



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**Diseño de un generador  
eléctrico para aerogeneradores  
de eje vertical y de baja  
potencia**

**TESIS**

Que para obtener el título de

**Ingeniero Eléctrico - Electrónico**

**P R E S E N T A**

José Manuel Ramos Guerrero

**DIRECTOR DE TESIS**

Dr. Mario Roberto Arrieta Paternina



**Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2022**

## **Dedicatoria**

Este trabajo se lo dedico principalmente a mis padres María Angela y José Ramos, quienes me han brindado su apoyo total durante todos mis estudios y han estado conmigo siempre que lo he necesitado.

A mi hermano Israel, por ser un gran apoyo durante la realización de este trabajo.

A Sofia, por estar conmigo en todo momento durante la realización de esta tesis.

# Agradecimientos

A mis padres, que me acompañaron en este camino y siempre confiaron en mí, y me brindaron soporte incondicional para culminar mis estudios.

A mi hermano, por el apoyo que siempre me brinda.

A Sofia, quien ha confiado siempre en mí, y estuvo conmigo en todo momento apoyándome totalmente.

Quiero agradecer de manera muy especial al Dr. Mario Arrieta Paternina por siempre guiarme durante la realización de este trabajo. Además de estar pendiente, y dando su ayuda durante este proceso. Su ayuda fue fundamental para la realización de este trabajo.

Finalmente, quiero agradecer a la UNAM, en especial agradezco a los proyectos PAPIIT No. TA101421 y PAPIME No. PE105421.

## Contenido

Capítulo 1. Introducción.....	9
1.1 Objetivo de la tesis .....	9
1.2 Definición del problema: .....	9
1.3 Método:.....	9
1.4 Estado del arte .....	9
1.5 Contribución .....	11
Capítulo 2. Marco teórico.....	12
2.1 Recursos para la generación de energía eléctrica .....	12
2.1.1 Energías no renovables.....	12
2.1.2 Energías renovables.....	12
2.2 Generadores eólicos.....	13
2.3 Generadores eléctricos.....	14
2.3.1 Configuraciones.....	16
2.3.2 Generador asíncrono.....	18
2.3.3 Generador síncrono de imanes permanentes .....	18
2.3.4 Mediciones mecánicas y eléctricas.....	19
2.4 Modelado magnético .....	22
2.4.1 Flujos magnéticos en el PMSG .....	22
2.4.2 Principios .....	22
Capítulo 3. Modelado del PMSG .....	29
3.1 Modelado del entrehierro.....	29
3.2 Acero eléctrico.....	32
3.3 Modelado eléctrico .....	32
3.4 Diseño mecánico.....	39
3.5 Dimensionamiento del imán .....	40
Capítulo 4. Cálculos y proceso iterativo .....	42
4.1 Parámetros iniciales de diseño.....	43
4.2 Número de polos e imanes.....	43
4.3 Ranuras .....	44
4.4 Potencia y torque. ....	45

4.5 Entrehierro, yugo y mejoramiento de la señal.....	45
4.6 Imanes.....	46
4.7 Materiales .....	49
4.8 Conductores .....	50
Capítulo 5. Modelado por elemento finito .....	51
5.1 Creación de la geometría .....	52
5.2 Materiales .....	56
5.3 Condiciones de operación.....	62
5.4 Creación de la malla .....	69
5.5 Ejecutar el análisis .....	70
5.6 Resultados.....	72
Capítulo 6. Resultados.....	75
6.1 Geometría .....	75
6.2 Malla.....	76
6.3 Rendimiento de la máquina .....	77
6.4 Simulaciones a velocidad variable .....	79
6.5 Simulaciones a velocidad máxima .....	80
Capítulo 7. Conclusiones y trabajos futuros.....	84
7.1 Conclusiones.....	84
7.2 Trabajos futuros .....	84
Referencias .....	86

## Índice de tablas

Tabla 1: Configuración de los imanes de neodimio. ....	28
Tabla 2: Parámetros iniciales de diseño. ....	43
Tabla 3. Variación de entrehierro y yugo .....	46
Tabla 4: Valores de la fracción magnética .....	48
Tabla 5: Parámetros iniciales de dimensionamiento del imán. ....	48
Tabla 6: Características de los materiales.....	49
Tabla 7: Medidas de la geometría del PMSG.....	52
Tabla 8: Características básicas de JMAG. ....	57
Tabla 9: Parámetros de entrada del PMSG.....	75
Tabla 10: Dimensiones en la geometría del PMSG.....	76
Tabla 11: Calidad de la malla.....	77

## Índice de Figuras

Figura 1: Espectro de Van der Hoven. ....	14
Figura 2: Partes de un generador de eje vertical. ....	15
Figura 3: Clasificación de los generadores. ....	16
Figura 4: Configuraciones rotor-estator [9]. ....	17
Figura 5: Direcciones en un generador [9]. ....	17
Figura 6: Dirección del flujo magnético entre estator y rotor. ....	17
Figura 7: Configuración de imanes en un PMSG [20]. ....	19
Figura 8: PMSG de dos polos. ....	20
Figura 9: PMSG de cuatro polos. ....	21
Figura 10: Circuito magnético básico. ....	23
Figura 11: Permeabilidad en un material ferromagnético. ....	25
Figura 12: Reluctancia de un material ferromagnético. ....	26
Figura 13: Curva de permeabilidad. ....	27
Figura 14: Curva de histéresis. ....	28
Figura 15: Circuito magnético PMSG. ....	30
Figura 16: Modelos de flujo en el entrehierro. ....	31
Figura 17: Reluctancias para cálculo del modelo complejo de entrehierro. ....	32
Figura 18: Circuito magnético en un núcleo ferromagnético. ....	33
Figura 19: Dimensiones del Imán PMSG. ....	41
Figura 20: Metodología de diseño del PMSG. ....	42
Figura 21: Comparación de BHmax en distintos imanes, adaptado de [29]. ....	47
Figura 22: Clasificación imanes de neodimio, adaptado de [32]. ....	48
Figura 23: Densidad de flujo en el acero 20JNEH1200. ....	50
Figura 24: Metodología para el modelado en elemento finito en JMAG. ....	52
Figura 25: Vista acotada de la geometría del PMSG. ....	53
Figura 26: Vista principal de JMAG. ....	54
Figura 27: Barra de herramientas principal de JMAG. ....	54
Figura 28: Vista de la geometría del PMSG en el editor de geometría de JMAG. ....	55
Figura 29: Selección y eliminación de material no ferromagnético. ....	56
Figura 30: Geometría sin material ferromagnético. ....	56
Figura 31: Agrupación de imanes del PMSG. ....	58
Figura 32: Selección de propiedades para los grupos. ....	59
Figura 33: Menú de características para los elementos en JMAG. ....	60
Figura 34: Geometría después de seleccionar colores. ....	61
Figura 35: Selección del estudio a realizar. ....	62
Figura 36: Condiciones para un PMSG. ....	63
Figura 37: Pestaña para la selección de velocidad del PMSG. ....	63
Figura 38: Menú para agregar circuito al modelo. ....	65
Figura 39: Menú de configuración del circuito. ....	66
Figura 40: Menú de configuración de parámetros eléctricos. ....	66

Figura 41: Circuito conexión Y.....	67
Figura 42: Configuraciones posibles en Emeter. ....	68
Figura 43: Configuración 1 de bobinado en el estator.....	68
Figura 44: Configuración 2 de bobinado en el estator.....	68
Figura 45: Menú de configuración de malla en JMAG.....	69
Figura 46: Malla creada a partir de una geometría base.....	70
Figura 47: Menú de selección de pasos y tiempo de simulación.....	71
Figura 48: Menú de configuración de la longitud axial del modelo.....	72
Figura 49: Menú de gráficos posibles a mostrar.....	73
Figura 50: Muestra de potencia para el estudio de ejemplo. ....	74
Figura 51: Geometría final del PMSG.....	76
Figura 52: Malla JMAG. ....	77
Figura 53: Flujo en el PMSG.....	78
Figura 54: Resultados en vacío.....	79
Figura 55: Resultados ante un perfil de viento variable. ....	80
Figura 56: Corriente eléctrica a velocidad máxima.....	81
Figura 57: Voltaje a velocidad máxima.....	81
Figura 58: Torque a velocidad máxima.....	82
Figura 59: Potencia a velocidad máxima.....	83



# Capítulo 1. Introducción

## 1.1 Objetivo de la tesis

Diseñar un generador eléctrico para aerogeneradores de eje vertical y de baja velocidad, considerando los datos de viento tomados en el periférico de Guadalajara y partiendo de una metodología de diseño. Este trabajo se centra en los cálculos y diseño de la parte eléctrica de un generador eléctrico para aerogeneradores de eje vertical y de baja velocidad, contemplando el rotor, estator y conexiones para las otras etapas (Parte electrónica y parte mecánica: eje y aspa). El objetivo del diseño es proporcionar una solución ambiental en el ámbito de baja potencia que pueda ser usado para satisfacer necesidades eléctricas en comunidades alejadas, y de bajo poder económico.

## 1.2 Definición del problema:

La generación de energía eléctrica convencional regularmente es causante de emisiones de gases de efecto invernadero. Para mitigar este problema se busca realizar parte de esta generación por medio de energías limpias (viento, sol, biomasa, etc.). Con las energías renovables se logra poner en marcha elementos eléctricos que, al no consumir energía generada convencionalmente, reducirán el impacto eléctrico en el sistema nacional, así como el impacto ambiental en el país. Un ejemplo de ello es la energía eólica, que es la generación de electricidad a partir de convertir la energía cinética del viento en energía eléctrica. Las máquinas encargadas de hacer este proceso se denominan aerogeneradores. Para lugares donde el viento tiene una velocidad media (3 m/s a 6m/s) se pueden implementar aerogeneradores de baja velocidad que nos permitirán alimentar sistemas de iluminación o sistemas eléctricos de bajo voltaje.

## 1.3 Método:

Se realizará una delimitación de las características del generador eléctrico para aerogeneradores de eje vertical y de baja velocidad por medio de la previa obtención de datos de velocidad de viento, con estos datos se obtendrán los parámetros necesarios iniciales que permitirán realizar el diseño del rotor y el estator de la máquina, calculando tanto las partes mecánicas, eléctricas y magnéticas.

Primero se definirían las restricciones topológicas, luego se delimitarán tanto el tipo de material como la geometría, esto permitirá obtener las características de los imanes, huecos y devanados del generador se realizarán simulaciones en *CAD* y elemento finito para comprobar que se cumplan las características propuestas. Al final se buscarán los materiales y lugares adecuados para realizar la maquinación de las partes y unirlos para obtener el generador.

## 1.4 Estado del arte

Las plantas de energía eólica están creciendo rápidamente en todo el mundo debido a sus grandes ventajas económicas, ambientales y tecnológicas. En 2021, la capacidad instalada fue de 68 GW. En este contexto, los generadores síncronos de imanes permanentes (*PMSG*), integrados en turbinas eólicas juegan un papel importante debido a sus ventajas competitivas, que incluyen: construcción sin engranes, eliminación del sistema de CC, alta densidad de potencia, bajo nivel de ruido, estructura simple, bajo mantenimiento y capacidad de control total del sistema para la máxima extracción de energía eólica con interfaz a la red.

En la literatura reciente, algunas investigaciones direccionan la problemática de diseño y construcción de *PMSGs* [1]-[4]. Por ejemplo, en [1] se describe una metodología de diseño basada en ranuras del estator y polos del rotor, así como de la potencia de entrada. Se hace la comparativa entre dos versiones de geometría variando los polos y ranuras, también se mencionan la elección de los materiales del *PMSG*, y se presentan simulaciones por elemento finito que muestran el comportamiento del flujo en las máquinas comparando la magnitud de este y la señal de voltaje y corriente de salida.

En [2], se presenta una metodología de diseño donde se exponen los requisitos básicos para poder modelar y diseñar un *PMSG*. Se describe que la potencia, el entrehierro y la densidad de corriente son los requerimientos iniciales para el diseño. También se presenta un diseño de geometría dando medidas holísticas. Se somete el diseño a simulaciones por elemento finito obteniendo señales de voltaje y corriente, así como el comportamiento en el tiempo de la inductancia propia del generador.

En [3], se aborda el diseño y construcción de un aerogenerador de eje vertical de potencia media, utilizando una metodología holística, en donde se abordan diferentes simulaciones de casos donde se varían los parámetros eléctricos y mecánicos del generador, abordando también el diseño eléctrico, donde se calculan todos los parámetros necesarios para poder implementar el circuito. De igual manera, se explica la implementación física del *PMSG* y su correlación con las simulaciones.

Por último, en [4] se aborda un diseño dividido en 4 fases, partiendo de los requerimientos iniciales, potencia, velocidad y torque. Luego, se realiza el modelo eléctrico y magnético, para después calcular sus valores por medio de ecuaciones que describen el comportamiento del *PMSG*. Este diseño brinda una solución metódica pero compleja para realizar el proceso de diseño.

Por otro lado, también se han llevado a cabo investigaciones acerca de la calidad de la energía en *PMSGs*, en este sentido en [5] se aborda la problemática del mejoramiento de la señal de salida de los *PMSGs*, utilizando la *THD* como método para determinar que tan pura es la señal. Además, este artículo expone que la reducción de la *THD* se logra gracias a la variación del tamaño de polo y un movimiento angular en los imanes del estator. En [6], se aborda la variación de potencia de entrada, y por lo tanto de torque en los *PMSGs*, analizando su relación con los armónicos de la señal de voltaje, y por lo tanto del *THD*, realizando simulaciones ante un aumento de torque, donde se muestra que, a mayor torque, los armónicos van aumentando en magnitud, y la velocidad va a disminuir a un valor constante a valores de torque alto. Se concluye que el *PMSG* debe operar en regiones donde el torque no aumente la *THD* significativamente.

En [7], se aborda la unión entre calidad de la señal en el *PMSG* y el diseño mecánico, por medio del análisis de dos prototipos que tienen ranuras con diferente geometría, se concluye que la geometría juega un papel importante en la conducción del flujo magnético, el cual está íntimamente relacionado con la señal de salida de voltaje que entrega el *PMSG*. Se estudian estatores con simple y doble ranura, siendo este último el que más flujo magnético produce, pero el que más *THD* involucra a la señal.

En [8], se aborda el análisis de la variación del diámetro, y la longitud del rotor y el estator, así como la relación entre las medidas geométricas y la potencia generada. Se explica la relación lineal que tiene el voltaje con la velocidad de forma gráfica, presentando variaciones de acuerdo con las dimensiones por medio de la relación entre diámetro y longitud. Utilizando bases geométricas, se determina la carga eléctrica y la salida de energía en periodos de tiempo determinados.

El método de elemento finito es un método matemático que sirve para realizar cálculos muy complejos, gracias al desarrollo computacional existente, dividiendo los cálculos en problemas más pequeños y resolviendo estos para luego armar un conjunto de resultados. En este sentido las simulaciones de sistemas complejos como son los *PMSGs* pueden resolverse con este método. En [9], se presenta un análisis electromagnético de *PMSG* por medio de elementos finitos, resaltando su importancia al calcular las distribuciones de los campos magnéticos en el generador. Se concluye que el método es particularmente útil cuando se quiere analizar el comportamiento dinámico de las máquinas, debido a las diferentes condiciones de operación que se suscitan en el sistema. También se obtuvieron señales de voltaje, corriente y potencia en las simulaciones.

### 1.5 Contribución

Artículo de revista: Los resultados adquiridos en esta tesis han sido presentados en el siguiente artículo.

Gabriel E. Mejía-Ruiz, Paul Pedraza, José Ramos, Javier de la Cruz, M. R. A. Paternina and A. Zamora-MendeMéndez. "Enhancing Grid Integration and Design of Low Speed PMSGs by Exploiting SRF-PLL-based Sensorless Control and Holistic Modeling", IEEE Transactions and Energy Conversion, en segunda ronda de evaluación.

## Capítulo 2. Marco teórico

En este capítulo se abordan los conceptos fundamentales que introducen al modelado de un generador eléctrico. Se trata la energía eólica como un recurso y su clasificación, así como la clasificación de los generadores para aerogeneradores. Por último, se explican los conceptos matemáticos básicos para el modelado.

### 2.1 Recursos para la generación de energía eléctrica

La generación de energía eléctrica necesita fuentes primarias de energía cinética, las cuales por medio de una conversión energética pueden producir electricidad para satisfacer las necesidades humanas. Existen muchas clasificaciones de energías primarias; sin embargo, la más común es dividir las por fuentes renovables o no renovables.

#### 2.1.1 Energías no renovables.

Las fuentes de energía no renovables son llamadas de esta manera debido a que son recursos que se encuentran de manera limitada en el planeta, por lo cual en algún momento se llegan a agotar. Estas fuentes de energía han sido tradicionalmente las más usadas para producir energía eléctrica; sin embargo, ellas contribuyen, en su mayoría, de gran manera con la contaminación y el calentamiento global en nuestro planeta. Las fuentes más usadas para la producción de energía eléctrica son: petróleo, carbón y gas; todas estas fuentes son también llamadas combustibles fósiles, debido a que se formaron de restos orgánicos de animales y plantas que vivieron en la tierra hace miles de años [10]- [11]. Dado que el proceso es muy lento y que las demandas energéticas de la población son muy grandes y se incrementan exponencialmente con el pasar de los años, las fuentes de energía no renovables se están agotando, sin dar tiempo a su recuperación y provocará que en algunos años estos recursos ya no estén disponibles para la producción de recursos energéticos.

#### 2.1.2 Energías renovables.

Las fuentes de energía renovables son aquellas que su tiempo de regeneración es muy bajo, o que son inagotables. Muchas de estas fuentes de energía no producen impacto sobre el cambio climático o la contaminación al ser usadas; por lo que en los últimos años se ha optado por desarrollar tecnologías centradas en este tipo de generación, en un afán por reducir el uso de las fuentes no renovables y con ello el impacto ambiental que estas producen. Debido a la disposición de los recursos energéticos renovables en todo el mundo, también se opta por este tipo de energías para proveer de electricidad a comunidades en donde, por cuestiones económicas, el sistema eléctrico no suministra el servicio, ya que le es incosteable construir toda la infraestructura necesaria a estos lugares. Las fuentes renovables permiten obtener la energía eléctrica muy cerca a los poblados más alejados de la civilización, por lo cual no se necesitan grandes instalaciones externas para producir electricidad. Las fuentes de energías renovables más utilizadas son: solar, hidráulica, eólica, biomasa y geotérmica.

*Energía eólica:* la tierra cuenta con una capa que la cubre y protege de radiaciones y elementos externos, llamada atmósfera, debido a la cual el viento no puede escapar. Debido a radiación solar, que genera cambios en la presión atmosférica, el viento se mueve dentro de la atmósfera terrestre, lo que produce energía cinética, que será aprovechada entonces para poder producir un trabajo. Es

por esta razón que se puede decir que la energía eólica también en forma indirecta es una forma de energía solar, ya que sin sol no hay corrientes de viento. La mayoría de las aplicaciones permiten aprovechar la energía que brindan las corrientes de viento horizontales, y que comprenden velocidades de entre 3 y 25 metros por segundo [12].

El viento fluctúa debido a muchas características meteorológicas como la estación del año o la cantidad de radiación solar que hay en el lugar, así como también depende de las características físicas del lugar a considerar, como altura, rugosidad del terreno y posibles obstáculos dentro del área. La energía que se extrae del viento se puede expresar en términos de su densidad  $\rho$  y velocidad  $v$  como se expresa en la ecuación ( 1) [13].

$$E = \frac{1}{2} \rho v^2 \quad (1)$$

Mientras que la potencia eólica desarrollada se puede expresar en la ecuación ( 2) con la velocidad  $v$ , la densidad  $\rho$  y el área perpendicular a la corriente de aire  $A$  [13]- [14]:

$$P = \frac{1}{2} \rho A v^3 \quad (2)$$

Para describir la distribución de la velocidad del viento se utiliza la distribución Weibull, la cual es una herramienta matemática muy útil para intervalos de velocidad de un mes [15]. Es claro que las variaciones de viento dependen de muchos otros factores y no pueden ser determinados totalmente con la distribución Weibull; sin embargo, se puede tener cierta periodicidad en las mediciones de la velocidad del viento, por ejemplo, cada día, o cada año. Existe el espectro de Van der Hoven donde se puede observar cómo se producen periodicidades en el viento dependiendo de la frecuencia temporal que se analice, como se ve en la Figura 1 [11].

## 2.2 Generadores eólicos

Los generadores eólicos son dispositivos que convierten la energía cinética del viento en energía eléctrica. Son básicamente constituidos por un aspa que utilizara la energía del viento para hacer girar un generador eléctrico, generalmente trifásico. Existen generadores de ejes horizontal y vertical.

Los aerogeneradores de eje horizontal son los que tienen su eje de rotación paralelo a la dirección del suelo, y su altura siempre va a ser proporcional al tamaño de sus hélices, debido a que estas giran perpendicular al piso. Los generadores de eje horizontal son los más utilizados por su alta eficiencia, ya que a bajas velocidades pueden producir mucha potencia, gracias a arreglos de engranes que podrán multiplicar la velocidad de giro en el alternador. Pueden alcanzar potencias de 1 MW [16].

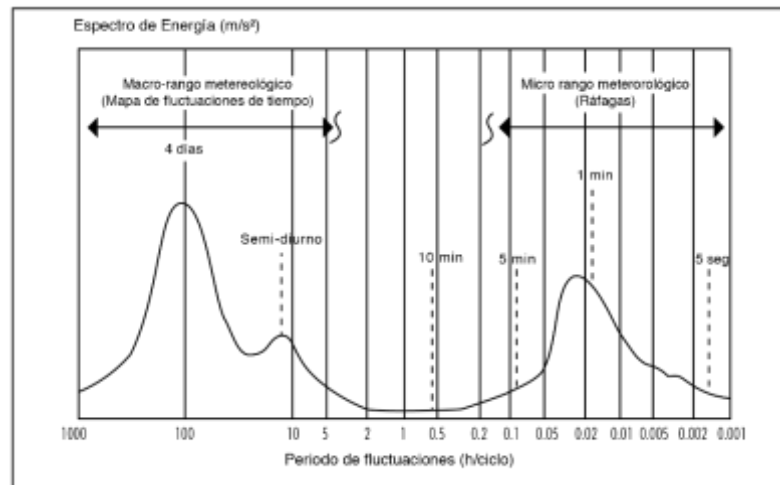


Figura 1: Espectro de Van der Hoven.

Los aerogeneradores de eje vertical son menos usados que su contraparte de eje horizontal, porque su eficiencia es menor, pero la gran variedad de tipos consigue diseños más flexibles, y por lo cual para aplicaciones de baja potencia son los más adecuados, además de poder obtener energía de vientos que provienen de todas direcciones [16]. Debido a que se encuentran a ras o cerca del suelo, el mantenimiento es mucho más sencillo. Los tipos más comunes de aerogeneradores de eje vertical son los siguientes [17]:

- Savonius.
- Darrieus.
- Giromill.
- Windside.
- WM.

Los aerogeneradores de eje vertical se componen de palas o aspas que son colocadas de acuerdo con la configuración elegida, también cuentan con un eje que conecta las aspas con el generador eléctrico, algunos tendrán cajas de engranes o motores de arranque, dependiendo de la potencia a la que se manejen. Los aerogeneradores menores a 10 kW de potencia no necesitan cajas de engranes o motores. En la Figura 2 se muestran los componentes antes mencionados.

### 2.3 Generadores eléctricos

Un generador eléctrico es un dispositivo capaz de convertir energía mecánica en energía eléctrica que puede entregar a la red, se logra gracias a la interacción de elementos eléctricos, magnéticos y mecánicos, convirtiendo la energía en diferentes tipos durante el proceso. Se clasifican por el tipo de señal que entregan a la salida, como generadores de corriente directa (llamados dinamos) y generadores de corriente alterna (llamados alternadores). Esta última clasificación también se puede dividir según la relación entre la velocidad de giro y la frecuencia, en generadores síncronos y asíncronos; también por la constitución del rotor en generadores de polos salientes o polos lisos; por el acomodo del estator y rotor como rotor externo o rotor interno; por la dirección del flujo

magnético como de flujo axial y flujo radial y finalmente por la cantidad de fases a la salida como generadores monofásicos o trifásicos. Las diversas configuraciones se encuentran en la Figura 3. La aplicación de interés en el texto será de corriente alterna trifásica, por lo que a continuación se describirá cada configuración posible y las razones del porque son adecuadas para un generador

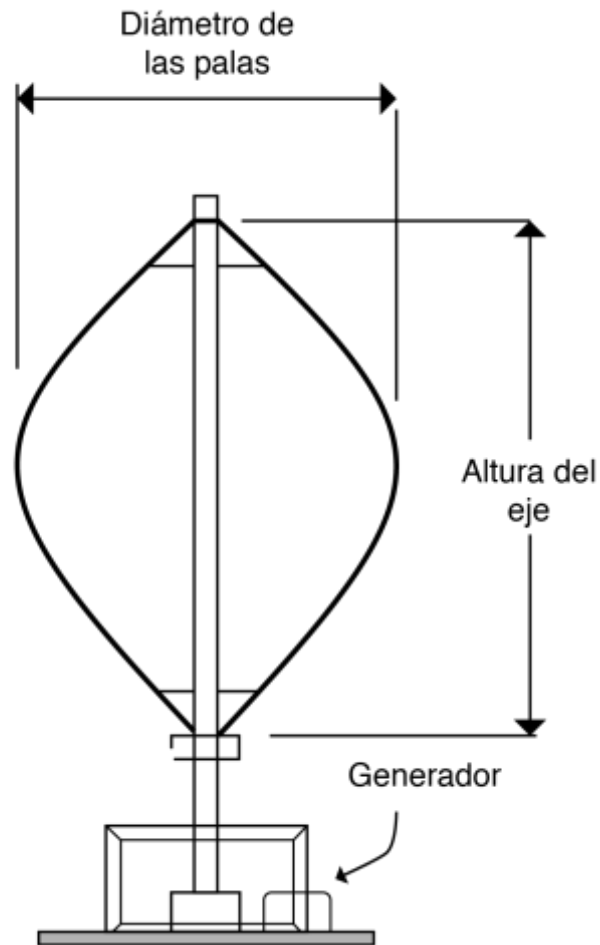


Figura 2: Partes de un generador de eje vertical.

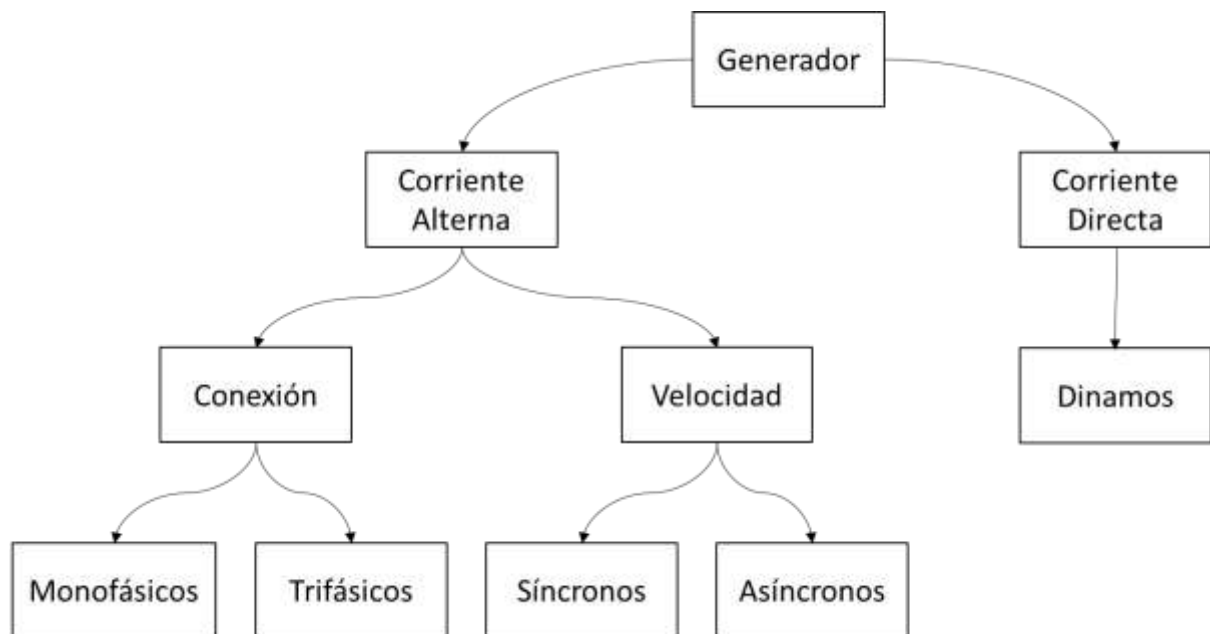
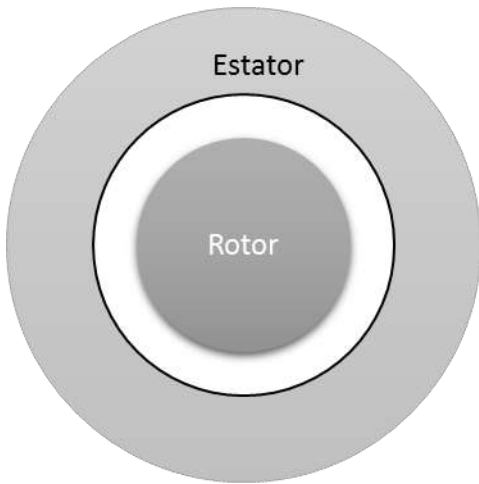


Figura 3: Clasificación de los generadores.

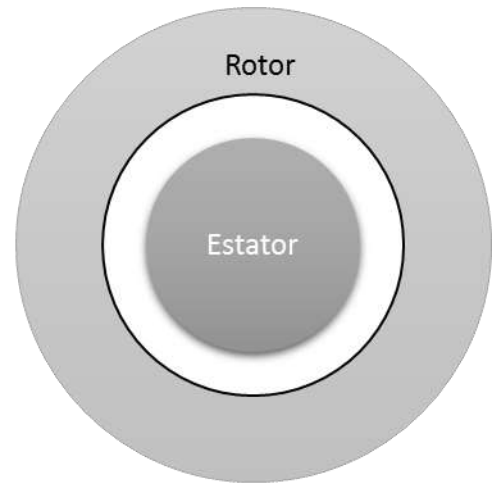
### 2.3.1 Configuraciones

Los generadores eléctricos constan de dos partes principales, la parte estacionaria o sin movimiento llamada estator, y la parte móvil del generador llamada rotor. Estas dos partes se pueden configurar de varias maneras para proveer diferentes direcciones de flujo y también dar diferentes opciones para la colocación de los elementos que acompañan al generador. Las configuraciones más comunes se muestran en la Figura 4. La disposición más utilizada es la que se muestra en la Figura 4 a), debido a que con el estator se cubre al rotor, formando así una protección. Además, el motor se puede fijar de la carcasa del estator debido a que no tiene movimiento, proporcionando una configuración ideal para la mayoría de las aplicaciones industriales. Para la configuración de la Figura 4 b) el estator se encuentra dentro del rotor, esta configuración es la que se va a tomar para el diseño del generador debido al hecho de que el rotor queda al exterior, permitiendo así sujetar directamente los elementos de sujeción con las aspas del aerogenerador. Estas configuraciones además se pueden clasificar de acuerdo con la dirección del flujo. En la Figura 5, se observa un eje de coordenadas con vectores que apuntan a las diferentes direcciones en el generador. La coordenada  $r$  es llamada dirección radial, la coordenada  $z$  es llamada dirección axial y la dirección  $\theta$  es llamada dirección tangencial [18]. En la configuración elegida para el generador, el flujo va a fluir en dirección radial, como se muestra en la Figura 6, por lo que será también llamado generador eléctrico de flujo radial.





(a)



(b)

Figura 4: Configuraciones rotor-estator [9].

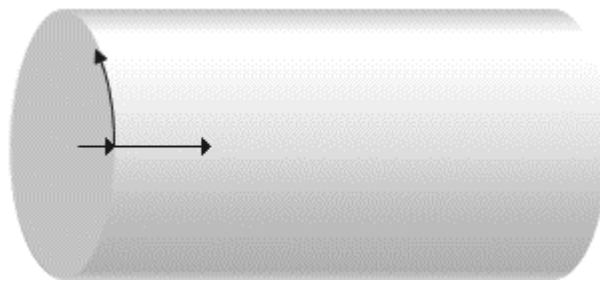


Figura 5: Direcciones en un generador [9].

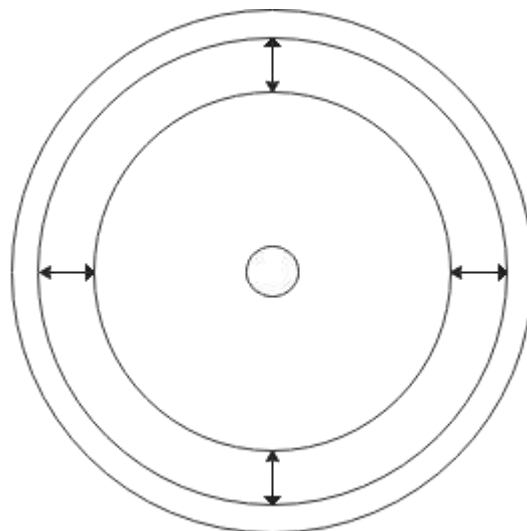


Figura 6: Dirección del flujo magnético entre estator y rotor.

La velocidad de sincronismo es la velocidad a la que el flujo magnético gira en el generador, esta velocidad puede ser o no igual a la velocidad de giro física. Cuando la velocidad de sincronismo es igual que la velocidad de giro, se dice que el generador es síncrono; ya que gira a la velocidad de sincronismo. Por el contrario, cuando un generador gira a una velocidad distinta que la velocidad de sincronismo se dice que es un generador asíncrono.

### 2.3.2 Generador asíncrono

Los generadores asíncronos pueden ser de dos tipos, jaula de ardilla o rotor devanado, y fueron originalmente concebidos como motores, pero también son ampliamente utilizados como generadores, sobre todo para aplicaciones de generación de fuentes renovables. Los generadores se tienen que operar a una velocidad mayor a la velocidad síncrona, induciendo corrientes en el rotor, por lo que entre más rápido gire el generador, más potencia eléctrica podrá ser entregada. Por lo tanto, los generadores asíncronos son perfectos para aplicaciones de generadores eólicos de altas velocidades para producir altas potencias.

### 2.3.3 Generador síncrono de imanes permanentes

También conocidos como *Permanent Magnet Synchronous Generator (PMSG*, por sus siglas del inglés), estos generadores tienen que generar un campo magnético para producir energía eléctrica, que se puede lograr mediante una excitatriz de CD, esta configuración es especialmente útil para cuando el generador tiene que producir grandes potencias, pero tiene la desventaja de que necesita una fuente de energía externa, la cual a su vez necesita un torque para iniciar a producir el campo magnético, además de que impacta en los costos. Para aplicaciones de baja potencia, el generador puede formar su propio campo magnético de excitación por medio de imanes permanentes, los cuales estarán colocados en ranuras hechas en el rotor, llamados polos. Debido a que el campo magnético de excitación es producido por los imanes permanentes se elimina la necesidad de tener una excitatriz, lo que a su vez disminuye los costos. Otra ventaja es que la densidad de campo magnético se incrementa a comparación con los generadores de excitación separada. Sin embargo, hace que la regulación de voltaje sea casi inexistente, por lo que se necesita una etapa electrónica a la salida del generador para poder regular los voltajes cambiantes debido a la acción del viento [19].

Para la constitución de generadores síncronos se pueden tener dos configuraciones: polos salientes o polos no salientes y van colocados en el rotor. La configuración de polos no salientes tiene imanes que estarán colocados dentro de la misma circunferencia del rotor, por lo que no tendrá elementos fuera de esta. La configuración de polos salientes tendrá imanes que se colocarán fuera de la circunferencia del rotor, por lo que formarán una configuración imán-hueco. Las dos configuraciones se muestran en la Figura 7. Para generadores de dos o menos polos se prefiere utilizar la configuración de polos no salientes; mientras que, para configuraciones mayores a 2 polos, por lo general se utiliza la configuración de polos salientes [20].

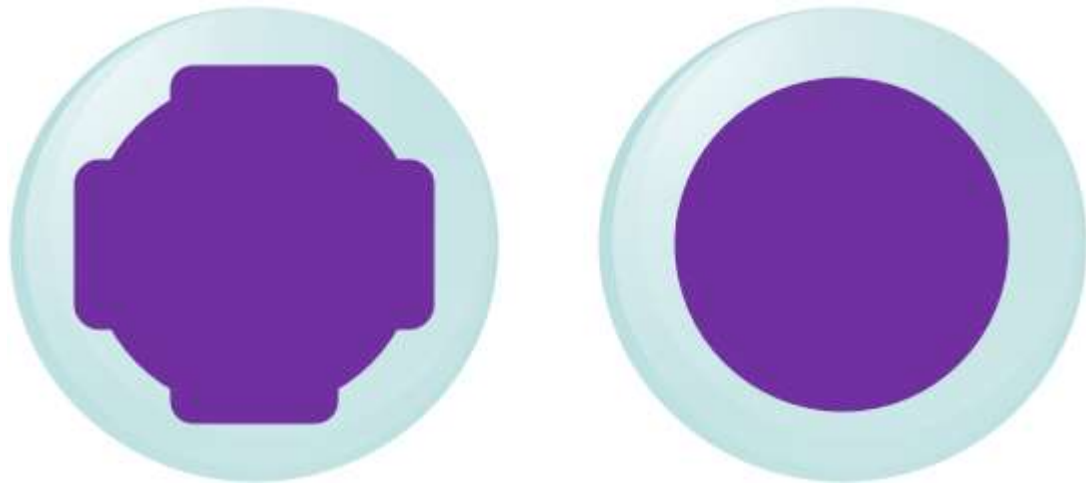


Figura 7: Configuración de imanes en un PMSG [20].

#### 2.3.4 Mediciones mecánicas y eléctricas

En los generadores síncronos la posición mecánica se mide en grados mecánicos. Cuando el generador da una vuelta completa se habrán recorrido  $360^\circ$  grados mecánicos ( $^\circ M$ ) o  $2\pi$  radianes mecánicos ( $radM$ ), y al llegar al punto de inicio el conteo de grados se reestablece volviendo al punto de partida. Ahora también se puede definir la posición eléctrica del generador, que es que cada  $360$  grados eléctricos ( $^\circ E$ ) o  $2\pi$  radianes eléctricos ( $radE$ ), el rotor se devuelve a una posición magnética idéntica a la del inicio.

La relación entre la posición eléctrica y magnética se puede entender primero estudiando el caso de un generador de dos polos como se muestra en la Figura 8. Aquí se puede ver que el rotor tiene que girar  $360^\circ$  mecánicos para volver a la misma posición, mientras que se observa que cuando el punto A vuelva a coincidir con el polo N del imán, se tendrán  $360^\circ$  magnéticos. Es evidente que en este caso  $360^\circ$  mecánicos son iguales a  $360^\circ$  magnéticos. En la Figura 9, se observa un generador de 4 polos, aquí al igual que en el caso anterior la vuelta del generador recorrerá  $360^\circ$  grados mecánicos, pero para que el punto A vuelva a tener de frente un polo N solo tendrán que pasar  $180^\circ$  grados mecánicos, por lo que ahora  $360^\circ$  grados magnéticos son  $180^\circ$  mecánicos. Se concluye que el número de polos influye directamente en la relación de posición magnética y eléctrica, esta relación la describe la ecuación (3) donde  $N_m$  es el número de polos:

$$\theta_e = \frac{N_m}{2} \theta_m \quad (3)$$

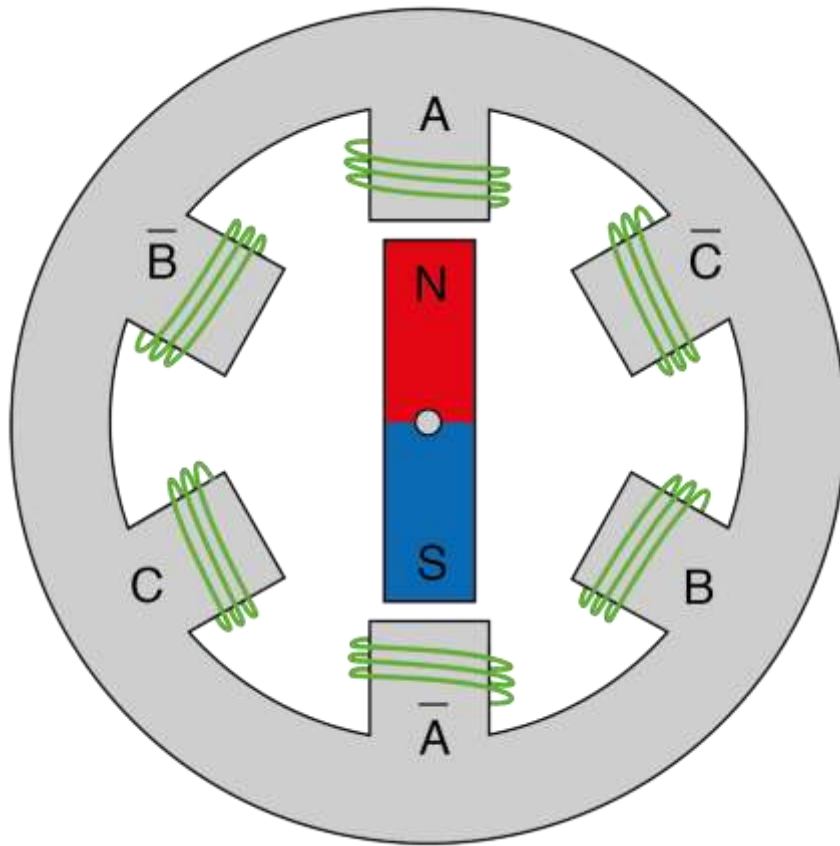


Figura 8: PMSG de dos polos

También es común definir  $\frac{N_m}{2}$  como el número de pares de polos ( $N_p$ ), quedando la relación como se muestra en la ecuación (4) [18].

$$\theta_e = N_p \theta_m \quad (4)$$

Si se aplica la derivada a la ecuación (4) se obtiene (5) entonces la relación entre la velocidad o la frecuencia mecánica y eléctrica.

$$\omega_e = N_p \omega_m \quad (5)$$

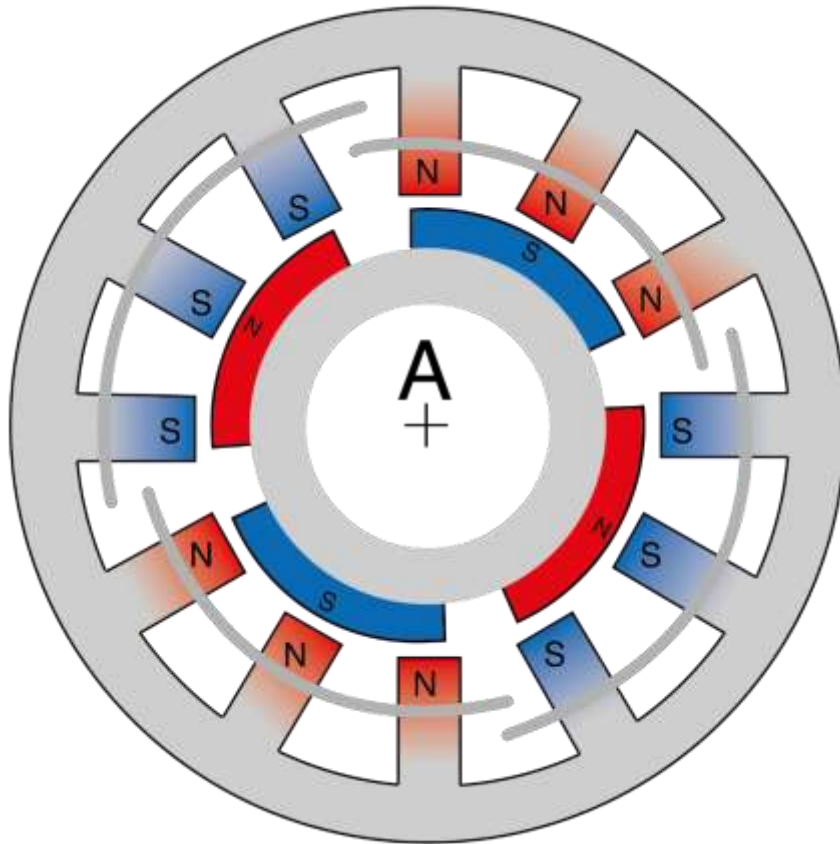


Figura 9: PMSG de cuatro polos.

Se conoce que la frecuencia angular (rad/s) se puede expresar en la frecuencia eléctrica (Hz) por medio de la expresión  $f_m = \frac{\omega_m}{\pi}$ , quedando la ecuación ( 6).

$$f_e = N_p f_m \quad (6)$$

Si se expresa la velocidad en rev/s (S), la ecuación ( 7) se puede escribir como la ecuación ( 8).

$$\omega_m = \frac{\pi}{30} S \approx \frac{S}{10} \quad (7)$$

$$f_e = \frac{N_m}{120} S = \frac{N_p}{60} S \quad (8)$$

## 2.4 Modelado magnético

Este tipo de modelado es indispensable para el correcto dimensionamiento, ya que el flujo magnético es el enlace entre la energía eléctrica y mecánica en el generador. El flujo magnético es apoyado en las leyes de Maxwell, y tiene injerencia directa en el dimensionamiento mecánico, como se describirá a continuación.

### 2.4.1 Flujos magnéticos en el PMSG

Los PMSG basan su funcionamiento en interacciones eléctricas y magnéticas. Se deben estudiar las relaciones para entender su funcionamiento y poder realizar un correcto cálculo para el diseño. En esta sección se explicará la manera en que el flujo magnético interacciona tanto con los materiales, como también con los campos eléctricos dentro del PMSG.

Los circuitos magnéticos tienen una complejidad matemática grande, sin embargo, es posible hacer ciertas consideraciones con el fin de facilitar los cálculos y el análisis. Estas consideraciones hacen que los resultados difieran un poco de los cálculos. Los resultados son suficientemente buenos para aplicaciones de máquinas eléctricas por lo que se permite.

### 2.4.2 Principios

*Ley de Ampere:* las corrientes eléctricas están fuertemente ligadas a la producción de campo magnético, corrientes eléctricas netas (I) pueden producir una intensidad de campo magnético (H) en cierta trayectoria. La ecuación ( 9) representa el fenómeno y es llamada ley de Ampere.

$$\oint \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = I \quad (9)$$

*Materiales ferromagnéticos:* son materiales que mantendrán la mayoría del campo magnético producido por la corriente eléctrica. Se aplica la ley de ampere en un núcleo magnético de forma cuadrada y con un área transversal que tendrá la misma forma como se muestra en la Figura 10.

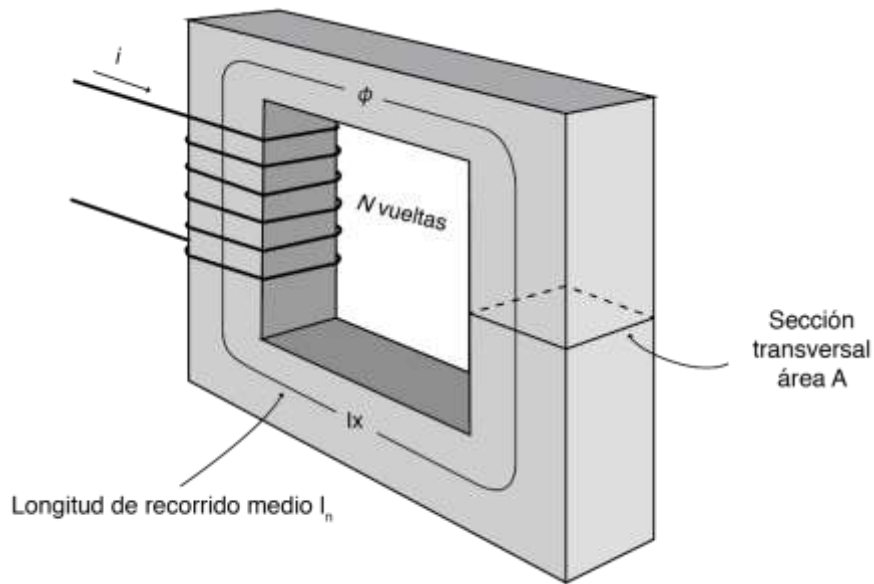


Figura 10: Circuito magnético básico.

Aquí se aplica una corriente en un conductor que estará enrollado sobre el núcleo magnético dando  $N$  vueltas. El núcleo magnético es un material ferromagnético, por lo que el flujo magnético producido por la corriente fluirá dentro de este siguiendo la trayectoria del núcleo, esta trayectoria se puede expresar como una longitud de recorrido medio  $l_n$ . El núcleo magnético tiene una sección transversal  $A$ . En esta configuración la ley de ampere se puede expresar como se ve en la ecuación (10). [20]

$$H = \frac{Ni}{l_n} \quad (10)$$

En la ecuación (11) la magnitud  $H$  representa la intensidad de campo magnético y se puede relacionar con la densidad de flujo magnético  $B$  por medio de la permeabilidad de los materiales. La permeabilidad es la facilidad con la que se puede establecer un campo magnético en los materiales [20].

$$B = \mu H \quad (11)$$

Si se sustituye la ecuación (10) en la ecuación (11) también se obtiene la ecuación (12):

$$B = \frac{\mu Ni}{l_n} \quad (12)$$

El flujo se representa en la ecuación ( 13), este flujo representa la cantidad de campo magnético que pasa en una determinada área [20].

$$\phi = \int_A \mathbf{B} \cdot d\mathbf{A} \quad ( 13)$$

Se sustituye la ecuación ( 12) en la ecuación ( 13) quedando la ecuación ( 14). Aquí se expresa la relación del flujo magnético con la permeabilidad, el área y la corriente eléctrica.

$$\phi = BA = \frac{\mu NiA}{l_n} \quad ( 14)$$

*Circuitos magnéticos:* los circuitos magnéticos se pueden representar por la fuerza magnetomotriz ( $\mathcal{F}$ ) que se relaciona con el flujo efectivo de corriente por medio del número de vueltas, con esta relación se obtiene la ecuación ( 15).

$$\mathcal{F} = Ni \quad ( 15)$$

También se puede hacer la analogía con un circuito eléctrico básico gobernado por la ley de Ohm, la fuerza magnetomotriz será la análoga al voltaje y el flujo magnético generado será el análogo a la corriente. La ecuación ( 16) muestra este comportamiento. Como sucede con la ley de Ohm existe una variable que relaciona estas dos magnitudes.

$$\mathcal{F} = \phi \mathcal{R} \quad ( 16)$$

*Reluctancia:* la variable que relaciona la fuerza magnetomotriz con el flujo se conoce como reluctancia, la cual se define como la resistencia que ofrece a el flujo magnético en el circuito. La reluctancia se puede tratar como las resistencias eléctricas, por lo que se tienen configuraciones de reluctancia en serie y en paralelo. Cuando se tienen muchas reluctancias en un circuito magnético se pueden hacer reducciones para obtener una reluctancia equivalente. Si se tienen reluctancias en serie su equivalente se calcula como en la ecuación ( 17), si se tienen reluctancias en paralelo su equivalente se calcula como la ecuación ( 18).



$$\mathcal{R}_{eqserie} = \mathcal{R}1 + \mathcal{R}2 + \mathcal{R}3 + \dots + \mathcal{R}n \quad (17)$$

$$\mathcal{R}_{eqparalelo} = \frac{1}{\frac{1}{\mathcal{R}1} + \frac{1}{\mathcal{R}2} + \frac{1}{\mathcal{R}3} + \dots + \frac{1}{\mathcal{R}n}} \quad (18)$$

*Permeancia:* ésta se representa como el inverso de la reluctancia y es usada comúnmente también para cálculos magnéticos. Esta se puede definir también con la sección transversal A del conductor y la longitud del conductor  $l_n$  como se ve en la ecuación (19) [21] .

$$P = \frac{\mu A}{l_n} \quad (19)$$

*Permeabilidad no constante:* la permeabilidad, como se mencionó antes, se define como la capacidad de un material a dejar fluir y contener el flujo magnético dentro de él. La permeabilidad no es constante, para una fuerza magnetomotriz dada. Al aplicar una fuerza magnetomotriz en un material ferromagnético, el flujo empieza a crecer a gran rapidez; sin embargo, llega un punto en que el flujo crece más lentamente, luego en la última etapa el flujo magnético ya no puede crecer más, aunque se le aplique más fuerza electromagnética. El comportamiento del flujo en un material ferromagnético se puede ver en la curva de la Figura 11.

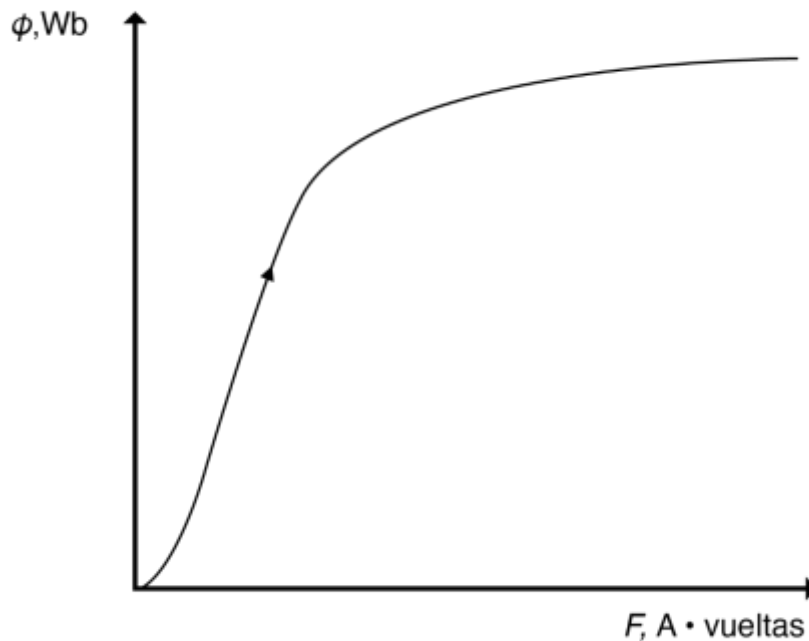


Figura 11: Permeabilidad en un material ferromagnético.

*Comparación gráfica:* el comportamiento de la intensidad de campo magnético se relaciona, como ya se dijo, con la densidad de flujo magnético. El comportamiento tampoco es lineal, al aplicar intensidad de campo magnético el flujo magnético crece de manera acelerada al principio, luego la densidad de flujo magnético crece más lentamente, hasta llegar a un punto en el que ya no puede crecer más. El comportamiento se muestra en la Figura 12.

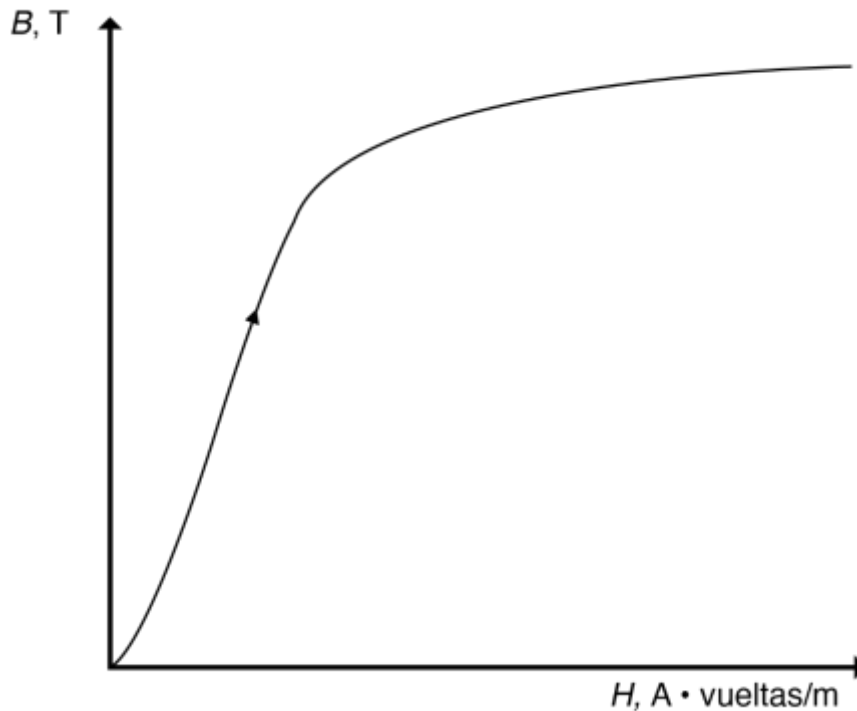


Figura 12: Reluctancia de un material ferromagnético.

*Linealidad:* las curvas están intrínsecamente relacionadas debido a que se observa un mismo comportamiento entre las variables, por lo que las ecuaciones están relacionadas, la intensidad del flujo magnético es directamente proporcional a la fuerza magnetomotriz, y la densidad de flujo magnético es directamente proporcional al flujo.

Se puede observar en las curvas que hay dos zonas importantes, la zona lineal que es donde las variables crecen directamente proporcionales. Luego en la parte donde  $H$  y  $\phi$  crece de manera no lineal y más lentamente se le conoce como curva de saturación. En la zona de cambio de las anteriores se produce un “doblez” en la curva, llamada zona de rodilla o codo. Una curva de permeabilidad típica se muestra en la Figura 13. Los motores y generadores operan cerca de la zona de rodilla produciendo en ocasiones comportamientos no lineales, sin embargo, en su mayoría el comportamiento se puede considerar lineal [20].

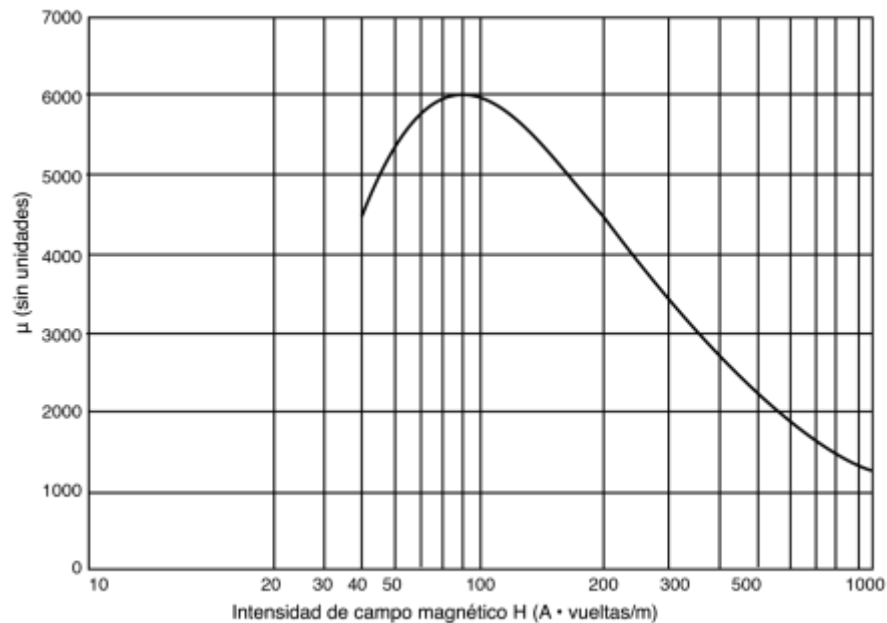


Figura 13: Curva de permeabilidad.

*Perdidas en el hierro, por histéresis y núcleo:* Cuando se le aplica una corriente sinusoidal a un circuito magnético se tiene un flujo magnético. Sin embargo, el comportamiento de esta corriente es especial, ya que dependerá directamente de la intensidad de campo magnético, ya que no será lineal. Cuando se aplica el primer periodo positivo de la corriente el flujo subirá de magnitud, cuando la corriente comience a bajar para entrar al ciclo negativo, el flujo bajará, pero cuando la corriente se encuentre en cero, el flujo no llegará completamente a cero de vuelta. El comportamiento demuestra que, aunque ya no se esté aplicando corriente, habrá un flujo remanente en el circuito. Lo mismo ocurre cuando se aplica el semiciclo negativo de corriente. La curva descrita se muestra en la Figura 14 y se conoce como curva de histéresis.

Para poder revertir el efecto de flujo residual, se necesita una fuerza magnetomotriz contraria a la que generó el efecto. Esta fuerza genera energía que convierte en pérdidas llamadas “pérdidas por histéresis”.

*Imanes:* se puede ver que cierta cantidad de densidad de flujo magnético queda en los materiales ferromagnéticos cuando ya no se aplica corriente. En los materiales ferromagnéticos se encuentran dominios, que son regiones donde los átomos se alinean de acuerdo con la fuerza producida por un campo magnético externo. Permanecen alineados debido a que se necesita energía para desalinearlos nuevamente. Los dominios permanecerán así mucho tiempo, produciendo campo magnético a su alrededor, los materiales que pueden producir un campo magnético debido a esta característica, se llaman imanes. Los imanes también pueden formarse de manera natural, cuando hay materiales que ya tienen sus dominios alineados sin una fuente externa. Los imanes permanentes son imanes que no perderán su alineamiento en mucho tiempo, y que se considerarán fuentes de campo magnético.

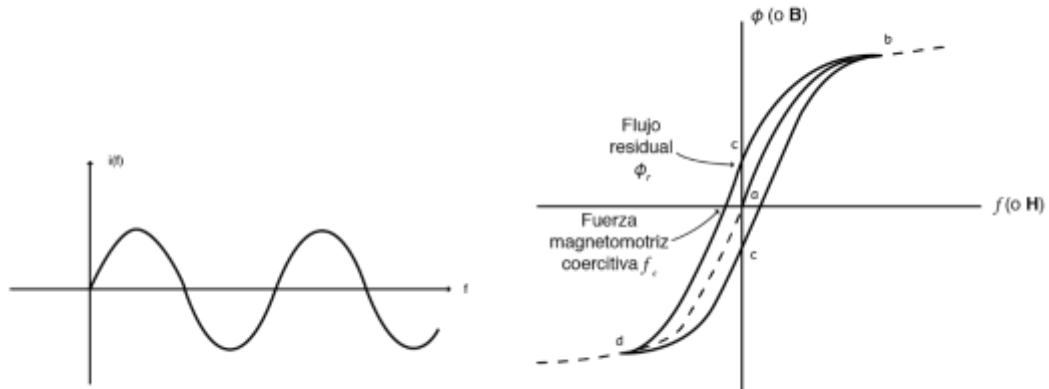


Figura 14: Curva de histéresis.

Los imanes de neodimio están hechos de neodimio (Nd), hierro (Fe) y boro (B) y son los imanes más fuertes disponibles en la actualidad. El producto energético de los imanes de neodimio es ocho veces mayor que el de los imanes de ferrita anisotrópica y tienen una excelente resistencia mecánica. Como se oxidan fácilmente, a menudo se tratan con níquel. La desventaja de los imanes de neodimio es que son sensibles al calor y requieren un manejo cuidadoso [22].

Para comparar los imanes permanentes se utilizan algunas propiedades importantes como: magnetismo residual ( $M_r$ ), medida de la fuerza del campo magnético; fuerza coercitiva ( $H_{ci}$ ), que mide la resistencia de un material magnetizado; el punto de máxima energía ( $BH_{max}$ ), que mide la densidad de energía magnética (y que sirve para calcular el volumen mínimo del imán), y temperatura de Curie ( $T_c$ ), que es la temperatura a la que un material pierde su magnetismo. Los imanes de neodimio tienen el mayor contenido de residuos, coercitividad y almacenamiento de energía extremadamente altos, pero en cambio tienen una temperatura de Curie mucho más baja que otros imanes. Para preservar las propiedades magnéticas de los imanes a altas temperaturas, el neodimio a menudo se mezcla con terbio y disprosio. La Tabla 1 compara la configuración operativa de los imanes de neodimio con la de los imanes permanentes [23].

Tabla 1: Configuración de los imanes de neodimio.

Tipo de imán	$M_r$ (T)	$H_{ci}$ (KA /m)	$BH_{max}$ (KJ /m <sup>3</sup> )	$T_c$ (°C)
$Nd_2Fe_{14}B$ (sinterizado)	1.0-1.4	750-2000	200-440	310-400
$Nd_2Fe_{14}B$ (ligado)	0.6-0.7	600-1200	60-100	310-400
$SmCO_5$ (sinterizado)	0.8-0.11	600-2000	120-200	720
$Sm(CO, Fe, Cu, Zr)_7$ (sinterizado)	0.9-1.15	450-1300	150-240	800
Alnico (sinterizado)	0.6-1.4	275	10-88	700-860
Sr-ferrita (sinterizado)	0.2-0.4	100-300	10-40	450

## Capítulo 3. Modelado del PMSG

Los PMSG se componen de estator y rotor, los cuales estarán fabricados con materiales ferromagnéticos. En un generador el rotor, el estator y el entrehierro forman un circuito magnético. La mayoría de los PMSG tienen un imán montado en la superficie del rotor. En algunos generadores, el imán permanente está enterrado en la carcasa de acero. Las topologías de imanes permanentes internos se usan comúnmente por tres razones. En primer lugar, al enterrar el imán, es posible utilizar la concentración de flujo. En segundo lugar, rodear el imán con acero puede fortalecer la estructura del rotor y, por lo tanto, permitir el funcionamiento a velocidades más altas. Finalmente, al enterrar los imanes, el motor puede operar en un rango de velocidad más amplio mediante el uso de un control de debilitamiento de campo [18].

La geometría del PMSG permite que sólo sea necesario modelar el circuito magnético en dos imanes, ya que el efecto se repite en el resto del generador, el circuito a analizar se muestra en la Figura 15. En esta figura, las áreas de acero del rotor y del estator se modelan simplemente como reluctancias  $R_r$  y  $R_s$  respectivamente. Los dos medios imanes se modelan como una fuente de flujo  $\Phi_r$  y la reluctancia del imán asociada  $R_m$ , con la dirección de la fuente de flujo dictando la polaridad del imán. El flujo primario desde los imanes a través del entrehierro hacia el estator fluye a través de las reluctancias del entrehierro indicadas como  $R_g$ . El flujo de fuga de un imán al siguiente fluye a través de la reluctancia de fuga  $R_l$ . Los tres flujos del circuito son el flujo del imán  $\Phi$ , el flujo del entrehierro  $\Phi_g$  y el flujo de fuga  $\Phi_l$ .

### 3.1 Modelado del entrehierro

En la configuración del PMSG hay un espacio entre el rotor y el estator, este espacio es llamado entrehierro, cuando el flujo va por el circuito magnético se crea una reluctancia en el entrehierro. Modelar esta reluctancia es un proceso complejo, debido a que el flujo en el entrehierro no tiene forma lineal, ya que parte de este flujo se escapa por el aire que tiene una permeabilidad diferente al acero. La permeabilidad del entrehierro se puede modelar por métodos de elementos finitos, o haciendo el proceso más sencillo simplificando el camino del flujo en el entrehierro. En la Figura 16, se pueden observar tres modelos de la reluctancia en el entrehierro, se tienen tres figuras de recorrido de flujo. El modelo más simple es una reluctancia recta ignorando totalmente el flujo que se escapa de la trayectoria. La ecuación ( 20) muestra este cálculo, donde  $\mu_0$  es la permeabilidad del espacio libre, A es el área de la sección transversal y g es la longitud del entrehierro.

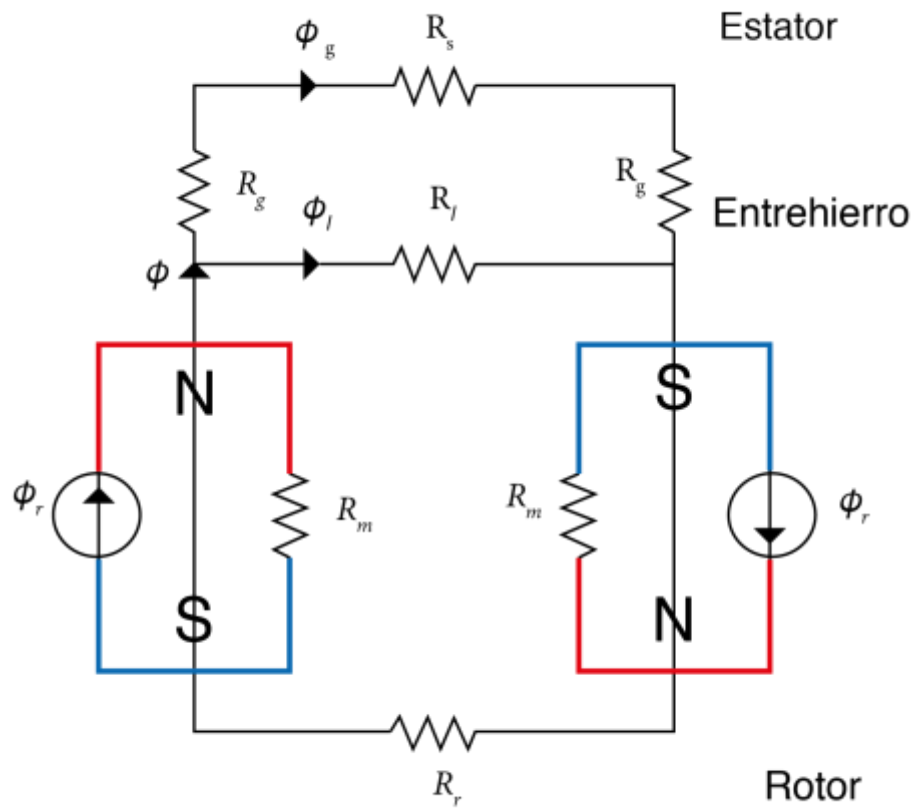


Figura 15: Circuito magnético PMSG.

$$R_{ga} = \frac{g}{A\mu_0} \quad (20)$$

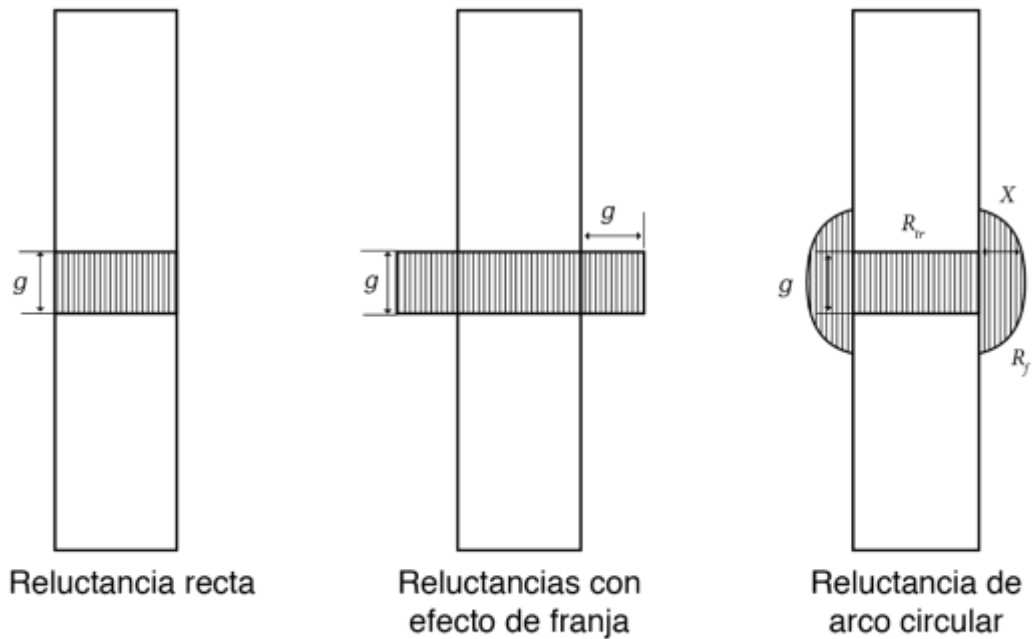


Figura 16: Modelos de flujo en el entrehierro.

Un modelo más preciso se obtiene considerando un efecto de escape de la reluctancia, donde se añade la longitud del entrehierro  $g$  al área de sección transversal  $A$ , convirtiéndose en  $A'$  como se presenta en la ecuación ( 21).

$$R_{ga} = \frac{g}{A'\mu_0} \quad (21)$$

El tercer método es un método más avanzado para el modelo de la reluctancia. Que se compone de dos reluctancias en paralelo, se utiliza la reluctancia de franja  $R_f$  y la reluctancia de la trayectoria del flujo.

En este método, la reluctancia de franja  $R_f$  se modela como una reluctancia separada que a su vez es paralela a la reluctancia de la trayectoria del flujo en línea recta  $R_{lr}$  a través del entrehierro. Se supone que el flujo de franja sigue un arco circular desde el lado de un bloque, viaja en línea recta a través del área del entrehierro, luego sigue un arco circular hacia el otro bloque. Del mismo modo, las otras dos reluctancias están diseñadas en la parte delantera y trasera, dejando cinco reluctancias libres en paralelo: cuatro reluctancias de franja  $R_f$  y una resistencia de línea recta  $R_{lr}$ , como se muestra en la Figura 17. Por lo tanto,  $R_{ga}$  se calcula usando la fórmula ( 22).

$$R_{ga} = \frac{(R_{lr})\left(\frac{1}{4}R_f\right)}{(R_{lr}) + \left(\frac{1}{4}R_f\right)} \quad (22)$$

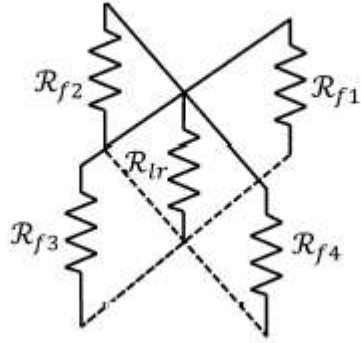


Figura 17: Reluctancias para cálculo del modelo complejo de entrehierro.

### 3.2 Acero eléctrico

La mayor parte de la chapa para maquinaria eléctrica es de acero al carbono o silicio magnético, los espesores comunes son 0.014", 0.0185", 0.025", 0.35mm, 0.50mm y 0.65mm.

El acero al carbono tiene una alta permeabilidad, pero altas pérdidas por corrientes de Foucault y elevada histéresis, el acero al silicio tiene una pérdida más baja, pero una permeabilidad más baja, así como una transferencia de calor deficiente debido a la pérdida de watts/kilogramos (W / kg) que el acero al silicio más bajo, que se usa con más frecuencia. Los fabricantes de acero eléctrico han desarrollado aceros al silicio cuyas propiedades de permeabilidad y conductividad térmica son cercanas a las de los aceros al carbono.

### 3.3 Modelado eléctrico

*Ley de Faraday:* Es una formulación fundamental para el diseño de máquinas eléctricas, ya que es la conexión entre los efectos magnéticos y eléctricos de la máquina. La ley de Faraday indica que, si se tiene un flujo magnético, que varía con respecto a tiempo, atravesando una espira de alambre, se inducirá en esta un voltaje directamente proporcional a la tasa de cambio del flujo. La ley de Faraday se puede expresar con la ecuación ( 23).

$$e_{ind} = -\frac{d\Phi}{dt} \quad (23)$$

La ley de Faraday también es aplicable a una espira con más de una vuelta, aquí el efecto del flujo concatenado se incrementa con cada N vueltas, produciendo así una mayor cantidad de voltaje inducido, lo que se expresa en la ecuación ( 24).

$$e_{ind} = -N \frac{d\Phi}{dt} \quad (24)$$

*Autoinductancia:* para poder modelar el PMSG se manejarán los cálculos en la región lineal de los materiales ferromagnéticos, y permitirá definir constantes, que, de operar en otra región, se



volverán funciones no lineales, que tendrán una solución muy compleja y que no es utilizada para aplicaciones de PMSG.

Si se parte de un circuito magnético básico como el que se muestra en la Figura 18 se puede observar que en la parte izquierda del modelo se produce una fuente de fuerza magnetomotriz (FMM), debido a la corriente circulante y al número de vueltas que el conductor da sobre el núcleo ferromagnético. Esta FMM producirá un flujo que circulará por el núcleo, el núcleo va a ofrecer una resistencia al paso del flujo, definida anteriormente como reluctancia. El circuito magnético se representa con una fuente y su reluctancia, por donde circulará el flujo, el circuito se observa en la parte izquierda de la Figura 18. Todo el comportamiento se puede definir como se muestra en la ecuación ( 25).

$$\phi = \frac{Ni}{\mathcal{R}} \quad (25)$$

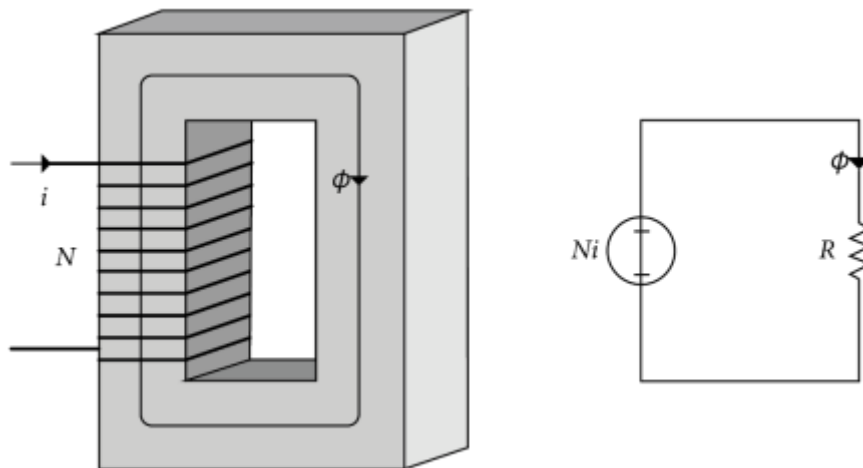


Figura 18: Circuito magnético en un núcleo ferromagnético.

El flujo que se produce va a enlazar a todas las vueltas que forma el conductor en el núcleo, se dice entonces que el flujo enlaza a la bobina, la totalidad de flujo enlazado en la bobina se puede calcular en la ecuación ( 26).

$$\lambda = N\phi \quad (26)$$

Combinando las ecuaciones se obtiene la ecuación ( 27).

$$\lambda = \frac{N^2}{\mathcal{R}} i \quad (27)$$

En la ecuación ( 27) se puede ver que el flujo enlazado es directamente proporcional a la corriente que fluye por el conductor. El flujo enlazado y la corriente están relacionados por una constante que incluye el número de vueltas y la reluctancia. Recordando que la permeancia es el inverso de la reluctancia se define también la relación con ésta. Independientemente de si se trabaja con reluctancia o permeancia la constante se va a definir como inductancia, como se ve en la ecuación ( 28) [18].

$$L = \frac{N^2}{\mathcal{R}} = N^2 P \quad ( 28)$$

*Voltaje inducido:* El voltaje inducido del PMSG se puede determinar aplicando conceptos fundamentales a un modelo más simple y luego llevando estas aseveraciones a un modelo real de la máquina. Se sabe que las bobinas en el estator permanecerán estáticas y el campo magnético del rotor formará un campo magnético variable debido a su movimiento, cumpliendo las condiciones para que se cumpla la ley de Faraday.

También se producirá densidad de campo magnético  $B$  debido a la acción de los imanes permanentes, debido a la rotación de la máquina, la densidad de campo magnético se comportará de manera sinusoidal, y en dirección radial en el generador, el comportamiento se resume en la ecuación ( 29).

$$B = B_m \cos \alpha \quad ( 29)$$

Si se incluye el efecto de la velocidad de rotación, la ecuación ( 29) se convertirá en la ecuación ( 30).

$$B = B_m \cos(\omega t - \alpha) \quad ( 30)$$

Cuando se tiene un conductor que se mueve a través de un campo magnético se genera un voltaje gobernado por la ecuación ( 31) [20].

$$e = (\mathbf{v} \times \mathbf{B}) \cdot \mathbf{l} \quad ( 31)$$

Combinando las ecuaciones ( 30) y ( 31) se puede obtener el voltaje inducido a partir del movimiento de campo magnético en el rotor que se muestra en la ecuación ( 32).

$$e_{ind} = -vB_M I \cos(\omega_m t - 180^\circ) + vB_M I \cos(\omega_m t) \quad (32)$$

Aplicando identidades trigonométricas y sumando términos queda la ecuación ( 33).

$$e_{ind} = 2vB_M I \cos(\omega_m t) \quad (33)$$

La velocidad  $v$  está dada por  $\omega_m r$  y el flujo es  $\phi = 2r l B_m$  se simplifica y queda la ecuación ( 34).

$$e_{ind} = N_c \phi \omega \cos(\omega_m t) \quad (34)$$

Si se tiene un arreglo de bobinas trifásicas se tendrán tres voltajes con la misma magnitud, pero desfasados  $120^\circ$ . Se concluye entonces que un campo magnético giratorio producirá un voltaje sinusoidal en los terminales de las bobinas.

*Par inducido:* Cuando por un conductor circula una corriente, se produce una fuerza que está relacionada con los campos eléctricos y magnéticos como se muestra en la ecuación ( 35).

$$\mathbf{F} = i(\mathbf{l} \times \mathbf{B}) \quad (35)$$

Aplicando el producto vectorial resultando la ecuación ( 36). [3]

$$F = B l \sin(\alpha) \quad (36)$$

Si los vectores  $\mathbf{l}$  y  $\mathbf{B}$  son perpendiculares el seno del ángulo entre ellos será 1, por lo que se puede escribir la ecuación ( 37).

$$F = B l i \quad (37)$$

El torque se puede definir en la ecuación ( 38) como una fuerza  $F$  que actúa tangencialmente a un punto dado, a una distancia  $r$ .

$$T = Fr \quad (38)$$

Sustituyendo la ecuación ( 37) en ecuación ( 38) derivando la ecuación ( 39).

$$T = Fr = BliR_{ro} \quad (39)$$

Para una máquina de flujo radial se define el número de ranuras por polo como  $N_{spp}$ , tomando en cuenta  $L$  como la longitud de los conductores, el campo magnético del entrehierro  $B_g$ , el número de polos de la máquina  $N_m$  y conductores en serie como  $n_s$  [3]. Así que el torque en el PMSG se expresa como en la ecuación ( 40).

$$T = N_m B_g L R_{ro} N_{spp} n_s i \quad (40)$$

Cuando se tiene un número de ranuras por polo menor a uno, la densidad del entrehierro se tendrá que modificar por factores de corrección obteniendo la ecuación ( 41).

$$T = N_m k_d k_p k_s B_g L R_{ro} \quad (41)$$

El torque se expresa también en función de la potencia de salida de la máquina, y se muestra en la ecuación ( 42).

$$T = \frac{P_{out}}{2\pi V_s} \quad (42)$$

El modelo PMSG concibe la forma diferencial de las ecuaciones de Maxwell y sus relaciones constitutivas dadas por  $\mathbf{D} = \epsilon\mathbf{E}$ ,  $\mathbf{B} = \mu\mathbf{H}$ , y  $\mathbf{J} = (1/\rho)\mathbf{E}$ , mostradas en las ecuaciones (43)- ( 46).

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (43)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{\rho}{\epsilon} \quad (44)$$

$$\nabla \times \mathbf{B} = \mu \left( \mathbf{J} + \epsilon \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \right) \quad (45)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (46)$$

Donde  $\nabla$ ,  $\mathbf{E}$ ,  $\mathbf{B}$ ,  $\mathbf{H}$ ,  $\mathbf{D}$  y  $\mathbf{J}$  denotan, el operador de gradiente tridimensional y las formas vectoriales de campo eléctrico, campo magnético, intensidad del campo magnético, corriente de desplazamiento y densidad de corriente eléctrica. Asimismo  $\mu$ ,  $\epsilon$  y  $\rho$  representan la permeabilidad magnética, la permitividad y la resistividad eléctricas.

El potencial del vector magnético en forma vectorial  $\mathbf{A}$ , en la ecuación (47), se resuelve en cada nodo en una formulación de problema bidimensional. Luego, se adopta un modelo 2D simple para reducir el tiempo de cálculo, simplificar el problema y representar la geometría completa.

$$\mathbf{A} = A(x, y) \mathbf{e}_z \quad (47)$$

donde  $\mathbf{e}_z$  es el vector unitario en la dirección  $z$ . Mientras tanto, la densidad de flujo magnético ( $\mathbf{B}$ ) es la curva del potencial del vector magnético y se expresa en la ecuación (48).

$$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A} \quad (48)$$

El enlace de flujo del estator por fase tiene un valor complejo en el dominio de la frecuencia. Se calcula en las ranuras del estator integrando el potencial del vector magnético en cada fase usando la ecuación (49).

$$\psi_s = \frac{N_t \cdot L}{A_{ss}} \cdot \left( \int_{+Q_s} A_z dS - \int_{-Q_s} A_z dS \right) \quad (49)$$

donde  $\psi_s$  es el enlace de flujo del estator por fase,  $N_t$  es el número de vueltas por ranura del estator,  $A_{ss}$  es el área de la ranura del estator,  $L$  es la longitud de laminación,  $+Q_s$  y  $-Q_s$  son las ranuras del estator con dirección positiva y negativa de la densidad de corriente,  $A_z$  es el vector potencial magnético y  $S$  es la superficie [24].

Dado que la corriente de desplazamiento se desprecia debido a que se supone que los campos electromagnéticos son cuasi-estáticos, lo cual es válido para frecuencias por debajo de decenas de kHz [25]. Entonces, el diseño PMSG está limitado a aplicaciones de baja frecuencia y la ley de Ampere-Maxwell se convierte en ( 50).

$$\nabla \times \mathbf{B} = \mu \mathbf{J} \quad ( 50)$$

Entonces, la relación entre la densidad de flujo magnético y la densidad de corriente eléctrica se puede definir en la ecuación ( 51).

$$\nabla \times (\nabla \times \mathbf{A}) + \frac{1}{\rho} \left( \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} + \nabla V \right) = \mathbf{0} \quad ( 51)$$

En coordenadas cartesianas es desarrollado en ( 52).

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\partial A_z}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\partial A_z}{\partial y} \right) = \frac{1}{\rho} \frac{\partial A_z}{\partial t} + \frac{1}{\rho} \nabla V \quad ( 52)$$

Dado de que se utilizan conductores cilíndricos, la corriente se distribuye uniformemente por lo que el flujo estará dado en la ecuación ( 53), donde el gradiente de voltaje estará solo en una dirección  $l$ .

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\partial A_z}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\partial A_z}{\partial y} \right) - \frac{1}{\rho} \frac{\partial A_z}{\partial t} + \frac{1}{\rho} \nabla \frac{V_b}{l} = 0 \quad ( 53)$$

Donde es el voltaje aplicado en la región de elementos finitos y es la longitud de la máquina (geometría 2D). Por lo tanto, está definido por la ecuación ( 54).

$$V_b = R_b I_b + n_s l_c \frac{\partial A_z}{\partial t} \quad ( 54)$$

donde  $R_b$  simboliza la resistencia de CD del conductor, denota la corriente total en el conductor y la longitud del conductor.

Una vez que converge la metodología de diseño, se obtienen especificaciones de modelado con parámetros tanto eléctricos como mecánicos del PMSG para diseñar adecuadamente su convertidor de potencia que interactuará con la red eléctrica.

### 3.4 Diseño mecánico.

Los polos dentro de los PMSG son una función de la frecuencia y la velocidad de giro como se demostró en la ecuación ( 8), y se retoma en este momento despejando el número de polos, quedando la ecuación ( 55), donde el primer parámetro de diseño es considerar la velocidad y la frecuencia, y se tendrá el número de polos necesarios para producir la velocidad deseada. Se debe modificar la velocidad hasta que el número de polos sea un número entero.

$$N_m = \frac{120f}{S_r} \quad (55)$$

Dividiendo el número de polos entre dos, se calcula el número de pares de polos, que servirá para comprobar el correcto diseño con ciertas delimitaciones y que se calcularan en el capítulo 4. El número de pares de polos se define en la ecuación( 56).

$$N_p = \frac{N_m}{2} \quad (56)$$

El número total de ranuras del estator que se muestra en la ecuación( 57) está determinado por el número de ranuras por fase  $N_{sp}$  y el número de fases que se tenga en el sistema. El número de ranuras por fase debe ser un número entero par cumpliendo que  $N_{sp} \geq N_m$ .

$$N_s = N_{ph}N_{sp} \quad (57)$$

El número de ranuras por polo y por fase que se expresa en la ecuación( 58) es una relación entre el número de ranuras por fase  $N_{sp}$  y el numero de polos, y muestra cuantas ranuras hay en cada conjunto polo fase.

$$N_{spp} = \frac{N_{sp}}{N_m} \quad (58)$$

El número de ranuras por polo  $N_{sp}$  que se muestra en ( 59) es una relación entre el número de ranuras y el número de polos, y dice cuántas ranuras se encuentran por cada polo.

$$N_{rp} = \frac{N_s}{N_m} \quad (59)$$

Con esta configuración se procede a un cálculo para poder determinar si es la más eficiente y produce un resultado correcto. Primero se determinará si la distribución es balanceada con la fórmula ( 60) donde el factor  $X$  debe ser un número entero, si no se cumple, se debe probar combinaciones de números de ranuras y polos.

$$X = \frac{N_s}{3MCD(N_s, N_p)} \quad (60)$$

Seguidamente se determinará si la relación entre ranuras y polos  $Y$  es la más óptima, con la fórmula (61) que ayudara a obtener un torque en vacío bajo. Este número debe ser un número alto [3].

$$Y = MCM(N_m, N_s) \quad (61)$$

El torque mecánico de la máquina  $T_m$  se expresa como una relación entre la potencia de entrada  $P_{in}$  y la velocidad mecánica  $\omega_m$  y se observa en la ecuación (62).

$$T_m = \frac{P_{in}}{\omega_m} \quad (62)$$

La velocidad mecánica  $\omega_m$  se da en la ecuación (63), como una relación de la velocidad de la máquina.

$$\omega_m = \frac{2 \pi S_r}{60} \quad (63)$$

### 3.5 Dimensionamiento del imán

Los imanes del PMSG se diseñan a partir del cálculo de volumen mínimo, el cual será el volumen más pequeño para el cual se producirá el torque requerido en la máquina. El volumen mínimo del imán es una magnitud que da una primera aproximación y que se va modificando de acuerdo al torque obtenido, el entrehierro deseado y a la forma de onda de el voltaje de salida. El volumen mínimo del imán se calcula con el torque mecánico  $T_m$ , el punto de energía máxima del imán  $BH_{max}$  y el número de polos en el rotor  $N_m$ . La ecuación (64) muestra este cálculo.

$$V_m = \frac{T_m}{BH_{max} N_m} \quad (64)$$

También es necesario calcular el área del imán, la cual es función de la longitud del generador  $L$ , de paso de polo  $\tau_p$  (que es la longitud del ancho del imán  $\tau_m$  más el espacio entre imanes en el estator  $\tau_f$ ) y de la fracción magnética  $\alpha_m$  que es la relación entre el ancho del imán y el espacio entre imanes. La literatura recomienda un valor de  $\alpha_m \geq 0.5$  y de este valor depende cuanta densidad de flujo habrá en el PMSG. Por lo tanto, la ecuación (65) describe el cálculo del área del imán. Las medidas se muestran en la Figura 19.



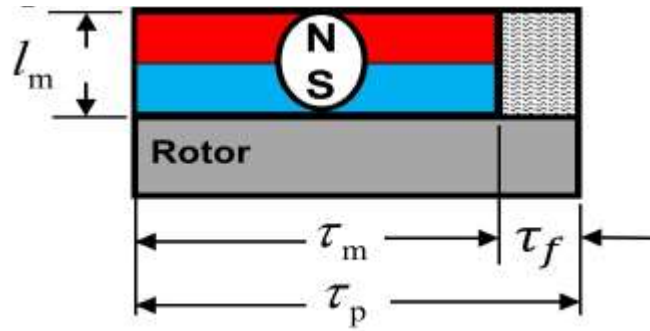


Figura 19: Dimensiones del Imán PMSG.

$$A_m = \alpha_m \tau_p L \quad (65)$$

Se calcula el espesor del imán  $l_m$ , como su volumen  $V_m$  sobre su área  $A_m$  como se ve en la ecuación (66).

$$l_m = \frac{V_m}{A_m} \quad (66)$$

Por último, se calcula el ancho del imán  $\tau_m$ , que es función del radio exterior del estator  $R_{so}$ , y el número de polos  $N_m$ , como se observa en la ecuación (67).

$$\tau_m = \frac{2\pi R_{si} a_m}{3 N_m} \quad (67)$$

## Capítulo 4. Cálculos y proceso iterativo

El proceso de diseño de una máquina síncrona es un proceso iterativo, en donde se cambian elementos físicos de la máquina, a fin de, mejorar las propiedades mecánicas, magnéticas y eléctricas. En el capítulo se presentará el historial de cambios que se realizaron en la máquina, se analizarán las variaciones que provocan en las variables antes mencionadas y se dará una versión final, la cual cumple con los objetivos de aplicación requeridos para la máquina. No existe una solución única para satisfacer todos los requisitos esperados, es decir, las diferencias en geometría, volumen y materiales podrían llevar a obtener el mismo rendimiento en un generador eléctrico. El *PMSG* está diseñado bajo un enfoque de bajo costo mediante la utilización de un estator comercial de uso general que se produce masivamente. Luego, el rotor de imán permanente se diseña para cumplir con todos los requisitos operativos del generador en función de la geometría del estator predefinida. La Figura 20 ilustra el diagrama de flujo del diseño de *PMSG*.

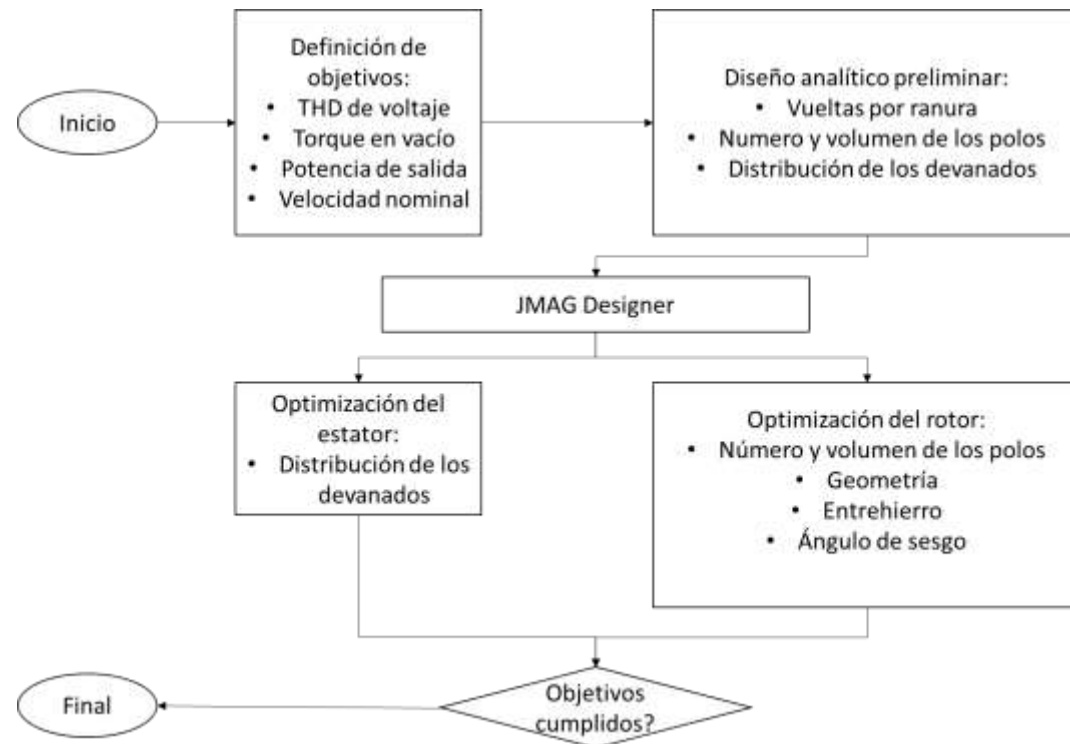


Figura 20: Metodología de diseño del PMSG.

Las simulaciones que nos permiten conocer el comportamiento de las variables, se harán en el software *JMAG*, cada variación involucra repetir las simulaciones, para poder introducir los nuevos parámetros, y obtener gráficas y comportamientos de las variables de interés.

Gracias a las simulaciones, se pueden obtener varias medidas eléctricas y magnéticas que darán una idea de si el comportamiento de la máquina es el correcto. Las variables de interés más representativas son las siguientes:

- Voltaje
- Intensidad de Corriente
- Potencia de salida del generador
- Torque
- Densidad de flujo magnético

La definición de objetivos está relacionada con las aplicaciones de la máquina. Como este trabajo trata con una aplicación para baja velocidad, se espera que el *THD*, que se muestra en la ecuación (68) [26], de voltaje tenga valores lo más pequeños posible. Ambos parámetros se han estudiado en detalle para *PMSG*. Para esta aplicación, el par dentado puede estar en valores de hasta 8 Nm pico. Se espera que la *THD* de voltaje de circuito abierto de línea a línea sea inferior a 5 % [27]. La potencia de salida y la velocidad nominal son datos de entrada.

$$\%THD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{n=50} V_n^2, RMS}}{V_1, RMS} \times 100\% \quad (68)$$

Todos los requerimientos de diseño expresados en los capítulos 2 y 3 fueron calculados matemáticamente, muchas veces se cumplían las restricciones topológicas y de diseño, sin embargo, no garantiza el correcto funcionamiento de la máquina. Siguiendo el proceso se pudieron obtener 4 versiones del generador. La información fue recopilada y se muestra en el capítulo el cálculo de la versión final.

#### 4.1 Parámetros iniciales de diseño

Los requerimientos iniciales de diseño se muestran en la Tabla 2, los cuatro parámetros descritos son los necesarios para iniciar el proceso de diseño, son requerimientos que se toman a partir de las condiciones de viento en el lugar, y de las especificaciones que se buscan en el *PMSG*.

Tabla 2: Parámetros iniciales de diseño.

Parámetros principales			
Especificación	Variable	Valor	Unidades
Frecuencia	F	32	Hz
Velocidad	V	137	rpm
Potencia de salida	Psal	1200	W
Longitud	L	0.1524	m
Entrehierro	g	1.5	mm

#### 4.2 Número de polos e imanes

El primer paso para dimensionar un *PMSG* es determinar el número de polos y ranuras, los polos determinan la magnitud de campo magnético que fluye en el circuito. Los polos se calculan con la ecuación (55) quedando como sigue.

$$N_m = \frac{120f}{S_r} = \frac{(120)(32)}{137} = 28 \quad (69)$$

El número de pares de polos está determinado por la ecuación (56), y se realiza el cálculo.

$$N_p = \frac{N_m}{2} = \frac{28}{2} = 14 \quad (70)$$

### 4.3 Ranuras

Las ranuras son los huecos por donde se introducen los conductores que proveen el voltaje de salida de la máquina. La determinación de ranuras se realiza de acuerdo con una combinación adecuada con los polos. Se elige un número de ranuras de 54 para realizar las pruebas. La determinación correcta entre ranuras y polos se comprueba más adelante. Ahora es necesario determinar el número de ranuras por fase  $N_{sp}$ . Dado que se diseña para un sistema trifásico el número de ranuras por fase esta dado por la ecuación (71).

$$N_{sp} = 18 \quad (71)$$

El número total de ranuras del estator que se describe en la ecuación (57), queda calculado en la ecuación (72), por lo que se tendrán 54 ranuras en el estator.

$$N_s = N_f N_{sp} = (3)(18) = 54 \quad (72)$$

El número de ranuras por polo y por fase se calcula con el número de ranuras por fase y el número de polos, y se describe en la ecuación (58) quedando 0.64, este valor es ideal que sea menor a 1 por lo que se cumple.

$$N_{spp} = \frac{N_{sp}}{N_m} = \frac{18}{28} = 0.64 \quad (73)$$

El número de ranuras por polo es el número de ranuras que se encontrarán alineadas en cada polo magnético del estator, se describió en la ecuación (59) y se calcula en la ecuación (74).

$$N_{rp} = \frac{N_s}{N_m} = \frac{54}{28} = 1.92 \quad (74)$$

#### 4.4 Potencia y torque.

La potencia y torque son parámetros de salida que determinan las características de trabajo del PMSG, lo primero que se tiene que calcular es la velocidad del generador, descrita en la ecuación (7). Se muestran dos maneras de llegar al resultado, con la velocidad y con el número de polos, esto nos da la seguridad de que el resultado es consistente, por lo que se continua el proceso. En caso de que los resultados no sean iguales, se tendrá que realizar un ajuste en los requerimientos iniciales. El cálculo de la velocidad angular se muestra en las ecuaciones (75)- (76).

$$\omega_m = \frac{2\pi S_r}{60} = \frac{2\pi(137)}{60} = 14.3466 \text{ rad/s} \quad (75)$$

$$\omega_m = \frac{2\pi f}{N_p} = \frac{2\pi(32)}{14} = 14.3466 \text{ rad/s} \quad (76)$$

La potencia de entrada es función de la potencia de salida y la eficiencia, y se calcula en la ecuación (77). El torque se calcula como se dedujo en la ecuación (62), quedando el cálculo de la ecuación (78).

$$P_{ent} = \frac{P_{sal}}{\eta} = \frac{1200}{0.84} = 1176.47 \text{ W} \quad (77)$$

$$T_m = \frac{P_{in}}{\omega_m} = \frac{1176.47}{14.34} = 82 \text{ N.m} \quad (78)$$

#### 4.5 Entrehierro, yugo y mejoramiento de la señal.

El entrehierro es el espacio entre el estator y el rotor, y representa una oposición al flujo, por otro lado, el yugo es el ancho de la laminación de estator, aquí es la frontera del camino del flujo. Variaciones en el entrehierro y el yugo ofrecen señales de voltaje y corriente con una cierta *THD*.

Lo primero a considerar es la *THD* de la salida de voltaje, si este parámetro se encuentra bajo norma entonces el diseño del *PMSG* se considera exitoso. Se aplicó la prueba de *THD* obteniendo un porcentaje de 6%, que se encuentra aún fuera de norma según [27]; sin embargo, se encuentra cercano a cumplirlo. Se mejora la señal de voltaje y corriente haciendo una inclinación axial en los imanes, reduciendo así ciertos armónicos, por lo que esta acción reduce el *THD*. Se realiza un sesgo en los imanes primero de 5° y luego de 10°, y se calcula el *THD* nuevamente. En esta ocasión se obtiene un *THD* de 3.8% el cual cumple con la norma y se procede entonces a comprobar los parámetros restantes.

Tabla 3. Variación de entrehierro y yugo

Versión	Número de polos	Número de ranuras	Entrehierro	Yugo	THD
V1	28	54	0.5	2.4 mm	6 %
V2	28	54	1.5	2.4 mm	5.9 %
V3	28	54	1.5	1.80 mm	4.5 %
V4 (skew 5°)	28	54	1.5	1.80 mm	4.2 %
V4 (skew 10°)	28	54	1.5	1.80 mm	3.8 %

#### 4.6 Imanes

Los imanes permanentes son los encargados de dar el flujo magnético en el *PMSG*, ahorrando el uso de arrancadores y cajas multiplicadoras. Por supuesto no todos los imanes permanentes pueden ser utilizados para tal propósito. Los imanes permanentes se clasifican en varias categorías, sin embargo, la característica a comparar en el desarrollo de generadores es el punto de máxima energía  $BH_{max}$ , que es una medida de la energía que se puede extraer del imán y son dos categorías de esta característica. Por un lado, se tiene la imanación, que es cuanto campo magnético puede generar el imán, y por otro lado se tiene la coercitividad, que es la dificultad de desalinear los campos magnéticos internos con fuentes provenientes del exterior. La suma de estas dos características da una  $BH_{max}$  que puede ser comparada para elegir el imán correcto [28].

La Figura 21 muestra una comparativa de la magnitud de  $BH_{max}$  para imanes de distintos materiales. Con las mejoras y descubrimientos tecnológicos, los imanes han ido produciendo cada vez más energía y han necesitado mucho menos volumen para hacerlo. Como se observa los imanes de neodimio (Nd-Fe-B) son los imanes que actualmente presentan una mayor magnitud de  $BH_{max}$  y por lo tanto son idóneos para aplicaciones de máquinas eléctricas.

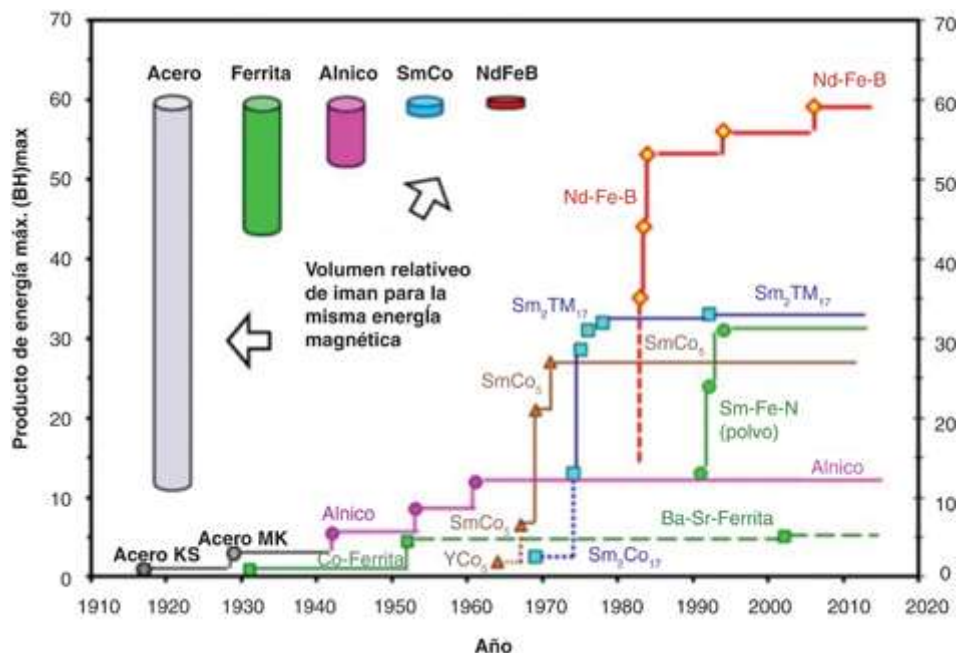


Figura 21: Comparación de BHmax en distintos imanes, adaptado de [29].

Los imanes de neodimio son imanes que tienen muy alta resistencia a la desmagnetización por lo que es menos probable que fuentes externas como el calor, los golpes o campos magnéticos externos. El punto de máxima energía es el parámetro a comparar para elegir el grado de imán correcto. Los imanes de neodimio miden su intensidad de campo magnético de acuerdo con un grado N como se muestra en la Figura 22, donde se observa que entre más grande el grado, más grande será la constante BHmax. De acuerdo con [30] y [31], un correcto flujo se presenta en imanes de neodimio grado N33 hacia arriba. Para la aplicación se eligió entonces imanes de neodimio N35 con un BHmax de  $283 \text{ kJ/m}^3$ .

Para el dimensionamiento del imán necesitamos definir ciertas características iniciales que se describirán a continuación.

El ángulo magnético  $\alpha_m$ , el espesor del yugo del rotor y del estator  $W_{bi}$  aumentan en proporción a el ángulo magnético. Este ángulo magnético puede ser propuesto con valores predeterminados de acuerdo con [3], y se tienen las siguientes configuraciones en la Tabla 4. Se eligió la opción de  $120^\circ$  para tener una mejor señal de torque más pura.

Marca de material	Densidad de flujo magnético residual		Coercitividad		Coercitividad		Producto energético máximo		Coeficiente de temperatura	Temperatura de resistencia al calor del mecanizado	Temperatura de Curie
	Grado		Br		H c b		H c j				
	kG	mT	kOe	kA/m	kOe	kA/m	MGOe	kJ/m3	$\alpha_{Br}$ %/°C	Temperatura de funcionamiento °C(H/D=0.7)	Temperatura de Curie
27	10.3-10.8	1030-1080	$\geq 10.0$	$\geq 796$	$\geq 12$	$\geq 955$	25-29	199-231	-0.12	$\geq 80^{\circ}\text{C}$	310°C
30	10.8-11.3	1080-1130	$\geq 10.0$	$\geq 796$	$\geq 12$	$\geq 955$	28-31	223-247	-0.12	$\geq 80^{\circ}\text{C}$	310°C
33	11.7-12.2	1130-1170	$\geq 10.5$	$\geq 836$	$\geq 12$	$\geq 955$	31-34	247-271	-0.12	$\geq 80^{\circ}\text{C}$	310°C
35	11.7-12.2	1170-1220	$\geq 10.9$	$\geq 868$	$\geq 12$	$\geq 955$	33-36	263-287	-0.12	$\geq 80^{\circ}\text{C}$	310°C
38	12.2-12.5	1220-1250	$\geq 11.3$	$\geq 899$	$\geq 12$	$\geq 955$	36-39	287-310	-0.12	$\geq 80^{\circ}\text{C}$	310°C

Figura 22: Clasificación imanes de neodimio, adaptado de [32].

Tabla 4: Valores de la fracción magnética

$\alpha_m$	Descripción
130°	Minimiza las pérdidas
125°	Minimiza el contenido armónico
120°	Minimiza la ondulación del torque

La fracción magnética  $\alpha_m$  va a dar la información del ancho óptimo del imán, a menos  $\alpha_m$  disminuye el torque en vacío y la distorsión armónica en el voltaje, pero se obtiene menor densidad de flujo y por lo tanto menor voltaje. Esta se supone de 50% para el modelo. La densidad de flujo magnético en el diente que tiene valores típicos de 2 a 3 T según [3].

Tabla 5: Parámetros iniciales de dimensionamiento del imán.

$B_{hmax}$	283
$\alpha_m$	1.047197551
$R_{si}$	0.09
$\alpha_s$	0.5
$B_{ts}$	2.8
$\alpha_m$	0.5

El volumen del imán se calcula con base en la ecuación (64), y con los valores de la Tabla 5. El resultado se da en la ecuación (79).



$$V_m = \frac{T_m}{BH_{max}N_m} = \frac{82}{(283)(1000)(28)} = 0.00001033795879 \text{ m}^3 \quad (79)$$

Las dimensiones del imán se calculan de acuerdo con la metodología del capítulo 3, en las ecuaciones (66) y (67), y se ven en la imagen Figura 19. La longitud y el ancho del imán están calculados en las ecuaciones (80) y (81) respectivamente.

$$l_m = \frac{V_m}{A_m} = \frac{0.00001033795879}{0.001024885698} = 0.01008693828 \text{ m} \quad (80)$$

$$\tau_m = \frac{2R_{si}a_m}{N_m} = \frac{2(0.09)(1.047)}{28} = 0.006724971774 \text{ m} \quad (81)$$

Por último, se calcula la densidad de flujo del entrehierro en el *PMSG* con la fracción magnética y la densidad flujo magnético en el diente  $B_{ts}$ . Este calculo se muestra en la ecuación (82).

$$B_g = B_{ts}(1 - \alpha_s) = 2.8(1 - 0.5) = 1.4 \text{ T} \quad (82)$$

#### 4.7 Materiales

La siguiente tabla, resume todos los materiales elegidos para la versión final del generador. En el diseño todos los materiales electromagnéticos fueron considerador isotrópicos. Para el rotor y el estator se eligió el mismo tipo de acero. Para los bobinados se utilizó cobre y para los imanes neodimio N35.

Tabla 6: Características de los materiales.

Elemento	Rotor	Estator	Bobinados	Imanes
Material	20JNEH1200	20JNEH1200	Cobre	N35
Características				
Resistividad ( $\Omega$ -m)	$5.50 * 10^{-7}$	$5.50 * 10^{-7}$	$1.67 * 10^{-08}$	$1.80 * 10^{-06}$
Densidad ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	7650	7650	8960	7500

Se eligió el acero 20JNEH1200 debido a que es un material magnético blando, materiales que por su construcción y propiedades físicas hace que, para orientar sus dominios magnéticos, se necesite mucho menos energía, la densidad de flujo magnético se muestra en la Figura 23. Los materiales producen por lo tanto curvas de histéresis más estrechas lo que a su vez reduce las perdidas magnéticas considerablemente. Debido a estas bondades se utilizan ampliamente en aplicaciones de máquinas eléctricas.

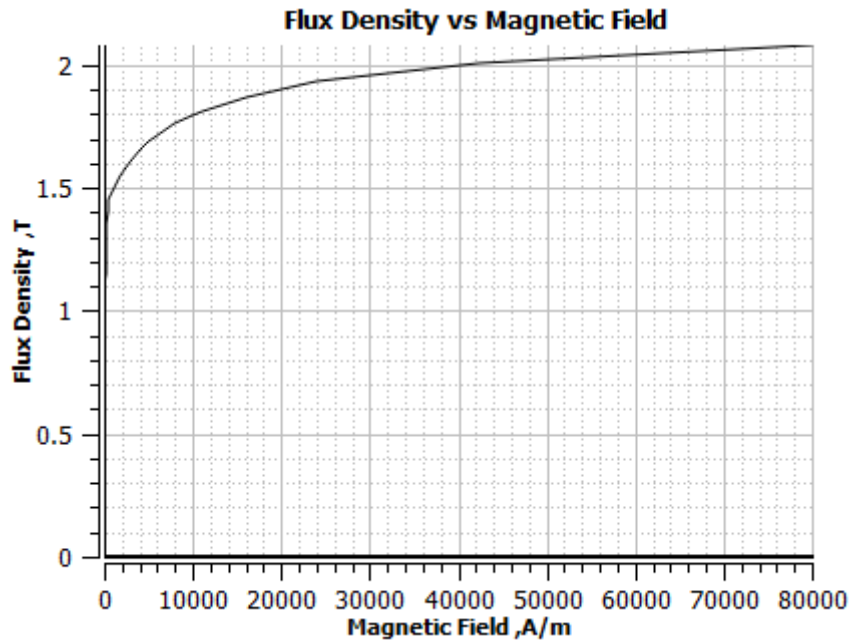


Figura 23: Densidad de flujo en el acero 20JNEH1200.

#### 4.8 Conductores

El cobre es el conductor de electricidad más usado, debido a sus bajas pérdidas eléctricas y bajo costo, por lo que se eligió para el bobinado del *PMSG*. El cobre es un material resistente, pero a la vez flexible lo que facilita trabajar con él. La fórmula para calcular la resistencia en los devanados está dada en la ecuación (83), donde  $\rho$  es la resistividad del material, en este caso se toma la resistividad del cobre,  $A$  es el área de la ranura del estator, que el fabricante proporciona ( $2.08 \times 10^{-6}$ ), y por último  $\gamma$  que es la longitud del cable y es función del número de vueltas (15), este se calcula asumiendo un calibre 8 que soporta 40 amperes, y el número de ranuras por fase (18). El cálculo de la resistencia se puede ver en la ecuación (84).

$$R = \rho \frac{\gamma}{A} \quad (83)$$

$$R = \rho \frac{\gamma}{A} = (1.71 \times 10^{-8}) \frac{(0.1524 + 0.08216)(15)(18)}{2.08 \times 10^{-6}} = 0.5207 \, \Omega \quad (84)$$

## Capítulo 5. Modelado por elemento finito

En este capítulo se presenta una descripción del método de solución por elemento finito. Además, se describe el procedimiento de simulación para *PMSGs* en el software *JMAG Designer*.

El proceso de solución de las ecuaciones matemáticas para obtener las variables de salida suele ser un proceso extenso y complicado que hace lento el proceso de iteración, incluso en algunas ocasiones, éstas no tienen solución. Además, debido a la complejidad, se da lugar a errores en los cálculos, que son difíciles de detectar. Es por eso que se recurre a una técnica llamada método de los elementos finitos (MEF).

La idea del método de los elementos finitos es dividir un problema complejo en varios problemas más simples que puedan resolverse simultáneamente; la solución al problema se obtiene combinando las soluciones a los problemas más simples [33]. Para tal fin, se divide la zona a analizar en muchas zonas más pequeñas, llamadas elementos finitos. El proceso se llama discretización del problema; una configuración clásica de elementos se compone de nodos y elementos. Los elementos son las formas que toman las subdivisiones del modelo base, y que pueden ser diferentes dependiendo de cada software utilizado, siendo las figuras más comunes cuadrados, triángulos, rectángulos o alguna combinación de éstas. Los nodos por otra parte, son los puntos en donde cada elemento se conecta con otro. Todo el conjunto de elementos y nodos da lugar a una nueva superficie llamada malla, esta puede tener más o menos elementos, se sabe que entre más elementos tenga una malla, los resultados serán mucho más exactos; sin embargo, el tiempo de simulación será mucho mayor, por lo que el adecuado dimensionamiento de la malla es una de las partes más importantes del modelado por elemento finito y va a depender de cada necesidad.

El análisis mediante elemento finito, independientemente del software donde se ejecute, siempre tendrá tres etapas principales, las cuales van a ser tan precisas como la aplicación y el software a utilizar lo demanden. Las tres etapas son: pre-procesamiento, resolución y post-procesamiento. En la primera etapa se definen todas las condiciones iniciales del sistema a analizar, así como la geometría. En la resolución se integra el cálculo de la malla, así como también se ingresan todas las cuantificaciones dentro de la geometría. Por último, en la tercera etapa se tiene la solución y análisis de resultados [33].

El análisis de elemento finito permitirá determinar las características de operación del generador en estado estable. Una herramienta especializada en el diseño de máquinas eléctricas es el software *JMAG Designer*. Esta herramienta proporciona muchos tipos de análisis que se pueden aplicar a la geometría creada, utilizando un análisis magnético transitorio que permitirá obtener los siguientes resultados para el *PMSG*: flujo magnético, campo magnético, magnetización, corriente, pérdidas, fuerza magnética, fuerza de Lorentz, tensión, corrientes de Eddy, campo eléctrico, desplazamiento, velocidad, inductancia de la bobina, corriente en el generador, torque, potencia de salida, e inductancia del motor [34].

A continuación, se describen los pasos necesarios para realizar el modelado mediante elemento finito de generadores síncronos de imanes permanentes. En la Figura 24, se muestran los pasos generales para el análisis, los cuales serán descritos más a fondo en el capítulo.

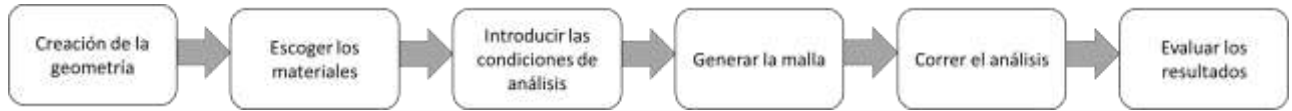


Figura 24: Metodología para el modelado en elemento finito en JMAG.

### 5.1 Creación de la geometría

Dado que se pueden realizar análisis en 3D y 2D en JMAG se determina que, de acuerdo con la aplicación, se representa en 2D, debido a que se puede ingresar un circuito eléctrico y condiciones magnéticas, las cuales dan un resultado más cercano al real. La creación de la geometría se realiza en SolidWorks, donde se representa el PMSG, respetando las unidades de medida correspondiente y aplicando todas las condiciones de frontera en la geometría, calculadas en el capítulo 3. Las medidas usadas para modelar el PMSG se pueden observar en la Tabla 7 y son indicadas en la Figura 25.

Tabla 7: Medidas de la geometría del PMSG.

Nomenclatura	Definición	Medida
$D1$	Profundidad de zapata 1	1 mm
$D2$	Profundidad de la zapata 2	1.70 mm
$D3$	Profundidad de la zapata 3	11.27 mm
$Wt$	Ancho del diente en la zapata	7.50 mm
$Ws$	Abertura de la ranura	3.00 mm
$Wsj$	Ancho de la ranura interno	7.00 mm
$Wtb$	Ancho del diente	3.20 mm
$Wbi$	Yugo estator y rotor	1.80 mm
$Rso$	Radio exterior de estator	90.20 mm
$Rsi$	Radio interior del estator	74.00 mm
$Wsb$	Ancho de la parte inferior de la ranura	5.69 mm
$Rri$	Radio interior del rotor	91.21 mm
$Rro$	Radio exterior del rotor	100.00 mm
$L$	Longitud del generador	152.4 mm
$g$	Entrehierro	1.5 mm

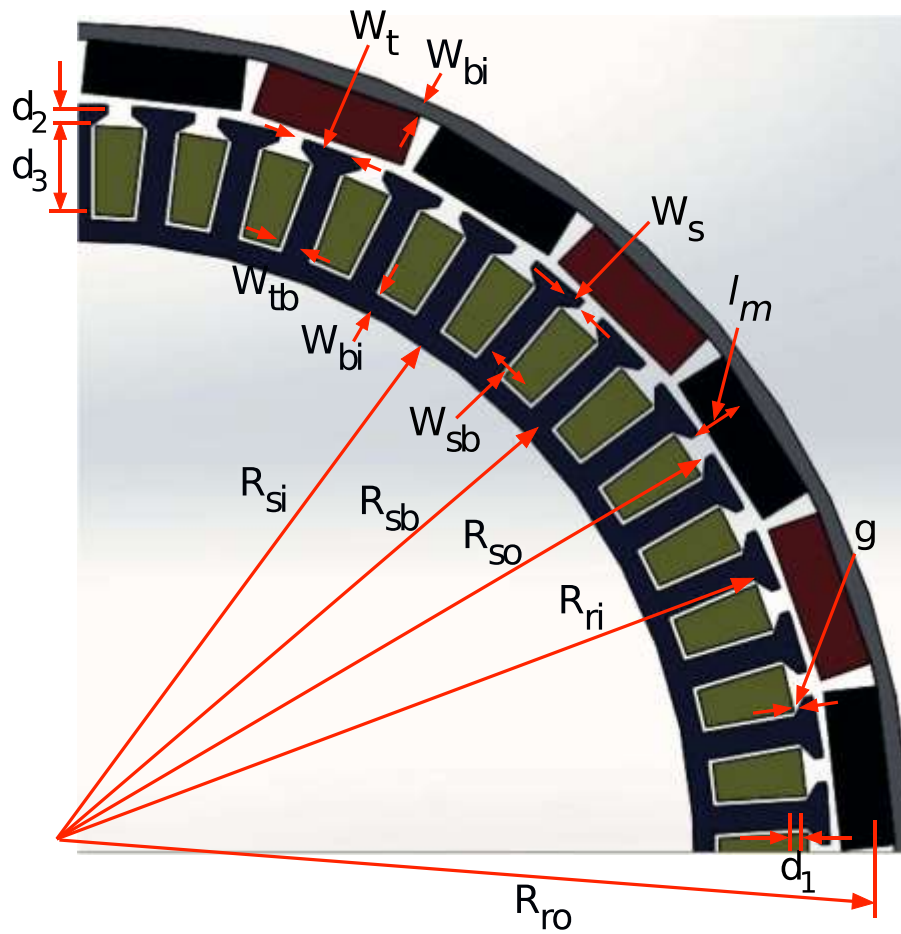


Figura 25: Vista acotada de la geometría del PMSG.

Cuando la geometría se crea y se revisa en SolidWorks, se guarda con una extensión de archivo .DXF, esta extensión permite abrir automáticamente el modelo en JMAG. Al abrir JMAG, se podrá ver la vista de inicio en la Figura 26:

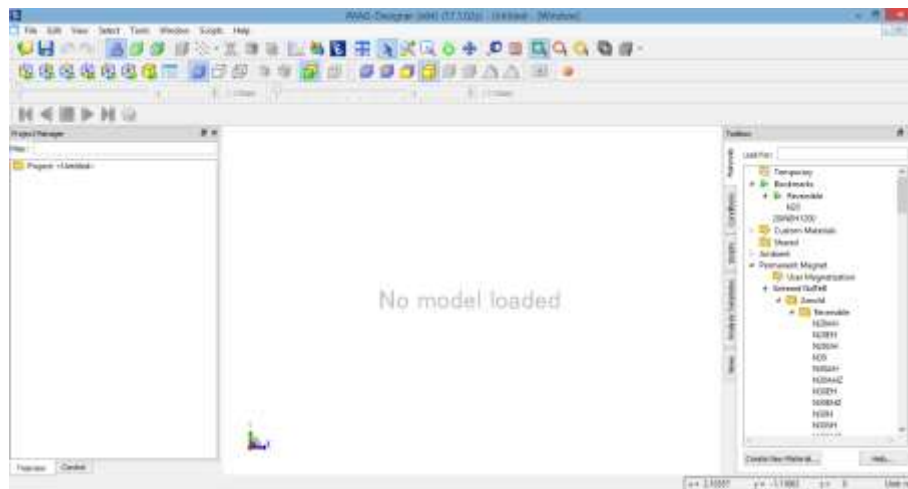


Figura 26: Vista principal de JMAG.

Se abre el archivo importado de SolidWorks, en la pestaña File y se busca el archivo DXF, el cual se abre automáticamente en el espacio de trabajo de JMAG, colocándose el dibujo de la geometría en la pantalla principal. Cuando se tenga la geometría en el espacio de trabajo, se procede al editor de geometría en la opción que se muestra en la Figura 27.



Figura 27: Barra de herramientas principal de JMAG.

Cuando se entra en el editor de geometría, el modelo 2D se ve de color blanco como se muestra en la Figura 28, permitiendo seleccionar cada área distinta con un clic, iluminándose el área de color verde. Con los pasos descritos anteriormente se puede determinar si existe algún error en la geometría; ya que, si alguna parte se encuentra mal dibujada o una figura no se encuentra cerrada completamente, al hacer clic, el área verde será mayor a la esperada. Una vez comprobado que la geometría se haya dibujado correctamente, se inicia a trabajar en el editor.

Una vez estando posicionados en el editor de geometría, se puede editar la geometría o crear una nueva; sin embargo, dado que ya se tiene la geometría lista, en esta sección sólo se eliminarán las partes que no contienen material ferromagnético para el análisis y que se dibujaron en *SolidWorks* por motivos de diseño. Para tal fin, se ingresa al “*Project Manager*” y en la pestaña “*Assembly*” se hará clic derecho en la capa 0 del modelo. En el menú abierto se hará clic en “*Edit Sketch*” y por último se seleccionarán las partes a eliminar con un clic, estas áreas se pondrán en verde. Una vez en el menú se dará clic derecho y se elegirá la opción eliminar, este menú se muestra en la Figura 29.

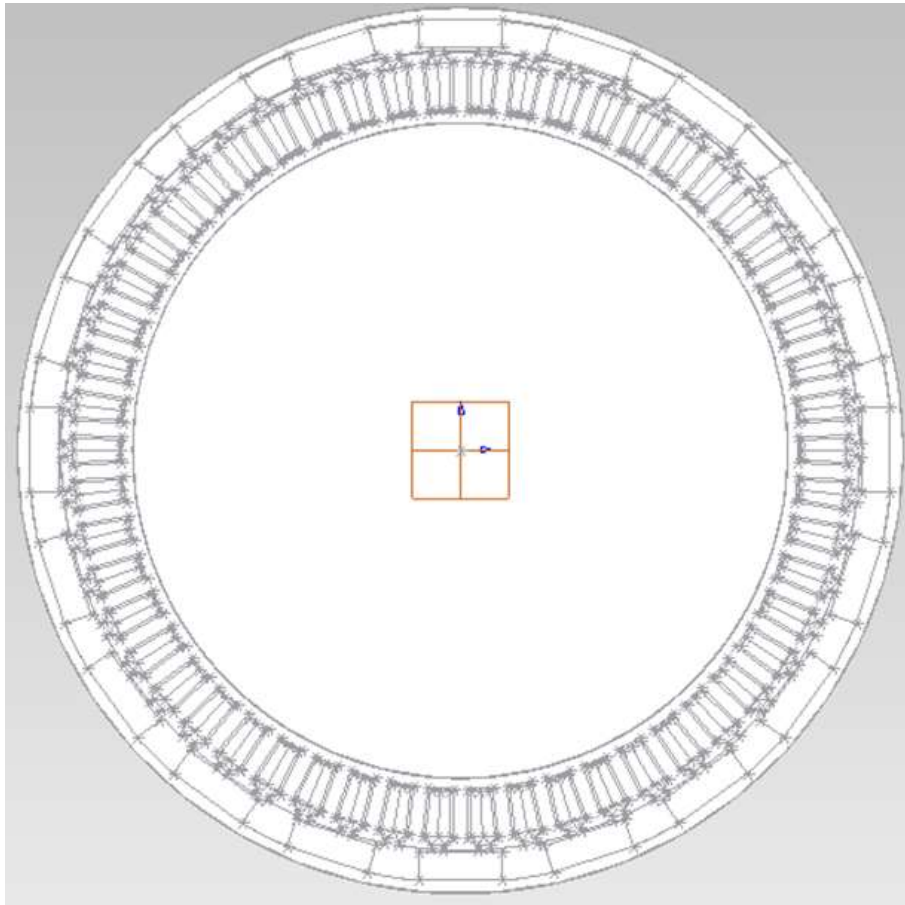


Figura 28: Vista de la geometría del PMSG en el editor de geometría de JMAG.

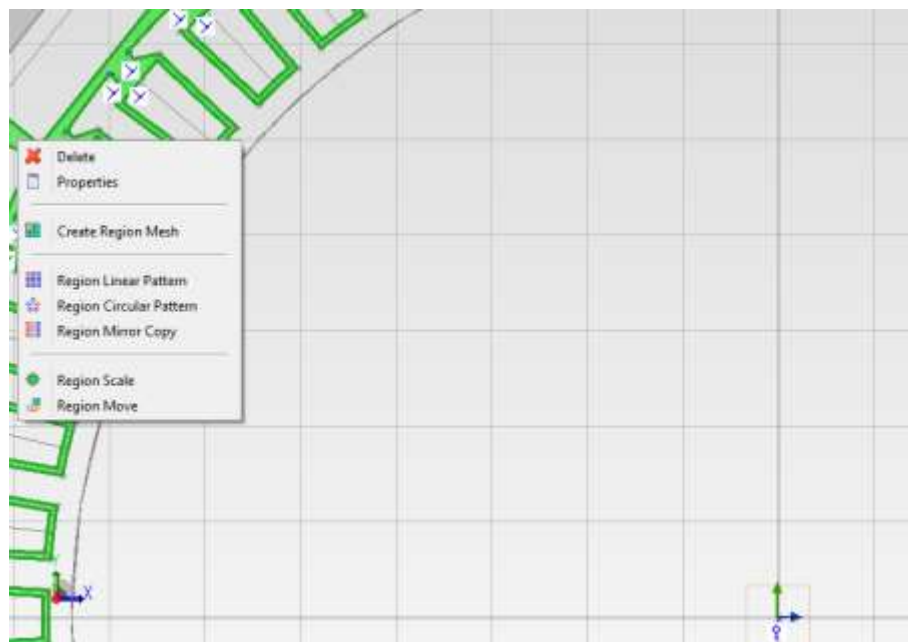


Figura 29: Selección y eliminación de material no ferromagnético.

El paso se repetirá con todos los elementos que resten en donde se tenga que eliminar alguna parte de la geometría. Una vez finalizada la edición de la geometría, se guardará el modelo y se hará clic en “Back to JMAG-Designer”. En la Figura 30, se muestra que las partes donde no hay material ferromagnético se eliminaron, quedando solo los elementos físicos del PMSG.

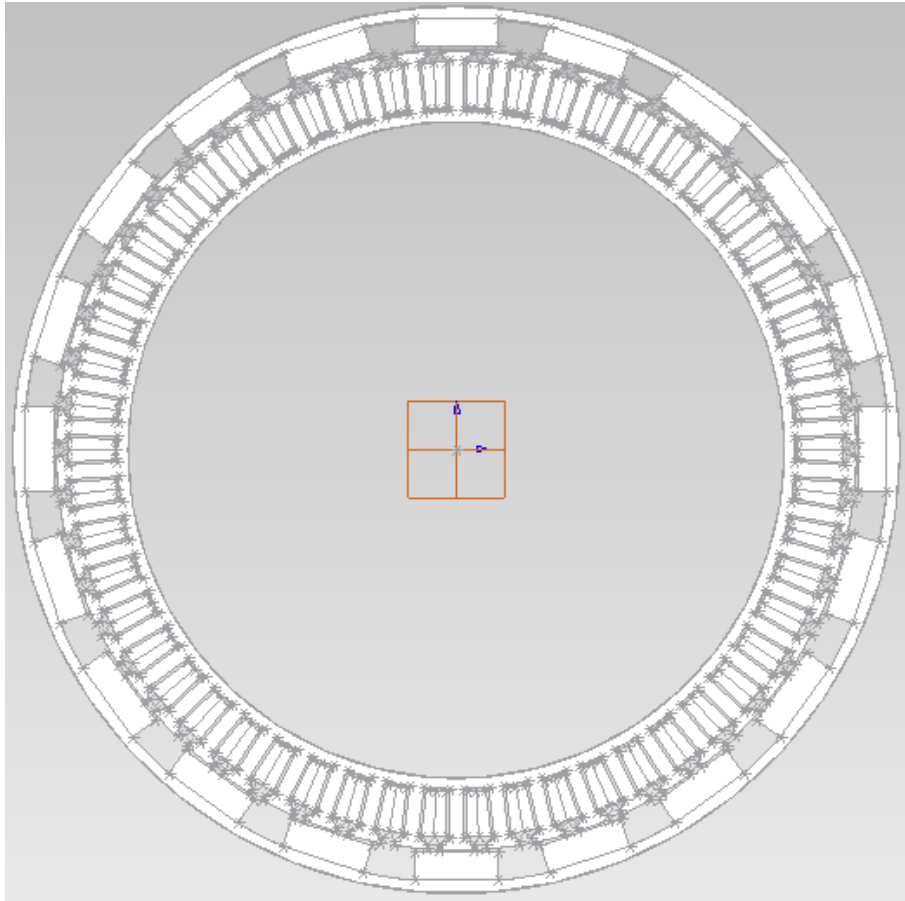


Figura 30: Geometría sin material ferromagnético.

## 5.2 Materiales

En el segundo paso, se elegirán los materiales del modelo de forma manual, es decir todas las características físicas, magnéticas y mecánicas de cada material, que se consiguen con los fabricantes de cada material elegido se deben especificar. Lo más importante para el análisis es conocer la gráfica de flujo y saturación magnética de los materiales, ya que una mala elección conducirá a resultados erróneos en la simulación. Los materiales en JMAG tienen características físicas, que se pueden comparar y verificar con las características proporcionadas por los fabricantes. Si los materiales no se encuentran en la librería, se pueden crear desde cero, donde será necesario obtener las curvas antes descritas por parte del fabricante. En la Tabla 8, se muestran las características básicas que son configurables en JMAG.



Tabla 8: Características básicas de JMAG.

Propiedades magnéticas
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Curva B-H</li> </ul>
Propiedades eléctricas
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Resistividad</li> <li>• Permitividad</li> </ul>
Propiedades mecánicas
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tipo de mecánica</li> <li>• Radio de Poisson</li> <li>• Expansión térmica</li> </ul>
Propiedades térmicas
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tipo de anisotropía</li> <li>• Tipo de propiedad de calor</li> <li>• Calor específico</li> </ul>

Para comenzar la sección se darán colores a los elementos, lo que ayudará a distinguir cada elemento de manera más fácil y cómoda. Para hacer el proceso *JMAG* permite seleccionar grupos que tengan el mismo color, así solo se asigna una vez y quedará aplicado a todos los elementos. Para seleccionar un grupo, se tomarán todos los elementos que lo conformarán (dando clic en cada uno o arrastrando el área de selección por los elementos), se da clic derecho y en la pestaña desplegada se da clic en “*Grouping*” y luego en “*Group selected*”, como se muestra en la Figura 31. Ahora todos los elementos forman parte de un grupo y se podrán tratar como si fueran una parte individual en el modelo.

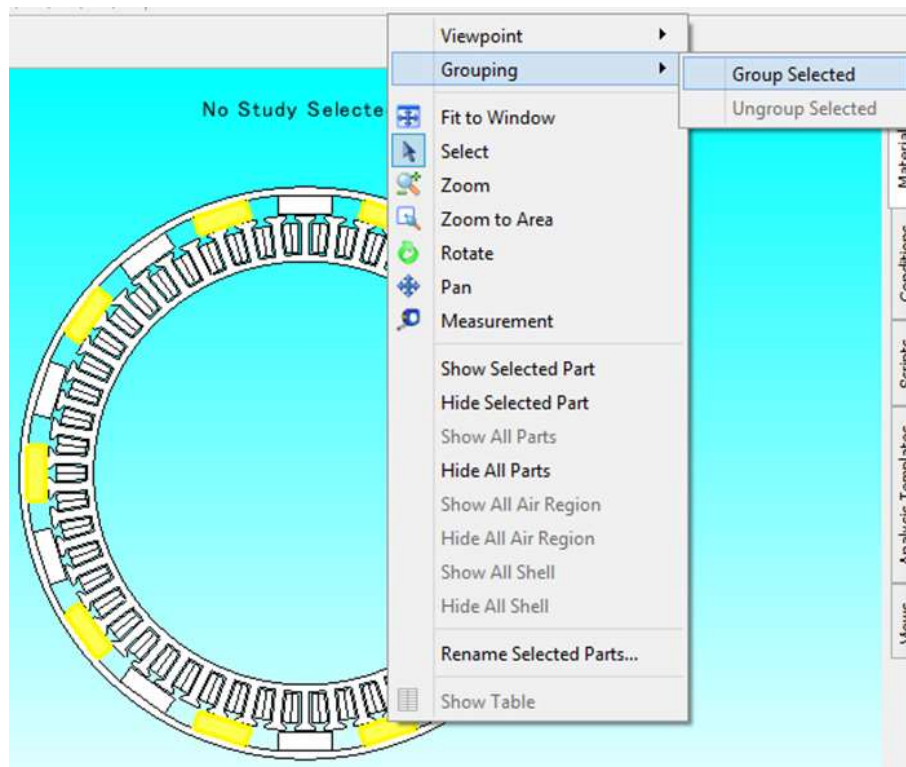


Figura 31: Agrupación de imanes del PMSG.

Para seleccionar el color, se abre el “*Project Manager*”, en la opción “*Assembly*”. Se podrán desplegar todos los grupos y elementos que se hayan creado hasta este punto, luego se selecciona el grupo con el que se quiere trabajar, se da clic derecho y se selecciona “*Properties*”, como se observa en la Figura 32.

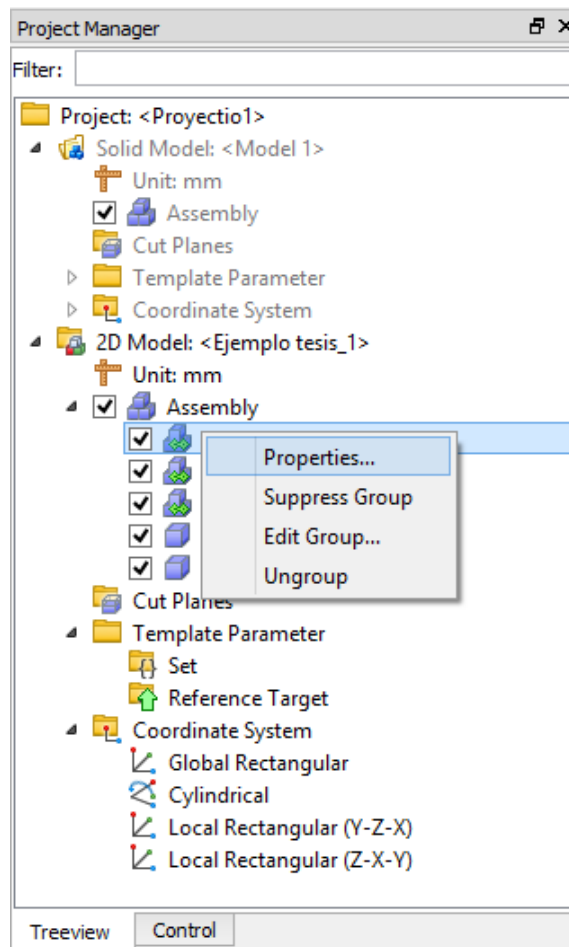


Figura 32: Selección de propiedades para los grupos.

Una vez en el menú adjunto en la Figura 33, se podrá seleccionar el color, transparencia y nombre del grupo. Aquí es importante colocar un nombre distintivo para el grupo, que represente perfectamente el elemento del que se trata, así se evitan confusiones en los pasos subsecuentes.

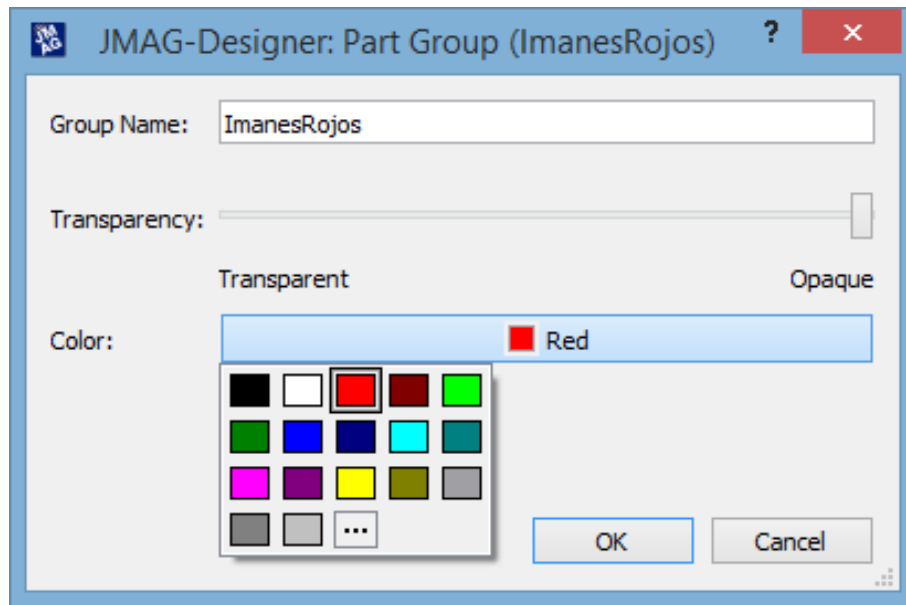


Figura 33: Menú de características para los elementos en JMAG.

Una vez seleccionados los colores y nombres de grupo se puede observar el modelo hasta ahora ilustrado en la Figura 34:

El siguiente requerimiento es elegir un estudio, *JMAG* ofrece estudios magnéticos, estructurales y asimétricos. El estudio que concierne para el alcance de la tesis es un estudio transitorio magnético. Para elegir el tipo de estudio se ingresará al “*Project Manager*”, se dará clic derecho en la pestaña “*2D Model*”, se elegirá “*New Study*” y en “*Magnetic*” se elegirá “*Transient Analysis*”, el proceso se ilustra en la Figura 35.

Luego se incluirán los materiales seleccionados para su construcción, para lo cual también se pueden hacer grupos con elementos que estén constituidos del mismo material, esta agrupación se hace de la misma manera que se realizó con los colores. Una vez hechos los grupos se seleccionará el grupo en el modelo con un clic, haciendo que se marque en rojo, luego se ira a la pestaña *Toolbox* a la derecha del software, se dará clic en “*Materials*”. Una vez aquí se puede encontrar el material de dos maneras, la primera es escribiendo su nombre en el cuadro “*Look For*”; la otra opción es ir navegando en las carpetas predeterminadas hasta encontrar el programa adecuado. Si el material no se encuentra en los predeterminados de *JMAG*, se podrá crea un nuevo material a partir del botón “*Create New Material*” donde se tendrán que ingresar las características magnéticas, eléctricas y térmicas del material. Una vez encontrado o creado el material lo único que se debe hacer es arrastrarlo hasta la parte del modelo en donde se utilizará.

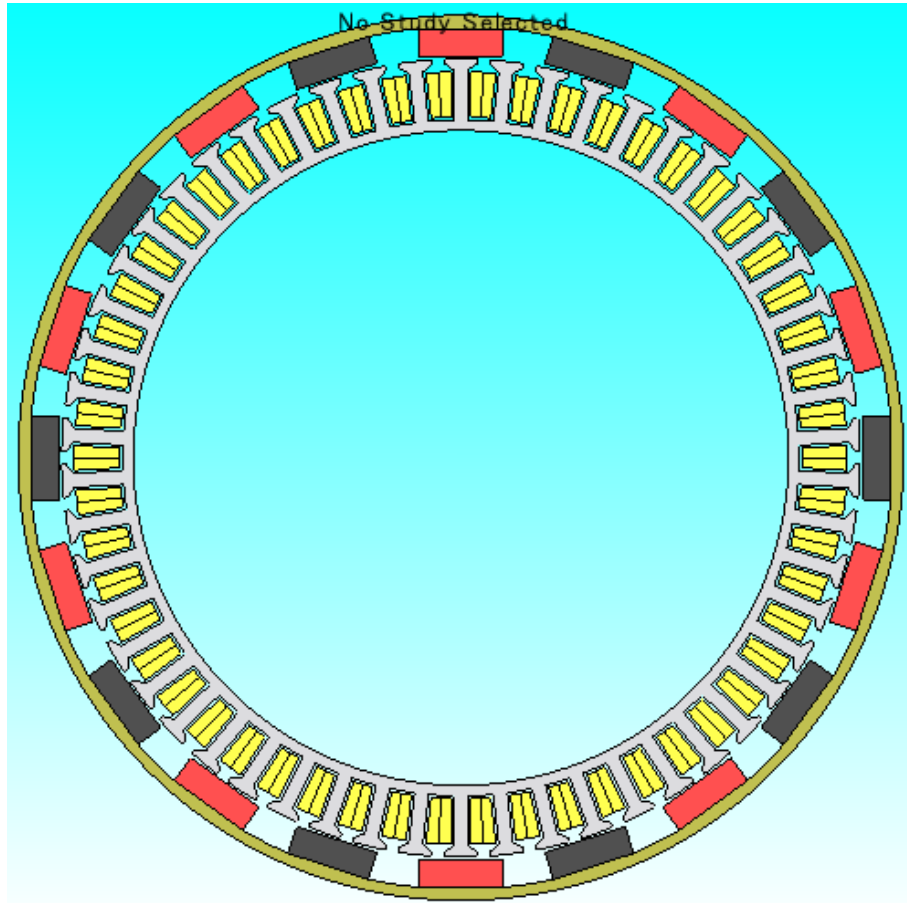


Figura 34: Geometría después de seleccionar colores.

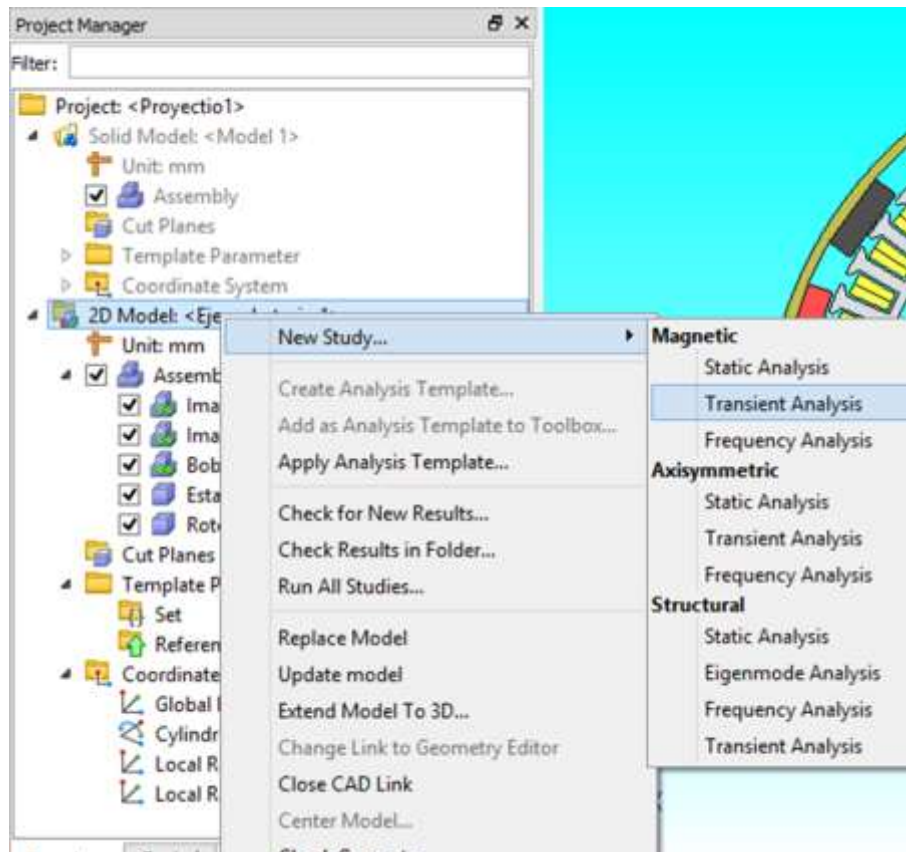


Figura 35: Selección del estudio a realizar.

Para el ejemplo los materiales fueron los siguientes:

- Para las bobinas se eligió “Copper”;
- Para los imanes se eligió “N35”; y
- Para el estator y el rotor se eligió “20JNEH1200”.

### 5.3 Condiciones de operación

Las condiciones de operación son todas aquellas características que delimitan el modelo dinámico del *PMSG*, así como todas las características eléctricas y magnéticas necesarias para la simulación. Para el caso de ejemplo se le dará un torque, una rotación y se incluirá el circuito eléctrico.

Las condiciones se encuentran en la parte derecha en el menú “*Toolbox*”, en la pestaña “*Conditions*”. Las condiciones necesarias para un *PMSG* se observan en la Figura 36.

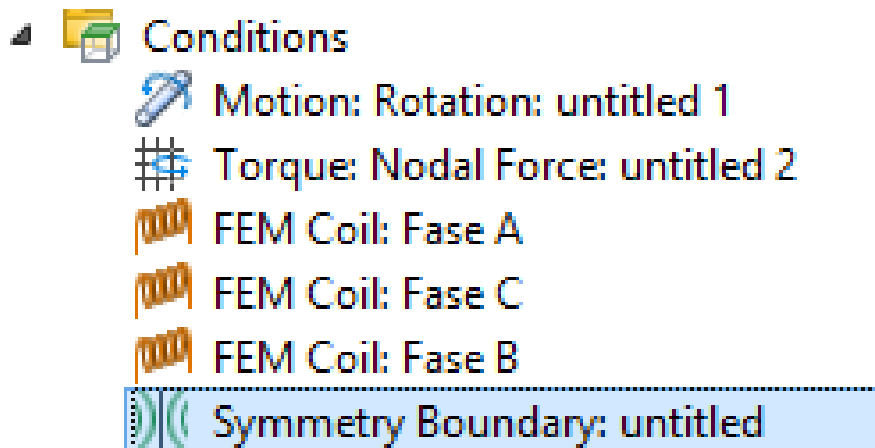


Figura 36: Condiciones para un PMSG.

Para el rotor se elegirán dos condiciones, por lo que se agrupan los elementos que lo conforman, y se arrastran al modelo. Las condiciones que se utilizan son:

Torque -> *Nodal Force*

En torque se elegirá la opción “upward”, y se guardan los cambios

*Motion->Rotation*

Aquí se podrá elegir la velocidad del giro como en la Figura 37, para el ejemplo es de 172.42 rpm.

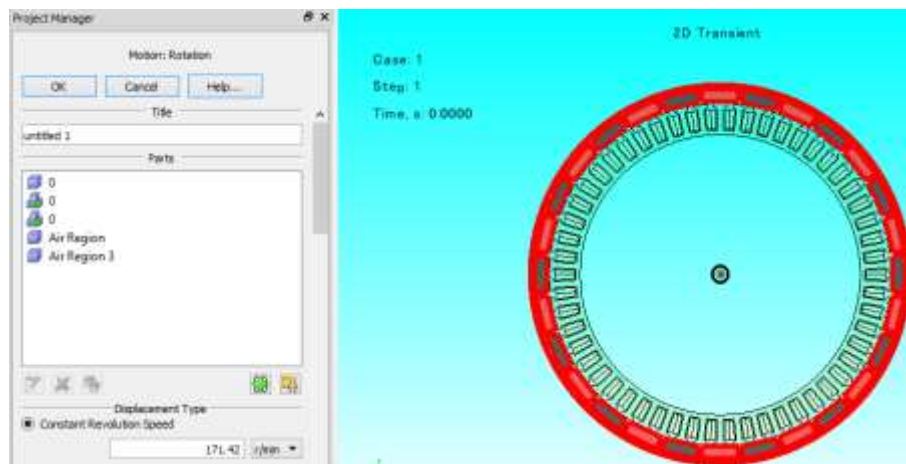


Figura 37: Pestaña para la selección de velocidad del PMSG.

Se establecieron las siguientes condiciones de simulación:

- Un giro de 175 rpm.
- Una longitud de 152.4 cm.

También se tiene que diseñar e ingresar el circuito eléctrico con el que trabajara el *PMSG*. Para poder ingresar el circuito se dará clic derecho en el estudio, y luego clic en la opción “*Add Circuit*” proceso mostrado en la Figura 38.

Se abrirá un nuevo menú como en la Figura 39, en el que, por medio de las herramientas predeterminadas, se podrá diseñar el circuito eléctrico de la máquina.



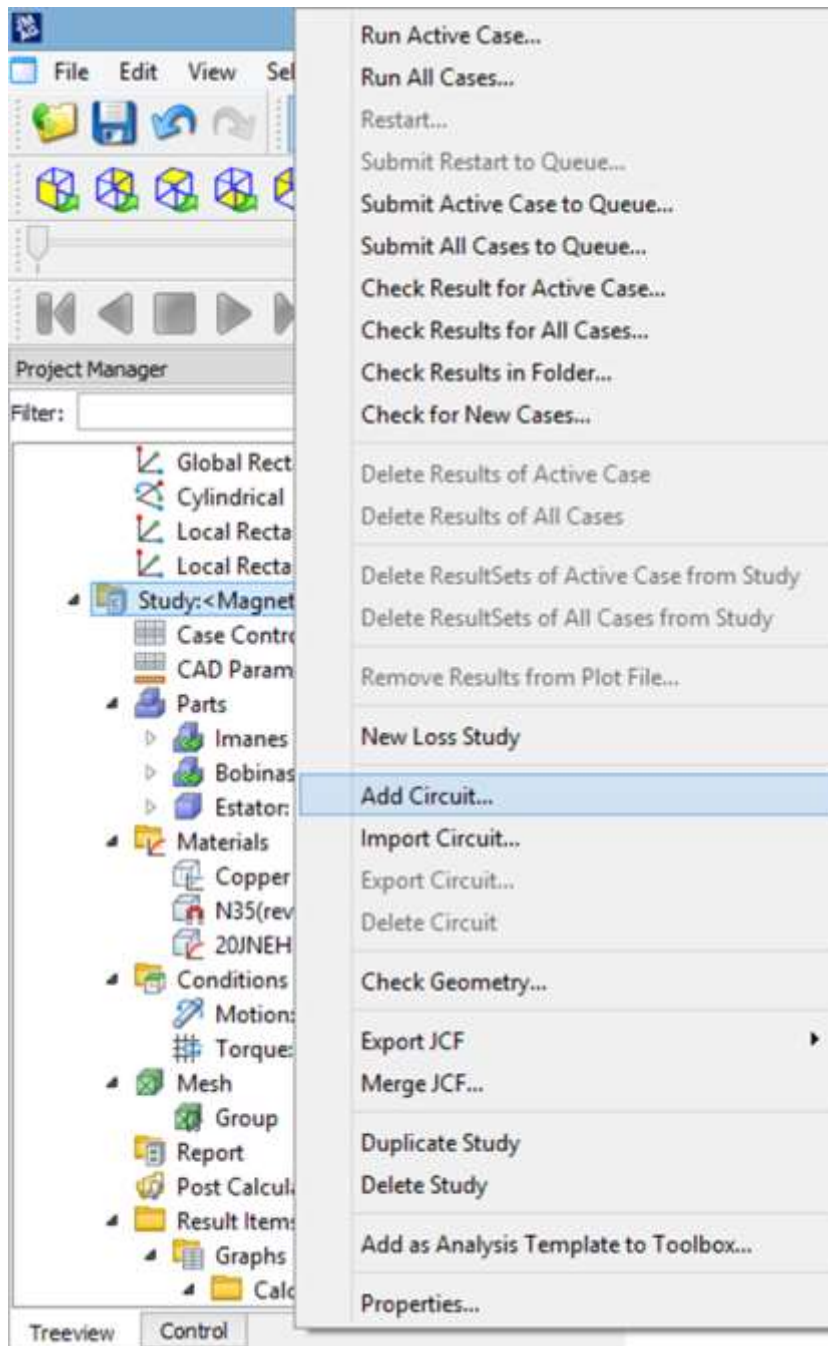


Figura 38: Menú para agregar circuito al modelo.

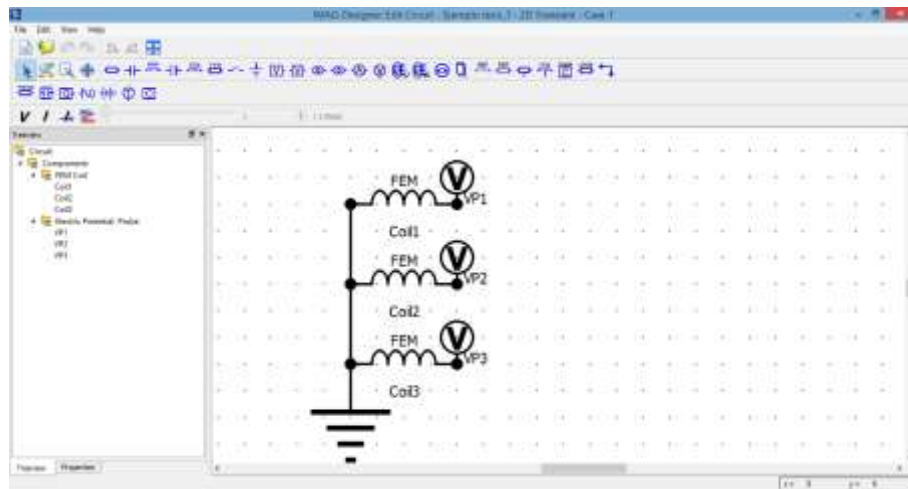


Figura 39: Menú de configuración del circuito.

Para el ejemplo se eligió una configuración con conexión en estrella, se colocaron las tres bobinas del estator, una referencia a tierra y tres probadores de voltaje que servirán para mostrar los resultados de la simulación en el último paso. Evidentemente se podrán agregar tantos elementos eléctricos como de medición se necesiten para cada caso. Una vez creado el circuito se ingresarán los parámetros eléctricos en cada elemento que se muestran en la Figura 40. Se logra haciendo doble clic en el elemento, e ingresando las medidas solicitadas.

FEM Coil

---

Title

---

X-axis Type

---

Turns

turn

---

Constant

ohm

---

Leakage Inductance

H

Figura 40: Menú de configuración de parámetros eléctricos.

- El circuito eléctrico quedó definido como se observa en la Figura 41:

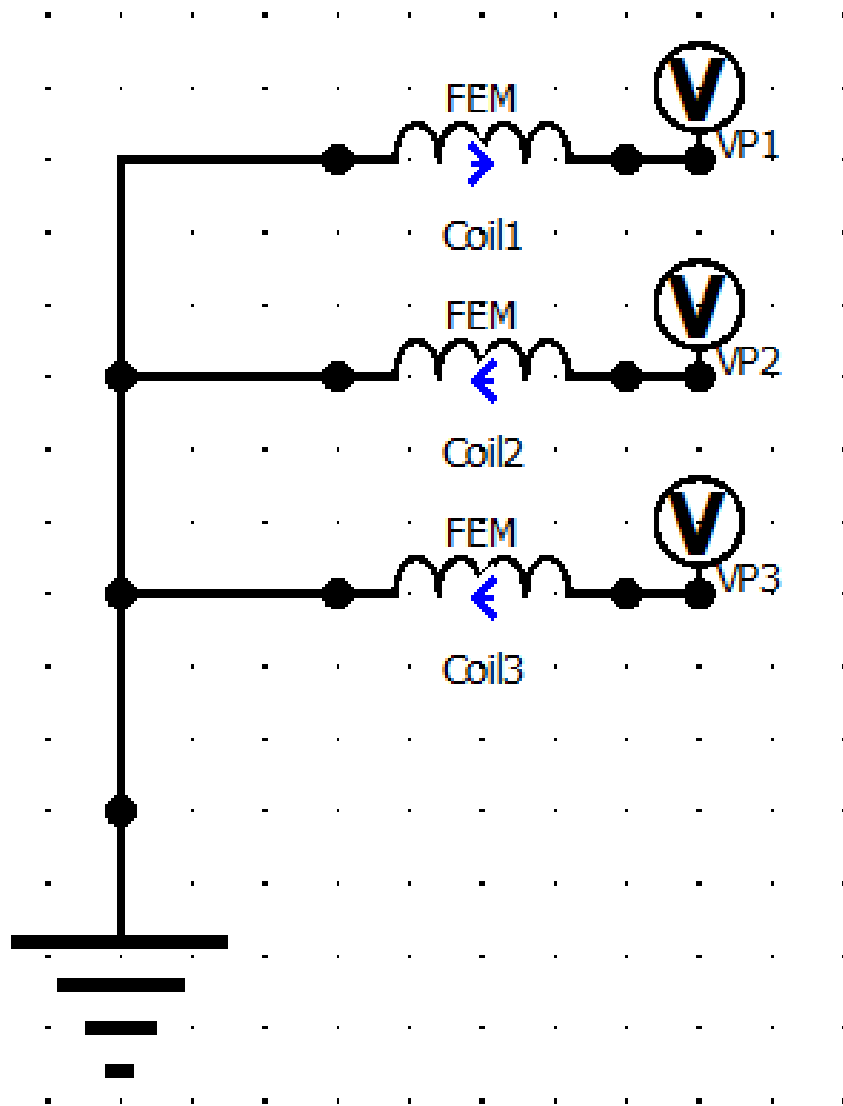


Figura 41: Circuito conexión Y.

Un paso de suma importancia es la colocación de los devanados en el estator, los cuales influyen en los resultados de salida del estudio. El proceso se realiza para determinar la dirección y colocación de cada grupo de bobinas en el circuito diseñado previamente.

Para obtener estas configuraciones se utilizó Emetor [35], una herramienta muy útil de análisis y diseño de máquinas eléctricas. Aquí se puede encontrar la distribución solamente ingresando el número de polos y ranuras en donde corresponde. La herramienta muestra automáticamente si nuestra configuración es apta, por medio de colores. Se indicará con color verde si es un devanado

concentrado, en la Figura 42 se muestra la vista de una configuración de 8 polos y 12 ranuras. Una vez comprobada la distribución de ranuras y polos se dará clic sobre la configuración seleccionada.



Figura 42: Configuraciones posibles en Emetor.

- Con la configuración de polos y ranuras del ejemplo (54 ranuras, 28 polos) se tienen dos configuraciones mostradas en las Figura 43 y Figura 44:

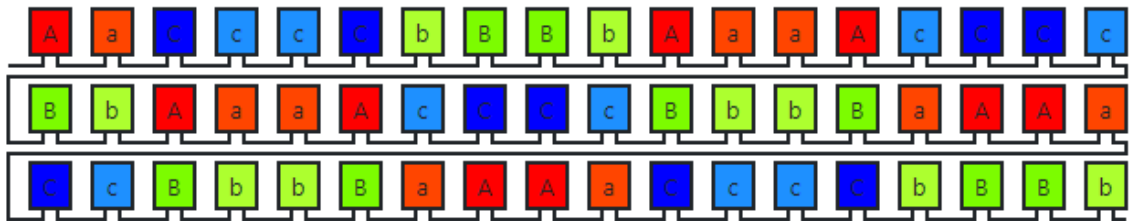


Figura 43: Configuración 1 de bobinado en el estator.

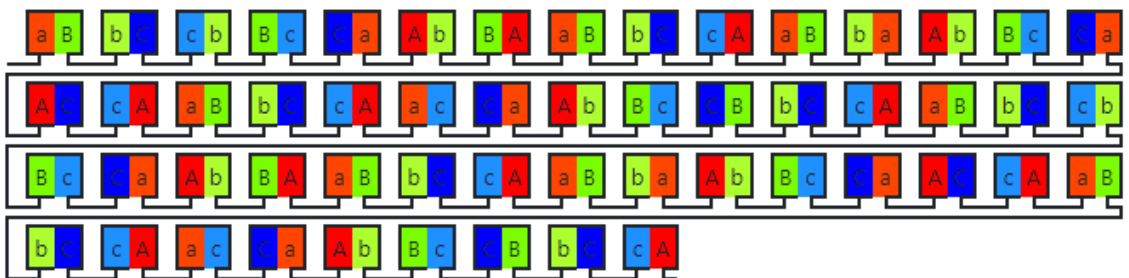


Figura 44: Configuración 2 de bobinado en el estator.

Se elegirá la segunda opción debido al número de periodicidades y la configuración de doble bobina por ranura, lo cual dará un voltaje con menor cantidad de ruido que la primera configuración.

#### 5.4 Creación de la malla

Para la creación de la malla se dará clic en “*Project Manager*” y a continuación en la opción “*Mesh*” donde se abrirá el menú que se observa en la Figura 45.

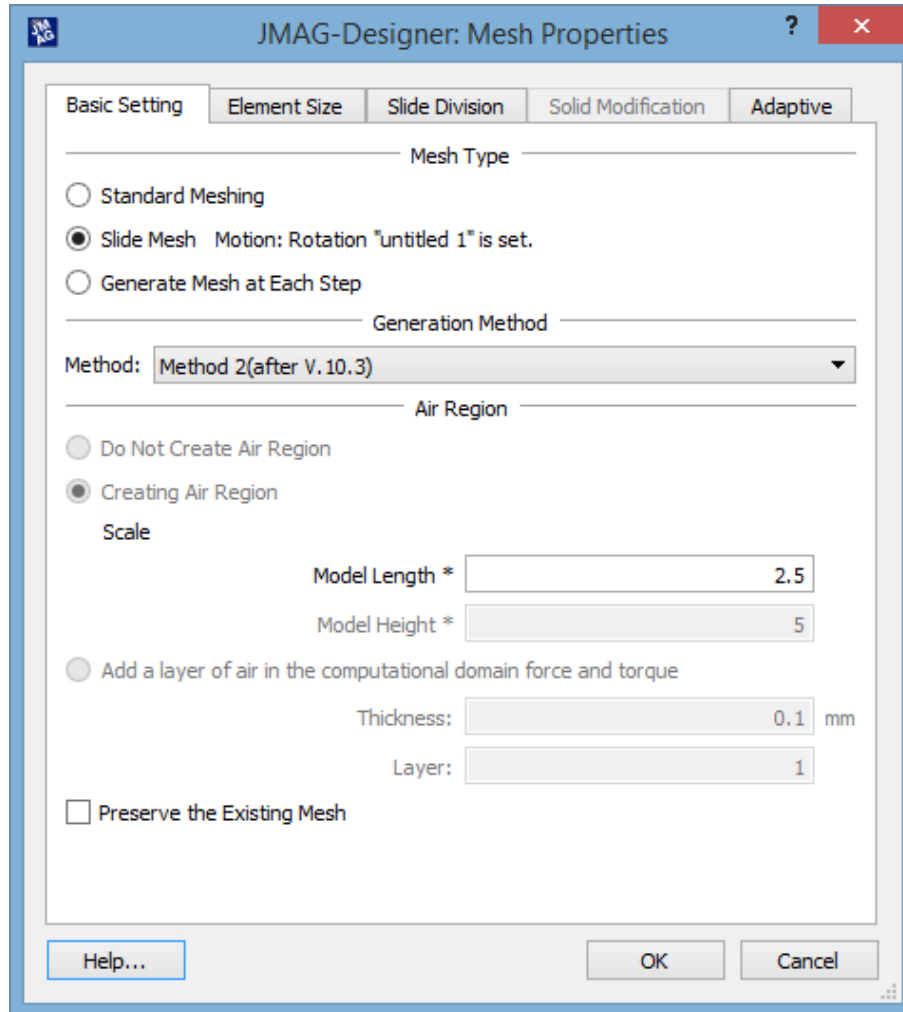


Figura 45: Menú de configuración de malla en JMAG.

Aquí se seleccionará “*Slide Mesh*” que genera una malla para un modelo completo que incluye el espacio entre el rotor y el estator junto con el movimiento del rotor. El método se puede utilizar para modelos de análisis con movimiento de rotación que se asemeja a un motor que tiene una sección de separación de forma cilíndrica. La precisión de un análisis se puede mejorar ajustando el tamaño del elemento del espacio [34], para el ejemplo se elegirá un tamaño de 2.5 y el tamaño de elemento se determinará automáticamente por JMAG. Una vez ejecutada la creación de malla, se observa en la Figura 46.

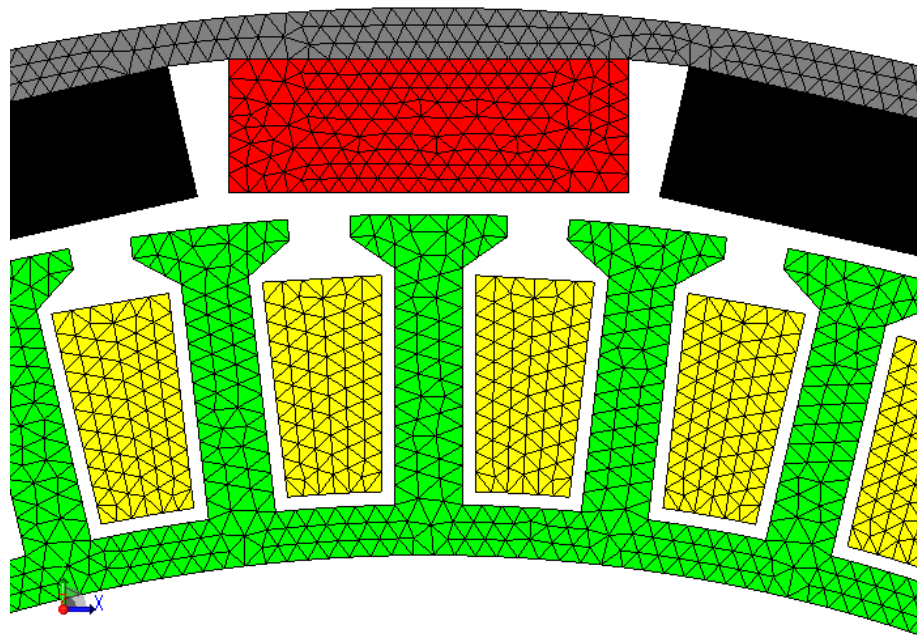


Figura 46: Malla creada a partir de una geometría base.

### 5.5 Ejecutar el análisis

En el paso final del análisis en *JMAG*, una vez ingresadas todas las características en el modelo se procede a correr el análisis. Se va a la pestaña “*Project Manager*”, y se dará clic derecho en el estudio transitorio, y a continuación en “*Properties*” como se muestra en la Figura 47.

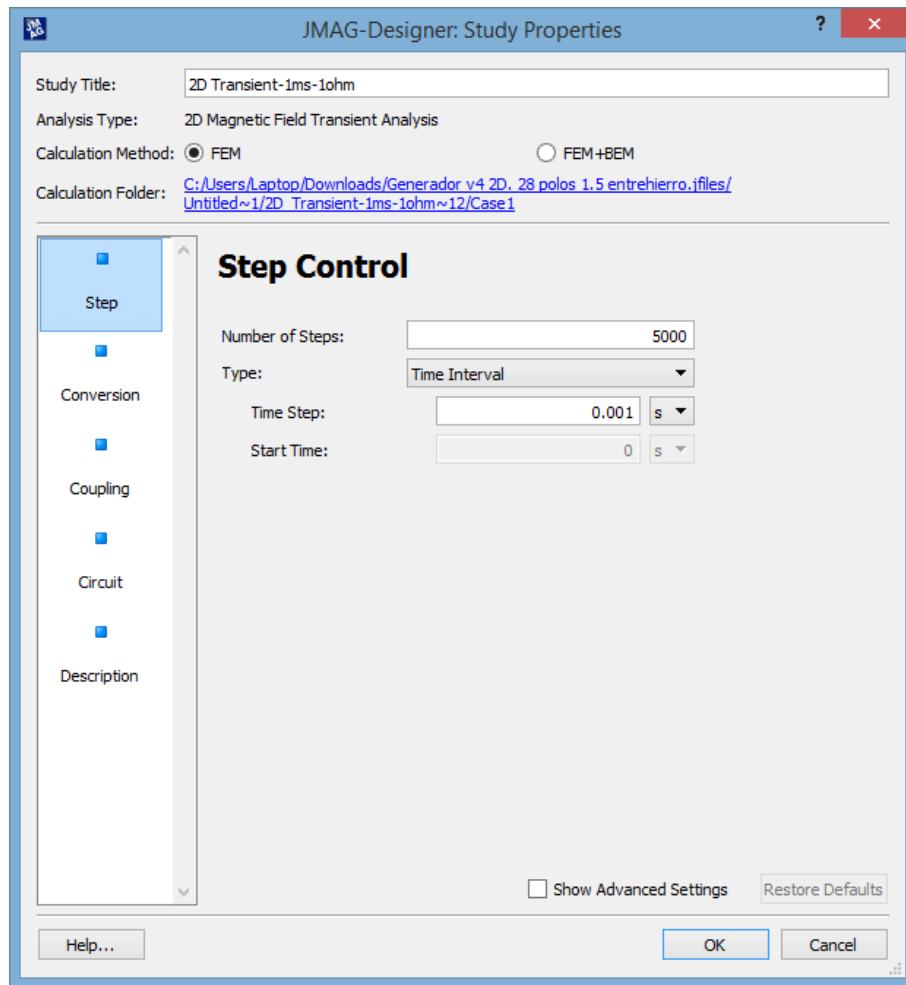


Figura 47: Menú de selección de pasos y tiempo de simulación.

En la Figura 48, se observa el menú de las propiedades del estudio. Aquí se pueden seleccionar el número de pasos y el tiempo de simulación para cada paso, debe ajustarse de acuerdo a la precisión que se busca en los resultados.

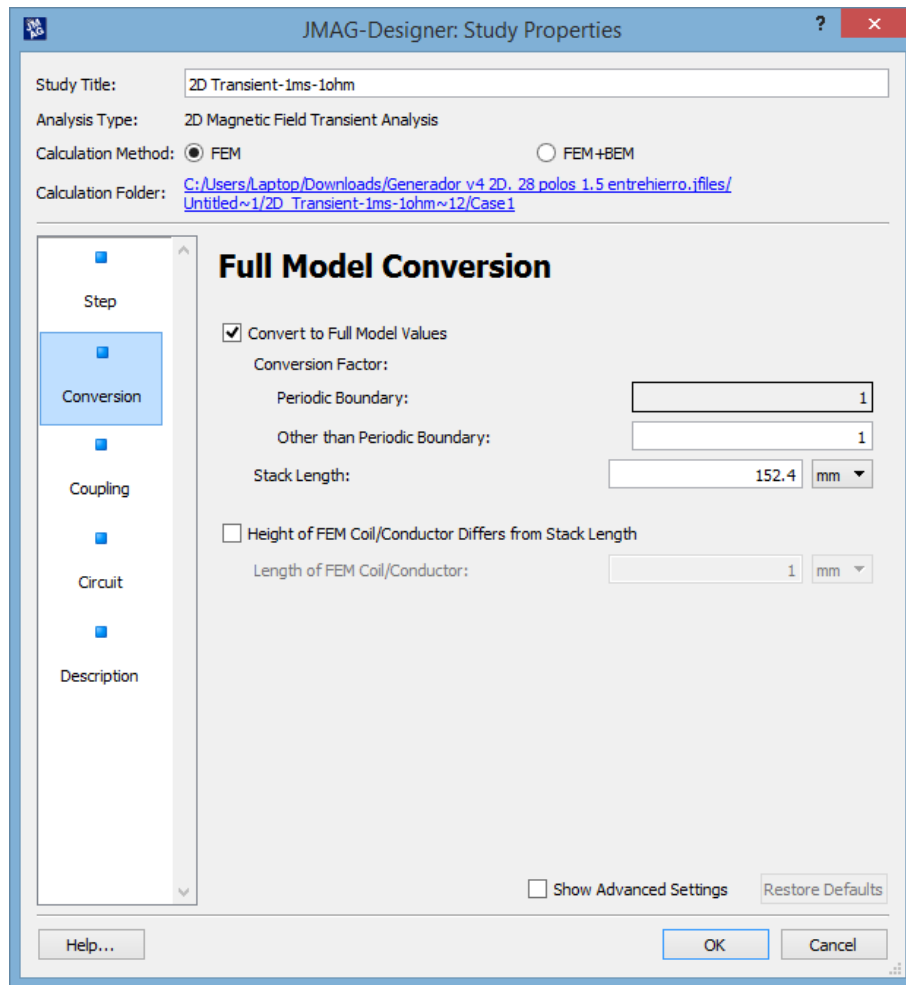


Figura 48: Menú de configuración de la longitud axial del modelo.

Por último, en la pestaña “*Conversion*” se elegirá la longitud del modelo, calculada en el capítulo 3.

Al final se dará clic derecho en el estudio, y se seleccionará la opción “*Run active case*”, con lo que el análisis comenzará a ejecutarse.

### 5.6 Resultados

Una vez terminado el estudio, los resultados estarán disponibles en el menú “*Project Manager*”, en la opción “*Results*”- “*Graphs*” que se muestran en la Figura 49. Aquí se podrá dar clic en cualquier variable de interés para mostrar su grafica.



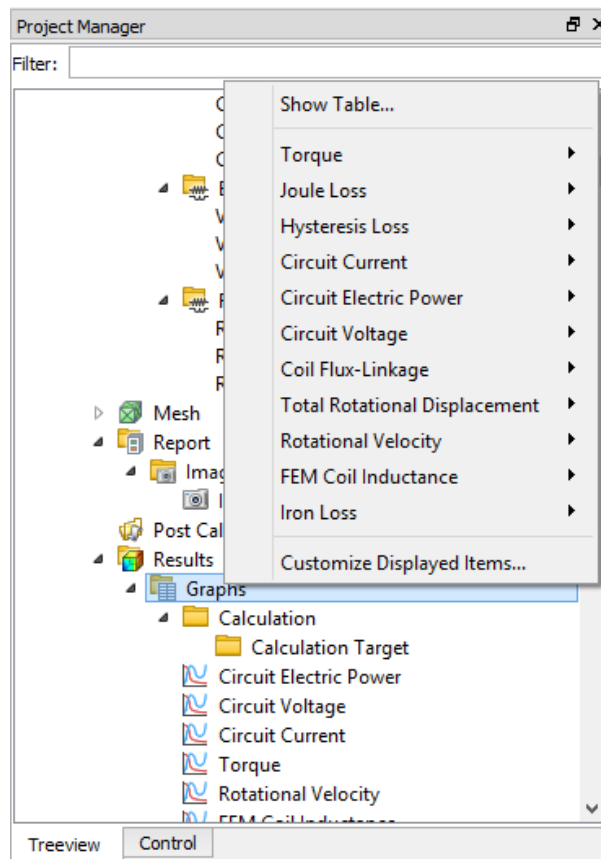


Figura 49: Menú de gráficos posibles a mostrar.

Una vista de los resultados se muestra en la Figura 50:

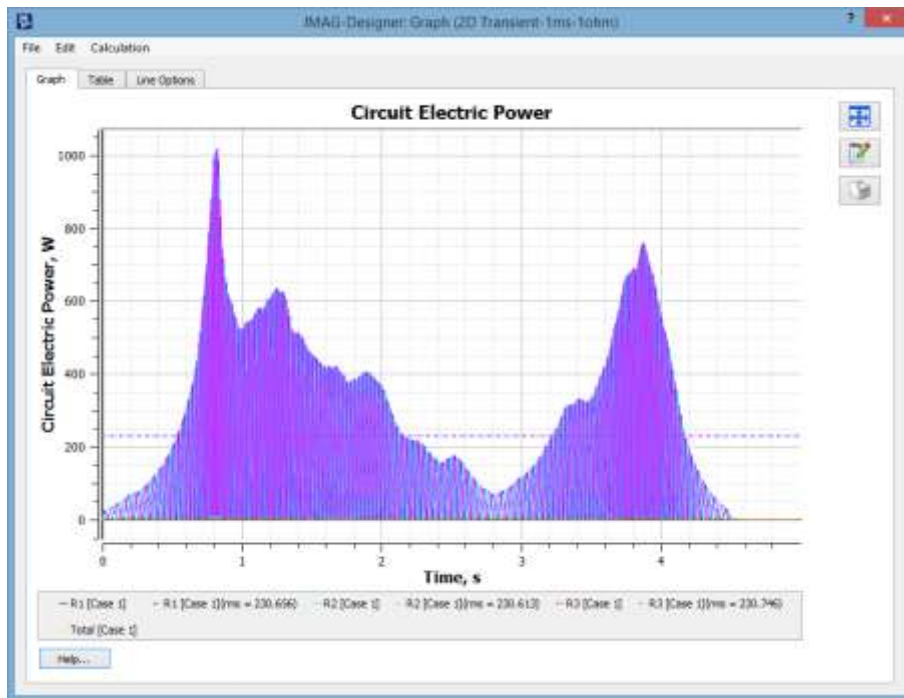


Figura 50: Muestra de potencia para el estudio de ejemplo.

## Capítulo 6. Resultados

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos con la última simulación realizada, que se eligió debido a que la distorsión armónica total cumple con los requerimientos iniciales. Se muestran las simulaciones de las variables obtenidas en *JMAG* y se describe el comportamiento final del *PMSG*. La versión final del *PMSG* se obtuvo con base en varias simulaciones modificando ciertas características físicas, estas modificaciones se explican en el capítulo 3. El proceso de simulación por elemento finito que se utiliza para comprobar los resultados se detalla en el capítulo 4.

Se presentan las gráficas de cada variable, para la velocidad máxima (136 rev/min) y también para un perfil de viento variable que simula un día de operación típico del *PMSG*. Los parámetros iniciales van a marcar las pautas de diseño a seguir, los parámetros se muestran en la Tabla 9 en el apartado “Parámetros del sistema”. Primero se mostrará el desempeño de la maquina ante un valor constante de velocidad de entrada y después se mostrará el desempeño en un perfil de viento variable lo que implica velocidad variable.

Tabla 9: Parámetros de entrada del *PMSG*.

<b>Parámetros del sistema</b>	
Potencia Nominal, Potencia del viento nominal	1.5 KW, 10.3m/s
Voltaje de la red, Tensión de enlace de CC	120 Vrms, 400 V
Tiempo de muestra de simulación	50 $\mu$ s
<b>Parámetros del PMSG</b>	
Voltaje línea a línea nominal en el estator	31.31 Vac
Velocidad angular mecánica nominal	136 RPM
Torque nominal, eficiencia	165 Nm, 80 %
Resistencia del estator, Inductancia del estator	0.5 $\Omega$ , 3.2 mH
Vueltas por polo, Pares de polos, Skew	15, 14, 10 grados

El voltaje obtenido, a una frecuencia nominal de 32 Hertz, es de 31.31 Vac, línea a línea. Teniendo en cuenta la potencia de entrada, se obtiene un torque nominal de 165 N.m. La resistencia es de 0.5 Ohms y la inductancia del estator de 3.2 mH. Estas cuantificaciones se dan cuando existen 15 vueltas de alambre de cobre calibre 13 y se resumen en la Tabla 9 en el apartado de “Parámetros del *PMSG*”. En los siguientes párrafos se describen la geometría, malla, y el rendimiento de la máquina.

### 6.1 Geometría

La geometría final cuenta con 28 polos y 54 ranuras y se puede observar en la Figura 51, un resumen de las medidas de la geometría se muestra en la Tabla 10 con la nomenclatura de la Figura 25. Las medidas del estator fueron determinadas por el fabricante y las medidas del rotor

son ajustadas al número de imanes, su tamaño, el desfase y el entrehierro. Se obtiene un total de 28 imanes de neodimio espaciados equidistantemente, que son colocados en el interior de rotor. En el rotor se colocan bases para que los imanes puedan ser colocados correctamente. Los imanes tienen una longitud de 19.05 mm y una altura de 6.35 mm, debido a la forma de colocación de los imanes el entrehierro varía de 1.5 a 1 mm. Se considera un doble bobinado por ranura, ya que se vio en las simulaciones que esta configuración mostraba menor cantidad de armónicos en la señal a comparación con un devanado único por ranura.

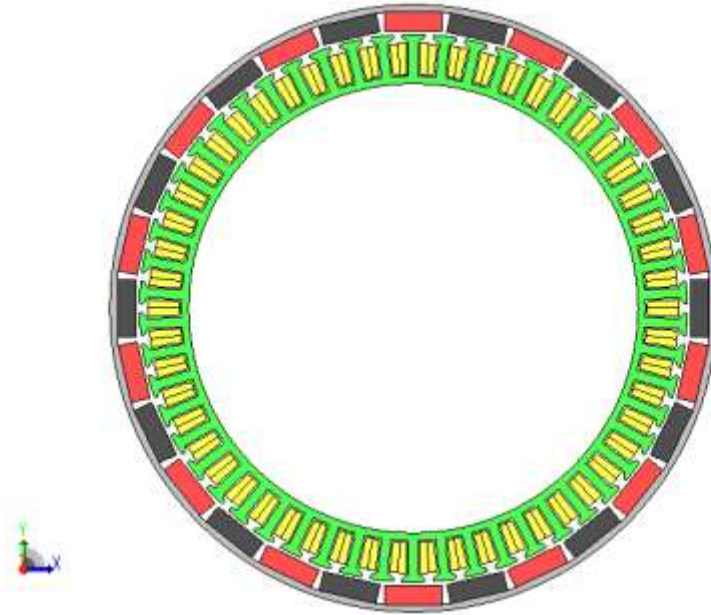


Figura 51: Geometría final del PMSG.

Tabla 10: Dimensiones en la geometría del PMSG.

Dimensiones en milímetros							
d1	d2	d3	Wt	Ws	lm	Wtb	g
1	1.7	11.27	7.5	3	19.05	3.2	1.5
Rso	Rsi	Rsb	Rri	Rro	Wbs	Wsb	-
90.2	74	76.4	91.21	100	2.5	5.69	-

## 6.2 Malla

Como se explicó en el capítulo 4, se utiliza una discretización que formara una malla en el modelo 2D del PMSG. Esta discretización es un proceso de JMAG donde se divide la geometría en elementos triangulares que facilitarían la resolución del problema. La discretización del modelo se muestra en la Figura 52. La cual cuenta con 70882 elementos y 36230 nodos. La calidad de la malla se describe en la Tabla 11, donde más del 80% de elementos están entre 0.7-1.0, lo que se considera

una muy buena calidad [36]. El restante 20% está entre 0.2% y 0.7% que refieren una calidad buena. Por consiguiente, el mallado provee resultados en su mayoría de una buena precisión, ya que las simulaciones muestran que se pueden obtener señales con un bajo porcentaje de *THD* con esta configuración de malla.

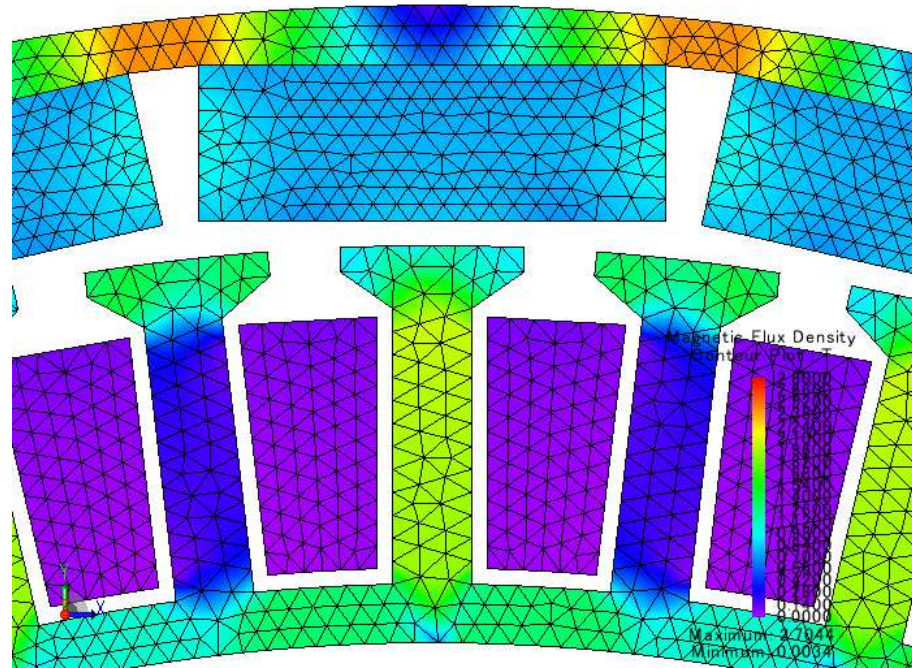


Figura 52: Malla JMAG.

Tabla 11: Calidad de la malla.

Calidad	0.0-0.1	0.1-0.2	0.2-0.3	0.3-0.4	0.4-0.5
Conteo de elementos	0	0	44	736	1942
Calidad	0.5-0.6	0.6-0.7	0.7-0.8	0.8-0.9	0.9-1.0
Conteo de elementos	3126	7741	17372	22593	17328

### 6.3 Rendimiento de la máquina

La densidad de flujo magnético se expone en la Figura 53. Se observa que, en el circuito magnético conformado por imanes, estator y rotor, el flujo toma el camino del circuito magnético, dando densidades de flujo desde 1 Tesla hasta 2.8 Teslas para diferentes momentos de giro en el *PMSG*. En el estator se alcanza un valor pico de 2.1 Teslas. Una densidad de 2.8 Teslas se encuentra en el núcleo del rotor. A pesar de la alta densidad de flujo existente se esperan bajas pérdidas en el hierro debido a la baja frecuencia operativa.

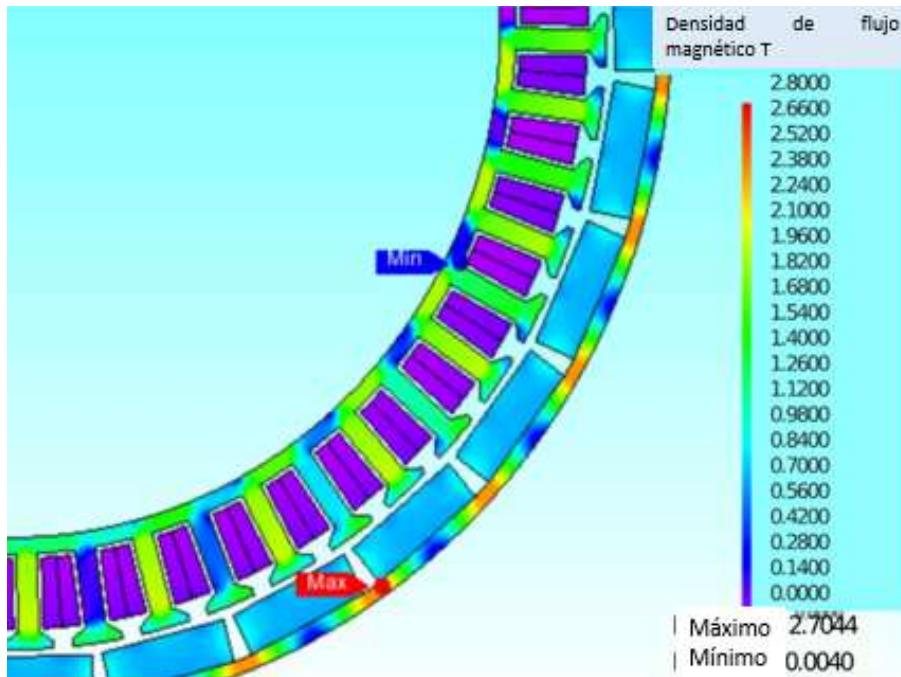


Figura 53: Flujo en el PMSG.

El comportamiento del PMSG en condiciones sin carga se muestra mediante las características mecánicas y eléctricas en la Figura 54. Se obtiene un torque sinusoidal en vacío, como se observa en la Figura 54(a), las formas de onda del voltaje instantáneo se exhibe en la Figura 54(b), el voltaje RMS conserva su linealidad a pesar del aumento de la velocidad angular, esta recta representa el comportamiento en vacío del voltaje ante un cambio de velocidad como se muestra en la Figura 54(c) [37]. La señal de voltaje exhibe un *THD* de 3.9%, cumpliendo con la norma ANSI/NEMA MG 1-2016 y se ilustra en la Figura 54(d) [27].

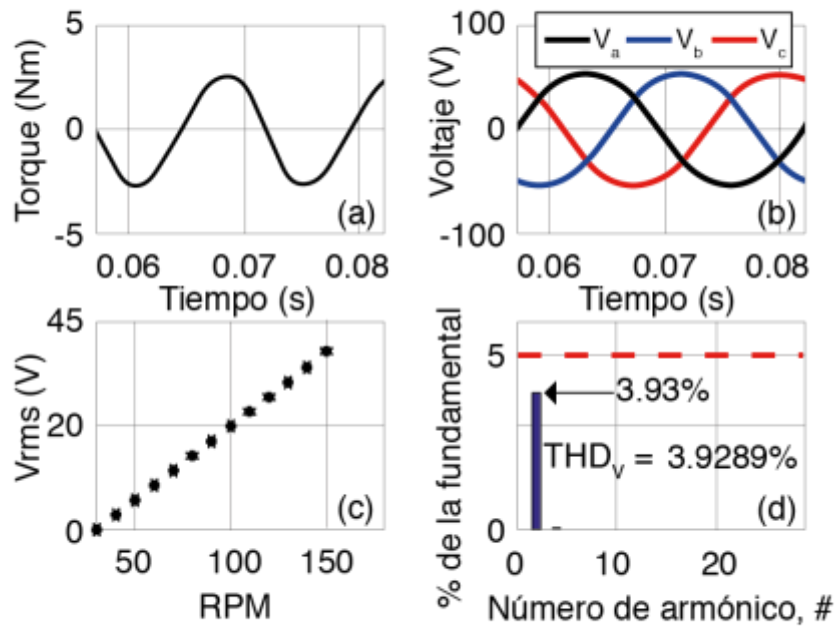


Figura 54: Resultados en vacío.

En las siguientes dos secciones se presentarán los resultados a velocidades máxima y variable.

#### 6.4 Simulaciones a velocidad variable

El comportamiento para un perfil de velocidad angular en operación de lazo abierto y una carga resistiva de 1 ohm se representa en las gráficas de la Figura 55.

Dadas las variaciones en la velocidad que se muestran en la Figura 55(a), la frecuencia cambia de acuerdo con la ecuación (55). El torque es directamente proporcional a la velocidad del generador eléctrico y se puede ver en la Figura 55(b). En el rendimiento de potencia del generador, se observa que la potencia máxima es de 1.3 KW a una velocidad de 135 rpm y se muestra en la Figura 55(c). Tanto el voltaje como la corriente tienen el mismo comportamiento, ya que la resistencia de carga es de 1 ohm y se muestran en la Figura 55(d) y Figura 55 (e), respectivamente.

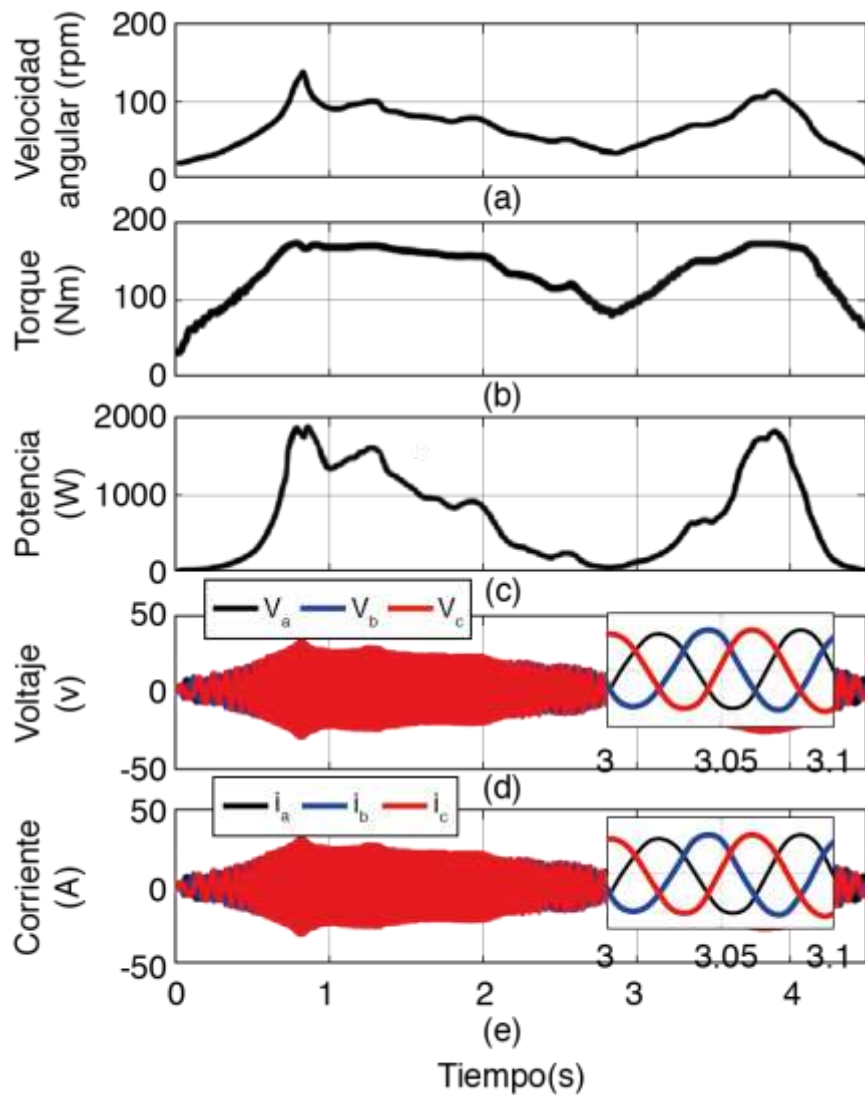


Figura 55: Resultados ante un perfil de viento variable.

### 6.5 Simulaciones a velocidad máxima

El estudio de las condiciones a velocidad máxima establece los valores de voltaje, corriente, torque y potencia mayores que puede proporcionar el *PMSG*. La corriente tiene el mismo comportamiento, y por lo tanto la misma amplitud, la onda de corriente se puede ver en la Figura 56. En la Figura 57, se observa el perfil de voltaje, la onda llega a un valor pico de 31.31 V. Debido al valor constante de velocidad, la frecuencia no cambia. La frecuencia se puede calcular con la ecuación (55), o midiendo el tiempo que tarda la onda de voltaje en dar un ciclo completo. La frecuencia por lo tanto es de 42 Hz.



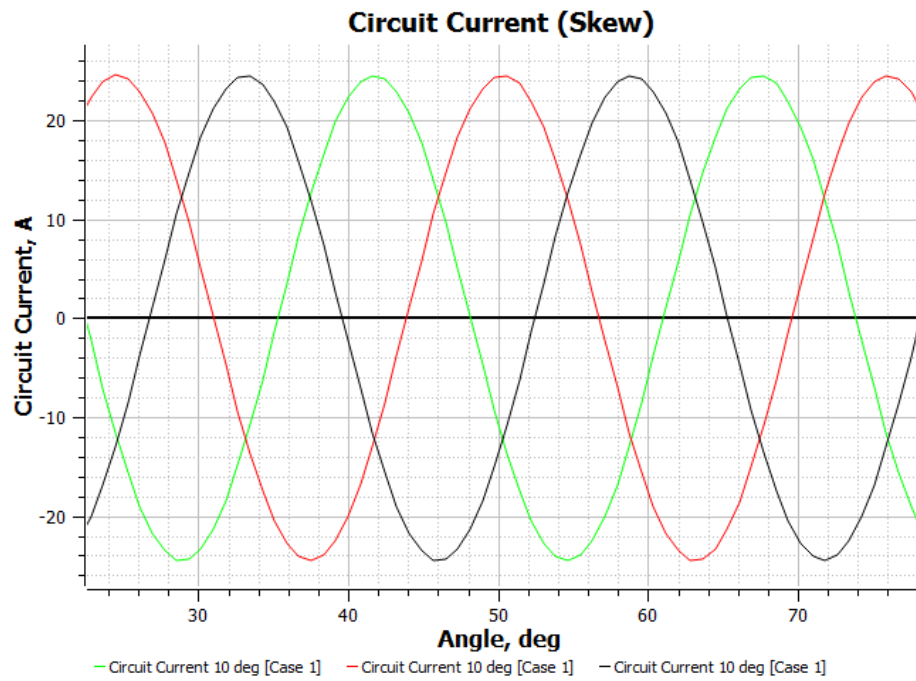


Figura 56: Corriente eléctrica a velocidad máxima.

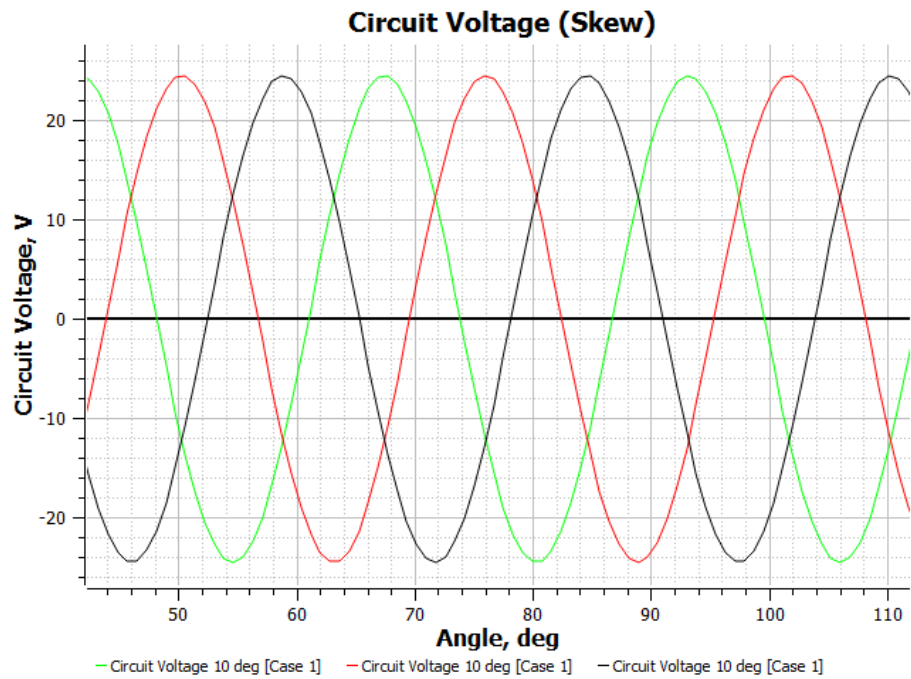


Figura 57: Voltaje a velocidad máxima.

El torque se encuentra entre 160 y 165.5 N.m teniendo un comportamiento sinusoidal y se muestra en la Figura 58. Este torque es la representación de la fuerza que produce el giro del *PMSG*. El

torque va variando en valores negativos, lo que indica que se trata de un generador, si los valores de torque son positivos se tratará de un motor.

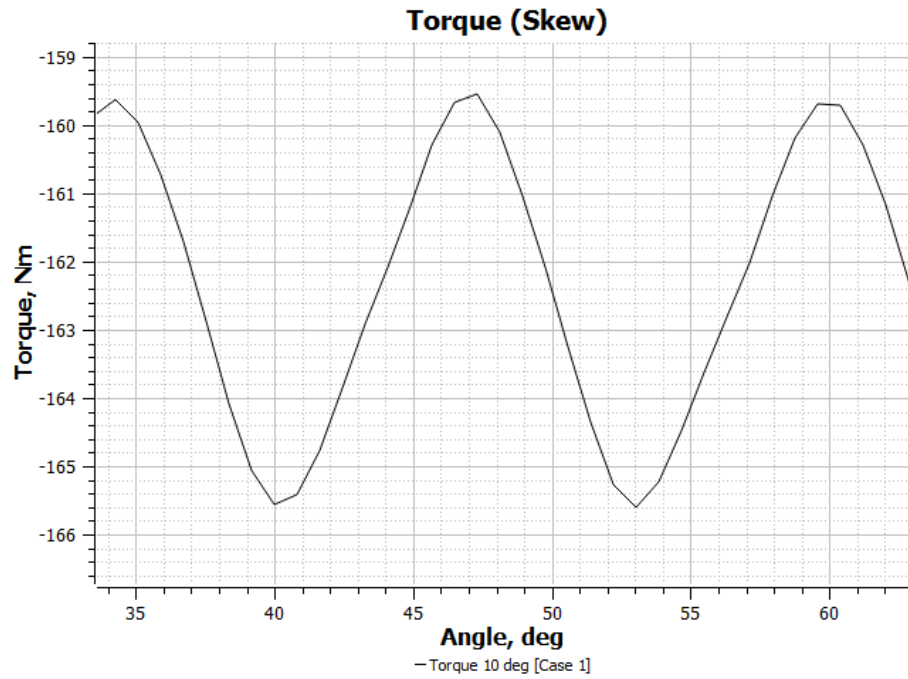


Figura 58: Torque a velocidad máxima.

Por último, la potencia instantánea de salida del PMSG se encuentra en 1kW cumpliendo con el requerimiento inicial, y se observa en la Figura 59.

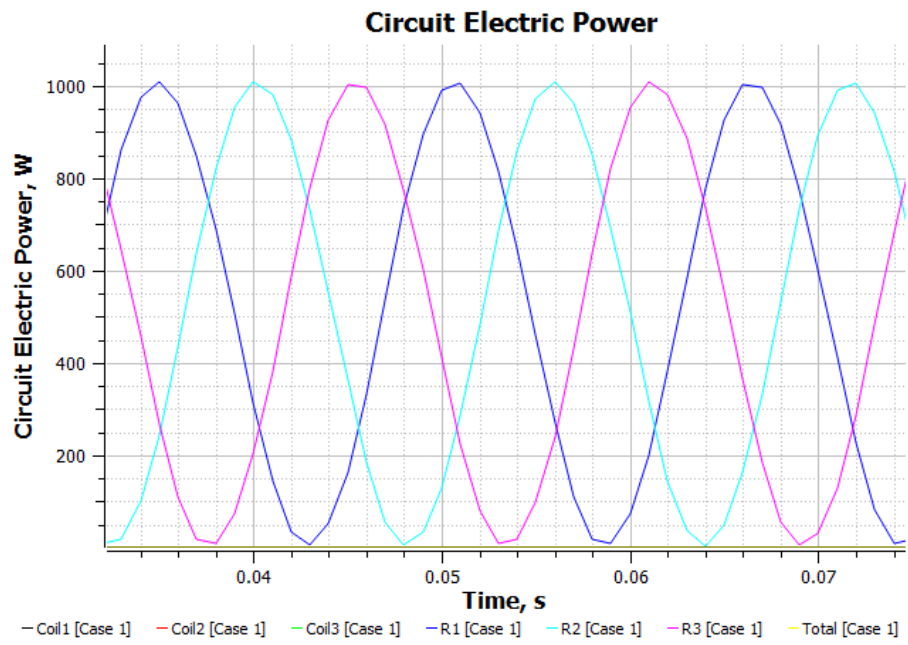


Figura 59: Potencia a velocidad máxima.

## Capítulo 7. Conclusiones y trabajos futuros

### 7.1 Conclusiones

El diseño del generador resulta de la aplicación de un proceso holístico, en el que se definen características de entrada y de salida, pero que durante el proceso se pueden tomar distintos caminos para llegar a cumplir los requerimientos. Tomando la medida de la THD como referencia se logró tener un punto de referencia y comparación, gracias al cual el proceso pudo realizarse de manera sistemática, llevando el diseño a un método científico aplicable.

El flujo magnético y la salida voltaje y corriente están determinados por el número y tamaño de los polos, entrehierro y yugo, así como de los materiales utilizados para su implementación. Para que exista una correcta conversión de energía se necesita que los materiales sean ferromagnéticos permitiendo que el campo este lo más encerrado posible en este circuito y disminuyendo las pérdidas en la máquina.

Se comprobó que el método de análisis por elemento finito permite obtener las soluciones a las variaciones en el diseño en un tiempo corto sin requerir de grandes cálculos matemáticos y obteniendo una alta precisión, por lo que se concluye que es un método ideal para el diseño y simulación de máquinas eléctricas.

La simulación a velocidad variable muestra que el generador responde a distintas velocidades de viento, por lo que su implementación es adecuada en distintas localidades donde el viento no sea constante en un periodo de tiempo.

La potencia producida a velocidad nominal se encuentra en el rango de 1 kW. Esta potencia es ideal para utilizar el *PMSG* en aplicaciones de baja potencia, sobre todo para ayudar a alimentar consumos eléctricos alejados de la infraestructura eléctrica, o bajar el consumo eléctrico en lugares donde el viento tenga velocidades bajas y medias. Las medidas finales del generador hacen de este un generador de fácil transporte y bajo mantenimiento, haciéndolo efectivo para zonas rurales alejadas de caminos y ciudades.

### 7.2 Trabajos futuros

La metodología de diseño puede ser aplicable para obtener varios modelos que satisfacen necesidades específicas de conversión de energía eólica en distintas partes del país. El siguiente paso es poder pasar de un proceso holístico a un proceso metódico a través del cual se puedan obtener soluciones concretas en un menor tiempo posible y disminuyendo también la cantidad de simulaciones realizadas. Con esta metodología se puede trabajar en el área de los aerogeneradores de baja potencia que hoy en día son muy poco investigados. Con el diseño determinístico, el área de investigación puede dar un gran salto para llegar a la implementación de este tipo de aerogeneradores y poder dotar de energía eléctrica a muchos lugares del país.

La interconexión a la red con el respectivo estudio de calidad de la energía es un punto de investigación que complementa el diseño, permitiendo la utilización no solo en localidades sin acceso a energía eléctrica, si no en lugares donde existe infraestructura eléctrica y se quiera aprovechar la velocidad del viento para bajar significativamente la huella de carbono en ese punto.

El diseño mecánico e implementación física del aerogenerador es el complemento de esta tesis, por lo que seguir esta línea de investigación ayudará a llevar a cabo la realización de este proyecto físicamente.

## Referencias

- [1] M. S. Özdemir, «Design Improvement of a Spoke-Type PMSG with Ferrite Magnets to Reduce Space Harmonics,» *2021 5th International Symposium on Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies (ISMSIT)*, 2021.
- [2] R. I. M. dos Santos, «Design and Analysis of PMSG and PWM Boost Converter for Isolated Ocean Wave Energy Conversion System,» *2021 14th IEEE International Conference on Industry Applications (INDUSCON)*, pp. 924-931, 2021.
- [3] W. D. Gómez, Diseño de generadores síncrono multipolo de imanes permanentes para su uso en aerogeneradores de baja potencia, Santo Domingo Tehuantepec, Oaxaca.: Universidad del Istmo, 2019.
- [4] Y. Y. a. E. Mese, « Design and analysis of generator and converters for outer rotor direct drive gearless small-scale wind turbines,» *2014 International Conference on Renewable Energy Research and Application (ICRERA)*, pp. 689-694, 2014.
- [5] J. d. I. C. Soto, «Machine, Voltage THD Improvement for an Outer Rotor Permanent Magnet Synchronous,» *International Journal of Emerging Electric Power Systems*, 2013.
- [6] P. Kumar, «Effect of Increasing Rated Torque of PMSG with Variable Wind Speed on Per Phase Output Voltage for Off-Grid Wind Energy Conversion System,» *Second International Conference on Advances in Computing and Communication Engineering*, 2015.
- [7] F. Rong, «A Comparative Analysis of Two Types of Rotor Structures for Low-speed Permanent Magnet Synchronous Generator,» *School of Automation, Northwestern Polytechnical University*.
- [8] M. Ebrahimi, «Optimal design of permanent magnet synchronous generator for wind energy conversion considering annual energy input and magnet volume,» *2009 International Conference on Sustainable Power Generation* , 2009.
- [9] J. González, «Analysis of a PMSG and its Power Electronic Converter in Isolated Operation».
- [10] Energyavm, «Energías renovables y no renovables,» 18 09 2018. [En línea]. Available: <https://www.energyavm.es/energias-renovables-y-no-renovables/>. [Último acceso: 03 01 2022].
- [11] R. H. Hernández, Metodología de selección de materiales para los, Villa Clara. Cuba, 2018.

- [12] A. P. Talayero Navales y T. Telmo Martínez, *Energías Renovables*, Zaragoza, España: Prensas Universitarias de Zaragoza, 2008.
- [13] M. Chinchilla Sánchez, *Control de un sistema de generación eólica de velocidad variable con generador síncrono multipolar de imanes permanentes acoplado a red*, Madrid: Universidad Carlos III de Madrid, 2001.
- [14] E. C. Calderón, *Modelos para el pronóstico de la velocidad del viento y la potencia generada por una central eólica en Oaxaca.*, México, 2006.
- [15] «Estimación de la Velocidad del Viento,» [En línea]. Available: <https://hrudnick.sitios.ing.uc.cl/alumno12/viento/10.html>. [Último acceso: 2022 Enero 2022].
- [16] J. A. A. Berhouague, *Energía Eólica en México*, México, 2009.
- [17] M. P. Baldomero, «Análisis de diferentes álabes de un aerogenerador de eje vertical para oxigenar estanques de peces,» *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, vol. 3, n° 4, 2012.
- [18] D. Hanselman, *Brushless Permanent Magnet Motor Design*, United States of America: Magna Physics, 2006.
- [19] A. J. Q. Baltodano, *Caracterización del generador de imanes permanentes*, Lima Perú: Universidad Nacional de Ingeniería, 2015.
- [20] S. J. Chapman, *Máquinas eléctricas*, España: McGraw-Hill Interamericana de España S.L., 2012.
- [21] J. C. Martin, *Cálculo industrial de máquinas eléctricas Tomo I*, Barcelona España: Publicaciones Reunidas S.A, 1976.
- [22] M. Á. R. Pozueta, «Materiales y Circuitos Magnéticos».
- [23] L. D. M. Drak, «Corrosion of Nd-Fe-B permanent,» *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, vol. 20, p. 4, 2007.
- [24] V. Wilow, *Electromagnetical model of an induction motor in COMSOL Multiphysics*, Royal Institute of Technology, 2014.
- [25] E. Herper, *Máquinas Eléctricas*, Limusa, 2005.
- [26] IEEE, «IEEE 519-2014 - IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems,» 2014. [En línea]. Available: <https://standards.ieee.org/standard/519-2014.html>. [Último acceso: 2022 01 2022].

- [27] N. E. M. Association, «NEMA Standards Publication ANSI/NEMA MG 1-2016,» December 28, 2021.
- [28] A. Quesada, «Difusión El reto de los imanes permanentes,» *Instituto de ceramica y vidrio*.
- [29] V. Abad y J. Sagredo, «Evolución y proceso de fabricación de imanes “NEO” aplicados a motores de vehículos eléctricos,» *Rev. Metal*.
- [30] T. Ros-Yañez y A. C., «Características magnéticas y microestructurales de aceros eléctricos con alto silicio producidos por inmersión y recocido de difusión,» *Revista de Metalurgia*, vol. Extr, p. 5, 2005.
- [31] R. R. J. Daniel, *Diseño y construcción de un generador de flujo radial de imanes permanentes de neodimio con estator de polos salientes*, Ecuador: Universidad Técnica de Ambato, 2019.
- [32] <https://www.magfine.it/>, «Especificación de las propiedades magnéticas de los imanes de neodimio,» [En línea]. Available: [https://www.magfine.it/es/user\\_data/neodymium\\_property.php](https://www.magfine.it/es/user_data/neodymium_property.php). [Último acceso: 2022 02 02].
- [33] Miller, «What is the finite-element method?,» 1 Julio 2019. [En línea]. Available: [https://www.jmag-international.com/engineers\\_diary/011/](https://www.jmag-international.com/engineers_diary/011/). [Último acceso: 14 01 2022].
- [34] JMAG, «JMAG Help,» [En línea]. Available: <https://www.jmag-international.com/>. [Último acceso: 15 01 2022].
- [35] Emotor, «Electric motor winding calculator,» [En línea]. Available: <https://www.emotor.com/windings/>. [Último acceso: 15 01 2022].
- [36] N. Fatchurrohman y S. Chia , «Performance of hybrid nano-micro reinforced mg metal matrix composites brake calliper: simulation approach,» *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2017.
- [37] I. M. Villegas, *Diseño y Análisis preliminar para un Generador Eléctrico de Alta Velocidad acoplado a una Microturbina. (Microturbogenerador)*, Ciudad de México: Universidad Nacional Autónoma de México, 2013.
- [38] A. Estrada Cruz, *Evaluación de un esquema de acción remedial basado en un disparo automático de generación para mitigar problemas de estabilidad angular en el sistema eléctrico nacional*, Puebla: Benemérita Universidad Autónoma de Puebla , 2018.