SUBSECRETARIA DE EDUCACION
SUPERIOR TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO
Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez

**TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO**
**INSTITUTO TECNOLÓGICO DE TUXTLA GUTIÉRREZ.**

**INGENIERIA ELÉCTRICA**

**RESIDENCIA PROFESIONAL**

# DISEÑO Y CARACTERIZACIÓN DE UN GENERADOR DE FLUJO AXIAL PARA UN AEROGENERADOR DE BAJA POTENCIA DE UN 1 KW.

**ASESORES**

**Ing. KARLOS VELAZQUEZ MORENO (Int)**
**Dr. JOSUE ENRIQUE ZARATE (Ext)**

**RESIDENTE**

**C. MIGUEL ÁNGEL SANTOS MENDOZA**

**N.C. 14270532**

**TUXTLA GUTIÉRREZ, CHIAPAS, A 23 DE JULIO DEL 2019.**

# RESUMEN

En el proyecto se presenta información bibliográfica y análisis de la información de logros alcanzado en los estudios basados en simulaciones y de forma experimental en el tema de diseño y fabricación de generadores de flujo axial. Analizando sus características físicas y dimensiones, así como también cada una de las variables que afectan su funcionamiento, incluyendo información relacionada con el tipo de material utilizado en su fabricación, y las variables o parámetros que se consideran en su condición de operación.

Para hacer el estudio y análisis de la fabricación del generador fue necesario hacer una especificación del tipo de generador a analizar, incluyendo su caso de aplicación y las variables que intervienen en el proceso de operación, rendimiento, desgaste y eficiencia. Para tal efecto, se realizó una investigación bibliográfica, necesaria para conocer el estado del estado en el tema de generadores de flujo axial, recurriendo principalmente a estudios y artículos publicados con investigaciones y desarrollos tecnológicos que presentan resultados en la mejora tanto del diseño como de eficiencia en generadores de flujo axial basados en prototipos experimentales con diferencias en su construcción.

Con la información obtenida a partir de cada una de las fuentes citadas, fue posible conocer muchas de las diferencias presentes en cada uno de los generadores, resultando que todos los generadores estudiados fueron sometidos a pruebas con la finalidad de evaluar su desempeño. Esto permitió hacer algunas propuestas de posibles mejoras con respecto al uso de materiales y nuevas propuestas para la mejora de los materiales y condiciones operativas de la máquina, incluyendo una optimización en el proceso de enfriamiento del estator.

Por otra parte, la información que se presente tendrá cierto enfoque a fallas que presentan los generadores de flujo axial, así como también a las causas que las generan. Al mencionar las causas que provocan las fallas damos conocimiento a quien pretende fabricar un generador y considere cada una de ellas y presente el interés de cómo solucionarlas o en su caso que medidas preventivas se pueden aplicar, con la finalidad de evitar que estas ocurran.

Finalmente, se trata de dar un conocimiento amplio y de calidad para la fabricación de un generador de flujo axial con fundamentos a los trabajos revisados en el estado del arte, con la finalidad de alcanzar resultados favorables que permitan mejorar el desempeño del generador diseñado y fabricado, evitando los posibles problemas en la eficiencia, daños o fallas en la máquina. Lo que permite asegurar cierta confiabilidad de funcionalidad en el proceso de fabricación de la máquina para fines experimentales, incluyendo la reducción de costos de fabricación.

# AGRADECIMIENTOS

**A mis padres**

Que con trabajo, amor y esfuerzo me educaron y apoyaron a pesar de todos los obstáculos y dificultades en mi formación profesional; por enseñarme a no darme por vencido en momentos difíciles que la vida me presente, por la motivación a siempre ser mejor persona y por el amor incondicional que siempre tendré de ellos.

**A mis hermanos**

Pedro Santos Mendoza, Juan Ramiro Santos Mendoza y la Sta. Karina Lucero Santos Mendoza. Por estar siempre conmigo y apoyarme en cada momento que lo necesite durante todo el proceso de formación.

**A mis profesores y asesores**

Por compartir conocimientos de las clases que me impartieron en los horarios de dichas clases o en horarios extra clases. Por la motivación de adquirir cada vez más conocimientos y experiencias que nos guían a una mejor preparación. Por las observaciones, opiniones y sugerencias: al Dr. Josué Enrique Zarate y al Ing. Karlos Velázquez Moreno.

**AL INSTITUTO TECNOLÓGICO DE TUXTLA GUTIÉRREZ**

Por la oportunidad de realizar y culminar mi educación académica del nivel superior. Por la oportunidades y conocimientos adquiridos en ella.

## INDICE

**INTRODUCCIÓN** ..... 6
**CAPITULO I** ..... 8
**GENERALIDADES.** ..... 8
**1.1 Antecedentes** ..... 8
**1.2 Estado del arte** ..... 9
**1.3 Descripción de los generadores** ..... 11
**1.4 Definición de las Partes Principales del Generador** ..... 13
**1.5 Motores eléctricos** ..... 15
**1.6 Motores de Corriente Alterna (AC)** ..... 15
**1.7 Problemas a Resolver** ..... 19
**1.8 Justificación** ..... 19
**1.9 Objetivo** ..... 19
**1.10 Metodología** ..... 20
**CAPITULO II** ..... 21
**FUENTES DE ENERGIA.** ..... 21
**2.1 Tipos de Energía** ..... 21
**2.2 Energía Solar** ..... 22
**2.3 Energía de Biomasa** ..... 24
**2.4 Energía Hidráulica** ..... 25
**2.5 Energía geotérmica** ..... 26
**2.6 Energía Eólica** ..... 27
**2.7 Principios de Operación de las Maquinas Eólicas** ..... 28
**2.8 Parámetros Eléctricos** ..... 29
**2.9 Energía Eólica** ..... 34
**Capitulo III** ..... 36
**Generadores Eléctricos en Aplicaciones Eólicas.** ..... 36
**3.1 Generador Eléctrico Flujo Radial** ..... 37
**3.2 Generador Eléctrico de Flujo Axial** ..... 39
**3.3 Tipos de generadores eléctricos de flujo axial de imanes permanentes.** ..... 40
**3.4 Materiales aislantes** ..... 46
**3.5 Principio de funcionamiento de generadores eléctricos** ..... 47
**3.6 Electromagnetismo en un generador eléctrico** ..... 47
**3.7 Imanes permanentes** ..... 48
**3.8 Clasificación de imanes** ..... 48

**3.9 Criterios de selección del generador eléctrico ..... 50**
**Capitulo IV ..... 52**
**METODOLOGÍA ..... 52**
**4.1 Modelo para la fabricación de generador eléctrico de flujo axial de imanes permanentes ..... 52**
**4.2 Modelo del generador eléctrico de flujo axial de imanes permanentes con núcleo de aire ..... 54**
**4.2.1 Polos magnéticos ..... 55**
**4.2.2 Excitación mediante Imanes Permanentes ..... 55**
**4.2.3 Selección de Imanes ..... 56**
**4.2.4 Rotores ..... 58**
**4.2.5. Número de espiras en las bobinas ..... 60**
**4.2.6 Estator del generador ..... 62**
**4.3 Eficiencia del prototipo ..... 65**
**4.4 Perdidas ..... 65**
**4.4.1 Perdidas en el cobre por efecto Joule ..... 65**
**4.4.2 Perdidas Mecánicas ..... 66**
**4.5 Análisis de las Probables Fallas y Consecuencias en el Generador ..... 67**
**4.6 Presupuesto Promedio para la Fabricación del Generador Eléctrico de Flujo Axial de Imanes Permanentes con Núcleo de Aire ..... 68**
**4.7 Conclusión ..... 69**
**4.8 Recomendaciones ..... 69**
**BIBLIOGRAFIA ..... 70**
**BIBLIOGRAFIA DE IMÁGENES ..... 72**

# INTRODUCCIÓN

Los problemas de contaminación medioambiental debidos a la quema de combustibles fósiles (carbón, petróleo y gas natural) son ya temas predominantes en nuestra sociedad. Los gases contaminantes son causantes del calentamiento global, de la lluvia acida y de los problemas de contaminación urbana. Con el rápido incremento del consumo de energía, la contaminación se está convirtiendo en una seria amenaza para el futuro. Los problemas de emisiones pueden mitigarse mediante el énfasis en las fuentes de energía renovables ambiente limpias. La conservación de la energía por el uso más eficiente de la electricidad y por lo tanto una reducción en el consumo de combustible, no es solamente una forma de reducir la contaminación ambiental, si no a demás de preservar los cada vez menores recursos de combustibles [5].

El hombre emplea en todas sus actividades la energía, por tal motivo ha buscado formas de transformarla para darle un uso o aplicación dependiendo de las necesidades que tenga. Sabemos que los procesos que más satisfacen al hombre, como la energía eléctrica, son causantes potenciales de contaminación, es decir, al utilizar un combustible para su generación. Es necesario contar con alternativas que permitan obtener la energía eléctrica sin afectar nuestros recursos naturales y medio ambiente. Afortunadamente contamos con alternativas que pueden apoyarnos como es el caso del sol, viento y agua [3].

El empleo y perfeccionamiento de la utilización de las fuentes renovables de energía podría ser considerado como el inicio de la una tercera “Revolución Industrial”, la transición a una economía de baja emisión de dióxido de carbono, permite dar giro trascendental en la lucha contra el cambio climático, mejorar la seguridad energética, y reducir significativamente las tensiones geopolíticas del presente [4].

Anualmente, el sol derrama sobre nuestro planeta 4,000 veces más energía de la que hoy consumimos. El sol es la fuente de vida de nuestro planeta y el origen de las fuentes de energía que la humanidad ha empleado en las distintas etapas de su historia. La utilización de la energía solar, el viento, la corriente de los ríos, entre otras, más que una alternativa, son la única solución posible a las exigencias energéticas.

Varios grupos de investigación (Universidad de Oxford, Universidad de Cambridge, Instituto de Aviación de Moscón, Instituto de Materiales de Jena, Alemán, Instituto de Ciencia de Materiales de Barcelona, Bellaterra, España, Universidad Nueva de Lisboa, Departamento de Ingeniería Electrotécnica, Portugal, China y Japón) han explorado la posibilidad de utilizar materiales superconductores en la construcción de máquinas eléctricas, en particular, de generadores sincrónicos, con la intención de obtener una mejor potencia especifica [1].

El viento es una fuente de energía renovable segura, medioambientalmente limpia y económica. El mundo tiene enormes recursos de energía del viento. Los recientes avances tecnológicos en turbinas eólicas de velocidad variable, en electrónica de potencia y en accionamientos de máquinas han hecho de la energía eólica una forma de energía competitiva, tanto como la energía obtenida de los combustibles fósiles [5].

El uso del viento se ha aprovechado desde los molinos de granos hasta la producción de energía eléctrica en pequeña y gran escala, con el uso de aerogeneradores. Un aerogenerador transforma la energía cinética del viento en energía mecánica por medio de un rotor eólico, transportando esta energía por medio de un eje y en ocasiones usando cajas multiplicadoras, al generador eléctrico [2].

Los aerogeneradores son dispositivos mecánico - eléctrico que cuentan con alabes o palas orientados de tal forma, que el viento al pasar sobre ellos, mueven un generador eléctrico. El diseño de los aerogeneradores presenta complicaciones debido a que se requiere del estudio de las condiciones de velocidad y frecuencia de los vientos, tiene que estar a una cierta altura en la cual se disponga de las condiciones de velocidad y frecuencia de los vientos óptimos, de tal manera que el viento se desplace sin la presencia de obstáculos, su estructura debe estar bien cimentada y soportar las deformaciones por las fuerzas de la naturaleza y el clima [3].

La energía eólica es una fuente de energía renovable, abundante, limpia y disponible en todas las regiones. La utilización de esta fuente de energía para la generación de energía eléctrica, a escala comercial, tiene su inicio desde hace poco más de 30 años [1].

# CAPITULO I
# GENERALIDADES.

## 1.1 Antecedentes

Históricamente, el desarrollo de la sociedad humana se ha basado en el aprovechamiento de fuentes energéticas primarias de tipo fósil. Producto de su uso indiscriminado se ha generado un deterioro ambiental global, que puede llegar a niveles insoportables si no se toman correctivos oportunos. Evidencias palpables de la degradación del ecosistema mundial son: el calentamiento global, la disminución de la capa de ozono y la lluvia acida [10].

Observando el desarrollo de la tecnología a lo largo de la historia, es un hecho evidente que el hombre siempre ha tenido la necesidad de capturar el viento para aprovechar su energía. El viento ha demostrado ser un recurso crucial en el progreso del hombre, puesto que el desarrollo de muchas actividades: navegar, volar aviones, producir energía mecánica y, más recientemente, producir energía eléctrica, ha sido posible gracias al viento [9].

La búsqueda de fuentes alternativas de energía, por medio de estudios enfocados al aprovechamiento de los recursos energéticos no convencionales, se ha ido desarrollando desde hace mucho tiempo atrás, respecto a energía eólica uno de los pioneros en la industria eléctrica americana fue Charles Francis Brush, este ingeniero inventó la que se piensa es la primera turbina eólica de funcionamiento automático para generación de electricidad de la historia. Con el paso del tiempo y los avances tecnológicos la importancia y eficiencia de la energía eólica se ha incrementado y con esto los estudios de dispositivos y mecanismos para el aprovechamiento de esta energía [7].

Un generador de electricidad es la fuente de energía en los sistemas eléctricos y electrónicos, debido a que proporciona potencia eléctrica (tensión y corriente). En todos los generadores se realiza una transformación de energía, es decir, se parte de un tipo de energía bien sea mecánica, térmica, química o de cualquier otro tipo, hasta llegar a la eléctrica [12].

Los aerogeneradores son dispositivos mecánico - eléctrico que cuentan con alabes orientados de tal forma, que el viento al pasar sobre ellos, mueven un generador eléctrico. El diseño de los aerogeneradores presenta complicaciones debido a que se requiere del estudio de las condiciones de velocidad y frecuencia de los vientos, tiene que estar a una altura en la cual él requiere del estudio de las condiciones de velocidad y frecuencia d ellos vientos, tiene que estar a una altura en la cual el viento no tenga obstáculos, su estructura debe estar bien cimentada y soportar las deformaciones por las fuerzas de la naturaleza y el clima [12].

Para ayudar a reducir costos y minimizar el mantenimiento tanto como sea posible, muchos de los desarrolladores de turbinas eólicas emplean generadores de imanes permanentes (GIP) de impulsión directa (sin caja de engranajes), mientras tengas un diseño de generador mecánicamente simple. Se pueden utilizar varias topologías de generador de imanes permanentes [8].

El diseño de un generador de flujo axial, consiste en un par de discos delgados de hierro que giran alrededor de un eje perpendicular al mismo, y en cuyo contorno se sitúan un conjunto de imanes, los cuales crean un campo magnético paralelo el eje de giro.

Un diseño adecuado para un generador con flujo axial de estator central, se basa en dos piezas rotoricas que se ubican lateralmente solidarias al eje de la máquina. Esta configuración de dos entrehierros tiene la ventaja de cancelar las fuerzas longitudinales sobre el estator, además, esta topología minimiza la inductancia de dispersión.

Algunos prototipos de generadores de flujo axial de doble rotor trifásico han sido construidos con estator de material no ferromagnético, el rotor consta de dos discos con imanes permanentes, obteniendo eficiencias superiores al 90%. En la construcción de un prototipo con 16 imanes por disco, 12 bobinas en la armadura de plástico (4 bobinas por fase) se obtuvieron potencias de 1 KW a 300 RPM y 2 KW a 500 RPM [2].

Para el generador axial de bobinas con núcleo de aire el conductor, se enrolla sobre un soporte hueco y posteriormente se retira este quedando con un aspecto parecido al de un muelle. Se utiliza en frecuencias elevadas. Cada bobina produce un voltaje en función de cómo se conecten, que pueden ser de 2 tipos: en serie y en paralelo.

La conexión en serie consiste en unir el final de la primera bobina con principio de la siguiente para que los voltajes se sumen, por otro lado, para conexión en paralelo los inicios se conectan entre sí y el voltaje resultante es el mismo que el de una bobina, con la diferencia de que se puede conseguir el doble de corriente. En paralelo es inevitable que el voltaje de salida de cada bobina sea ligeramente diferente en corrientes parasitas que desperdician energía [8].

## 1.2 Estado del arte

Alejandro Andrés Abarzúa Martínez en su memoria para optar por el título de Ingeniero Civil Electricista presentada en la Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Ingeniería Eléctrica, bajo el tema: “Aspectos de diseño de generadores sincrónicos de flujo axial para la aplicación en aerogeneradores “en Santiago de Chile 2012, presenta un estudio preliminar de campos magnéticos para imanes diferentes en geometría y composición con el fin de determinar la configuración que genera una mayor densidad de flujo magnético, además del diseño del generador basándose en los requerimientos y limitaciones [14].

Un tipo de maquina eléctrica que es utilizada con más frecuencia en aplicaciones de turbinas de viento es el generador de imanes permanentes. Este es ahora el preferido en la mayoría de los pequeños generadores de turbinas eólicas de hasta por lo menos de 1 kW de potencia, y también se pueden utilizar en turbinas de viento más grandes. En estos generadores, los imanes permanentes proporcionan el campo magnético, por lo cual no hay la necesidad del uso de devanados de campo o el suministro de corriente a este [12].

El estudio de los Generadores Eléctricos de Flujo Axial de Imanes Permanentes (GEFAIP) ha tomado fuerza en los últimos años por la necesidad de poco espacio, bajo ruido y baja vibración en especial para el uso específico de aerogeneradores [2].

Los generadores de flujo axial son lo que se encuentran con mayor frecuencia a disposición. La principal característica de estos generadores es su capacidad de entregar energía eléctrica a bajas revoluciones, con una eficiencia aceptable [8].

Julio Javier Murillo Julián en su proyecto de final de carrera presentado en la Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Industrial bajo el tema: “Diseño de un alternador de flujo axial con imanes permanentes” en España 2012, desarrolló el diseño del alternador, tomando en consideración para todo el proceso de diseño los parámetros de velocidades máximas y mínimas, ya que la capacidad de generación está en función de la velocidad del viento. Finalmente, realizó un análisis de la onda de inducción magnética en el entrehierro mediante el método de elementos finitos, para garantizar que la densidad de flujo magnético fuera el adecuado para el generador, utilizando un software para el análisis por elementos finitos conocido como FEMM (*Finite Element Method Magnetics*) [13].

Jesús Antonio Enríquez Santiago en su trabajo “Dimensionado de generadores eléctricos de flujo axial de imanes permanentes para aerogeneradores de baja potencia”. Presenta la construcción de un generador de imanes permanentes con un estator de núcleo solido metálico laminado, y el embobinado de este de forma toroidal, aislando la parte metálica con las bobinas con mylar (se colocó alrededor de todo el anillo base del estator) para aislar la parte superficial de las bobinas utiliza fibra de vidrio y epóxico aislante. El rotor se fabricó con material laminado en forma de disco con 8 imanes por disco, imanes de forma rectangular, los resultados no fueron favorables ya que el estator con núcleo metálico tiene muchas perdidas en el núcleo por calor. Lo que llevo a un calentamiento excesivo en las bobinas y aislantes hasta el grado de dañarse el prototipo [2].

Claudio Medina Cristian Ernesto en su tesis de Maestría “Dimensionado de generadores eléctricos de flujo axial de imán permanente para aerogeneradores de baja potencia”. Diseña y construye un generador de flujo axial de imanes permanentes, después de un análisis de los tipos de núcleos decide trabajar con generadores de núcleo de aire por su mayor eficiencia y sus pérdidas mínimas en generación, además de las facultades que ofrece conexiones según sea el propósito que se busque. Especifica que se pueden realizar conexiones en serie y paralelo y las características en cuanto a voltaje y corriente que ofrecen.

Los resultados que obtiene son muy eficientes, pero menciona el cuidado que hay que tener con respecto a las temperaturas en la máquina de igual manera propone el uso de 2 rotores con 12 polo en cada uno para así aumentar la potencia generada y estos fueron reflejados en los resultados eficientes obtenidos [7].

Víctor Hernández G. en la publicación de su Artículo "Diseño de un aerogenerador con fines didácticos". Realiza un estudio de las condiciones de velocidad del viento del lugar con respecto a ello hizo el diseño de los componentes del aerogenerador: generador eléctrico, rotor eólico y sistema de orientación. Decidió trabajar con un generador de 6 bobinas un para para cada fase y un solo rotor son 8 imanes rectangulares, el proyecto solo quedo en una propuesta [3].

## 1.3 Descripción de los generadores

### Generador de Electricidad

Un generador transforma la energía mecánica en energía eléctrica. Un generador eléctrico es todo dispositivo capaz de mantener una diferencia de potencial eléctrica entre dos de sus puntos (llamados polos, terminales o bornes) transformando la energía mecánica en eléctrica. Esta transformación se consigue por la acción de un campo magnético sobre los conductores eléctricos dispuestos sobre una armadura (denominada también estátor). Si se produce mecánicamente un movimiento relativo entre los conductores y el campo, se generará una fuerza electromotriz (F.E.M.) [16].

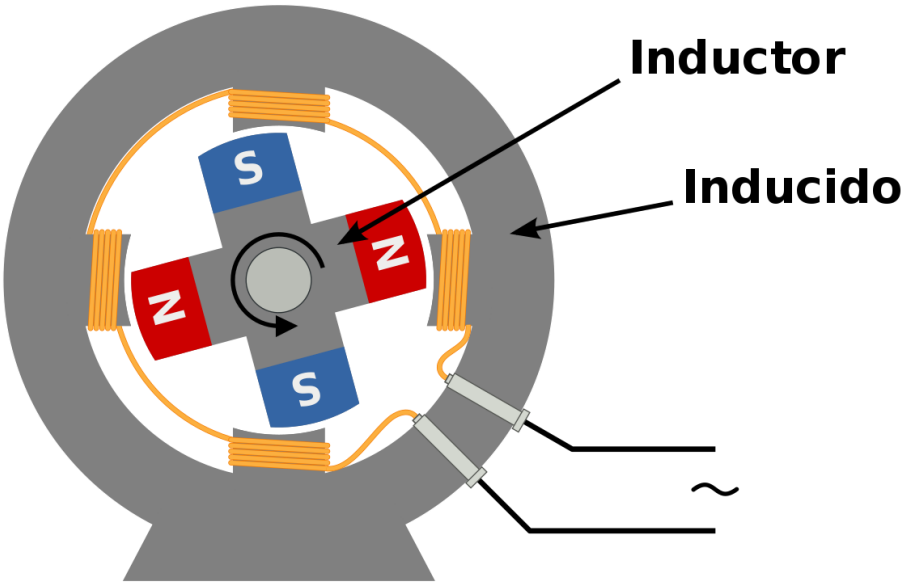



**Figura 1: generador eléctrico. [1]**

**Clasificación de los Generadores Eléctricos**

Los generadores se encuentran divididos en dos tipos, según el tipo de energía y señal producida.

**Generadores según el tipo de energía.** Estos generadores se dividen en dos grupos: *mecánicos* y *químicos*.

**Generadores mecánicos:** Los generadores mecánicos comprenden los dinamos, los cuales trabajan con *corriente continua*, y los alternadores, que operan con *corriente alterna*.

**Generadores químicos:** Los generadores químicos por su parte comprenden las pilas, las baterías y los acumuladores.

**Generadores según la señal eléctrica producida.** Estos se dividen en generadores de *corriente continua* y *corriente alterna*.

**Generadores de corriente continua:** Estos generadores llamados también dinamos no son muy utilizados en aplicaciones de altas potencias, debido a que solo se pueden conectar a la red eléctrica a través de convertidores electrónicos que transforman la corriente continua en corriente alterna.

**Generadores de corriente alterna:** Llamados también alternadores, son los más utilizados en las grandes centrales de generación de energía (Hidroeléctricas, Termoeléctricas, Parques Eólicos, etc.).

**Generador de Inducción Trifásico**

Un generador de inducción trifásico, es una clase de generador eléctrico que es mecánicamente y eléctricamente similar al motor de inducción trifásico. El generador de inducción produce potencia eléctrica cuando el rotor es movido a velocidad mayor a la frecuencia de sincronismo del motor de inducción equivalente [15].

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 maquinaría 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).

Fundamentalmente, existen dos tipos de generadores asíncronos que se han utilizado para la integración de aerogeneradores: el **tipo jaula de ardilla** y el **tipo rotor devanado**. Los de tipo jaula de ardilla son los más utilizados debido a que su costo es bajo, requieren poco mantenimiento, son robustos y se pueden conectar directamente (a través de protecciones y medios de desconexión adecuados) a la línea eléctrica a la que entregaran energía; mientras los generadores asíncronos de rotor devanado cuentan con un rotor ranurado y un colector en la parte superior donde se les proporciona excitación mediante las escobillas o carbones, por lo cual se debe tener un control de estas partes por su desgaste acelerado.

Los generadores de inducción se utilizan mayoritariamente en turbinas eólicas y en algunas instalaciones hidráulicas debido a su especial capacidad de producir potencia eléctrica útil a velocidades variables de rotación.

## 1.4 Definición de las Partes Principales del Generador

**Estator.** El estator es la parte fija de la máquina. Está formado por una carcasa metálica que sirve de soporte, dentro del mismo se encuentra el núcleo del inducido, donde se monta el que será el devanado o bobinas del inducido. Por el estator circula toda la energía eléctrica generada [11].

Es la parte fija del generador. Una carcasa de metal fundido o de aleación ligera encierra una corona de chapas delgadas (del orden de 0,5 mm de espesor) de acero al silicio. Las chapas quedan aisladas entre sí por oxidación o por barniz aislante. La "*foliación*" del circuito magnético, reduce las pérdidas por histéresis y por corrientes de Foucault. Las chapas disponen de ranuras en las que se sitúan los devanados estatóricos que producen el campo giratorio (tres devanados en el caso de un motor trifásico). Cada devanado se compone de varias bobinas. El modo de acoplamiento de las bobinas entre sí determina el número de pares de polos del generador y, por tanto, la velocidad de rotación [19].

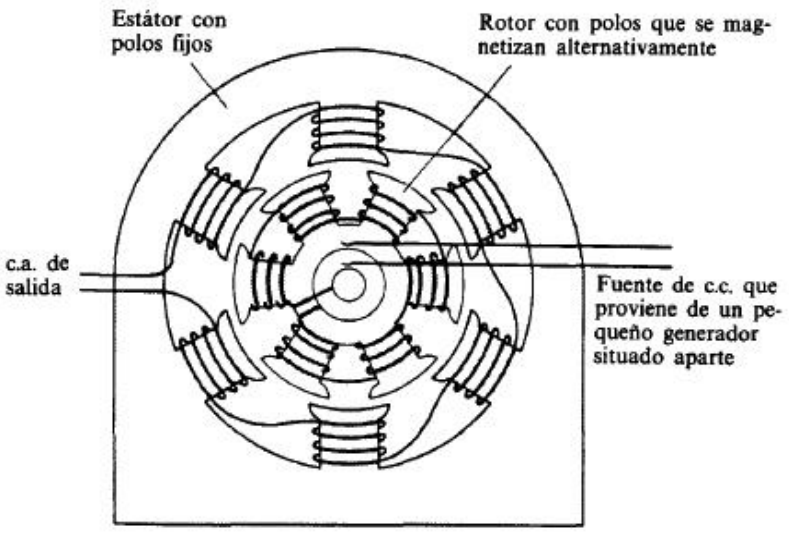



**Figura 2. Estator de generado. [2]**

**Rotor.** Es el elemento que presenta movimiento rotacional en las maquinas eléctricas como motores y generadores, en este caso el rotor es el encargado de realizar movimiento rotacional, presentando un eje que pasa por el centro del estator. Es llamado también rotor inductor ya que tiene como función producir un campo magnético giratorio, en este proyecto el rotor inductor está constituido por un grupo de imanes con campo magnético permanente; al girar el rotor inductor; permitirá inducir un campo magnético rotacional en las bobinas del estator generando una diferencia de potencial también llamado voltaje inducido o fuerza electromotriz [11].

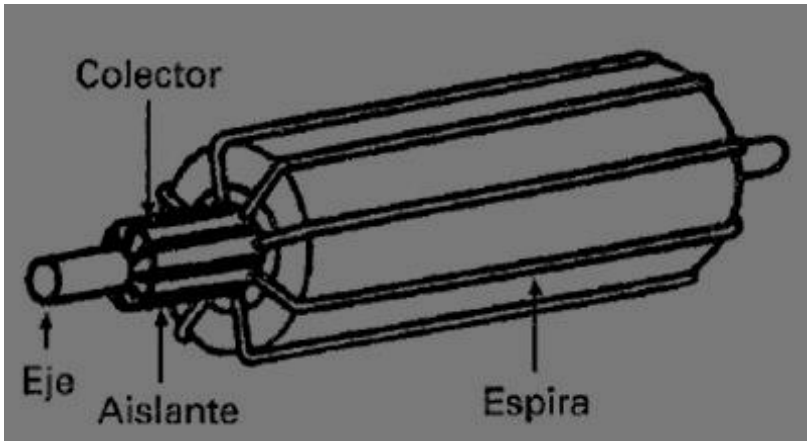



**Figura 3. Rotor de generador. [3]**

**Bobina Eléctrica.** La bobina o inductor por su apariencia (espiras de alambre enrollados sobre un núcleo) es aquella que acumula energía en forma de campo magnético [11]. Todo inductor al cual se le suministra una corriente eléctrica, almacenara energía en forma de campo magnético, y la descargara cuando el suministro de corriente desaparezca o baje de intensidad. El campo magnético almacenado en el inductor circulara por el centro del mismo y cerrara su camino por su parte exterior.

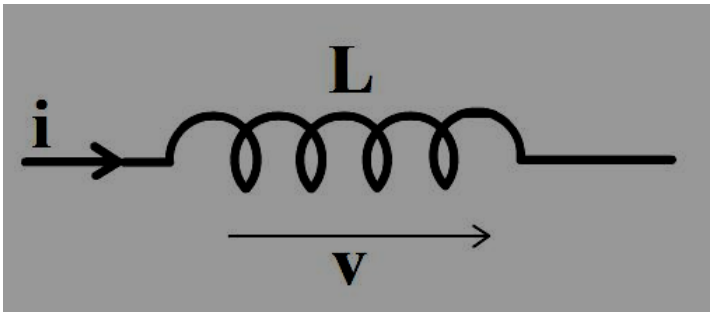



**Figura 4. Bobina eléctrica. [4]**

## 1.5 Motores eléctricos

Los motores eléctricos son máquinas rotatorias que tienen la finalidad de convertir la energía eléctrica, en forma de corriente continua o alterna, en energía mecánica apta para mover los accionamientos de todo tipo de máquinas. Realizan un trabajo útil por medio de hacer girar una flecha, es decir, convierte la electricidad en fuerzas de giro por medio de la acción mutua de los campos magnéticos.

La corriente eléctrica que suministran y distribuyen las empresas eléctricas es del tipo alterna, sin embargo, hay aplicaciones que utilizan también la corriente en forma directa, por ello los motores eléctricos pueden ser de corriente directa o de corriente alterna.

**Motores de corriente continua composición**

Los motores de corriente continua se componen de los siguientes elementos:

- **El inductor o estator:**

  Es el elemento de circuito magnético inmóvil sobre el que se bobina un devanado para producir un campo magnético. El electroimán resultante consta de una cavidad cilíndrica entre sus polos.

- **El inducido o rotor:**

  Es un cilindro de chapas magnéticas aisladas entre sí y perpendiculares al eje al eje cilíndrico. El inducido es móvil entorno a su eje y queda separado del inductor por un entrehierro. A su alrededor, varios conductores se reparten de manera regular.

## 1.6 Motores de Corriente Alterna (AC)

Los motores de corriente alterna (AC), son los más empleados dado a que trabajan con corriente alterna suministrada por la red, por tanto, son de menor costo. Se clasifican en *motores síncronos* y *motores asíncronos* (o de inducción). En los motores síncronos el eje gira a la misma velocidad que lo hace el campo magnético, en los asíncronos el eje se revoluciona a una velocidad poco menor a la del campo magnético [19].

- **Motor síncrono:**

  Contiene una pieza giratoria denominada rotor o campo, cuya bobina se excita mediante la inyección de una corriente continua, y una pieza fija denominada estator o armadura por cuyas bobinas circula corriente alterna.

La corriente alterna que circulan por los devanados del estator producen un campo magnético que gira en el entrehierro de la maquina con la frecuencia angular de las corrientes del estator. El rotor debe girar a la misma velocidad del campo magnético producido en el estator, para que el par eléctrico medio pueda ser diferente de cero.

Si las velocidades angulares del campo magnético giratorio y del rotor de la maquina síncrona son diferentes, el par eléctrico medio es nulo. Por esta razón a esta máquina se le denomina síncrona: el rotor gira mecánicamente a la misma frecuencia del campo magnético giratorio del estator durante la operación en régimen permanente. Si $\boldsymbol{n}$ es la velocidad del rotor en rpm y $\boldsymbol{p}$ es el número de pares de polos de la máquina, se define la velocidad de sincronismo como:

$$\mathbf{n} = \frac{\mathbf{60}.\boldsymbol{f}}{\boldsymbol{p}}$$

Para producir una fuerza magnetomotriz en el rotor es necesario inyectar corriente en esta bobina mediante una fuente externa. De esta forma se obtienen dos campos magnéticos que giran a la misma velocidad, uno producido por el estator y otro por el rotor. Estos campos interactúan produciendo par eléctrico medio y se realiza el proceso de conversión electromecánica de energía.

La velocidad de giro de un motor síncrono, es constante y viene determinada por la frecuencia de la tensión de la red a la que esté conectada y el número de pares de polos del motor, siendo conocida esa velocidad de sincronismo.

Este motor tiene la característica de que su velocidad de giro es directamente proporcional a la frecuencia de la red de corriente alterna que lo alimenta.

El motor síncrono, utiliza el mismo concepto de un campo magnético giratorio producido por el estator, pero ahora el rotor consta de electroimanes o de imanes permanentes (PM) que giran sincrónicamente con el campo del estator.

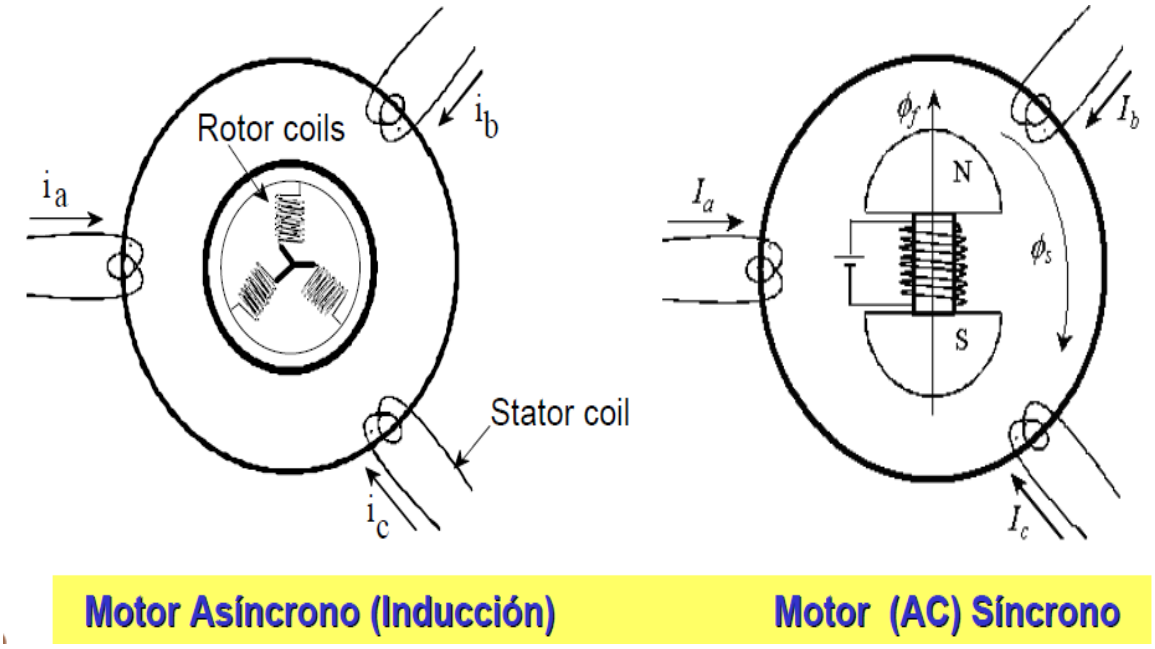



**Figura 5. Motor Asíncrono, Motor Síncrono. [5]**

El motor síncrono es utilizado en aquellos casos en que los que se desea velocidad constante. El motor síncrono utiliza el mismo concepto de un campo magnético giratorio producido por el estator, pero ahora el rotor consta de electroimanes o de imanes permanentes (PM) que giran síncronamente con el campo del estator.

La velocidad de un generador que está conectado a una red trifásica es constante y esta impuesta por la frecuencia de la red. Los motores de AC que utilizan imanes para producir el campo magnético en el entre hierro, se denominan motores de imán permanente.

**Clasificación de motores de corriente alterna que utilizan imanes permanentes:**

***Motores de imán permanente conmutados o trapezoides,*** en este tipo de motores, el rotor tiene dos imanes que cubren cada uno aprox. 180° del perímetro del rotor y producen una densidad de flujo de flujo. El estator tiene un bobinado trifásico, donde los conductores de cada fase están distribuidos uniformemente en proporciones de arcos de 60°.

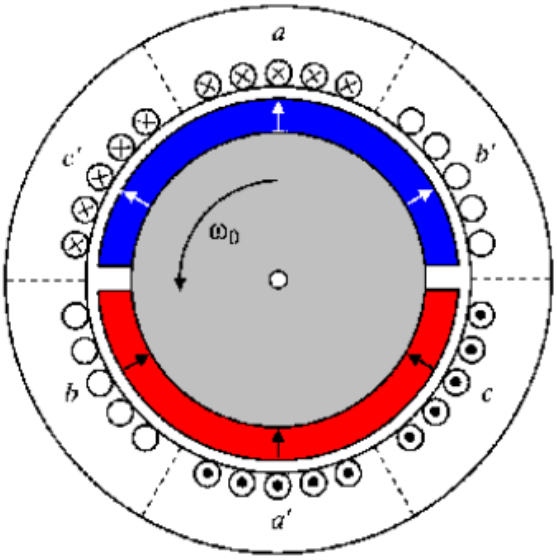



**Ilustración 6. Representación de generador trifásico con dos imanes permanentes. [5]**

***Motores de reluctancia variable,*** en este tipo de motores, se eliminan los imanes permanentes, las escobillas, y los conmutadores. El estator consiste en unas laminaciones de acero que forman postes salientes. Una serie de bobinas, conectadas independientemente en pares de cada fase, envuelve los postes del estator. Sin bobinas del rotor, el rotor es básicamente un pedazo de acero formado para formar postes salientes.

La reluctancia se refiere a la característica de resistencia de un circuito magnético, también llamada resistencia magnética. Cuando un par de bobinas de los polos del estator es energizado, el rotor se mueve para alinearse con los postes del estator.

## 1.7 Problemas a Resolver

El proyecto se elabora para obtener información y datos de resultados previos a la fabricación del generador de flujo axial de imanes permanentes, con el fin de conocer cada una de sus características, beneficios, variables a considerar en su fabricación y de importancia en sus puntos críticos de operación, así como cada una de sus ventajas y desventajas en comparación de los generadores actuales. El punto más importante es tener los conocimientos necesarios del generador con base a la investigación y recopilación de resultados de estudios de prototipos y con ello tener la información necesaria para la fabricación de un prototipo de uso académico y experimental.

## 1.8 Justificación

¿Por qué es importante conocer sobre los generadores de flujo axial?

El generador de flujo axial de imanes permanentes presenta nuevas características favorables para los aerogeneradores, como son: disminución de dimensiones con respecto a otros, más eficientes, no requiere de excitación para empezar a generar, disminución de peso y masa, en el proceso de generación requiere de menos revoluciones por minuto y con ello el desgate mecánico es menor, así como también reducen las exigencias de velocidad del viento y alturas de los aerogeneradores.

## 1.9 Objetivo

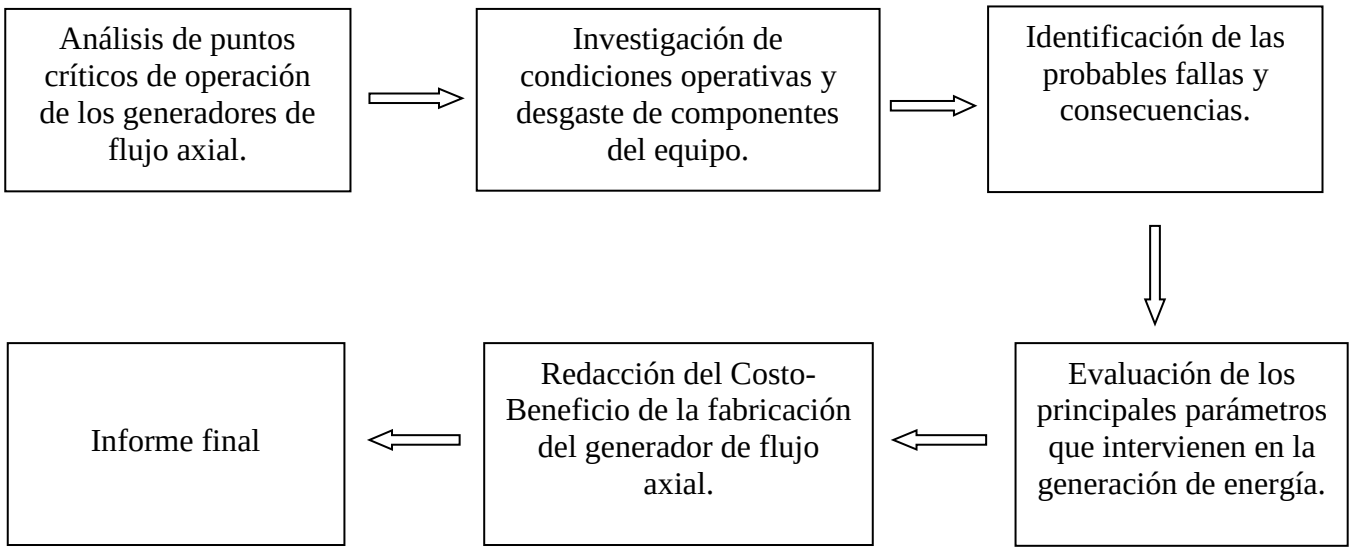
**Objetivo general:**

Obtener la información actual sobre el diseño y construcción de los generadores de flujo axial, incluyendo el estudio de los resultados de pruebas de funcionamiento, para realizar un análisis con respecto a las mejoras que se han logrado con respecto a su desempeño, considerando los resultados favorables y no favorables, utilizando esta información como base para la propuesta de un nuevo prototipo.

**Objetivos específicos:**

- Identificar las variables que interactúan en la funcionalidad del generador.
- Propuesta de soluciones a problemas que presentaron prototipos anteriores.
- Presentar las bases para la fabricación de un generador para una potencia de 1 kW.

## 1.10 Metodología




En el proceso de investigación sobre el generador de flujo axial se realizan las siguientes actividades:

1. Análisis de puntos críticos de operación de los generadores de flujo axial. Hacer un estudio mediante bibliografías y datos de prototipos previos de los puntos críticos a considerar en la fabricación de la máquina, y con ello conocer las variables que interactúan en su funcionamiento.

2. Investigación de condiciones operativas y desgaste de componentes del equipo. Mediante el estudio bibliográfico y análisis de estadísticas de los actuales generadores de flujo axial se realizará un análisis de cada una de las partes que constituyen la máquina.

3. Identificación de las probables fallas y consecuencias. Se identificará cada una de las fallas que se pueden presentar en el funcionamiento de un generador de flujo axial, y sus consecuencias de acuerdo a previos estudios.

4. Redacción del Costo-Beneficio de la fabricación del generador de flujo axial. Es la etapa donde se analizará cuantitativamente la rentabilidad de tener y fabricar un generador de flujo axial respecto a sus costos y beneficios que ofrece.

# CAPITULO II
# FUENTES DE ENERGIA.

## 2.1 Tipos de Energía

Si bien las fuentes de energía pueden clasificarse de variadas formas según el criterio usado, la clasificación más amplia de la misma es en renovable y no renovables. Las primeras son aquellas que se consumen a una mayor velocidad de lo que la naturaleza puede remplazarlas; tal que la cantidad total disponible es cada vez menor y su posibilidad de reposición remota, en esta categoría se ubican las fuentes fósiles. Las segundas, son fuentes que o pueden reponerse al generarse por procesos cíclicos de periodicidad variable (desde horas hasta años) o son inagotables. Se conocen genéricamente como energías alternativas (EA) [10].

**Energías Alternativas (EA).** Comprenden todas aquellas energías de origen no fósil y que no han participado significativamente en el mercado mundial de la energía. Se tiende a usar indiscriminadamente los términos renovables, nuevas y no convencionales como sinónimos, no siendo totalmente correcto. Tampoco se debe confundir el concepto de energía renovable con el de energía no-convencional, pues entre las fuentes energéticas convencionales se encuentran algunas con características de renovables, como la hidráulica o la bioenergía. Existen además fuentes no renovables y no convencionales como la energía geotérmica o la fusión nuclear. Las energías no agotables, como la eólica, comúnmente se incluyen entre las renovables.

## 2.2 Energía Solar

Con las excepciones de la energía nuclear, geotérmica y mareas, todas las formas de energía usadas en la tierra se originan a partir de la energía del sol, siendo esta el resultado de un proceso de fusión nuclear que tiene lugar en su interior. De toda la energía producida, nuestro planeta recibe menos de una millonésima parte, sin embargo; es una cantidad enorme en proporción al tamaño de nuestro planeta y a los requerimientos de energía, basta decir que la energía diaria proporcionada por el sol a la Tierra es aproximadamente igual al consumo mundial de energía en 27 años. Al llegar esta energía a la superficie terrestre se puede transformar en calor útil, electricidad, o usarse para producir un combustible. Todo esto demuestra su poder.

**Figura 7. Energía solar. [11]**

### Tecnologías de conversión solar

Las tecnologías solares se han usado en todas las épocas y en cada rincón del mundo. La invención y desarrollo de las tecnologías solares modernas data de hace 40 años, actualmente existen varias suficientemente probadas y ya en fase de comercialización para proporcionar servicios energéticos a viviendas individuales, conjuntos habitacionales, grandes complejos industriales y comerciales, e incluso toda una ciudad.

Existen cinco tecnologías fundamentales: calentamiento de agua doméstica, obtención de vapor (para generación eléctrica o uso industrial), calentamiento espacial activo, calentamiento espacial pasivo, y conversión directa: energía solar/electricidad. Las tres primeras involucran el uso de colectores térmicos, que comprenden desde colectores planos para calentamiento de agua hasta parabólicos para generación de vapor. Por lo contrario, el calentamiento pasivo es más bien materia de diseño arquitectónico y en la conversión directa en celdas fotovoltaicas, no es necesario ningún esquema colector de calor. Finalmente, combustibles alternativos como el hidrogeno se pueden obtener a partir de reacciones químicas manejadas por la luz solar o por electrolisis en celdas de combustible.

Todas estas tecnologías están en diferentes fases de desarrollo, se describirán las tres que han tenido mayor impacto y expectativas de crecimiento:

- **Colectores Solares Planos**
  Son dispositivos que se calientan al ser expuestos a la radiación solar y que transmiten el calor al fluido de trabajo (normalmente agua), su ubicación en los techos de casas y/o edificios es la imagen más común de la tecnología solar. Su construcción y operación es bastante simple, suficientemente probada y con un gran potencial de aplicación en todo el mundo. Se destaca Israel, donde se usa la energía solar para calentamiento de agua desde hace más de 50 años y donde a partir de 1980, se hizo obligatoria su instalación en toda construcción residencial nueva.

- **Electricidad Solar Directa.**
  La conversión directa de luz solar a electricidad tiene lugar en las llamadas celdas solares fotovoltaicas, FV. Estas son laminas semiconductoras fabricadas principalmente de silicio (el segundo elemento más abundante en la Tierra) con cantidades relativas de ciertos materiales cuyas propiedades eléctricas únicas hacen que en presencia de luz solar se produzca una corriente eléctrica continua. Si bien la cantidad de energía eléctrica producida no es altamente significante en comparación con la demanda mundial, esta tecnología ha tenido un gran impacto en nuestras vidas por su capacidad de generar electricidad en todo sitio que brille el sol. Así las FV generan la potencia para activar los satélites espaciales.

- **Celdas de Combustible**
  Son dispositivos electroquímicos en los que la energía química almacenada en un combustible se transforma directamente en electricidad mediante reacciones de oxido-reducción. A diferencia de las baterías, una CC no se agota ni requiere recarga, producirá electricidad y calor mientras se le provea de combustible generando como único subproducto agua pura.

## 2.3 Energía de Biomasa

En sentido amplio el termino biomasa se refiere a cualquier tipo de materia orgánica que ha tenido su origen inmediato en un proceso biológico y es, en última instancia, energía solar transformada por fotosíntesis. La madera, los deshechos de agricultura y el estiércol animal se ubican en esta categoría. Su uso es de vieja data, la leña fue la primera y única fuente energética utilizada por el hombre para satisfacer sus necesidades domésticas y todavía es una fuente importante en muchos países subdesarrollados.

A partir de los años sesenta se ha experimentado un progreso tecnológico extraordinario en el uso de esta fuente energética. Además, según el concepto ecológico moderno, a las fuentes forestales se las considera como renovables, no solo por su reemplazo sino por su beneficio al ambiente, ya que tienen la propiedad de reducir grandemente las emisiones de gases de invernadero o incluso establecer un balance ideal.

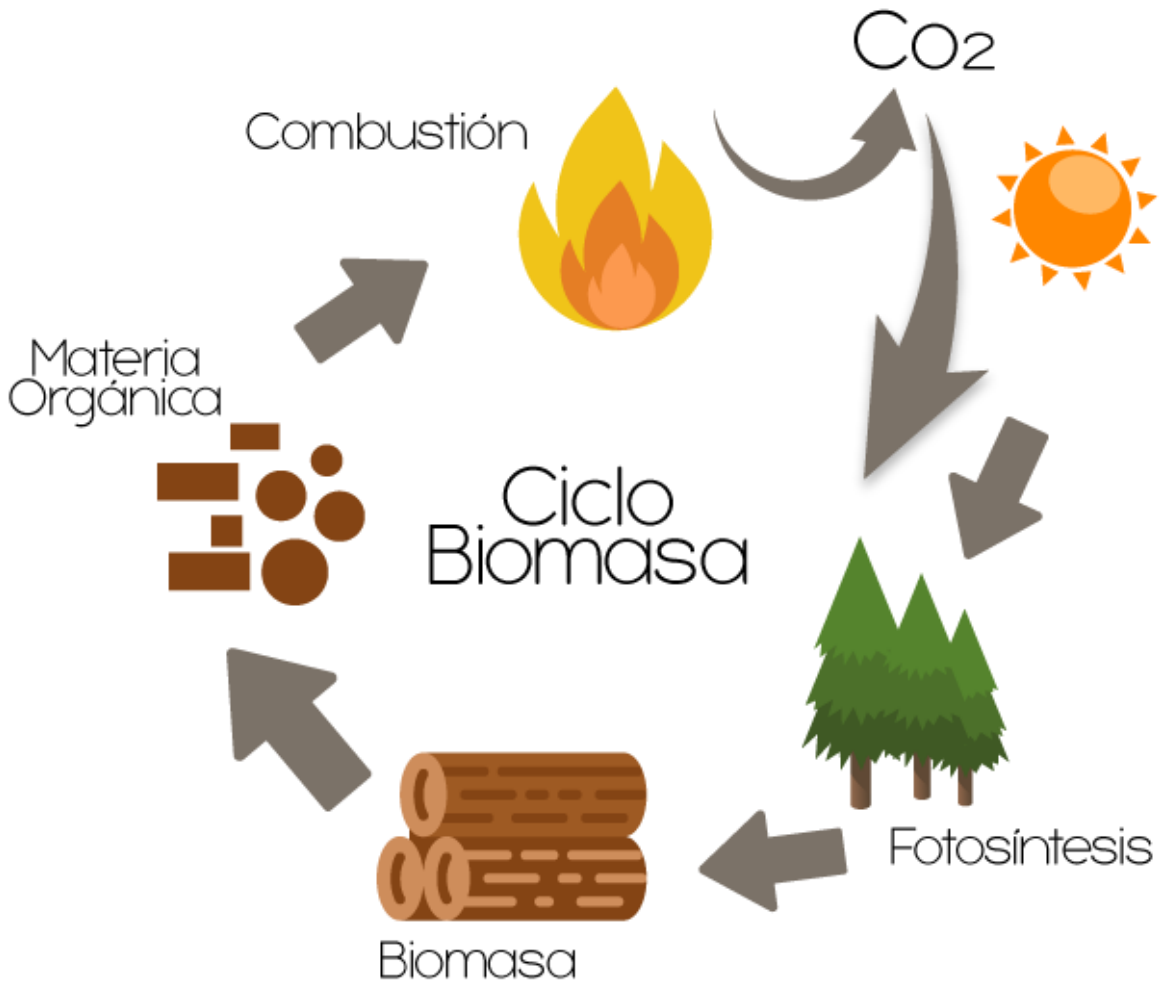



**Figura 8. ciclo carbono y oxígeno. [12]**

## 2.4 Energía Hidráulica

El agua de los ríos y corrientes en su retomo a los mares y océanos como parte del ciclo hidrológico es el origen de la energía hidráulica, considerándose esta como la fuente renovable por excelencia y, quizás, la forma más antigua de aprovechamiento de energía para el desarrollo de las actividades productivas de la humanidad. Su uso se fundamenta en la conversión de la energía cinética y potencial; la primera se ha utilizado desde el tiempo más antiguo de los romanos para actividades como molienda de granos, aserraderos o simplemente como una fuerza mecánica.

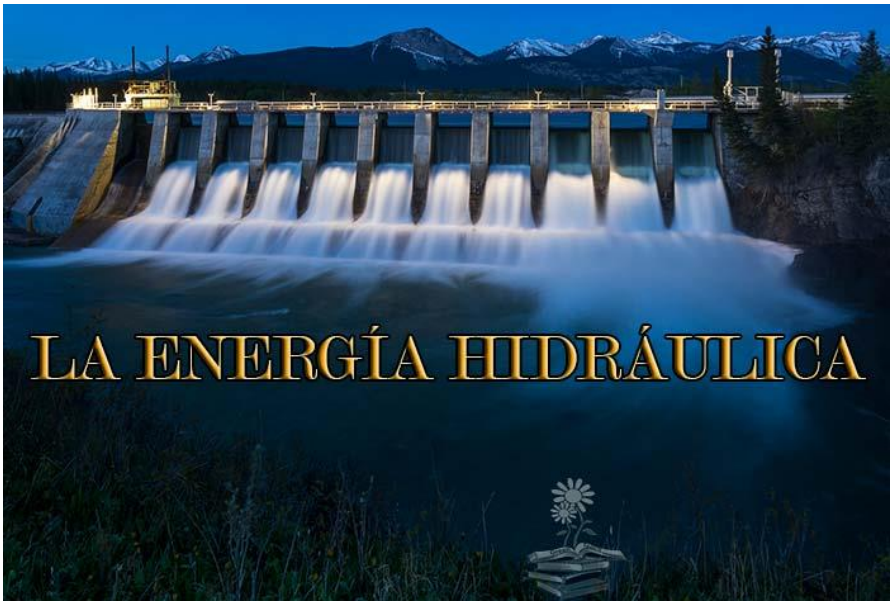



**Figura 9. Energía hidráulica. [13]**

Las características más relevantes de esta fuente son:

- Esta ampliamente distribuida en el mundo. Existen potenciales en cerca de 150 países y aproximadamente, dos tercios de su potencial económicamente factible permanece sin desarrollar y se ubica mayoritariamente en los países en desarrollo donde su capacidad de generación es más urgentemente requerida.
- Es una tecnología madura, con más de una centuria de experiencia.
- Cuando se compara con otras opciones de generación a gran escala, tiene los costos de operación más bajos y los más largos ciclos de vida, así como también una contaminación atmosférica mínima.
- El “combustible” (agua) es renovable y no esté sujeto a fluctuaciones en las condiciones del mercado.

## 2.5 Energía geotérmica

La energía geotérmica no es más que el calor natural de la tierra y derivada del vapor o agua caliente subterránea producto de los acuíferos y/o instrucciones del magma caliente cerca de la superficie. Condiciones favorables para su desarrollo solo se dan en ciertas regiones de la tierra donde los movimientos tectónicos en recientes tiempos geológicos, han permitido intrusiones de magma en la corteza terrestre; es decir, en regiones donde hay o hubo actividad volcánica.

**Figura 10. Energía geotérmica. [14]**

La primera producción de electricidad a partir de vapor geotérmico se hizo en Italia en el año 1904. Se distinguen básicamente dos tipos de usos:

- **Generación de Electricidad**
  para esta aplicación, el fluido con una temperatura superior a los 150°C se extrae de los reservorios subterráneos y eleva a la superficie a través de producción. Algunos reservorios producen vapor directamente, mientras que la mayoría produce agua forma líquida de la cual el vapor se separa y alimenta a turbinas conectadas a un generador.

## 2.6 Energía Eólica

El calentamiento dispar en la superficie terrestre por acción de la radiación solar, es el principal causante de los vientos. En las regiones ecuatoriales se produce una mayor absorción de radiación solar que en las polares; el aire caliente que se eleva en los trópicos es reemplazado por las masas de aire fresco superficiales proveniente de los polos. El ciclo se cierra con el desplazamiento, por la atmosfera, del aire caliente hacia los polos. Esta circulación general, que sería observada si la tierra no girase [17].

La energía eólica es la energía del viento. Esta es una fuente de energía autóctona, que no contamina, es inagotable, segura y frena el consumo de combustibles fósiles, por lo que contribuye a evitar el cambio climático; además, es una de las fuentes energéticas más baratas y puede competir en realidad con otras fuentes tradicionales [9].

**Figura 11. Parque eólico. [6]**

**Energía obtenida de viento**

La energía máxima teóricamente que puede ser extraída de una masa de aire en movimiento está dada por la expresión:

$$E_c = \frac{1}{2} m.V^2$$

Donde:
$E_c$ = Energía cinética [joule/s]
m = flujo de aire [kg/s]
V = velocidad del viento [m/s]

**Figura 12. Energía de aerogenerador. [7]**

## 2.7 Principios de Operación de las Maquinas Eólicas

Los molinos de viento, aerogeneradores, maquinas eólicas (términos que pueden ser considerados sinónimos), o los aerogeneradores, o turbinas eólicas en su acepción, son dispositivos que convierten la energía cinética del viento en energía mecánica [17].

Aunque existen dos tipos básicos de molinos, eje horizontal y eje vertical, el principio de operación es esencialmente el mismo. La captación de la energía eólica se realiza mediante la acción del viento sobre las palas, las cuales están unidas al eje a través de un elemento denominado cubo (conjunto que recibe el nombre de rotor). El principio aerodinámico, por el cual este conjunto gira, es similar al que hace que los aviones vuelen.

## 2.8 Parámetros Eléctricos

### Corriente Eléctrica

La corriente eléctrica es el desplazo de cargas eléctricas de un punto a otro en un conductor. Se llama intensidad de corriente eléctrica (I) a la carga que recorre una sección del conductor la unidad de la intensidad de corriente eléctrica esta dad en (A), que equivale a un flujo de cargas de un culombio por segundo (s) [11].

Siempre que haya un flujo neto de carga a través de alguna región (por ejemplo, un pedazo de material), se dice que existe una corriente eléctrica. la cantidad de flujo depende del material a través del cual las cargas fluyen y la diferencia de potencial a través del material.

Para definir la corriente eléctrica con mayor precisión, supongan que las cargas se mueven perpendicularmente respecto una superficie de área *A*.

Ejemplo, esta área puede ser la sección transversal de un alambre conductor.

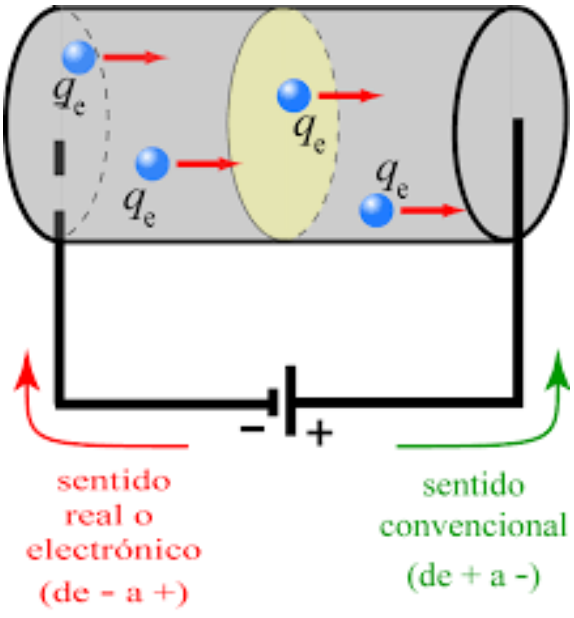



**Figura 13. Corriente Eléctrica. [8]**

Si $\Delta Q$ es la cantidad de carga que pasa a través de dicha área $A$ en un intervalo de tiempo $\Delta t$ la corriente promedio $I_{av}$ es igual a la carga que pasa a través de $A$ por unidad de tiempo:

$$\boldsymbol{Intencidad\ de\ Corriente = \frac{Cantidad\ de\ Electricidad}{Unidad\ de\ tiempo}}$$

$$\boldsymbol{I = \frac{Q}{t}}$$

Donde se deriva la siguiente formula:

$$\boldsymbol{t = \frac{Q}{I}}$$

Las cargas que pasan a través de la superficie pueden ser positivas o negativas, o ambas. Es una convención el asignar a la corriente la misma dirección que el flujo de carga positiva cuando es libre de moverse. Sin embargo, en los conductores eléctricos (Cu o Al) la corriente eléctrica se debe al movimiento de electrones cargados negativamente. En ese caso, cuando se refiere a la corriente es en dirección opuesta a la del flujo de electrones [18].

**Diferencia de potencial**

La diferencia de potencial ($V$) es el trabajo ($W$) esencial para llevar la unidad de carga eléctrica de un punto a otro. La unidad de la diferencia de potencial está dada en voltio (V), para llevar 1 C de carga de un punto a otro de un conductor es esencial ejecutar un trabajo de 1 J [11].

**Resistencia Eléctrica**

Se puede definir la resistencia $R$ como la relación de la diferencia de potencial eléctrico $\Delta V$ a través de un conductor y la corriente eléctrica $I$ en el conductor:

$$\mathbf{R} \equiv \boldsymbol{\frac{\Delta V}{I}}$$

Todo conductor tiene una resistencia eléctrica (*R*) que se opone al paso de una corriente eléctrica, la resistencia eléctrica depende de las características geométricas del conductor, del material de construcción y su temperatura. La resistencia eléctrica fija la intensidad de la corriente obtenida por una diferencia de potencial dada. La unidad de la resistencia eléctrica viene dada en ohmios y significa la resistencia de un conductor en el que, con una diferencia de potencial aplicada de 1 V, circula una corriente de 1 A de intensidad de corriente [11].

**Potencia Eléctrica**

Se denomina potencia eléctrica a la relación de paso de energía de un flujo por unida de tiempo, es decir la cantidad de energía entregada o absorbida por un elemento en un tiempo determinado. La potencia eléctrica se presenta con la letra P y la unidad de medida es el Vatio (*Watt*).

$$\boldsymbol{potencia} = \frac{\textbf{Energía}}{\boldsymbol{Tiempo}}$$

Es una cantidad importante, se mide en unidades de energía sobre tiempo, usualmente Joules sobre segundo (J/s) o también en Watts (W) que esto equivale a:

$$\mathbf{1}\,\boldsymbol{Watt} = \frac{\mathbf{1}\,\boldsymbol{Joule}}{\mathbf{1}\,\boldsymbol{Segundo}}$$

El Watt es una unidad de potencia muy utilizada, especialmente para medir la potencia de equipos pequeños. Sin embargo, cuando se desea medir la potencia demandada por un edificio o una maquina industrial se utiliza la unidad de Kilowatt que esto equivale a:

$$\mathbf{1}\,\boldsymbol{Kilowatt} = \mathbf{1000}\,\boldsymbol{Watts}$$

**Caída de potencial**

La caída de potencial es la disminución de energía potencial por unidad de carga y la corriente eléctrica es la carga que fluye por unidad de tiempo. El proceso mediante el cual la potencia eléctrica *P* es perdida como energía interna en un conductor de resistencia *R* (energía cedida a un conductor debido al paso de la corriente eléctrica) se conoce comúnmente como calor por efecto joule o, simplemente, calor joule [18].

Cuando se transporta energía como electricidad a través de líneas o cables de alta tensión, no se puede simplificar la situación considerando que los cables tienen resistencia cero. Las líneas de alta tensión en realidad si tienen resistencia y, por lo tanto, se proporciona o transfiere una potencia eléctrica a dichos cables.

Las compañías de luz buscan minimizar la potencia eléctrica que se transforma en energía interna dentro de las líneas de alta tensión con el objeto de maximizar la energía que se suministra a los consumidores. Las compañías de luz eligen transportar la energía a bajas corrientes eléctricas y altas diferencias de potencial debido principalmente a razones económicas.

**Campo magnético**

La densidad de flujo magnético de un imán también llamado "campo B" o "inducción magnética", se indica con las unidades de medida Tesla (unidad SI) o Gauss (10,000 Gauss = 1 Tesla). Los denominados imanes permanentes producen un campo B tanto en su interior como en su campo externo.

**Superconductores**

Existe una clase de metales y compuestos conocidos como superconductores, cuya resistencia *R* disminuye hasta cero cuando se encuentran por debajo de cierta temperatura *Tc,* conocida como temperatura critica.

La grafica *R= f (T)* para un superconductor tiene la misma forma que para un metal normal a temperaturas mayores que *Tc.*

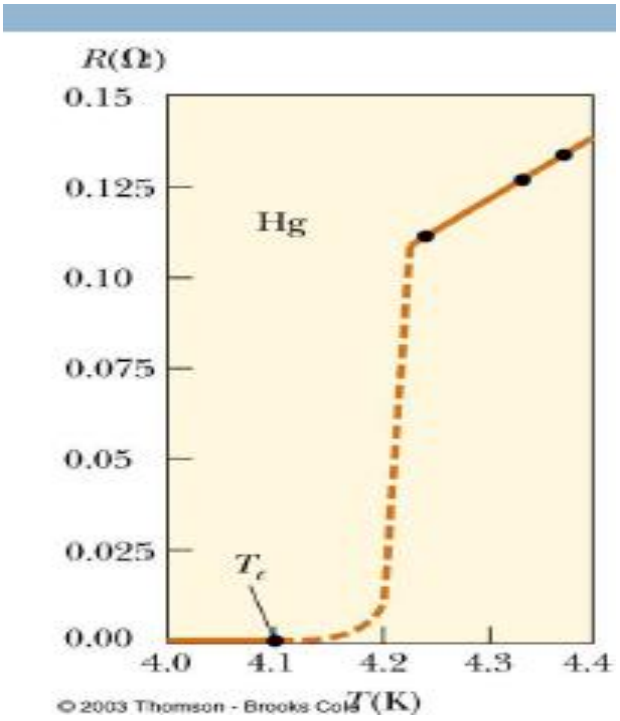



**Figura 14. Grafica (*R-T*). [10]**

Ahora, se conocen miles de superconductores, y como lo ilustra la siguiente tabla, las temperaturas críticas de superconductores recientemente descubiertos (especialmente óxidos cerámicos) son substancialmente mayores que lo que inicialmente se creía posible [11].

**Critical Temperatures for Various Superconductors**

| Material | $T_c$(K) |
|---|---|
| $HgBa_2Ca_2Cu_3O_8$ | 134 |
| Tl–Ba–Ca–Cu–O | 125 |
| Bi–Sr–Ca–Cu–O | 105 |
| $YBa_2Cu_3O_7$ | 92 |
| $Nb_3Ge$ | 23.2 |
| $Nb_3Sn$ | 18.05 |
| Nb | 9.46 |
| Pb | 7.18 |
| Hg | 4.15 |
| Sn | 3.72 |
| Al | 1.19 |
| Zn | 0.88 |

**Figura 15. Temperaturas criticas $T_c$. [10]**

Una importante aplicación de la superconductividad es el desarrollo de imanes superconductores, en los cuales las magnitudes del campo magnético son aproximadamente diez veces mayores que los producidos por los mejores electroimanes normales. Tales imanes superconductores se consideran como medios para almacenar energía [18].

El fenómeno de la superconductividad fue descubierto en 1911, el mercurio, por Heike Kammerlingh Onnes, profesor de la universidad de Leiden. Diversos elementos y aleaciones metálicas (indio, niobio-titanio, etc.) muestran superconductividad (superconductores de 1° generación) pero su temperatura critica nunca sobre pasa los 23 K, por lo que, normalmente, son enfriados mediante helio líquido, que es costoso.

Los materiales superconductores cerámicos de alta temperatura (SCAT) de 2° generación cuando son enfriados con nitrógeno líquido (mucho más barato que el helio liquido), pueden transportar densidades de corriente, mucho mayores que las que puede soportar el cobre y por ello, su utilización en la construcción de máquinas eléctricas da lugar a una miniaturización y mejora de su rendimiento.

Los SCAT son materiales muy quebradizos y difíciles de mecanizar. Por eso, las maquinas eléctricas que incorporan superconductores en su construcción deberán tener una configuración especial a fin de minimizar los esfuerzos mecánicos que se producen en estos materiales. Además, los materiales superconductores, cuando se someten a un campo magnético variable, disipan energía por histéresis y, por eso son utilizados normalmente en la construcción del rotor de generadores síncronos [1].

Los imanes superconductores se utilizan actualmente en imagenología medica por resonancia magnética (MRI), mediante la cual se obtienen imágenes de órganos internos con alta definición, sin necesidad de someter a los pacientes a una exposición excesiva a rayos X u otro tipo de radiación dañina [18].

## 2.9 Energía Eólica

Su origen se basa en la energía solar, por el calentamiento diferencial de las masas de aire por el sol, ya sea por diferencias de altitud (vientos globales) o el terreno (mar tierra o vientos locales). Las diferencias de radiación en distintos puntos de la tierra generan diversas áreas térmicas y los desequilibrios de temperatura provocan cambios de densidad en las masas de aire que implican variaciones de presión [7]. La dirección del viento está determinada por efectos topográficos y por la rotación de la tierra. El aprovechamiento del viento para la generación eléctrica, es la tecnología de energía renovable que ha tenido un desarrollo muy acelerado. Las fuerzas del viento se han aprovechado durante muchos siglos, la más antigua aplicación fue el uso de velas en la navegación, con el paso del tiempo se desarrollaron mecanismos impulsados por el viento como molinos para moler granos o bombear agua.

De todos los vientos generados, solo una fracción muy pequeña puede ser aprovechada ya que se requieren condiciones de intensidad y regularidad; así, solo una fracción muy pequeña puede ser aprovechada ya que se requieren condiciones de intensidad y regularidad. Esta energía cinética puede convertirse en energía útil mediante un sistema compuesto por: 1.- Un rotor, que convierte la energía cinética en movimiento rotatorio, 2.- un sistema de transmisión, que acopla esta potencia mecánica de rotación, y 3.- una aplicación, que puede ser: una aerobomba, si se trata de bombeo de agua, un aeromotor, si se acciona un dispositivo mecánico y un aerogenerador si se trata de un generador eléctrico. Esta última aplicación es la más difundida y utilizada tanto en redes de distribución como por usuarios remotos en todo el mundo.

Los aerogeneradores comerciales han ido aumentando su potencia. En cuanto a costos la electricidad eólica ya es hoy competitiva. Los avances tecnológicos en diseño y transmisiones han causado disminuciones significativas en el costo de inversión y producción, tal que los precios han bajado han un 85% en los últimos años.

La energía eólica es ambientalmente positiva. Las perturbaciones ambientales están asociadas con niveles de ruido, producto de la rotación de las aspas y dispositivos mecánicos, considerándose que 300-400 m es una distancia aceptable, para compensar el ruido. Por otra parte, puede generar interferencias a ondas de televisión y radio. También se puede hablar de perturbaciones a la vida salvaje, especialmente pájaros. El efecto visual, especialmente para grandes arreglos de turbinas. Sin embargo, los generadores de tercera

generación superan en parte estas deficiencias, ya que son mucho menos ruidosos y giran a bajas velocidades [10].

**Figura 16. Energía eólica. [15]**

**¿Qué es la energía eólica?**

La energía eólica es la energía del viento. Esta es una fuente de energía autóctona, que no contamina, es inagotable, segura y frena el consumo de combustibles fósiles, por lo que contribuye a evitar el cambio climático; además, es una de las fuentes energéticas más baratas y puede competir en rentabilidad con otras fuentes tradiciones [9].
Por ello, la energía eólica es una alternativa real al uso de las energías convencionales que permite diversificar las fuentes de energías y disminuir el grado de dependencia de las importancias del exterior.

Entre las ventajas de uso de esta fuente tenemos [20]:
- No hay emisión de gases contaminantes, efluentes líquidos y gaseosos ni residuos sólidos.
- No requiere de proceso de extracción subterráneos ni a cielo abierto.
- No implica riesgos ambientales de gran impacto como derrames, explosiones, incendios +.
- Ahorra combustibles fósiles y diversifica el suministro energético.

Entre sus inconvenientes están:
- No es en cualquier zona, ya que el viento es disperso y de gran variabilidad y fluctuación.
- Provoca un aumento del nivel de ruido.
- Genera impacto visual en el paisaje.
- Causa impacto sobre la fauna, especialmente sobre las aves.
- Ocupa un área considerada en el terreno.
- Puede causar interferencias con las transmisiones electromagnéticas.

# Capitulo III

# Generadores Eléctricos en Aplicaciones Eólicas.

Los generadores eléctricos son maquinas o dispositivos que transforman la energía mecánica en energía eléctrica, para ello el procedimiento habitual es la utilización de la inducción electromecánica; según el tipo de maquina la corriente generada puede ser continua o alterna. El principio de operación del aerogenerador se encuentra establecido en términos de la velocidad de rotación, la cual puede ser constante o variable [7].
Las maquinas eléctricas convencionales cuentan por lo general con un bajo número de polos y sus velocidades de sincronismo son de 750 a 3000 rpm.

**Tipos de generadores**

Por la disposición de los polos los generadores eléctricos son de flujo *radial* y *axial*, la definición está mal expresada por motivo de que el flujo es una magnitud escalar y no tiene ni dirección ni sentido, no obstante, lo que sí es axial o radial es el campo creado por los imanes respecto al eje de giro. En la mayoría de generadores, los imanes o polos son en realidad electroimanes que necesitan de corriente de excitación para crear el campo magnético, la utilización de imanes permanentes ha ido creciendo por el abaratamiento de materiales con cualidades magnéticas excelentes: como el neodimio, el cual con un bajo volumen proporciona una elevada intensidad de campo magnético.

Los generadores eólicos o aerogeneradores, son básicamente un gigantesco molino de viento conectado a un generador eléctrico que aprovecha la fuerza del viento para mover las aspas del molino y producir energía eléctrica.

A mayor caudal de viento mayor cantidad de giros hará el rotor eólico del aerogenerador, produciendo más energía. Los aerogeneradores generalmente van conectados a un sistema de interconexión eléctrica, de tal manera que se disponga de la energía generada inmediatamente se produce.

La energía producida por los aerogeneradores es completamente limpia, no produce ningún tipo de contaminación ni residuos, por lo que se considera uno de los sistemas de generación de energía más limpios que existen actualmente. Los aerogeneradores pueden trabajar de manera aislada o conectados entre sí formando un parque eólico. Los aerogeneradores pueden trabajar solos (aplicaciones aisladas) o en grupo, conectados unos a otros, lo que se conoce como parque eólico.

Las aplicaciones aisladas pueden tener usos domésticos o agrícolas. Las turbinas pequeñas o de baja potencia, se utilizan en zonas rurales para abastecer de electricidad a hogares, escuelas, hospitales, granjas o pequeños comercios. Este mismo sistema se utiliza para abastecer e irrigar el agua, proporcionando una alternativa a la bomba diésel en plantaciones agrícolas. También se utilizan generadores eólicos aislados para usos específicos como desalinización del agua marina, producción de hidrógeno, entre otros muchos usos.

Los parques eólicos se instalan en zonas poco habitadas por donde circulan grandes corrientes de aire y se utilizan para solventar las necesidades eléctricas de una ciudad. Un generador eólico está compuesto por aspas que giran al pasar el viento entre ellas; con este movimiento se genera una diferencia de presiones que produce un movimiento rotatorio en el eje principal del generador. Este eje está conectado a una serie de engranajes que multiplican la fuerza del movimiento y con ello se genera energía eléctrica.

Un aerogenerador funciona de manera inversa a un motor eléctrico: pues mientras el motor recibe electricidad y da energía de rotación; el generador recibe energía de rotación y da energía eléctrica. Esta energía eléctrica pasa a un transformador y la transporta a través de los cables para que sea suministrada a los lugares en donde ésta sea necesaria.

## 3.1 Generador Eléctrico Flujo Radial

Consiste en un cilindro que gira alrededor de su eje, y los imanes se sitúan en la superficie lateral, creando un campo magnético perpendicular al eje de giro. En los generadores de flujo radial el corte del campo magnético respecto al embobinado se realiza de forma perpendicular, es decir, que el corte del campo magnético al embobinado es de 90º, por ende, se genera un cambio muy rápido del campo produciendo pérdidas y recalentamiento por la disposición de las mismas [7].

En los generadores de flujo radial, el campo magnético es siempre paralelo a un plano perpendicular al eje de giro (sin considerar singularidades como lo que ocurre en los extremos de la maquina debido al campo creado por las cabezas de bobina). Estator y rotor están separados por un entrehierro cilíndrico, que idealmente es concéntrico con el eje de giro [6].

Hay que considerar la robustez y rigidez del mismo, y la facilidad de producir componentes como: laminaciones ferromagnéticas y bobinas adaptables a dicha topología. Esta topología permite contar con cierta flexibilidad a la hora de elegir las dimensiones de la máquina.

La principal limitación de las máquinas de flujo radial está en su esencia. Un campo confinado en un plano requiere una carga de corriente en dirección perpendicular a dicho plano. Eso significa que la carga de corriente que crea el campo y la carga magnética resultante, es decir el flujo, han de compartir en dicho plano.

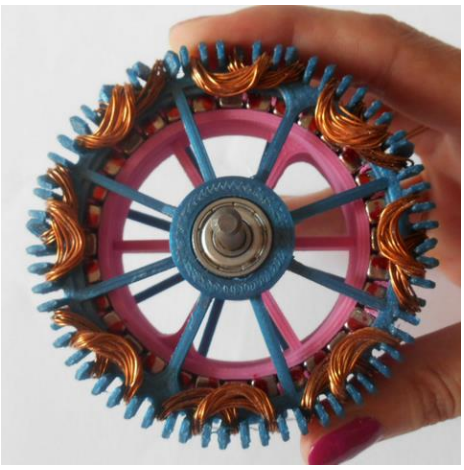


**Figura 17. Estator de Generador Eléctrico de Flujo Radial. [19]**

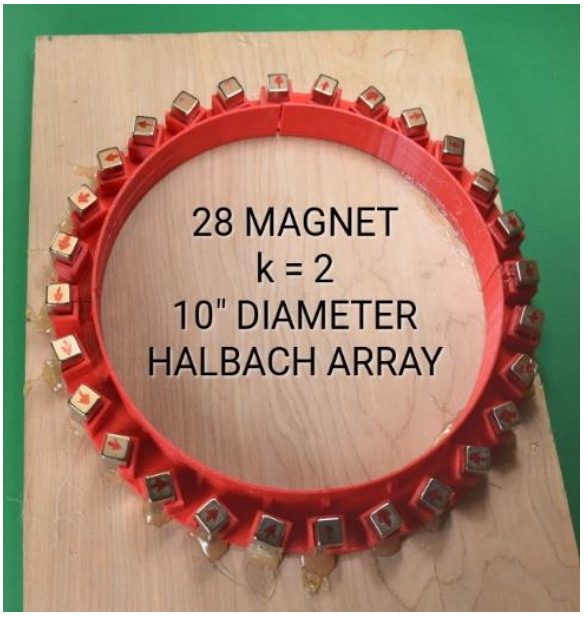



**Figura 18. Rotor de Generador Eléctrico de Flujo Axial. [20]**

## 3.2 Generador Eléctrico de Flujo Axial

Consiste en un par de discos delgados de hierro que giran alrededor de un eje perpendicular al mismo, y en cuyo entorno se sitúan un conjunto de imanes; los cuales crean un campo magnético paralelo al eje de giro. La disposición axial para el corte del campo magnético es paralela respecto al embobinado, esta clase de disposición permite una excitación de los electrones sin fricción y oposición magnética, el corte que se realiza es de 180° produciendo menores perdidas que la generación radial.

Los generadores eléctricos de flujo axial de imanes permanentes, también es llamada máquina de disco, es una alternativa atractiva a la maquina cilíndrica debido a su forma compacta y alta densidad de potencia. Los motores de flujo axial son especialmente adecuados para vehículos eléctricos, bombas, ventiladores, control de válvulas, centrifugas, maquinas herramienta, robots y equipos industriales. Puede funcionar como pequeños generadores eléctricos, dado que un gran número de polos puede ser acomodado, estas máquinas son ideales para aplicaciones de baja velocidad, como, por ejemplo, unidades de tracción electromagnéticos, montacargas o ***generadores eólicos***. El perfil del disco del rotor y el estator de las máquinas de flujo axial hace que sea posible generar diversos diseños e intercambiables. Estas máquinas pueden diseñarse como espacio de aire de una o varias máquinas, con armadura con ranuras, sin ranuras o incluso totalmente sin hierro.

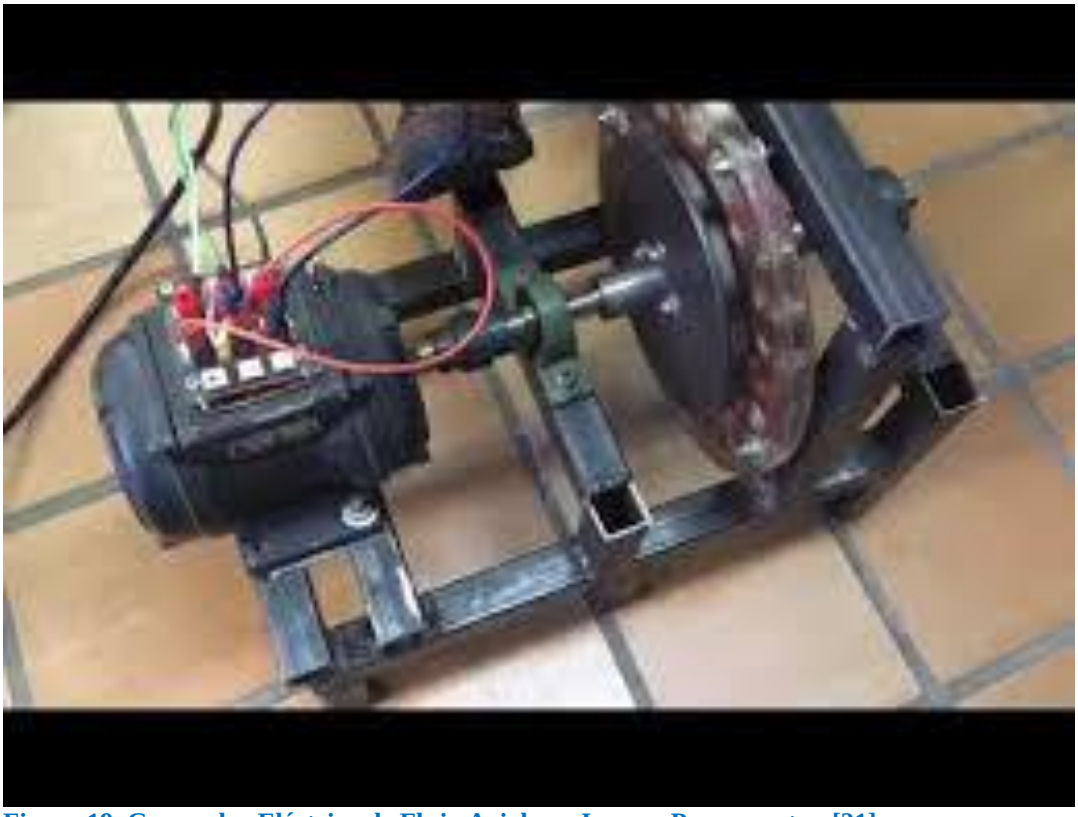


**Figura 19. Generador Eléctrico de Flujo Axial con Imanes Permanentes. [21]**

**Tipos de generadores**

Los generadores de corriente alterna, se pueden clasificar de diferentes maneras: por su *flujo magnético*, su *potencia* o por su *forma de excitación*. Una manera de clasificarlos, puede ser según su forma de excitación, los cuales son del tipo: auto-excitados o síncronos, ya sea con corriente eléctrica continúa inyectada en las bobinas del rotor o con excitación de imanes permanentes; y por otro lado, tenemos a los generadores asíncronos, excitados a partir de la red eléctrica conectada a las bobinas del estator del generador:

- *Maquina síncronas*.
- *Maquinas asíncronas*.

***Síncronos***: El termino síncrono viene dado por qué en este tipo de máquinas, el desplazamiento del campo magnético giratorio coincide siempre con el desplazamiento del rotor. Cuando se mantienen los conductores o espiras en reposo (la parte del estator de la máquina), y hacemos que aquello que realiza el movimiento giratorio relativo con respecto al conductor sea el campo magnético, haciendo uso del giro de un rotor con varios polos que se han obtenido, bien mediante espiras por las que pasa una corriente de excitación o bien por la acción de imanes permanentes, se produce una fuerza electromotriz, inducida en los conductores que están en reposo, cuya amplitud dependerá de la cantidad de corriente de excitación así como la frecuencia de la velocidad mecánica de giro del rotor. la ventaja principal es que la corriente alterna se puede extraer de los bornes fijos y no de las escobillas sometidas continuamente a razonamiento. La corriente inducida se produce, en este caso, en los devanados con núcleo de hierro, que están fijos y distribuidos en la parte interior del estator, de manera que la tensión y la corriente inducidas son completamente sinusoidales.

***Asíncronos***: En este tipo de máquinas no existe corriente conducida a uno de los arrollamientos. La corriente que circula por uno de los devanados se debe a la fuerza electromotriz inducida por la acción del flujo de otro, y por esta razón se denominan máquinas de inducción. El termino asíncrona se debe a que la velocidad de giro del rotor no es la velocidad de sincronismo impuesta por la frecuencia de la red. Las características más importantes de los generadores asíncronos son su construcción simple y su robustez, sobre todo para las que hacen uso de los denominados rotores de jaula de ardilla.

## 3.3 Tipos de generadores eléctricos de flujo axial de imanes permanentes.

Desde un punto de vista de la construcción, los generadores de flujo axial se pueden diseñar con uno o dos rotores, con o sin ranuras en el estator, con o sin núcleo en el estator, con rotores internos o externos, con montaje en superficie o interiores [2]. En el caso de configuraciones de doble cara, ya sea el estator externo o dispositivo de rotor externo pueden ser adoptados. La primera opción tiene la ventaja de utilizar menos imanes a expensas de la utilización deficiente del bobinado mientras que el segundo se considera como una tipología de maquina particularmente ventajoso.

En la figura 20A., se observa un generador de flujo axial de un rotor con núcleo ferromagnético y ranuras en el estator. A este tipo de generador también se le conoce como de una capa o simple capa, ya que la interacción del rotor con respecto al estator es de un solo lado de la máquina.

En la figura 20B., se observa un generador de flujo axial de doble rotor con núcleo ferromagnético y sin ranuras en el estator, también conocido como generador de doble capa, en este caso el estator del generador interactúa con dos rotores, es decir, es afectado por doble campo magnético a diferencia del de una capa.

En la figura 20C., se observa un generador de flujo axial de doble estator con un núcleo ferromagnético y con ranuras en el estator, esta máquina entra en la clasificación de doble capa con la diferencia que son dos estatores en vez de dos rotores, y en este caso el campo magnético creado por el rotor interactúa con dos estatores.

En la figura 20D., se observa un generador de flujo axial de doble rotor sin núcleo ferromagnético en el estator, de igual manera es considerada de doble capa como B y C, sin embargo, este tipo de generador necesita una mayor cantidad de imanes para poder compensar la falta de núcleo ferromagnético en el estator. Las diversas tipologías de los generadores de flujo axial se pueden clasificar de la siguiente manera:

- DE UNA SOLA CAPA:
  - con estator ranurado
  - con estator sin ranuras
  - con estator de polos salientes
- DE DOBLE CAPA:
  - ***Con estator interior***
    - Con estator ranurado
    - Con estator sin ranuras
    - Con hierro el núcleo del estator
    - Con estator sin núcleo
    - Ambos sin núcleos (rotor y estator)
    - Con estator de polos salientes
  - ***Con rotor interno***
    - Con estator ranurado
    - Con estator sin ranuras
    - Con estator de polos salientes

- MULTICAPAS

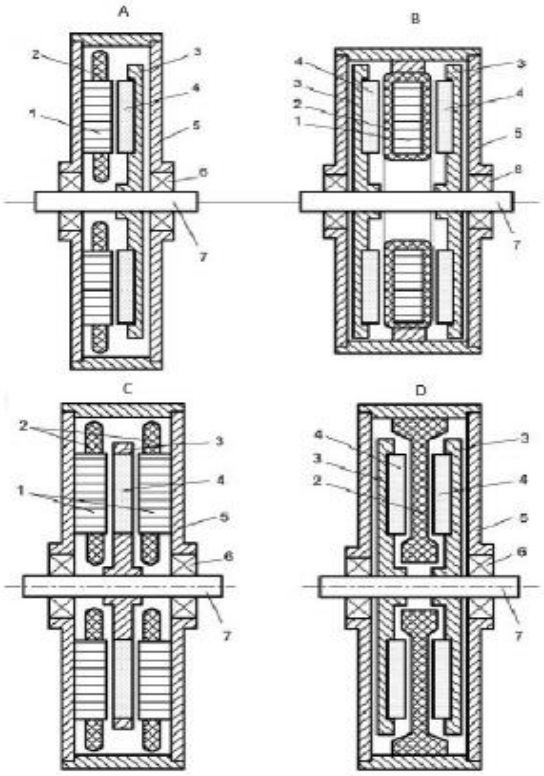



**Figura 20. Tipología de generadores eléctricos de flujo axial. (1.- Núcleo del estator, 2.- Devanado, 3.- Rotor, 4.- Imanes, 5.- Carcasa, 6.- Rodamientos, 7.- Eje). [16]**

Para máquinas de flujo axial con bobinas sin ranuras el espacio de aire es muy largo, es igual al juego mecánico más el grosor de todos los materiales magnéticos (devanado, aislamiento) que son pasados por el flujo magnético. En comparación con un ranurado convencional, el devanado del inducido sin ranuras tiene ventajas tales como conjunto de estator simple, la eliminación del par ranura (cojín), la saturación magnética y el ruido acústico. Las desventajas incluyen el uso de más imanes, inductancias del devanado a veces causan problemas para los de inversores alimentados y perdidas por corrientes parasitas [2].

En la máquina de doble rotor de polos salientes sin escobillas, las bobinas del estator se enrollan en los postes laminados axialmente. El número de polos del estator debe ser diferente del número de los polos del rotor. dependiendo de la aplicación y el entorno operativo, el estator sin ranuras puede tener núcleos ferromagnéticos o ser completamente sin núcleo.

Las configuraciones del estator sin núcleo eliminan cualquier material ferromagnético desde el sistema de estator. Este tipo de configuración también elimina fuerzas axiales de atracción magnética entre el estator y el rotor en el estado sin corriente.

### 3.3.1. Componentes de un generador de flujo axial

- *ROTOR*: Es la parte móvil del generador, el cual es el disco donde van alojados los imanes permanentes y giran por medio de un eje que se encuentra en el centro del disco, para proporcionar un campo magnético giratorio.

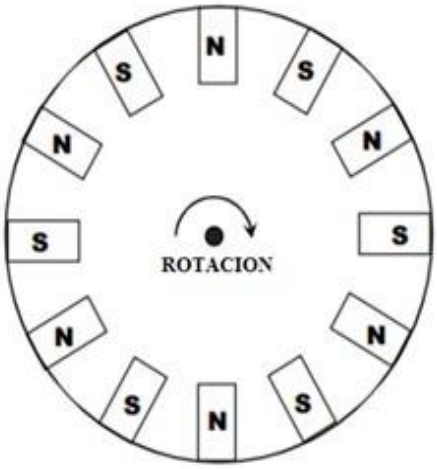



**Figura 21. Rotor de máquina de flujo axial con distribución de imanes según su polaridad. [17]**

- *IMANES PERMANENTES*: es un material magnético que proporciona el campo magnético necesario para producir líneas de fuerzas magnéticas por donde pasan los conductores. Normalmente los imanes empleados el área de generación son comunes los imanes de neodimio.

- *EJE*: Es el encargado de transmitir la energía mecánica captada por el rotor eólico al generador eléctrico. En un extremo contiene el acople que va al rotor eólico y del otro en algunos casos un disco para el freno hidráulico.

- *ESTATOR*: Esla parte fija del generador eléctrico, donde van alojadas las bobinas o conductores que realizan las conexiones necesarias para obtener una ***fuerza electromotriz*** en los bornes de dicho generador.

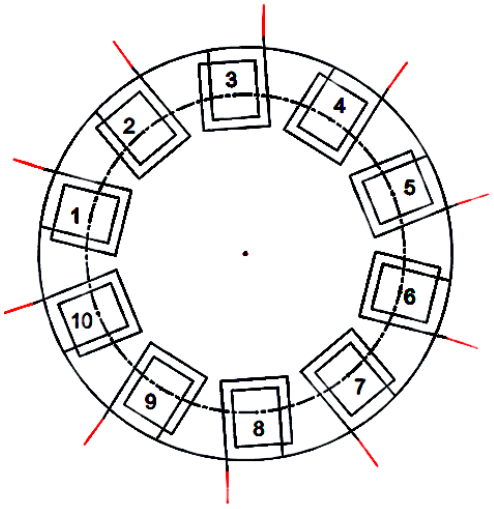



**Figura 22. Ilustración con bobinas en el estator. [18]**

- *DEVANADO*: son el conjunto de bobinas que van alojados en el estator ya sea con un núcleo de hierro o aire según sea el caso; van conectados para formar un circuito donde la ***fuerza electromotriz*** se genera, normalmente los devanados son monofásicos o trifásicos.

- *CARCASA*: Protege al generador eléctrico de cualquier objeto del exterior que pueda perjudicar su buen desempeño (polvo, basura, agua).

- *BOBINAS*: Es un conjunto de espiras que conforman su arreglo puede ser varias espiras en paralelo o única en serie. Son componentes que generan un flujo magnético cuando se hace circular por ellas una corriente eléctrica; se fabrican arrollando un hilo conductor sobre un núcleo de material ferromagnético o al aire. El material para la realización de las bobinas generalmente es cobre en forma de hilo esmaltado, la misión del aislante es ofrecer una separación eléctrica adecuada entre espiras. Las bobinas se pueden clasificar de la siguiente manera [7]:

  **Bobinas con núcleo de aire**

  El conductor se enrolla sobre un soporte hueco y posteriormente se tira este quedando con un aspecto parecido al de un muelle. Se utiliza en frecuencias elevadas. Una variante de la bobina anterior se denomina solenoide y difiere en el aislamiento de las espiras y la presencia de un soporte que no necesariamente tiene que ser cilíndrico. Se utiliza cuando precisan muchas espiras, estas espiras pueden tener tomas intermedias, en este caso se puede considerar como dos o más bobinas sobre un mismo soporte y conectadas en serie.

**Bobinas con núcleo solido**

Poseen valores de inductancia más altos que los anteriores debido a su nivel elevado de permeabilidad magnética. El núcleo suele ser de un material ferromagnético, los más usados son la ferrita, cuando se manejan potencias considerables se utilizan núcleos parecidos a los de los transformadores (en fuentes de alimentación, sobre todo).

**Conexión de bobinas**

Cada bobina produce un voltaje diferente lo que está en función de cómo se conecten, hay dos formas de conectar las bobinas: en *serie* y en *paralelo*. La conexión en serie consiste en unir el final de la primera bobina con el principio de la siguiente entonces los voltajes se suman, por otro lado, para conexión en paralelo los principios se conectan entre sí al igual que los finales, el voltaje resultante es el mismo que de una bobina con la diferencia de que se puede conseguir el doble de corriente.

A continuación, en las Figuras. 23 y 24 se indican las conexiones de las bobinas propuestas para este tipo de generadores, lo primordial es aprovechar al máximo el flujo magnético producido por los imanes y es lo que se pretende con estas configuraciones.

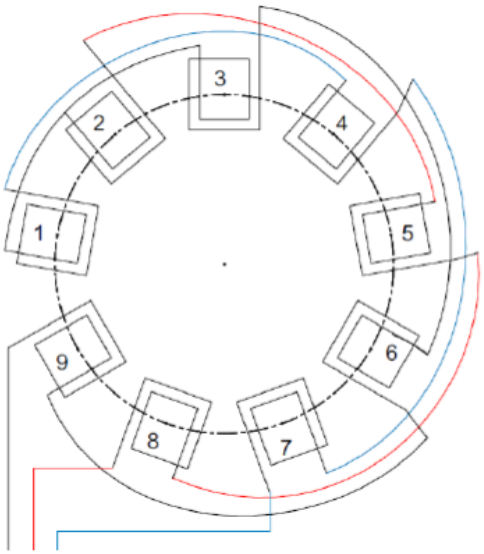



**Figura 23. Esquema de conexión de bobinas en serie. [19]**

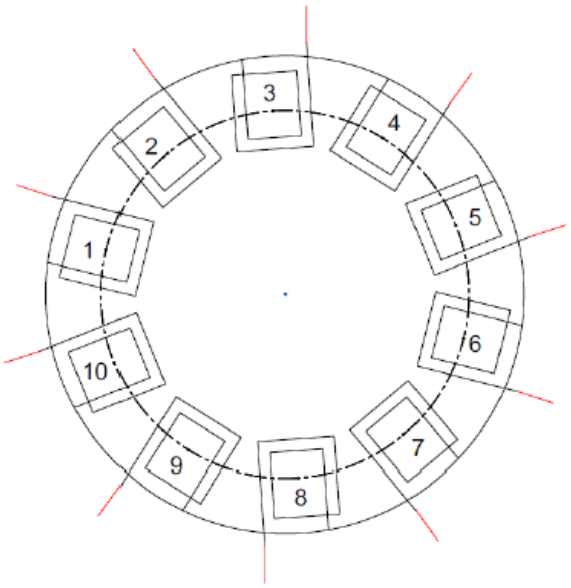



**Figura 24. Esquema de conexión bobinas en paralelo. [19]**

En el primer caso se puede observar que están conectadas tres bobinas en serie para cada fase al tratarse de tres fases, el estator está compuesto por nueve bobinas en total. Por lo tanto, es un generador trifásico. Una ventaja notable de este generador es que para el rectificador sólo se tienen tres cables, al contrario del segundo caso en el que se tienen diez cables para el rectificador, el número de cables de salida determina la ubicación del rectificador ya que si se tienen demasiados cables el movimiento del generador en el extremo de la torre queda limitado, lo que implica que el rectificador debe estar ubicado junto al generador y esto ocasiona problemas de mantenimiento.

Para el segundo caso se tienen diez bobinas conectadas en paralelo entonces se tiene un generador de diez fases, el número de fases no es un problema para la rectificación, ya que se pueden variar las conexiones de los puentes rectificadores para rectificar hasta dos fases por cada uno.

## 3.4 Materiales aislantes

Los generadores eléctricos, son dispositivos de conversión de energía y durante el proceso cierto nivel de perdidas es desprendido: *perdidas en el núcleo* y *perdidas en el cobre*. La energía perdida dentro de la maquina es convertida en calor el cual causa que la temperatura dentro de la maquina se eleve. Es por ello, que las perdidas no son solo lo importante desde el punto de vista de la eficiencia, sino que también causan que la temperatura de los devanados aumente significativamente [2].

Las temperaturas de las diferentes partes del generador están determinadas por la producción y la disipación de calor. La temperatura del estado estable es alcanzada cuando las dos son iguales. Reduciendo la carga eléctrica y magnética, las pérdidas y el calor generado se puede reducir. Sin

embargo, esto no resulta rentable. El mejor diseño es aquel en que los materiales activos son utilizados a su nivel óptimo y cuando se provee un adecuado aislamiento y un sistema de refrigeración.

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

## 3.5 Principio de funcionamiento de generadores eléctricos

Se basa en el fenómeno de inducción electromagnética, que consiste en el movimiento relativo de una espira o conductor a través de un campo magnético, o si un conductor este situado en las proximidades de un campo magnético cuya intensidad es variable, estas dos situaciones generan una diferencia de potencial en los extremos de dicha espira conocida como fuerza electromotriz (**FEM**) [7].

De acuerdo a la ley de Faraday el voltaje inducido en un circuito es directamente proporcional al cambio del flujo magnético en el conductor. La FEM dependerá de la cantidad de flujo magnético (también llamado líneas) que la espira pueda cortar, cuanto mayor sea el número de espiras, mayor variación de flujo generará y por lo tanto mayor FEM. Esta fuerza electromotriz a su vez actúa para oponerse al movimiento, (Ley de Lenz) se conoce como fuerza contra electromotriz, este efecto no es más que una consecuencia del principio de conservación de la energía aplicado al electromagnetismo.

Cuando el generador no está conectado a un generador externo, se necesita un pequeño torque para que gire el rotor, pero en el caso de que se conecte un dispositivo o carga, la resistencia se opone al paso de la corriente, provocando que el esfuerzo para que gire el rotor aumente, es decir, se necesita un mayor torque para el accionamiento mecánico. Como las bobinas portadoras de corriente están en un campo magnético externo, se genera una resistencia en las bobinas que genera una oposición al movimiento. Cuanto mayor sea la carga eléctrica mayor sea la resistencia al movimiento, por lo tanto, para poder vencer esta resistencia que se ve reflejada como un torque aplicado para el movimiento del rotor deberá ser mayor. Se necesita más entrada de energía mecánica para producir más salida de energía eléctrica.

## 3.6 Electromagnetismo en un generador eléctrico

El funcionamiento del generador eléctrico con imanes permanentes, se basa en la conversión de energía eléctrica a partir de la magnética y la mecánica. Debido a que la energía magnética desempeña un papel central en la producción, es necesario formular métodos para el cálculo de la misma. La energía magnética es altamente dependiente de la distribución espacial de un campo magnético [2].

Para los generadores eléctricos esto significa encontrar la distribución de campo magnético dentro del generador. Hay numerosas formas de determinar la distribución del campo magnético dentro de un generador. Para geometrías muy simples, la distribución del campo magnético se puede encontrar analíticamente. Sin embargo, en la mayoría de los casos, la distribución del campo solo puede ser aproximada.

## 3.7 Imanes permanentes

Un imán es un cuerpo que posee la propiedad de atraer a las sustancias magnéticas [2]. Se definen como materiales que pueden ser imantados y a la vez ser capaces de generar un campo magnético persistente, es decir, la magnetización es duradera y potente, esta es la principal característica que la diferencia de los imanes temporales, que requieren de la circulación de una corriente eléctrica para generar el campo magnético, tan pronto como la corriente desaparece el campo magnético se anula [7].

## 3.8 Clasificación de imanes

Un imán es un cuerpo que posee la propiedad de atraer a las sustancias magnéticas. Los imanes son de dos tipos: *imanes permanentes* y *electroimanes* [2].

*LOS IMANES PERMANENTES*: Tienen la propiedad de almacenar energía magnética después de eliminar la fuerza magnetizante externa que la produce. La energía magnética almacenada por un imán de este tipo puede ser esencialmente contante durante un periodo definitivo.

*LOS ELECTROIMANES*: Son imanes que poseen cualidades magnéticas solo en presencia de una fuerza magnetizante producida por una corriente eléctrica. La energía magnética inducida es función de la intensidad, del sentido y algunos casos, de la duración de la corriente.

Los imanes permanentes provienen del magnetismo residual o remanente, cualidad denominada retentividad. Cuantitativamente se consideran los siguientes conceptos:

- ***Remanencia***:
  Es la de flujo estructural, denominada también inducción residual. Se representa por el símbolo $B_r$ y se expresa en unidades en Tesla.

- ***Fuerza coercitiva***:
  Es igual a la fuerza magnetizante inversa necesaria para reducir la remanencia a cero, se representa por el símbolo $H_c$, y se expresa en Amper-vueltas por centímetro.

- ***Producto energético***:
  Es el producto de $B_r$ y $H_c$ de un imán en puntos específicos de su curva de magnetización. El valor máximo del producto energético se utiliza a menudo para comparar distintos materiales magnéticos en lo relatico a su idoneidad para aplicaciones.

Se clasifican de acuerdo a los materiales de los que están compuestos, cada material tiene diferentes propiedades ya sean mecánicas o magnéticas, mediante diferentes combinaciones se obtienen nuevos materiales con las características de sus componentes [7].

**Imanes de acero al carbono**

Tienen la propiedad de magnetizarse por medios mecánicos o físicos y además retienen en cierta medida este magnetismo. Algunas acciones mecánicas que pueden inducir la magnetización en aceros son: golpes, deformación plástica, tensiones mecánicas elevadas entre otras. Las principales acciones físicas que pueden lograr el mismo efecto son aplicaciones de campos magnéticos externos y circulación de corriente. Mediante estudios y avances en la metalurgia, se descubrió el efecto de varios elementos aleantes como el tungsteno o cromo que aparte de cambiar las propiedades mecánicas también modifica la capacidad de retención magnética. Los más conocidos de este tipo de imanes son: Acero al cromo y acero al tungsteno.

**Imanes de Alnico**

Este tipo de imanes permanentes comenzaron a desarrollarse en 1930, su nombre se debe a que además de hierro estos imanes contienen aluminio, níquel y cobalto. Los grados de estos imanes están en función de la tecnología de fabricación y las proporciones de los elementos de aleación su aspecto es metálico similar al de un acero, pero tienen la desventaja de ser mecánicamente más frágiles. Este tipo de imanes representan un avance considerable respecto a los de acero al carbono por que poseen mayor resistencia a la desmagnetización. Algunos ejemplos de este tipo de imanes son: Alnico 1, Alnico 4 y Alnico 5 A.

**Imanes de ferrita**

Su nombre a la denominación en ingles del compuesto químico del que está hecha como ejemplo Barrium Ferrite, estos imanes son de color gris oscuro, frágiles y además inmunes a la corrosión. Superan ampliamente la coercitividad del Alnico con un costo muy inferior lo que lo hace un material muy utilizado, su desarrollo empezó en 1950 y en la actualidad no se puede sustituir algunas aplicaciones como en parlantes y motores de corriente continua.

**Imanes de tierras raras**

Con este tipo de material se puede combinar las mejores características como son la alta remanencia y la coercitividad, se desarrollaron inicialmente 1960 y fueron los de Samario-Cobalto que presentaban propiedades magnéticas superiores a los imanes antes mencionados el inconveniente de estos imanes es su elevado costo. Sim embargo su relación de peso y poder magnético hizo que se justifique el precio

elevado. En 1984 aparece un nuevo compuesto denominado Neodimio-Hierro-Boro, que supera las propiedades del Samario-Cobalto a un precio inferior, aunque con una temperatura máxima de operación menor. El compuesto básico de Neodimio-Hierro-Boro (NdFeB) tiene las desventajas de desmagnetizarse a temperaturas menores que otros compuestos y baja resistencia a la corrosión y que se han mejorado con ajustes de composición y otros recursos como recubrir los imanes con capas finas de níquel y cromo para aislar al material base del ambiente corrosivo.

A continuación, se ampliará la información de este último por su importancia en este trabajo de investigación [7].

**Origen**

El neodimio (Nd), es un elemento químico que pertenece al grupo de tierras raras, este elemento fue descubierto por Carl Aver Von Welshbach químico austriaco en Viena 1885, neodimio viene de las palabras griegas neos (nuevo) y didymos (gemelo) entonces neodimio significa nuevo gemelo se lo denomino así por motivo de que el Praseodimio y el Neodimio se descubrieron juntos por eso se los llamo gemelos.

**Obtención**

Nunca se encuentra en la naturaleza como elemento libre, está presente en la arena monocita y batnasita que presentan en su composición pequeñas cantidades de todos los metales de tierras raras.

**Grados**

Se clasifican de acuerdo al material que este combinado (N35, N38, N42, N38SH) como regla general cuando más alto es el grado más fuerte es el imán actualmente los imanes más potentes tienen el grado N52, las letras que siguen este grado indican la temperatura de funcionamiento si no sigue ninguna letra significa que la temperatura es 80° C. La cualidad más notable de este tipo de imanes es que poseen una potencia magnética 9 veces superior a la de un imán convencional.

## 3.9 Criterios de selección del generador eléctrico

Dentro de las principales clasificaciones de la tipología de los ***generadores de flujo axial de imanes permanentes*** se considera únicamente los que no usan ranuras, a continuación, se explica el motivo de la selección.

Los ***generadores eléctricos de flujo axial de imanes permanentes sin ranuras*** presentan fácil construcción, de igual manera se reduce el peso del estator ya que no cuenta con núcleo de hierro y tener que ranurar el estator lleva un costo elevado en el generador de igual manera con el laminado del hierro para evitar el calentamiento de este y que por ello existan más perdidas e ineficiencia del generador.

Los ***generadores de flujo axial de imanes permanentes sin núcleo ferromagnético*** presentan la mayor facilidad de construcción si se hace una comparación con los demás, sin embargo, se necesita una gran cantidad de volumen en los imanes para mantener una eficiencia alta. Provocando que el generador no sea ligero y costoso.

Los ***generadores eléctricos de flujo axial de imanes permanentes de polos salientes*** presentan una construcción fácil, sin embargo, al usar o no núcleo ferromagnético el costo del diseño de estos generadores son altos por las piezas que se utilizan que de igual forma suman peso al generador.

**Nota**: Teniendo en cuenta la metodología, se enfocará en un ***generador de flujo axial de imanes permanentes con núcleo de aire*** ya que con esto ganamos pérdida de peso en el generador; sin embargo, se utilizará mayor cantidad de imanes para así lograr compensar la falta de núcleo de hierro en el núcleo del estator.

De acuerdo a la metodología nos basaremos en un ***generador eléctrico de flujo axial de imanes permanentes núcleo de aire***, el cual nos permite economizar en el maquinado de piezas de hierro para fabricar un estator, el cual el generador de núcleo de aire no lo requiere ya que solo está formado por devanados conectados en serie o paralelo según sea los beneficios que se requieran obtener. Por otro lado, el estator es más ligero ya que solo está formado por el devanado dentro de una resina epóxica resistente al calor que no tiene ningún tipo de atracción a los imanes que genere un torque o frenado por la interacción de los campos magnéticos producidos por los imanes que están colocados en los rotores del generador ya que este generador se puede trabajar con uno o con dos rotores a la vez.

# Capitulo IV
# METODOLOGÍA

Para la elaboración de la metodología de diseño de un ***generador eléctrico de flujo axial de imanes permanentes de núcleo de aire*** se parte del diseño y construcción de 2 rotores eólico optimizados. Se realizaron investigaciones de las ultimas publicaciones de los avances tecnológicos sobre el diseño y construcción de estos generadores para conocer el modelo de dimensionado, para así proceder con el maquinado de cada una de las partes del generador.

Como primera etapa, se considera el estudio del estado del arte, con respecto al diseño de generadores de flujo axial, seleccionando los materiales de acuerdo a sus propiedades, y a las necesidades que el generador demanda con base a diseño, en este caso un valor nominal de 1 kW, y tomando en cuenta la recopilación de información de los prototipos realizados.

La segunda etapa está enfocada a diseñar el proceso para optimizar el dimensionado de generadores eléctricos de flujo axial de imanes permanentes, para su uso en aerogeneradores de baja potencia. El propósito principal es la extracción de la máxima potencia del viento para el mejor rendimiento del generador, el cual es un factor importante a considerar para mejorar la eficiencia de los generadores, así como las variables presentes en la puesta en marcha de la máquina, y cada uno de los puntos críticos en cada una de estas variables o parámetros.

En la tercera etapa se realiza el maquinado y construcción preliminar de un prototipo de ***generador eléctrico de flujo axial de imanes permanentes con núcleo de aire***, el cual fue financiando por parte del asesor externo, con fines didácticos y experimentales que permitan evaluar la eficiencia y calidad del generador construido, considerando las variables que intervienen en su funcionamiento, así como los desgastes de partes de piezas mecánicas.

## 4.1 Modelo para la fabricación de generador eléctrico de flujo axial de imanes permanentes

Para realizar las partes constructivas del generador, se utilizó el *software* conocido como: AutoCAD; *software* con el cual se realizó los dibujos de cada una de las piezas que se requieren para la construcción del generador.

### 4.1.1 Auto CAD

Es un programa de diseño asistido por computadora para dibujo en dos y tres dimensiones. El término AutoCAD surge como creación de la compañía Autodesk, teniendo su primera aparición en 1982. AutoCAD es un *software* reconocido a nivel internacional por sus amplias capacidades de edición, que hacen posible el dibujo digital de planos o la recreación de imágenes en 3D [21].

AutoCAD es uno de los programas más usados, elegido por arquitectos, Ingenieros y diseñadores industriales.

Al igual que otros programas de diseño asistido por computadora, AutoCAD gestiona una base de datos de entidades geométricas (puntos, líneas, arcos, etc.) con la que se puede operar a través de una pantalla gráfica, llamado editor de dibujo. La interacción del usuario se realiza a través de comandos desde la línea de órdenes, a la que el programa está fundamentalmente orientado. Las versiones modernas del programa permiten la introducción de éstas mediante una interfaz gráfica de usuario, que automatiza el proceso.

Como todos los programas y de CAD, procesa imágenes de tipo vectorial, aunque admite incorporar archivos de tipo fotográfico o mapa de bits, donde se dibujan figuras básicas o primitivas (líneas, arcos, rectángulos, textos, etc.), y mediante herramientas de edición se crean gráficos más complejos. El programa permite organizar los objetos por medio de capas, ordenando el dibujo en partes independientes con diferente color. El dibujo de objetos seriados se gestiona mediante el uso de bloques, posibilitando la definición y modificación única de múltiples objetos repetidos.

En el desarrollo del proyecto con el apoyo del software Auto CAD nos es una herramienta de gran utilidad ya que es por medio de este programa donde realizamos los dibujos previos a la manufactura de cada uno de las partes constructivas del que será en un futuro próximo un ***generador de flujo axial de imanes permanentes con núcleo de aire.*** Con el apoyo de esta herramienta de trabajo se diseñó con medidas exactas y en 3Dpartes importantes del generador como lo son: rotores, rotor con imanes, estator y bobinas. El apoyo que nos ofrece el software es tomar la decisión de continuar o no con la fabricación de cada una de las partes constructivas del generador de acuerdo a las dimensiones obtenidas de cada una de ellas y contar con la seguridad de lo que se invierte en material y manufactura sea un gasto necesario y correcto.

## 4.2 Modelo del generador eléctrico de flujo axial de imanes permanentes con núcleo de aire

A continuación, se hace un análisis con respecto a la metodología y el dimensionado del ***generador eléctrico de flujo axial de imanes permanentes con núcleo de aire***. Los factores por los cuales se eligió este generador provienen de la lectura y análisis de [2, 7].

**Principio de funcionamiento**

Los generadores de flujo axial son especialmente recomendables en aplicaciones donde se cumplen los siguientes requisitos:

- Bajas velocidades.
- Pares elevados.
- Bajo peso.
- Sobrecargas elevadas y frecuentes.

Las máquinas eléctricas de flujo axial pueden diseñarse con una relación potencia/peso mucho más alto que las máquinas de flujo radial para rendimientos similares. Esta relación tan alta se consigue con un número de polos elevado. Al aumentar el número de polos aumenta la densidad de potencia, por lo que se consigue mayor potencia con una máquina más ligera. Por lo tanto, este tipo de máquinas son recomendables en aquellas aplicaciones que requieran pares elevados y velocidades bajas.

Los imanes permanentes se ubican sobre la superficie de los rotores, de tal forma que el flujo magnético pasa de un rotor a otro a través de las bobinas del estator, mientras el eje del rotor gira. De esta forma, se induce una tensión eléctrica en los terminales de las bobinas. El hecho de usar imanes permanentes, elimina las pérdidas en el devanado de excitación, que normalmente suelen representar entre el 20 y el 30 % de las pérdidas en un generador. Cabe indicar que dicha configuración permite el crecimiento modular de la máquina, al añadir otro conjunto de estator bobinado y rotor con imanes.

### 4.2.1 Polos magnéticos

Un generador eléctrico es un dispositivo que convierte energía mecánica en energía eléctrica. Mantiene por tanto una diferencia de potencial entre dos puntos denominados polos. Por la ley de Faraday, al hacer girar una espira dentro de un campo magnético, se produce una variación del flujo de dicho campo a través de la espira y por tanto se genera una corriente eléctrica.

El número de polos que presentara el generador eléctrico, tiene una relación directa con la frecuencia en que se desea generar, así como con las revoluciones por minutos a las cual estará sometido el generador, de acuerdo a la ecuación [2].

$$\boldsymbol{N_m = \frac{120\, f}{RPM}}$$

Donde:

$N_m$ = Numero de polos por disco
$f$ = Frecuencia eléctrica [Hz]
$RPM$ = Revoluciones por minuto

### 4.2.2 Excitación mediante Imanes Permanentes

Resulta de fundamental importancia en la elección de una excitación mediante imanes permanentes, el hecho de que no haya perdidas por efecto Joule asociadas a la creación de campo magnético, permitiendo incrementar la eficiencia de la maquina respecto a la excitación eléctrica. En el caso de una maquina lenta, en la que mayor parte de las pérdidas se genera en el cobre, el devanado de excitación puede ser un responsable de casi la mitad de todas las perdidas. La excitación por imanes puede por lo tanto reducir la cualidad de irreversible de la maquina a prácticamente la mitad [6].

Un inconveniente de la utilización de los imanes permanentes como sistema de excitación es la posible desmagnetización. Para ello las maquinas han de diseñarse a prueba de ello, siendo tolerantes a las situaciones que hacen que esto ocurra, lo cual hace incrementa su coste. Por otro lado, la complejidad adicional de usar imanes permanentes, creciente con el tamaño de la máquina, ha de ser valorada, puesto que condiciona los procesos de montaje de la maquina misma y los de instalación de esta en el aerogenerador, introduciendo restricciones adicionales.

### 4.2.3 Selección de Imanes

Los imanes necesarios en nuestro espacio son difíciles de obtener ya que los distribuidores no cuentan con imanes permanentes de las dimensiones que se solicita, por ello se recurrió a buscarlos en otros lugares e importarlos ya que consta de características específicas. Se requieren imanes con un alto grado de magnetización a medidas que hagan posible la ubicación de varios imanes en cada rotor, además la dirección de su polarización debe ser pertinente para esta aplicación.

Se requieren imanes con un alto grado de magnetización a medidas que hagan posible la ubicación de varios imanes en cada rotor, además de que su dirección de polarización debe ser pertinente para esta aplicación.

**Determinación del número de polos**

El número de polos está directamente relacionado con la frecuencia de la señal eléctrica generada, la velocidad del viento y por lo tanto las rpm determinan la frecuencia de la señal entregada por el generador. Con la siguiente ecuación podemos determinar la frecuencia de la señal eléctrica generada: [7].

$$\boldsymbol{f = \frac{p.N}{120}}$$

Donde:
*f* = Frecuencia en Hz.
P= número total d polos.
N = rpm.

| | Tabla I: Determinación del número de polos | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Velocidad de 2m/s | | Velocidad de 4m/s | | Velocidad de 6m/s | |
| Frecuencia (Hz) | Número de polos | Frecuencia (Hz) | Número de polos | Frecuencia (Hz) | Número de polos |
| 10 | 13,46 | 10 | 6,73 | 10 | 4,49 |
| 20 | 26,93 | 20 | 13,46 | 20 | 8,98 |
| 30 | 40,39 | 30 | 20,20 | 30 | 13,46 |
| 40 | 53,86 | 40 | 26,93 | 40 | 17,95 |
| 50 | 67,32 | 50 | 33,66 | 50 | 22,44 |
| 60 | 80,78 | 60 | 40,39 | 60 | 26,93 |
| Velocidad de 8m/s | | Velocidad de 10m/s | | Velocidad de 12m/s | |
| Frecuencia (Hz) | Número de polos | Frecuencia (Hz) | Número de polos | Frecuencia (Hz) | Número de polos |
| 10 | 3,37 | 10 | 2,69 | 10 | 2,24 |
| 20 | 6,73 | 20 | 5,39 | 20 | 4,49 |
| 30 | 10,10 | 30 | 8,08 | 30 | 6,73 |
| 40 | 13,46 | 40 | 10,77 | 40 | 8,98 |
| 50 | 16,83 | 50 | 13,46 | 50 | 11,22 |
| 60 | 20,20 | 60 | 16,16 | 60 | 13,46 |

Como se puede observar en la tabla mientras mayor sea la frecuencia que se requiere para la señal eléctrica generada más polos se necesitan, también su la velocidad de viento es baja, se requiere un mayor número de polos para alcanzar la frecuencia requerida (frecuencia de la señal eléctrica generada). Se elige un número de 24 polos (12 en cada rotor) con el que se garantiza una adecuada distribución de los imanes en los rotores. El valor de la frecuencia de funcionamiento no tiene por qué ser demasiado alto ya que en la rectificación se obtiene corriente directa que carece de frecuencia.

### 4.2.4 Rotores

En los generadores de flujo axial, los imanes se disponen sobre un disco de hierro que gira alrededor de un eje perpendicular que pasa por su centro. De esta manera, el campo magnético de los imanes es paralelo al eje de giro y perpendicular al estator.

La configuración con doble rotor consigue una onda de inducción magnética del doble de amplitud, al estar las bobinas enfrentadas a dos imanes de polos opuestos cada vez. Esta configuración es muy similar a la de doble estator, con la diferencia de que tiene dos rotores externos y un estator interior, que es que se seleccionó en la construcción de nuestro prototipo.

A la hora de realizar el diseño del generador, se consideran los datos referentes al rotor eólico utilizado en el prototipo de la referencia [7]. Además, se incluye lectura y análisis de información de artículos relacionados al tema, que dieron como resultado la elección del prototipo ya mencionado.

En el diseño del generador, se consideraron los datos utilizados en el trabajo [7] que se utilizó como referencia. El prototipo tiene rotores de diámetro de 30 cm y 6 mm de altura o grosor con chumacera en la parte central de cada uno, para ser de fácil ajuste a la flecha y asegurar mediante opresores. A continuación, se presentan las Figuras 25 y 26, en el que se pueden observar el diseño realizado mediante AutoCAD, así como pieza maquinada.

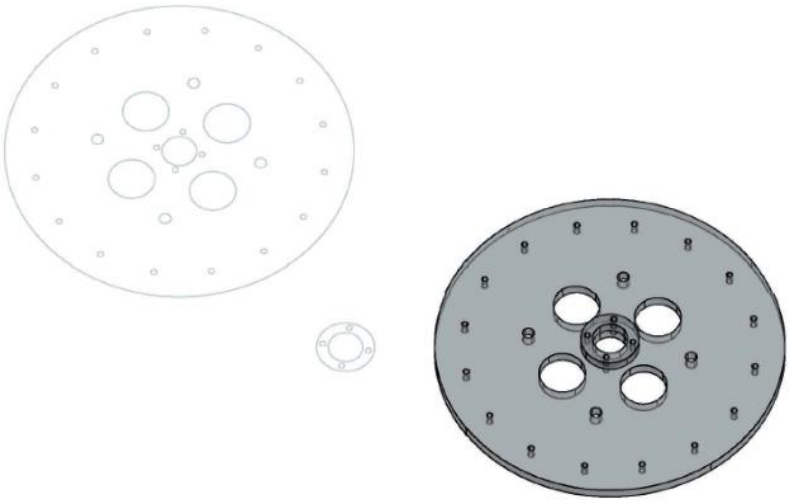


**Figura 25. Rotor de generador. [De autoría propia].**

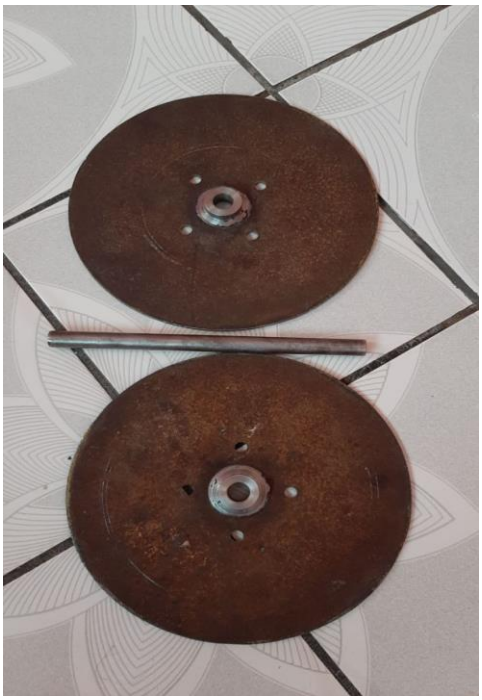


**Figura 26. Rotores de generador sin imanes. [De autoría propia].**

Para la colocación de los imanes, y su ubicación de manera correcta sobre los rotores sin errores de longitudes diferentes, fue necesario diseñar y construir un molde. El molde que se pretende usar para la colocación de los imanes se diseñó mediante AutoCAD, para posteriormente construirlo en madera. El molde cuenta con 12 espacios, en los que se alojaran los imanes que corresponden a cada rotor.

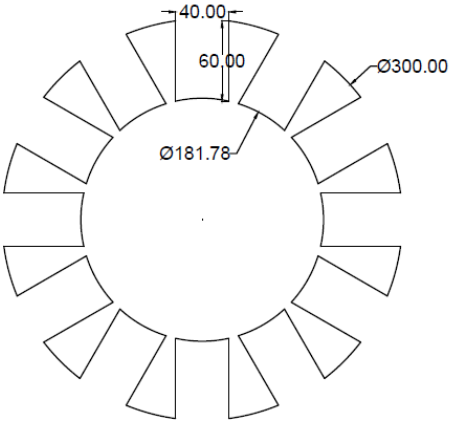



**Figura 27. Diseño de molde para la colocación de imanes en rotor del generador. [De autoría propia].**

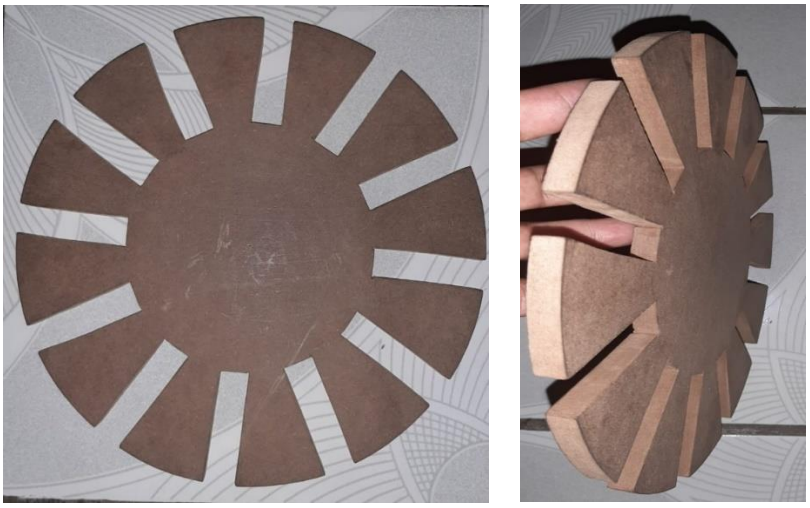


**Figura 28. Molde para la colocación de imanes de neodimio en rotores del generador. [De autoría propia].**

## 4.2.5. Número de espiras en las bobinas

Las dimensiones de la bobina quedan determinadas por las medidas del imán ya que la bobina debe proporcionar una sección hueca para el paso del campo magnético. En la siguiente tabla se muestran las características de bobinas con diferentes tipos de núcleos [7]:

| Tipo de núcleo | Mínimo (H) | Máximo (H) | ¿Alta corriente? | Frecuencia límite |
|---|---|---|---|---|
| Núcleo de aire con | | | | |
| soporte | 20 nH | 1 mH | Si | 1 GHz |
| Núcleo de aire sin | | | | |
| soporte | 20 nH | 100 mH | Si | 500 MHz |
| Devanado abierto | 100 nH | 1 mH | No | 500 MHz |
| Anillo de ferrita | 10 mH | 20 mH | No | 500 MHz |
| RM núcleo de ferrita | 20 mH | 0,3 H | No | 1 MHz |
| EC o ETD núcleo de | | | | |
| ferrita | 50 mH | 1 H | Si | 1 MHz |
| Acero | 1 H | 50 H | Si | 10 Hz |

Por lo tanto, para nuestro caso de estudio se consideran bobinas con núcleo de aire con soporte y se considera una inductancia de 1mH. A continuación, se aplica el siguiente formalismo matemático.

$$\boldsymbol{L = \frac{n^2 \mu A}{l}}$$

donde:

L= inductancia (H).

n= número de espiras.

l= longitud de bobina.

A= Área de la sección transversal.

$\mu$= Permeabilidad del núcleo.

Resultando:

$\mathbf{L = 1mH}$

$\mathbf{l = 0.013m}$

$\mathbf{A = 1.2x10^{-3}\ m^2}$

$\boldsymbol{\mu = 4\pi.10^{-7}\ (nucleo\ de\ aire)}$

$$\boldsymbol{n = \sqrt{\frac{l.L}{\mu A}}}$$

Por lo que al sustituir se tiene que el número de espiras por bobina es de 92.84; lo que por simplicidad se redondea a un valor de 93 espiras, para la construcción y los cálculos. Para el caso del generador de bobinas en paralelo, se tiene que cada bobina tiene un total de 67 espiras. El calibre del alambre propuesto, es de cobre esmaltado con características de un alambre de calibre AWG 14, el cual tiene un diámetro de 1.63mm.

**Figura 29. Bobinas para estator de generador de flujo axial de imanes permanentes con núcleo de aire. [De autoría propia].**

## 4.2.6 Estator del generador

Para el diseño propuesto, se ha elegido un estator sin ranuras, debido a que disminuyen el ruido y las vibraciones. Se requiere que las bobinas puedan enlazar la totalidad del flujo generado por los imanes, por lo tanto, se han elegido unas bobinas que sigan la forma del imán, con una superficie un poco superior a la del imán para que sea posible el menor flujo disperso posible [13].

Se tienen nueve bobinas, las cuales deben de estar separadas a cierta distancia, del hueco diseñado para el paso de los tornillos de los rotores, para la sujeción de ambos rotores y evitar con ello el desbalanceo de los mismos. Para este paso, se diseñó una “isla” que se maquinó como un molde exclusivo para construir el estator; el molde cuanta en la parte central con un orificio. La “isla” está diseñada con un diámetro de 11cm.

Finalmente, para la construcción del estator, se propone utilizar una resina epóxica que recubrirá a las nueve bobinas construidas. Las bobinas se conectarán en serie, debido a que el generador se diseñó con esta configuración. Para tal efecto, se deberá de conectar tres bobinas en serie por cada fase, formando un conjunto de tres bobinas por fase, resultando en un generador de tipo trifásico. Una ventaja notable de este generador es que para el rectificador solo se tiene tres cables, lo que en generadores con conexión paralelo se tienen 10 cables.

Por efecto de inducción magnética se genera corriente alterna en las bobinas, la misma que debe de ser rectificada para que pueda ser almacenada en baterías. La conversión de corriente alterna (C.A.) a corriente continua (C.C.) se realiza mediante rectificadores a base de diodos.

En el caso del estator se pretende concluir al momento de tener disponible los materiales faltantes para su construcción como son: la resina epóxica, imanes, estructura para sujetar el estator y material aislante de resina epóxica con molde donde se colocarán las bobinas para dar la forma correcta del estator para posteriormente ser secado en una mufla a un rango de temperatura de 120°-150° C.

Por el momento para la construcción del estator se cuenta con el molde donde se alojarán las bobinas para ser colocadas en la mufla, las 9 bobinas para fabricar un generador de configuración serie, cables para la realización de las conexiones (tres cables de salida, 1 por cada fase), y el diseño en AutoCAD del montaje total del generador ya terminado.

En la siguiente figura se presenta el molde con que se pretende fabricar el estator del ***generador de flujo axial de imanes permanentes con núcleo de aire,*** que será puesto en una mufla a una temperatura de 120° C para darle firmeza.

**Figura 30. Molde para Fabricar Estator de Generador de Flujo Axial de Imanes Permanentes con Núcleo de Aire. [De Autoría Propia]**

Para continuar con el proyecto se requiere principalmente la parte financiera ya que lo logrado hasta el momento es mediante gastos propios de la persona a quien corresponde el proyecto de ***DISEÑO Y CARACTERIZACIÓN DE UN GENERADOR DE FLUJO AXIAL PARA UN AEROGENERADOR DE BAJA POTENCIA DE UN 1 KW:*** *Dr. Josué Enríquez Zarate*.

A continuación, se presenta el diseño en AutoCAD del montaje total y de su desmontaje del generador terminado.

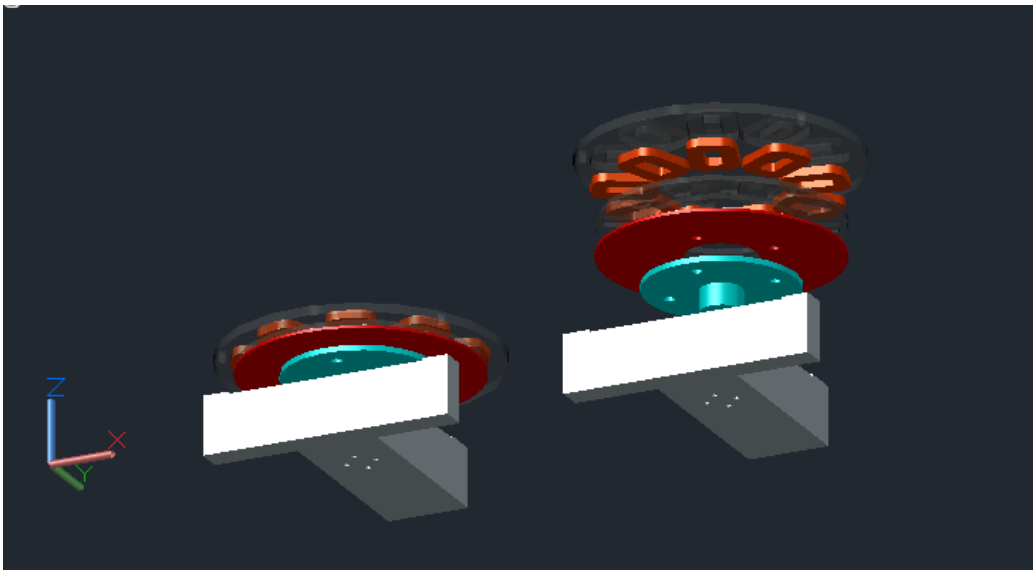



**Figura 31. Generador de flujo axial de imanes permanentes con núcleo de aire. [De autoría propia].**

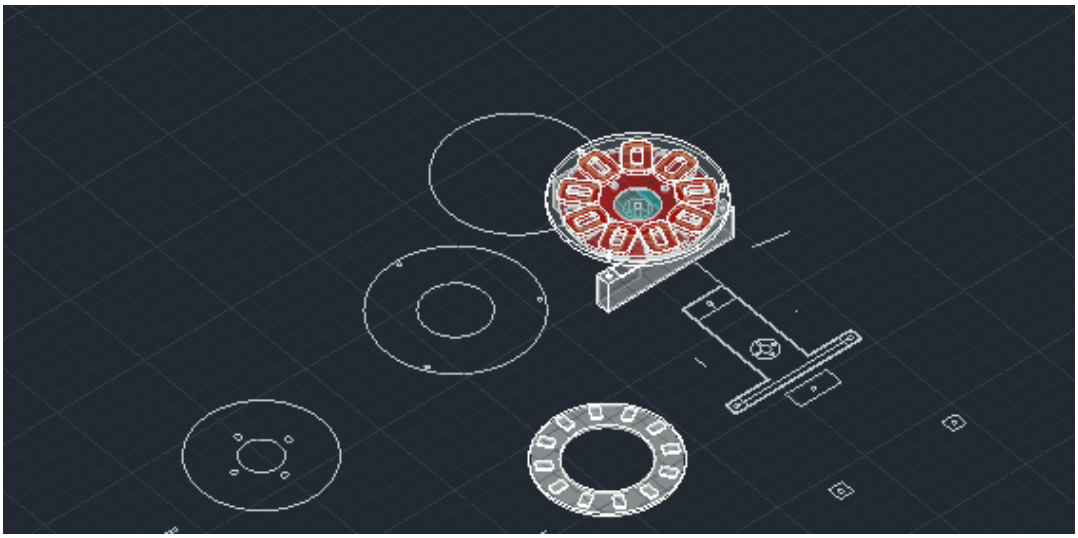


**Figura 32. Desmontaje de generador de flujo axial de imanes permanentes con núcleo de aire. [De autoría propia]**

## 4.3 Eficiencia del prototipo

La eficiencia es un asunto de fundamental importancia en el caso de las máquinas de imanes permanentes, o de cualquier otra, destinada a generación con energías renovables. El punto de partida en ese sentido ha de ser la consideración de las máquinas de accionamiento directo serán más desfavorables en cuestión de eficiencia que las maquinas arrastradas a mayor velocidad a través de un sistema de conversión mecánica, como es una multiplicadora en un aerogenerador. El par desarrollado por la maquina ha de ser mayor, y este está íntimamente ligado a las perdidas en el cobre de la máquina. En la medida en que la carga en carga en corriente de la maquina se emplee de una manera mejor, las perdidas en el cobre podrán reducirse. Dicha reducción es marginal, y los cambios de configuración no cambiaran en una gran fracción el valor de las perdidas. Por tanto, es menester señalar que los objetivos de eficiencia que se le pueden marcar a una maquina cualquiera directamente accionada por una fuente renovable de baja velocidad no pueden ser los mismos que los marcados para máquinas que trabajan a más velocidad, si bien esto no significa que se deba renunciar a un nivel de eficiencia similar a la eficiencia conjunta de un sistema que comprenda transmisión y conversión mecánica además de maquina eléctrica de alta velocidad.

## 4.4 Perdidas

Para llevar a cabo la transformación de energía mecánica a energía eléctrica parte de la potencia transformada se convierte en calor y prácticamente no se utiliza a estas se las conoce como pérdidas por efecto Joule. Además, por el inevitable rozamiento entre elementos de transmisión se generan las denominadas pérdidas mecánicas, el estudio y determinación de estas pérdidas es de gran interés porque influyen sobre dos magnitudes importantes el rendimiento y el calentamiento de una máquina eléctrica [7].

### 4.4.1 Perdidas en el cobre por efecto Joule

Se generan por la presencia de resistencia en los conductores eléctricos, estas pérdidas son en forma de calor. La resistencia que se opone al paso de la corriente, es en definición la causante del efecto Joule que no es más que el calentamiento de los devanados, cuanto mayor es la corriente que pasa, mayor es el calentamiento de las bobinas, no obstante la solución fácil sería aumentar la sección de las espiras de manera que la corriente pueda fluir con mayor facilidad, pero a la vez esto representa el aumento del tamaño de la bobinas, dificultaría el montaje y construcción de estos elementos, además el incremento considerable del costo del conductor.

### 4.4.2 Perdidas Mecánicas

Son provocadas por la fricción entre los elementos mecánicos en movimiento, como es lógico estas pérdidas solo existen en máquinas que disponen de un órgano giratorio, las pérdidas por rozamiento y fricción son proporcionales a la velocidad en este caso se generan en el rodamiento, que está conectado directamente a los rotores.

Al tratarse de una transmisión directa desde las aspas hacia el generador no existen pérdidas en las cajas multiplicadoras esta es una característica muy notable de este tipo de generadores, por el número de polos funcionan muy bien a bajas revoluciones además se evita la fricción en las escobillas, las cuales no se requieren en el diseño de generadores de flujo axial, y la energía se recolecta directamente en los extremos de las bobinas del estator. Todas las pérdidas mencionadas anteriormente son transformadas en calor que se disipa en el ambiente por radiación, convección y a su vez parte del calor es absorbido por la estructura de la máquina, ahora como el generador se instalará a una altitud considerable el mismo viento será el encargado de refrigerarlo ya que por su configuración el viento circula sin problemas a través del estator y discos rotores que son los elementos donde se generará mayor calor.

En la fabricación del ***generador de flujo axial de imanes permanentes con núcleo de aire*** a que respecta el proyecto se pretende innovar con la colocación de un ventilador en cada uno de los rotores, cada ventilador va colocado en la flecha donde presentara un giro mientras el generador este en función. Este sistema de enfriamiento se usa en motores de inducción y es funcional es por ello se realizará en el generador para disipar el calor que ahí se presente. En la siguiente figura se presenta el ventilador destinado para el proyecto.

**Figura 33. Ventilador para Ventilación de Rotores. [De autoría propia]**

## 4.5 Análisis de las Probables Fallas y Consecuencias en el Generador

**Desmagnetización irreversible en máquinas de imanes permanentes**

A continuación, se presenta someramente el problema de la desmagnetización en máquinas de imanes permanentes de tierras raras.

La desmagnetización permanente en los imanes de las maquinas eléctricas viene dada por la aparición de campos magnéticos opuestos al del imán y que le obliguen a superar la máxima fuerza coercitiva que el imán es capaz de desarrollar de forma reversible.

La desmagnetización reversible del imán se da desde el primer instante en que este se retira del circuito magnético que sirvió para magnetizarlo. Ser reversible significa que la magnetización se recupera, siempre en función del campo existente en el imán. Por lo tanto, mientras el imán este en dicha zona de operación reversible no habrá desmagnetización permanente alguna.

**Desmagnetización por cortocircuito**

Hay un caso en el que las corrientes pueden ser suficientemente altas como para generar un campo magnético opuesto al del imán con entidad para producir una desmagnetización permanente en este. Ese es el caso de un cortocircuito. En él pueden llegar a aparecer corrientes un orden de magnitud por encima de las de operación en la máquina.

## 4.6 Presupuesto Promedio para la Fabricación del Generador Eléctrico de Flujo Axial de Imanes Permanentes con Núcleo de Aire

| MATERIAL | CARACTERISTICAS | COSTO UNITARIO | TOTAL |
|---|---|---|---|
| Barniz (resina epóxica) | Aislante para encapsulado de bobinas de estator, impermeable y de alta temperatura | $505.00/ *l* cantidad total: 2*l* | $1010.00 |
| Alambre Magneto #14 | Alambre magneto para embobinado de estator calibre #14. | $316.00/kg cantidad total: 3kg | $948.00 |
| Flecha para el generador maquinada | Flecha reciclada de motor de inducción de 3500 rpm maquinada para el generador | $280.00 | $280.00 |
| Placa de fierro ¼ pulgada de grosor | Lamina para fabricar discos de rotores | $2400.00/m | $2400.00 |
| Opresores | Opresores para sujetar los rotores en la flecha. | $15.00 c/u cantidad total: 4 | $60.00 |
| Ventiladores | Ventilador plástico para ventilación en cada rotor | $90.00 c/u cantidad:2 | $180.00 |
| Rotores de disco | Cortar dos discos para rotores y fabricar pieza central de sujeción | $720.00 c/u cantidad: 2 | $1440.00 |
| Pieza para colocar imanes | Pieza de madera con 12 espacios para colocar imanes | $160.00 | $160.00 |
| Isla | Pieza central de madera para dejar hueco el centro del estator | $60.00 | $60.00 |
| Molde para bobinas | Molde de madera para fabricar las bobinas | $95.00 | $95.00 |
| Molde para estator | Molde metálico para poner el estator a la mufla | $900.00 | $900.00 |

## 4.7 Conclusión

En la presente investigación se diseñó una metodología a para el dimensionado de un generador eléctrico de flujo axial de imanes permanentes de doble rotor con núcleo de aire, optimizándolo para la reducción de su peso, ventilación y mantener una e ciencia alta. La información que se presenta en el desarrollo del proyecto lo sustenta la teoría de las fuentes bibliográficas citadas en el proceso de investigación.

La estructura del ***generador de flujo axial de imanes permanentes con núcleo de aire*** permite realizar un diseño de construcción fácil, por la simplicidad de cada una de sus partes. El diseño en el software Auto CAD, que se presenta en el desarrollo del presente trabajo se puede observar cada una de las partes constructivas del generador lo cual indica que no son partes de mucho maquinado.

El resultado de la investigación nos llevó a concluir en la elección de un *generador de flujo axial de imanes permanentes con núcleo de aire* por sus características de funcionamiento, sus principales ventajas de las cuales se basó nuestra elección fueron: funcionamiento y eficiencia a baja rpm lo que se resume que la utilización del generador como aerogenerador este no demandaría altas velocidades de viento, lo que lleva a ser ideal en muchos lugares; otra de sus ventajas es que su tamaño es pequeño y con ello su peso respecto a su capacidad generada lo que lo hace aún más ideal para su uso en aerogeneradores, ya que en estos se encuentra en la parte superior.

Por otra parte, la documentación del tema nos proporciona información respecto a las características constructivas del generador y características de los materiales que son actos para su fabricación. También se presenta un presupuesto aproximado de gastos en algunos materiales de la construcción de un prototipo.

## 4.8 Recomendaciones

- Conocer sobre resinas epóxica, sus características dieléctricas, características de firmeza, tratamiento y temperaturas críticas de operación.

- Realizar las conexiones internas de las bobinas de cada devanado antes de encapsularlo dentro de la resina, para evitar que el conductor sufra un desperfecto.

- Investigar la temperatura máxima de operación de los imanes que se pretenda utilizar para la fabricación de los rotores.

# BIBLIOGRAFIA

[1] Leao Rodríguez, A. (2010). Generador Eólico Superconductor. Facultad de Ciencias y Tecnología, Universidad Nueva de Lisboa, Departamento de Ingeniería
Electrotécnica, Quinta da Torre, 2825 -114 Caparica, Portugal.

[2] Enríquez Santiago, Jesús Antonio. (enero 2016). DIMENSIONADO DE GENERADORES ELÉCTRICOS DE FLUJO AXIAL DE IMÁN PERMANENTE PARA AEROGENERADORES DE BAJA POTENCIA. Santo Domingo Tehuantepec, Oaxaca, México.

[3] Hernández G. Víctor, González O. Gilberto. (2009). DISEÑO DE UN AEROGENERADOR CON FINES DIDACTICOS. Laboratorio de Investigaciones en Energías Renovables, FES Cuautitlán – UNAM.

[4] Bravo Hidalgo, Debrayan. (octubre-diciembre, 2015). ENERGIA Y DESARROLLO SOSTENIBLE EN CUBA. Centro de Estudios de Energía y Medio Ambiente. Universidad de Cienfuegos "Carlos Rafael Rodríguez." Cuatro Caminos, Cienfuegos 59430, Fax: 522762, Telf.: 500137.

[5] Miguel López, Jean-Claude Vannier, Daniel Sadarnac. SISTEMAS DE CONVERSION DE ENERGIA EÓLICA CONTROL Y DISEÑO. Asociación Chilienne de Controle Automatique, Jan 2007, Temuco, Chile.

[6] Pinilla Martin, Manuel. (2011). SISTEMA DE CONVERSIÓN ELECTROMECÁNICA DE LATA POTENCIA ESPECÍFICA PARA GENERACIÓN ELÉCTRICA DE ORIGEN RENOVABLE. Departamento de Ingeniería Eléctrica, Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales, Universidad Politécnica de Madrid.

[7] Claudio Medina, Cristian E. (2016). CARACTERIZACIÓN DE UN GENERADOR DE FLUJO AXIAL PARA APLICACIONES EN ENERGÍA EÓLICA. AMBATO, Ecuador.

[8] Carrillo Rosero, Mauricio; Medina, Cristian; Mayorga Pardo, Alex. (2018). CARACTERIZACION DE UN GENERADOR DE FLUJO AXIAL PARA APLICACIONES EN ENERGIA EOLICA. AMBATO, Ecuador.

[9] Mercado Vargas, María J. (2012). MODELOS EQUIVALENTES DE PARQUES EÓLICOS CON GENERADORES SÍNCRONOS DE IMANES PERMANENTES. Universidad de Granada: Editorial de la Universidad de Granada.

[10] Posso, Fausto. ENERGIA Y AMBIENTE: PASADO, PRESENTE Y FUTURO. PARTE DOS: SISTEMA ENERGÉTICO BASADO EN ENERGIAS ALTERNATIVAS. Universidad de Los Andes, Táchira Venezuela.

[11] Rodríguez Santillán, Manuel D.; León Yungaicela Michael J. (2016). Análisis y aplicación de un generador de imanes permanentes para un sistema de energía eólica. Guayaquil.

[12] Castillo González, Carlos A.; Iguaran Daza, Hernán D. (2012). DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN GENERADOR DE MAGNETOS PERMANENTES. UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA ESCUELA DE INGENIERIAS FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA BUCARAMANGA.

[13] J. Murillo. "Diseño de un alternador de flujo axial con imanes permanentes", Ingeniería, Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Industrial, España,2012.

[14] A. Abarzua, "Aspectos de diseño de generadores síncronos de flujo axial para la aplicación en aerogeneradores", Ingeniería, Universidad de Chile, Santiago de Chile, 2012.

[15] Damián Pérez, Marcos. "MAQUINAS ELÉCTRICAS MODERNAS."

[16] Blanco Benito, Armengol. (16 de diciembre de 2015). "Maquinas Eléctricas." Facultad Nacional de Ingeniería Eléctrica e Ingeniería Electrónica.

[17] Jaime Moragues, Alfredo Rapallini. (2003). ENERGÍA EÓLICA. Instituto Argentino de la General Mosconi". Argentina.

[18] R. Serway. Physics for Scietists and Engineers. Saunders College Publishers, 3° edition.

[19] Paul Baillarie, Rosenmann. (agosto 2007). "DISEÑO DE AERO GENERADORES CON IMANES PERMANENTES PARA APLICACIONES EN ELECTRIFICACION RURAL". Santiago de Chile.

[20] Quiralte Carmona, Beatriz. (julio 2018). "PLATAFORMA PARA CONSTRUCCIÓN DE GENERADOR DE FLUJO RADIAL PARA MICROTURBINA EÓLICA." Universidad Politécnica de Madrid, Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales.

[21] Diaz del Castillo Rodríguez, Felipe. (2015). "MANUAL PARA EL USO Y APLICACIÓN DEL PROGRAMA AUTOCAD V2012." Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán Departamento de Ingeniería, UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO.

# BIBLIOGRAFIA DE IMÁGENES


- [1]https://www.google.com/search?rlz=1C1CHBF_esMX842MX842&biw=1366&bih=657&tbm=isch&sa=1&ei=C9MnXaTbMKSF9PwP_KG4-AQ&q=generador+de+electricidad+representacion&oq=generador+de+electricidad+representacion&gs_l=img.3...3170.11846..12232...0.0..0.221.2164.0j14j1.....0....1..gws-wiz-img.....0j0i24.QrmD0IfRxbE#imgrc=7Gt1mOpHW7EpBM:

- [2]https://www.google.com/search?q=estator+de+generador+electrico+diagrama&rlz=1C1CHBF_esMX842MX842&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=0ahUKEwjesqmD77fjAhUEjq0KHb3MBPgQ_AUIECgB&biw=1366&bih=657#imgrc=dng1eFxRCaEX8M:

- [3]https://www.google.com/search?rlz=1C1CHBF_esMX842MX842&biw=1366&bih=657&tbm=isch&sa=1&ei=YvEsXbrlBsSwtgX5mqjYBA&q=ilustracion+rotor+de+generador+electrico&oq=ilustracion+rotor+de+generador+electrico&gs_l=img.3...65213.68570..68818...0.0..0.161.1695.0j12.....0....1..gws-wiz-img.RliQBo_SVNM#imgrc=Z4-86tdGjvGD0M:

- [4]https://www.google.com/search?rlz=1C1CHBF_esMX842MX842&biw=1366&bih=624&tbm=isch&sa=1&ei=jNEsXbOGCsy0tAadjZvADQ&q=representacion+de+bobina+electrica&oq=representacion+de+bobina+electrica&gs_l=img.3...199799.209956..210288...0.0..2.571.7180.0j24j3j3j1j3.....0....1..gws-wiz-img.....0..0i67j0j0i8i30j0i24.dhOhxRAVllg#imgrc=oWzp2MPW20ZRJM:

- [5]https://www.uv.es/emaset/iep00/descargas/motores-Sincronos-0809.pdf

- [6]https://www.google.com/search?rlz=1C1CHBF_esMX842MX842&biw=1366&bih=608&tbm=isch&sa=1&ei=wNQnXfuYJNautQal45i4Cw&q=parque+eolico&oq=parque+eoli&gs_l=img.1.0.0l10.161990.166989..168811...0.0..0.317.2332.0j5j4j2.....0....1..gws-wiz-img.....0..0i67.iSeHZxM9O4I#imgrc=j7yLL6RsA2CinM:

- [7]https://www.google.com/search?rlz=1C1CHBF_esMX842MX842&biw=1366&bih=608&tbm=isch&sa=1&ei=bNUnXaSuGomUtAbu-rCYDA&q=potencia+del+aero+generador&oq=potencia+del+aero+generador&gs_l=img.3...91823.104173..104589...0.0..0.465.5565.0j18j6j1j2.....0....1..gws-wiz-img.....0..0i67j0j0i8i30j0i24.lIS66uqX_mg#imgrc=njiMAKBpVybkdM:

- [8]https://www.google.com/search?rlz=1C1CHBF_esMX842MX842&biw=1366&bih=608&tbm=isch&sa=1&ei=2NUnXa20CoTbtAb03aHQDA&q=flujo+de+corriente+electrica&oq=flujo+de+corriente+&gs_l=img.1.0.0l6j0i30j0i5i30l2j0i8i30.39454.48060..49652...5.0..0.432.4082.0j14j4j1j1.....0....1..gws-wiz-img.....0..0i67.cWoMjLe4BLk#imgrc=IBmnRBfbc-fiYM:

- [9]https://www.google.com/search?q=formula+de+intensidad+de+corriente&rlz=1C1CHBF_esMX842MX842&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=0ahUKEwi-zKCP-7fjAhVHAqwKHT8ZAhMQ_AUIECgB&biw=1366&bih=608#imgrc=D4YZhPq6BfnoQM:

- [10]R. Serway. Physics for Scietists and Engineers. Saunders College Publishers, 3° edition.

- [11]https://www.google.com/search?rlz=1C1CHBF_esMX842MX842&biw=1366&bih=608&tbm=isch&sa=1&ei=DNYnXam9N8yUtAaGtJTYAQ&q=energia+solar&oq=energia+solar&gs_l=img.3..0l10.88366.91396..91619...0.0..0.800.5422.4-1j6j2.....0....1..gws-wiz-img.....0..0i67.tNs-XmKG1n8#imgrc=z4OznHxkAu0DlM:

- [12]https://www.google.com/search?rlz=1C1CHBF_esMX842MX842&biw=1366&bih=608&tbm=isch&sa=1&ei=bNYnXfO8EZCstQargpyYCQ&q=energia+biomasa&oq=energia+bioma&gs_l=img.1.0.0l10.90826.96760..99089...4.0..0.1445.6565.0j1j2j2j2j0j2j2.....0....1..gws-wiz-img.....0..0i67.KTMcX0MsMIY#imgrc=8hFOOT0cSDTIAM:

- [13]https://www.google.com/search?rlz=1C1CHBF_esMX842MX842&biw=1366&bih=608&tbm=isch&sa=1&ei=1dYnXZakAsG7tQaKpq3IDw&q=energia+hidraulica&oq=energia+&gs_l=img.1.5.0i67j0l9.134354.135891..138616...0.0..0.321.1591.0j2j4j1.....0....1..gws-wiz-img.WHwg7ZwzvE8#imgrc=JZ_VEuILYRBylM:

- [14]https://www.google.com/search?rlz=1C1CHBF_esMX842MX842&biw=1366&bih=608&tbm=isch&sa=1&ei=Z9cnXduUDob5tAb4mJWABQ&q=energia+geotermica&oq=energi&gs_l=img.1.8.0i67j0l5j0i67j0l3.81081.83177..86566...0.0..0.266.2498.0j5j7.....0....1..gws-wiz-img.xzptwN9ljs4#imgrc=jM2mpFpwRD41JM:

- [15]https://www.google.com/search?rlz=1C1CHBF_esMX842MX842&biw=1366&bih=608&tbm=isch&sa=1&ei=x9cnXaqsEpi0tQaglbnICg&q=energia+eolica&oq=energia+&gs_l=img.1.1.0i67j0l8j0i67.102205.103550..106424...0.0..1.499.2430.0j4j4j1j1.....0....1..gws-wiz-img.9m2M0pFLHC4#imgrc=HpZGZHmj59THhM:

- [16]Enríquez Santiago, Jesús Antonio. (enero 2016). DIMENSIONADO DE GENERADORES ELÉCTRICOS DE FLUJO AXIAL DE IMÁN PERMANENTE PARA AEROGENERADORES DE BAJA POTENCIA. Santo Domingo Tehuantepec, Oaxaca, México.

- [17]https://www.google.com/search?rlz=1C1CHBF_esMX842MX842&biw=1366&bih=608&tbm=isch&sa=1&ei=JtknXfCDIYTctQbntbj4Bw&q=rotor+de+generador+de+flujo+radial&oq=rotor+de+generador+de+flujo+radial&gs_l=img.3...3651.7333..7671...0.0..0.229.1541.0j9j1.....0....1..gws-wiz-img.UxWFSHGbGdE#imgrc=fQeZ4Xpnvnoh-M:

- [18]https://www.google.com/search?rlz=1C1CHBF_esMX842MX842&biw=1366&bih=608&tbm=isch&sa=1&ei=JtknXfCDIYTctQbntbj4Bw&q=rotor+de+generador+de+flujo+radial&oq=

rotor+de+generador+de+flujo+radial&gs_l=img.3...3651.7333..7671...0.0..0.229.1541.0j9j1.....0....1..gws-wiz-img.UxWFSHGbGdE#imgdii=GhlQXEzVkZiWCM:&imgrc=TLaiWtBmuZOGGM:

- [19]https://www.google.com/url?sa=i&source=images&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwjv-r3C-9jjAhVDOs0KHRxOCTQQjRx6BAgBEAU&url=%2Furl%3Fsa%3Di%26source%3Dimages%26cd%3D%26ved%3D%26url%3Dhttps%253A%252F%252Fcults3d.com%252Fen%252F3d-model%252Ftool%252Fradial-low-rpm-halbach-array-pm-generator-with-serpentine-coils%26psig%3DAOvVaw1f2bhKr11BAJgGSSqkqRI1%26ust%3D1564449671480210&psig=AOvVaw1f2bhKr11BAJgGSSqkqRI1&ust=1564449671480210

- [20]https://www.google.com/url?sa=i&source=images&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwiR-vb7-9jjAhVQiqwKHTdSBHsQjRx6BAgBEAU&url=%2Furl%3Fsa%3Di%26source%3Dimages%26cd%3D%26ved%3D%26url%3Dhttps%253A%252F%252Fwww.kjmagnetics.com%252Fblog.asp%253Fp%253Dhalbach-arrays-2%26psig%3DAOvVaw1f2bhKr11BAJgGSSqkqRI1%26ust%3D1564449671480210&psig=AOvVaw1f2bhKr11BAJgGSSqkqRI1&ust=1564449671480210

- [21]https://www.google.com/url?sa=i&source=images&cd=&ved=2ahUKEwiNh67t-djjAhXPQc0KHROpD1wQjRx6BAgBEAU&url=https%3A%2F%2Fwww.youtube.com%2Fwatch%3Fv%3D8eBg3UV4GWw&psig=AOvVaw1qNfX_VIabjp7RKSsYj_ML&ust=1564449067891685