mayor es el voltaje inducido, siempre y cuando no se viole la densidad de flujo máxima en las partes de la máquina para evitar la saturación.

2.7.7 Determinación de las dimensiones básicas de la máquina

Primeramente, se determinan las dimensiones básicas del generador, las cuales son el diámetro del rotor y el largo del núcleo, teniendo en cuenta el torque por volumen y la relación largo del núcleo- radio exterior del rotor [38] Dadas por:

Torque, potencia y velocidad nominales.

$$T = \frac{P_n}{\omega_n} \quad (2)$$

Para calcular el volumen exterior del rotor se utiliza la siguiente ecuación:

$$V_o = \frac{T_n}{T_v} \quad (3)$$

Donde $T_v = 30 \text{ kNm/m}^3$, es el torque por unidad de volumen sugerido por Darell en [39]

La relación, largo del núcleo – radio exterior del rotor, está dada por:

$$\frac{L_{stk}}{RRo} = \frac{1}{3.39} \quad (4)$$

Una longitud del entrehierro típica sería 0,25 mm para máquinas de pequeña escala, 0,5 mm para media y 1 mm para gran escala, como se menciona en [38], tomando en consideración que una longitud de entrehierro mayor permite una mayor potencia y respetando la relación 4/6 espesor del imán – longitud del entrehierro según [40], se escoge 0,5 mm de longitud del entrehierro.

Para establecer los radios interno y externo del rotor y el estator se tienen:

$$dc = \frac{SRi}{1.6p} \quad (5)$$

$$RRi = RRo - dc \quad (6)$$

$$SRi = RRo + lg + lm \quad (7)$$

$$SRO = SRi + 4dc \quad (8)$$

Donde:

dc: espesor del yugo

SRi: radio interno del estator

SRO: radio externo del estator

RRi: radio interno del rotor

RRo: radio externo del rotor

lg: ancho del entrehierro

lm: espesor del imán

Lstk: largo del núcleo

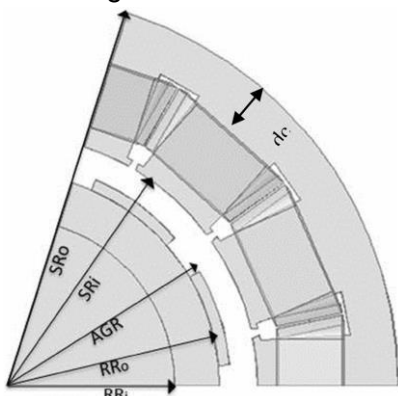


Fig 2.3 Dimensiones del generador

Luego de conocer el número de ranuras requeridas, las dimensiones de la ranura y el diente se toman para un ajuste del devanado, teniendo en cuenta el rango aceptable de densidad de flujo en el diente, el cual es: 1,2 - 1,5 T

La densidad de flujo en el diente viene dada por la ecuación:

$$B_{diente} = \frac{\Phi_{diente}}{t_s L_{stk}} = \frac{\tau_s B_g}{t_s} \quad (9)$$

Donde:

T_s : largo del diente

t_s : ancho del diente

B_g : densidad de flujo en el entrehierro

La densidad de flujo en el yugo del estator y rotor:

$$B_{nucleo} = \frac{\Phi_{nucleo}}{dc L_{stk}} = \frac{2 * radio B_g}{p * dc} \quad (10)$$

Se varía el espesor del yugo hasta que su densidad de flujo se encuentre en el rango de 1,2 - 1,5 T

2.7.8 Cálculo del devanado eléctrico y especificación del cable

El número efectivo de vueltas por bobina se calcula:

$$N_a = \frac{V_n}{\sqrt{2} * \omega_n * SRi * L_{stk} * k_w * B_g} \quad (11)$$

La cantidad de bobinas por fase:

$$N_c = \frac{Ranuras}{Q} \quad (12)$$

Donde:

k_w : factor de devanado (se escoge de acuerdo a la tabla en el anexo 2)

N_c : grupo de bobinas por fase

Q : número de fases

La corriente nominal por fase está dada por la ecuación:

$$I_n = \frac{P_n}{Q * V_n * fp} \quad (13)$$

Donde:

fp: factor de potencia

Luego se selecciona el área de la sección transversal del cable a utilizar de acuerdo a la tabla en el Anexo 1.

Los requerimientos para los materiales conductores en la construcción de máquinas eléctricas son tener la mayor conductividad posible y el menor coeficiente de temperatura. También es necesario tener una adecuada rigidez mecánica que permita su manufactura en alambres, bobinas y otras estructuras como colectores y anillos. Debido a su alta conductividad eléctrica y excelentes propiedades mecánicas, ver tabla 2.1, el cobre es ampliamente usado para la construcción de bobinados de motores, por lo que su selección es evidente.

Tabla 2.2 Propiedades del cobre y el aluminio

	Cobre	Aluminio
Peso específico kg/m ³	8.89	2.70
Punto de fusión (oC)	1083	658
Resistividad a 20oC (Ωm)	1.17e-8	2.87e-8
Coefficiente de Temperatura (α)	0.0039	0.004
Coefficiente de expansión lineal	17e-3	23e-3

2.7.9 Cálculo del voltaje inducido sin carga

El voltaje inducido en vacío se calcula:

$$V_{vacio} = \sqrt{2} * N_{tc} * N_s * \omega_n * SRi * L_{stk} * k_w * B_g \quad (14)$$

Donde:

N_{tc}: vueltas por bobina

N_s: bobinas en serie por fase

ω_n: velocidad nominal

SRi: radio interno del estator

L_{stk}: largo del núcleo

k_w: factor de devanado

B_g: intensidad del flujo magnético en el entrehierro

Las vueltas por bobina:

$$N_{tc} = N_a / N_s \quad (15)$$

Y las Bobinas en serie por fase:

$$N_s = N_c / P_a \quad (16)$$

2.7.10 Cálculo de la impedancia de fase

La resistencia de fase se calcula:

$$R_{\Phi} = R_{bobina} \frac{N_c}{P_a^2} \quad (17)$$

Donde:

R_{bobina} : resistencia de la bobina

N_c : grupo de bobinas por fase

P_a : caminos paralelos

La resistencia de la bobina:

$$R_{bob} = \frac{N_{TC} * MLT * \rho}{C_{CSA}} \quad (18)$$

Donde:

MLT: longitud media por vuelta

C_{CSA} : área de la sección transversal del cable

ρ : resistencia específica del cable

La inductancia de fase es:

$$L_{\Phi} = L_{ig} + L_{ii1} \quad (19)$$

Donde:

$$L_{ig} = \frac{\mu_0 Q^2 S R i_{stk} (0.5 N_{tc} N_c / p)^2}{\pi g} \quad (20)$$

$$L_{ii1} = \frac{\mu_0 Q^2 * 4 L_{stk} (N_{tc} N_c)^2}{S} \quad (21)$$

L_{ig} : inductancia del entrehierro

L_{ii1} : inductancia de la ranura

μ_0 : permeabilidad del aire

S: número de ranuras

La reactancia de fase es:

$$XL_{\Phi} = 2\pi f_n L_{\Phi} \quad (22)$$

Donde:

f_n : frecuencia nominal

Por último, la impedancia de fase se calcula:

$$Z_{\Phi} = \sqrt{R_{\Phi}^2 + XL_{\Phi}^2} \quad (23)$$

2.7.11 Cálculo del voltaje a plena carga

El voltaje de fase se obtiene:

$$V_{carga} = V_{vacio} - I_{\Phi} Z_{\Phi} \quad (24)$$

Si el resultado difiere del voltaje nominal definido, se requiere una optimización para alcanzarlo. Esto se logra cambiando algunos parámetros como son: el número de vueltas por bobina, el área de la sección transversal del conductor, el largo del núcleo y el radio del estator y rotor.

2.7.12 Cálculo de la regulación de voltaje, pérdidas y eficiencia

El porcentaje de regulación de voltaje se calcula:

$$V_{reg} = \frac{V_{vacio} - V_{carga}}{V_{vacio}} * 100 \quad (25)$$

Las pérdidas totales:

$$Perd_{totales} = P_{cu} + P_{friccion} + P_{nucleo} \quad (26)$$

Donde:

$$P_{cu} = Q I_{\Phi}^2 R_{\Phi} \quad (27)$$

$$P_{friccion} = 0.005 * P_n \quad (28)$$

$$P_{nucleo} = 0.005 * P_n \quad (29)$$

P_{cu} : pérdidas de cobre

$P_{friccion}$: pérdidas por fricción

P_{nucleo} : pérdidas de núcleo

La eficiencia se determina:

$$\eta = \frac{P_{sal}}{P_{ent}} * 100 \quad (30)$$

Donde:

$$P_{sal} = Q * V_{carga} * I_{carga} * fp \quad (31)$$

$$P_{ent} = P_{sal} + Perd_{totales} \quad (32)$$

P_{ent} : potencia de entrada

P_{sal} : potencia de salida

2.8 Conclusiones parciales

Después de realizados los cálculos correspondientes al diseño propuesto, del generador de 1.5 kW de flujo radial, con imanes permanentes, se obtuvieron los siguientes resultados, mostrados en la tabla 2.3.

Tabla 2.3 Principales especificaciones del diseño

Potencia nominal	1,5 kW
Velocidad nominal	200 rpm
Voltaje nominal	72 V
Frecuencia	60 Hz
Factor de potencia	0.92
Número de fases	3
Número de polos	36
Número de ranuras	54
Factor de devanado	0.866
Torque nominal	55.9 Nm
Volumen del rotor	0,0023 m ³
Longitud del núcleo	40 mm
Radio exterior del rotor	135 mm
Radio interior del rotor	133 mm
Radio exterior del estator	148 mm
Radio interior del estator	138 mm
Densidad de flujo en el entrehierro	1,13 T
Ancho del entrehierro	0,5 mm
Espesor del imán	2,5 mm
Bobinas por fase	36
Vueltas por bobina	450
Corriente nominal	7,71 A
Área de la sección transversal del conductor	0,518 mm ²
Impedancia de fase	2.44 ohm
Pérdidas totales	168.3 W
Eficiencia	87.4%

La potencia de salida entregada por un generador depende no solo de la eficiencia interna del mismo, sino del torque que induce en el rotor la interacción de los campos magnéticos de los imanes permanentes y el originado al circular corriente por el bobinado inducido.

La máquina diseñada se concibe para trabajar a baja velocidad y altas turbulencias del viento con un buen rendimiento, también se logra que este generador, alimentando a puentes rectificadores, opere con factor de potencia muy próximo a uno.

Al elegir un adecuado tamaño y forma para el imán permanente, se minimiza el torque pulsante "cogging torque" que se produce al interactuar los polos del rotor y la estructura ferromagnética del estator.

El contar con máquinas que generen a partir de una baja velocidad de la fuente motriz, presenta la ventaja de poder prescindir de elementos de transmisión mecánica en base a engranajes para elevar la velocidad.

CONCLUSIONES

La eficiencia energética actualmente busca nuevas propuestas para la generación de energía eléctrica por medio de la energía renovable. Entre estos casos, la energía eólica representa una fuente importante en desarrollo. Por este motivo, realizar investigaciones que permitan obtener la mayor eficiencia de este recurso es de vital importancia actualmente.

Se ha logrado diseñar un generador de 1,5kW con características fiables, fácil accesibilidad de los componentes y operación. El diseño con imanes permanentes extrae la máxima potencia con la mínima complejidad.

Las turbinas con rotores de eje vertical tienen la ventaja fundamental de que no precisan ningún sistema de orientación activo para captar la energía del viento. Debido a su configuración poseen mejores prestaciones para ser integrados en edificios, producen menor nivel sonoro, menor impacto visual y mejor comportamiento ante flujo turbulento. Por lo que se propone la utilización del mismo para este diseño.

Al elegir un adecuado tamaño y forma para el imán permanente, se minimiza el torque pulsante "cogging torque" que se produce al interactuar los polos del rotor y la estructura ferromagnética del estator.

RECOMENDACIONES

-Simular, con el uso de Matlab o algún otro software, el comportamiento de este generador para su estudio y aplicación.

-Hacer llegar esta propuesta de diseño a los organismos interesados para su análisis, construcción y explotación, contribuyendo así, al desarrollo de energías renovables en el país.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] WWEA, "Small Wind World Report Update," 2013.
- [2] *Requisitos de diseño para aerogeneradores*, 2006.
- [3] Bahaj and P. James. (2007) Urban energy generation: the added value of photovoltaics in social housing. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2121-2136.
- [4] N. Mithraratne. (2009) Roof-top wind turbines for microgeneration in urban houses in New Zealand. *J. Energy and Buildings*. 1013-1018.
- [5] EMSD. (2014, mayo). *List of Small Wind Turbines Projects*. Available: http://re.emsd.gov.hk/english/wind/small/small_ep.html
- [6] I. Cruz. (2012). *La integración urbana de los mini aerogeneradores*. Available: <http://minieolica.ciemat.es>
- [7] L. Lu and K. Y. Ip. (2009) Investigation on the feasibility and enhancement methods of wind power utilization in high-rise buildings of Hong Kong. *J. Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 450-461.
- [8] D. Uygun, Y. Cetinceviz, and G. Bal. (2016) Optimization study on a 0.6 kW PMSG for VAWTs and determination of open and short circuit performances by using external circuit method. *Int J Hydrogen Energy*. 12535-12545.
- [9] C. Guerroudj, R. Saou, A. Boulayoune, M. E.-h. Zaim, and L. Moreau. (2016, mayo). *Performance analysis of Vernier slotted doubly salient permanent magnet generator for wind power*. Available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.07.043>
- [10] Cubadebate. (2017, mayo). *Cuba avanza en el uso de energías renovables*. Available: <http://www.cubadebate.cu/especiales/2017/02/22/cuba-avanza-en-el-uso-de-energias-renovables-video-e-infografia/>
- [11] P. B. Rosenmann, "Diseño de aerogeneradores con imanes permanentes para aplicaciones en electrificación rural," FACULTAD DE CIENCIAS FISICAS Y MATEMATICAS DEPARTAMENTO DE INGENIERIA ELECTRICA, Universidad de Chile, 2007.
- [12] Wikipedia, "Energía Eólica," in *Wikipedia*, ed, 2019.
- [13] A.G. Drachmann, "Heron's Windmill," *Centaurus*, vol. 7, 1961.
- [14] D. R. H. Ahmad Y Hassan, "Islamic Technology: An illustrated history," *Cambridge University Press*, 1986.
- [15] Dietrich Lohrmann, "Von der östlichen zur westlichen Windmühle," *Archiv für Kulturgeschichte*, vol. 77, pp. 1-30, 1995.
- [16] C. Rufin. (2015) *Revista Harvard review of latin america*.
- [17] I. d. M. (INSMET). (2019, *Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente (CITMA)*).
- [18] C. M. Figueredo, "La transición energética en Cuba," 2017.
- [19] MINEM, "Ministerio de Energía y Minas," ed. Cuba, 2019.
- [20] O. d. E. R. p. A. L. y. e. Caribe, "Programa de capacitación en energías renovables,," 2014.
- [21] C. M. M. a. J. S. Velez, "Modelacion de un aerogenerador de iman permanente y su controlador," Universidad Politecnica Salesiana, Cuenca, 2015.
- [22] S. A. N. Ortega, "Predicción de corto plazo de potencia generada en un aerogenerador usando modelo sarima," Memoria para optar al título de Ingeniero Civil Eléctrico, Universidad de Chile, 2011.
- [23] T. Ackermann. (2005, *Wind Power in Power Systems*).

- [24] G. Anders, "Design of Direct – driven Permanent – magnet Generators for Wind Turbines," Technical Report No 292. the School of Electrical and Computer Engineering CHALMERS UNIVERSITY OF TECHNOLOGY, 1996.
- [25] D. Svechkarenko., "On design and analysis of a novel transverse flux generator for direct driven wind application," PhD thesis, Royal Inst. of Tech., Sweden, 2010.
- [26] A. N. Basanta, "Ventajas de los motores de flujo axial," 2001.
- [27] Y. C. Gago, "Generadores de imanes permanentes para aplicaciones eólicas," Trabajo de Diploma, UCLV, Santa Clara, 2011.
- [28] P. T. C. Sadarangani F. Magnussen, "Performance evaluation of permanent magnet synchronous machines with concentrated and distributed windings including the effect of field weakening," *In PEMD*, vol. 2, 2004.
- [29] N. B. e. al., "Design considerations on fractional slot fault tolerant synchronous motors.," *In IEMDC*, 2005.
- [30] F. Libert., "Design, optimisation and comparison of permanent magnet motors for a low speed direct driven mixer," Lic. thesis, Royal Inst. of Tech., Sweden, 2004.
- [31] F. L. M. Degner A. Munoz, "Evaluation of interior pm and surface pm synchronous machines with distributed and concentrated windings," *In IECON*, 2008.
- [32] C. Sadarangani., "Electrical machines: design and analysis of induction and permanent magnet motors.," Stockholm, Sweden, Royal Inst. of Tech., 2006.
- [33] D. Svechkarenko., "Thermal modeling and measurements of permanent magnet machines.," Master's thesis, Royal Inst. of Tech, Sweden, 2004.
- [34] G. R. S. R. Bonert C. Mi, "Modeling of iron losses of permanent magnet synchronous motors," *In IEEE trans. on Industrial Applications*, vol. 39, 2003.
- [35] F. Sahin., "Design and development of a high speed axial flux permanent magnet machine," PhD thesis, Eindhoven Univ. of Tech., The Netherlands, 2001.
- [36] A. W. Rogel & Rodríguez. (2000) Diseño de un aerogenerador de flujo axial con imanes permanentes para aplicaciones eólicas. *Revista Facultad de Ingeniería*.
- [37] Q. R. Zhang X, "Pole number selection strategy of low speed multiple-pole permanent magnet synchronous machines," presented at the Proceedings of the 2013 IEEE international electric machines and drives conference, 2013.
- [38] M. T. Hendershot JR, "Design of brushless permanentmagnet motors," presented at the 1st edn. Clarendon Press, 1994.
- [39] D. DG, "Design requirements for brushless permanent magnet generators for use in small renewable energy systems," presented at the IECON proceedings (industrial electronics conference), 2007.
- [40] Y. S.-N. Hsiao C-Y, Hwang J-C, "Design of high performance permanent-magnet synchronous wind generators," *Energies*, vol. 7, 2014.

ANEXOS

Anexo 1. Valores estándares de calibres de conductores(AWG).

AWG	Diameter [inches]	Diameter [mm]	Area [mm ²]	Resistance [Ohms / 1000 ft]	Resistance [Ohms / km]	Max Current [Amperes]	Max Frequency for 100% skin depth
0000 (4/0)	0.46	11.684	107	0.049	0.16072	302	125 Hz
000 (3/0)	0.4096	10.40384	85	0.0618	0.202704	239	160 Hz
00 (2/0)	0.3648	9.26592	67.4	0.0779	0.255512	190	200 Hz
0 (1/0)	0.3249	8.25246	53.5	0.0983	0.322424	150	250 Hz
1	0.2893	7.34822	42.4	0.1239	0.406392	119	325 Hz
2	0.2576	6.54304	33.6	0.1563	0.512664	94	410 Hz
3	0.2294	5.82676	26.7	0.197	0.64616	75	500 Hz
4	0.2043	5.18922	21.2	0.2485	0.81508	60	650 Hz
5	0.1819	4.62026	16.8	0.3133	1.027624	47	810 Hz
6	0.162	4.1148	13.3	0.3951	1.295928	37	1100 Hz
7	0.1443	3.66522	10.5	0.4982	1.634096	30	1300 Hz
8	0.1285	3.2639	8.37	0.6282	2.060496	24	1650 Hz
9	0.1144	2.90576	6.63	0.7921	2.598088	19	2050 Hz
10	0.1019	2.58826	5.26	0.9989	3.276392	15	2600 Hz
11	0.0907	2.30378	4.17	1.26	4.1328	12	3200 Hz
12	0.0808	2.05232	3.31	1.588	5.20864	9.3	4150 Hz
13	0.072	1.8288	2.62	2.003	6.56984	7.4	5300 Hz
14	0.0641	1.62814	2.08	2.525	8.282	5.9	6700 Hz
15	0.0571	1.45034	1.65	3.184	10.44352	4.7	8250 Hz
16	0.0508	1.29032	1.31	4.016	13.17248	3.7	11 k Hz
17	0.0453	1.15062	1.04	5.064	16.60992	2.9	13 k Hz
18	0.0403	1.02362	0.823	6.385	20.9428	2.3	17 kHz
19	0.0359	0.91186	0.653	8.051	26.40728	1.8	21 kHz
20	0.032	0.8128	0.518	10.15	33.292	1.5	27 kHz
21	0.0285	0.7239	0.41	12.8	41.984	1.2	33 kHz
22	0.0254	0.64516	0.326	16.14	52.9392	0.92	42 kHz
23	0.0226	0.57404	0.258	20.36	66.7808	0.729	53 kHz
24	0.0201	0.51054	0.205	25.67	84.1976	0.577	68 kHz
25	0.0179	0.45466	0.162	32.37	106.1736	0.457	85 kHz
26	0.0159	0.40386	0.129	40.81	133.8568	0.361	107 kHz
27	0.0142	0.36068	0.102	51.47	168.8216	0.288	130 kHz

AWG	Diameter [inches]	Diameter [mm]	Area [mm ²]	Resistance [Ohms / 1000 ft]	Resistance [Ohms / km]	Max Current [Amperes]	Max Frequency for 100% skin depth
28	0.0126	0.32004	0.081	64.9	212.872	0.226	170 kHz
29	0.0113	0.28702	0.0642	81.83	268.4024	0.182	210 kHz
30	0.01	0.254	0.0509	103.2	338.496	0.142	270 kHz
31	0.0089	0.22606	0.0404	130.1	426.728	0.113	340 kHz
32	0.008	0.2032	0.032	164.1	538.248	0.091	430 kHz
33	0.0071	0.18034	0.0254	206.9	678.632	0.072	540 kHz
34	0.0063	0.16002	0.0201	260.9	855.752	0.056	690 kHz
35	0.0056	0.14224	0.016	329	1079.12	0.044	870 kHz
36	0.005	0.127	0.0127	414.8	1360	0.035	1100 kHz
37	0.0045	0.1143	0.01	523.1	1715	0.0289	1350 kHz
38	0.004	0.1016	0.00797	659.6	2163	0.0228	1750 kHz
39	0.0035	0.0889	0.00632	831.8	2728	0.0175	2250 kHz
40	0.0031	0.07874	0.00501	1049	3440	0.0137	2900 kHz

Anexo 2. Valores de los factores de distribución de devanados trifásico.

Armónico	q (ranuras por polo y fase)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	1.000	0.9659	0.9598	0.9577	0.9567	0.9561	0.9558	0.9556	0.9555	0.9554
3	1.000	0.7071	0.6667	0.6533	0.6472	0.6440	0.6420	0.6407	0.6399	0.6392
5	1.000	0.2588	0.2176	0.2053	0.2000	0.1972	0.1955	0.1944	0.1937	0.1932
7	1.000	-0.2588	-0.1774	-0.1576	-0.1494	-0.1453	-0.1429	-0.1413	-0.1403	-0.1395
9	1.000	-0.7071	-0.3333	-0.2706	-0.2472	-0.2357	-0.2291	-0.2250	-0.2222	-0.2203
11	1.000	-0.9659	-0.1774	-0.1261	-0.1095	-0.1017	-0.0974	-0.0948	-0.0930	-0.0918
13	1.000	-0.9659	0.2176	0.1261	0.1022	0.0919	0.0864	0.0831	0.0810	0.0795
15	1.000	-0.7071	0.6667	0.2706	0.2000	0.1725	0.1586	0.1503	0.1450	0.1414
17	1.000	-0.2588	0.9598	0.1576	0.1022	0.0837	0.0748	0.0697	0.0665	0.0643
19	1.000	0.2588	0.9598	-0.2053	-0.1095	-0.0837	-0.0722	-0.0660	-0.0622	-0.0596
21	1.000	0.7071	0.6667	-0.6533	-0.2472	-0.1725	-0.1429	-0.1274	-0.1182	-0.1122
23	1.000	0.9659	0.2176	-0.9577	-0.1494	-0.0919	-0.0722	-0.0626	-0.0571	-0.0536

Anexo 3. Propiedades mecánicas y físicas típicas de las chapas eléctricas.

Grade EN 10106	Conventional density kg/dm ³	Resistivity $\mu\Omega\text{cm}$	Yield strength N/mm ²	Tensile strength N/mm ²	Young's Modulus (E)		Hardness HV5 (VPN) -
					RD N/mm ²	TD N/mm ²	
M235-35A	7,60	59	460	580	185 000	200 000	220
M250-35A	7,60	55	455	575	185 000	200 000	215
M270-35A	7,65	52	450	565	185 000	200 000	215
M300-35A	7,65	50	370	490	185 000	200 000	185
M330-35A	7,65	44	300	430	200 000	220 000	150
M700-35A*	7,80	30	290	405	210 000	220 000	125
M250-50A	7,60	59	475	590	175 000	190 000	220
M270-50A	7,60	55	470	585	175 000	190 000	220
M290-50A	7,60	55	465	580	185 000	200 000	220
M310-50A	7,65	52	385	500	185 000	200 000	190
M330-50A	7,65	50	375	495	185 000	200 000	185
M350-50A	7,65	44	305	450	200 000	210 000	165
M400-50A	7,70	42	305	445	200 000	210 000	160
M470-50A	7,70	39	300	435	200 000	210 000	155
M530-50A	7,70	36	295	430	200 000	210 000	150
M600-50A	7,75	30	285	405	210 000	220 000	125
M700-50A	7,80	25	285	405	210 000	220 000	125