



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL  
ESTADO DE MORELOS



Facultad de Ciencias  
Químicas e Ingeniería

**UNIVERSIDAD AUTONOMA DEL ESTADO DE MORELOS**

**FACULTAD DE CIENCIAS QUIMICAS E INGENIERIA**

**DISEÑO Y SIMULACIÓN DEL ROTOR DE IMANES PERMANENTES  
PARA EL GENERADOR SÍNCRONO DE UNA TURBINA EÓLICA DE  
BAJA POTENCIA**

PRESENTA:

**ING. ALAN PAUL PEDRAZA SANDOVAL**

**TESIS PROFESIONAL**

Que para obtener el grado de:

**MAESTRIA EN INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA**

**ASESOR: DR. ROY LOPEZ SESENES**

**ASESOR EXTERNO: DR. JAVIER DE LA CRUZ SOTO**

**Sinodales:**

**Cuernavaca, Morelos**

**2023**

## **AGRADECIMIENTOS**

---

Agradezco a mi padre Miguel Ángel Pedraza R. por siempre estar dispuesto a dar su empeño y fuerza ante las situaciones difíciles y enseñarme el significado de “cabeza de familia”, a mi madre C. Esmeralda Sandoval G. por demostrarme que detrás de cada gran hombre hay una mujer siendo un pilar en todo momento.

Agradezco a mi hermana Ximena E. Pedraza Sandoval por estar ahí siempre que lo necesite y a pesar de ser más chica que yo me ha enseñado bastantes lecciones que por mi cuenta serían difícil de aprender.

A mi prometida Itzel Salgado García por apoyarme y motivarme a superar mis límites todos los días y enseñarme lo lejos que podemos llegar trabajando en equipo.

También quiero agradecer a los profesores de la Universidad Autónoma del Estado de Morelos (UAEM) por compartirme sus conocimientos, en especial al Doctor Roy López Sesenes por brindarme bastante de su ayuda y apoyado en momentos de difícil comprensión, además de enseñarme que nunca se deja de aprender y que la humildad siempre cabe en cualquier lado. De igual manera agradezco al Doctor Gerardo Vera quien estuvo al pendiente del desarrollo de este proyecto y al Doctor Cisneros por sus comentarios siempre tan acertados dedicados a las correcciones de este proyecto y documento.

De igual manera agradezco a mis compañeros de proyecto por brindarme la oportunidad de obtener tanto conocimiento practicando y desarrollando parte del proyecto. De la mano, doy gracias al Doctor Mario Paternina que a pesar de no ser su responsabilidad siempre se tomó el tiempo para resolver mis dudas. Agradezco a Manuel Ramos por la increíble mancuerna que hicimos.

Y, por último, quiero agradecer al doctor Javier de la Cruz Soto por apreciar mi trabajo en el diseño 3D y brindarme la oportunidad de trabajar a su lado y conocer una parte más que ofrece el mundo de mi carrera, por mostrarme una parte del mundo de la investigación y hacer que mi interés hacia la misma, creciera, de tal

manera que llegara a decidir continuar mis estudios en el mismo ámbito y superarme cada vez más en conocimiento y habilidades.

## RESUMEN

---

El siguiente proyecto consiste en diseñar y modelar un aerogenerador de eje vertical de 1kW. Como aerogenerador de clase S, con una velocidad esperada 5 m/s. El rendimiento se evalúa en un patrón de viento previamente registrado alrededor de 3 m/s en una locación ubicada en Guadalajara, esperando también explorar otros lugares en donde el viento pueda hacerlo funcionar. Con el objetivo de llegar a los mejores rendimientos aerodinámico, se selecciona un aerogenerador de eje vertical de cuatro palas.

El generador eléctrico se considera como máquina síncrona trifásica de imanes permanentes con un rotor externo y la capacidad de convertir hasta 1 kW de potencia mecánica gracias al eje de acoplamiento directo con el rotor eólico, también se pretende alcanzar una velocidad nominal de 175 RPM con una eficiencia del 85% y un par nominal de 70 Nm. Ya que este prototipo está planeado para ser conectado a la red a 120 VAC por un solo convertidor de fuente de tensión diseñado hasta 1.5 kW, una potencia nominal se espera un voltaje de salida de línea a línea de 45 VCA en la salida generador eólico, siendo rectificado ganando un voltaje nominal de bus de CC de 60 VDC, que se puede aumentar hasta 240 VDC a través de un DC-DC convertidor de carga.

## **ABSTRACT**

---

The following project consists of designing and modeling a 1kW vertical axis wind turbine. As a class S wind turbine, it has an expected speed of 5 m/s. The performance is evaluated in a previously recorded wind pattern around 3 m/s in a location located in Guadalajara, hoping to also explore other places where the wind can make it work. In order to achieve the best aerodynamic performance, a four-blade vertical axis wind turbine is selected.

The electric generator is considered as a three-phase permanent magnet synchronous machine with an external rotor and the ability to convert up to 1 kW of mechanical power thanks to the direct coupling shaft with the wind rotor, it is also intended to achieve a nominal speed of 175 RPM with an efficiency of 85% and a nominal torque of 70 Nm. Since this prototype is planned to be connected to the network at 120 VAC by a single voltage source converter designed up to 1.5 kW, at nominal power a line-to-line output voltage of 45 VAC is expected at the wind generator output, being rectified gaining a nominal DC bus voltage of 60 VDC, which can be increased up to 240 VDC via a DC-DC charge converter.

# ÍNDICE GENERAL

## Contenido

---

AGRADECIMIENTOS.....	1
RESUMEN .....	3
ABSTRACT.....	4
ÍNDICE GENERAL.....	5
LISTA DE TABLAS.....	8
LISTA DE FIGURAS.....	9
LISTA DE ACRÓNIMOS Y SÍMBOLOS .....	11
1. Introducción .....	2
1.1 Antecedentes .....	3
1.1.1 Proyecto: Aerogenerador de eje vertical .....	3
1.2 Planteamiento del problema .....	5
1.3 Justificación .....	6
1.4 Objetivos .....	6
1.4.1 General .....	6
1.4.2 Específicos .....	6
1.5 Marco teórico.....	7
1.5.1 Herramientas de simulación de elementos finitos .....	7
1.5.2 Recursos para la generación de energía eléctrica.....	7
1.5.3 Energías no renovables .....	8
1.5.4 Energías renovables .....	8
1.5.5 Energía Eólica .....	8
1.5.6 Generadores eólicos.....	10
1.5.7 Tipos de generadores eléctricos implementados en la industria eólica .....	12
1.5.7.1 Generador eléctrico asíncrono.....	14
1.5.7.2 Principios básicos del generador eléctrico síncrono .....	14
1.6 Clasificación del generador síncrono de imanes permanentes PMSG.....	16
1.6.1 Generador síncrono de imanes permanentes de flujo axial (AF-PMSG).....	16
1.6.2 Generador síncrono de imanes permanentes de flujo transversal.....	17
1.6.3 Generador síncrono de imanes permanentes de flujo radial .....	18
2. Metodología experimental.....	22
2.1 Metodología de dimensionamiento.....	22

2.1.1	Diseño Mecánico .....	22
2.1.2	Dimensionamiento del imán .....	25
2.1.3	Modelado del entrehierro .....	26
2.1.4	Parámetros geométricos .....	27
2.2	Metodología del diseño .....	28
2.3	Requerimientos de aplicación .....	29
2.4	Requerimientos de diseño de la maquina eléctrica .....	30
2.5	Selección de estator comercial .....	30
2.6	Obtención de medidas requeridas para diseño (CAD) de estator y rotor .....	30
2.7	Análisis y modelado (CAD) .....	31
2.7.1	SolidWorks.....	32
2.7.2	Modelado 3D de piezas individuales.....	32
2.7.3	Creación de ensamble del generador .....	32
2.8	Simulación de FEM .....	33
2.8.1	JMAG-Designer .....	33
2.8.2	Crear la geometría.....	33
2.8.3	Especificar materiales.....	34
2.8.4	Especificar condiciones .....	34
2.8.5	Generar mallado.....	34
2.8.6	Correr el análisis.....	34
2.8.7	Evaluar resultados .....	34
2.8.8	Comparación de datos .....	35
3.	Material y métodos .....	36
3.1	Requerimientos de aplicación .....	36
3.2	Requerimientos de diseño de la maquina eléctrica .....	38
3.2.1	Parámetros eléctricos y rendimiento .....	39
3.3	Selección de estator comercial .....	39
3.4	Obtención de medidas requeridas para el diseño de estator y rotor .....	40
3.4.1	Numero de polos e imanes .....	40
3.4.2	Ranuras.....	41
3.4.3	Entrehierro y yugo.....	42
3.4.4	Dimensiones del imán .....	43
3.5	Modelado CAD .....	45

3.5.1	Modelado 3D de piezas individuales.....	46
3.5.1.1	Geometría .....	46
•	Estator y bobinas.....	47
•	Ensamble del generador .....	49
3.6	Simulación de FEM .....	50
3.6.1	Crear la geometría.....	51
3.6.2	Especificar materiales.....	53
3.6.3	Especificar condiciones .....	56
3.6.4	Generar mallado.....	59
3.6.5	Correr análisis.....	61
3.6.6	Evaluar resultados .....	62
3.6.7	Comparación de datos y selección.....	63
4.	Resultados .....	66
4.1	Geometría .....	66
4.2	Malla.....	67
4.3	Rendimiento .....	68
4.4	Simulaciones de velocidad .....	69
4.4.1	Velocidad variable. ....	69
4.4.2	Velocidad máxima .....	70
5.	Conclusiones.....	73
6.	Anexos .....	74
6.1	Planos .....	74
7.	Bibliografía .....	76

## LISTA DE TABLAS

---

Tabla 3.1 Parámetros principales de diseño .....	39
Tabla 3.2 Variación de versiones.....	43
Tabla 3.3 Valores de fracción magnética .....	44
Tabla 3.4 Parámetros iniciales de dimensionamiento del imán .....	44
Tabla 3.5 Medidas de la geometría del PMAG.....	46
Tabla 3.6 Características básicas de JMAG.....	53

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 Aerogenerador de eje vertical .....	4
Figura 1.2 Capacidad eólica anual, instalada a nivel mundial 2001-2017 .....	10
Figura 1.3 Capacidad eólica acumulada a nivel mundial 201-2017 .....	10
Figura 1.4 Partes de un generador de eje vertical .....	11
Figura 1.5 Clasificación de los generadores eléctricos .....	12
Figura 1.6 Evolución del tamaño y potencia de los aerogeneradores comerciales (V. Yaramasu, 2015) .....	13
Figura 1.7 Aspectos constructivos de los generadores síncronos. a) polos salientes, excitación .....	16
Figura 1.8 AF-PMSG .....	17
Figura 1.9 TF-PMSG .....	18
Figura 1.10 RF-PMSG .....	19
Figura 1.11 RF-PMSG Rotor externo y RF-PMSG Rotor interno .....	20
Figura 1.12 Rotores de máquinas de imán permanente .....	21
Figura 3.1 Generadores eléctricos .....	36
Figura.3.2 Generador síncrono de imanes permanentes .....	37
Figura 3.3 Eliminación de material no ferromagnético.....	52
Figura 3.4 Geometría en JMAG .....	53
Figura 3.5 Agrupación de elementos .....	54
Figura 3.6 Propiedades para los grupos .....	54
Figura 3.7 Características para elementos de JMAG.....	55
Figura 3.8 Selección de estudio.....	55
Figura 3.9 Material JMAG.....	56
Figura 3.10 Agregar circuito al modelo .....	57
Figura 3.11 Conexión tipo estrella .....	58
Figura 3.12 Menú de configuración de parámetros eléctricos .....	58
Figura 3.13 Configuraciones en Emetor .....	59
Figura 3.14 Configuración de bobinas Emetor .....	59
Figura 3.15 Configuración de malla en JMAG .....	60
Figura 3.16 Malla en JMAG .....	61
Figura 3.17 Menú de selección de pasos y tiempo de simulación .....	61
Figura 3.18 Menú de la configuración de la longitud axial del modelo .....	62
Figura 3.19 Menú de graficas a mostrar .....	63
Figura 3.20 Muestra de potencia para el estudio .....	63
Figura 3.21 Torque (v8) .....	64
Figura 3.22 Densidad magnética (v8).....	64
Figura 3.23 Frecuencia de fase(v8) .....	65
Figura 3.24 THD(v8).....	65
Figura 4.1 Geometría final.....	67
Figura 4.2 Malla y flujo magnético JMAG.....	68
Figura 4.3 Flujo magnético en PMSG .....	68
Figura 4.4 RPM Y Numero de armónicos .....	69
Figura 4.5 Perfil de viento variable .....	70

Figura 4.6 Corriente eléctrica a velocidad máxima .....	71
Figura 4.7 Voltaje a velocidad máxima .....	71
Figura 4.8 Onda de torque a velocidad máxima .....	72
Figura 4.9 Potencia en velocidad máxima.....	72
Figura 6.1 Plano del rotor.....	74
Figura 6.2 Plano de imanes .....	74

---

## LISTA DE ACRÓNIMOS Y SÍMBOLOS

---

### Acrónimos

<b>AF-PMSG</b>	Axial Flux – Permament Magnet Synchronous Generator Generador síncrono de imanes permanentes de flujo axial
<b>DFIG</b>	Generador asíncrono doblemente alimentado

### Símbolos

- Letras mayúsculas

<i>A</i>	Área de la sección transversal del entrehierro
<i>B</i>	Densidad de flujo magnético
<i>BH<sub>ma</sub></i>	Producto de energía máxima
<i>x</i>	Densidad de flujo magnético
<i>Br</i>	Intensidad de campo magnético
<i>l</i>	Longitud del estator
<i>L</i>	Numero de polos
<i>N<sub>m</sub></i>	Numero de pares de polos
<i>N<sub>p</sub></i>	Numero de fases
<i>N<sub>ph</sub></i>	Numero de ranuras
<i>N<sub>s</sub></i>	Numero de ranuras por polo
<i>N<sub>sm</sub></i>	Numero de ranuras por fase
<i>N<sub>p</sub></i>	Numero de ranuras por polo y por fase
<i>N<sub>spp</sub></i>	Permanencia
<i>P</i>	Potencia mecánica de entrada
<i>P<sub>ent</sub></i>	Potencia mecánica de salida
<i>P<sub>sal</sub></i>	Torque mecánico
<i>T<sub>m</sub></i>	Volumen del imán

▪ Letras minúsculas

am	Angulo del imán
ds	Distancia de profundidad de ranura
d1	Profundidad de zapato d1
d2	Profundidad de zapato d2
d3	Profundidad de ranura del conductor d3
<i>f</i> e	Frecuencia eléctrica
fem	Fuerza electromotriz
fmm	Fuerza magnetomotriz
g	Entrehierro
ge	Entrehierro efectivo
i	Corriente
kc	Coeficiente de Carter
kcp	Factor de relleno
lm	Espesor del imán
v	Velocidad

▪ Letras griegas

$\alpha_m$	Fracción magnética
$\alpha_s$	Fracción de ranura
$\alpha_{sd}$	Fracción de profundidad de zapato
$\mu$	Permeabilidad magnética
$\mu_r$	Permeabilidad relativa
$\alpha_m$	Flujo magnético
$\eta$	Eficiencia
$T_c$	Paso de devanado
$T_m$	Ancho del imán
$T_p$	Paso del polo magnético
$T_s$	Paso de la ranura
$\omega_e$	Frecuencia eléctrica
$\omega_m$	Velocidad o frecuencia mecánica
$\omega_{bi}$	Yugo del estator y rotor
$\omega_s$	Abertura de la ranura
$\omega_{sb}$	Ancho de la parte inferior de la ranura
$\omega_t$	Ancho del diente del zapato
$\omega_{tb}$	Ancho del diente

## CAPITULO 1

### 1. Introducción

---

El generador eléctrico es considerado el elemento principal de un aerogenerador y además es considerado como un componente de referencia para el diseño de otros subsistemas. Los generadores asíncronos tipo jaula fueron ampliamente utilizados en el diseño de aerogeneradores durante las décadas 80's y 90's. La principal característica de estos generadores era la facilidad para lograr la interconexión del parque eólico con las redes eléctricas. Sin embargo, su principal desventaja era que no se podía hacer un control de la potencia activa y reactiva. (J. Rodríguez Amenedo, 2003)

Con el desarrollo de la electricidad de potencia, se introducen los generadores asíncronos doblemente alimentados (DFIG, por sus siglas en ingles) que permiten al suministro eléctrico y/o el operador del parque eólico controlar la potencia activa y reactiva dentro de un rango que puede alcanzar hasta un 30%. El diseño de aerogeneradores implementados con generadores asíncronos requiere, de forma obligada, una caja multiplicadora de engranes para acoplar con el rotor eólico, el uso de la caja multiplicadora impacta enormemente en los costos de capital y el mantenimiento de los parques eólicos. (Dubois, 2004)

Actualmente, una de las nuevas tendencias de diseño en aerogeneradores es el uso de generadores síncrono de imanes permanentes (*PMSG's*) para evitar el uso de la caja multiplicadora y, por consiguiente, lograr una reducción considerable en los costos de inversión y de mantenimiento de los parques eólicos. Adicionalmente, otras características favorables que presentan los *PMSG's* son el mínimo ruido, alta eficiencia y larga vida útil. (Z.C., 2006)

Por motivo y con la finalidad de la aplicación de las nuevas tecnológicas en aerogeneradores, este trabajo de investigación presenta una metodología general para el diseño de *PMSG's*, desarrollando cálculos estimados variables para modelar y dimensionar el generador para aplicaciones en aerogeneradores de baja potencia, así mismo es evaluado a través de un software de elementos finitos, con el objetivo

de validar el diseño y la obtención de las curvas características del RF-PMSG 1kW. (Z.C., 2006) (Madani N. , 2011)

## **1.1 Antecedentes**

La energía eólica es el aprovechamiento de la energía cinética contenida en el viento, la cual suele utilizarse para generar electricidad.

La energía del viento está relacionada con el movimiento de las masas de aire que se desplazan desde zonas de alta presión atmosférica hacia zonas adyacentes de menor presión, con velocidades proporcionales al gradiente de presión y así poder generar energía.

Para el aprovechamiento de la energía producida por el viento se utilizan especialmente los aerogeneradores. En este proyecto nos enfocaremos especialmente en los aerogeneradores de baja potencia. Se puede decir que los *PMSG's* se han convertido en la nueva tendencia tecnológica para el diseño turbinas eólicas de transmisión directa dado que ofrecen más ventajas técnicas sobre sus contrapartes; las máquinas de inducción y las máquinas síncronas de rotor devanado. Principalmente esto se debe a que los generadores síncronos de imanes permanentes ofrecen mejores relaciones de potencia/ masa, son más confiables por ofrecer una mayor eficiencia y requieren de menor mantenimiento.

Los *PMSG's* son clasificados de forma general en: máquinas de flujo axial, flujo radial y máquinas de flujo transversal. En el pasado se llevó a cabo un estudio comparativo entre diseños diferentes de aerogeneradores síncronos de imanes permanentes para el uso de grandes turbinas eólicas. En este trabajo se comparan diferentes versiones con características topológicas que comparan los resultados presentados con respecto a torque, densidad magnética, frecuencia de fase y THD.

### **1.1.1 Proyecto: Aerogenerador de eje vertical**

En el año 2013 el Dr. Javier de la Cruz Soto con apoyo y financiamiento del CINVESTAV creo la primera versión del proyecto "Aerogenerador de eje vertical" ubicado en Guadalajara, este proporciona un aproximado de 100 watts de potencia,

utilizando una inversión aproximada de 60 mil pesos mexicanos. Este se muestra en la Figura 1.1.



Figura 1.1 Aerogenerador de eje vertical

Los aerogeneradores de baja potencia han representado en México un nicho de oportunidad sin ser explotado. México cuenta con zonas que presentan buen recurso eólico, donde también existen usuarios del servicio eléctrico con elevadas tarifas eléctricas. Tal es el caso de Usuarios tipo DAC, pequeña demanda en baja tensión, riego agrícola en baja tensión y alumbrado público en baja tensión. (Virtual, 2014)

El costo de los componentes de pequeños aerogeneradores se distribuye de la siguiente manera:

- Sistema de orientación: 12 %
- Veleta: 4 %
- Rotor (alabes): 10 %
- Generador eléctrico: 22 %
- Inversor: 22 %
- Torre y cimientos: 30 %

(Soto, 2019)

Con la ayuda de herramientas digitales se puede modelar diseños en 3D y simular flujos magnéticos utilizando diferentes tipos de materiales ferromagnético sin necesidad de pruebas físicas en laboratorio.

Este tipo de acciones nos permitirá crear una segunda versión de un generador síncrono tomando en cuenta que este debe ser de mayor eficiencia y menor costo que el primero.

Las herramientas de simulación nos permitirán analizar diferentes tipos de materiales magnéticos para la selección de uso tomando en cuenta el tipo de reluctancia de cada uno de ellos.

## **1.2 Planteamiento del problema**

Para hacer más competitivo el uso de las tecnologías de energía eólica se requiere lograr una mejora en la eficiencia global del aerogenerador, una de las tendencias actuales consiste en prescindir de la caja multiplicadora, mediante el uso del generador síncrono múltiplo de imanes permanentes, el cual puede ser diseñado para acoplarse directamente con el rotor eólico.

Al estudiar el diseño se toman en cuenta factores que pueden reducir el peso total, las dimensiones, el ruido mecánico, costos de inversión, costos de operación y mantenimiento, asimismo, hacer más eficiente el sistema.

El diseño de estos generadores eléctricos es sometido a procesos de verificación. Por ello, se vuelven un proceso riguroso en donde si no se ingresan los parámetros y dimensiones adecuados de acuerdo al diseño propuesto ya que cualquier cambio mínimo generara un dato diferente al esperado e incluso problemas a la hora de ensamblar en el proceso de fabricación.

Una de las herramientas ampliamente utilizadas para el análisis del campo electromagnético en las estructuras de máquinas eléctricas son softwares basados en métodos de elementos finitos, los cuales, requieren un mayor tiempo y recurso computacional.

Por eso es la importancia de seguir y/o crear una metodología de diseño propia con los requerimientos necesarios para el desarrollo de un *PMSG*'s y conocer previamente las características necesarias a modificar, en este caso los valores de medición con la finalidad de ingresar el modelo del diseño a software de análisis de elementos finitos para su validación. En este proceso de simulación nos permite contar con especificaciones definidas para el proceso de manufactura y así evitar los costos elevados que conllevan a un exceso de materiales contribuyendo en la mejora de dicho proceso.

### **1.3 Justificación**

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, 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 maquinas encargadas de hacer este proceso se denominan aerogeneradores. Para lugares donde el viento tiene una velocidad media se puede implementar aerogeneradores de baja velocidad que nos permitan alimentar sistemas de iluminación o sistemas eléctricos de bajo voltaje.

### **1.4 Objetivos**

#### **1.4.1 General**

Crear un diseño de aerogenerador eléctrico de baja potencia que pueda ser usado para satisfacer necesidades eléctricas en zonas rurales o de difícil acceso.

#### **1.4.2 Específicos**

.

- Realizar el diseño de un rotor y estator de una máquina, calculando tanto las partes mecánicas, eléctricas y magnéticas
- Validar con ayuda de herramientas de simulación de elementos finitos el diseño del PMSG 1 kW.

## **1.5 Marco teórico**

### **1.5.1 Herramientas de simulación de elementos finitos**

Los softwares de análisis de elementos finitos permiten a los diseñadores industriales poder obtener respuestas para numerosos problemas de ingeniería. El resultado proviene de un modelado de segmentos específicos o conexiones de una estructura, que son sometidas a determinadas cargas y restricciones.

El objetivo es mejorar la calidad de los productos y proyectos, que posteriormente pasarán a los procesos de fabricación, y finalmente llegarán a las manos de los clientes. Los análisis de elementos finitos son llamados así, por cuanto la geometría de la estructura del objeto se divide en partes mucho más pequeñas, con la finalidad de hacer los problemas un asunto más específico. De este modo, los sistemas computarizados podrán llevar a cabo la solución de esos problemas, en un menor tiempo y de forma más eficiente.

Las fallas son muy comunes, entre ellas las fatigas, concentraciones de esfuerzo, deformaciones, los cuales son resueltos mediante el análisis de elementos finitos

### **1.5.2 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, las más común es dividirla por fuentes renovables o no renovables.

### **1.5.3 Energías no renovables**

Las fuentes de energía no renovable 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 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. (Energyavm, 2018)

### **1.5.4 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 fuentes no renovables y con ello el impacto ambiental que estas producen. Se opta por este tipo de energías para proveer la electricidad a comunidades en donde, por cuestiones económicas, el sistema eléctrico no suministra el servicio, ya que les es complicado costear una infraestructura en estos lugares. Las fuentes de energías renovables más utilizadas son: solar, hidráulica, eólica, biomasa y geotérmica. (Energyavm, 2018)

### **1.5.5 Energía Eólica**

Las energías renovables se han convertido en un tema mundial para garantizar el suministro de energía así mismo disminuir la dependencia de los combustibles fósiles y abordar los desafíos del cambio climático, los cuales son factores que han indicado en el acelerado crecimiento del uso de las energías renovables en el mundo.

Entre las energías renovables, la energía eólica es una de las fuentes de energía con mayor crecimiento en la escala mundial y suministro hasta el 20% de la electricidad global en el 2020, según el último informe del Consejo Mundial de Energía Eólica (GWEC, por sus siglas en inglés), de acuerdo a este informe, en la Figura 1.2 podemos ver que el incremento anual de la capacidad eólica a nivel mundial en el 2017 alcanzó los 52.573 GW, reportando al fin del año una potencia mundial de 539.581 GW, entre los primeros países con mayor capacidad instalada a nivel mundial se encuentran: China (35%), Estados Unidos de América (17%), Alemania (10%), India (6%) y España (4%) y el resto de los países (28%). (GWEC, 2018).

A nivel América Latina nuestro país se posiciona en el segundo puesto detrás de Brasil en capacidad instalada en energía eólica, de acuerdo a la Asociación Mexicana de Energía Eólica (AMDEE) la capacidad instalada en México a finales de 2016 fue de 3,876 MW, donde la región con mayor potencia de energía eólica se encuentra en el Istmo de Tehuantepec, con 2,360 MW instalados.

A nivel nacional la capacidad de energía eólica instalada representa el 5.08% y conforme al reporte de avances de energías limpias publicado por la secretaria de Energía (SENER) en el 2016 la energía eólica generó 10,463 GWh, lo cual representa el 3.28% de la energía eléctrica a nivel nacional, donde se estima que en los próximos años la generación de energía por centrales eléctricas se triplique.

Además, cabe señalar, que este crecimiento de capacidad instalada, principalmente en los países líderes, va acompañada con innovación y madurez tecnológica, debido a que los mayores productores de turbinas eólicas (Onshore y Offshore) provienen de estos países. El ranking a nivel mundial de fabricantes de turbinas eólicas en el 2017 es: Siemens y Gamesa (Alemania y España), Vesta, (Dinamarca); líder mundial de turbinas onshore, Goldwind (China), General Electric (EUA) y Enercon (Alemania), esto conlleva a nuevas innovaciones tecnológicas implementadas en la generación de la energía. Este se muestra en la Figura 1.3.

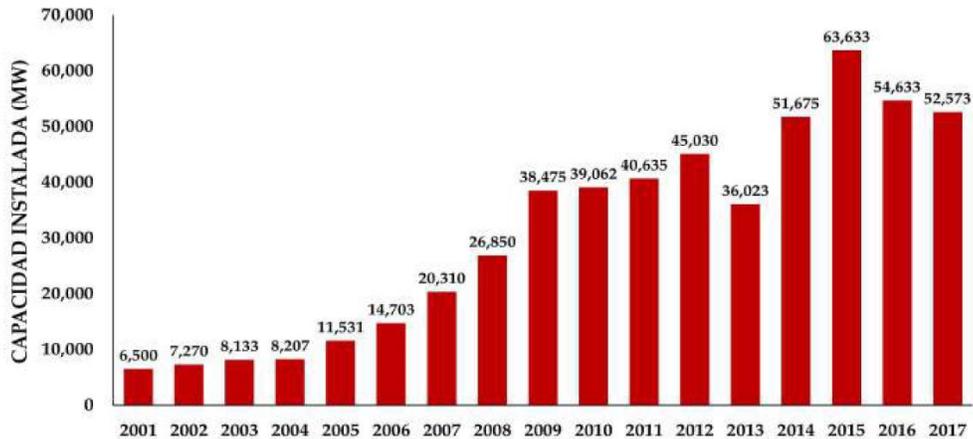


Figura 1.2 Capacidad eólica anual, instalada a nivel mundial 2001-2017

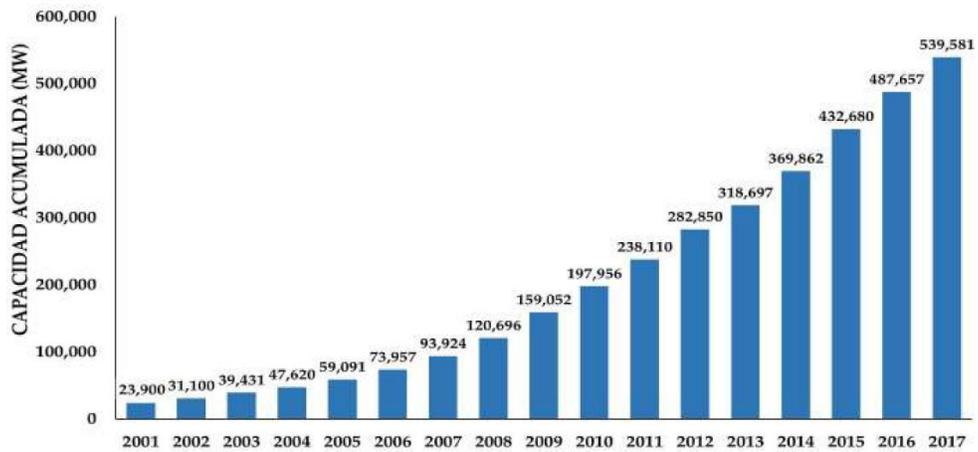


Figura 1.3 Capacidad eólica acumulada a nivel mundial 201-2017

### 1.5.6 Generadores eólicos

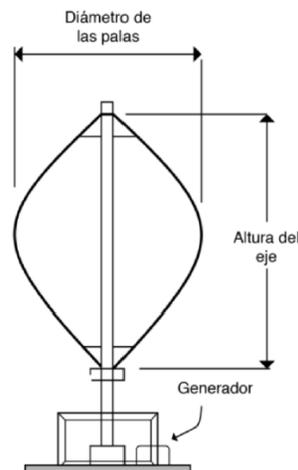
Los generadores eólicos son dispositivos que convierten la energía cinética del viento en energía eléctrica. Son básicamente contruidos por un aspa que utiliza la energía del viento para hacer girar un generador eléctrico, generalmente trifásico. Existen generadores de eje horizontal y vertical.

Los generadores de eje horizontal son los que tienen su eje de rotación paralelo a la dirección del suelo, y su altura siempre será proporcional al tamaño de sus aspas. Ya que estas giran de manera perpendicular al piso. Este tipo de generadores son

frecuentemente utilizados por su eficiencia, ya que estos pueden producir mucha potencia a bajas velocidades gracias a diferentes arreglos de engranes que pueden multiplicar la velocidad de giro alternado. Pueden alcanzar potencias de 1MW. (J.A.A.Berhouague, 2009)

Los aerogeneradores de eje vertical son menos usados ya su eficiencia es menor, pero estos cuentan con mayor variedad de diseños haciéndolos más flexibles, por lo cual son más adecuados para aplicaciones de baja potencia, además de poder obtener energía de viento que proviene de todas direcciones.

Estos generadores se componen de palas o aspas que son colocadas de acuerdo a la configuración elegida, también cuentan con un eje que conecta las aspas con el generador eléctrico, algunos de estos cuentan con motores de arranque o cajas de engranes, dependiendo de la potencia a la que se maneje. Por ejemplo; los aerogeneradores menores a 10 kW de potencia no necesitan cajas o motores de arranque. Podemos ver un ejemplo con sus componentes en la Figura 1.4.



*Figura 1.4 Partes de un generador de eje vertical*

Su mantenimiento es más sencillo debido a que se encuentran a ras o cerca del suelo, los tipos de aerogeneradores de eje vertical más comunes son:

- Savonius
- Darrieus

- Giromill
- Widside
- WM

(Baldomero, 2012)

### 1.5.7 Tipos de generadores eléctricos implementados en la industria eólica

La industria de la energía eólica se ha consolidado a través de los avances tecnológicos en términos de diseño aerodinámico, sistemas mecánicos, generadores eléctricos, convertidores electrónicos de potencia, integración de los sistemas de potencia y teoría de control (V. Yaramasu, 2015).

Principalmente, el generador eléctrico es el elemento central del sistema eléctrico de los aerogeneradores y el componente a partir del cual se dimensionan los elementos restantes, sistema de control y supervisión (J. Rodríguez Amenedo, 2003), este se encarga de convertir la energía mecánica producida por el rotor eólico a energía eléctrica.

Los generadores eléctricos se pueden clasificar por el tipo de alimentación de energía eléctrica, pueden ser de corriente directa (CD) y corriente alterna (CA), los de CA se dividen en asíncronos y síncronos (Stiebler, 2008), como se muestra en la Figura.1.5.

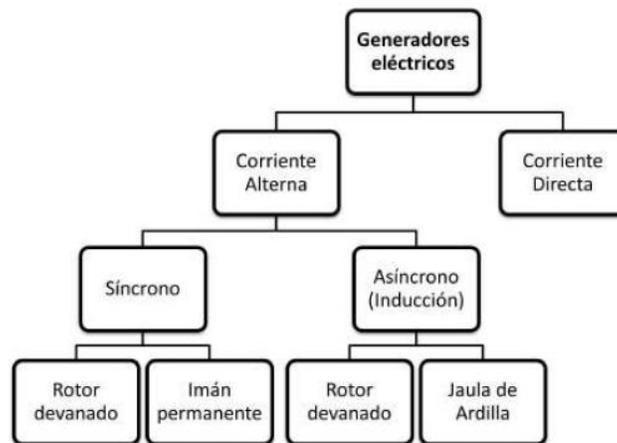


Figura 1.5 Clasificación de los generadores eléctricos.

Las máquinas CD ya no son de interés práctico como generadores debido a varios inconvenientes; requieren mayor trabajo de mantenimiento, mayor peso/potencia, no son adecuados para devanados de alto voltaje y presentan mayor costo, esto hace que no sean adecuados para turbinas eólicas de mayor tamaño. Por lo tanto, en los aerogeneradores actuales tienen generadores de corriente alterna trifásicos, estos presentan ventajas de menor mantenimiento; menor relación peso/potencia y menores costos (Stiebler, 2008).

En los últimos 30 años los aerogeneradores comerciales se han incrementado exponencialmente en dimensiones, aumentando la captación de máxima energía y potencia eléctrica del generador como se muestra en la FIGURA. 1.6, lo cual presenta la evolución de los aerogeneradores comerciales desde el año de 1980 a una estimación del 2020. A través de este tiempo, se han implementados diferentes tecnologías en generadores eléctricos y convertidores electrónicos de potencia de acuerdo a las velocidades de operación; fija, parcialmente variable y variable.

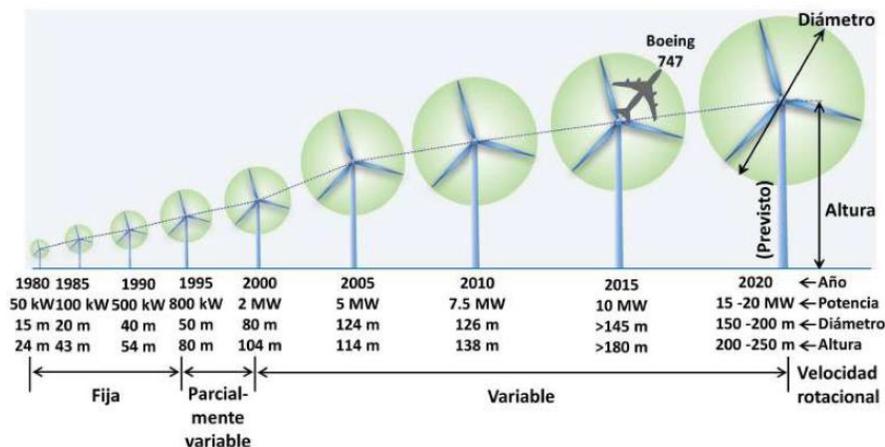


Figura 1.6 Evolución del tamaño y potencia de los aerogeneradores comerciales (V. Yaramasu, 2015)

El aerogenerador más grande registrado en 2014, es de la industria Vestas, modelo V164, con un diámetro de rotor de 164 m y una potencia de 8 Mw. Las industrias Clipper, Sway Turbine AS y Windtec-AMSC se han pronunciado al respecto en la fabricación de turbinas eólicas de 10 MW y General Electric (GE) está en desarrollo de aerogeneradores de 15 Mw. Las mayores máquinas eólicas instalados se

encuentra dentro del mar (offshore), la potencia promedio de un aerogenerador en tierra (onshore) y alta mar (offshore) se reporta en 1.926 y 3.613 Mw, respectivamente (V. Yaramasu, 2015).

En el desarrollo de la energía eólica se han implementados generadores asíncronos o de inducción: jaula de ardilla, rotor devanado, doblemente alimentado (*DFIG*), y actualmente generadores síncronos: de imán permanente (*PMSG*) y rotor devanado.

#### **1.5.7.1 Generador eléctrico asíncrono**

La mayoría de las turbinas eólicas del mundo utilizan un generador asíncrono trifásico (de jaula bobinada), también llamado generador de inducción, para generar corriente alterna. Fuera de la industria eólica y de las pequeñas unidades hidroeléctricas, este tipo de generadores no está muy extendido; aunque, de todas formas, el mundo tiene una gran experiencia en tratar con ellos: Lo curioso de este tipo de generador es que fue inicialmente diseñado como motor eléctrico. De hecho, una tercera parte del consumo mundial de electricidad es utilizado para hacer funcionar motores de inducción que muevan maquinaria en fábricas, bombas, ventiladores, compresores, elevadores, y otras aplicaciones donde se necesita convertir energía eléctrica en energía mecánica. Otra de las razones para la elección de este tipo de generador es que es muy fiable, y comparativamente no suele resultar caro. Este generador también tiene propiedades mecánicas que lo hace especialmente útil en turbinas eólicas (el deslizamiento del generador, y una cierta capacidad de sobrecarga) (A. D. Eólica, 2003)

#### **1.5.7.2 Principios básicos del generador eléctrico síncrono**

En un generador síncrono se produce un campo magnético en el rotor ya sea mediante el diseño de este como un imán permanente o mediante la aplicación de CD (corriente directa) a su devanado para crear un electroimán. En seguida, el rotor del generador gira mediante un motor primario y produce un campo magnético giratorio dentro de la máquina. Este campo magnético giratorio induce un conjunto

de voltajes trifásicos dentro de los devanados del estator del generador (Chapman, 2012).

Las máquinas síncronas son máquinas eléctricas cuya velocidad de rotación  $Sr$  (rpm) está vinculada rígidamente con la frecuencia eléctrica  $f_e$ , de acuerdo con la Ecuación 1.

$$Sr = \frac{60f_e}{N_p}$$

(1)

donde  $N_p$  es el número de pares de polos de la máquina (J. Rodríguez Amenedo, 2003).

El devanado del inducido de la máquina síncrona está alojado habitualmente en el estator. En el caso de máquinas trifásicas: está formado por tres bobinas desfasadas a  $120^\circ$  eléctricos, como ocurren en las máquinas asíncronas. Si en el interior de las máquinas se tiene un campo magnético giratorio, entonces en los devanados del inducido se genera una fem (fuerza electromotriz); la forma de onda de la fem en el tiempo es idéntica a la forma de onda del campo magnético en el espacio. La frecuencia  $f_e$  de la fem está relacionada con la velocidad de giro  $\omega_m$  (rad=s) según la Ecuación 2.

$$f_e = \frac{N_p \omega_m}{2\pi}$$

(1)

Existen dos formas de crear el campo magnético giratorio necesario para que se produzca la conversión mecánica en eléctrica: a través de imanes permanentes alojados en el rotor y a través de polos inductores en corriente directa, como se muestra en la Figura 1.7.

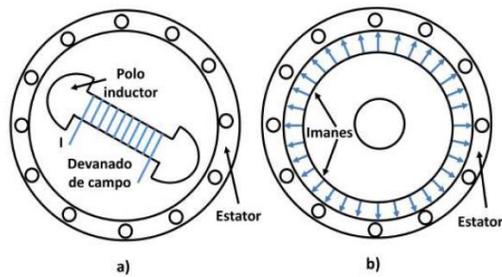


Figura 1.7 Aspectos constructivos de los generadores síncronos. a) polos salientes, excitación

## 1.6 Clasificación del generador síncrono de imanes permanentes PMSG

Los PMSG se clasifican de acuerdo con la trayectoria del flujo magnético:

- Flujo axial
- Flujo transversal
- Flujo radial

Las máquinas de flujo transversal están en desarrollo en el mercado de la industria eólica, y el diseño de flujo axial solo se utiliza en máquinas de baja potencia, sin embargo, el diseño de flujo radial es mayormente implementado en los aerogeneradores de transmisión directa, en las siguientes secciones se describe cada uno de estos PMSG's. (N. Goudarzi W. Z., 2013)

### 1.6.1 Generador síncrono de imanes permanentes de flujo axial (AF-PMSG)

El generador de flujo axial se caracteriza porque el flujo en el entrehierro tiene una dirección axial respecto al eje de giro, es decir, es paralelo al mismo. (Dubois, 2004) El rotor se construye de forma de disco, con los imanes colocados a lo largo del perímetro, y el estator esta ranurado de forma radial, este diseño de generador se caracteriza por ser más compacta y difícil de fabricación.

Generalmente, en las máquinas de flujo axial la longitud de la maquina es mucho menor en comparación con las máquinas de flujo radial. Su principal ventaja es alta

densidad en par, por lo que se recomienda para aplicaciones con restricciones de tamaño especialmente en dirección axial. (Madani N. , Design of a permanent magnet synchronous generator for a vertical axis wind turbine, 2011)

Una de las ventajas con las máquinas de flujo axial es que no son equilibradas en un solo rotor, Por lo general, para un mejor rendimiento del rotor se acoplan entre dos estatores o viceversa, a diferencia de las máquinas de flujo radial. Cualquier aumento en la longitud de más máquinas de flujo axial aumenta el diámetro del entrehierro. Por lo tanto, al aumentar la potencia de un nuevo diseño se necesita una nueva geometría, de otra manera, es aumentar el número de estatores y rotores. Sin embargo, hace que la maquina sea de mayor peso y costo. En la Figura 1.8 podemos ver en ejemplo de *AF-PMSG*.

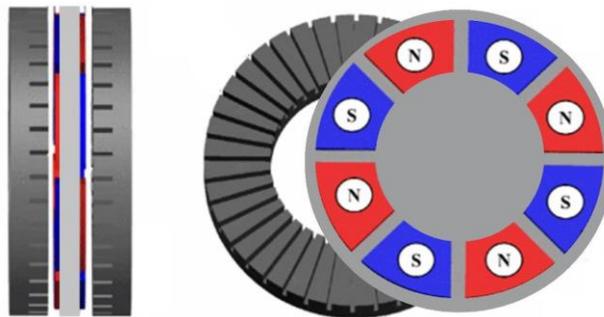


Figura 1.8 AF-PMSG

### 1.6.2 Generador síncrono de imanes permanentes de flujo transversal

Los generadores de imanes permanentes de flujo transversal (*TF-PMSG*) presentan una densidad de par muy alta y un devanado con mayor simplicidad. Por lo tanto, es de interés para aplicaciones en la energía eólica, se han presentado investigaciones en la aplicación de este tipo de máquinas. Sin embargo, los *TF-PMSG* tienen una serie de desventajas significativas, tales como una ruta de flujo tridimensional, un factor de potencia bajo y una densidad de potencia decreciente para aumentar los espacios de aire. Probablemente sean la razón por la cual la aplicación comercial en grandes turbinas eólicas aún no ha sucedido. Este tipo de

generadores tiene una orientación radial de entrehierro y tiene el ranurado en el estator una orientación transversal. La orientación transversal en el estator permite que el área de la bobina sea independiente de la elección del paso del polo. (Polinder H. , 2011)

En las máquinas de flujo transversal, el plano de trayectoria del flujo es perpendicular a la dirección de movimiento del rotor. El uso de máquinas de flujo transversal se puede proponer en aplicaciones con requisito de alta densidad de par. Una propiedad atractiva de las máquinas de flujo transversal es que la carga de corriente y la carga magnética se puede ajustar de forma independiente. Estos se proponen para los sistemas eólicos y generadores para vehículos híbridos.

Un inconveniente del *TF-PMSG* es el flujo magnético de dispersión elevada que resulta en un bajo factor de potencia. Para lograr una menor pérdida de flujo, el número de polos se tiene que disminuir esto a su vez reduce la densidad de par. El objetivo en el diseño es encontrar un punto de equilibrio entre el flujo de dispersión y la densidad de par de la máquina, otro principal inconveniente son las complicaciones en el ensamble del proceso de fabricación. En la Figura 1.9 podemos observar un ejemplo de geometría de *TF-PMSG* (Madani N. , 2011)

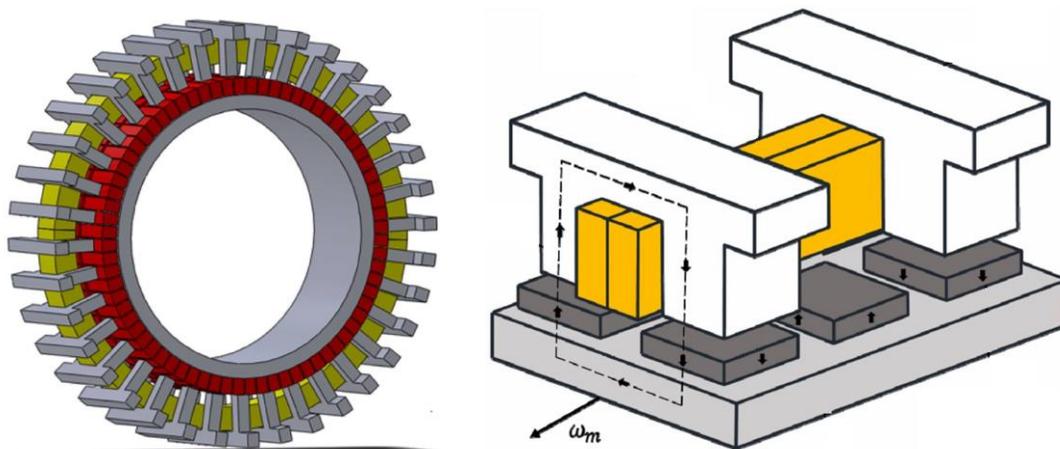


Figura 1.9 TF-PMSG

### 1.6.3 Generador síncrono de imanes permanentes de flujo radial

El generador de flujo radial *RF-PMSG* que se muestra en la Figura 1.10, es el más convencional entre los *PMSG*'s, la fabricación de este tipo de maquina está bien establecida, lo que indica que el costo de producción es más bajo en comparación con el generador axial.

Además, de dimensionar con ciertas características; potencia más altos de la maquina se consiguen mediante el aumento de la longitud y diámetro, el estator y el rotor están separados por un entrehierro cilíndrico, idealmente es concéntrico con el eje de giro. (Dubois, 2004)

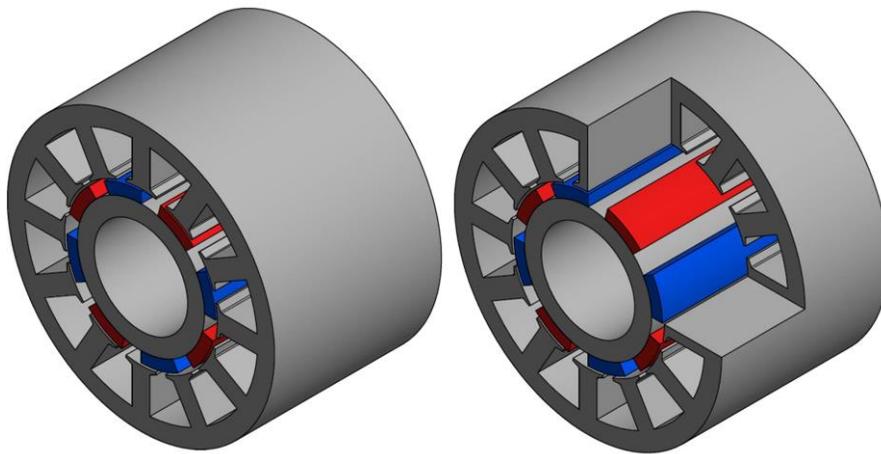


Figura 1.10 RF-PMSG

Una de las configuraciones de este tipo de máquinas es a través de la colocación de los imanes sobre la superficie del rotor de tipo:

- Rotor interno
- Rotor externo

En la Figura 1.11 tenemos el ejemplo visual de las configuraciones.

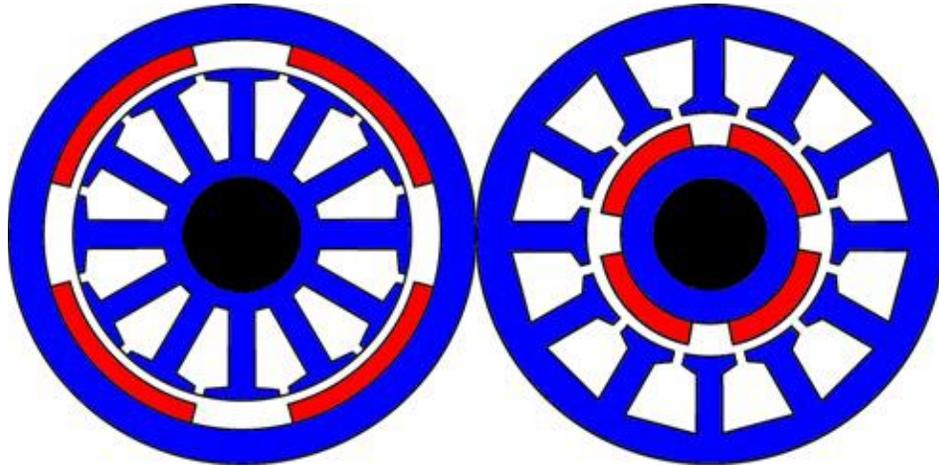


Figura 1.11 RF-PMSG Rotor externo y RF-PMSG Rotor interno

Desde un punto de vista térmico, la mayor parte del calor se genera en los devanados del estator, por lo que un rotor interno permite la ruta de enfriamiento más corta. La mayoría de los fabricantes de aerogeneradores han elegido un rotor interno con imanes permanentes. (Hpolinder, 2013)

Las características de una máquina de imán permanente se determinan principalmente en función de la construcción del rotor. En la Figura 1.12 se ilustra las diferentes configuraciones de construcción de los rotores con imanes permanentes. Los imanes incrustados en la construcción del rotor; la inductancia sincrónica del eje de cuadratura es más alta que la inductancia.

sincrónica del eje directo. Incrustar el material magnético completamente dentro de la estructura del rotor se pierde una cuarta parte del flujo producido por el imán, por otra parte, los imanes incrustados están protegidos tanto mecánica y magnéticamente. En el montaje integrado, también podemos emplear dos imanes por polo, en cuyo caso es posible alcanzar un espacio de aire o gap de mayor dimensión. (M.A. Hernandez -Rodriguez, 2018)

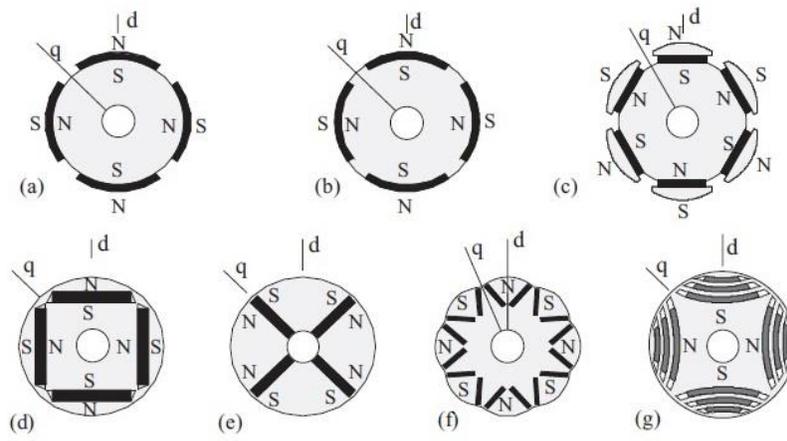


Figura 1.12 Rotores de máquinas de imán permanente

#### 2.1 Metodología de dimensionamiento

Para empezar con el diseño del generador se toma en cuenta una primera metodología de dimensionamiento propuesta por Le Gourieres en la cual resulta conveniente introducir los parámetros dimensionales que caracterizan el comportamiento del aerogenerador. Esta se basa en introducir los parámetros más significativos de las dimensiones iniciales como son el tamaño de los imanes, separación del entrehierro y parámetros geométricos.

##### 2.1.1 Diseño Mecánico

Los polos dentro de los PMSG son una función de la frecuencia y la velocidad de giro, tomando en cuenta una metodología previa a la investigación se queda tomando en cuenta la una ecuación 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 a la velocidad hasta que el número de polos sea un numero entero.

El número de polos o imanes  $Nm$  en el diseño del rotor esta dado por la Ecuación 3.

$$Nm = \frac{120f_e}{Sr}$$

(3)

donde  $f_e$  es la frecuencia eléctrica en Hz y  $Sr$  es la velocidad nominal en rpm, estos son considerados parámetros de entrada para el diseño del generador, la principal restricción de es que  $Nm$  debe ser un entero par, para alternar la polaridad de los imanes y crear un lazo cerrado de flujo magnético, ya que los

imanes permanentes están compuestos por 2 polos magnéticos (norte y sur), por lo cual el número de pares de polos ( $Np$ ), se obtiene con la Ecuación 4.

$$Np = \frac{Nm}{2}$$

(4)

sí  $Nm$  es un número impar o una fracción,  $Nm$  debe modificarse para producir un entero par. Después de esto,  $Sr$  se ajusta.

La principal restricción en el diseño del estator es que el número total de ranuras en el estator ( $Ns$ ) debe ser un entero par múltiple del número de fases ( $Nph$ ), es decir,

$$Ns = NspNph$$

(5)

donde  $Nsp$  es el número de ranuras por fase, el cual es un número entero par, bajo la siguiente restricción  $Nsp > Nm$ . Esta restricción garantiza que cada fase tenga el mismo número de ranuras. El número de ranuras por polo y por fase esta dado por la Ecuación 6.

$$Nsp = \frac{Ns}{Nm}$$

(6)

donde  $Nsp > 1$ . Finalmente definimos el número de ranuras por polo es una relación entre el número de ranuras y el número de polos, y dice cuántas ranuras se encuentran por cada polo con la Ecuación 7.

$$Nsm = \frac{Ns}{Nm}$$

(7)

estos parámetros mencionados son importantes en el diseño geométrico de las ranuras y dientes del estator. Sin embargo, están sujetos a la selección del tipo de la distribución de los devanados, en función de la elección de parámetros como él ( $Nspp$ ) y la combinación adecuada de ( $Ns$ ) y ( $Np$ ).

Con esta configuración se procede a un cálculo para poder determinar si es la más eficiente y produce un resultado correcto. Primero se determina si la distribución es balanceada con la fórmula donde el factor  $X$  debe ser un número entero, sino se cumple, se debe probar combinaciones de número de ranuras y polos como se muestra en la Ecuación 8.

$$X = \frac{Ns}{3MCD(Ns, Np)}$$

(8)

Continuando, se determina si la relación entre ranuras y polos  $Y$  es la más óptima, con la fórmula que ayudara a obtener un torque en vacío bajo. Este número debe ser un número alto. (Gomez, 2019)

$$Y = MCM(Nm, Ns)$$

(9)

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 10.

$$T_m = \frac{P_{in}}{\omega_m}$$

(10)

La velocidad mecánica  $\omega_m$  se da en la Ecuación 11, como una relación de la velocidad de la máquina.

$$\omega_m = \frac{2\pi Sr}{60} \quad (11)$$

### 2.1.2 Dimensionamiento del imán

Minimizar el peso y volumen del imán es factor importante para lograr un diseño eficiente y económico del generador. En ese sentido, el punto de máxima energía  $BH_{max}$ , es un factor de carácter importante para elegir y dimensionar los imanes como se muestra en la Figura 2.1. Como antes mencionado, los diseños del generador de bajo costo se pueden obtener al elegir imanes con puntos  $BH_{max}$  más altos. (association, 2009)

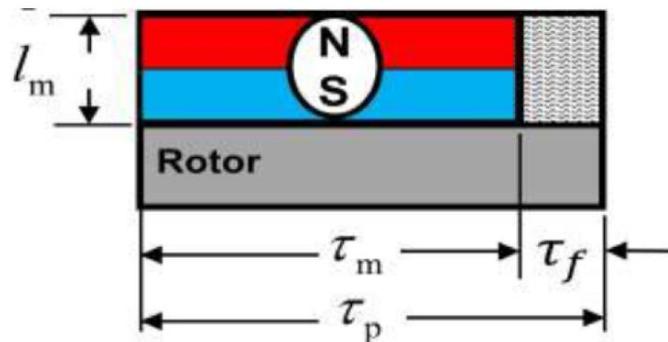


Figura 2.1. Dimensiones del imán PMSG

El volumen mínimo del imán de un generador se puede encontrar con la Ecuación 12.

$$V_m = \frac{T_m}{BH_{max} N_m} \quad (12)$$

donde  $T_m$  es torque mecánico de entrada y  $N_m$  es el número de imanes.

$$\alpha_m = \frac{T_m}{T_p} \quad (13)$$

También se es necesario calcular el área del imán, la cual es función de la longitud del generador L, de paso de polo  $T_p$  (que es la longitud del ancho del imán  $T_m$  más el espacio entre imanes en el estator  $T_f$ ) y de la fracción magnética  $\alpha_m$  que es la relación entre el ancho del imán y el espacio entre imanes. La teoría recomienda un valor de  $\alpha_m > 0.5$  y de este valor depende cuanta densidad de flujo habría en el *PMSG*. Por lo tanto, la Ecuación 14 describe el cálculo del área del imán.

$$A_m = \alpha_m T_p L \quad (14)$$

Se calcula el espesor del imán como su volumen sobre su área como ve en la Ecuación 15.

$$l_m = \frac{V_m}{A_m} \quad (15)$$

Por último, se calcula el ancho del imán, que es función del radio exterior del estator y el número de polos como se observa en la Ecuación 16.

$$T_m = \frac{2\pi R_s i \alpha_m}{3N_p} \quad (16)$$

### 2.1.3 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 crean 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 2.2 se tienen tres figuras de recorrido del flujo. El modelado más simple es una reluctancia recta ignorado totalmente el flujo que se escapa de la trayectoria.

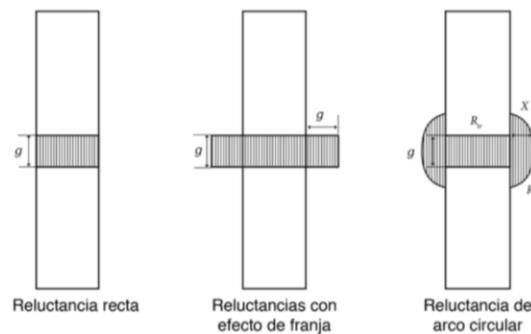


Figura 2.2 Modelos del flujo en el entrehierro

La Ecuación 17 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

$$R_{ga} = \frac{g}{A\mu_0}$$

(17)

#### 2.1.4 Parámetros geométricos

En esta sección se describe las formulaciones para dimensionamiento del generador síncrono de imanes permanentes de flujo radial, principalmente las variables geométricas en el diseño del estator, que ilustran en la Figura 2.3.

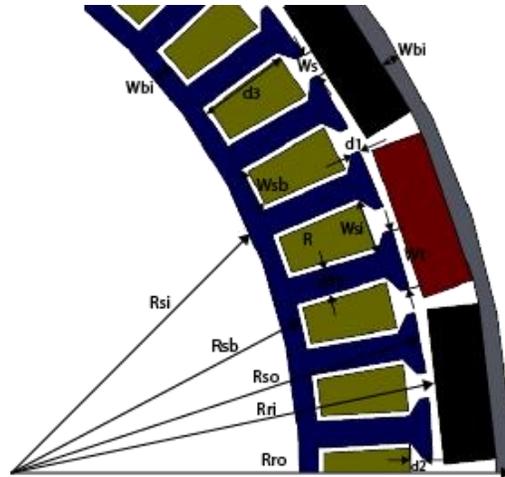


Figura 2.3 Definiciones geométricas

## 2.2 Metodología del diseño

En este apartado se presenta una metodología empleada en el diseño del rotor de imanes permanentes. Cabe resaltar, que para el diseño de máquinas eléctricas hay diferentes vías para realizar un diseño final. Sin embargo, la metodología que se presentan es una estructura general de los pasos a seguir para llevar a cabo el proceso de fabricación y validación del prototipo del rotor 1 kW, como se muestra en la Figura 2.4. En las siguientes secciones se describen cada una de estas etapas.

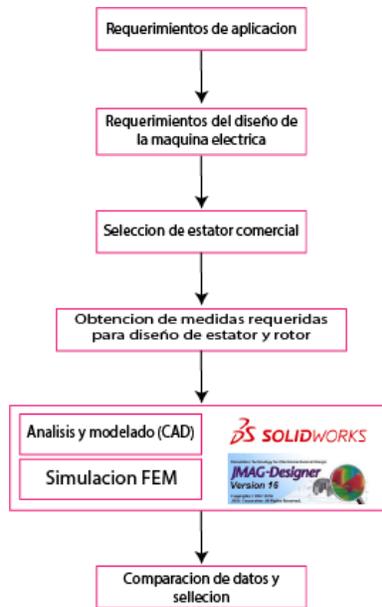


Figura 2.4 Metodología aplicada

## 2.3 Requerimientos de aplicación

Como primer paso se establecieron los requerimientos de diseño de acuerdo con la aplicación, esto conlleva la determinación de parámetros de entrada y factores de operación que se deben cumplir para el diseño de la máquina eléctrica.

En esta etapa del diseño es muy amplio, pues hay factores muy importantes a considerar. Sin embargo, todo depende del criterio del diseñador y las características de la aplicación. De acuerdo con los objetivos de la tesis, se determinó la aplicación de un generador eléctrico de imanes permanentes para la implementación en aerogeneradores de eje horizontal. Esto nos permite determinar los primeros requerimientos de diseño; los parámetros eléctricos, rendimiento y operación del generador.

Algunos de los parámetros de entrada se definen con base a las características que requiere el diseñador, enseguida se establece los requerimientos de diseño y se proporcionan las propiedades de los materiales (acero, imán y conductores).

De acuerdo a las dimensiones proporcionadas, se procede a crear la geometría en software. Para esta tarea fue utilizado el método de diseño CAD por las siglas de

su nombre en inglés computer-aided design (diseño asistido por computadora) se usa en casi todas las industrias, en proyectos tan variados como el diseño de paisajes, la construcción de puentes, el diseño de edificios de oficinas y la animación en películas. Con los programas de diseño CAD 2D o 3D, puedes realizar diferentes tareas, como crear un modelo 3D de un diseño, aplicar materiales y efectos de iluminación, y documentar el diseño con cotas y otras anotaciones.

## **2.4 Requerimientos de diseño de la maquina eléctrica**

Posteriormente se procede a determinar mayores parámetros en los requerimientos del diseño.

A continuación, se presentan los siguientes parámetros establecidos como requerimientos del diseño, algunos son parámetros de entrada y otros como parámetros de verificación, es decir, que el diseño del generador se encuentre en los rangos adecuados establecidos.

- **Parámetros eléctricos y rendimiento**

- Potencia eléctrica
- Revoluciones por minuto
- Voltaje de fase
- Frecuencia eléctrica
- Distorsión armónica THD

## **2.5 Selección de estator comercial**

En esta parte se inicia contemplando los datos de la sección 2.2. Se toma en cuenta el utilizar un estator de medias comerciales previamente fabricado y seleccionado de acuerdo con las medidas del aerogenerador referente como la primera versión a este proyecto.

## **2.6 Obtención de medidas requeridas para diseño (CAD) de estator y rotor**

De acuerdo a diferentes metodologías para el diseño de generadores eléctricos se es necesario iniciar calculando los datos de:

- Numero de polos
- Numero de ranuras

Con base a los parámetros de entrada y se calcula todos los ángulos geométricos que intervienen en el diseño. Teniendo en cuenta lo anterior se aplican los resultados para obtener:

- Entrehierro
- Dimensionamiento de imanes
- Yugo

Una vez teniendo en cuenta las dimensiones del del estator y los datos previamente mencionados se recolectan los datos de estas para pasar a la siguiente parte.

## 2.7 Análisis y modelado (CAD)

Esta parte con ayuda de una herramienta de modelado en CAD se tomará en cuenta las dimensiones proporcionadas por los cálculos y se procede a realizar el modelado 3D tomando en cuenta nuevamente una metodología como se muestra en la Figura 2.5.

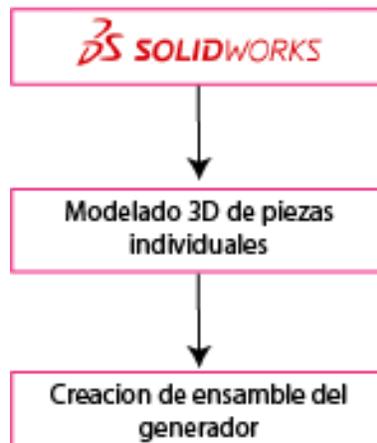


Figura 2.5 Metodología SolidWorks

### **2.7.1 SolidWorks**

Entre varios softwares que existen en el mercado para cumplir la tarea de modelado CAD se eligió SOLIDWORKS. El software proporciona un entorno de desarrollo en 3D intuitivo que ayuda a aumentar al máximo la productividad de sus recursos de diseño e ingeniería para crear productos mejores con mayor rapidez y rentabilidad.

Es un software de diseño CAD 3D para modelar piezas y ensamblajes en 3D y planos 2D. Entre sus referencias este software ofrece un abanico de soluciones para cubrir los aspectos implicados en el proceso de desarrollo de un producto, como lo son: Crear, diseñar, simular, fabrica y gestionar los datos del proceso de diseño.



Figura 2.6 Versión de SolidWorks

### **2.7.2 Modelado 3D de piezas individuales**

Con las dimensiones que se recolectaron previamente se procede modelar de forma individual las piezas requeridas para el generador.

### **2.7.3 Creación de ensamble del generador**

Utilizando las piezas modeladas se crea una sola figura a la que llamaremos ensamble del generador. se muestra el diseño completo de la geometría del generador de 1 kW, 52 ranuras del estator y de rotor externo con imanes montados sobre una de las superficies del rotor.

En este software de diseño se realizaron todas las modificaciones de casos de estudio, posteriormente, cada geometría es evaluada por FEM (Software de elementos finitos) en JMAG-Designer.

## 2.8 Simulación de FEM

Para el desarrollo del proyecto, se evaluó el diseño con análisis y estudios electromagnéticos en el software de elementos finitos, puesto que uno de los objetivos principales para la obtención de resultados y comparativas, es que, a partir del análisis y estudio del modelo electromagnético de la máquina, dimensionar todas las características geométricas y parámetros eléctricos del diseño final, validando a través del software JMAG con análisis electromagnéticos.

En la Figura 2.6 se muestra la metodología para el análisis en el software de elementos finitos JMAG-Designer.



Figura 2.6 Metodología JMAG

### 2.8.1 JMAG-Designer

Es un software de simulación para el desarrollo y diseño de dispositivos eléctricos. JMAG se lanzó originalmente en 1983 como una herramienta para respaldar el diseño de dispositivos como motores, actuadores, componentes de circuitos y antenas. (Design, En línea)

### 2.8.2 Crear la geometría

En este paso regularmente se crea desde el inicio el dibujo de una geometría, pero, utilizando el paso 2.5 sobre la geometría CAD previamente realizada en SolidWorks se exporta directamente al programa creando sólidos en las piezas y vacíos en los espacios que son huecos.

### **2.8.3 Especificar materiales**

Tomando en cuenta los datos antes mencionados en el punto 2.1 se seleccionan en el catálogo del programa los materiales requeridos.

### **2.8.4 Especificar condiciones**

Las especificaciones antes mencionadas en el paso 2.2 se colocan en las especificaciones de la simulación.

### **2.8.5 Generar mallado**

El programa Jmag como algunos otros softwares de simulación crean una malla encima de la superficie a simular para tomar en cuenta todos los sólidos y hacer más precisos los resultados.

### **2.8.6 Correr el análisis**

Teniendo completados los puntos anteriores de simulación FEM se procederá a correr la simulación, también es necesario dividir en pasos y marcar cuanto tiempo es que tomara en cuenta cada uno, al correr la simulación esto puede tardar entre algunos minutos y horas.

### **2.8.7 Evaluar resultados**

Dentro de los diferentes datos que nos arroja la simulación algunos de los más importantes en el estudio de este proyecto son:

- Voltaje
- Torque mecánico

- Giro del motor

### 2.8.8 Comparación de datos

Este último paso tomara en cuenta los resultados, se compararán con los requerimientos y en caso de no ser los requeridos regresaremos a paso 2.5 para crear nuevas versiones del generador.

Al final se revisan todas las versiones realizadas comparando los datos de:

- **Torque:**

Se refiere a la fuerza de rotación o giro generada por el cigüeñal del motor; también se denomina fuerza o potencia de tracción.

- **Densidad magnética:**

Cuando hablamos de la densidad de flujo magnético, nos referimos a la cantidad física, que indica como de fuertes son los campos magnéticos. Esto determina como denso es el área del flujo magnético.

- **Frecuencia de fase:**

Es la señal a la cantidad de ciclos que pueden desarrollarse en un segundo. Se mide en ciclos por segundo o Hertz

- **THD:**

La Distorsión Armónica Total (THD) es una medida de cuánto se distorsiona o se cambia la forma de onda del voltaje o de la corriente de su forma de onda sinusoidal convencional.

Para llevar a cabo esta tarea fue el necesario obtener todas las medidas que las piezas podrían contener.

**3. Material y métodos**

La industria de la energía eólica se ha consolidado a través de los avances tecnológicos en términos de diseño aerodinámico, sistemas mecánicos, generadores eléctricos, convertidores electrónicos de potencia, integración de los sistemas de potencia y teoría de control.

Tomando en cuenta el párrafo anterior y utilizando la metodología que se explicó en el capítulo pasado el primer paso para el inicio de este proyecto fue tomar en cuenta los requerimientos de diseño marcados como el punto 2.3.

**3.1 Requerimientos de aplicación**

Los generadores eléctricos se pueden clasificar por el tipo de alimentación de energía eléctrica, pueden ser de corriente directa (CD) y corriente alterna (CA), los de CA se dividen en asíncronos y síncronos, como se muestra en la Figura 3.1.

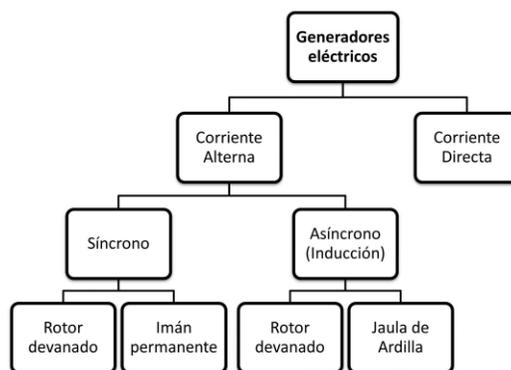
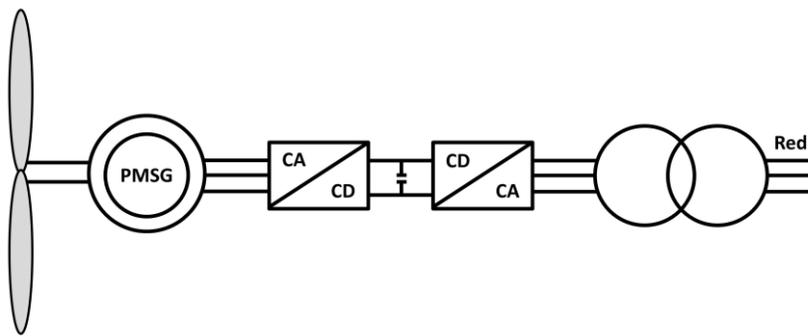


Figura 3.1 Generadores eléctricos

En este caso se utilizó eligió la configuración de un generador síncronos de imanes permanentes ya que el espectacular desarrollo de las aleaciones de alto magnetismos permanente, como imanes de: Ferritas, Al-Ni-Co (Aluminio-Níquel y Cobalto) y de tierras raras; Nd-Fe-B (Neodimio- Hierro-Boro) y Sm-Co (Samario-

Cobalto) han hecho que los generadores síncronos de imanes permanentes representen una alternativa muy interesante en la generación eólica a velocidad variable, debido a su alta densidad de potencia y elevado rendimiento. En la Figura 3.2 se presenta la configuración empleada en los aerogeneradores al operar con un generador síncrono de imanes permanentes (PMSG). (Madani N. , Design of a Permanent Magnet Synchronous Generator for a Vertical Axis, 2011) (M. R. J. Dubois, 2004) (C. Y. Hsiao, 2014)



*Figura 3.2 Generador síncrono de imanes permanentes*

En esta configuración los generadores eléctricos se clasifican de acuerdo con la trayectoria del flujo magnético:

- Flujo Axial
- Flujo Transversal
- Flujo Radial

Se toma en cuenta la configuración de flujo radial ya que el generador de flujo radial, como se muestra en la Figura 3.3. Es el más convencional entre los generadores, la fabricación de este tipo de máquina está bien establecido, lo que indica que el costo de producción es más bajo en comparación con el generador axial. (N. Goudarzi W. Z., 2013)

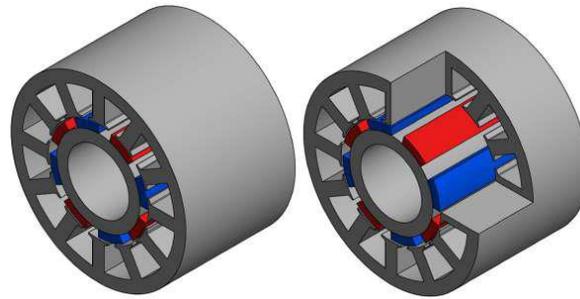


Figura 3.3 RF-PMSG

Además, de dimensionar con ciertas características; potencia más altos de la máquina se consiguen mediante el aumento de la longitud y diámetro (Madani N. , Design of a Permanent Magnet Synchronous Generator for a Vertical Axis, 2011), el estator y rotor están separados por un entrehierro cilíndrico, idealmente es concéntrico con el eje de giro (M. R. J. Dubois, 2004).

Una de las configuraciones de este tipo de máquina es a través de la colocación de los imanes sobre la superficie del rotor de tipo:

- Rotor externo
- Rotor interno

La configuración de rotor externo fue seleccionada para este proyecto ya que, desde un punto de vista térmico, la mayor parte del calor se genera en los devanados del estator, por lo que un rotor externo permite la ruta de enfriamiento más corta. La mayoría de los fabricantes de aerogeneradores han elegido un rotor externo con imanes permanentes por la compatibilidad en la fabricación. (Polinder M. M., 2013)

### **3.2 Requerimientos de diseño de la máquina eléctrica**

Los parámetros elegidos en este punto se determinaron con la influencia de una primera versión del generador que se encuentra trabajando en las calles de Guadalajara, al ser una máquina de baja potencia la exigencia los parámetros eléctricos es menor y los datos se establecieron de la siguiente manera.

### 3.2.1 Parámetros eléctricos y rendimiento

Los requerimientos iniciales del diseño se muestran en la Tabla 3.1, los cuatro parámetros descritos son necesarios para iniciar el proceso de diseño, son requerimiento que se toman a partir de las condiciones del viento en el lugar de las especificaciones que se buscan en el PMSG

Tabla 3.1 Parámetros principales de diseño

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

### 3.3 Selección de estator comercial

En el modelado general de generadores eléctricos se es necesario llevar una serie de pasos y cálculos para obtener las medidas del rotor y estator las cuales se muestran en la Figura 3.4.

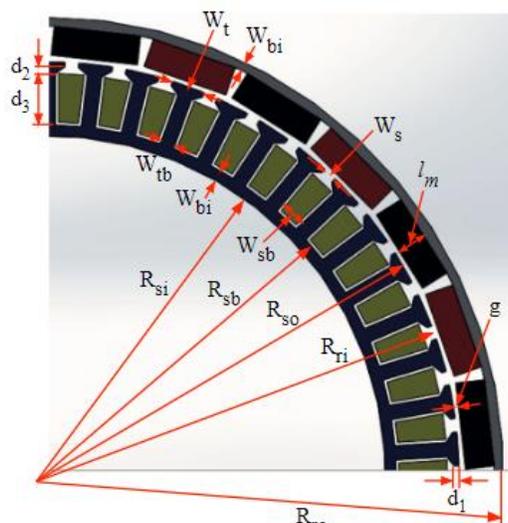


Figura 3.4 Medidas del aerogenerador

En este proyecto se tomó la decisión de tomar un estator de utilizar un modelo de estator comercial.

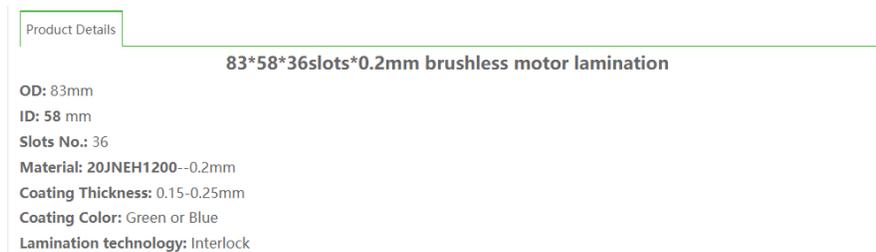


Figura 3.5 Características de estator comercial

Nuevamente tomando en cuenta las medidas de la primera versión de este proyecto se tomó como referencia para la selección de ranuras de dimensiones, seleccionando la opción de 56 ranuras y un radio externo de 90.20 mm.

### 3.4 Obtención de medidas requeridas para el diseño de estator y rotor

#### 3.4.1 Numero de polos e imanes

Como se explicó en el punto 3.4, antes de pasar al punto de modelado CAD se fue necesario calcular diferentes medidas para la creación de un rotor de óptimas condiciones, lo primero fue calcular el número de polos o imanes permitidos que este dado por la Ecuación 18.

$$Nm = \frac{120Fe}{Sr} = \frac{(120)(32)}{137} = 28$$

(18)

El número de pares de polos está determinado por la Ecuación 19, y se realiza el cálculo.

$$Np = \frac{Nm}{2} = \frac{28}{2} = 14$$

(19)

Si  $Nm$  es un número impar o una fracción,  $Nm$  debe modificarse para producir un entero par. Después de esto,  $Sr$  se ajusta de acuerdo con la ecuación 4.1. Cabe mencionar que en este proyecto fue necesario probar con diferente número de polos para las distintas versiones a simular utilizando de 20 hasta 32 polos. (C., 1994) (Miller J. R., 2010)

### 3.4.2 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 de polos. Se elige un número de ranuras de 54 para realizar la prueba. La determinación correcta entre ranuras y polos se comprueba más adelante. En este paso se determina el número de ranuras por fase. Ya que este  $PMSG$  y su diseño está formado para un sistema trifásico el número de ranuras por fase es dado por a la Ecuación 20.

$$Nsp = 18$$

(20)

El número total de ranuras del estator queda calculado en la Ecuación 21, por lo que se obtienen 54 ranuras.

$$Ns = NfNsp = (3)(18) = 54$$

(21)

El número de ranuras por polo y por fase se calcula con el número de ranuras por fase y el número de polos, la teoría dice que este valor es ideal que sea menor a 1, el resultado queda en 0.64, por lo cual se cumple el valor ideal.

$$N_{spp} = \frac{N_{sp}}{N_m} = \frac{18}{28} = 0.64 \quad (22)$$

Por último, el número de ranuras por polo es el número de ranuras que se encontraran alineadas en cada polo magnético del estator, se calcula en la Ecuación 23.

$$N_{rp} = \frac{N_s}{N_m} = \frac{54}{28} = 1.92 \quad (24)$$

### 3.4.3 Entrehierro y yugo

El entrehierro como ya lo mencionamos antes, 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 del estator, aquí es el límite del camino del flujo. Las variaciones mínimas en el entrehierro y el yugo tienen como resultado señales de voltaje y corriente con una cierta THD

Se considera en primer plano el THD de la salida del voltaje, si este se encuentra bajo la norma entonces el diseño *PMSG* se considera exitoso.

En la Tabla 3.2 podemos ver las diferentes versiones creadas para la simulación con sus variables. Como primera prueba se obtiene un THD obteniendo un porcentaje del 6% el cual se encuentra fuera de la norma según la teoría.

A continuación, se mejora la señal de voltaje y corriente haciendo una inclinación axial en los imanes, reduciendo así ciertos armónicos, esta acción Reduce el THD, esta inclinación en los imanes primeramente fue de 5° y luego de 10°, y se calcula

el THD nuevamente. En esta ocasión se obtiene un THD de 3.8% cumpliendo con la norma ANSI/NEMA MG 1-2016 y procediendo a comprobar los parámetros restantes (Association, 2021).

Tabla 3.2 Variación de versiones

Versión	Numero de polos	Numero de ranuras	Entrehierro	Yugo	THD
<b>v6.1</b>	30	54	0.5	2.4 mm	6%
<b>v7</b>	26	54	1.5	2.4 mm	5.90%
<b>v8</b>	28	54	1.5	1.8 mm	4.50%
<b>v8 (5 °)</b>	28	54	1.5	1.8 mm	4.20%
<b>v8 (10 °)</b>	28	54	1.5	1.8 mm	3.80%

Incluso nos proporciona un display visual donde recomienda con diferentes colores el óptimo funcionamiento de la combinación:

- Devanado de ranuras enteras
- Bobinado de ranura fraccional
- Bobinado concentrado
- Bobinado desequilibrado

### 3.4.4 Dimensiones del imán

Inicialmente las medidas del imán fueron tomadas en cuenta de la página <http://www.imanes.com.mx> que nos ofrece imanes de neodimio con diferentes medidas comerciales, esto genero algunas de las diferentes versiones de las medias del generador, al final se tomó en cuenta la restricción topológica en el desarrollo de aerogeneradores donde nos dice que en una maquina eléctrica se debe evitar tener espacios muy abierto o distancias grandes entre los polos, esto puede provocar perdidas en el flujo magnético, por lo tanto lo más conveniente es dividir el perímetro completo del rotor con la cantidad necesaria de imanes eligiendo como dato el número de polos, esto nos dará una de las medidas optimas en el dimensionamiento del imán.

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. Los imanes de neodimio miden su intensidad de campo magnético de acuerdo con un grado N, entre más grande el grado, más grande será la constante  $BH_{max}$ . Un correcto flujo en estos se presenta en imanes de neodimio grado N33 hacia arriba. Para esta aplicación se eligieron imanes de neodimio N35 con un  $BH_{max}$  de 283kJ/m<sup>3</sup>.

Para el dimensionamiento del imán fue necesario definir ciertas características iniciales que se describen más adelante.

El ángulo magnético  $\alpha_m$ , el espesor del yugo del rotor y el estator  $W_{bi}$  aumenta en proporción el ángulo magnético. Este puede ser propuesto con valores predeterminados, se eligió la opción de 120° para tener una mejor señal de torque más pura. (Gomez, 2019)

Tabla 3.3 Valores de fracción magnética

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

La fracción magnética  $\alpha_m$  va a dar la información del ancho optimo del imán, a menos  $\alpha_m$  disminuye el torque en vacío y la distorsión armónica en el voltaje, pero se obtiene menos 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. (Gomez, 2019)

Tabla 3.4 Parámetros iniciales de dimensionamiento del imán

$Bh_{max}$	283
$\alpha_m$	1.04719755°
$R_{si}$	0.009
$as$	0.5
$B_{ts}$	2.8

Iniciando con el cálculo del volumen del imán con la Ecuación 25 se obtiene el resultado.

$$V_m = \frac{T_m}{B_{Xmax} N_m} = \frac{82}{(283)(1000)(28)} = 0.00001033795879 \text{ m}^3 \quad (25)$$

Las dimensiones buscadas del imán se ven en la figura. La longitud y el ancho del imán están calculados por las siguientes ecuaciones.

$$l_m = \frac{V_m}{A_m} = \frac{0.00001033795879}{0.001024885698} = 0.01008693828 \text{ m} \quad (26)$$

$$T_m = \frac{2R_s i_a m}{N_m} = \frac{2(0.09)(1.047)}{28} = 0.006724971774 \text{ m} \quad (27)$$

Por último, se calcula la densidad de flujo del entrehierro en el PMSG con la fracción magnética y la densidad del flujo magnético en el diente  $B_t$ .

$$B_g = B_t (1 - \alpha_s) = 2.8(1 - 0.5) = 1.4 \text{ T} \quad (28)$$

### 3.5 Modelado CAD

Como se mencionó en el punto 3.5 se utilizó el software SolidWorks y las medidas de la tabla para el modelado de las piezas separando el generador en 3 partes:

- Estator y bobinas
- Rotor
- Imanes

obteniendo los siguientes resultados.

### 3.5.1 Modelado 3D de piezas individuales

#### 3.5.1.1 Geometría

Ya que la base de este proyecto es el modelado CAD, antes de realizar los análisis de 3D y 2D se crea la geométrica completa en un software de modelado mecánico llamado SOLIDWORKS donde se presenta el PMSG, representando las unidades de medida correspondiente y aplicando todas las condiciones de frontera en la geometría. Las medidas usadas para modelar el PMSG se pueden observar en la Tabla 3.5.

Tabla 3.5 Medidas de la geometría del PMAG

Nomenclatura	Definición	Medida (mm)
D1	Profundidad de zapato 1	1mm
D2	Profundidad del zapato 2	1.70 mm
D3	Profundidad del zapato 3	11.27 mm
Wt	Ancho del diente en el zapato	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
Rio	Radio exterior del rotor	100.00 mm
L	Longitud del generador	152.4mm
g	Entrehierro	1.5 mm

En la Figura 3.6 se muestra una primera vista de la geometría completa del generador modelado y simulado en una superficie de 2D en el software de JMAG.

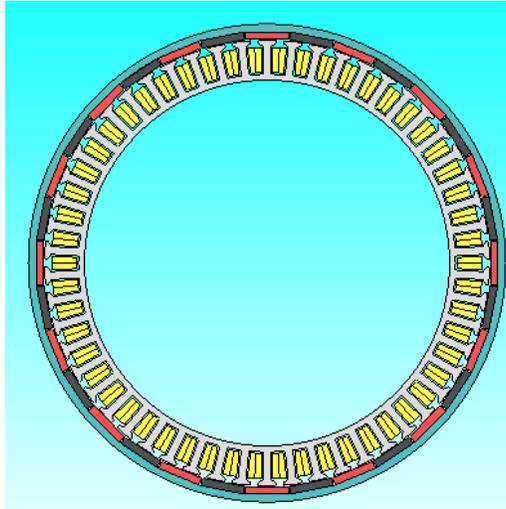


Figura 3.6 Vista de geometría en JMAG

- **Estator y bobinas**

El estator fue seleccionado previamente con un proveedor de servicios utilizando las medidas de un estator comercial previamente diseñado, se le solicito al proveedor las medidas de estos proporcionados documentos en formato Dxf como se muestra en la Figura 3.7.

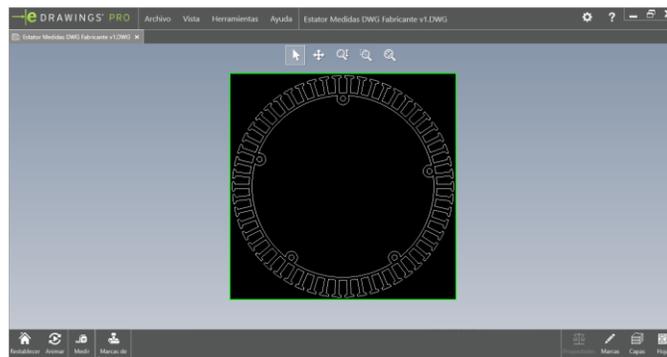


Figura 3.7 Estator comercial DXF

Como se muestra en la Figura 3.8, aplicando el formato Dxf y la ayuda de su herramienta “Medir” se tomaron las medidas requeridas para el desarrollo del modelado, a partir del cual se obtienen las medidas de la Tabla 3.5.

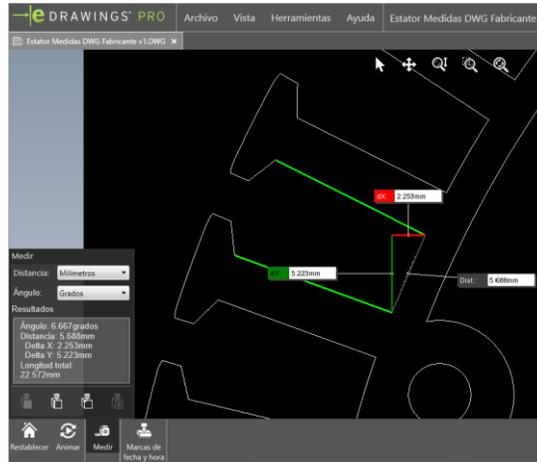


Figura 3.8 Dxf herramienta medir

Una vez obtenidas las medidas completas y detalladas del documento del proveedor Dxf se realizó el modelado sólido en 3D del estator que se utilizó para este proyecto, imagen que se demuestra en la Figura 3.9.

En la figura se muestran detalladas las áreas importantes de la simulación, de color verde se distingue el estator y por requerimientos del modelado en JMAG se dibujan las bobinas contempladas para la sección del flujo magnético, estas se identifican con el color amarillo.

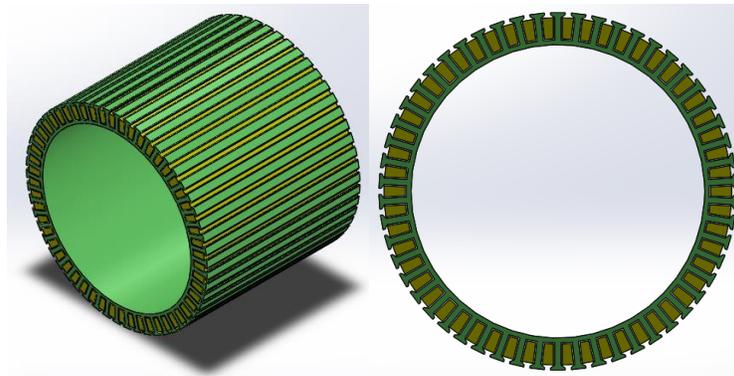


Figura 3.9 CAD de Estator y bobinas

- Rotor

Continuando con el modelado del rotor y tomando en cuenta la configuración del generador y las medidas de geometría de los elementos magnéticos, en este caso los imanes, se crea una geometría con un ángulo en la base interior obteniendo la Figura 3.10

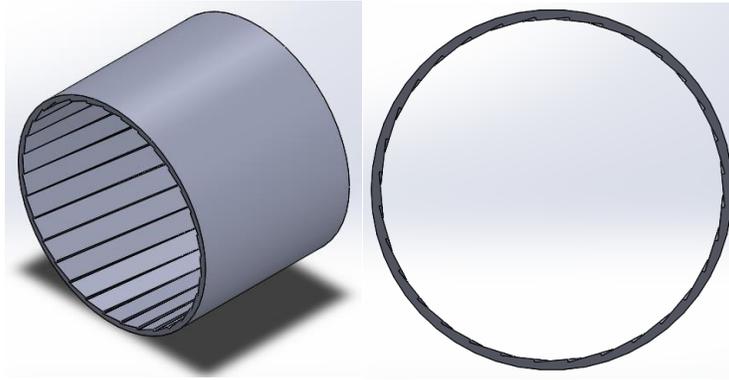


Figura 3.10 CAD de Rotor

- **Imanes**

Los imanes se clasificaron con colores diferentes para distinguir la diferencia de polaridad, utilizando el color rojo para los polos positivos y el color negro en los polos negativos, lo cual se puede visualizar en la Figura 3.11.

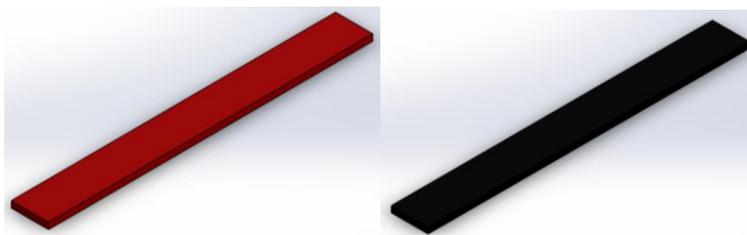


Figura 3.11 CAD de Imanes

- **Ensamble del generador**

Como último paso en el modelado CAD, al terminar las piezas de forma individual se unieron creando un solo ensamble del generador que se muestra en diferentes ángulos en la Figura 3.12.

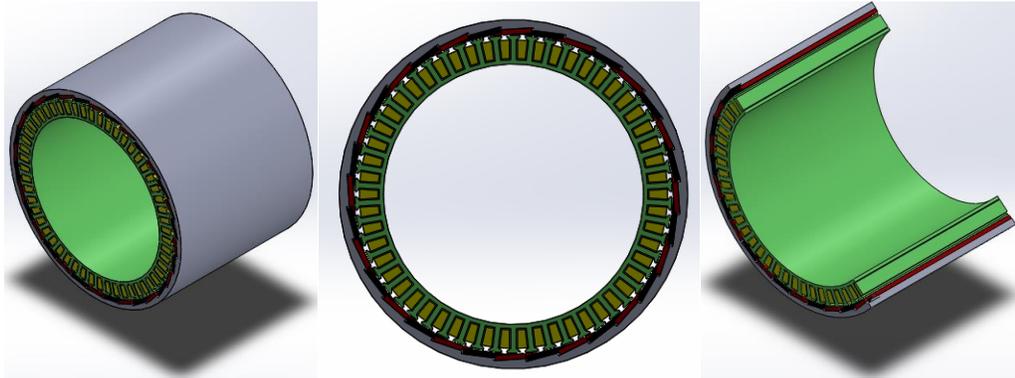


Figura 3.12 Ensamble SolidWorks

### 3.6 Simulación de FEM

El análisis mediante elemento finito, independientemente del software donde se ejecute, siempre tendrá tres principales etapas, las cuales van a ser tan precisas como la aplicación y el software a utilizar lo demanden. Las tres etapas son: pre - procedimiento, resolución y post - procedimiento. En la primera etapa se definen todas 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 funciones dentro de la geometría. Por último, en la tercera etapa se tiene la solución y análisis de resultados. (Miller, 2019)

Teniendo el diseño CAD del generador podemos pasar a utilizar Jmag para iniciar con el proceso de la simulación. Se guarda una extensión de archivo .DXF, esta extensión permite abrir automáticamente el modelo en JMAG. Al abrir JMAG, de primera vista se encuentra el inicio.

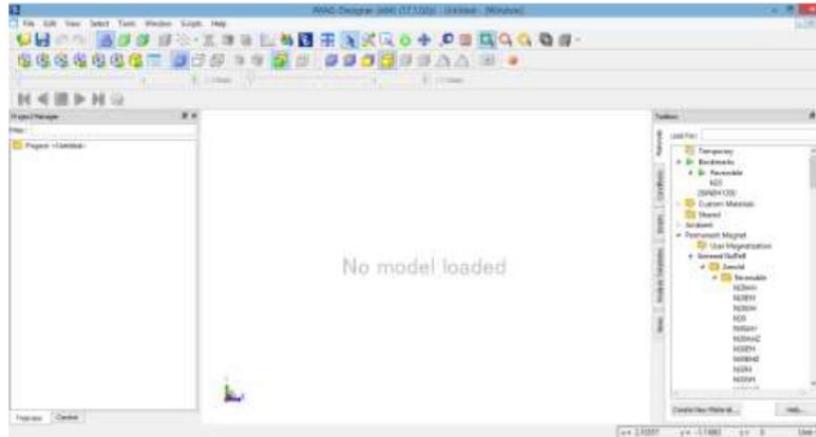


Figura 3.13 Pantalla principal JMAG

Una vez abierto el archivo importado de SOLIDWORKS, se abre automáticamente en el espacio de trabajo de JMAG, colocándose el dibujo de la geometría en la pantalla principal, después de esto se procede al editor de geométrica en la opción que se muestra en la Figura 3.14.



Figura 3.14 Barra de herramientas JMAG

### 3.6.1 Crear la geometría

Entrando por primera vez al editor de la geometría, se nos presenta un modelo en 2D que se ve de color blanco como se muestra en la Figura 3.15, permitiéndonos seleccionar cada área de sólidos y vacíos. Con lo anterior el programa puede determinar si existe algún error en la geometría como alguna parte mal dibujada o la apertura de una figura. Una vez comprobado que la geometría esta correcta se inicia el trabajo en el editor.

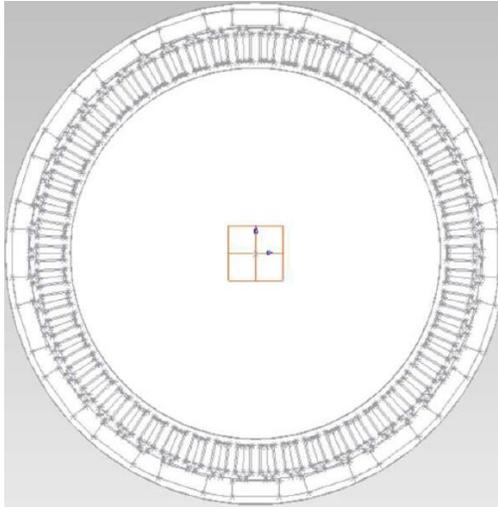


Figura 3.15 Geometría en el editor geométrico de JMAG

El editor te permite editar la geometría o incluso crear una nueva; sin embargo, ya se tiene una geometría lista, en esta parte por motivos de diseño se eliminan las partes o piezas que no contengan un valor en material o como antes se mencionó, se elimina el vacío o espacios en blanco de la geometría. Al final se ingresa al “PROJECT MANAGER” y en la pestaña “ASSEMBLY” se dará clic en la capa 0 del modelado. En el menú abierto se dará clic en “EDIT SKETCH” y por último se seleccionarán las partes para eliminar.

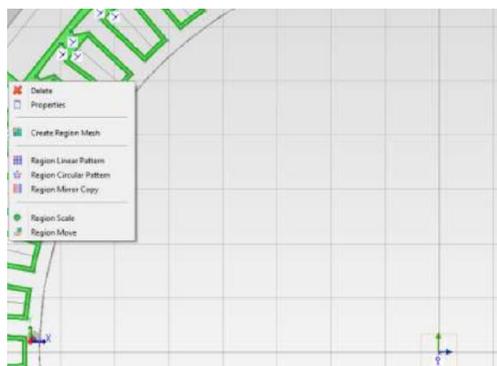


Figura 3.3 Eliminación de material no ferromagnético

Este último paso se debe repetir con todos los elementos que resten en donde se tenga que eliminar alguna parte de la geometría. Terminando este proceso de guarda el modelado y se da clic en “BACK TO JMAG-DESIGNER”.

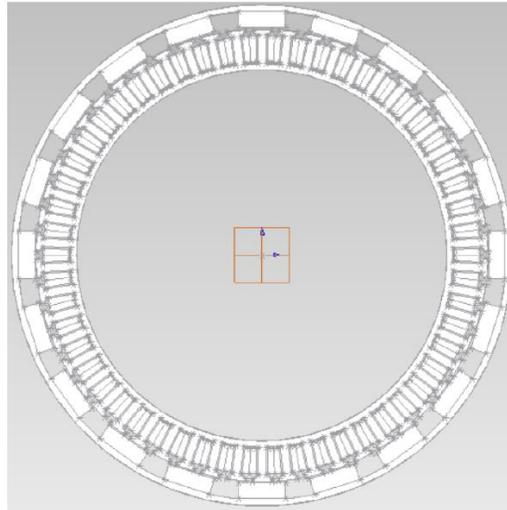


Figura 3.4 Geometría en JMAG

### 3.6.2 Especificar materiales

En el siguiente paso se eligen los materiales de forma manual. Lo más importante de este análisis es conocer la gráfica de flujo y saturación magnética de los materiales, ya que una mala elección de ellos conducirá a resultados erróneos en la simulación.

Jmag nos ofrece un catálogo extenso de materiales a elegir de acuerdo a las necesidades del proyecto y permite crear una simulación real sobre los efectos de los mismos, estos materiales tienen características físicas. Si los materiales no se encuentran en la librería, se puede crear desde cero, donde ser necesario obtener las curvas antes descritas para el fabricante.

En la Tabla 3.6, se muestran las características básicas que son configurables en JMAG.

Tabla 3.6 Características básicas de JMAG

<b>Propiedades magnéticas</b>
-------------------------------

<ul style="list-style-type: none"> <li>• Curva B-H</li> </ul>
<b>Propiedades eléctricas</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Resistividad</li> <li>• Permeabilidad</li> </ul>
<b>Propiedades mecánicas</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tipo de mecánica</li> <li>• Expansión térmica</li> </ul>
<b>Propiedades térmicas</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Propiedades de calor</li> <li>• Calor específico</li> </ul>

Iniciando la selección JMAG te ofrece colocar colores a los elementos, esto para ayudar a distinguir cada uno de estos de una manera más sencilla y cómoda

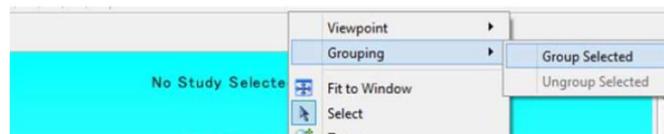


Figura 3.5 Agrupación de elementos

Ase abre el “PROYECT MANAGER” y seleccionamos la opción “ASSEMBLY” para seleccionar el color, se selecciona el grupo en el que se quiera trabajar, se da clic derecho y se selecciona “PROPERTIES”, como se muestra en la Figura 3.13.

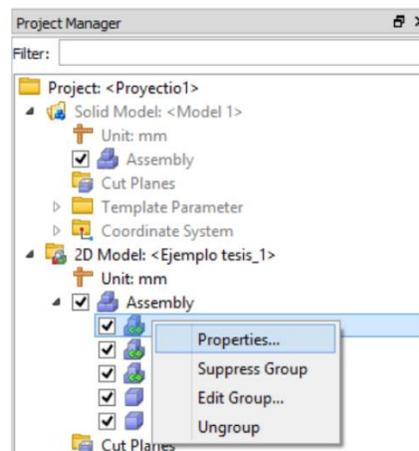


Figura 3.6 Propiedades para los grupos

Estando en el menú mostrado en la Figura 3.14 se podrá seleccionar el color, transparencia y nombre del grupo. Aquí es importante que se coloque un nombre distintivo que represente perfectamente el elemento del que se trata cada grupo, así se evitara confusiones en los siguientes pasos.

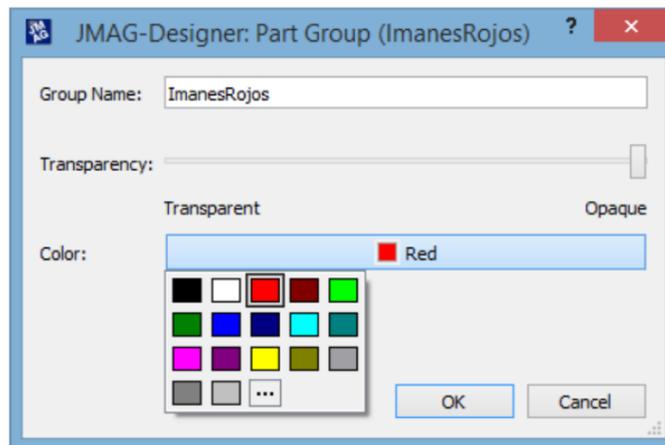


Figura 3.7 Características para elementos de JMag

El siguiente paso es elegir un estudio, JMag ofrece una gama de estudios magnéticos, estructurales y asimétricos. Para elegir el tipo de estudio se ingresa a “PROJECT MANAGER”, se dará clic en la pestaña de “2D MODEL”, se elegirá “NEW STUDY” y en “MAGNETIC” se elegirá “TRANSIENT ANALYSIS”.

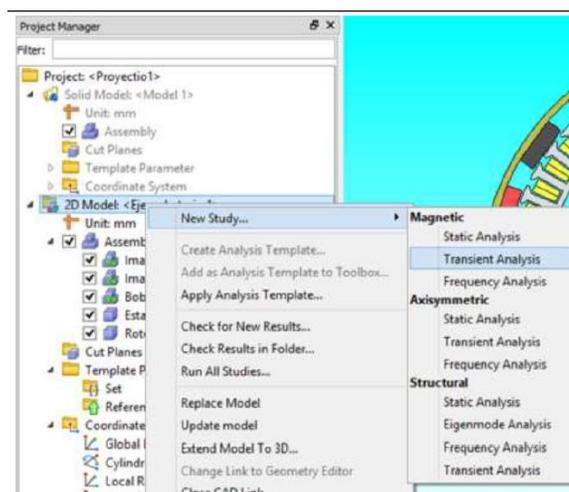


Figura 3.8 Selección de estudio

A continuación, se incluirán los materiales seleccionados para su construcción, para esto se debe tener los grupos de elementos previamente hechos con el paso anterior. Teniendo los grupos se seleccionará el grupo de modelado con un clic, haciendo que se marque en color rojo, después se va a Toolbox a la derecha de software, se da clic en “MATERIALS”. En este menú se puede encontrar el material de dos formas, la primera es ir al navegador en las carpetas predeterminadas hasta encontrar el material adecuado. Y la otra opción es escribiendo el nombre en el cuadro de búsqueda “LOOK FOR”.

En caso de no encontrar el material requerido se podrá crear uno nuevo, para esto es necesario las características magnéticas, eléctricas y térmicas del material. Una vez encontrado el material este se debe ser arrastrado hasta la parte del modelado en donde se utilizará.

Para este caso los materiales se definieron por sus propiedades y el área en donde se colocaron quedando de la siguiente manera:

- Bobinas: Cobre
- Imanes: N35 Ferrita
- Estator: Aleación de metal 20JNEH1200
- Rotor: Aluminio

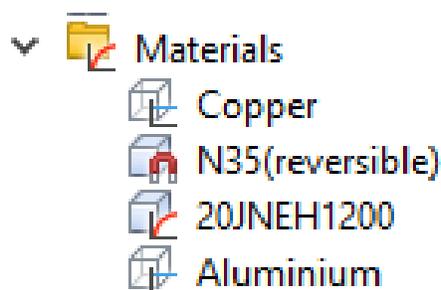


Figura 3.9 Material JMag

### 3.6.3 Especificar condiciones

Jmag es un programa de simulación que nos permite crear comportamientos exactos sobre reacciones de generadores electros, pero esto se es necesario

especificar condiciones como; voltaje, rpm, Hertz, longitud de la máquina, selección del área de rotación, efecto de torque entre otros. Estas condiciones son todas aquellas que delimitan el modelo dinámico del PMSG, así como todas las características eléctricas y magnéticas necesarias para la simulación. Para este trabajo se le dará un torque, una rotación y se incluirá el circuito eléctrico.

Para esto se es necesario tomar en cuenta dos condiciones:

1.-La creación del circuito eléctrico con el que trabajará el PSMG, para poder agregar el circuito se dará clic derecho en el estudio, luego clic en la opción “ADD CIRCUIT”, enseguida se abrirá un nuevo menú que se muestra en la Figura 3.17, en el que, por medio de herramientas predeterminadas, se podrá diseñar el circuito eléctrico de la máquina.

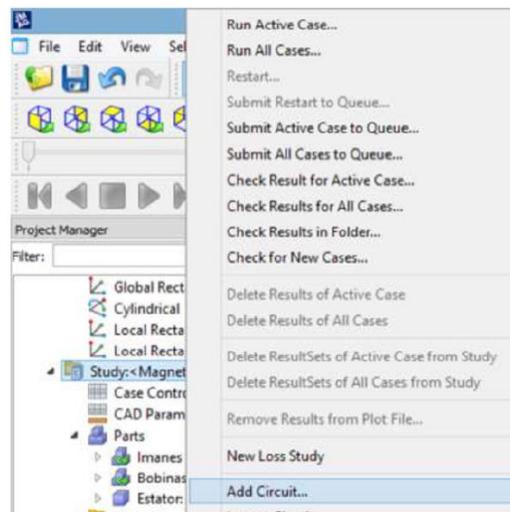


Figura 3.10 Agregar circuito al modelo

Para este trabajo se eligió una configuración de tipo estrella en donde se colocaron 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. El circuito eléctrico quedo definido como se muestra en la Figura 3.18.

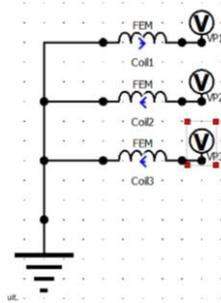


Figura 3.11 Conexión tipo estrella

Una vez creado el circuito se ingresarán los parámetros eléctricos en cada elemento que se muestra en la Figura 3.19.

Figura 3.12 Menú de configuración de parámetros eléctricos

2.- La segunda condición es de suma importancia es la colocación de devanados en el estator, estos influyen completamente en los resultados de salida del estudio. Este proceso se realiza para determinar la colocación y dirección del de las bobinas del circuito diseñado previamente. Fue necesario utilizar una herramienta web **WINDING EDITOR** de la página <https://www.emetor.com> que nos permite obtener un diseño de bobina óptimo para nuestro generador. En emetor puedes comparar el factor de bobinado fundamental máximo para diferentes combinaciones de número de polos, ranuras y en donde corresponde. (Emetor, s.f.)

La herramienta muestra automáticamente si nuestra configuración es apta, por medio de colores que indican si un devanado es concentrado. En la Figura 3.20 se muestra la vista de una configuración de 32 polos y 54 ranuras. Comprobando la distribución de ranuras y polos se dará clic sobre la configuración seleccionada

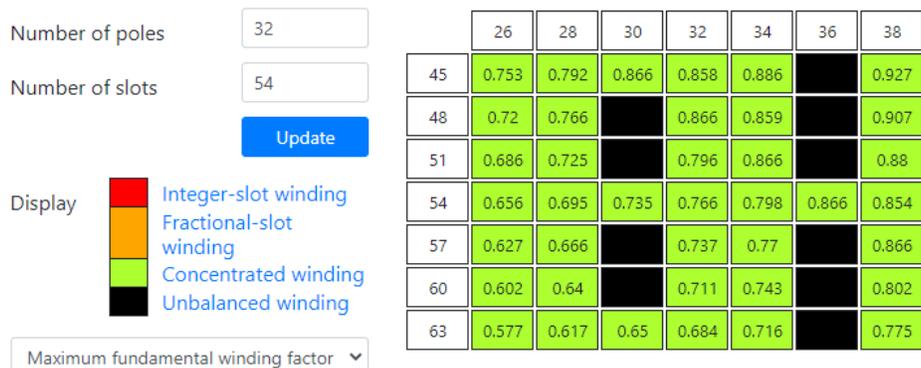


Figura 3.13 Configuraciones en Emetor

esta herramienta nos ofrece la opción de elegir entre varias configuraciones de conexión del embobinado tomando en cuenta el número de polos y ranuras que antes se mencionó.

La elección de la configuración que más convenga depende de los resultados al finalizar la simulación, es necesario crear una simulación por cada configuración que se desea probar.



Figura 3.14 Configuración de bobinas Emetor

### 3.6.4 Generar mallado

El mallado genera elementos sólidos tetraédricos en 3D, elementos de vaciado triangulares en 2D y elementos de viga en 1D. Una malla está compuesta por un tipo de elementos a no ser que se especifique el tipo de malla mixta. Los elementos sólidos son apropiados para modelos de gran tamaño. Para esto se dará clic en 2PROYECT MANAGER” y a continuación en la opción “MESLI” donde se abrirá el menú que se observa en la Figura 3.22.

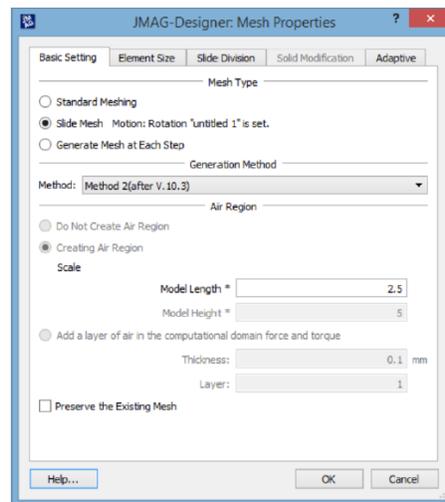


Figura 3.15 Configuración de malla en JMAG

En esta parte se seleccionará “SLIDE MESH” que genera una malla para un modelo completo que incluye el espacio entre rotor y el estator junto con el movimiento del rotor. Este método se puede utilizar para modelos de análisis con movimiento de rotación que se asemeja a un motor que tiene dirección de separación cilíndrica. La precisión del análisis puede mejorar ajustando el tamaño del elemento del espacio, para esta configuración se elegirá un tamaño de 2.5. Una vez ejecutada la creación, la malla se observa como en la Figura 3.23.

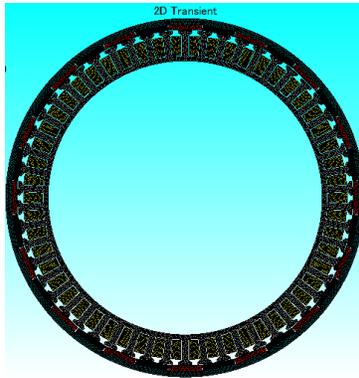


Figura 3.16 Malla en JMAG

### 3.6.5 Correr análisis

Completando los pasos anteriores y una vez ingresadas todas las características en el modelo se procede a correr la simulación dando clic en la pestaña “PROJECT MANAGER”, y se dará clic en el estudio transitorio, y a continuación en “PROPERTIES” como se muestra en la Figura 3.24.

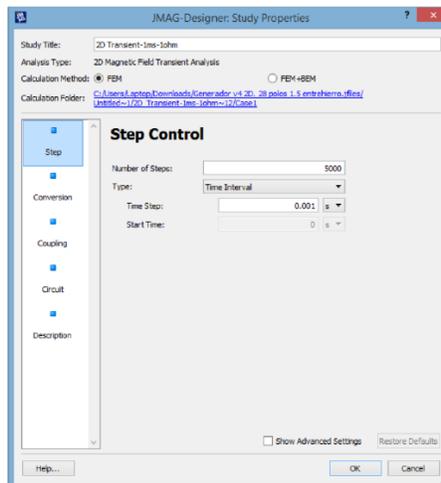


Figura 3.17 Menú de selección de pasos y tiempo de simulación

En este menú se pueden seleccionar el número de pasos y el tiempo de simulación para cada paso. Este debe ajustarse de acuerdo con la precisión que se busca en los resultados.

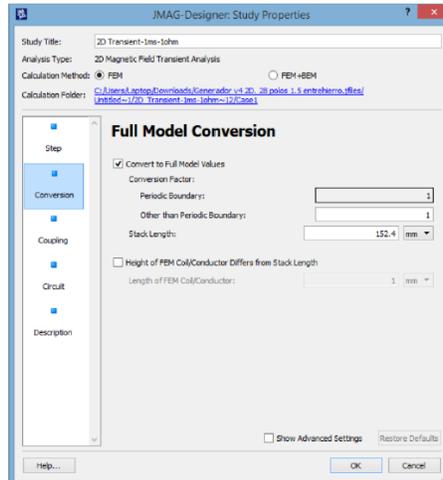


Figura 3.18 Menú de la configuración de la longitud axial del modelo

Por último, en la pestaña “CONVERSION” se elegirá la longitud del modelo. Al final se dará clic derecho en el estudio, y se seleccionará la opción “RUN ACTIVE CASE” con lo que el análisis iniciará con su ejecución.

### 3.6.6 Evaluar resultados

Al terminar el estudio por parte de JMAG, los resultados estarán disponibles en el menú “PROJECT MANAGER” en la opción “RESULTS” – “GRAPHS” que se muestra en la Figura 3.26. En este menú se podrá dar clic en cualquier variable que se necesite mostrar en forma de gráfica.

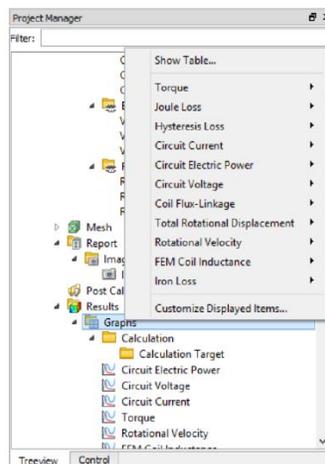


Figura 3.19 Menú de graficas a mostrar

Una gráfica de los resultados se muestra en la Figura 3.27.

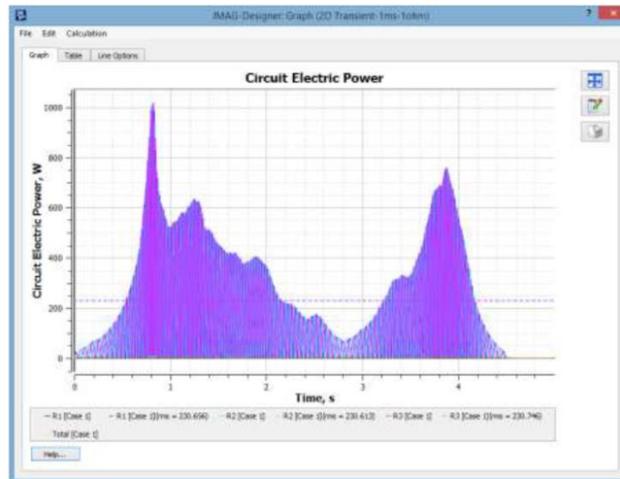


Figura 3.20 Muestra de potencia para el estudio

En la evaluación fue necesario tener más de una versión del generador, como antes se mencionó se es necesario repetir los pasos por cada simulación que se necesite crear y al final al comparar los resultados se seleccionará la opción más optima de las versiones simuladas.

En el proyecto fue necesario crear aproximadamente 10 versiones diferentes con modificaciones mínimas en los datos.

### 3.6.7 Comparación de datos y selección

Este último después de comparar las diferentes simulaciones de las versiones creadas del generador se definió que la versión v8 (10 grados) fue la opción más eficiente en cuanto resultados. Los datos importantes para comparar se muestran de la Figura 3.28 a la Figura 3.31.

1. Torque:

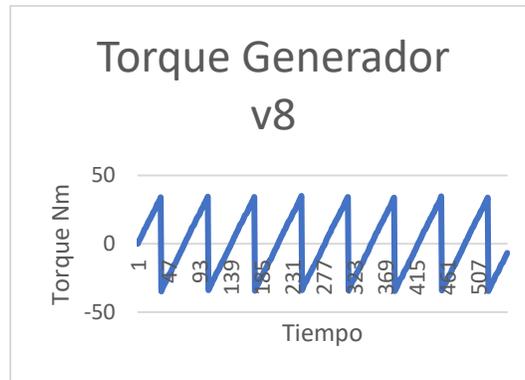


Figura 3.21 Torque (v8)

2. Densidad magnética:

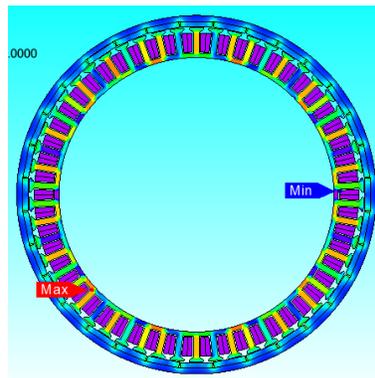


Figura 3.22 Densidad magnética (v8)

Generador v8	
Densidad magnetica	
Max	1.6484
Min	0.0002

3. Frecuencia de fase

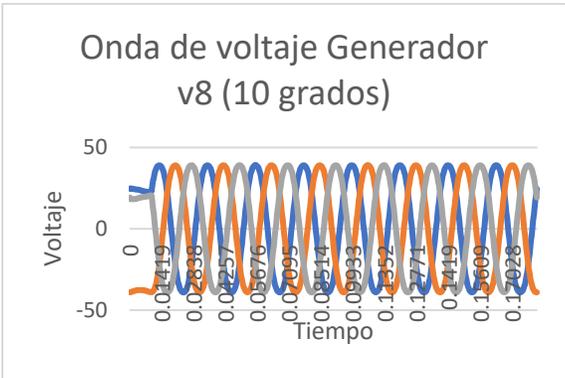


Figura 3.23 Frecuencia de fase(v8)

4. THD:

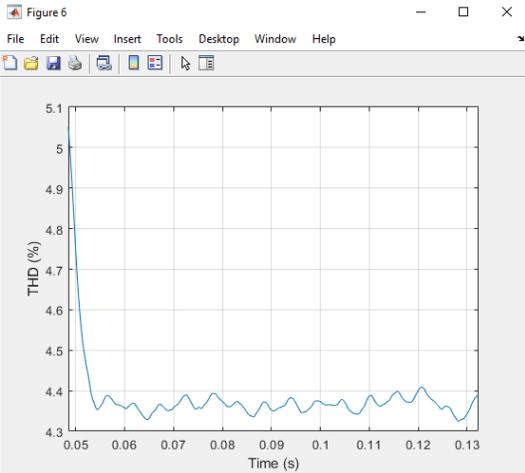


Figura 3.24 THD(v8)

Se presentan los resultados obtenidos con la última simulación realizada, esta se eligió debido a que la distorsión armónica total cumple con los requerimientos iniciales. La versión final del PMSG se obtuvo con base en varias simulaciones como se explicó en el capítulo anterior.

#### 4.1 Geometría

La geometría final quedó configurada con 28 polos y 54 ranuras y se puede ver en la Figura 4.2. Las medidas de la geometría se muestran en la tabla 3.5 del capítulo 3 con la nomenclatura correspondiente. Las medidas del estator fueron definidas por el fabricante y las medidas del estator son ajustadas al número de imanes, su tamaño, el de fase y el entrehierro. Se queda con un total de 28 imanes del material neodimio colocados de forma equidistante colocados en la parte interior del rotor. El rotor fue diseñado con bases donde pueden ser colocados los imanes. Los imanes fueron calculados con una longitud de 19.05 mm y una altura de 6.35 mm, por la colocación de los imanes en el rotor el entrehierro tiene una variable de espacio de 1.5 a 1 mm.

Por ranura se consideró un doble bobinado ya que esta configuración mostro en las simulaciones una menor cantidad de armónicos en la señal del devanado por ranura.

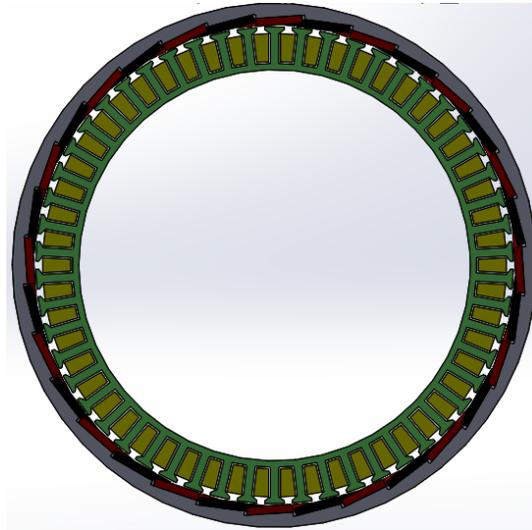


Figura 4.1 Geometría final

## 4.2 Malla

El proceso de la malla divide la geometría en elementos de forma triangulares que permiten de manera más sencilla la resolución de problemas. La discretización del modelo cuenta con 70882 elementos y 36230 nodos. La calidad de la malla generada muestra un 80% de elementos entre 0.7 -1.0, lo que se considera como una muy buena calidad. El resto de la malla muestra los elementos entre 0.2% y 0.7% que marca una calidad buena. Esto genera que el mallado arroja resultados en su mayoría de buena precisión, ya que la simulación seleccionada muestra que con esta configuración de malla se puede obtener un porcentaje bajo de THD.

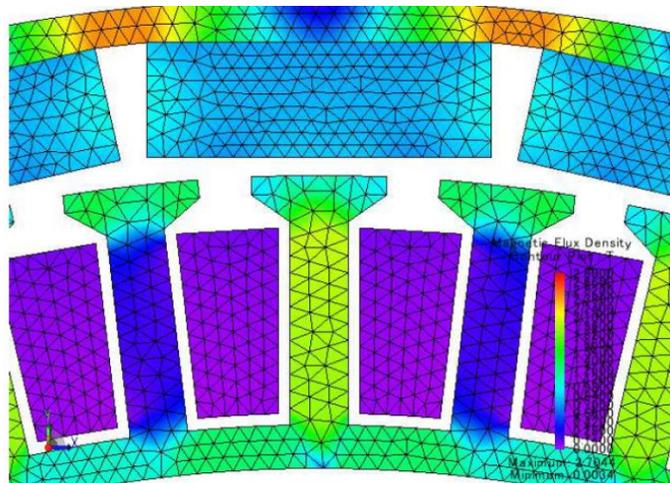


Figura 4.2 Malla y flujo magnético JMAG

### 4.3 Rendimiento

En la figura 4.3 podemos ver la densidad del flujo magnético. Se puede observar el circuito magnético conformado por el rotor, estator e imanes. El circuito magnético es el que da camino al flujo obteniendo una densidad de flujo desde 1 a 2.8 Teslas en diferentes tiempos del giro en el PMSG. La densidad mayor de 2.8 Teslas se encontró en el núcleo del rotor, mientras que en el estator se alcanzó un valor pico de 2.1 Teslas. Aun con la existente alta densidad de flujo se esperan bajas pérdidas a causa de a la distancia del entrehierro debido a la baja frecuencia de operación.

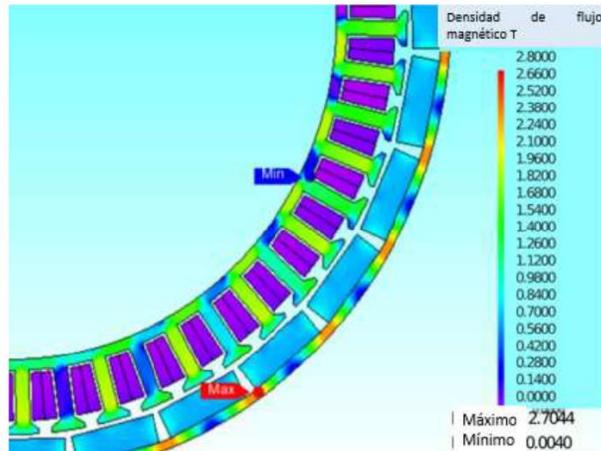


Figura 4.3 Flujo magnético en PMSG

El comportamiento del PMSG en condiciones sin carga se muestra mediante las características mecánicas y eléctricas en la siguiente figura. Se obtiene un torque sinusoidal en vacío. 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 y 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 4.4.

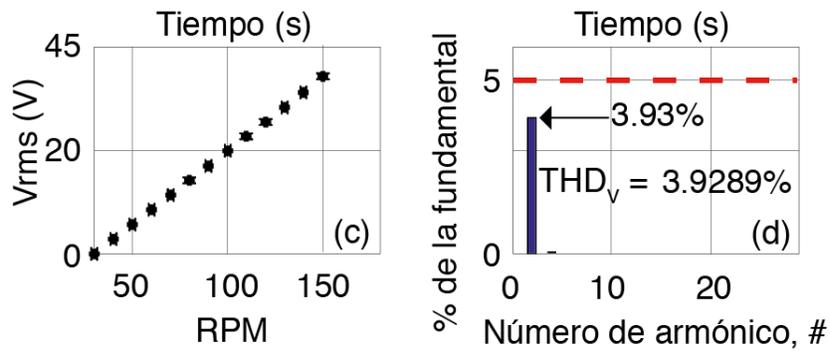


Figura 4.4 RPM Y Numero de armónicos

## 4.4 Simulaciones de velocidad

### 4.4.1 Velocidad variable.

En las siguientes graficas se presenta el comportamiento para una velocidad angular en operación de lazo abierto y una carga resistiva de 1 ohm.

Dadas las variaciones en la velocidad que se muestran en la Figura 4.5 la frecuencia cambia de acuerdo con la ecuación 3. El torque es directamente proporcional a la velocidad del generador eléctrico y en el rendimiento de potencia del generador, se observa que la potencia máxima es de 1.3 KW a una velocidad de 135 rpm. Tanto el voltaje como la corriente tienen el mismo comportamiento por la resistencia de carga de 1.

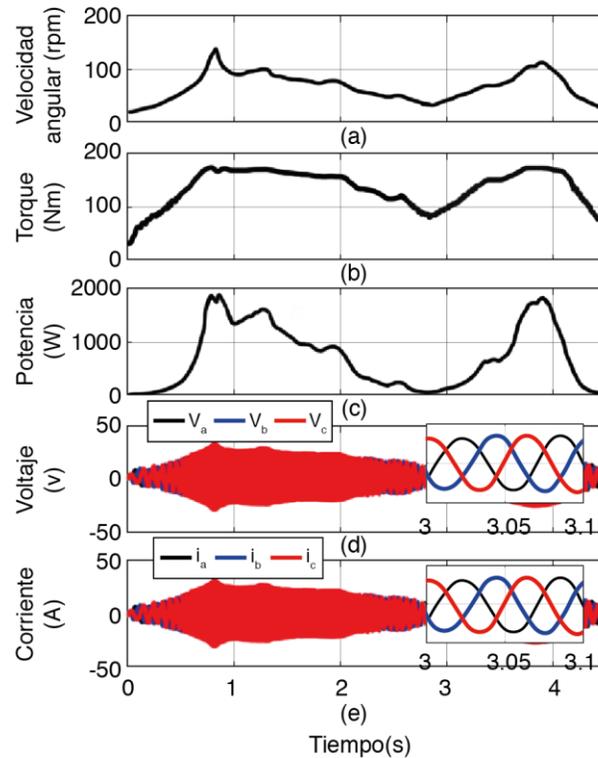


Figura 4.5 Perfil de viento variable

#### 4.4.2 Velocidad máxima

Para obtener un estudio real de condiciones del PMSG se crearon simulaciones a velocidad máxima que establece los valores máximos que se pueden proporcionar de voltaje, corriente, torque y potencia.

La corriente se comportó de una forma ordenada haciendo que la amplitud de onda respondiera de la misma manera, la onda llego a un valor pico de 31.31 volts, esta onda la podemos observar en la figura 4.6. Por el valor constante de la velocidad en la simulación, la frecuencia no tiene ninguna alteración, esta se puede calcular midiendo el tiempo que tarda la onda de voltaje en dar un ciclo por completo, por lo tanto, la frecuencia es de 42 Hz como se muestra en la Figura 4.7.

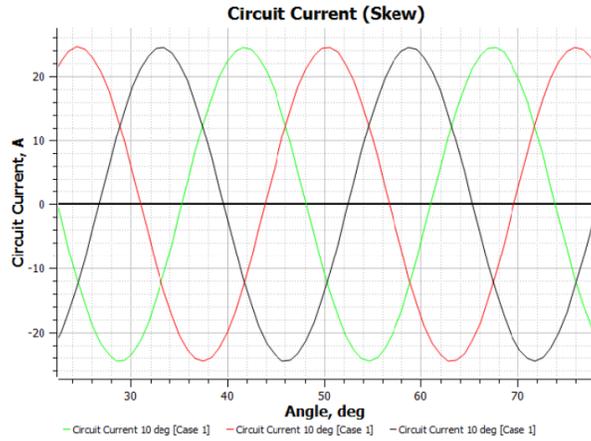


Figura 4.6 Corriente eléctrica a velocidad máxima

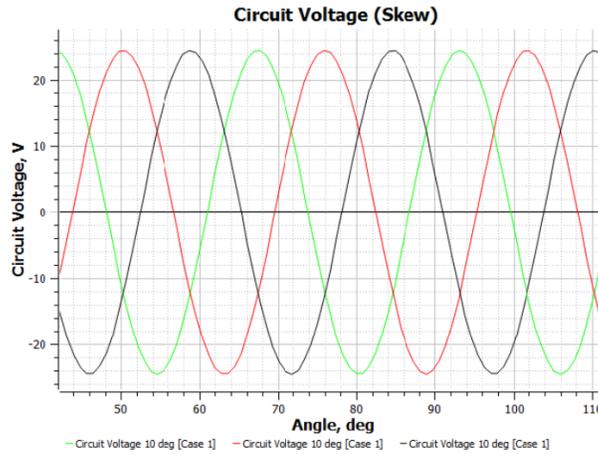


Figura 4.7 Voltaje a velocidad máxima

El torque generado en esta simulación se encuentra entre 160 y 165.5 Nm este se muestra en la Figura 4.8 presentándonos un comportamiento sinusoidal. Es importante recordar que el torque es la presencia de fuerza que produce el giro del PMSG, nótese que los valores que van variando son negativos, lo que indica que se trata de un generador, si estos valores de torque fueran positivos se trataría de un motor.

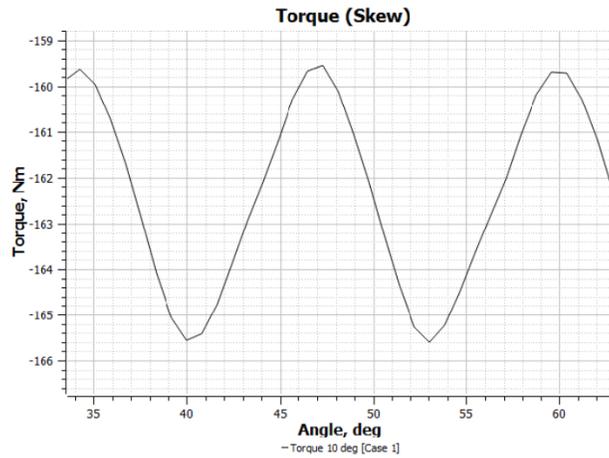


Figura 4.8 Onda de torque a velocidad máxima

Por último, cumpliendo el último requerimiento inicial tenemos la potencia instantánea de salida del PMSG que se muestra en la Figura 4.9 esta se encuentra en 1 kW.

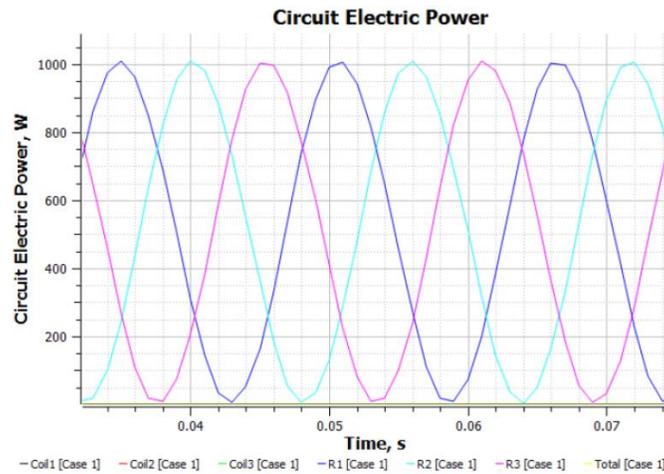


Figura 4.9 Potencia en velocidad máxima

### 5. Conclusiones

---

En este proyecto de tesis se describe la metodología de diseño, validación y construcción del generador en donde la potencia producida a velocidad nominal se encuentra en un rango de 1 kW para su aplicación en PMSG's de baja potencia. El establecer los requerimientos de diseño, permiten delimitar los rangos de operación y dimensionado del generador eléctrico, esto con base en una correcta investigación de acuerdo a la potencia de diseño, en este trabajo de investigación se presentan referencias de rangos correspondientes en el diseño de máquinas de imanes permanentes. Estas se pueden utilizar para ayudar a alimentar consumos eléctricos alejados de la infraestructura eléctrica o bajar el consumo eléctrico en lugares donde el viento tenga velocidades bajas contemplando de 11 a 16 km/ hora en adelante.

La herramienta de prediseño como SolidWorks, es un punto de partida en el diseño del generador, que nos permite realizar cálculos rápidos en el tamaño inicial de la geometría de la máquina y rendimiento. Además, de proponer nuevas ideas de diseño, debido a que la herramienta puede extenderse para el diseño de otros niveles de potencia, posteriormente debe ser evaluado a través de FEM.

Basados en las simulaciones de elementos finitos, se obtuvieron los parámetros a verificar en el rendimiento del generador eléctrico. Con el fin de encontrar un punto óptimo en el diseño de geometría que cumpliera con los requisitos de los parámetros iniciales. 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 de simulaciones de máquinas eléctricas.

Las medidas finales del generador hacen que este sea pequeño y fácil de transportar, haciéndolo efectivo para zonas de vientos de velocidades bajas como autopistas, camellones, zonas rurales alejadas de caminos y ciudades.





## 7. Bibliografía

1. A. D. Eólica. (10 de Mayo de 2003). *A. D. Eólica*. Obtenido de <http://xn--drmsttre-64ad.dk/wp-content/wind/miller/windpower%20web/es/tour/wtrb/async.htm>.
2. Association, N. (28 de Diciembre de 2021). NEMA standards publication ANSI/NEMA MG 1-2016.
3. association, N. e. (2009). *NEMA standars publication ANSI/NEMA MG 1-2009*. Washington DC, USA.
4. Baldomero, M. (2012). Análisis de diferentes álabes de un generador de eje vertical para oxigenar estantes de peces. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*.
5. C. Y. Hsiao, S. N.-Y. (2014). *Design of high performance permanent-magnet*.
6. C., D. (1994). *Hanselman, Brushless Permanent Magnet Motor Design*. USA: McGraw-Hill, Inc.
7. Chapman, S. J. (2012). *Maquinas electricas*. Df, México.
8. Design, S. T. (En línea). <https://www.jmag-international.com/>.
9. Dubois, M. (2004). *Optimized Permanent Magnet Generator Topologies for Direct-Drive*.
10. Emotor. (s.f.). <https://www.emotor.com>.
11. Energyavm. (18 de septiembre de 2018). *Energyavm*. Obtenido de <http://www.energyavm.es/energias-renovables-y-no-renovables/>.
12. Gomez, W. (2019). *Diseño de generadores sincrónico miltipolo de imanes permanentes para su uso en aerogeneradores de baja potencia*. Oaxaca.
13. GWEC, G. W. (Febrero de 2018). Obtenido de <http://gwec.net/publications/global-wind-report-2/>
14. Hpolinder, M. M. (2013). Electrical drives for direct drive renewables energy systems. En M. M. Hpolinder. Woodhead Publishing Limited.
15. J. Rodríguez Amenedo, J. B. (2003). *Sistemas Eólicos de Producción de Energía Eléctrica*, Madrid, España.
16. J.A.A.Berhouague. (2009). *Energía eólica en México*. México.
17. M. R. J. Dubois. (2004). *Optimized Permanent Magnet Generator Topologies for Direct-Drive*.
18. M.A. Hernandez -Rodriguez, R. I.-C.-G. (2018). Designing a transverse fluz PMSG with analytical methods for aplicaciones in wind turbines. *Central America and Panama convention*.
19. Madani, N. (2011). *Design of a Permanent Magnet Synchronous Generator for a Vertical Axis*. Royal Institute of Technology Stockholm, Sweden.
20. Madani, N. (2011). *Design of a permanent magnet synchronous generator for a vertical axis wind turbine*. Sweden.

21. Madani, N. (2011). *Design of a Permanent Magnet Synchronous Generator of a Vertical Axis* .
22. Miller. (1 de Julio de 2019). *What is the finite-element method?* Obtenido de [https://www.jmag-international.com/engineers\\_diary/011/](https://www.jmag-international.com/engineers_diary/011/)
23. Miller, J. R. (2010). *Design of Brushless Permanent Magnet Machines*.
24. N. Goudarzi, W. Z. (2013). *A review on the development of wind turbine generators across*. International Journal of Dynamics and Control.
25. N. Goudarzi, W. Z. (2013). *A review on the development of wind turbine generators across the world*.
26. Polinder, H. (2011). Overview of and trends in wind turbine generator systems. *Proceedings of IEEE power and energy society meeting*.
27. Polinder, M. M. (2013). *Electrical drives for direct drive renewable energy systems*. USA: Woodhead Publishing Limited.
28. Soto, D. J. (2019). Aerogeneradores de baja potencia.
29. Stiebler, M. (2008). *Wind Energy Systems for Electric Power*. Berlin Alemania.
30. V. Yaramasu, B. W. (2015). *High-power wind energy conversion systems: State-of-the-art and emerging technologies*. Proceedings of the IEEE.
31. Z.C., F. B. (2006). *Power Electronics in Wind Turbine* . Shanghai.



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL  
ESTADO DE MORELOS

## FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS e INGENIERÍA

Programas educativos de calidad reconocidos por CIEES, CACEI y CONACYT  
SGI Certificada en la norma ISO 9001:2015 e ISO 21001:2018



Facultad de Ciencias  
Químicas e Ingeniería

FORMATO T-2  
NOMBRAMIENTO DE COMISIÓN REVISORA  
Y DICTAMEN DE REVISIÓN

Cuernavaca, Mor., a 27 de junio de 2023.

**Dr. Luis Cisneros Villalobos**  
**Dr. José Gerardo Vera Dimas**  
**Dr. Outmane Oubram**  
**Dr. Roy Lopez Sesenes**  
**Dr. Javier de la Cruz Soto**  
**PROFESORES DE LA FCQeI**  
**P R E S E N T E**

Por este conducto, me permito informarle que ha sido asignado como integrante de la Comisión Revisora de la tesis que presenta el Ing. Alan Paul Pedraza Sandoval titulada: DISEÑO Y SIMULACIÓN DEL ROTOR DE IMANES PERMANENTES PARA EL GENERADOR SÍNCRONO DE UNA TURBINA EÓLICA DE BAJA POTENCIA realizada bajo la dirección del Dr. Roy Lopez Sesenes y Dr. Javier de la Cruz Soto en el Programa Educativo de Maestría en Ingeniería Eléctrica y Electrónica. Agradezco su valiosa participación en esta Comisión y quedo a sus órdenes para cualquier aclaración o duda al respecto.

**A T E N T A M E N T E**  
*Por una humanidad culta*

**DRA. VIRIDIANA AYDEÉ LEÓN HERNÁNDEZ**  
**DIRECTORA DE LA FCQeI**

### D I C T A M E N

**DRA. VIRIDIANA AYDEÉ LEÓN HERNÁNDEZ**  
**DIRECTORA DE LA FCQeI**

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

En respuesta a su amable solicitud para formar parte de la Comisión Revisora de la tesis mencionada y una vez realizada la revisión correspondiente, me permito informarle que mi VOTO es:.

### D I C T A M E N

NOMBRE	VOTO	FIRMA
Dr. Luis Cisneros Villalobos	Aprobatorio	*Se anexa firma electrónica
Dr. José Gerardo Vera Dimas	Aprobatorio	*Se anexa firma electrónica
Dr. Outmane Oubram	Aprobatorio	*Se anexa firma electrónica
Dr. Roy Lopez Sesenes	Aprobatorio	*Se anexa firma electrónica
Dr. Javier de la Cruz Soto	Aprobatorio	*Se anexa firma electrónica



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL  
ESTADO DE MORELOS

Se expide el presente documento firmado electrónicamente de conformidad con el ACUERDO GENERAL PARA LA CONTINUIDAD DEL FUNCIONAMIENTO DE LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS DURANTE LA EMERGENCIA SANITARIA PROVOCADA POR EL VIRUS SARS-COV2 (COVID-19) emitido el 27 de abril del 2020.

El presente documento cuenta con la firma electrónica UAEM del funcionario universitario competente, amparada por un certificado vigente a la fecha de su elaboración y es válido de conformidad con los LINEAMIENTOS EN MATERIA DE FIRMA ELECTRÓNICA PARA LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE ESTADO DE MORELOS emitidos el 13 de noviembre del 2019 mediante circular No. 32.

### Sello electrónico

**VIRIDIANA AYDEE LEON HERNANDEZ** | Fecha:2023-06-27 23:23:42 | Firmante

azuTkGErZawtXkweQdP6Q7NragFvSfXEWHaYqu9mfMclAxSNBUcbitRtILfqbOCzc5VR+ez/8qqn4Ku/4c2j+cMmgq4YPIkjp2gT5i3yc5CGAM6w6MB1Eddq7q824K4PALskD07M660URMvpzYRaRIJWghkN4ZAZvBBq/5nBrricw54fyMr+kWdG76sUzd3NCRkObA8lFQB9zLX9bKGQyXk7LU0XzXq1mU0qeB1JA2bX2lxx8tfsRJdJXUvxq6YcBHM4BRnrRLCsTJKiAdm6+soPHkoHj7j7i24bmv706ryNY6suNJIgX318+vOAIEocwiC7yS/8AMNuOYbSsozeIA==

Puede verificar la autenticidad del documento en la siguiente dirección electrónica o escaneando el código QR ingresando la siguiente clave:



[ztiqBNJl3](#)

<https://efirma.uaem.mx/noRepudio/VB4ppTnHtiOMqCPRGLsfCdTFc6OS9Wgi>





UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL  
ESTADO DE MORELOS

Se expide el presente documento firmado electrónicamente de conformidad con el ACUERDO GENERAL PARA LA CONTINUIDAD DEL FUNCIONAMIENTO DE LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS DURANTE LA EMERGENCIA SANITARIA PROVOCADA POR EL VIRUS SARS-COV2 (COVID-19) emitido el 27 de abril del 2020.

El presente documento cuenta con la firma electrónica UAEM del funcionario universitario competente, amparada por un certificado vigente a la fecha de su elaboración y es válido de conformidad con los LINEAMIENTOS EN MATERIA DE FIRMA ELECTRÓNICA PARA LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE ESTADO DE MORELOS emitidos el 13 de noviembre del 2019 mediante circular No. 32.

### Sello electrónico

**JOSE GERARDO VERA DIMAS | Fecha:2023-06-28 09:30:39 | Firmante**

Xtb929GGYQLdZrPQNuWf5VRT3UqhTJxkV9agjoaQRK5GXvoKVR18SKKhCRadv8GiVTLURwALukVB6hPvNKfVSOpu+EsWSpqc2aCT43C3kkvUARdC9huCY5wMhRDzGu0/GFellEO6a7kEOZbPAHF8hUV5TmBCsol0wksXdMb9z4Vdl4PE48792IQ9YCR7JTd/kaU8RdxnTbDnJHR1nQMvCyVpUcptETOLfCdxnHz84LPa/cjbAyJd/FV2vLLNRKSEfJIoQx8BVKu5sCX/dDbfYWx8F0c+ebkojQnORsTFm/HJWi+zohDV6/UZpGgXp16XQ/1awaU+QZ0mjbfLiA==

**LUIS CISNEROS VILLALOBOS | Fecha:2023-06-28 18:02:08 | Firmante**

g6rvf1FiWK+F2CmzjvUyQ7vJcwwdDth5Wl56DNNFnP5mR+95bnCWSNoaYgLLH5zJW9kOYip65Mqhc3Mzj7Jl3VBeGx9x5mWG9qLAEsR4KtAC+a0EBosxqmWnxDxo3kBDZ4S3eUPN5faK7Wl3iM7/icC5TIgfpDfpTOMWyss+YKMIp2o3QJRnMIA2AM4XKYTug2ahOF679b9RuqXTVStzBW8Xhgdrf6rx0TTU0mBf9E1ep6+xB6CjbpJmYPEXgu0aL/QOif/KXkO V/AAO9hhUmYgluYG4SLvODY8cwk7+fd4vaaHwFclHpiPY7OEWeWzgm1ulmiEIVcmh5o8sn4g==

**OUTMANE OUBRAM | Fecha:2023-06-28 23:50:03 | Firmante**

iiuzVbPWbq+vVfzCwu7AvhI9eEsVNIIt0GGFo+Djs068zal+3KcZReilAlgrcZ93T70uBhgstAf3klz5RMiD2POdQZ1loOL97/Uc2moQ/Wjpw0U81aGvRDZAAaXulcosTagT48OJp4Jh5ZP/g5beCg9ayTIK6L03Sc3dRUGtilprollDOZ2QPA2tfbeaAEGps9ieYZnEj2m0QYTgS1Jc0i+xitXJ4N7+HpgGpflLQUnYIA55BEvYw3FDI7hFDfeZuaghfjOyVsbjvBdKHsKoSi+gibtSIJBZ+cktXUbdy+qRwEg/xrL2UNDmGjYI0eAqUo9D0W3TxEzXSWbbvcxg==

**ROY LOPEZ SESENES | Fecha:2023-06-29 21:31:42 | Firmante**

n5/S4HWRrZSbIr8k2m3RiJvWvRMPicqo4i7LBhoY1fhH72EzrsXvDAxVoA7vyx8PEHSIEBVXaYSeT6nkD09FOJqckm+ZKY24nSsrDnDEIFW+m43U9suBadIVzOyXAMa/iqrJ44Ce+yGKfxXlumeZlouFjpYVaExpYTu8lBFva600mGLRpm9jRGON/iIDHn48KCK76TXSKKFR39ce5OhIPukpOYBPArVHyZuQDk8T0kInEXjpCZThVgiyQcAp86X8iy/d6aGypmmFTm/wGD5F/ugrWcsmaioMNH/bPFWb8f2TEbtCx5G/oGsrLG9+Oxzp4pwsSq815YdlzlxN0moA==

Puede verificar la autenticidad del documento en la siguiente dirección electrónica o escaneando el código QR ingresando la siguiente clave:



G0qya7kEi

<https://efirma.uaem.mx/noRepudio/sy8eJ01ifVVfInvnwsz3kXo18aGcl2CIQ>

