



**UNIVERSIDAD CENTRAL "MARTA ABREU" DE LAS VILLAS**

**VERITATE SOLA NOBIS IMPONETUR VIRILISTOGA. 1948**

**Facultad de Ingeniería Eléctrica**

**Departamento de Electroenergética**

## **TRABAJO DE DIPLOMA**

**Generadores de imanes permanentes para  
aplicaciones eólicas**

**Autor: Yosman Cruz Gago**

**Tutor: Msc, Arián Ramos Martínez**

**Santa Clara**

**2011**

**"Año 53 de la Revolución"**

**CON SU ENTRAÑABLE TRANSPARENCIA**



**Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas**

**Facultad de Ingeniería Eléctrica**

**Departamento de Electroenergética**



## **TRABAJO DE DIPLOMA**

### **Generadores de imanes permanentes para aplicaciones eólicas**

**Autor: Yosman Cruz Gago**

**Tutor: Msc, Arián Ramos Martínez**

**Dpto. de Electroenergética**

**Facultad de Ing. Eléctrica. UCLV.**

**E-mail: [arian@uclv.edu.cu](mailto:arian@uclv.edu.cu)**

**Santa Clara**

**2011**

**"Año 53 de la Revolución"**



Hago constar que el presente trabajo de diploma fue realizado en la Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas como parte de la culminación de estudios de la especialidad de Ingeniería en Eléctrica, autorizando a que el mismo sea utilizado por la Institución, para los fines que estime conveniente, tanto de forma parcial como total y que además no podrá ser presentado en eventos, ni publicados sin autorización de la Universidad.

---

Firma del Autor

Los abajo firmantes certificamos que el presente trabajo ha sido realizado según acuerdo de la dirección de nuestro centro y el mismo cumple con los requisitos que debe tener un trabajo de esta envergadura referido a la temática señalada.

---

Firma del Autor

---

Firma del Jefe de Departamento  
donde se defiende el trabajo

---

Firma del Responsable de  
Información Científico-Técnica

## PENSAMIENTO

*“En la tierra hace falta personas que trabajen más y critiquen menos, que construyan más y destruyan menos, que prometan menos y resuelvan más, que esperen recibir menos y dar más, que digan mejor AHORA que MAÑANA”.*

*Ernesto Guevara.*

## DEDICATORIA

*A mis padres por el apoyo que me han brindado a lo largo de mi vida, por el amor que siempre me han dado, por estar siempre conmigo cuando los necesitaba.*

## AGRADECIMIENTOS

*A mis hermanos por todos los momentos agradables que hemos pasados juntos.*

*A mis primos, especialmente a Yudanís por haberme ayudado con la tesis.*

*A mis tíos por toda la ayuda que me dieron.*

*A mi tutor Arián, por su apoyo y ayuda, sin la cual esta tesis no hubiera estado lista.*

*A todos los profesores que durante la carrera me guiaron y aconsejaron por el camino correcto.*

*A todos mis compañeros del aula por haberme soportado durante estos cinco años.*

*A mi papá, por enseñarme siempre el camino correcto, por sus explicaciones “científicas” que me incentivaron a estudiar esta carrera.*

*A mi madre, por confiar en mí, por demostrarme que nada es imposible, por hacer lo impensable para que yo estudiara, por estar ahí siempre que la necesitaba,*

*MUCHAS GRACIAS.*

## **TAREA TÉCNICA**

Trabajo de diploma: Título a desarrollar por el diplomante: “Generadores de imanes permanentes para aplicaciones eólicas”.

1. Búsqueda bibliográfica y organización de información referente al tema de las máquinas de imanes permanentes.
2. Seleccionar el tipo de máquina de imanes permanentes más propicio para ser utilizado para la generación eólica.
3. Determinar los requisitos principales a cumplir por un generador de imanes permanentes para aplicaciones eólicas.
4. Determinar las ventajas de las máquinas de imanes permanentes con respecto a las máquinas convencionales utilizadas en los aerogeneradores.
5. Realizar el diseño de un generador de imanes permanentes para aplicaciones eólicas.
6. Escritura del Trabajo.

---

Firma del Autor

---

Firma del Tutor

## **RESUMEN**

Este trabajo aborda la teoría y aspectos generales de los generadores de imanes permanentes. Se realiza el diseño de un generador sincrónico de flujo axial de imanes permanentes para aplicaciones eólicas, para el cual se buscó y organizó información referente al tema, para contribuir al desarrollo de este tipo de máquinas en el país por los organismos interesados.

**TABLA DE CONTENIDOS**

|                                                                                |     |
|--------------------------------------------------------------------------------|-----|
| PENSAMIENTO .....                                                              | i   |
| DEDICATORIA.....                                                               | ii  |
| AGRADECIMIENTOS .....                                                          | iii |
| TAREA TÉCNICA .....                                                            | v   |
| RESUMEN .....                                                                  | vi  |
| INTRODUCCIÓN .....                                                             | 1   |
| CAPÍTULO 1. FUNDAMENTOS TEÓRICOS DE LOS GENERADORES DE IMANES PERMANENTES..... | 4   |
| 1.1    Introducción .....                                                      | 4   |
| 1.2    Características de los imanes permanentes.....                          | 4   |
| 1.3    Generador sincrónico de imanes permanentes (GSIP) .....                 | 9   |
| 1.3.1    Principio de funcionamiento del GSIP .....                            | 11  |
| 1.3.2    Topologías de GSIP .....                                              | 11  |
| 1.3.3    Generador sincrónico de flujo axial .....                             | 17  |

|                                                                                          |                                                             |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|----|
| 1.4                                                                                      | Conclusiones parciales .....                                | 18 |
| CAPÍTULO 2. DISEÑO DE UN GENERADOR SINCRÓNICO DE IMANES PERMANENTES DE FLUJO AXIAL ..... |                                                             |    |
| 19                                                                                       |                                                             |    |
| 2.1                                                                                      | Factores que afectan el diseño .....                        | 19 |
| 2.1.1                                                                                    | Factores Económicos.....                                    | 19 |
| 2.1.2                                                                                    | Materiales .....                                            | 20 |
| 2.1.3                                                                                    | Especificaciones .....                                      | 20 |
| 2.1.4                                                                                    | Factores Especiales.....                                    | 20 |
| 2.2                                                                                      | Áreas que involucra el diseño de una máquina eléctrica..... | 21 |
| 2.2.1                                                                                    | Eléctrica .....                                             | 21 |
| 2.2.2                                                                                    | Magnéticas.....                                             | 21 |
| 2.2.3                                                                                    | Dieléctricas .....                                          | 21 |
| 2.2.4                                                                                    | Térmicas .....                                              | 21 |
| 2.2.5                                                                                    | Mecánicas.....                                              | 22 |
| 2.3                                                                                      | Materiales Eléctricos y Magnéticos .....                    | 22 |
| 2.3.1                                                                                    | Materiales Conductores .....                                | 22 |
| 2.3.2                                                                                    | Materiales Aislantes .....                                  | 23 |
| 2.4                                                                                      | Diseño del Generador Sincrónico de Flujo Axial .....        | 24 |
| 2.4.1                                                                                    | Principales características del diseño.....                 | 25 |
| 2.4.2                                                                                    | Determinación del número de fases .....                     | 27 |

|                                     |                                                               |    |
|-------------------------------------|---------------------------------------------------------------|----|
| 2.4.3                               | Oblicuamiento .....                                           | 27 |
| 2.4.4                               | Cálculo de la inductancia de dispersión .....                 | 27 |
| 2.4.5                               | Puente rectificador, conmutación de corriente.....            | 28 |
| 2.4.6                               | Número de vueltas del devanado del estator .....              | 28 |
| 2.4.7                               | Tensión inducida.....                                         | 29 |
| 2.4.8                               | Comparación de conexiones de rectificadores y devanados ..... | 32 |
| 2.4.9                               | Cálculo de las corrientes efectivas por fase .....            | 33 |
| 2.4.10                              | Forma de las tensiones inducidas .....                        | 35 |
| 2.4.11                              | Conmutación.....                                              | 36 |
| 2.5                                 | Pérdidas de potencia .....                                    | 37 |
| 2.5.1                               | Pérdidas en el hierro .....                                   | 38 |
| 2.5.2                               | Pérdidas en el cobre .....                                    | 38 |
| 2.6                                 | Especificaciones y parámetros del diseño .....                | 39 |
| 2.7                                 | Análisis de los resultados.....                               | 40 |
| 2.8                                 | Conclusiones del capítulo .....                               | 41 |
| CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES..... |                                                               | 43 |
| Conclusiones.....                   |                                                               | 43 |
| Recomendaciones.....                |                                                               | 43 |
| REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....    |                                                               | 45 |
| Anexo I                             | AWG estándar .....                                            | 47 |

|          |                                                                                                                                        |    |
|----------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Anexo II | Resumen de dimensiones y datos relevantes del diseño del Generador de Flujo Axial de Imanes Permanentes para aplicaciones eólicas..... | 49 |
|----------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|

## INTRODUCCIÓN

Durante la última década la tecnología asociada a la industria eólica ha evolucionado enormemente mejorando la calidad de la energía eléctrica entregada a las redes interconectadas, aumentando la confiabilidad de los sistemas de generación, y reduciendo el costo de cada kWh. El parque eólico mundial instalado ha crecido a una tasa promedio del 27% anual durante los últimos 10 años. Muchos países ya tienen importantes industrias eólicas que producen y exportan equipamiento, prestan servicios o generan electricidad a partir del viento [12].

La Unión Europea es el espacio político que se ha situado en la cabeza del desarrollo de la energía eólica, inicialmente movida por intereses ambientales y en la actualidad por la realidad tecnológica y comercial. Se prevee que para el año 2012, la potencia eólica instalada en los países miembros sobrepase los 28.000 MW, lo que supondría el 2% de la generación de electricidad en la Unión Europea [1].

En lo que respecta a los generadores impulsados por turbinas eólicas, las máquinas de imanes permanentes están siendo utilizadas cada vez en mayor medida y para potencias más grandes. Esto es debido principalmente al desarrollo reciente de imanes de alta energía, como por ejemplo los de Neodimio-Hierro-Boro (Nd-Fe-B) o Samario-Cobalto (Sm-Co).

Los Generadores Sincrónicos de Imanes Permanentes (GSIP) poseen, en general, un alto rendimiento y una alta densidad de potencia [13].

Entre los GSIP de media y alta potencia, directamente acoplados, que se han empleado o se emplean en la generación de energía a partir del viento, destacan los desarrollados por las empresas: Genesys y Jeumon.

En Cuba la problemática de la generación de electricidad 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 ineludiblemente repercusión social, pues el desarrollo de estos equipos además de poseer un variado uso industrial están vinculados al Programa Nacional de Ciencia y Técnica, donde el partido y los organismos de administración del estado centran todo su esfuerzo.

Este tipo de generador se viene difundiendo desde hace unos años a partir del desarrollo que ha alcanzado la electrónica, lo que ha permitido el uso de estos equipos por organismos como el MINAZ, MINAGRI y el MINBAS.

La producción de estos equipos actualmente no se ha desarrollado en nuestro país dada las limitaciones que existían en su uso y explotación. Esta problemática condujo a la formulación del problema de investigación: ¿cómo contribuir al desarrollo de la generación eólica a través del diseño de generadores de imanes permanentes? Para dar respuesta a este problema de investigación se lleva a cabo este trabajo de diploma que tiene como objetivo general el siguiente:

Realizar el diseño de un generador de imanes permanentes factible para ser utilizado en la generación eólica.

Para cumplimentar dicho objetivo general se definió un conjunto de objetivos específicos, estos son:

1. Búsqueda bibliográfica y organización de información referente al tema de las máquinas de imanes permanentes.
2. Seleccionar el tipo de máquina de imanes permanentes más propicio para ser utilizado para la generación eólica.
3. Determinar los requisitos principales a cumplir por un generador de imanes permanentes para aplicaciones eólicas.

4. Determinar las ventajas de las máquinas de imanes permanentes con respecto a las máquinas convencionales utilizadas en los aerogeneradores.
5. Realizar el diseño de un generador de imanes permanentes para aplicaciones eólicas.

El aporte de este trabajo es que brinda una metodología de diseño para este tipo de generadores.

El cuerpo del trabajo se dividió en dos capítulos que dan respuestas a los objetivos específicos. El capítulo uno aborda toda la concepción teórica en relación con los generadores de imanes permanentes. En el capítulo dos se realiza el diseño eléctrico del generador y se presentan un conjunto de tablas que resume los principales resultados obtenidos, además se hace un análisis de estos.

La sección conclusiva contiene las conclusiones, recomendaciones, las referencias bibliográficas y los anexos.

Para analizar la temática abordada en este trabajo se consultaron diferentes fuentes documentales lo que posibilitó una mejor comprensión del tema y con ello una estrategia a seguir. Para la parte teórica se tomaron como referencia principalmente lo expuesto en los textos “Introducción al Diseño de las Máquinas Eléctricas” de Juan L. Tapia y “Control de un sistema de generación eólica de velocidad variable con generador sincrónico multipolar de imanes permanentes acoplados a la red” de Mónica Sánchez Chinchilla. El diseño del generador se efectúa a partir de lo planteado en “Diseño y Construcción de un Generador con Flujo Axial y Estator Central ” de Juan L. Tapia. Otros aspectos se toman de diversos artículos y textos que aparecen referenciados en el cuerpo del trabajo.

## **CAPÍTULO 1. FUNDAMENTOS TEÓRICOS DE LOS GENERADORES DE IMANES PERMANENTES**

### **1.1. Introducción.**

Los generadores sincrónicos de imanes permanentes (GSIP) son cada vez más utilizados en el ámbito mundial para múltiples aplicaciones y especialmente para la generación de energía eólica a velocidad variable debido al desarrollo espectacular que han tenido las aleaciones de alto magnetismo remanente (Nd-Fe-B o Sa-Co). La construcción de este tipo de generadores va desde las pequeñas potencias hasta los MW.

Su característica principal es el uso de imanes permanentes en vez de los electroimanes para crear el campo magnético de excitación del generador.

### **1.2. Características de los imanes permanentes.**

Los imanes permanentes son materiales que presentan un campo magnético remanente sin requerir energía externa luego de su magnetización inicial, esta característica permite que sean utilizados en una gran variedad de aplicaciones, en especial la construcción de máquinas eléctricas. Su evolución ha sido creciente en los últimos 50 años, en cuanto a los grados de calidad de sus propiedades. Las investigaciones sobre la utilización de nuevos materiales, en la construcción de imanes permanentes, han sido importantes debido a que los dispositivos que los requieren deben ser más compactos y de mayor eficiencia.

El ordenamiento paralelo de los momentos magnéticos atómicos, en la estructura cristalina, se extiende a un volumen limitado, pero más bien indefinido del cristal ferromagnético. La razón de esta limitación no se conoce por completo, pero se tienen evidencias experimentales que demuestran que, incluso cuando un cristal no está

imantado en conjunto, existen en él regiones diminutas próximas entre sí, llamadas dominios, que están totalmente imanadas. Sin embargo, cada una de estas regiones tiene su momento magnético en una dirección diferente y la resultante de todos ellos, extendida a todo el cristal, es nula. La teoría de los dominios ha sido demostrada mediante fotografías de materiales ferromagnéticos, obtenidas a través de microscopios electrónicos. Esta teoría nos permite comprender los fenómenos ferromagnéticos [7].

En un material ferromagnético desmagnetizado, los dominios están orientados en forma desordenada según los seis sentidos, como se indica en la figura 1.1 a, obteniéndose un campo magnético resultante nulo. Cuando se aplica un campo magnético externo en uno de los seis sentidos, los dominios cuyos momentos magnéticos tienen los otros cinco sentidos cambian su orientación, de manera que quedan dirigidos en la dirección del campo aplicado, como se muestra en la figura 1.1 b.

Un hecho particular es la preferencia de ciertas direcciones de orientación de los dominios, es decir, se obtiene mayor facilidad en orientarse en algunas direcciones más que en otras, esta propiedad se conoce con el nombre de anisotropía de los materiales magnéticos.

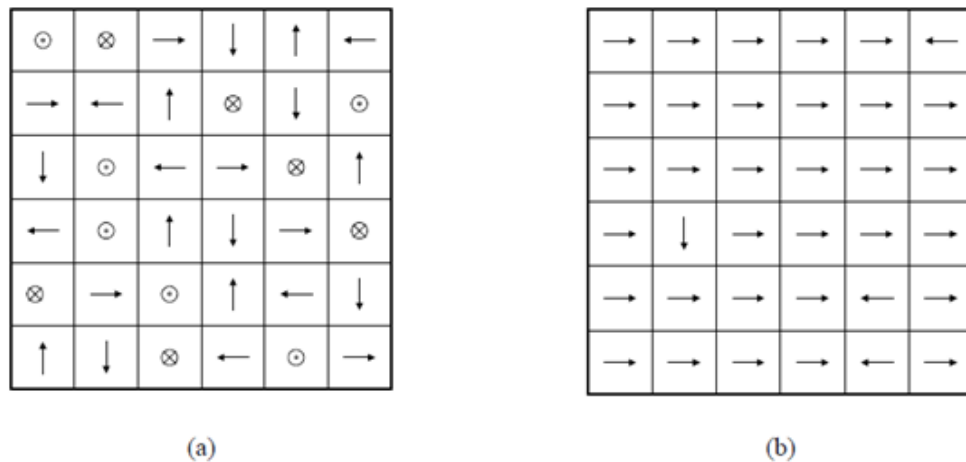


Figura 1.1. Estructura de un material ferromagnético: (a) dominios con orientación aleatoria: (b) dominios alineados por la acción de un campo externo.

La característica principal de los imanes permanentes, es que están constituidos de manera que los momentos magnéticos de sus dominios se pueden reorientar con relativa dificultad, por lo que requieren mayor energía para orientar sus dominios que los

materiales ferromagnéticos comunes. Para aumentar la fuerza coercitiva de los dominios se obtienen mezclas de materiales ferromagnéticos con cerámicas. Es así que cuando se magnetiza un imán permanente, este permanece con sus dominios alineados, sujetos por la estructura rígida de las cerámicas. También la estructura de los imanes permanentes hace que su magnetización inicial requiera la aplicación de un intenso campo magnético [7].

La dificultad de reorientación de los dominios en los imanes permanentes se refleja en sus curvas de histéresis, las que resultan más amplias que en los materiales ferromagnéticos comunes. En la figura 1.2 se muestra el lazo de histéresis de un imán permanente contrastado con un lazo de histéresis de un material ferromagnético común.

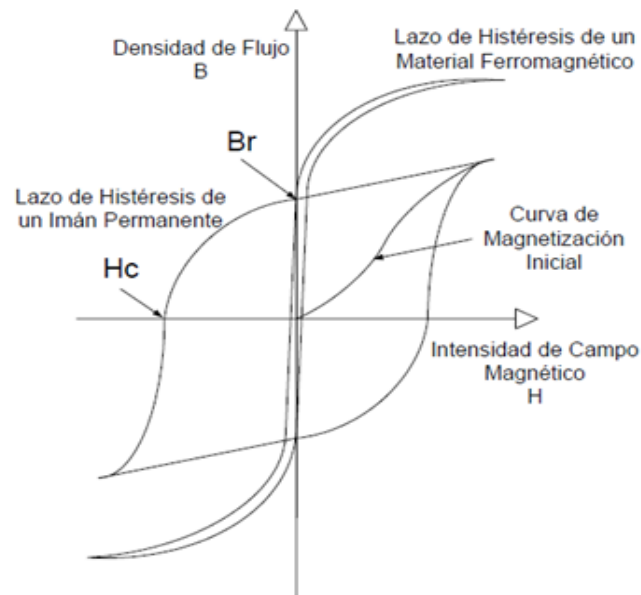


Figura 1.2. Comparación de lazos de histéresis de un material ferromagnético comercial y de un imán permanente.

Los imanes permanentes poseen varias propiedades que son presentadas mediante técnicas gráficas debido a la no linealidad existente en la mayoría de los materiales magnéticos. En general los imanes permanentes son usados en el segundo y cuarto cuadrante. En estos cuadrantes la dirección de la intensidad de campo magnético  $H$  y la inducción magnética  $B$  son opuestas. En el segundo cuadrante la curva  $B$ - $H$  es denominada "Curva de Desmagnetización", la cual se muestra en la figura 1.3. Las características magnéticas en esta región son llamadas características de

desmagnetización. Los principales puntos relacionados con las características de desmagnetización son los siguientes:

- Remanencia magnética: Cuando un imán ha sido magnetizado una vez, este permanecerá magnetizado en forma permanente si su intensidad de campo magnético se disminuye a cero. La densidad de flujo magnético en este punto se denomina remanencia magnética y se designa por  $B_r$ .
- Fuerza coercitiva: Si la intensidad de campo magnético se incrementa en la polaridad opuesta a través de la curva de desmagnetización y la densidad de flujo se hace cero, la intensidad de campo presente se denomina fuerza coercitiva y se designa  $H_c$ .
- Producto de energía y producto de energía máximo: El valor absoluto del producto de la densidad de flujo  $B$  y la intensidad de campo  $H$  en cada punto a través de la curva de desmagnetización se denomina producto de energía. La figura 1.3 muestra el producto de energía como una función de la densidad de campo  $B$ , en el segundo cuadrante. El valor máximo del producto de energía es llamado el producto de energía máximo, y esta cantidad es uno de los índices que indica la energía interna del imán, su unidad en el sistema MKS es  $J/m^3$ .
- Recta de carga y punto de operación: El estado B-H de los imanes permanentes es localizado en la intersección de la curva de desmagnetización y la recta de carga OP. La recta de carga es determinada desde las cantidades características de la estructura del circuito magnético: largo del entrehierro, largo del circuito magnético y número de vueltas de las bobinas. Durante la operación, sin embargo, el punto de operación es inclinado por la reacción de las bobinas del circuito magnético, por ejemplo corriente de armadura en máquinas eléctricas (fenómeno denominado reacción de armadura) [7].

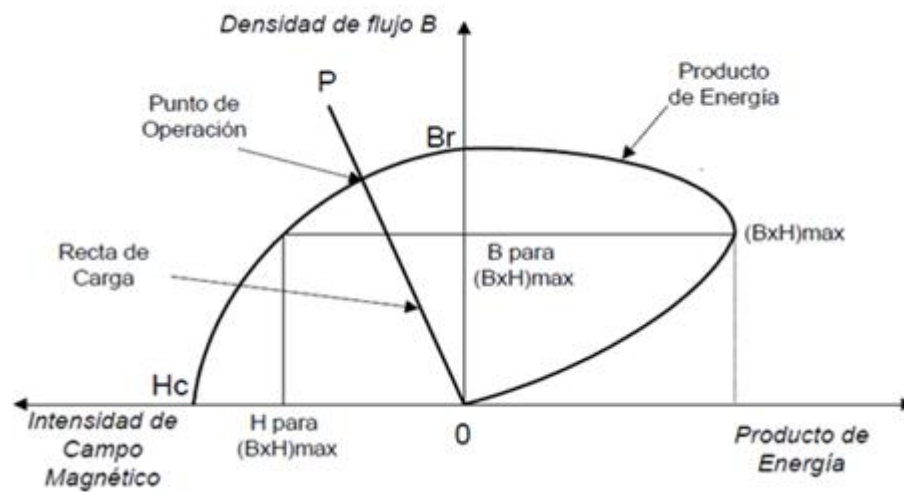


Figura 1.3. Curva de desmagnetización, producto de energía y recta de carga.

Otra característica, no menos importante, para la especificación de un imán permanente es la *temperatura de Curie* ( $T_c$ ), que es la temperatura crítica sobre la cual un material ferromagnético se hace paramagnético. La tabla 1.1 presenta las especificaciones de un imán permanente comercial.

Tabla 1.1: Especificaciones de un imán permanente comercial.

|                                           |           |
|-------------------------------------------|-----------|
| Densidad remanente ( T )                  | 1.02-1.06 |
| Fuerza coercitiva ( KA/m )                | 740-796   |
| Producto de energía ( KJ/m <sup>3</sup> ) | 199-214   |
| Temperatura de Curie ( °C )               | 80        |

El uso de los imanes permanentes en la construcción de las máquinas eléctricas trae los beneficios siguientes:

- El sistema del campo de excitación no absorbe energía eléctrica y además no hay pérdidas de excitación, lo que significa un incremento sustancial de la eficiencia.
- Un aumento del torque y de la potencia de salida por volumen, en comparación con máquinas de excitación electromagnética.
- Mejor funcionamiento dinámico (mayor densidad de flujo magnético en el entrehierro).
- Simplificación de la construcción y del mantenimiento.

- Reducción de los precios para algunos tipos de máquinas.

### **1.3 Generador sincrónico de imanes permanentes (GSIP).**

El espectacular desarrollo de aleaciones de alto magnetismo remanente (Nd-Fe-B o Sa-Co) ha hecho posible que los generadores sincrónicos de imanes permanentes representen una alternativa muy interesante en la generación eólica a velocidad variable. El empleo de imanes permanentes elimina la necesidad de anillos rozantes e implica la eliminación de las pérdidas en el cobre del rotor; con lo que desaparece la necesidad de refrigeración del rotor, además se disminuye considerablemente el volumen de la máquina. Como es posible disminuir el paso polar, es posible construir generadores de mayor número de polos, que eliminan la necesidad de utilizar un multiplicador de velocidad para adecuar la velocidad de giro de la turbina y del generador, lo que trae consigo una disminución del costo de la electricidad producida debido a que se disminuye el costo del tren de potencia y las pérdidas por conversión de energía. La velocidad asignada de los generadores sincrónicos utilizados en energía eólica está comprendida entre 20 y 200 rpm, dependiendo de la potencia nominal del generador.

En éste tipo de generadores la tensión de salida depende únicamente de la velocidad de giro del rotor, al no ser posible variar la corriente de excitación del circuito inductor. Para una determinada velocidad de rotación el generador se saturará a medida que esta aumente. Fenómeno que puede ser observado en la característica de vacío que se muestra en la figura 1.4.

La energía obtenida con un generador sincrónico de imanes permanentes es mayor que la que se obtiene con otro tipo de generadores. Un aerogenerador de imanes permanentes de 20 kW puede captar un 10% más de energía que un aerogenerador asincrónico con convertidor de frecuencia y un 15% más que un aerogenerador asincrónico de la misma potencia a velocidad fija [1].

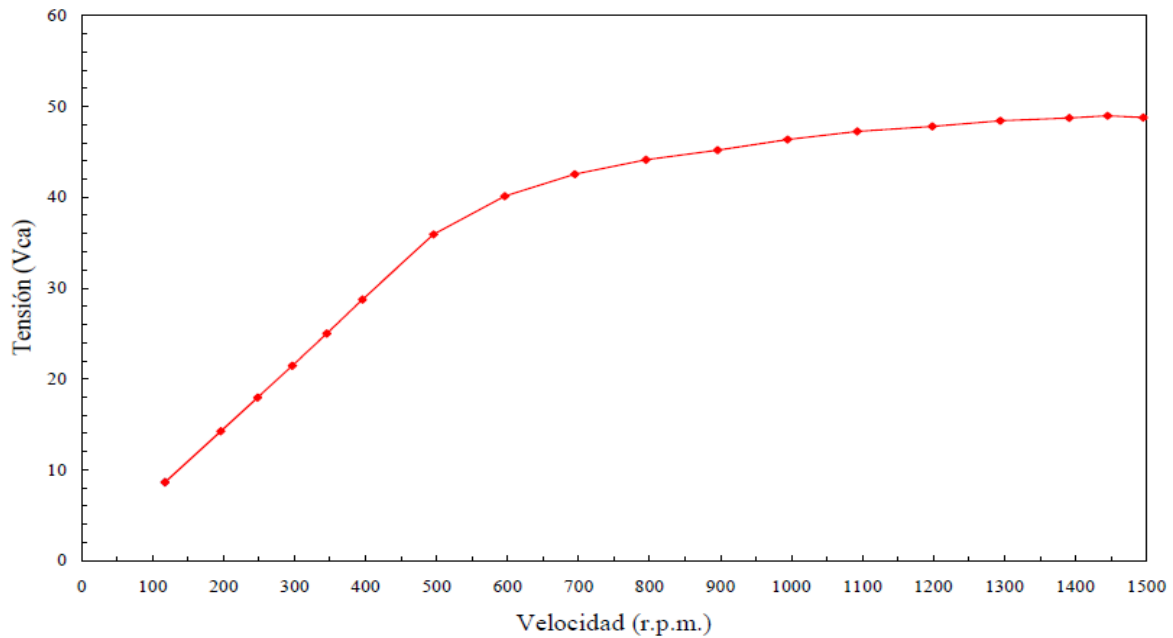


Figura 1.4: Característica Tensión-Velocidad de rotación de un generador de imanes permanentes de 24 voltios.

Tradicionalmente, el material más empleado en la fabricación de máquinas sincrónicas de imanes permanentes era la ferrita, debido a su bajo costo y excelente linealidad en la desmagnetización; sin embargo, su bajo magnetismo remanente limita su utilización. Los nuevos materiales empleados, son imanes fabricados mediante tierras raras, como el Samario-Cobalto ( $\text{SmCo}_5$  o  $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ ), o el Neodimio-Hierro-Boro (Nd-Fe-B) [1]. Este último presenta un magnetismo remanente muy alto y una gran linealidad en la curva de desmagnetización aunque tiene el inconveniente de que la intensidad de campo decrece con la temperatura. El Samario-Cobalto presenta la mejor combinación de características pero es caro y solamente utilizable en aplicaciones especiales donde la reducción en tamaño y peso justifique el incremento en el coste [1].

En la tabla 1.2 se muestran las propiedades de estos materiales.

Tabla 1.2: Propiedades de los materiales utilizados en la sinterización de los imanes.

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

### 1.3.1 Principio de funcionamiento del GSIP.

Según la Ley de Faraday cuando un conductor eléctrico corta las líneas de fuerza de un campo magnético que varía en el tiempo, se origina en él una corriente eléctrica. La generación de corriente trifásica tiene lugar en los alternadores, en relación con un movimiento giratorio. Debido a este principio, existen tres devanados iguales independientes entre sí, dispuestos mecánicamente de modo que se encuentran desplazados entre sí 120°. Según el principio de la inducción, al dar vueltas el rotor, en el que se encuentran los imanes permanentes se crea un campo magnético de excitación de dirección constante asociados a éstos, el cual provoca que se induzcan en los devanados del estator tensiones alternas sinusoidales y respectivamente corrientes alternas, desfasadas también 120° entre sí, por lo cual quedan desfasadas igualmente en cuanto a tiempo. De esa forma tiene lugar un ciclo que se repite constantemente, produciendo la corriente alterna trifásica.

Este tipo de máquinas, al carecer de un devanado de excitación, poseen un mejor rendimiento siempre que la geometría de diseño sea óptima y los imanes trabajen en su punto máximo de operación de energía  $(HB)_{\text{máx}}$ , debido a la ausencia de pérdidas en el devanado de excitación.

### 1.3.1 Topologías de GSIP.

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 y la trayectoria del flujo magnético. A continuación se describen las ventajas y desventajas de los mismos para su uso en aerogeneradores.

Las máquinas de flujo radial son las más convencionales de las alternativas existentes en el mercado, se utilizan como referencia para las comparaciones. La disposición de los imanes en los distintos tipos de generadores puede verse de la figura 1.5 a la figura 1.9.

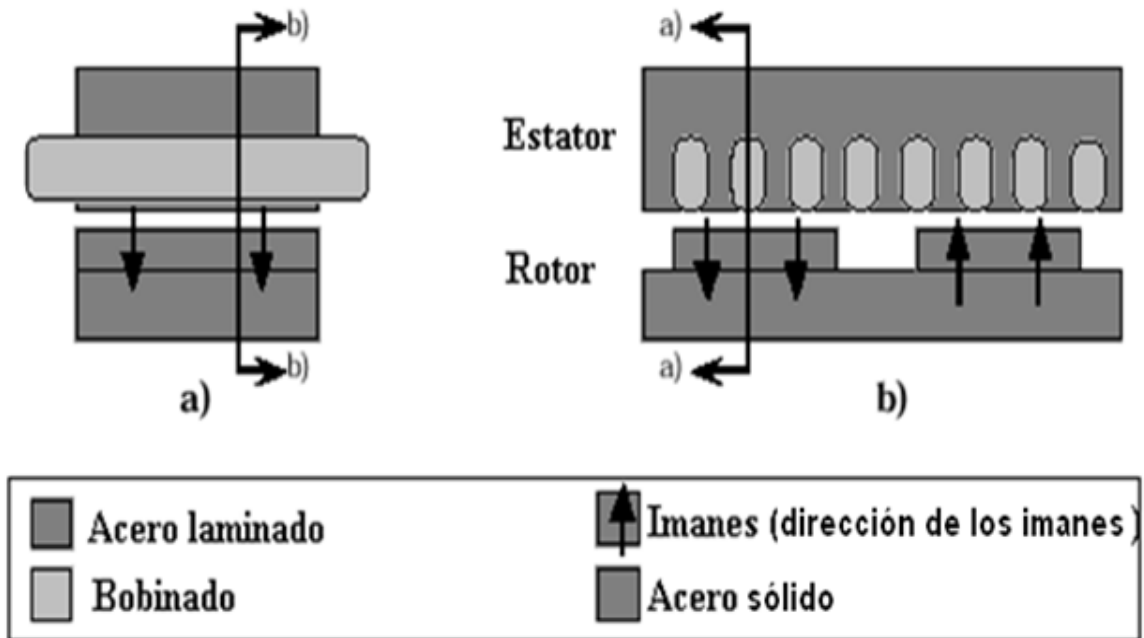


Figura 1.5. Generador de flujo radial con imanes montados en la superficie: a) vista tangencial y b) vista axial.

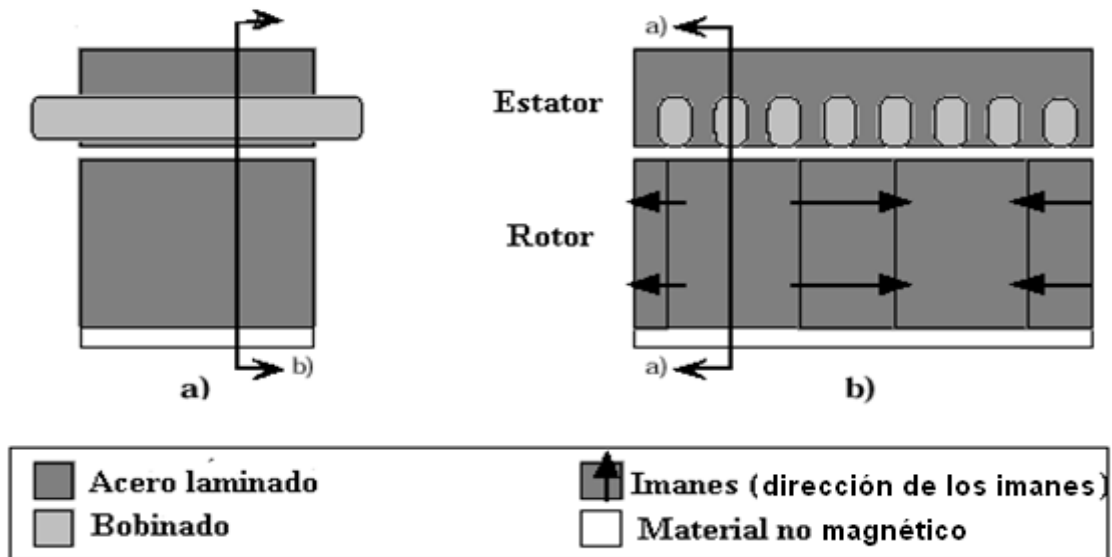


Figura 1.6. Generador de flujo radial con concentración de flujo e imanes de ferrita: a) vista tangencial y b) vista axial.

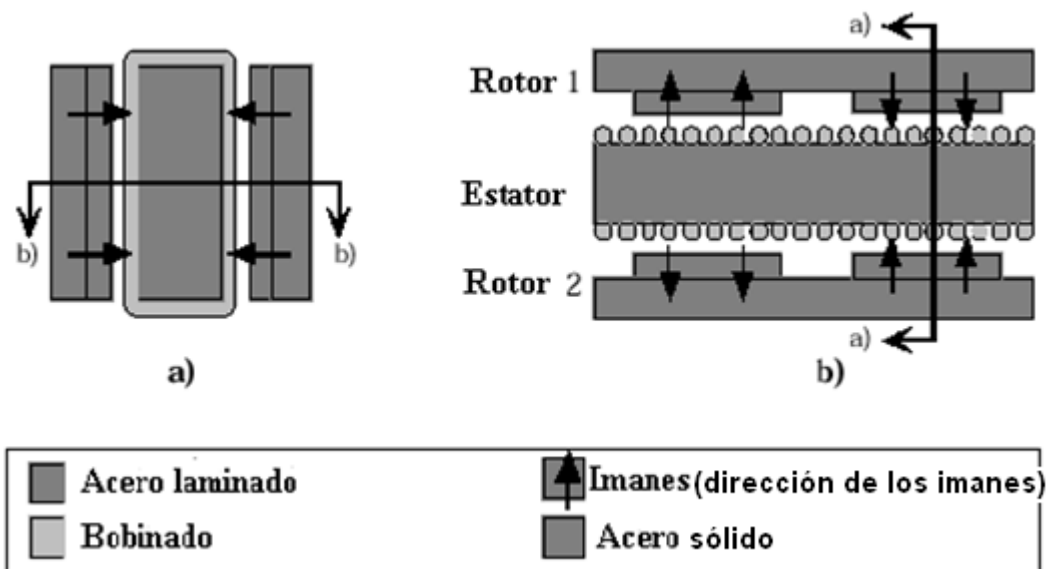


Figura 1.7. Generador de flujo axial con estator toroidal e imanes montados en la superficie del rotor: a) vista tangencial b) vista radial.

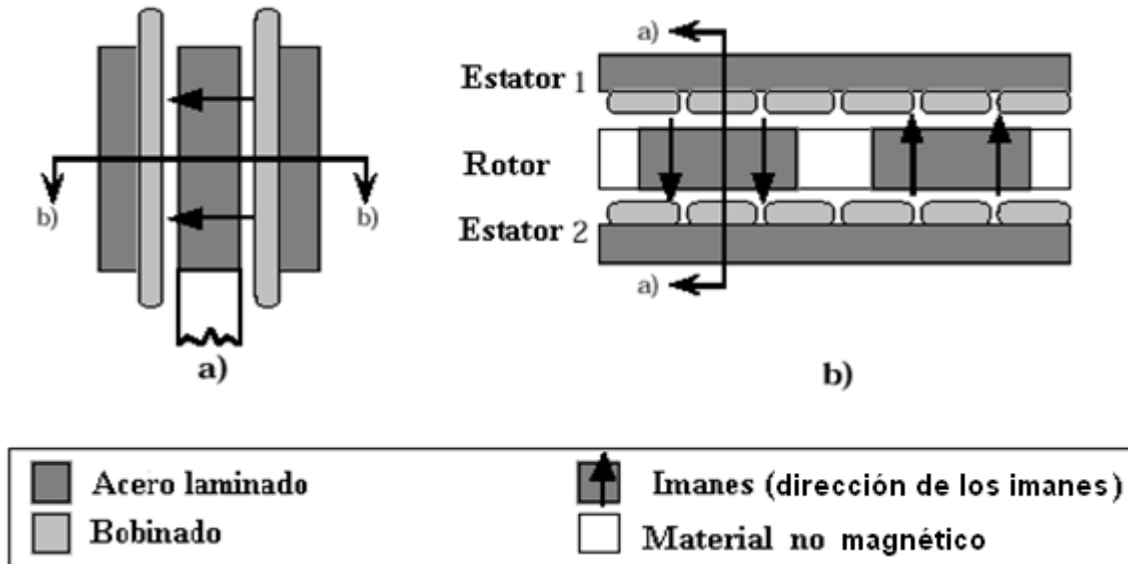


Figura 1.8. Generador de flujo axial con estator doble y bobinados en el rotor: a) vista tangencial b) vista radial.

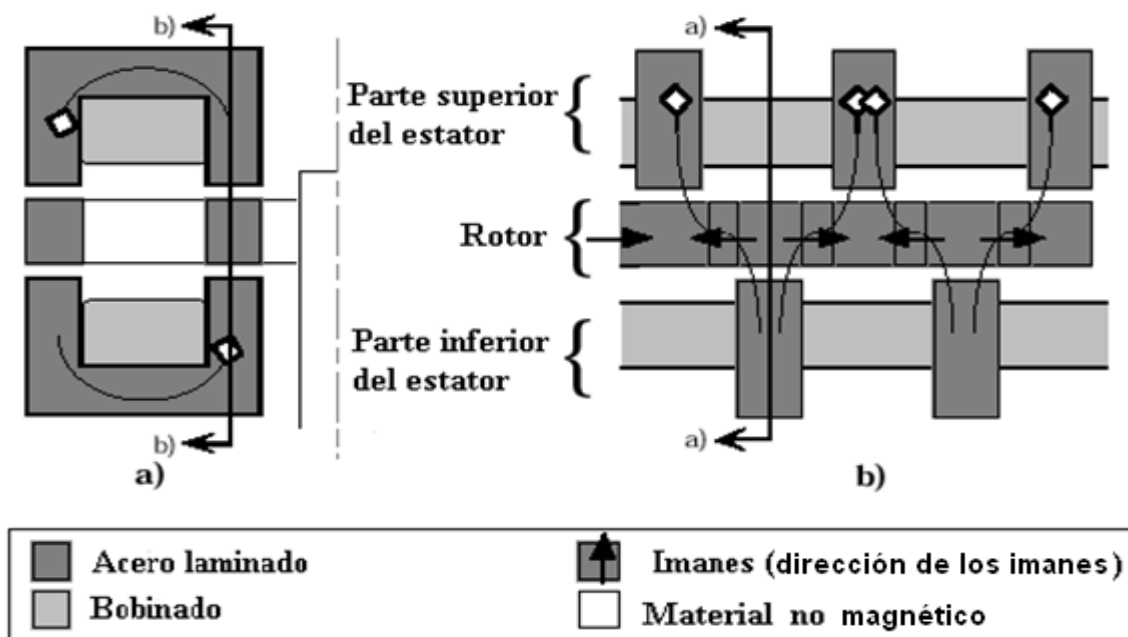


Figura 1.9. Generador de flujo tangencial: a) vista tangencial y b) vista radial.

Una restricción importante en las máquinas de flujo axial es la cantidad de bobinas que pueden colocarse, al estar limitada por el espacio disponible en el radio interno y la

distancia entre las bobinas y el estator, el radio más grande no puede usarse totalmente debido a esto, y sin embargo permite la utilización del centro férrico e imanes ligeramente menos eficaces, en máquinas de flujo axial que en máquinas de flujo radial. En las máquinas de flujo radial, puede escogerse la longitud del estator interno, la distancia entre las bobinas y el estator de manera independiente. Si es necesario, la máquina de flujo radial puede construirse con un diámetro pequeño usando un estator largo.

Para reducir el diámetro de la máquina de flujo axial, manteniendo constante el torque, la diferencia entre el radio interno y externo tiene que ser aumentada. El torque máximo de una máquina de flujo axial, se logra cuando el radio interno es aproximadamente 0.6 veces el radio exterior [7]. Un radio interno más pequeño disminuirá sólo el torque. Por consiguiente, el diámetro de la máquina de flujo axial no puede reducirse tanto como el diámetro de la máquina de flujo radial.

Una manera de evitar un diámetro grande es apilar varias máquinas de flujo axial con un diámetro pequeño en el mismo árbol. Así, la potencia puede ser mayor sin aumentar el diámetro. Esto conlleva, a un aumento considerable en el costo del generador.

Si la distancia entre las bobinas y el estator es pequeña, el rotor y estructuras del estator tienen que resistir una fuerza magnética alta. Es más fácil hacer un rotor más largo en la dirección radial que en la dirección axial, sobre todo en generadores con un diámetro grande. Por consiguiente, es más fácil hacer generadores de flujo radial con un entrehierro (*air gap*) pequeño. Sin embargo, la expansión térmica del rotor y estator, tienen influencia en el generador de flujo radial y por lo tanto en la distancia entre las bobinas y el estator, mientras en una máquina de flujo axial, la distancia entre las bobinas y el estator no se afecta por estas causas. Los generadores de flujo axial también son difíciles de fabricar porque el diapason de las hendeduras varía en las laminaciones del estator para los diferentes radios.

Las máquinas de flujo axial pueden construirse más fácilmente que una máquina de flujo radial con un estator doble. El mismo elimina la necesidad de un yugo en el rotor como un camino del retorno para el flujo. Seguidamente, el peso activo del generador puede reducirse.

No obstante, es sólo un yugo del rotor hecho de hierro sólido y barato lo que se elimina. En cambio una estructura del rotor no magnética más compleja tiene que ser usada para sostener los imanes. El estator doble también permite que el devanado pueda ser dividido en dos. En una máquina de flujo radial una distribución electromagnética equivalente puede ser lograda aumentando dos veces la longitud del estator, en lugar de usar dos mitades del estator. Semejante solución llevará a una cantidad menor de devanados. Si la longitud de la máquina no se restringe, la máquina de flujo axial con un estator doble no será mejor que una máquina de flujo radial con un estator largo, desde el punto de vista electromagnético [11].

Un tipo especial de generador de flujo axial es la máquina de estator toroidal (que se muestra en la figura 1.7).

Los generadores del tipo toroidal heredan las ventajas y desventajas de las máquinas axiales, pero se hace más difícil de adecuar el estator a la estructura del generador. Una desventaja extensa es que los devanados tienen altas pérdidas en generadores para turbina de viento, estos se calientan mucho en la parte media de la máquina, haciéndose muy difícil evacuar el calor sin aire o agua dirigidos directamente a ese lugar.

La máquina de flujo transversal es diferente de los otros dos tipos de máquinas analizadas, y es difícil de hacer cualquier comparación simple entre ellas. La diferencia mayor entre la radial ó máquinas de flujo axial y la máquina de flujo transversal, es que el concepto utilizado en la de flujo transversal permite un aumento en el espacio entre los devanados sin disminuir el espacio disponible para el flujo principal; esto permite disminuir las pérdidas de cobre.

La máquina de flujo transversal también puede hacerse con un diapasón de polos muy pequeño comparado con los otros tipos. Estas diferencias hacen la máquina de flujo transversal capaz de producir una densidad de fuerza más alta en la distancia entre las bobinas y el estator que los otros tipos de máquinas. Desgraciadamente, la estructura electromagnética es más compleja que para los generadores de tipo convencional que pueden hacer más cara su construcción. El generador de flujo transversal es probablemente mejor que la máquina de flujo radial desde el punto de vista electromagnético, pero al comparar éstos dos tipos de generadores debe incluirse una investigación mecánica detallada.

El generador de flujo transversal tiene una fuerza muy alta por la proporción de peso, pero una desventaja es su compleja estructura [11].

### 1.3.2 Generador sincrónico de imanes permanentes de flujo axial.

Las máquinas de flujo axial están formadas por un rotor en forma de disco que lleva los imanes permanentes, los cuales producen un flujo magnético axial que pasa por las bobinas en dirección paralela al eje del generador y un estator que contiene las bobinas de la fase. Muchas variaciones en este diseño básico son posibles, incluyendo una sola cara, de doble cara, del tipo toroidal como el que se mostró en la figura 1.7, y diseños multidisco. La estructura que ha tenido más aceptación a nivel mundial es la que se muestra en la figura 1.10, la cual se compone de un rotor frontal, un estator y un rotor posterior. Ambos rotores están unidos por un eje longitudinal, lo que permite una mayor densidad de energía en la máquina.

Este tipo de diseño tiene varias ventajas sobre otras topologías, tales como la facilidad de fabricación, la reducción de pérdidas en el hierro, la alta relación potencia/tamaño, además los rotores, con los imanes que lo componen actúan como ventiladores, enfriando los enrollados del estator.

El estator contiene bobinas de alambre de cobre, en las cuales se induce el voltaje producto del flujo variable que produce el campo magnético de los imanes ubicados en los rotores frontal y posterior. El estator está montado en una base fija, inmóvil.

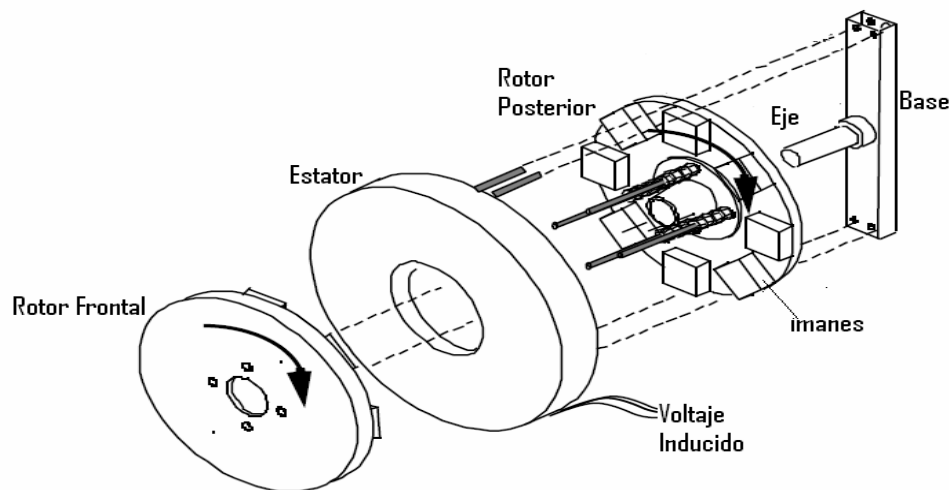


Figura 1.10. Estructura de un generador de flujo axial.

Los imanes permanentes se ubican de forma tal que el flujo magnético pasa de un rotor a otro, cruzando a través de las bobinas del estator, mientras el eje del rotor gira; se induce así el voltaje sinusoidal en los terminales de las bobinas. Cabe indicar que dicha configuración permite el crecimiento de la máquina en forma modular, al agregar otro estator de bobinas junto con otro rotor de imanes [2].

Por su geometría, diseños con un gran número de polos pueden ser construidas, por lo que es posible la operación a baja velocidad con un elevado torque.

Las principales dimensiones de diseño son el diámetro externo e interno ( $D_o$ ,  $D_i$ ). Figura 1.11.

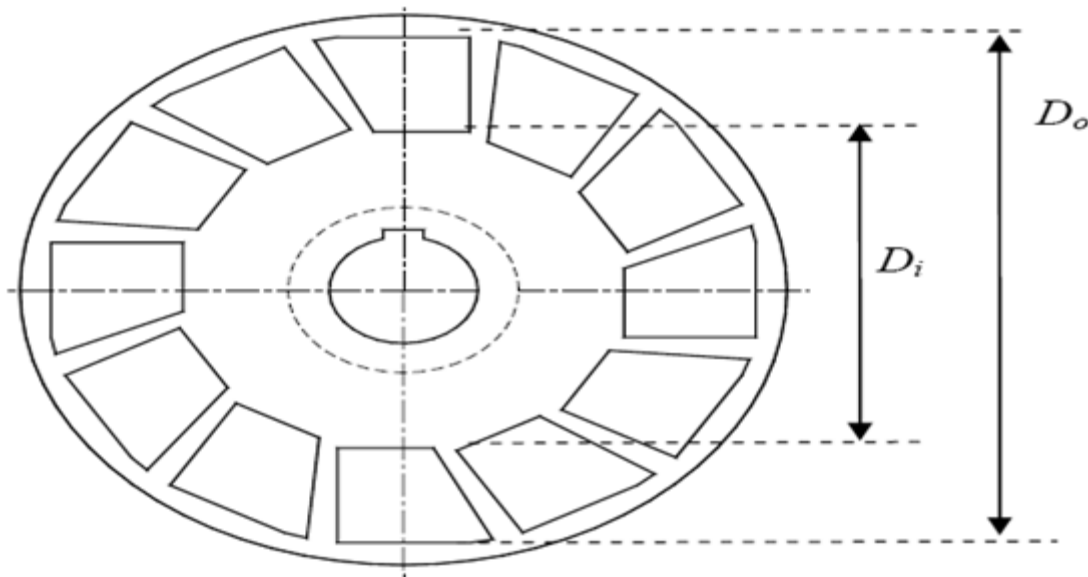


Figura 1.11. Principales dimensiones en el diseño de una máquina de flujo axial.

#### 1.4 Conclusiones parciales.

El generador de flujo axial resulta más ventajoso que los de flujo radial o transversal, ya que es más fácil de construir, además tiene una alta relación de potencia\tamaño y una mayor reducción de pérdidas en el hierro.

## **CAPÍTULO 2. DISEÑO DE UN GENERADOR SINCRÓNICO DE IMANES PERMANENTES DE FLUJO AXIAL**

### **2.1 Factores que afectan en el Diseño.**

Hay una serie de factores que afectan el diseño de una máquina, 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 Factores 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/m<sup>3</sup>, 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). NEMA (National Electrical Manufacturers Association) establece estándares para tamaños, desempeño y prueba de máquinas CA y CD de potencias desde 1 hasta 450 HP. 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.**

Para un apropiado diseño de una máquina eléctrica, conceptualmente se deben considerar cinco ámbitos: eléctrico, magnético, aislación, 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 Materiales Eléctricos y Magnéticos.

### 2.3.1 Materiales Conductores.

Los requerimientos para los materiales conductores en la construcción de máquinas eléctricas es tener la mayor conductividad posible y el menor coeficiente de temperatura. La variación de la resistencia de acuerdo a la temperatura está dada por la ecuación 2.1, donde  $\alpha$  es el coeficiente de temperatura y  $T$  es la temperatura a la cual se desea evaluar la resistencia. También es necesario tener una adecuada rigidez mecánica que permita su manufactura en alambres, bobinas y otras estructuras como colectores y anillos. Aunque los conductores utilizados en pequeños motores no se encuentran sujetos a grandes solicitaciones durante la operación, el proceso de fabricación de las bobinas y su inserción en las ranuras requieren que posean ciertas propiedades mecánicas.

$$R(T) = R_{20^{\circ}C} [1 + \alpha(T - 20^{\circ}C)] \quad (2.1)$$

Debido a su alta conductividad eléctrica y excelentes propiedades mecánicas, el cobre es ampliamente usado para la construcción de bobinados de motores. Los conductores redondos con recubierto de barniz aislante son utilizados para pequeñas máquinas eléctricas.

El aluminio es más liviano y barato que el cobre y tiene menor temperatura de fundición (fácil de moldear), sin embargo su conductividad es solo un 60% de la conductividad del cobre y posee menor rigidez mecánica por lo que no puede ser manufacturado en delgados conductores. Principalmente es utilizado en la fabricación de devanados tipo jaula para motores de inducción. Las propiedades del cobre y aluminio se resumen en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1: Propiedades del cobre y aluminio

|                                   | Cobre               | Aluminio            |
|-----------------------------------|---------------------|---------------------|
| Peso específico kg/m <sup>3</sup> | 8.89                | 2.70                |
| Punto de fusión (°C)              | 1083                | 658                 |
| Resistividad a 20°C (Ωm)          | 1.17e <sup>-8</sup> | 2.87e <sup>-8</sup> |
| Coeficiente de Temperatura (α)    | 0.0039              | 0.004               |
| Coeficiente de expansión lineal   | 17e <sup>-3</sup>   | 23e <sup>-3</sup>   |

Convencionalmente, los alambres de cobre y aluminio están especificados por la *American Wire Gauge* (AWG) o la británica *Standar Wire Gauge* (SWG), sin embargo, actualmente existe una especificación internacional establecida por la *International Electrotechnical Comission* (IEC 182-1). En el Anexo I está incluida la transformación del número AWG a pulgadas y milímetros. Adicionalmente se muestra la resistencia en Ohm/m a 20°C para cada conductor.

### 2.3.2 Materiales aislantes.

Las máquinas eléctricas son dispositivos de conversión de energía y durante este proceso cierto nivel de pérdidas es inevitable. Las pérdidas ocurren primariamente en las piezas activas: hierro o pérdidas en el núcleo en el circuito magnético y pérdidas en el cobre del circuito eléctrico. La energía pérdida dentro de la máquina es convertida en calor el cual causa que la temperatura dentro de la máquina se eleve. Es por ello que las pérdidas no

son solo importantes desde el punto de vista de la eficiencia sino que también causan que la temperatura de los devanados aumente significativamente.

La temperatura de las diferentes partes de la máquina está determinada por la razón de producción y disipación de calor. La temperatura de estado estable es alcanzada cuando las dos razones son iguales. Reduciendo la carga eléctrica y magnética las pérdidas y el calor generado puede reducirse, sin embargo, esto no resulta rentable. El mejor diseño es aquel en que los materiales activos son utilizados a su nivel óptimo y cuando se provee un adecuado aislamiento y un sistema de refrigeración.

La temperatura en los distintos puntos de la máquina varía de acuerdo a los cambios de carga lo que produce que la aislación se encuentre sujeta a estrés adicional. El diseño debe asegurar que la aislación soportará los aumentos de temperatura bajo todas las condiciones de operación. La importancia de la aislación y ventilación no debe ser menospreciada, las fallas en máquinas son predominantemente debido a estrés térmico.

De acuerdo a la IEC, los materiales aislantes están divididos en siete clases (Y, A, E, B, F, H y C). Esta clasificación es sólo referida al límite de temperatura, sin embargo en máquinas eléctricas otras propiedades son necesarias, además de la tolerancia a la temperatura. Capacidad de ser doblado y curvado, capacidad de ser impregnada y resistencia a la abrasión. Todas estas características sugieren una clasificación más elaborada, sin embargo esto conlleva a mayor confusión.

## **2.4 Diseño del Generador Sincrónico de Flujo Axial.**

A continuación se presenta un ejemplo de cómo se realiza el diseño de un generador de flujo axial con imanes permanentes para aplicaciones eólicas. El diseño está orientado a que la máquina genere a partir de bajas velocidades de viento, lo cual reduce la razón de transmisión del mecanismo elevador de potencia, lo que mejora el rendimiento del sistema de potencia. 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. Se considera aleación amorfa para el circuito magnético del generador, lo que favorece la disminución de las pérdidas por histéresis. La máquina se diseña con siete fases y tres devanados independientes, cada uno de los cuales se conecta a un

rectificador tipo puente de catorce pulsos, los que a su vez se pueden conectar en serie con el fin de aumentar la tensión en bornes del generador.

Una de las ventajas de las máquinas con imanes permanentes, radica en que se reduce su volumen y peso en comparación a una máquina tradicional equivalente (con devanado de excitación en el rotor). Las máquinas con imanes permanentes logran altos rendimientos con reducido tamaño. Esto posibilita la aplicación de generadores con flujo axial e imanes permanentes para la producción de energía eléctrica mediante turbinas eólicas. [3], [4], [5], [6]. Un diseño adecuado para esta aplicación se basa en un generador con flujo axial de estator central, donde se ubican lateralmente dos piezas rotóricas soldadas al eje de la máquina. (Fig. 2.1). Esta configuración de dos entrehierros tiene la ventaja de cancelar las fuerzas longitudinales sobre el estator, además esta topología minimiza la inductancia de dispersión. Además, el uso del generador con flujo axial de alto torque hace innecesario el empleo de un mecanismo elevador de velocidad. Es importante recordar que el viento como fuerza motriz es intermitente lo que implica una generación de tensiones a frecuencia variable lo que obliga a utilizar un rectificador a la salida del generador, para lograr una tensión continua [6].

#### **2.4.1 Principales características del diseño.**

Los generadores sincrónicos de potencia, que generalmente alimentan transformadores elevadores de tensión se diseñan para producir en bornes tensiones sinusoidales. Con este fin se construyen devanados distribuidos y acortados, con un adecuado biselado de los polos salientes, lo que garantiza 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 puntos 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 lo que favorece 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.

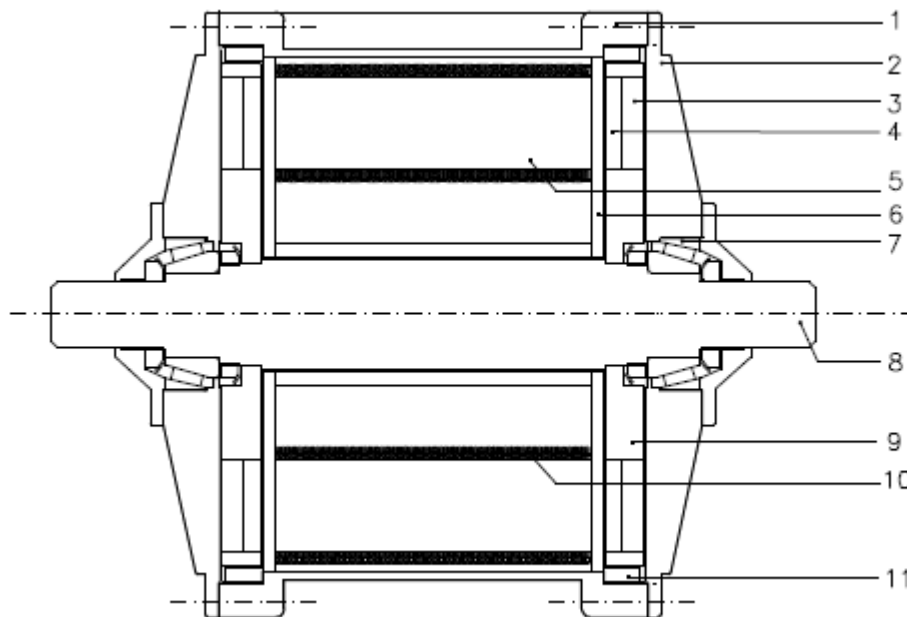


Figura 2.1: Plano general del generador con flujo axial de estator central e imanes permanentes.

Donde:

- |                        |                         |
|------------------------|-------------------------|
| 1. Carcasa             | 7. Rodamiento           |
| 2. Tapa lateral        | 8. Eje                  |
| 3. Yugo                | 9. Rotor                |
| 4. Imanes permanentes  | 10. Bobinados           |
| 5. Dientes del estator | 11. Anillos de fijación |
| 6. Disco de sujeción   |                         |

### 2.4.2 Determinación del número de fases.

Se eligió el número de fases igual a siete por el alto factor de utilización que se obtiene del generador. También para disminuir el torque pulsante deben quedar frente al espacio interpolar, un diente y una ranura, hecho que facilita además la conmutación de corriente. En el espacio interpolar deben caber exactamente una ranura y un diente para disminuir al máximo el torque pulsante [8].

### 2.4.3 Oblicuamiento.

El oblicuamiento se justifica en máquinas que cuentan con varias ranuras por fase y por polo. Esto permite que el imán permanente este siempre frente a la misma cantidad de hierro, pero además se logra que esté entrando a un diente y saliendo de otro en forma gradual, lo que hace continua la onda de tensión. En este caso no se justifica el oblicuamiento, ya que esta máquina, solo tiene una ranura por fase y por polo, también para lograr una mejor conmutación de corriente, conviene que la tensión se haga cero lo más rápidamente posible [9], [10].

### 2.4.4 Cálculo de la inductancia de dispersión.

Las ranuras abiertas favorecen una fem trapezoidal o cuadrada, se disminuye el flujo de dispersión y se facilita la realización del devanado. Como la máquina cuenta con dos entrehierros y el estator lo constituyen devanados y dientes, la mayor inductancia de dispersión corresponde a la producida por el flujo de dispersión de ranura. Por tratarse de una máquina de siete fases con devanado concentrado, resultan los caminos de los flujos de dispersión de ranuras desiguales. Como el devanado está constituido por un grupo de bobinas por polo y por fase, la fase que se ubique en el centro del diente del estator resultará con una inductancia de dispersión mayor que aquellas fases ubicadas más cerca de los entrehierros. Se determinó una expresión para la inductancia de dispersión de ranura considerando un grupo de bobinas concentradas de N vueltas por fase.

$$L_{ran} = \frac{2}{p} \cdot \frac{\mu_0 \cdot h}{a_{ran}} \cdot \left[ l_1 - \frac{l_1^2}{L_D} \right] \cdot N^2 \quad (2.1)$$

Donde:

$P$  : número de pares de polos.

$\mu_0$  : permeabilidad magnética del vacío ( $4\pi \cdot 10^{-7}$ ).

$l_1$  : distancia del centro del grupo de bobinas al extremo del diente (m).

$L_D$  : largo total del diente (m).

$a_{ran}$  : ancho de la ranura (mm).

$h$  : alto del diente (mm).

La expresión 2.1 para  $L_{ran}$  en función de " $l_1$ " representa una parábola, que tiene su valor máximo para  $l_1 = L_D/2$ , es decir, para la fase que se encuentra ubicada en el centro del diente, la inductancia de dispersión de ranura es máxima.

#### **2.4.5 Puente rectificador, conmutación de corriente.**

El generador de flujo axial alimentará un rectificador tipo puente de siete fases. Por tratarse de tensiones inducidas trapezoidales, habrá siempre tres fases trabajando en paralelo llevando corriente en sentido contrario (la séptima fase estará conmutando). La rapidez de la conmutación está determinada, principalmente por la inductancia sincrónica de la fase, que como se vio anteriormente son distintas para las diferentes fases, este hecho tiende a producir variaciones (de séptima armónica) en la corriente de carga. La magnitud de estas variaciones dependerá de la naturaleza de la carga. El conjunto generador-rectificador se comporta como un generador de corriente continua sin interpolos (los interpolos inducen una tensión proporcional a la corriente de carga en la bobina que se está conmutando). Además se conmuta sólo 1/3 de la corriente de carga en forma secuencial.

#### **2.4.6 Número de vueltas del devanado del estator.**

Para calcular el número de vueltas del devanado del estator, se considera como restricción el largo del estator y el diámetro del conductor que se utilizará en la confección de los devanados. Luego, la expresión que permite calcular el número de vueltas por ranura es la siguiente:

$$L_{est} = m \cdot \frac{N_b}{2} \cdot d_{Cu} + 2 \cdot l_{DS} \quad (2.2)$$

Donde:

$L_{est}$  : Largo del estator (mm).

$m$  : Número de fases.

$N_b$  : Número de vueltas por bobina (el devanado tiene una bobina por polo).

$d_{Cu}$  : Diámetro del conductor de cobre (mm).

$l_{DS}$  : Ancho de los discos de sujeción de los dientes del estator (mm).

Para el cálculo se considera un largo del estator  $L_{est}=207$  (mm), un diámetro de conductor  $d_{Cu}=0,912$  (mm) y un ancho de los discos de sujeción de los dientes del estator  $l_{DS}=8$  (mm). Con estos datos resulta que el número de vueltas por bobina es igual a  $N_b=59,84$  valor que conviene aproximar a  $N_b \gg 58$  vueltas para facilitar la instalación del devanado. Entonces, el número de vueltas del devanado de una fase es  $N = 2pN_b = 696$  vueltas. Cada bobina se confecciona con dos capas, de manera que en cada ranura ( $a_{ran}= 4,2$  mm) deben ubicarse 4 capas de devanado, así se elige alambre esmaltado AWG No 19, con un diámetro  $d_{Cu} = 0,912$  (mm).

#### 2.4.7 Tensión inducida.

Con los resultados obtenidos anteriormente y considerando una densidad de flujo magnético  $\vec{B}$  en el entrehierro del orden de los 0.55 (Teslas), se puede calcular el valor máximo de la tensión inducida por fase, que resulta:

$$E_{ind} = 2p \cdot 2N_b \cdot B_{ent} \cdot \Omega \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{D_0^2 - D_1^2}{4} \quad (2.3)$$

Donde:

$E_{ind}$ : Valor máximo de la tensión inducida en una fase (volts).

$p$ : Número de pares de polos.

$N_b$ : Número de vueltas por bobina.

$B_{ent}$ : Densidad de flujo magnético en el entrehierro (Teslas).

$\Omega$ : Velocidad del rotor ( $\Omega=2\pi n/60$  rpm).

$D_0$ : Diámetro externo del rotor (m).

$D_1$ : Diámetro interno del rotor (m).

Luego se tiene que la tensión inducida es  $E_{ind}=60$  (V) para una velocidad de rotación en revoluciones por minuto de  $n=120$  (rpm). Se debe notar que al seleccionar un alambre delgado para el devanado, se puede elegir una densidad de corriente alta. Luego, si se da, provisoriamente un valor máximo de la densidad de corriente:  $J=2$  (A/mm<sup>2</sup>) resulta que la corriente por fase de la máquina es de  $I_{fase}=1,306$  (A). Entonces la potencia que puede entregar el generador bajo estas condiciones es  $S=6 \cdot E_{ind} \cdot I_{fase}=470,2$  VA (siempre entregan potencia 6 fases al rectificador). Al considerar en el diseño un devanado concentrado, el factor de aprovechamiento de las ranuras del estator central es bajo, lo que impide obtener mayor potencia de la máquina. Sin embargo, el factor de aprovechamiento de las ranuras se puede mejorar si se agrega un devanado adicional al principal utilizando las ranuras adyacentes e internas a éste, el devanado adicional se puede conectar a un segundo rectificador y obtener así un mayor aprovechamiento de los materiales magnéticamente activos de la máquina y por ende una mayor potencia de la misma. Lo anterior indica que si el devanado principal cubre siete dientes y todo el largo del imán permanente el devanado interior cubrirá sólo cinco dientes y un largo proporcional al imán, luego con el mismo objetivo de mejorar el factor de aprovechamiento de las ranuras y aumentar la potencia que se puede extraer de la máquina, se puede agregar un tercer devanado utilizando las ranuras internas y adyacentes al segundo devanado, con lo que solo cubrirá tres dientes del estator central (Fig.2.2). Los tres devanados pueden conectarse en forma independiente a tres rectificadores que a su vez pueden conectarse en serie.

Para los devanados interiores se eligen conductores con un diámetro  $d_{Cu}=1,15$  (mm) y  $d_{Cu}=1,29$  (mm), lo que permite construir devanados de tres capas y mantener la misma

amplitud de corriente a la salida de cada rectificador. Luego utilizando la ecuación 2.4 (equivalente a la ecuación 2.2), considerando tres capas para cada devanado, resulta un número de vueltas por bobina para el segundo devanado  $N_b=70$  y el número de vueltas del devanado por fase es  $N=840$ , evidentemente los devanados interiores tienen un mayor número de vueltas debido a que son concéntricos además de un mayor rendimiento, debido a que las cabezas de bobinas son menores que las del devanado principal (Fig. 2.2). Para el tercer devanado y el más interno, el número de vueltas por bobina es  $N_b=62$  y el número de vueltas del devanado por fase es  $N=744$ .

$$L_{est} = m \cdot \frac{N_b}{3} \cdot d_{Cu} + 2 \cdot l_{DS} \quad (2.4)$$

Con la ecuación 2.3 y de acuerdo a estos últimos datos los valores máximos de las tensiones inducidas para los devanados interiores son  $E_{ind2}=72$  (V) y  $E_{ind3}=64$  (V), respectivamente. Al conectar los rectificadores puentes en serie se obtiene una tensión total de salida igual a  $E=392$  (V), pero los diodos de cada rectificador estarán sometidos aproximadamente a  $1/6$  (y  $1/3$ ) de la tensión total. Este hecho los protege contra sobretensiones producto de eventuales aumentos en la velocidad del viento.

Para calcular la potencia que entrega cada uno de estos devanados, se necesita conocer la corriente total rectificada que resulta igual a  $I=3 \cdot I_{fase}=3,918$  (A). Luego las potencias que cada devanado interior puede entregar son  $S_2=564,2$  (VA) y  $S_3=501,5$  (VA) respectivamente. Si se suma estos resultados al obtenido para el devanado principal, se tiene que el generador entrega una potencia total de  $S_{total}=1535,9$  (VA), para una velocidad de giro igual a  $n=120$  (rpm).

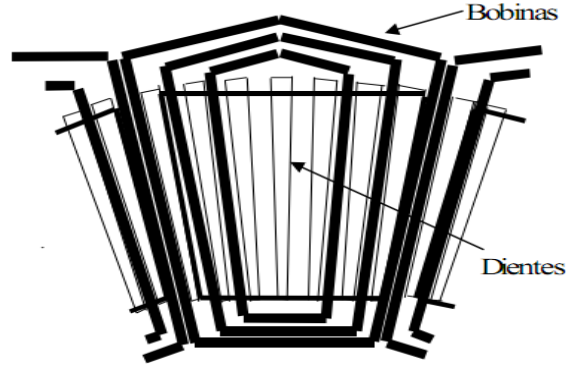


Figura 2.2: Representación de las bobinas principal y secundaria del generador.

#### 2.4.8 Comparación de conexiones de rectificadores y devanados.

Para comparar las pérdidas de potencias (Joule)  $P_2$  y  $P_1$  de los devanados rectificando en forma independiente y de los devanados conectados en serie alimentando un rectificador respectivamente, se puede partir de las siguientes relaciones:

$$P_1 = I_1^2 \cdot (Rd_1 + Rd_2 + Rd_3) \quad (2.5)$$

$$P_2 = I_2^2 \cdot \left( \frac{Rd_1}{3} + \frac{Rd_2}{2} + Rd_3 \right) \quad (2.6)$$

Luego se puede comparar las pérdidas de ambas conexiones para iguales potencias de salida y para iguales pérdidas de la potencia de salida.

a) Para igual potencia de salida ( $I_1=I_2$ ) resulta:

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{6 \cdot (Rd_1 + Rd_2 + Rd_3)}{(2 \cdot Rd_1 + 3 \cdot Rd_2 + 6 \cdot Rd_3)} \quad (2.7)$$

Donde:

$P_1$ : Pérdidas de potencia de los devanados conectados en serie y alimentando un puente rectificador (W).

$P_2$ : Pérdidas de potencia de los devanados alimentando en forma independiente puentes rectificadores (W).

$Rd_1$ : Resistencia del devanado principal ( $\Omega$ ).

$Rd_2$ : Resistencia del segundo devanado ( $\Omega$ ).

$Rd_3$ : Resistencia del tercer devanado ( $\Omega$ ).

Para calcular las resistencias de los devanados, se consideró una temperatura de trabajo de 120 °C, luego a esa temperatura la resistividad del cobre es:  $r = 0,24186 \cdot 10^{-7}$  (W-m). Entonces los valores de las resistencias de los devanados resultan:  $Rd_1 = 6,59$  ( $\Omega$ );  $Rd_2 = 4,13$  ( $\Omega$ );  $Rd_3 = 2,25$  ( $\Omega$ ).

De acuerdo a los datos previos, y utilizando la relación 2.7 se obtiene:  $P_1=1,992P_2$ .

b) Para pérdidas de potencias iguales ( $P_1=P_2$ ) resulta:

$$\frac{P_{s2}}{P_{s1}} = \frac{I_2}{I_1} = \sqrt{\frac{6 \cdot (Rd_1 + Rd_2 + Rd_3)}{2 \cdot Rd_1 + 3 \cdot Rd_2 + 6 \cdot Rd_3}} \quad (2.8)$$

Donde:

$P_{s1}$ : Potencias de salida de los devanados conectados en serie (W).

$P_{s2}$ : Potencias de salida de los devanados trabajando en forma independiente (W).

Luego utilizando la expresión 2.8, con los datos anteriores, se obtiene:  $P_{s2}=1,411P_{s1}$ .

#### 2.4.9 Cálculo de las corrientes efectivas por fase.

Para encontrar las densidades de corriente efectivas para los conductores de cada devanado, primeramente debemos calcular las corrientes por fase efectivas de cada devanado, considerando que en el segundo devanado siempre son cuatro las fases que entregan potencia y en el tercer devanado siempre son dos las fases (Fig. 2.4). Luego la corriente se puede calcular como:

$$I_{FASE} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \frac{I}{\sqrt{7}} \quad (2.9)$$

Resultando  $I_{Fase} = 1,21$  (A) y como el diámetro del  $d_{Cu}=0,912$  (mm) se tiene que la densidad de corriente efectiva es  $J=1,852$  (A/mm<sup>2</sup>). La corriente de fase para el devanado adyacente al principal se puede obtener de:

$$I_{FASE} = \frac{I}{\sqrt{7}} \quad (2.10)$$

De donde resulta  $I_{Fase}=1,48$  (A) y como el conductor seleccionado para este devanado tiene un diámetro de  $d_{Cu}=1,15$  (mm) resulta que la densidad de corriente efectiva es  $J=1,425$  (A/mm<sup>2</sup>). Para el tercer devanado la corriente de fase se obtiene de:

$$I_{FASE} = \sqrt{2} \cdot \frac{I}{\sqrt{7}} \quad (2.11)$$

Donde  $I_{Fase}=2,09$  (A) y como el diámetro del conductor seleccionado para este conductor es  $d_{Cu}=1,29$  (mm) la densidad de corriente efectiva es  $J=1,602$  (A/mm<sup>2</sup>).

En la figuras 2.3 y 2.4 se supone que cada devanado de la máquina está conectado a un rectificador diferente. En la figura 2.3 se presentan las fases activas de cada devanado. En la figura 2.4 se comparan las corrientes que aportan los diferentes devanados al rectificador.

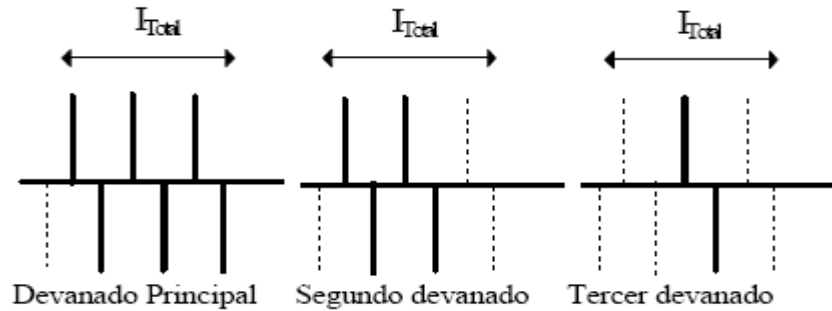


Figura 2.3: Fases que aportan corriente en forma paralela al puente rectificador respectivo.

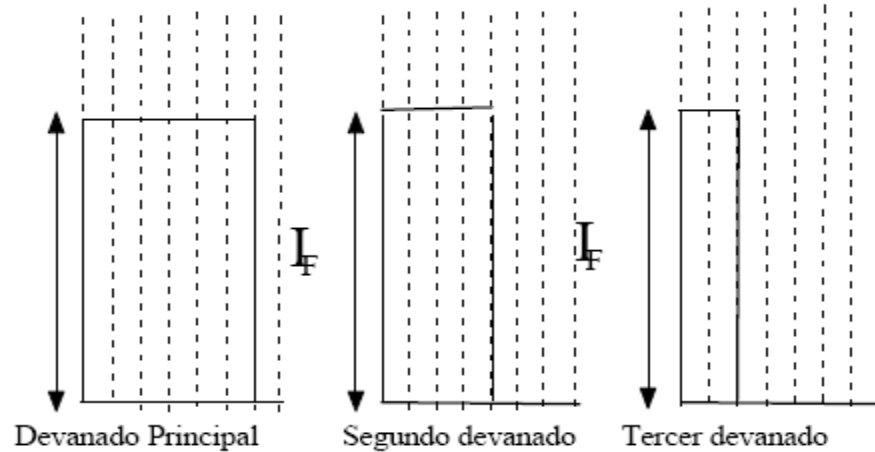


Figura 2.4: Corriente que aporta cada fase de los diferentes devanados al rectificador respectivo.

#### 2.4.10 Forma de las tensiones inducidas.

La geometría de los imanes permanentes incide directamente en la forma de la tensión inducida. Esto es obvio ya que las líneas de la densidad de flujo van solamente de los imanes a los dientes. Esto implica que geoméricamente el entrehierro es fijo pero magnéticamente variable.

La figura 2.5 representa la forma de la tensión inducida por fase.

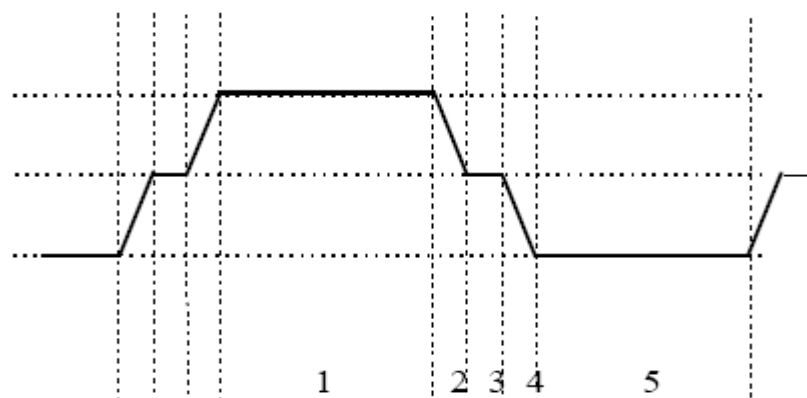


Figura 2.5: Tensión inducida por fase del devanado principal.

De la figura 2.5 se puede observar que cuando la bobina de una fase queda completamente frente a un polo, corta líneas de densidad de flujo que son constantes y por ende genera una tensión constante (sector 1 en la figura 2.5). Cuando el espacio interpolar comienza a enfrentar a la bobina, la tensión comienza a descender conforme el polo se aleja de la bobina (sector 2). Al salir completamente el polo de la bobina la tensión inducida se hace cero (sector 3). Luego al comenzar el polo a ubicarse frente a la bobina con polaridad opuesta (sector 4), la tensión inducida aumenta, pero como la polaridad cambia, esta tensión es negativa.

Para los devanados secundarios la forma de la tensión inducida por fase es semejante a una onda trapezoidal (figura 2.6) pero de mayor magnitud y con la tensión un mayor tiempo en cero, a medida que el devanado es más interno.

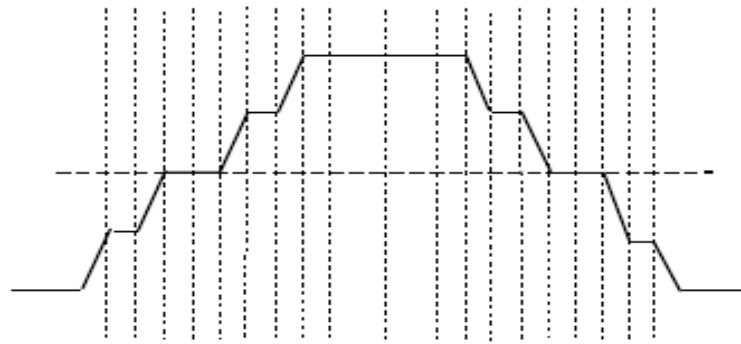


Figura 2.6: Tensión inducida por fase de un devanado secundario.

#### 2.4.11 Conmutación.

Durante la conmutación es deseable que la corriente se haga cero cuando el espacio interpolar esté sobre la bobina ya que la tensión inducida en ese momento es cero. Si la tensión cambia de polaridad y la corriente aún no conmuta se producen torques frenantes, en otras palabras se requiere que la onda de corriente siga a la de tensión ( $\cos\phi = 1$ ).

El tiempo que demora la conmutación depende de los valores de resistencia e inductancia sincrónica,  $R$  y  $L$ , de cada fase. Entonces si  $T=L/R$  es la constante de tiempo se puede suponer " $t_{int}=T$ " como tiempo máximo permitido para que la corriente se haga cero. Este tiempo es lo que demora el rotor en pasar la zona interpolar frente a la bobina que está conmutando. Luego, como  $a_{ran}=a_{dte}=a$  el tiempo " $t_{int}$ " es el tiempo que se toma en recorrer

la distancia de  $2a$  (se debe recordar que  $2a = 8,8$  (mm)). Condición para el devanado principal (no acortado), ya que para los devanados secundarios, la distancia que deben recorrer frente al polo es menor, y por ende, la corriente en estos devanados dispone de un mayor tiempo para la conmutación.

Sea  $n_r$  la velocidad de rotación del rotor en rpm, entonces se tiene:

$$f_r = \frac{n_r}{60} \quad \text{y} \quad \Omega_r = 2 \cdot f_r \quad (2.12)$$

Luego:

$$v = \Omega_r \cdot \frac{D_m}{2} = \frac{2n_r}{60} \cdot \frac{D_m}{2} \left( \frac{\text{mm}}{\text{seg}} \right) \quad (2.13)$$

Por lo tanto el tiempo empleado en recorrer la distancia  $2a$  a velocidad  $v$  es:

$$t_{\text{int}} = \frac{2a}{\frac{2n_r}{60} \cdot \frac{D_m}{2}} \quad (2.14)$$

Al reemplazar los valores resulta que  $t_{\text{int}} = 0,749/n_r$  (seg). Entonces debe cumplirse para garantizar una buena conmutación, la desigualdad:

$$\frac{L}{R} < \frac{0,749}{n_r} \text{ seg.} \quad (2.15)$$

## 2.5 Pérdidas de potencia.

Las principales pérdidas en una máquina eléctrica se deben a las que se producen en el hierro y el cobre, al fijar la densidad magnética máxima en el entrehierro se fijan las pérdidas por kilogramo en el hierro. Análogamente al fijar la densidad de corriente se fijan las pérdidas en el cobre por kilogramo de material.

### 2.5.1 Pérdidas en el hierro.

Se debe tener presente que al utilizar aleaciones amorfas las pérdidas en el hierro son muy bajas, esto es muy importante en máquinas que trabajan a baja velocidad ya que estas pérdidas son constantes (no dependen de la velocidad). En la aleación amorfa que se emplea, las pérdidas en el hierro se pueden cuantificar de la siguiente forma:

$$\left[ \frac{Perd}{Kg} \right]_{Fe} = 0,5 \cdot \frac{f}{50} \cdot B_{max}^2 \left[ \frac{watts}{Kg} \right] \quad (2.16)$$

Donde:

$f = 12$  Hz que es la frecuencia a una velocidad de giro igual a  $n=120$  (rpm).

Debido a la alta resistencia de las aleaciones amorfas las pérdidas de *Foucault* se pueden despreciar, luego por esa razón las pérdidas totales resultan proporcionales a las de histéresis. El peso total de los dientes de aleación amorfa en este generador es de 28,34(Kg.), y el  $B_{máx}=1,1$ (T), luego las pérdidas alcanzan a  $P_{Fe}=4,12$ (w).

Estas pérdidas en el hierro resultan extremadamente bajas por las siguientes razones:

El peso total de los dientes que constituyen el circuito magnético en el estator es bajo, debido a la ausencia de yugos.

- Las aleaciones amorfas tipo "*Metglas*" son de bajas pérdidas específicas (alrededor de la tercera parte de las correspondientes al hierro silicoso común).
- La frecuencia de trabajo es baja (12 Hz que corresponden a 120 rpm).
- Las bajas pérdidas de hierro hacen posible que el generador con flujo axial tenga un muy alto rendimiento al alimentar cargas de baja potencia. Si la velocidad de giro es igual a  $n = 250$ (r.p.m.) la frecuencia de trabajo es  $f = 26$ (Hz), entonces las pérdidas en el hierro alcanzan a  $P_{Fe}=9$  W que al igual que en el caso anterior son bajas.

### 2.5.2 Pérdidas en el cobre.

Al considerar una temperatura de trabajo de  $120^{\circ}\text{C}$  en los conductores, las pérdidas de potencias en los devanados del generador se pueden calcular con la siguiente relación:

$$\left[ \frac{Perd}{Kg} \right]_{Cu} = 2,74 \cdot J^2 \left[ \frac{watts}{Kg} \right] \quad (2.17)$$

El peso del devanado principal es de  $P_{Cu1}=7,66$  (Kg) esto implica que las pérdidas en este devanado son:  $P_{Cu1}=72$  (W). El segundo devanado tiene un peso de  $P_{Cu2}=11,967$  (Kg) y las pérdidas son:  $P_{Cu2}=66,6$  (W). El tercer devanado pesa  $P_{Cu3}=10,285$  (Kg) con unas pérdidas iguales a  $P_{Cu3}=72,3$  (W). Luego la potencia de pérdidas totales ascienden a 215 (W) y representan el 14% de la potencia eléctrica del generador cuando este trabaja a una velocidad de giro  $n=120$  (rpm) y una frecuencia de trabajo  $f=12$  (Hz). Así la potencia útil del generador en esta condición es:

$$P_{\text{útil}} = 1535,9 \cdot 0,86 = 1320(W)$$

Sin embargo, si el generador tiene una velocidad de giro igual a  $n=250$  (rpm) con una frecuencia de trabajo  $f=26$  (Hz), la potencia que entregan los tres devanados alcanza a  $S_{\text{total}}=3204$  (W). En este caso las pérdidas de potencia llegan a 220 (W) y representan el 7% de la potencia eléctrica del generador. Luego la potencia útil en esta condición de trabajo es:

$$P_{\text{útil}} = 3204 \cdot 0,93 = 2979(W)$$

Cuando el generador trabaja con una velocidad de giro igual a  $n=500$  (rpm) la frecuencia de trabajo es  $f=52$  (Hz). Las pérdidas en el hierro en estas condiciones alcanzan un valor de  $P_{Fe}=18$  (W) al agregar las pérdidas que se producen en los devanados resulta que las pérdidas totales ascienden a 229 (W). En estas condiciones el generador es capaz de entregar una potencia  $S_{\text{total}}=6409$  (W) luego las pérdidas alcanzan el 3,5% de la potencia producida. En esta condición de trabajo del generador se debe considerar un elevador de velocidad de una razón de elevación de 4 a 5 veces.

## 2.6 Especificaciones y parámetros del diseño.

Se presenta en la tabla 2.3 y el Anexo II un resumen de las principales especificaciones y parámetros relevantes que arroja el diseño del Generador con Flujo Axial e Imanes Permanentes para aplicaciones eólicas.

Tabla 2.3.- Principales especificaciones del generador.

|                                                |        |
|------------------------------------------------|--------|
| Velocidad en rpm                               | 120    |
| Número de Polos                                | 12     |
| Número de Ranuras                              | 84     |
| Diámetro máximo de la Carcasa                  | 300 mm |
| Diámetro externo del Rotor                     | 280 mm |
| Diámetro interno del Rotor                     | 169 mm |
| Ancho de los Imanes Permanentes                | 10 mm  |
| Número de Fases                                | 7      |
| Paso Polar (ranuras)                           | 7      |
| Ancho discos sujeción para dientes del estator | 8 mm   |
| Largo del estator                              | 207 mm |

## 2.7 Análisis de los resultados.

El Generador con Flujo Axial de Imanes Permanentes diseñado, presenta como principales características un alto factor de utilización y buen aprovechamiento de los elementos activos (Hierro y Cobre), más aún si se diseña para generar tensiones inducidas trapezoidales. La generación de tensiones trapezoidales facilita la rectificación y la obtención de una señal continua de salida.

El alto número de fases con que se diseñó este generador, permite reducir la aparición de torques pulsantes y aumenta el factor de utilización. Además, el utilizar devanados concentrados y no acortados permite obtener la máxima potencia del generador.

La baja velocidad de operación de la máquina permite desde el punto de vista constructivo poder ajustar menores entrehierros lo que ayuda a alcanzar niveles elevados de densidad de flujo magnético en el entrehierro.

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

A baja velocidad de funcionamiento la frecuencia sincrónica también es baja y como las pérdidas por histéresis disminuyen en forma proporcional a la frecuencia, para este

generador las pérdidas en el hierro resultan mínimas (como se hace uso de aleaciones amorfas, se desprecian las pérdidas por corrientes parásitas). Además la utilización de aleaciones amorfas en el circuito magnético del generador se justifica por las bajas pérdidas específicas en comparación al hierro silicoso común. Las pérdidas que se producen en el cobre y el hierro son del orden del 15% de la potencia eléctrica total producida a 120 rpm, a menores cargas eléctricas el rendimiento aumenta, es decir el generador aumenta su rendimiento a bajas velocidades de viento, atributo que no se puede lograr con un generador tradicional (con mayores pérdidas de hierro).

El agregar devanados secundarios, dificulta la realización de los mismos, pero se logra aprovechar mejor las ranuras. Los devanados interiores del generador son concéntricos y de un mayor rendimiento que el devanado externo ya que las cabezas de bobinas de éstos son menores. El contar con tres devanados independientes, permite alimentar tres pequeñas cargas independientes o conectar dos o tres de ellos en serie, con lo que se obtiene una mayor flexibilidad en la utilización de la potencia de la máquina.

El sistema generador-rectificador podrá absorber importantes alzas en la velocidad del viento y consiguientes elevaciones de tensión, ya que en la conexión tipo puente de onda completa los diodos de cada rectificador están sometidos a  $1/6$  (y  $1/3$ ) de la tensión total (lo que ocurre cuando los tres devanados se conectan en serie).

Para iguales pérdidas de potencia la potencia de salida que se logra del generador, a partir de los devanados alimentando tres rectificadores independientes, es mayor (del orden del 40%) que cuando los devanados se conectan en serie para alimentar un solo rectificador. En otras palabras, aumenta en un 40% la potencia nominal del generador.

Para una misma potencia de salida las pérdidas de los devanados conectados en serie y alimentando un rectificador son aproximadamente un 99% mayores que cuando los devanados alimentan rectificadores en forma independiente.

## **2.8 Conclusiones del capítulo.**

Una baja velocidad de operación de la máquina permite desde el punto de vista constructivo poder ajustar menores entrehierros lo que ayuda a alcanzar niveles elevados de densidad de flujo magnético en el entrehierro.

Al utilizar sistemas de excitación de baja permeabilidad, es decir imanes permanentes, se tiene la ventaja de minimizar el efecto de reacción de armadura, lo cual tiene como consecuencia un aumento de la regulación de tensión. Además al no tener contacto óhmico el sistema de excitación con el exterior, se hace posible la construcción de unidades blindadas.

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 o reducir en tamaño elementos de transmisión mecánica en base a engranajes para elevar la velocidad.

Al contar con tres devanados independientes conectado cada uno a un rectificador puente, tenemos un mejor aprovechamiento de la máquina que si conectáramos los devanados en serie a un solo rectificador puente.

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### Conclusiones

- 1 La búsqueda y organización de la bibliografía utilizada para la confección del trabajo resultó de gran ayuda a la hora de realizar el diseño de la máquina de imanes permanentes.
- 2 Dentro de las diferentes topologías de máquinas de imanes permanentes, la más utilizada, debido a las grandes ventajas que brinda para ser utilizada en aerogeneradores, es la de flujo axial.
- 3 Las máquinas de imanes permanentes, al presentar un gran número de polos, pueden trabajar a bajas velocidades y por lo tanto no requieren de caja multiplicadora para su utilización en aerogeneradores.
- 4 Las máquinas de imanes permanentes presentan, en aplicaciones eólicas, las ventajas siguientes:
  - Son más eficientes ya que no presentan devanado de excitación.
  - Presentan un aumento del torque desarrollado y de la potencia de salida por volumen, en comparación con máquinas de excitación electromagnética.
  - Presentan un mejor funcionamiento dinámico (mayor densidad de flujo magnético en el entrehierro).
- 5 El generador diseñado cumple con los requisitos establecidos.

**Recomendaciones**

- 1 Ampliar el diseño de las máquinas de imanes permanentes a las demás topologías existentes.
- 2 Implementar, con la ayuda de algún software, la posibilidad de simular el comportamiento de este tipo de máquinas para su estudio.
- 3 Hacer llegar esta propuesta de diseño a los organismos interesados para su análisis, construcción y explotación.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Chinchilla Sánchez, Mónica. "Control de un sistema de generación eólica de velocidad variable con generador sincrónico multipolar de imanes permanentes acoplados a la red". Tesis doctoral. Madrid, España. Universidad Carlos III de Madrid. Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Automática, 2001. Página(s): 29 – 33.
- [2] B.J. Chalmers, W. Wu, E. Spooner. "An Axial-Flux Permanent-Magnet Generator For A Gearless Wind Energy System". Energy Conversion, IEEE Transaction on. Volume 14, Issue 2, Jun 1999. Página(s): 251 – 254.
- [3] Wallace Rogel, Morán, Cea, Pérez: "Diseño y Construcción de Motores con Flujo Axial en Potencias Medias". Congreso Chileno de Ingeniería Eléctrica. Arica, Chile, Octubre, 1991.
- [4] Wallace Rogel, Lipo, Tapia, Morán. "Diseño y Construcción de un Generador de Flujo Axial con Imanes Permanentes". Congreso Chileno de Ingeniería Eléctrica. pp. C-67-C-72, Valdivia- Chile, Noviembre, 1993.
- [5] Wallace Rogel, Morán, Valenzuela. "Desarrollo de Máquinas Eléctricas con Flujo Axial". Seminario IEEE. Concepción, Chile, Agosto, 1994.
- [6] Tapia, Juan A. "Diseño y Construcción de un Generador con Flujo Axial y Estator Central". Memoria de Grado. Concepción, Chile. Universidad de Concepción. Facultad de Ingeniería. Departamento de Ingeniería Eléctrica. Abril, 1992. Página(s):
- [7] Tapia, Juan A. "Introducción al Diseño de Máquinas Eléctricas". Apuntes de clases. Concepción, Chile. Universidad de Concepción. Facultad de Ingeniería. Departamento de Ingeniería Eléctrica, 2003. Página(s): 2-5; 9-10; 18-22.

- [8] De La Ree Jaime, Boules; "Magnet Shaping to Reduce induced Voltage Harmonic in PM Machines with Surface Mounted Magnets", IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 6 N°1, pp. 155-161, March, 1991.
- [9] Li T, Slemon G.; "Reduction of Cogging Torque in Permanent Magnet Motors" IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 24, N°6, pp. 2901-2903, November, 1988.
- [10] Ishikawa Takeo, Slemon G.R.; "A Method of Reducing Ripple Torque in Permanent Magnet Motors without Skewing" IEEE Transactions on Magnetics, vol. 29, N° 2, pp.324-329, March, 1993.
- [11] Grauers, 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.
- [12] Soares, M., Kind, S. & Fernandez, O.H., 2009. Estado de la Industria Eólica en Argentina 2009.
- [13] Chen, J. & Nayar, C., 1998. "A Direct-coupled, Wind-driven Permanent Magnet Generator". Renewable Energy, 542-547.
- [14] Jahns, T.M. & Soong, W.L., 1996. Pulsating Torque Minimization Techniques for Permanent Magnet AC Motor Drives. Review, Transactions on Industrial Electronics, 2, 321-330.
- [15] Leidhold, R. & Garcia, G., 2000. Pmac motor control strategy based on the instantaneous active and reactive power, for ripple-torque and copper--losses minimization. In Industrial Electronics Society, IECON 2000. pp. vol. 2 1401-1405.

## ANEXOS

### Anexo I AWG estándar.

| Número<br>AWG | Ø [Inch] | Ø [mm] | Ø [mm <sup>2</sup> ] | Resistencia a 20 °C<br>[Ohm/m] |
|---------------|----------|--------|----------------------|--------------------------------|
| 1             | 0.289    | 7.35   | 42.4                 | 0.000407                       |
| 2             | 0.258    | 6.54   | 33.6                 | 0.000513                       |
| 3             | 0.229    | 5.83   | 26.7                 | 0.000647                       |
| 4             | 0.204    | 5.19   | 21.1                 | 0.000815                       |
| 5             | 0.182    | 4.62   | 16.8                 | 0.00103                        |
| 6             | 0.162    | 4.11   | 13.3                 | 0.00130                        |
| 7             | 0.144    | 3.66   | 10.5                 | 0.00163                        |
| 8             | 0.128    | 3.26   | 8.36                 | 0.00206                        |
| 9             | 0.114    | 2.91   | 6.63                 | 0.00260                        |
| 10            | 0.102    | 2.59   | 5.26                 | 0.00328                        |
| 11            | 0.0907   | 2.30   | 4.17                 | 0.00413                        |

|    |         |        |         |         |
|----|---------|--------|---------|---------|
| 12 | 0.0808  | 2.05   | 3.31    | 0.00521 |
| 13 | 0.0720  | 1.83   | 2.62    | 0.00657 |
| 14 | 0.0641  | 1.63   | 2.08    | 0.00829 |
| 15 | 0.0571  | 1.45   | 1.65    | 0.0104  |
| 16 | 0.0508  | 1.29   | 1.31    | 0.0132  |
| 17 | 0.0453  | 1.15   | 1.04    | 0.0166  |
| 18 | 0.0403  | 1.02   | 0.823   | 0.0210  |
| 19 | 0.0359  | 0.912  | 0.653   | 0.0264  |
| 20 | 0.0320  | 0.812  | 0.518   | 0.0333  |
| 21 | 0.0285  | 0.723  | 0.410   | 0.0420  |
| 22 | 0.0253  | 0.644  | 0.326   | 0.0530  |
| 23 | 0.0226  | 0.573  | 0.258   | 0.0668  |
| 24 | 0.0201  | 0.511  | 0.205   | 0.0842  |
| 25 | 0.0179  | 0.455  | 0.162   | 0.106   |
| 26 | 0.0159  | 0.405  | 0.129   | 0.134   |
| 27 | 0.0142  | 0.361  | 0.102   | 0.169   |
| 28 | 0.0126  | 0.321  | 0.0810  | 0.213   |
| 29 | 0.0113  | 0.286  | 0.0642  | 0.268   |
| 30 | 0.0100  | 0.255  | 0.0509  | 0.339   |
| 31 | 0.00893 | 0.227  | 0.0404  | 0.427   |
| 32 | 0.00795 | 0.202  | 0.0320  | 0.538   |
| 33 | 0.00708 | 0.180  | 0.0254  | 0.679   |
| 34 | 0.00631 | 0.160  | 0.0201  | 0.856   |
| 35 | 0.00562 | 0.143  | 0.0160  | 1.08    |
| 36 | 0.00500 | 0.127  | 0.0127  | 1.36    |
| 37 | 0.00445 | 0.113  | 0.0100  | 1.72    |
| 38 | 0.00397 | 0.101  | 0.00797 | 2.16    |
| 39 | 0.00353 | 0.0897 | 0.00632 | 2.73    |
| 40 | 0.00314 | 0.0799 | 0.00501 | 3.44    |

**Anexo II Resumen de dimensiones y datos relevantes del diseño del Generador de Flujo Axial de Imanes Permanentes para aplicaciones eólicas.**

|                                                          |                       |
|----------------------------------------------------------|-----------------------|
| Potencia de salida del generador (devs. 1+2+3)           | 1535 VA               |
| Potencia útil del generador                              | 1320 W                |
| Corriente de salida (devs. 1+2+3 en serie)               | 3,9 A                 |
| Tensión inducida máxima a 120 r.p.m. (1-2-3 en serie)    | 392 V                 |
| Pérdidas de cobre totales (devs. 1+2+3)                  | 215 W                 |
| Inducción magnética remanente ( $B_{\text{remanente}}$ ) | 1,16 T                |
| Fuerza Coercitiva ( $H_{\text{coercitivo}}$ )            | 839176 A/m            |
| Largo del Imán                                           | 10 mm                 |
| Alto del Imán                                            | 52 mm                 |
| Ancho máximo del imán (en el perfil trapezoidal)         | 60 mm                 |
| Ancho mínimo del imán (en el perfil trapezoidal)         | 38 mm                 |
| Separación media entre imanes                            | 8,8 mm                |
| Separación máxima entre imanes                           | 11,3 mm               |
| Separación mínima entre imanes                           | 6,2 mm                |
| Área de la ranura                                        | 233 mm <sup>2</sup>   |
| Área del diente                                          | 233 mm <sup>2</sup>   |
| Ancho superior del diente                                | 6,3 mm                |
| Ancho inferior del diente                                | 2,1 mm                |
| Largo de la ranura ( $h_{\text{ran}}$ )                  | 55,5 mm               |
| Ancho de la ranura ( $a_{\text{ran}}$ )                  | 4,2 mm                |
| Ancho del yugo                                           | 13 mm                 |
| Factor de distribución (Devanado principal)              | 1,0                   |
| Factor de acortamiento (Devanado principal)              | 1,0                   |
| Factor de devanado (Devanado principal)                  | 1,0                   |
| Diámetro conductor de cobre devanado principal           | 0,9                   |
| B en el entrehierro                                      | 0,55 T                |
| Densidad de corriente (rms) del devanado principal       | 1,8 A/mm <sup>2</sup> |
| Corriente por fase del devanado principal                | 1,2 A                 |
| Tensión inducida por fase, devanado principal            | 60 V                  |

|                                                  |                       |
|--------------------------------------------------|-----------------------|
| Potencia que entrega el devanado principal       | 470 VA                |
| Número de vueltas del devanado principal         | 696                   |
| Número de vueltas por bobina                     | 58                    |
| Peso del cobre del devanado principal            | 7,7 Kg                |
| Pérdidas por cobre en el devanado principal      | 72 W                  |
| Diámetro conductor de cobre segundo devanado     | 1,15 mm               |
| B en el entrehierro                              | 0,55 T                |
| Densidad de corriente (rms) del segundo devanado | 1,4 A/mm <sup>2</sup> |
| Corriente por fase del segundo devanado          | 1,5 A                 |
| Tensión inducida por fase, segundo devanado      | 72 V                  |
| Potencia que entrega el segundo devanado         | 564 VA                |
| Número de vueltas del segundo devanado           | 840                   |
| Número de vueltas por bobina                     | 70                    |
| Peso del cobre del segundo devanado              | 12 Kg                 |
| Pérdidas por cobre en el segundo devanado        | 66 W                  |
| Diámetro conductor de cobre tercer devanado      | 1,29 mm               |
| B en el entrehierro                              | 0,55 T                |
| Densidad de corriente (rms) del tercer devanado  | 1,6 A/mm <sup>2</sup> |
| Corriente por fase del tercer devanado           | 2,1 A                 |
| Tensión inducida por fase, tercer devanado       | 64 V                  |
| Potencia que entrega el tercer devanado          | 501 VA                |
| Número de vueltas del tercer devanado            | 744                   |
| Número de vueltas por bobina                     | 62 Kg                 |
| Peso del cobre del tercer devanado               | 10 Kg                 |
| Pérdidas por cobre en el tercer devanado         | 72 W                  |