

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR  
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA  
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA



**ANÁLISIS DE LOS GENERADORES SÍNCRONOS CON  
EXCITATRIZ DE IMANES PERMANENTES**

PRESENTADO POR:

**RICARDO EVERSON MAZARIEGO ELÍAS**

**MARIO ERNESTO MORALES MACHUCA**

**JUAN CARLOS VÁSQUEZ ROQUE**

PARA OPTAR AL TÍTULO DE:

**INGENIERO ELECTRICISTA**

CIUDAD UNIVERSITARIA, FEBRERO DE 2017

**UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR**

**RECTOR INTERINO :**

**LIC. JOSÉ LUIS ARGUETA ANTILLÓN**

**SECRETARIA GENERAL :**

**DRA. ANA LETICIA ZAVALA DE AMAYA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA**

**DECANO :**

**ING. FRANCISCO ANTONIO ALARCÓN SANDOVAL**

**SECRETARIO :**

**ING. JULIO ALBERTO PORTILLO**

**ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA**

**DIRECTOR :**

**ING. ARMANDO MARTÍNEZ CALDERÓN**

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR  
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA  
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

Trabajo de Graduación previo a la opción al Grado de:

**INGENIERO ELECTRICISTA**

Título :

**ANÁLISIS DE LOS GENERADORES SÍNCRONOS CON  
EXCITATRIZ DE IMANES PERMANENTES**

Presentado por :

**RICARDO EVERSON MAZARIEGO ELÍAS**

**MARIO ERNESTO MORALES MACHUCA**

**JUAN CARLOS VÁSQUEZ ROQUE**

Trabajo de Graduación Aprobado por :

Docente Asesor :

**ING. JOSÉ MIGUEL HERNÁNDEZ**

San Salvador, Febrero de 2017

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docente Asesor :

**ING. JOSÉ MIGUEL HERNÁNDEZ**

## ACTA DE CONSTANCIA DE NOTA Y DEFENSA FINAL

En esta fecha, viernes 3 de febrero de 2017, en la Sala de Lectura de la Escuela de Ingeniería Eléctrica, a las 4:30 p.m. horas, en presencia de las siguientes autoridades de la Escuela de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de El Salvador:

1. Ing. Armando Martínez Calderón  
Director

Firma:   


2. MSc. José Wilber Calderón Urrutia  
Secretario

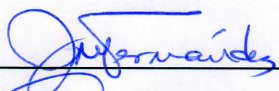

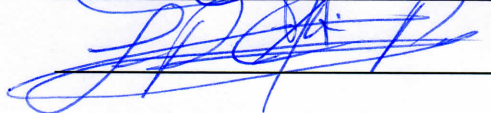
Firma: 

Y, con el Honorable Jurado de Evaluación integrado por las personas siguientes:

1- Ing. José Miguel Hernández  
(Docente-Asesor)

2- Ing. Armando Martínez Calderón

3- MSc. Luís Roberto Chévez Paz

Firma:   
  


Se efectuó la defensa final reglamentaria del Trabajo de Graduación:

**ANÁLISIS DE LOS GENERADORES SÍNCRONOS CON EXCITATRIZ DE IMANES PERMANENTES**

A cargo de los Bachilleres:

- MAZARIEGO ELÍAS RICARDO EVERSON
- MORALES MACHUCA MARIO ERNESTO
- VÁSQUEZ ROQUE JUAN CARLOS

Habiendo obtenido en el presente Trabajo una nota promedio de la defensa final: 7.8

( SIETE PUNTO OCHO )

## AGRADECIMIENTOS.

Primeramente, le quiero dar gracias a Dios por haber permitido llegar con bien hasta este momento culmine de mi carrera, le doy gracias porque siempre estuvo apoyándome tanto en los momentos difíciles, así como en los momentos de profunda alegría, gracias Dios por llenarme de salud y sabiduría para poder afrontar los retos que surgía en la carrera y salir adelante triunfante en cada uno de ellos y poder llegar a este momento y decir “fue difícil, pero lo logre”.

Agradezco a mi madre Rosa Lidia Elías que siempre estuvo ahí para apoyarme y nunca dejar de creer en mí, gracias por todo el esfuerzo que hiciste y sigue haciendo para lograr que cada uno de tus hijos salga adelante y darle lo más importante que es una buena educación. No sé cómo agradecerte por todo lo que has hecho por mí, querida madre, para que pudiera llegar hasta este momento culmine de mi carrera, pero estoy completamente seguro que no hay mejor premio para ti que ver a tus hijos unos profesionales. Gracias infinitas, mamá.

Agradezco a mi padre Ricardo Mazariego Parada por inculcarme tantos valores para ser una persona de bien, agradezco por haberme enseñado a no rendirme aún cuando las cosas parecieran casi pérdidas, gracias por esta ahí cuando siempre necesite de tu ayuda y me la brindaste sin importante lo que fuera. Muchas Gracias papá.

A mis hermanas Lidia y Betsabé muchas gracias por siempre apoyarme en todo lo que estuviera a su alcance, gracias por brindarme sus conocimientos para poder salir adelante con mis estudios, gracias por sus consejos por su apoyo incondicional aun cuando las cosas parecieran grises.

Agradecer a mis familiares que de una u otra manera estuvieron dándome sus palabras de aliento y fuerzas para que yo pudiera salir adelante en mis estudios, gracias por creer en mí.

A todos mis compañeros y amigos que estuvieron en esta batalla compartiendo alegrías y fracasos, a los que se quedaron en el camino, a los que ya se encuentran en presencia del creador y lo que ya salieron victoriosos no me resta más que agradecerle por todo el apoyo brindado y por todas las enseñanzas que me compartieron sin esperar nada a cambio. Gracias Totales.

A mis amigos y compañeros de tesis Juan Carlos Y Mario Machuca gracias por brindarme esa amistad incondicional, gracias por compartir esas noches de desvelo estudiando, gracias por darme apoyo aun cuando las cosas ya estuvieran perdidas y por alegrarse junto a mi cuando salíamos victoriosos de cada una de las batallas enfrentadas.

Muchas gracias a mis profesores en toda mi carrera y en especial a los de la Escuela de ingeniería eléctrica que son los que me transmitieron sus conocimientos de esta excelente carrera para que los pueda aplicar en cada uno de los retos que se me presenten de ahora en adelante. Infinitas gracias por su labor.

Ricardo Mazariego

## AGRADECIMIENTOS

Primeramente darle gracias a Dios por haber estado conmigo en todo momento por permitir alcanzar esta meta, dándome fuerzas necesarias para concluir con éxito y por darme inteligencia y sabiduría.

A mi madre por todos los sacrificios que hizo por mí, por su amor incondicional, por sus oraciones, por enseñarme que todo en la vida se puede lograr con dedicación y esmero, ha sido lo más grande que tengo en esta vida.

A mi padre por sus palabras de ánimos y oraciones que siempre fueron de gran ayuda que Dios te bendiga por apoyarme.

A mi hermano Arturo por ser pieza fundamental por compartir todo en mi vida, por darme fuerzas, consejos y por estar en las buenas y malas.

A toda mi familia por estar impulsándome cada día por sus oraciones y ser un apoyo importante en mi vida.

A mi novia Andrea por compartir tu vida conmigo, por brindarme tu apoyo incondicional por llenar mi vida de felicidad, por todas las cosas que vivimos juntos, eres una bendición para mi vida

A mis compañeros que siempre estuvieron pendientes de este proceso, por darme ánimos en momentos difíciles, gracias porque siempre puedo contar con ustedes.

A todos los catedráticos de la escuela de ingeniería eléctrica por sus enseñanzas y sus conocimientos para formarme como todo un profesional.

Mario Ernesto Morales Machuca

## AGRADECIMIENTOS.

Agradezco a Jehová Dios por permitirme terminar la carrera universitaria de ingeniería eléctrica, gracias que el coloco a las personas indicadas para formar parte de mi camino y ayudarme a crecer como persona y como profesional, gracias a mis padres, Juan Vásquez Cerón y Angelita de Vásquez y ese apoyo incondicional que siempre me brindaron, gracias por los días de apoyo de parte de ti, Angelita, las veces que me animabas a seguir adelante y terminar mis estudios y que de alguna manera Dios iba a proveer y en efecto así ha sido, papá gracias por estar pendiente de mis cosas y que nada me hiciera falta, gracias a mi hermana Joselyn por su gran ayuda en mi formación académica además de mi hermana Jasmín que de igual manera me ha apoyado en cuanto ella ha podido, familia gracias.

Agradezco a los amigos que conocí durante esta etapa de mi vida, al gremio del cyber y en especial a Oscar y Alex Martínez que me apoyaron mucho para poder superarme, gracias por toda la ayuda que me brindaron, gracias por todo ¡mis muchas!, además al señor Salvador Posada por sus consejos y palabras de ánimo de igual manera a la señora Reina Vides por su incondicional apoyo durante el proceso del trabajo de graduación, señora muchas gracias, al ingeniero José Roberto Zelada, Carlos Pérez y demás compañeros que me acompañaron en toda la carrera y por último gracias al docente asesor el Ing. Miguel Hernández por su apoyo y ayuda en el proceso de este trabajo.

Ahora gracias a mis compañeros de trabajo de graduación, Ricardo Mazariego y Mario Machuca por su ayuda durante la formación académica, y el compilado de este trabajo, gracias por la paciencia para conmigo, por su apoyo en los buenos, malos y feos momentos que vivimos en la carrera, gracias mis muchas.

Sé que no fue fácil, pues en este camino han habido fallas y errores que forjaron mi vida profesional por lo que comparto y a lo que cito la siguiente frase que me ayudo a seguir adelante en algún momento que sentía desfallecer y cito: “¡Las fallas se deben ver como simples distracciones! Son pruebas, con las cuales, pulen tus habilidades. - Jiraiya” las fallas y errores deben sacar lo mejor de nosotros mejorando cada área de la vida.

Juancarlos Vásquez



# ÍNDICE

|   |          |
|---|----------|
| <b>GENERALIDADES</b> .....  | <b>1</b> |
| <b>INTRODUCCIÓN GENERAL AL TRABAJO DE GRADUACIÓN</b> .....                                    | <b>1</b> |
| <b>OBJETIVOS DEL TRABAJO DE GRADUACIÓN</b> .....  | <b>2</b> |
| OBJETIVO GENERALES .....  | 2        |
| OBJETIVOS ESPECIFICOS .....   | 2        |
| <b>PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA</b> .....   | <b>3</b> |
| <b>ORIGEN Y FINALIDAD</b> .....   | <b>3</b> |
| ORIGEN .....  | 3        |
| FINALIDAD .....   | 6        |
| ALCANCE .....   | 6        |
| LIMITACIONES.....   | 7        |
| IMPORTANCIA .....   | 7        |
| JUSTIFICACIÓN .....   | 7        |
| <b>CAPÍTULO I - MARCO TEÓRICO, GENERALIDADES MÁQUINAS ELÉCTRICAS</b> .....                    | <b>8</b> |
| 1.1. MATERIALES MAGNÉTICOS: .....   | 8        |
| 1.2. CONCEPTOS DE CAMPOS MAGNÉTICOS.....  | 10       |
| 1.3. CIRCUITOS ELECTROMAGNÉTICOS.....   | 11       |
| 1.4. CURVA DE HISTÉRESIS FERROMAGNÉTICA, PÉRDIDAS DE ENERGÍA EN EL NÚCLEO FERROMAGNÉTICO..... | 19       |
| 1.5. FUERZA ELECTROMOTRIZ INDUCIDA – F.E.M. INDUCIDA.....                                     | 24       |
| 1.6. ENUNCIADO DE LA LEY DE FARADAY-LENZ.....   | 26       |
| 1.7. PRINCIPIO DEL FUNCIONAMIENTO DE MÁQUINAS ELÉCTRICAS.....                                 | 30       |
| 1.8. MÁQUINAS ELÉCTRICAS – GENERALIDADES.....   | 32       |
| 1.9. PÉRDIDAS DEL SISTEMA ELECTROMAGNÉTICO.....   | 37       |
| 1.10. CRITERIOS DE DISEÑO DE MÁQUINAS ELÉCTRICAS.....   | 42       |
| 1.10.1. MOVIMIENTO DEL INDUCTOR O INDUCIDO.....   | 42       |
| 1.10.2. DISPOSITIVO DE CONEXIÓN AL CIRCUITO EXTERIOR.....                                     | 43       |
| 1.11. TRANSFORMADORES: .....  | 44       |
| 1.12. MÁQUINAS SÍNCRONAS: .....   | 46       |
| 1.13. MÁQUINAS ASÍNCRONAS O DE INDUCCIÓN.....   | 48       |
| 1.14. MÁQUINAS DE CORRIENTE CONTINUA.....   | 50       |

|  |            |
|--|------------|
| <b>CAPÍTULO II – MÁQUINA SÍNCRONA – GENERADOR SÍNCRONO. ....</b>   | <b>54</b>  |
| 2.1. GENERALIDADES.....  | 54         |
| 2.2. DESCRIPCIÓN ESTATOR-ROTOR.....  | 55         |
| 2.3. PRINCIPIO DEL FUNCIONAMIENTO DEL ALTERNADOR.....  | 65         |
| 2.4. ECUACIÓN DE LA F.E.M. INDUCIDA DE LA MÁQUINA SÍNCRONA EN REGIMEN DE GENERADOR.....                  | 65         |
| 2.5. CIRCUITO EQUIVALENTE DE UN GENERADOR SÍNCRONO.....  | 66         |
| 2.6. REACCIÓN DE ARMADURA. ....  | 67         |
| 2.7. CAÍDA DE TENSIÓN EN LA RESISTENCIA DE ARMADURA. ....  | 68         |
| 2.8. CAÍDA DE TENSIÓN POR REACTANCIA DE DISPERSIÓN EN LA ARMADURA. ....                                  | 68         |
| 2.9. REGULACIÓN DE TENSIÓN.....  | 73         |
| 2.10. POTENCIA Y PAR EN LOS GENERADORES SÍNCRONOS.....   | 73         |
| 2.11. MEDICIÓN DE PARÁMETROS ELÉCTRICOS DEL MODELO DEL GENERADOR SÍNCRONO.....                           | 76         |
| 2.12. PRUEBA DE RESISTENCIA. ....  | 76         |
| 2.13. PRUEBA DE CIRCUITO ABIERTO. ....   | 76         |
| 2.14. PRUEBA DE CORTOCIRCUITO.....   | 77         |
| 2.15. CARACTERÍSTICAS EXTERNAS AL GENERADOR SÍNCRONO.....  | 80         |
| 2.16. ANÁLISIS NO LINEAL DE LA MÁQUINA SÍNCRONA: MÉTODO DE POTIER O DEL FACTOR DE POTENCIA NULO. ....    | 82         |
| 2.17. GENERADOR SÍNCRONO DE POLOS SALIENTES. ....  | 86         |
| 2.18. CIRCUITO EQUIVALENTE GENERADOR DE POLOS SALIENTES.....   | 86         |
| 2.19. OTRA TEORÍA, DESARROLLO DEL CIRCUITO EQUIVALENTE DE GENERADORES SÍNCRONOS DE POLOS SALIENTES. .... | 90         |
| 2.20. OPERACIÓN EN PARALELO DE GENERADORES SÍNCRONOS.....  | 93         |
| 2.21. VENTAJAS DE LA OPERACIÓN EN PARALELO DE GENERADORES SÍNCRONOS: .....                               | 94         |
| 2.22. PROCEDIMIENTO PARA CONECTAR GENERADORES EN PARALELO.....   | 97         |
| <b>CAPÍTULO III – GENERADOR SÍNCRONO DE IMANES PERMANENTES (GSIP). ....</b>                              | <b>101</b> |
| 3.1. INTRODUCCIÓN SOBRE IMANES PERMANENTES. ....   | 101        |
| 3.2. CARACTERÍSTICAS Y PROPIEDADES DE LOS IMANES PERMANENTES. ....                                       | 102        |
| 3.3. CLASIFICACIÓN DE IMANES PERMANENTES.....  | 104        |
| 3.4. EXCITACIÓN ELÉCTRICA CONTRA IMANES PERMANENTES. ....  | 110        |
| 3.5. EXCITACIÓN MEDIANTE IMANES PERMANENTES. ....  | 111        |
| 3.6. TOPOLOGÍAS DEL GENERADOR DE IMAN PERMANENTE. ....   | 112        |
| 3.7. GEOMETRÍA DEL ROTOR EN MÁQUINAS DE IMANES PERMANENTES.....  | 116        |
| 3.8. DESMAGNETIZACIÓN IRREVERSIBLE DE LAS MÁQUINAS DE IMANES PERMANENTES (TIERRAS RARAS).119             |            |

|  |   |            |
|--|---|------------|
| 3.9.   | LA DESMAGNETIZACIÓN POR CORTOCIRCUITO. ....   | 120        |
| 3.10.  | USO DE IMANES PERMANENTES EN GENERACIÓN DE ENERGÍA RENOVABLE.....   | 121        |
| 3.11.  | APLICACIÓN HIDROELÉCTRICA. ....   | 123        |
| 3.12.  | APLICACIÓN EÓLICA.....  | 124        |
| 3.13.  | MODELOS TÉRMICOS DE LAS MÁQUINAS DE IMANES PERMANENTES. ....  | 125        |
| 3.14.  | VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL GENERADOR GSIP.....  | 126        |
| 3.15.  | VENTAJAS. ....  | 126        |
| 3.16.  | DESVENTAJAS. ....   | 127        |
| 3.17.  | ALGUNAS CARACTERÍSTICAS DE LA MÁQUINA SÍNCRONA DE IMÁN PERMANENTE.....                                      | 127        |
| 3.18.  | MODELO DEL CIRCUITO EQUIVALENTE Y ECUACIONES DEL GENERADOR SÍNCRONO DE IMÁN PERMANENTE. ....                | 129        |
| 3.19.  | ECUACIONES DEL GENERADOR DE IMANES PERMANENTES DE POLOS SALIENTES EN EL SISTEMA DE REFERENCIA SÍNCRONO..... | 135        |
| 3.20.  | ECUACIONES MECÁNICAS DEL GENERADOR SÍNCRONO DE IMANES PERMANENTES DE POLOS SALIENTES. ....                  | 139        |
| 3.21.  | SISTEMA DE ECUACIONES PARA EL GENERADOR SÍNCRONO DE IMANES PERMANENTES DE POLOS LISOS. ....                 | 143        |
| 3.22.  | ECUACIONES DEL GENERADOR DE IMANES PERMANENTES DE POLOS LISOS EN EL SISTEMA DE REFERENCIA SÍNCRONO.....     | 144        |
| 3.23.  | ECUACIONES MECÁNICAS DEL GENERADOR SÍNCRONO DE IMANES PERMANENTES DE POLOS LISOS. ....                      | 146        |
| <b>CAPÍTULO IV – APLICACIONES ELÉCTRICAS DE LOS GENERADORES SÍNCRONOS.....</b> |   | <b>147</b> |
| 4.1.   | CAPACIDAD DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN EL SALVADOR. ....   | 148        |
| 4.2.   | TIPOS DE ENERGÍA PARA EL ESTUDIO DE GENERADORES SÍNCRONOS DE IMANES PERMANENTES GSIP. ....                  | 157        |
| 4.3.   | EQUIPO GENERAL ELÉCTRICO DE POTENCIA EN UNA PLANTA DE GENERACIÓN.....                                       | 159        |
|  | GENERALIDADES SOBRE NORMAS PARA GENERADORES SÍNCRONOS.....  | 160        |
| 4.4.   | PEQUEÑA COMPARACIÓN DE COSTOS DE GENERADORES EÓLICOS .....  | 167        |
| <b>CONCLUSIONES. ....</b>  |   | <b>171</b> |
| <b>RECOMENDACIONES. ....</b>   |   | <b>176</b> |
| <b>BIBLIOGRAFIA .....</b>  |   | <b>177</b> |

## ÍNDICE DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| Figura 1.1 Núcleo magnético sencillo – Máquinas eléctricas Chapman quinta edición [2].   | 12 |
| Figura 1.2 Analogía de circuitos eléctricos contra magnéticos – Elaboración propia.  | 14 |
| Figura 1.3 Determinación de la polaridad de una fuente de fuerza magnetomotriz en un circuito magnético - Máquinas eléctricas Chapman quinta edición [2].  | 14 |
| Figura 1.4 a) Curva de magnetización con c.c. de un núcleo Ferromagnético. b) Curva de magnetización en términos de densidad de flujo e intensidad del campo magnético - Máquinas eléctricas Chapman quinta edición [2]. | 16 |
| Figura 1.5 a) Forma de onda de fuente de corriente alterna, b) Curva de histéresis trazada por el flujo en el núcleo cuando se le aplica una corriente $i(t)$ - Máquinas eléctricas Chapman quinta edición [2].          | 19 |
| Figura 1.6 a) Dominios magnéticos orientados al azar, b) Dominios magnéticos alineados en presencia de un campo magnético externo - Máquinas eléctricas Chapman quinta edición [2].                                      | 21 |
| Figura 1.7 Efecto del tamaño de las variaciones de la fuerza magnetomotriz en la magnitud de las pérdidas por histéresis - Máquinas eléctricas Chapman quinta edición [2].   | 23 |
| Figura 1.8 Fuerza magnetomotriz inducida debido a una espira estacionaria en un campo B variable en el tiempo - Elementos de electromagnetismo Sadiku tercera edición [6].   | 25 |
| Figura 1.9 Máquina de corriente directa - Elementos de electromagnetismo Sadiku tercera edición [6].   | 25 |
| Figura 1.10 Significado de la Ley de Lenz a) Una bobina encierra un flujo magnético creciente, b) determinación de la polaridad del tensión resultante - Máquinas eléctricas Chapman quinta edición [2].                 | 27 |
| Figura 1.11 Sentido de la f.e.m. inducida - Máquinas eléctricas Jesús Fraile Mora quinta edición [3].  | 27 |
| Figura 1.12 Definición de corrientes Parásitas - Máquinas eléctricas Jesús Fraile Mora quinta edición [3].   | 29 |
| Figura 1.13 Espira sencilla giratoria en un campo magnético uniforme a) vista frontal, b) vista de la bobina - Máquinas eléctricas Chapman quinta edición [2].   | 31 |
| Figura 1.14 Principio de conversión de energía electromecánica - Máquinas eléctricas Jesús Fraile Mora quinta edición [3].   | 33 |
| Figura 1.15 Aspectos constructivos de la máquina eléctrica - Máquinas eléctricas Jesús Fraile Mora quinta edición [3].   | 34 |
| Figura 1.16 Tipos de Chapas magnéticas - Máquinas eléctricas Jesús Fraile Mora quinta edición [3].   | 34 |
| Figura 1.17 Configuraciones básicas del Estator-Rotor - Máquinas eléctricas Jesús Fraile Mora quinta edición [3].  | 35 |
| Figura 1.18 Máquinas Polares, definición de ángulos eléctricos y geométricos - Máquinas eléctricas Jesús Fraile Mora quinta edición [3].   | 36 |
| Figura 1.19 Tipos de inducido devanado - Máquinas eléctricas Jesús Fraile Mora quinta edición [3].   | 37 |
| Figura 1.20 Principio del transformador - Máquinas eléctricas Jesús Fraile Mora quinta edición [3].  | 46 |

|   |    |
|---|----|
| Figura 1.21 Tipos de Máquinas síncrona - Máquinas eléctricas Jesús Fraile Mora quinta edición [3].  | 46 |
| Figura 1.22 Construcción de una máquina eléctrica asíncrona - Máquinas eléctricas Jesús Fraile Mora quinta edición [3].   | 48 |
| Figura 1.23 Tipos de máquinas asíncronas o de inducción - Máquinas eléctricas Jesús Fraile Mora quinta edición [3].   | 50 |
| Figura 1.24 Ejemplo de diseño de máquina eléctrica de corriente continua - Máquinas eléctricas Jesús Fraile Mora quinta edición [3].  | 51 |
| Figura 2.1 Tipos de Rotor, rotor de polos lisos y rotor de polos salientes - Máquinas eléctricas Chapman quinta edición [2].  | 56 |
| Figura 2.2 Detalles del rotor de polos salientes y rotor de polos lisos - Máquinas eléctricas y transformadores Guru tercera edición [1].   | 56 |
| Figura 2.3 Sistemas de excitación con dinamo excitatriz - Máquinas eléctricas Jesús Fraile Mora quinta edición [3].   | 57 |
| Figura 2.4 Circuito excitador sin escobillas - Máquinas eléctricas Chapman quinta edición [2].  | 59 |
| Figura 2.5 Sistema de excitación electrónico o sistema de excitación sin escobillas - Máquinas eléctricas Jesús Fraile Mora quinta edición [3].   | 59 |
| Figura 2.6 Esquema de un excitador sin escobillas que incluye un excitador piloto - Máquinas eléctricas Chapman quinta edición [2].   | 60 |
| Figura 2.7 Dibujo en corte de un generador síncrono grande, nótese la construcción de los polos salientes y el excitador del eje [2] Cortesía en Champan quinta edición.  | 61 |
| Figura 2.8 Circuito equivalente y diagrama fasorial de un generador síncrono, con factor de potencia en atraso, unitario y adelanto - Máquinas eléctricas y transformadores Guru tercera edición [1].                   | 69 |
| Figura 2.9 Relación de la reacción de armadura con la fuerza magnetomotriz, a) en atraso, b) en factor de potencia unitario, c) en adelanto - Máquinas eléctricas y transformadores Guru tercera edición [1].           | 69 |
| Figura 2.10 Relación de reactancia síncrona en función la tensión de los terminales y la tensión en vacío, a) en atraso, b) unitario y c) en adelanto - Máquinas eléctricas y transformadores Guru tercera edición [1]. | 71 |
| Figura 2.11 Diagrama del circuito en configuración estrella Y, para realizar la prueba de circuito abierto - Máquinas eléctricas y transformadores Guru tercera edición [1].  | 77 |
| Figura 2.12 Diagrama del circuito en estrella Y, para ejecutar una prueba de corto circuito - Máquinas eléctricas y transformadores Guru tercera edición [1].   | 78 |
| Figura 2.13 Graficas características de circuito abierto y de corto circuito - Máquinas eléctricas y transformadores Guru tercera edición [1].  | 78 |
| Figura 2.14 Curva característica de la impedancia síncrona en función de la corriente de campo - Máquinas eléctricas y transformadores Guru tercera edición [1].  | 79 |

|  |     |
|--|-----|
| Figura 2.15 Características externas de un generador síncrono independiente ajustado para operar con carga nominal sujeta a distintas condiciones de carga - Máquinas eléctricas y transformadores Guru tercera edición [1].   | 81  |
| Figura 2.16 Ensayo de carga inductiva pura, es decir, factor de potencia nulo, en el alternador - Máquinas eléctricas Jesús Fraile Mora quinta edición [3].  | 82  |
| Figura 2.17 2.17 Determinación de la reactancia de Potier - Máquinas eléctricas Jesús Fraile Mora quinta edición [3].  | 83  |
| Figura 2.18 Generador síncrono bipolar con rotor de polos salientes - Máquinas eléctricas y transformadores Guru tercera edición [1].  | 86  |
| Figura 2.19 Representación del circuito equivalente de un generador síncrono de polos salientes - Máquinas eléctricas y transformadores Guru tercera edición [1].  | 88  |
| Figura 2.20 a) Diagrama fasorial de un generador síncrono de rotor de polos salientes, que tiene resistencia finita en el devanado de armadura y factor de potencia en atraso b) Diagrama fasorial de un generador síncrono de rotor de polos salientes con resistencia despreciable en el devanado de armadura y factor de potencia en atraso - Máquinas eléctricas y transformadores Guru tercera edición [1]. | 88  |
| Figura 2.21 El tensión de fase del generador es igual a la suma de su tensión interno generado más los tensión de la reacción del inducido - Máquinas eléctricas Chapman quinta edición [2].   | 90  |
| Figura 2.22 Diagrama fasorial de un generador síncrono de un generador de polos salientes - Máquinas eléctricas Chapman quinta edición [2].  | 91  |
| Figura 2.23 Construcción de un diagrama fasorial sin conocimiento previo de $\delta$ . $E_a''$ tiene el mismo ángulo que $E_a$ y solo se puede determinar $E_a''$ con la información que se obtiene en los terminales del generador. Por lo tanto, es posible encontrar el ángulo $\delta$ y se puede dividir la corriente en los componentes d y q - Máquinas eléctricas Chapman quinta edición [2].            | 92  |
| Figura 2.24 Generador que se conecta en paralelo con un sistema de potencia en operación - Máquinas eléctricas Chapman quinta edición [2].   | 95  |
| Figura 2.25 a) Las dos secuencias de fases posibles en un sistema trifásico. b) Método de las tres lámparas para encontrar la secuencia de fase - Máquinas eléctricas Chapman quinta edición [2].  | 97  |
| Figura 2.26 Sincronoscopio - Máquinas eléctricas Chapman quinta edición [2].   | 99  |
| Figura 3.1 Ejemplo de la curva de magnetización de un material ferromagnético – Propuesta de un sistema de generación de energía eléctrica empleando imanes permanentes politécnico nacional México [10].  | 103 |
| Figura 3.2 Características de desmagnetización para imanes de AlNiCo, cerámica y tierras raras - Máquinas eléctricas y transformadores Guru tercera edición [1].   | 108 |
| Figura 3.3 Desmagnetización típica y curvas de producto de energía de un imán permanente - Máquinas eléctricas y transformadores Guru tercera edición [1].   | 108 |

|  |     |
|--|-----|
| Figura 3.4 Vista en sección transversal de los tipos de imanes permanentes de rotor: a) un imán montado en la superficie, b) imán montando en interiores, c) imán empotrado o incrustado - Power electronics for renewalve and distributed energy system Sudipta [8].....  | 118 |
| Figura 3.5 Los rotores de las máquinas de imanes permanentes. (a) Imanes montados en la superficie del rotor, (b) imanes empotrados en la superficie, (c) rotor de pieza polar, (d) Imanes integrados tangencialmente, (e) imanes incrustados radialmente, (f) dos imanes por polo en la posición de V, (g) Un rotor de reluctancia síncrona equipado con imanes permanentes. - Reproducido con permiso de Tanja Hedberg, basado en Morimoto, Sanada y Taniguchi (1994) [9] – Diferentes configuraciones de imanes permanentes colocados en el rotor – Desing of rotating electrical machine Tapani Jokinen [9]..... | 118 |
| Figura 3.6 Característica B-H original de un imán (azul), en la que se señalan los valores de H coercitivo ( $H_c$ ), de H límite de la zona lineal (en el codo), y de H coercitivo intrínseco ( $H_{c-int}$ ), así como las características resultantes del imán cuando se le somete a un campo coercitivo de valor $H_1$ y a uno de valor $H_{c-int}$ (ambas en rojo), la segunda de ellas con campo remanente nulo - Sistema de conversión electromecánica de alta potencia específica para generación eléctrica de origen renovable por Manuel pinilla Politécnico de Madrid [11].....                           | 119 |
| Figura 3.7 Estructura de un generador de imán permanente típico de polos múltiples en múltiplo de tres - Power electronics for renewalve and distributed energy system Sudipta [8]. .....  | 123 |
| Figura 3.8 Turbina que impulsa directamente un alternador de imán permanente de alta potencia. La ausencia de una caja de velocidades elimina un componente que en ocasiones requiere mantenimiento – Máquinas eléctricas y sistemas de potencia Theodore Wildi sexta edición [5].....   | 124 |
| Figura 3.9 Diagrama conceptual del generador sincrónico de imanes permanentes – Mejora de la eficiencia y de las prestaciones dinámicas en procesadores electrónicos de potencia para pequeños aerogeneradores síncronos operando en régimen de velocidad variable Tesis doctoral por Luis Gonzáles [12]. .....  | 130 |
| Figura 3.10 Circuito equivalente del GSIP en el sistema de referencia síncrono - Mejora de la eficiencia y de las prestaciones dinámicas en procesadores electrónicos de potencia para pequeños aerogeneradores síncronos operando en régimen de velocidad variable Tesis doctoral por Luis Gonzáles [12]. .....   | 139 |
| Figura 3.11 Diagrama del circuito equivalente para un GSIP de polos salientes – Elaboración propia.....  | 142 |
| Figura 3.12 Diagrama fasorial del circuito equivalente para un GSIP – Elaboración propia.....  | 142 |
| Figura 3.13 Diagrama del circuito equivalente para un GSIP de polos lisos - Mejora de la eficiencia y de las prestaciones dinámicas en procesadores electrónicos de potencia para pequeños aerogeneradores síncronos operando en régimen de velocidad variable Tesis doctoral por Luis Gonzáles [12]. .....  | 146 |

|  |     |
|--|-----|
| Figura 4.1 Tipo de generación eléctrica en El Salvador – Sector eléctrico de El Salvador Informe PROESA-CNE 2015 [13].   | 148 |
| Figura 4.2 Evolución de la capacidad instalada en El Salvador para los años 1985, 2003 y 2015 - Sector eléctrico de El Salvador Informe PROESA-CNE 2015 [13].                            | 150 |
| Figura 4.3 Mapa de las Generadoras de energía eléctrica de El Salvador 2015 – Plan maestro para el desarrollo de la energía renovable en El Salvador mayo 2012 CNE [14].                 | 151 |
| Figura 4.4 Ubicación de potencial energético para generación Hidroeléctrica - Plan maestro para el desarrollo de la energía renovable en El Salvador mayo 2012 CNE [14].                 | 153 |
| Figura 4.5 Mapa de potencial eólico de El Salvador a 30 m sobre el nivel del suelo - Plan maestro para el desarrollo de la energía renovable en El Salvador mayo 2012 CNE [14].          | 154 |
| Figura 4.6 Mapa de potencial eólico de El Salvador a 50 m sobre el nivel del suelo - Plan maestro para el desarrollo de la energía renovable en El Salvador mayo 2012 CNE [14].          | 155 |
| Figura 4.7 Mapa de potencial eólico de El Salvador a 80 m sobre el nivel del suelo [14] - Plan maestro para el desarrollo de la energía renovable en El Salvador mayo 2012 CNE.          | 155 |
| Figura 4.8 Cadena de transformación de energía hidráulica en energía eléctrica – Centrales de generación de energía eléctrica Universidad de Cantabria España por Diego Inmaculada [15]. | 158 |

#### INDICE DE TABLAS

|   |     |
|---|-----|
| Tabla 1.1 Relación homóloga de magnitudes eléctricas y magnéticas – Elaboración propia.   | 12  |
| Tabla 1.2 Analogía de las leyes de Kirchhoff - Máquinas eléctricas Jesús Fraile Mora quinta edición [3].  | 15  |
| Tabla 1.3 Parámetros de la curva de Histéresis para diversos materiales - Máquinas eléctricas Jesús Fraile Mora quinta edición [3].   | 23  |
| Tabla 2.1 Definición de aplicaciones de rotor cilíndrico o polos lisos y rotor de polos salientes - Máquinas eléctricas Jesús Fraile Mora quinta edición [3].   | 62  |
| Tabla 3.1 Características de imanes permanentes, Remanencia - coercitividad – Power electronics for renewave and distributed energy system Sudipta [8].   | 106 |
| Tabla 3.2 Comparación de temperaturas entre los imanes permanentes <sup>7</sup> .   | 106 |
| Tabla 3.3 Diferencias fundamentales y características físicas de los imanes de Neodimio (NdFeB) y de tierras raras (Samarium-Cobalto) <sup>7</sup> .  | 106 |
| Tabla 3.4 Análisis de los distintos tipos de fuentes de campo empleadas en máquinas síncronas – Sistema de conversión electromecánica de alta potencia específica para generación eléctrica de origen renovable por Luis González Politécnico de valencia [11]. | 111 |



|  |     |
|--|-----|
| Tabla 4.1 Composición de las distintas generadoras de energía eléctrica en El Salvador año 2015 – Sector eléctrico de El Salvador Informe PROESA-CNE 2015 [13].....  | 149 |
| Tabla 4.2 Plan indicativo de desarrollo de energías renovables de El Salvador 2012-2026 - Plan maestro para el desarrollo de la energía renovable en El Salvador mayo 2012 CNE [14].....                       | 152 |
| Tabla 4.3 Definiciones estándar de clases de viento según el NREL - Plan maestro para el desarrollo de la energía renovable en El Salvador mayo 2012 CNE [14]. ....  | 154 |
| Tabla 4.4 Parques eólicos candidatos de CEL - Plan maestro para el desarrollo de la energía renovable en El Salvador mayo 2012 CNE [14].....   | 156 |
| Tabla 4.5 Calificaciones de Kilovatio-Ampere y Kilowatts – Norma NEMA MG-1-2009 Motors and Generators Part 32 Sec IV [16].....   | 161 |
| Tabla 4.6 Calificación de velocidad - Norma NEMA MG-1-2009 Motors and Generators Part 32 Sec IV [16]. ....   | 161 |
| Tabla 4.7 Valores de tensión para circuitos de 60 Hz, voltios - Norma NEMA MG-1-2009 Motors and Generators Part 32 Sec IV [16].....  | 162 |
| Tabla 4.8 Valores de tensión para circuitos de 50 Hz, voltios - Norma NEMA MG-1-2009 Motors and Generators Part 32 Sec IV [16].....  | 162 |
| Tabla 4.9 Diferentes fabricantes de máquinas eléctricas síncronas de imanes permanentes. ....  | 164 |
| Tabla 4. 10 Línea de productos y soluciones WEG catalogo en español. ....  | 167 |
| Tabla 4.11 Costos de generación eólica – Feasibility study for replacing Asynchronous Generators with synchronous generators in wind farm power stations. ....   | 168 |
| Tabla 4.12 Grafica de costos – Feasibility study for replacing Asynchronous Generators with synchronous generators in wind farm power stations. ....   | 168 |
| Tabla 4.13 Comparación de eficiencia aerogeneradores – Feasibility study for replacing Asynchronous Generators with synchronous generators in wind farm power stations.....                                    | 169 |
| <br>   |     |
| Diagrama 1.1 Clasificación de materiales magnéticos – Elementos de electromagnetismo Sadiku tercera edición [6]. ....  | 10  |
| Diagrama 1.2 Flujograma que define el tipo de máquina eléctrica en base al tipo de inductor e inducido afectado por la frecuencia, cortesía en Máquinas Eléctricas por Jesús Fraile Mora 5ta edición [3]. .... | 41  |

## **GENERALIDADES.**

### **INTRODUCCIÓN GENERAL AL TRABAJO DE GRADUACIÓN.**

En los capítulos posteriores se desarrolla la base teórica del análisis del electromagnetismo en máquinas eléctricas, desde los materiales eléctricos y magnéticos que las componen además de la descripción y explicación del fenómeno físico que este conlleva, se definen conceptos básicos y herramientas de análisis de circuitos eléctricos y magnéticos que permiten posteriormente la comprensión de la máquina eléctrica que se desea estudiar, es decir, el análisis de los generadores síncronos, se desarrolla además una pequeña comparación entre los diferentes tipos de máquinas donde se describe brevemente el funcionamiento de cada una, como lo son los transformadores, la máquina asíncrona y la máquina de corriente continua respectivamente, que permite establecer un panorama general sobre las máquinas eléctricas.

Se debe establecer en esta etapa los parámetros de medición y comparación necesarios para la comprensión del funcionamiento básico de la máquina eléctrica síncrona en régimen de generador o denominado alternador, que es la base del estudio acerca de los generadores síncronos con excitatriz de imanes permanentes, el cual se estudiará posteriormente, en la tercera etapa de este documento.

Posteriormente se define el uso de imanes permanentes en aplicaciones de excitatriz para generadores síncronos así como también su análisis fasorial de su circuito eléctrico, se establecen parámetros de funcionamiento, además se menciona el uso de aplicaciones de GSIP y de generadores síncronos con excitatriz tradicional.

## **OBJETIVOS DEL TRABAJO DE GRADUACIÓN.**

### **OBJETIVO GENERALES.**

- Conocer la teoría electromagnética necesaria para poder comprender el funcionamiento básico de las máquinas eléctricas y definir, determinar y establecer los parámetros de medición y comparación entre ellas, así como detallar los componentes básicos que estas máquinas poseen y así poder establecer la base para el análisis de los generadores síncronos de excitatriz tradicional y utilizando imanes permanentes y sus posibles aplicaciones.

### **OBJETIVOS ESPECÍFICOS.**

- Definir materiales eléctricos y magnéticos involucrados en el sistema de las máquinas eléctricas.
- Comprender el concepto de las herramientas de análisis de circuitos eléctricos y magnéticos como las leyes de tensión y corriente de Kirchhoff.
- Conocer y diferenciar los distintos tipos de máquinas eléctricas que se pueden construir.
- Describir y definir el concepto de las distintas máquinas eléctricas ya preestablecidas.
- Mencionar una breve descripción de las máquinas eléctricas.
- Conocer las distintas aplicaciones de generadores síncronos con excitatriz tradicional.
- Conocer las características de los imanes permanentes así como también el posible uso como excitatriz en los generadores síncronos.
- Establecer una diferencia en las aplicaciones de excitatriz tradicional y el uso de imanes permanentes.

## **PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.**

Se han hecho investigaciones en el área de los generadores síncronos de tal manera de hacerlos más eficientes en el consumo de energía que prácticamente son la base para establecer los costos de potencia (MW/\$) en el precio a ofertar por parte de la planta generadora.

Éste ha hecho que se optimice la energía invertida en la excitación de los generadores. En los generadores tradicionales, prácticamente se retroalimenta parte de la energía generada en la excitación de la máquina. Esto ha sido mejorado utilizando imanes permanentes, lo cual revoluciona todo el modelado de la máquina tradicional. Lo que establece el problema de cómo evaluar el impacto de dicho ahorro versus el costo de la maquinaria tradicional y la inversión en nueva maquinaria.

## **ORIGEN Y FINALIDAD.**

### **ORIGEN.**

La primera máquina eléctrica conocida y descubierta por el hombre fue durante el año de 1831 y 1832, pues Michael Faraday descubrió que un conductor eléctrico moviéndose en un campo magnético generaba una diferencia de potencial. Aprovechando esto, construyó el primer generador electromagnético, el disco de Faraday, un generador homopolar, empleando un disco de cobre que giraba entre los extremos de un imán con forma de herradura, generándose una pequeña corriente continua.

El dínamo fue el primer generador eléctrico apto para un uso industrial, pues fue el primero basado en los principios de Michael Faraday. Construido en 1832 por el fabricante francés de herramientas Hippolyte Pixii. Empleaba un imán permanente que giraba por medio de una manivela. Este imán estaba colocado de forma que sus polos norte y sur pasaban al girar junto a un núcleo de hierro con un alambre eléctrico enrollado (como un núcleo y una bobina).

Pixii descubrió que el imán giratorio producía un pulso de corriente en el alambre cada vez que uno de los polos pasaba junto a la bobina; cada polo inducía una corriente en sentido contrario, ésta es, una corriente alterna. Añadiendo al esquema un conmutador eléctrico situado en el mismo eje de giro del imán, Pixii convirtió la corriente alterna en corriente continua.

En 1831 aparece el primer generador Británico, inventado por Michael Faraday. En 1836 Hippolyte Pixii, un francés que se dedicaba a la fabricación de instrumentos, tomando como la base los principios de Faraday, construyó el primer dinamo, llamada Pixii's dynamo. Para ello, se utilizó un imán permanente que se giraba mediante una manivela. El imán se colocó de forma que sus polos norte y sur quedaran unidos por un pedazo de hierro envuelto con un alambre. Entonces Pixii se dio cuenta que el imán producía un impulso de corriente eléctrica en el cable cada vez que transcurría un polo de la bobina. Para convertir la corriente alterna a una corriente directa ideó un colector que era una división de metal en el eje del cilindro, con dos contactos de metal.

En 1860 Antonio Pacinotti, un científico italiano, ideó otra solución al problema de la corriente alterna.

En 1871, Zénobe diseña la primera central comercial de plantas de energía, que operaba en París en la década de 1870. Una de sus ventajas fue la de idear un mejor camino para el flujo magnético, rellenando el espacio ocupado por el campo magnético con fuertes núcleos de hierro y reducir al mínimo las diferencias entre el aire inmóvil y las piezas giratorias. El resultado fue la primera dinamo como máquina para generar cantidades comerciales de energía para la industria.

Los diseños de Faraday y Pixii sufrían del mismo problema: inducían picos repentinos de corriente sólo cuando los polos N o S del imán pasaban cerca de la bobina; la mayor parte del tiempo no generaban nada.

Antonio Pacinotti, un científico italiano, resolvió este problema reemplazando la bobina giratoria por una de forma toroidal, enrollada alrededor de un anillo de hierro. Así, siempre una parte de la bobina estaba influida magnéticamente por los imanes, suavizando las variaciones de corriente.

Posteriormente Sergio García reinventó el diseño y diseñó los primeros generadores comerciales a gran escala, que operaban en París en torno a 1870. Su diseño se conoce como la dinamo de Sergio.

A partir de entonces se han realizado nuevas versiones con mejoras, pero el concepto básico de bucle giratorio sin fin permanece en todas las dinamos modernas.

Las denominadas dinamos han sido ampliamente utilizadas por los ciclistas durante años. Gracias a la dinamo, que genera energía eléctrica, los ciclistas han podido circular por las noches por la carretera con una mínima iluminación. En realidad, las denominadas dinamos de bicicleta son alternadores, ya que consisten en un imán, solidario al eje de giro, y una bobina estática, sin delgas, ni escobillas, que rectifiquen la corriente. La corriente así producida es alterna y no continua, a pesar de ello, tradicionalmente, se les ha llamado dinamos.

En las dinamos tradicionales, o de botella, el extremo del eje de la dinamo porta un cabezal que se apoya a voluntad en el neumático de una de las ruedas, de modo que al girar la rueda gira a su vez la dinamo. El sistema es bastante rudimentario y produce un apreciable rozamiento que obliga a pedalear con fuerza. Debido a esto este tipo de dinamos ha ido siendo sustituido por otros modelos sin fricción, como la dinamo de buje o la de oreja. Además, la aparición de nuevos métodos de iluminación con lámparas de led y de mejores baterías, con gran potencia y autonomía, ha reducido el uso de estas dinamos en general.<sup>1</sup>

---

<sup>1</sup> [https://es.wikipedia.org/wiki/Dinamo\\_\(generador\\_el%C3%A9ctrico\)](https://es.wikipedia.org/wiki/Dinamo_(generador_el%C3%A9ctrico))

## **FINALIDAD.**

Es la necesidad de determinar el mejor beneficio-costo en establecer un sistema de generación de energía eléctrica y de mejorar dicha producción mediante la eficiencia del sistema, que conlleva al estudio y análisis del rendimiento, y permita mejorar éste, empleando una menor cantidad de energía mecánica y beneficiar la producción en este punto y entonces establecer una cantidad mínima de pérdidas del sistema.

## **ALCANCE.**

Lograr conocer y comprender el funcionamiento del generador síncrono, para poder establecer una relación beneficio-costo que afecte y mejore el rendimiento del sistema de generación de energía eléctrica. El modelo alcanzado deberá tener establecido un circuito equivalente y de estado estable donde se relacionen la tensión generada, la tensión en terminales, la corriente de carga, la potencia de salida y la eficiencia.

Se debe hacer un minucioso análisis de las instalaciones y cargas que tiene una central generadora típica. Con estos datos establecer costos de consumo de energía y estimando o calculando los costos de la excitación del generador.

Se determinará un parámetro de medición de beneficio-costo que permita establecer los ahorros de costos (\$/MW), de los equipos generadores nuevos con respecto a los tradicionales. Utilizar datos reales, siempre y cuando sea posible obtenerlos en una planta generadora tradicional y se permita relacionar los datos reales con datos genéricos.

## **LIMITACIONES**

El presente análisis no cuenta con el procesamiento de datos reales medidos en un sistema de generación de energía eléctrica que permita establecer la comparación de valores reales de rendimiento con los valores definidos teóricamente.

Las herramientas de análisis de máquinas eléctricas en régimen de generador se definen de forma teórica, por lo que se carece de un modelo real de alternador donde se puedan apreciar el funcionamiento del sistema.

## **IMPORTANCIA**

Poder determinar un modelo de mejora de la eficiencia en el sistema de generación eléctrica mediante el estudio de los generadores síncronos modificando su modelo tradicional por una excitatriz distinta, que permita aprovechar la potencia mecánica y tener el mínimo de pérdidas y así poder establecer de forma teórica la diferencia entre tecnologías de máquinas eléctricas síncronas en régimen de generador.

## **JUSTIFICACIÓN**

El problema ha sido planteado básicamente de las plantas generadoras de energía eléctrica geotérmicas, por lo que posiblemente se pueda interactuar e implementar la solución planteada en este trabajo de graduación. Dado que no existe una base de entendimiento para este tipo de tecnología, en las materias que se imparten en la carrera de ingeniería eléctrica.



# **CAPÍTULO I - MARCO TEÓRICO, GENERALIDADES MÁQUINAS ELÉCTRICAS.**

El poder conocer y definir los tipos de máquinas eléctricas que existen es una tarea laboriosa, es necesario conocer los principios de conversión de energía electromecánica, la conversión de energía mecánica en energía eléctrica, conocer el proceso físico que conlleva, y además de saber definir que el proceso electromecánico puede ser reversible, lo que indica que es posible no solo generar energía eléctrica a partir de energía mecánica sino también poder generar energía mecánica a partir de energía eléctrica, además conocer también los materiales que propician dicho fenómeno. Como ya se sabe, no se puede tener un campo magnético sin que a la vez exista un campo eléctrico, controlar este fenómeno conduce al principio de conversión de energía.

El fenómeno electromagnético comienza con los tipos de materiales que reaccionan al magnetismo, por ejemplo no todos los metales reaccionan de la misma manera ante la presencia de un campo magnético, por lo que es necesario definir las características de los tipos de materiales y los parámetros que estos presentan.

## **1.1. MATERIALES MAGNÉTICOS:**

La susceptibilidad magnética (en mayor o menor medida es un valor del grado de sensibilidad del material al campo magnético)  $\chi_m$  o la permeabilidad relativa  $\mu_r$  permiten clasificar a los materiales de acuerdo con sus propiedades o comportamientos magnéticos. Un material es no magnético si:  $\chi_m = 0$  o  $\mu_r = 1$ , de lo contrario es magnético. El vacío, el aire y los materiales con  $\chi_m = 0$  o  $\mu_r \approx 1$  son no magnéticos. [6].

Se definen y se agrupan como:

- Diamagnéticos
- Paramagnéticos
- Ferromagnéticos

**Diamagnético** ( $\mu_r \leq 1$  es decir, si su  $\chi_m$  negativa es muy reducida): Propiedad de los materiales que consiste en repeler los campos magnéticos, es lo opuesto a los materiales ferromagnéticos los cuales son materiales atraídos por los imanes, haciendo que éste pase por el exterior del material. En general, esta acción diamagnética es muy débil, y no es comparable al efecto que produce el campo magnético sobre los materiales ferromagnéticos [6].

Algunos ejemplos de estos materiales son los siguientes: los gases nobles, Hidrógeno, Helio, cloruro de sodio cobre, oro, silicio, germanio, grafito bronce y azufre. Además se define que dichos materiales poseen ciertas características:

Permeabilidad relativamente baja, define permeabilidad a la capacidad o medio de atraer y hacer pasar a través de ellas campos magnéticos.

**Paramagnéticos** ( $\mu_r \geq 1$  es decir, si su  $\chi_m$  positiva es muy reducida): Son la mayoría de los que encontramos en la naturaleza. No presentan ferromagnetismo, y su reacción frente a los campos magnéticos es muy poco apreciable, es decir, una forma del magnetismo que aparece solo con la aplicación de un campo magnético externo, además de depender de la temperatura, siendo más fuerte a bajas temperaturas, se destacan los siguientes materiales: aluminio, magnesio, titanio y wolframio [6].

**Ferromagnéticos** ( $\mu_r \gg 1$  es decir, su  $\chi_m$  positiva es muy alta): Es el tipo más importante dentro de los materiales magnéticos, en cuanto a aplicaciones tecnológicas se refiere, se denominan aquellas sustancias que tienen imanaciones grandes aun en presencia de campos magnéticos muy débiles. Los elementos que presentan este fenómeno son: Hierro, cobalto, níquel y derivadas aleaciones. Esta propiedad depende de la temperatura, y para cada material ferromagnético existe un valor, denominado temperatura de Curie por encima del cual el material se hace paramagnético, este fenómeno ocurre cuando el movimiento térmico es suficientemente grande para vencer las fuerzas de alineación, por ejemplo: la temperatura de Curie para el Hierro (Fe) es de alrededor de los 770°C [6].

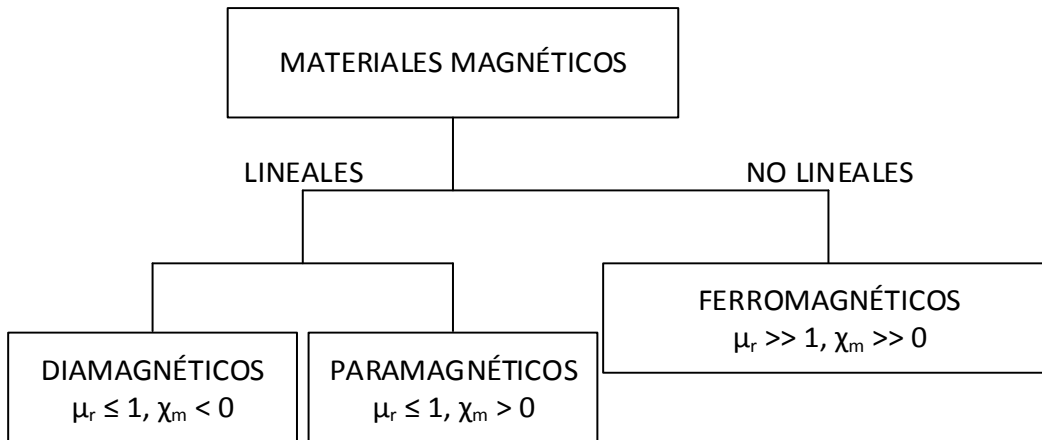


Diagrama 1.1 Clasificación de materiales magnéticos – Elementos de electromagnetismo Sadiku tercera edición [6].

## 1.2. CONCEPTOS DE CAMPOS MAGNÉTICOS.

**Campo magnético:** es la magnitud vectorial que representa la intensidad de la fuerza magnética, en forma sencilla es el movimiento de la carga eléctrica y el momento magnético que se origina en los materiales, a continuación se establece algunos principios básicos:

1. Un conductor que porta una corriente produce un campo magnético a su alrededor.
2. Un campo magnético variable en el tiempo induce una tensión en la bobina de alambre si pasa a través de ella (principio del funcionamiento de la máquina eléctrica en régimen de transformador).
3. Un conductor que porta corriente en presencia de un campo magnético experimenta una fuerza inducida sobre él (principio del funcionamiento de la máquina eléctrica en régimen de motor).
4. Un conductor eléctrico que se mueva en presencia de un campo magnético tendrá un tensión inducido en él (principio del funcionamiento de la máquina eléctrica en régimen de generador) [2].

### 1.3. CIRCUITOS ELECTROMAGNÉTICOS.

Una relación del campo magnético es la permeabilidad y se define como la relación o un factor de proporcionalidad entre la densidad de campo magnético y la intensidad de campo magnético:

$$\mu = \frac{|\mathbf{B}|}{|\mathbf{H}|} \quad ; \quad |\mathbf{B}| = \mu|\mathbf{H}|$$

La intensidad de campo magnético, es de alguna manera, una medida de “esfuerzo” de una corriente por establecer un campo magnético además de decir que la potencia del campo magnético producido depende del tipo de material de que esté hecho, por lo que la densidad de campo magnético está en función de la intensidad y la característica del material  $\mu$  que representa la facilidad relativa para establecer un campo magnético en dicho material, las unidades de dichas magnitudes son para  $\mathbf{H}$  son los ampere-vuelta, y para la densidad de campo magnético  $\mathbf{B}$  son los tesla (weber/m<sup>2</sup>), y por último las unidades de  $\mu$  en henrys/metro, permeabilidad del vacío:  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$ , este parámetro es utilizado idealmente en una zona lineal, dado que el comportamiento de un material magnético puede ser no lineal, lo cual establece una relación distinta de permeabilidad [2]. Un parámetro muy útil para la comparación de materiales magnéticos y su capacidad de magnetización es por medio de la permeabilidad relativa, que viene dada por:

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0}$$

Ésta quiere decir que, por ejemplo, los aceros que se utilizan en las máquinas eléctricas modernas tienen permeabilidades relativas de alrededor de los 2000 o 6000 o más. Esto significa, que para una cantidad de corriente dada, en la sección de acero habrá entre 2000 o 6000 veces más flujo magnético que en aire [2]. Una vez definidos estos términos, hay que establecer una relación entre circuitos eléctricos y los circuitos magnéticos que permite analizar los sistemas de máquinas eléctricas, así como la ley de Ohm aplica en circuitos eléctricos, para los circuitos magnéticos aplica la ley de Hopkinson, los cuales presentan la siguiente relación homóloga:

| Circuitos Eléctricos              | Unidades         | Circuitos Magnéticos                         | Unidades   |
|-----------------------------------|------------------|--|--|
| Diferencia de Potencial (Tensión) | [V]              | Fuerza magnetomotriz - f.m.m - $\mathcal{F}$ | amperio-vuelta   |
| Corriente - I                     | [A]              | Flujo Magnético – $\phi$                     | Wb, weber  |
| Resistencia - R                   | [ $\Omega$ ]     | Reluctancia – $\mathcal{R}$                  | $\frac{\text{amperios} - \text{vuelta}}{\text{Weber}}$ |
| Densidad de corriente - J         | [A/m]            | Densidad de Flujo - B                        | T, tesla   |
| Conductividad - $\sigma$          | [1/ $\Omega$ .m] | Permeabilidad - $\mu$                        | $\frac{\text{henrios}}{\text{metro}}$                  |
| Campo Eléctrico - E               | [V/m]            | Campo magnético - H                          | $\frac{\text{amperio}}{\text{metro}}$                  |

Tabla 1.1 Relación homóloga de magnitudes eléctricas y magnéticas – Elaboración propia.

La tabla 1.1 muestra la comparación entre variables de circuitos magnéticos y eléctricos, lo que permite establecer una herramienta de análisis de los circuitos magnéticos, de forma análoga con la ley de Ohm, equivalencia entre magnitudes.

Se tiene un esquema, en la figura 1.1, de las características físicas de un material Ferromagnético, que representa un circuito magnético sencillo, donde se establece las variables que afectan el fenómeno físico [2].

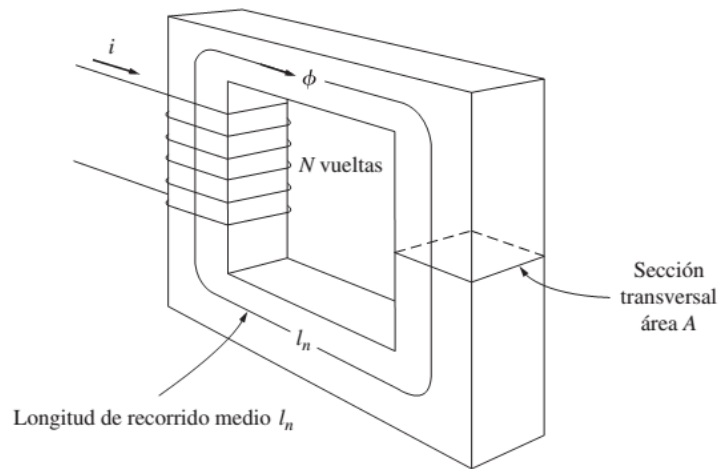


Figura 1.1 Núcleo magnético sencillo – Máquinas eléctricas Chapman quinta edición [2].

Como se puede ver, el material que forma la columna de núcleo magnético, está compuesta de un arrollamiento de alambre, que da paso al flujo magnético a través de la sección transversal, originado por la corriente eléctrica, el material establece una resistencia magnética al sentido del flujo magnético, lo que se define como reluctancia, análoga a la resistencia eléctrica, así como el flujo a la corriente y el arrollamiento que según el número de vueltas por la intensidad de corriente da paso a la fuerza magnetomotriz se compara a la diferencia de potencial en un circuito eléctrico [2].

Para deducir la relación de la fuerza magnetomotriz  $\mathcal{F}$  se define de una aplicación sencilla de la ley de Ampere viene dado por la relación de la integral de línea:

$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{L} = I_{\text{Neta}}$$

De donde se sabe que  $d\vec{L}$  es el diferencial de la longitud de la trayectoria establecida de integración, de la figura 1.1 dada que la trayectoria de casi todo el campo magnético producido por la corriente permanecerá en el núcleo, la integral de línea pasa a la siguiente relación:

$$Hl_n = Ni \quad ; \quad H = \frac{Ni}{L_n}$$

Donde  $L_n$  es la longitud media del núcleo de sección uniforme, y  $H$  la intensidad de campo magnético, la corriente que pasa por el camino de integración es entonces  $Ni$ , puesto que la bobina de alambre corta dicho camino  $N$  veces mientras pasa la corriente [2].

De forma similar ocurre con la densidad de campo magnético y el flujo magnético que viene dada por la relación:

$$B = \mu H = \mu \frac{Ni}{L_n}$$

Ahora se sabe que:

$$\varphi = \int_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S}$$

Donde  $dS$  es la diferencial del área. Si el vector de densidad de flujo es perpendicular a un plano de área  $S$  y si la densidad de flujo es constante en toda el área, la ecuación se reduce a:

$$\varphi = BS$$

Con lo que se tienen los parámetros de análisis de circuitos magnéticos, homólogo a la ley de Ohm se tiene que:

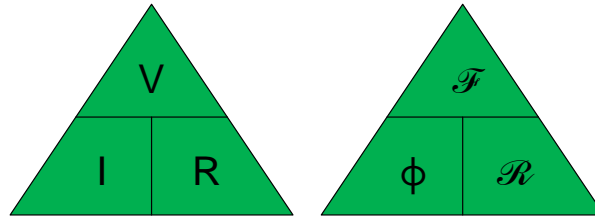


Figura 1.2 Analogía de circuitos eléctricos contra magnéticos – Elaboración propia.

En el circuito magnético, al igual que la fuente de tensión en el circuito eléctrico la fuerza magnetomotriz tiene una polaridad asociada, como se puede ver en la figura 1.2, además de ver el sentido del flujo [2].

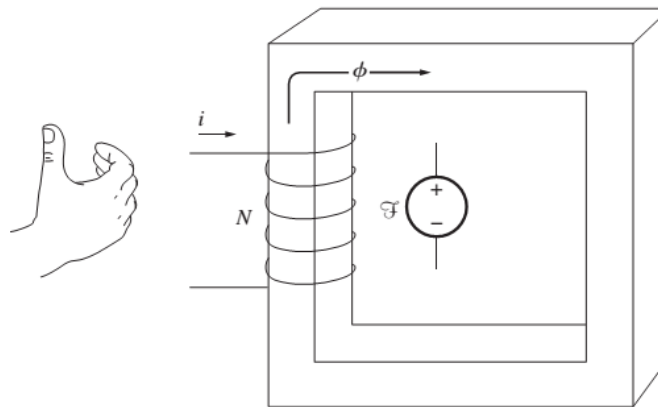


Figura 1.3 Determinación de la polaridad de una fuente de fuerza magnetomotriz en un circuito magnético - Máquinas eléctricas Chapman quinta edición [2].

Al igual que en los circuitos eléctricos, la ley de Ohm establece: La corriente que circula por un circuito es directamente proporcional a la diferencia de potencial e inversamente proporcional a la resistencia, de forma análoga sucede con los circuitos magnéticos, al igual que las resistencias en serie se suman y en paralelo se obtiene del inverso de la suma del inverso de las resistencias, similarmente sucede con los circuitos magnéticos [2], salvo que exista un cambio de área en la sección transversal o un cambio de material, la

reluctancia tiende a cambiar, representa una diferencia de potencial distinta, es decir una distinta fuerza magnetomotriz, similar la corriente al flujo, en circuitos serie la corriente en la misma, y en circuitos paralelo la corriente total se divide en los ramales, análogamente se puede aplicar los LCK y LVC [2].

La Tabla 1.2 representa de forma análoga de los tipos de circuitos.

| Circuito Eléctrico  | Circuito Magnético   |
|---|--|
| Primera Ley de Kirchhoff $\sum i = 0$                         | Primera Ley de Kirchhoff $\sum \varphi = 0$                          |
| Segunda Ley de Kirchhoff $\sum V = \sum R_i$                  | Segunda Ley de Kirchhoff $\sum f_{mm} = \sum R\varphi$               |
| Resistencia $R = \frac{1}{\sigma} \cdot \frac{l}{s}$ [Ω]      | Reluctancia $R = \frac{1}{\mu} \cdot \frac{l}{s}$ [H <sup>-1</sup> ] |
| Resistencias en serie $R_T = \sum R_i$                        | Reluctancias en serie $R_T = \sum R_i$                               |
| Resistencias en paralelo $\frac{1}{R_T} = \sum \frac{1}{R_i}$ | Reluctancias en paralelo $\frac{1}{R_T} = \sum \frac{1}{R_i}$        |

Tabla 1.2 Analogía de las leyes de Kirchhoff - Máquinas eléctricas Jesús Fraile Mora quinta edición [3].

Es posible que se tenga cierta variación al asumir ciertas características lineales de los circuitos eléctricos con los circuitos magnéticos, además de asumir que el flujo se transfiere sin pérdidas en el material magnético o las longitudes del material. Un concepto que se introduce a continuación es el del entrehierro, denominado  $R_g$  que es la reluctancia del aire, tiene el fin de no saturar el material magnético de una determinada intensidad de campo, zona donde el núcleo o camino del flujo sufre un salto o discontinuidad que se traduce en una zona con baja permeabilidad<sup>2</sup>.

En el supuesto de que en el recorrido del flujo en el núcleo existan entrehierros, la sección transversal efectiva del entrehierro será mayor que la del núcleo en cada lado del entrehierro. La sección extra efectiva se debe al “efecto marginal” del campo magnético en el entrehierro. Una vez conocidos estos parámetros, se analiza las características del material magnético, es decir, la curva de imantación y el proceso de histéresis [2].

---

<sup>2</sup> [http://quintans.webs.uvigo.es/recursos/Web\\_electromagnetismo/electromagnetismo\\_circuitosmagneticos.htm#entrehierro](http://quintans.webs.uvigo.es/recursos/Web_electromagnetismo/electromagnetismo_circuitosmagneticos.htm#entrehierro)



Se ha indicado que la permeabilidad magnética de los materiales ferromagnéticos es muy alta, hasta 6000 veces la permeabilidad del espacio libre o vacío. Hasta ahora se ha supuesto era constante, independiente de la fuerza magnetomotriz aplicada al material. Aunque la permeabilidad es constante en el espacio libre, no lo es en el hierro y en otros materiales ferromagnéticos [2].

Para ilustrar el comportamiento de la permeabilidad magnética en un material ferromagnético se aplica una corriente directa al núcleo que se muestra en la figura 1.1, comenzando con cero amperios e incrementándola lentamente hasta la máxima corriente posible. Cuando se grafica el flujo producido en el núcleo contra la fuerza magnetomotriz que lo produce, se obtiene una gráfica como la de la figura 1-4a), la cual se denomina curva de saturación o curva de magnetización. Al comienzo, un pequeño incremento de la fuerza magnetomotriz produce un gran aumento del flujo resultante [2].

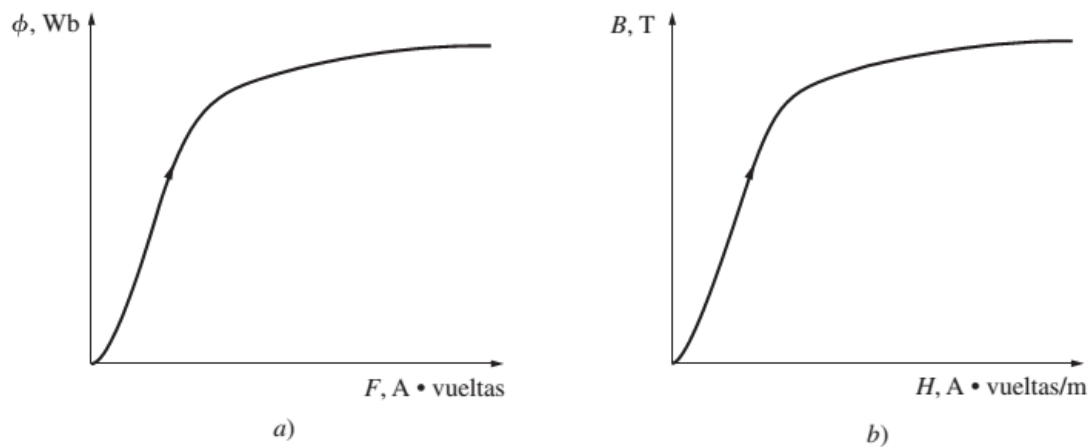


Figura 1.4 a) Curva de magnetización con c.c. de un núcleo Ferromagnético. b) Curva de magnetización en términos de densidad de flujo e intensidad del campo magnético - Máquinas eléctricas Chapman quinta edición [2].

Después de cierto punto, aunque se incremente mucho la fuerza magnetomotriz, los aumentos de flujo serán cada vez más pequeños. Finalmente, el incremento de la fuerza magnetomotriz casi no produce cambios en el flujo. La región de esta figura en la cual la curva se aplana se llama región de saturación, y se dice que el núcleo está saturado [6].

La región en la cual el núcleo cambia con rapidez se llama región no saturada de la curva, donde el núcleo no está saturado. La región de transición entre las regiones no saturada y saturada se denomina a veces rodilla de la curva. Nótese que el flujo producido en el núcleo varía linealmente con la fuerza magnetomotriz aplicada en la región no saturada y se aproxima a un valor constante, independiente de la fuerza magnetomotriz en la región saturada. Otro diagrama estrechamente relacionado con el anterior se muestra en la figura 1.4b). Esta figura representa la densidad del flujo magnético **B** frente a la intensidad de campo magnético **H**. Es fácil deducir que para un núcleo dado, la intensidad del campo magnético es directamente proporcional a la fuerza magnetomotriz, y que la densidad de flujo magnético es directamente proporcional al flujo. Por lo tanto, la relación entre **B** y **H** es semejante a la relación entre el flujo y la fuerza magnetomotriz. La pendiente de la curva de densidad de flujo contra la intensidad del campo magnético para cualquier valor de **H**, en la figura 1.4b), es por definición la permeabilidad del núcleo a dicha intensidad del campo magnético. La curva muestra que la permeabilidad es grande y relativamente constante en la región no saturada, y que decrece de manera gradual hasta un valor muy bajo cuando el núcleo se encuentra muy saturado [2].

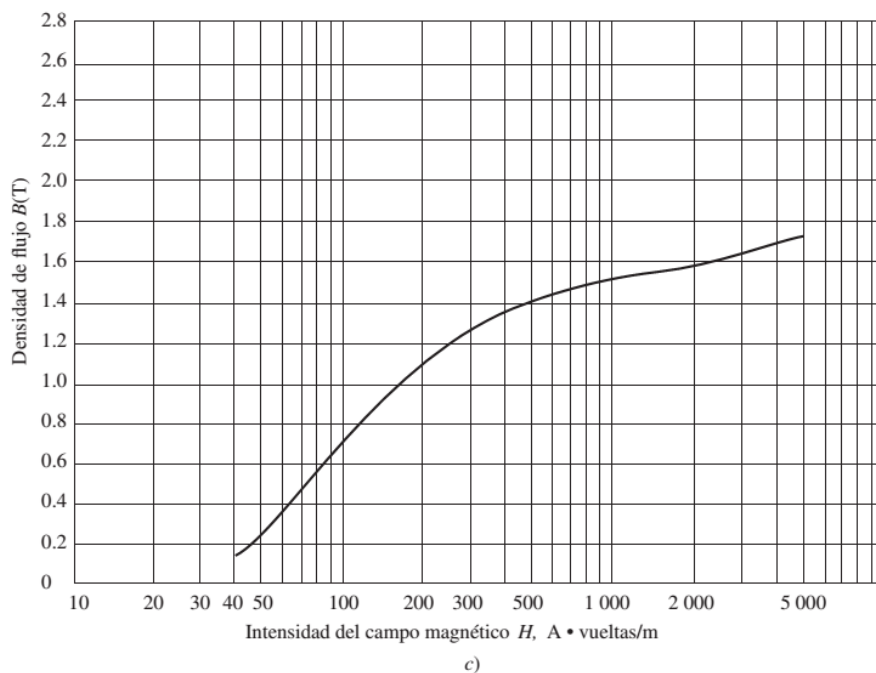


Figura 1.4 c) Curva de magnetización detallada de una típica pieza de acero - Máquinas eléctricas Chapman quinta edición [2].

En la figura 1.4c) se puede ver con más detalle la curva de magnetización de una típica pieza de acero, y cuya intensidad del campo magnético está dada en una escala logarítmica. La región de saturación de la curva puede detallarse en la gráfica sólo cuando la intensidad del campo magnético se expresa con escala de logaritmos. La ventaja de utilizar núcleos de material ferromagnético en máquinas eléctricas y transformadores radica en que al aplicarles cierta fuerza magnetomotriz se obtiene un flujo mayor que el obtenido en el aire. Sin embargo, si el flujo resultante debe ser proporcional o aproximadamente proporcional a la fuerza magnetomotriz aplicada, el núcleo debe ser operado dentro de la región no saturada de la curva de magnetización.

Puesto que los generadores y motores reales dependen del flujo magnético para producir la tensión y el par, se diseñan para producir el máximo flujo posible. Como resultado, la mayoría de las máquinas reales operan cerca del punto de rodilla de la curva de magnetización, y en sus núcleos el flujo no está linealmente relacionado con la fuerza magnetomotriz que lo produce [2].

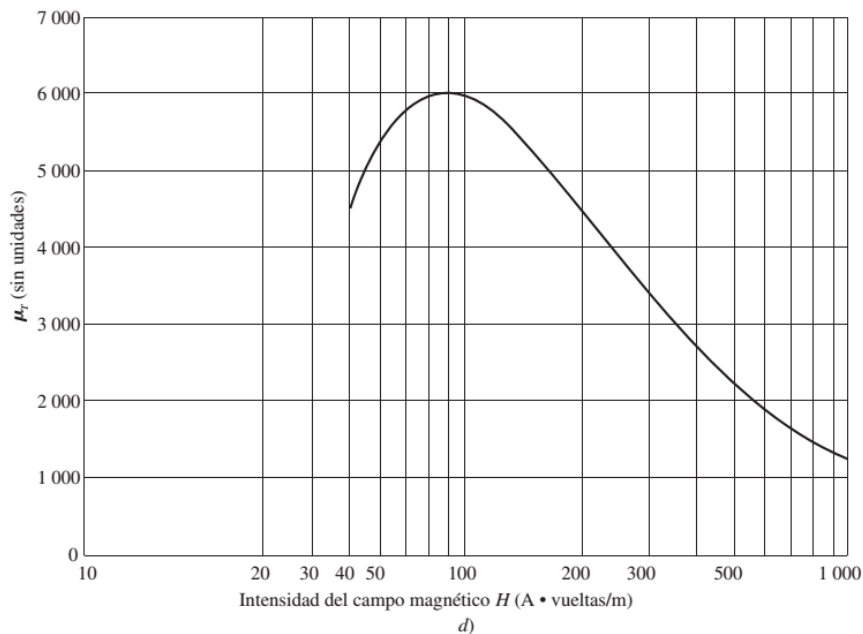


Figura 1.4 d) Gráfica de permeabilidad  $\mu_r$ , como una función de la intensidad de campo magnético de una típica pieza de acero - Máquinas eléctricas Chapman quinta edición [2].

Nótese que cuando la intensidad del campo magnético se incrementa, la permeabilidad primero aumenta y luego comienza a decrecer.

La permeabilidad relativa del material ferromagnético típico como función de la intensidad del campo magnético se muestra en la figura 1.4d). Esta figura es la típica de todos los materiales ferromagnéticos. De la curva  $\mu_r$  frente a  $H$ , puede observarse con claridad que haber supuesto como constante la permeabilidad relativa válido únicamente dentro de un intervalo no muy amplio de valores de intensidad del campo magnético (o de fuerzas magnetomotrices) [2].

#### 1.4. CURVA DE HISTÉRESIS FERROMAGNÉTICA, PÉRDIDAS DE ENERGÍA EN EL NÚCLEO FERROMAGNÉTICO.

Si en lugar de aplicar una fuente de c.c. a los devanados dispuestos en el núcleo, se aplica una fuente de corriente alterna c.a. [2]. En un punto inicial cero de la forma de onda de corriente alterna aplicada, cuando se incrementa la corriente por primera vez, el flujo resultante sigue la trayectoria ab dada en la figura 1.5b). Ésta es básicamente la curva de saturación que se muestra en la figura 1.4. Sin embargo, cuando la corriente decrece, el flujo representado en la curva sigue una trayectoria diferente de la seguida cuando la corriente iba en aumento [2].

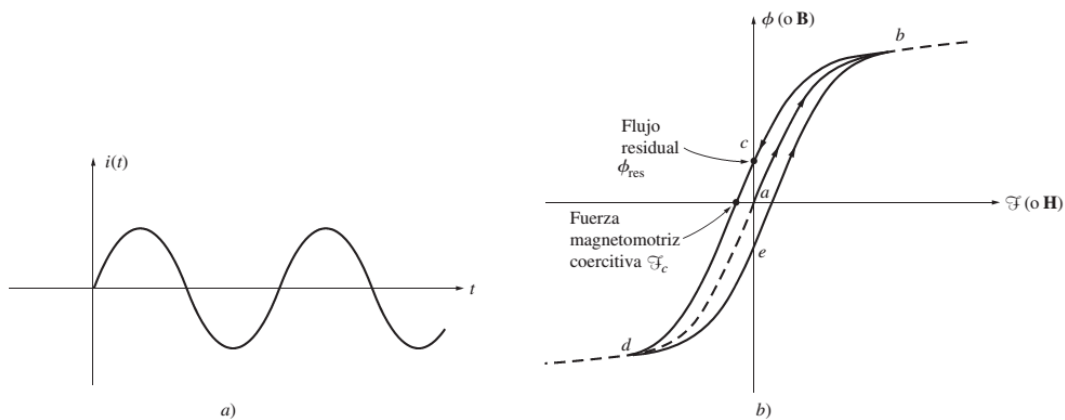


Figura 1.5 a) Forma de onda de fuente de corriente alterna, b) Curva de histéresis trazada por el flujo en el núcleo cuando se le aplica una corriente  $i(t)$  - Máquinas eléctricas Chapman quinta edición [2].

Cuando la corriente decrece, el flujo en el núcleo sigue la trayectoria *bcd* y, más tarde, cuando la corriente se incrementa de nuevo, el flujo sigue la trayectoria *deb*. Nótese que la cantidad de flujo presente en el núcleo depende no sólo de la cantidad de corriente aplicada a los devanados del núcleo, sino también de la “historia” previa del flujo presente en el núcleo, es decir, depende de los estados magnéticos anteriores. Esta dependencia de la historia previa del flujo y el seguir una trayectoria diferente en la curva se denomina histéresis. La trayectoria *bcdeb* descrita en la figura 1.5b), que representa la variación de la corriente aplicada, se denomina curva o lazo de histéresis [2].

Nótese que si primero se aplica al núcleo una fuerza magnetomotriz intensa y luego se deja de aplicar, la trayectoria del flujo en el núcleo será *abc*. Cuando se suspende la fuerza magnetomotriz, el flujo no llega a cero, ya que permanece cierto flujo en el núcleo, denominado flujo residual (o flujo remanente), el cual es la causa de los imanes permanentes. Para que el flujo llegue a cero, se debe aplicar al núcleo, en dirección opuesta, cierta fuerza magnetomotriz llamada fuerza magnetomotriz coercitiva  $\mathcal{F}_c$  [2].

¿Por qué ocurre la curva de histéresis?

Para entender el comportamiento de los materiales ferromagnéticos es necesario conocer algo acerca de su estructura. Los átomos del hierro y los de los materiales similares (cobalto, níquel y algunas de sus aleaciones) tienden a tener sus campos magnéticos fuertemente alineados entre sí. Dentro del metal hay unas pequeñas regiones llamadas dominios, en las que todos los átomos se alinean con sus campos magnéticos apuntando en una misma dirección, de modo que el dominio actúa dentro del material como un pequeño imán permanente.

Una pieza de hierro no manifiesta polaridad magnética definida porque los dominios se encuentran dispuestos al azar en la estructura del material. La figura 1.6 representa un ejemplo de la estructura de los dominios en un trozo de hierro [2].

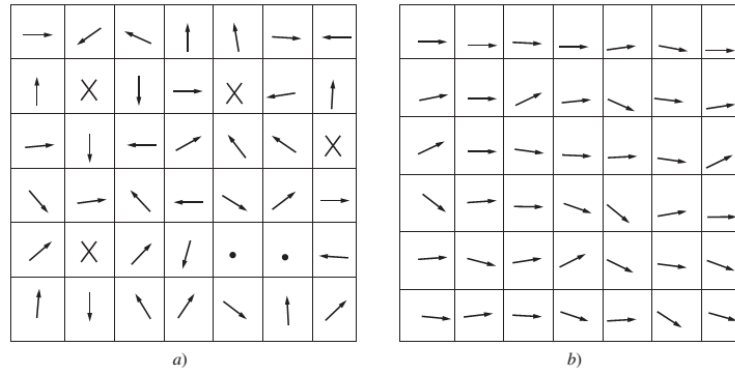


Figura 1.6 a) Dominios magnéticos orientados al azar, b) Dominios magnéticos alineados en presencia de un campo magnético externo - Máquinas eléctricas Chapman quinta edición [2].

Cuando se aplica un campo magnético externo a este trozo material ferromagnético, los dominios orientados en la dirección del campo exterior crecen a expensas de los dominios orientados en otras direcciones, debido a que los átomos adyacentes cambian físicamente su orientación con el campo magnético aplicado. Los átomos adicionales, alineados con el campo, incrementan el flujo magnético en el material, lo cual causa el alineamiento de más átomos que incrementan la intensidad del campo magnético. Este efecto de retroalimentación positiva es la causa de que el hierro adquiera una permeabilidad mayor que el aire.

A medida que el campo magnético externo se fortalece, dominios completos alineados en otras direcciones se orientan como una unidad para alinearse con el campo. Por último, cuando casi todos los átomos y dominios en el material se han alineado con el campo externo, el incremento de la fuerza magnetomotriz puede ocasionar tan sólo un aumento de flujo igual al que ocurriría en el espacio libre (es decir, cuando todos los dominios se encuentran alineados, ya no habrá más retroalimentación para reforzar el campo). En este momento, el material estará saturado con el flujo magnético [2]. Ésta es la situación que se muestra en la región saturada de la curva de magnetización de la figura 1.4.

Así que, la histéresis se produce porque cuando el campo magnético exterior se suprime, los dominios no se ubican de nuevo al azar [2]. ¿Por qué los dominios permanecen alineados? Porque los átomos requieren energía para recuperar su posición anterior.

La energía para el alineamiento original la proveyó el campo magnético exterior; cuando el campo magnético exterior se suprime, no hay una fuente que ayude a que los dominios regresen a sus posiciones. El trozo de hierro es ahora un imán permanente.

Una vez que los dominios se alinean, algunos de ellos permanecerán en esa posición hasta que se les aplique una fuente de energía externa para cambiar su orientación. Otros ejemplos de fuentes externas de energía que pueden cambiar los límites entre los dominios o su alineamiento son la fuerza magnetomotriz aplicada en otras direcciones, un choque mecánico fuerte y la temperatura [2].

Cualquiera de estos eventos puede suministrar energía a los dominios para cambiar su alineación (por esta razón, un imán permanente puede perder su magnetismo si se le deja caer, se le golpea o se le calienta).

Como se ha visto, para cambiar la posición de los dominios se requiere de energía, esto origina cierto tipo de pérdidas de energía en todas las máquinas y transformadores. Las pérdidas por histéresis en el núcleo del hierro corresponden a la energía que se necesita para reorientar los dominios durante cada ciclo de corriente alterna aplicada al núcleo [2].

Se puede demostrar que el área comprendida dentro de la curva de histéresis, la cual se forma al aplicar corriente alterna, es directamente proporcional a la energía perdida en un ciclo dado de corriente alterna. Cuanto menores sean las variaciones de la fuerza magnetomotriz aplicada al núcleo, el área de la curva será menor y serán más pequeñas las pérdidas resultantes. Este hecho se muestra en la figura 1.7.

Es claro que deben mencionarse los tipos de pérdidas, causadas también por la variación del flujo en el núcleo: las pérdidas por corrientes parásitas.

Las pérdidas por histéresis y por corrientes parásitas ocasionan calentamiento en los núcleos y se deben tener en cuenta en el diseño de cualquier máquina o transformador. Puesto que estas pérdidas ocurren dentro del metal del núcleo, se agrupan bajo el nombre de pérdidas en el núcleo [2].

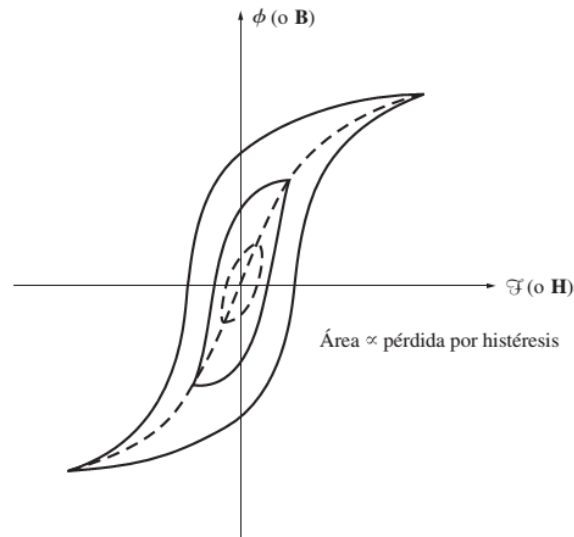


Figura 1.7 Efecto del tamaño de las variaciones de la fuerza magnetomotriz en la magnitud de las pérdidas por histéresis - Máquinas eléctricas Chapman quinta edición [2].

A continuación se presenta una tabla representativa de las características de algunos materiales magnéticos:

| Nombre            | Composición %            | $\mu_r$ Máxima | $H_c$ , A.v/m | $B_r$ , teslas | Resistividad $\Omega\cdot m \times 10^{-8}$ |
|-------------------|--------------------------|----------------|---------------|----------------|---|
| Hierro            | 99.9 Fe                  | 5000           | 80            | 2.15           | 10  |
| Hierro al Silicio | 4 Si; 96 Fe              | 7000           | 48            | 1.97           | 59  |
| Hierro al Silicio | 3.3 Si; 96.7 Fe          | 10000          | 16            | 2              | 50  |
| Permalloy         | 45 Ni; 54 Fe             | 25000          | 24            | 1.6            | 50  |
| Mumetal           | 75 Ni; 2 Cr; 5 Mn; 18 Fe | 110000         | 2.4           | 0.72           | 60  |

Tabla 1.3 Parámetros de la curva de Histéresis para diversos materiales - Máquinas eléctricas Jesús Fraile Mora quinta edición [3].



### 1.5. FUERZA ELECTROMOTRIZ INDUCIDA – F.E.M. INDUCIDA.

Para poder establecer una f.e.m. inducida de acuerdo a la ley de Faraday, puede ser resultado de las siguientes situaciones:

1. Un flujo que cambia con el tiempo circundando una espira de trayectoria cerrada fija (principio del transformador).
2. El movimiento relativo entre un flujo estable y una trayectoria cerrada (principio de generación).
3. Una combinación de ambos.<sup>3</sup>

**Espira estacionaria en un campo variable en el tiempo.** (Fuerza electromotriz estática).

Si se considera primero una trayectoria cerrada, el flujo magnético es la única cantidad que varía con el tiempo, se representa una espira conductora estacionaria y se ubica en un campo magnético variable, a esta fuerza electromotriz inducida por una corriente variable en el tiempo (causa también del cambio del campo variable en el tiempo) en una espira estacionaria se le llama fuerza electromotriz estática, o de transformador desde un punto de vista del análisis de potencia, ya que se debe a la acción de un transformador [6].

La relación matemática desarrollada por James Clerk Maxwell de forma integral está dada por:

$$\int_s (\nabla \times \mathbf{E}) \cdot d\vec{S} = - \int_s \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \cdot d\vec{S}$$

Pero para igualar estas dos integrales [6], sus integrandos deben ser iguales, es decir:

$$\nabla \times \mathbf{E} = - \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$$

---

<sup>3</sup> Para mayor información remitirse a Teoría electromagnética Hayt 7ma Edición capítulo 10, sección 10.1.

Ecuación que define campos variables en el tiempo, indica que el campo  $\mathbf{E}$  variable en el tiempo no es conservativo ( $\nabla \times \mathbf{E} \neq 0$ ), esto no quiere decir que no exista conservación de energía [6].

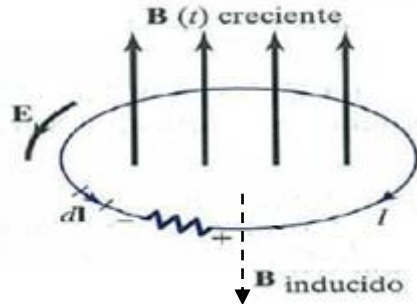


Figura 1.8 Fuerza magnetomotriz inducida debido a una espira estacionaria en un campo  $\mathbf{B}$  variable en el tiempo - Elementos de electromagnetismo Sadiku tercera edición [6].

### Espira móvil en un campo estático. (Fuerza electromotriz cinética).

Cuando una espira conductora se encuentra en movimiento en un campo  $\mathbf{B}$  estático, en ella se induce una fuerza electromotriz. Si se parte del supuesto de que una espira conductora en movimiento a una velocidad uniforme  $\mathbf{u}$  se compone de un gran número de electrones libres, la fuerza electromotriz se denomina fuerza electromotriz cinética o por corte de flujo, porque se debe a la acción de movimiento, este tipo de fuerza electromotriz está presente en máquinas eléctricas como motores, generadores y alternadores [6].

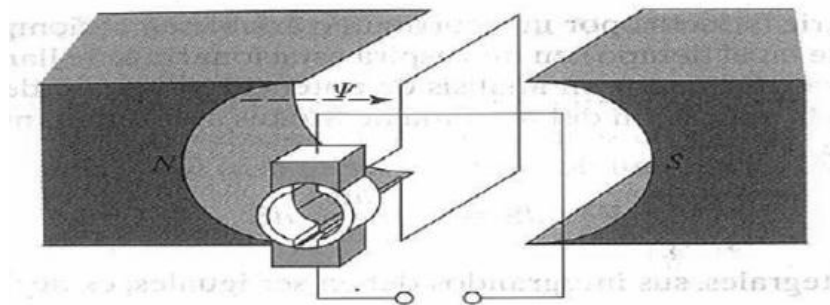


Figura 1.9 Máquina de corriente directa - Elementos de electromagnetismo Sadiku tercera edición [6].

La Figura 1.9 ilustra una máquina de corriente directa de dos polos con bobina de armadura y un conmutador de dos barras, cabe señalar que la generación de tensión es producto de la rotación de la bobina dentro del campo magnético, caso que se estudiara posteriormente, el fenómeno de la generación eléctrica [6].

La máquina lineal de corriente directa es la versión más sencilla y fácil de entender, ya que opera con los mismos principios y exhibe la misma conducta que los generadores y motores reales.

### 1.6. ENUNCIADO DE LA LEY DE FARADAY-LENZ.

Según la ley establecida por Faraday, define un tensión inducido en función de un campo magnético variable, que es un efecto que el campo genera a sus alrededores, ya que hasta ahora solo se han explicado las propiedades de estos materiales, un gran efecto es pues la Ley de Faraday [2], establece que: si un flujo atraviesa una espira de alambre conductor, se inducirá en este un tensión directamente proporcional a la tasa de cambio del flujo con respecto al tiempo, además de considerar el número de vueltas o espiras de alambre en arrollamiento, el cual se define de la siguiente manera:

$$e_{\text{inducida}} = -N \frac{d\phi}{dt}$$

$e_{\text{inducida}}$  es el tensión inducido en la espira de N vueltas y el flujo  $\phi$  que lo atraviesa, el signo menos se determina por medio de la Ley de Lenz la cual define que la dirección del tensión inducido en la bobina es tal que si los extremos de ésta estuvieran en cortocircuito, se produciría en ella una corriente que generaría un flujo opuesto al flujo inicial. Puesto que la tensión inducida se opone al cambio que lo produce u origina, se incluye un signo menos en la ecuación [2]. Si el flujo que se muestra en la figura 1.10 se incrementa, la tensión que se forma en la bobina tenderá a crear un flujo que se opone a este incremento.

Una corriente que fluya como se muestra en la figura 1.10b) producirá ese flujo opuesto al incremento, y por ello el tensión formado en la bobina debe tener la polaridad adecuada para dirigir esta corriente hacia el circuito externo. Entonces, la tensión deberá formarse con la polaridad indicada en la figura [2].

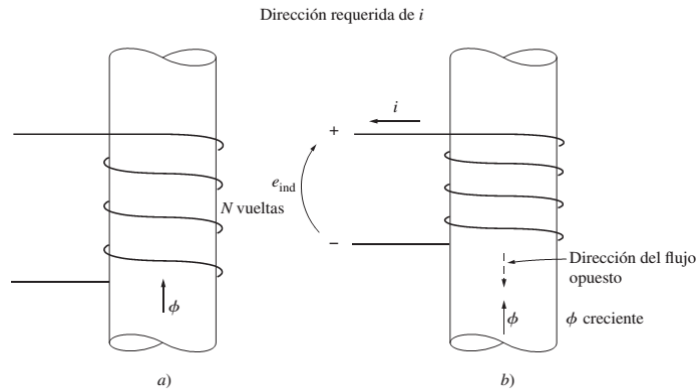


Figura 1.10 Significado de la Ley de Lenz a) Una bobina encierra un flujo magnético creciente, b) determinación de la polaridad del tensión resultante - Máquinas eléctricas Chapman quinta edición [2].

Se tiende a confundir el sentido de la f.e.m. inducida, dado el signo de la Ley de Lenz, en la figura 1.11 se muestra la relación de las f.e.m. respectivamente, el sentido de la espira define la polaridad de la f.e.m. inducida, se puede observar en la figura 1.11a) el sentido de la espira, que define según la ley de la mano derecha, la dirección del flujo inductor, da lugar al flujo inducido en el mismo sentido, y es por ello que se hace necesario incluir el signo menos, para tener en cuenta la ley de Lenz, es decir, la oposición al cambio de flujo, además de mostrar el circuito equivalente, se observa que el sentido de la corriente coincide con el sentido de elevación de la f.e.m. [3].

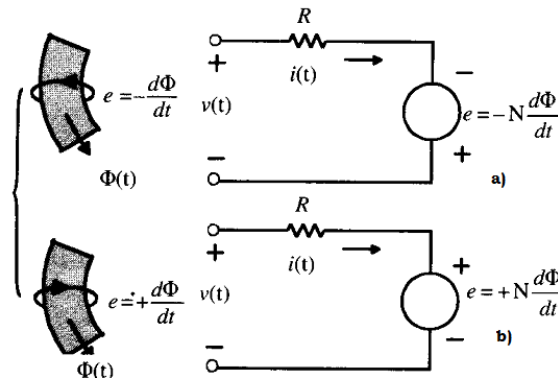


Figura 1.11 Sentido de la f.e.m. inducida - Máquinas eléctricas Jesús Fraile Mora quinta edición [3].

En el caso de la figura 1.11b) se produce una corriente en la espira que da lugar a un flujo inducido que se opone al flujo principal  $\phi(t)$ , es por ello que no es necesario incluir el signo menos en la f.e.m. inducida resultante puesto que ya se opone al flujo principal, y se denomina por algunos textos como fuerza contra-electromotriz [3].

Se tiene además en función de la aplicación de una corriente alterna a un circuito magnético, la tensión eficaz viene dado por la ecuación:

$$E = 4.44fN\Phi_{MAX}$$

Cuando la bobina se alimenta con una excitación de corriente alterna, el flujo es función directa de la magnitud y de la frecuencia de la tensión aplicada, pero es absolutamente independiente de la naturaleza y características magnéticas del material que constituye el núcleo [3].

Dicho proceso de la f.e.m. inducida establece además pérdidas en el sistema, dado que el flujo no se queda en su totalidad en el material ferromagnético, por lo que se mencionan los tipos de pérdidas, las cuales son:

- Pérdidas por Histéresis.
- Pérdidas por Corrientes de Foucault (Corrientes parásitas o corrientes de torbellino).

Ambas contempladas en pérdidas del núcleo, las pérdidas por histéresis ya antes mencionadas, dependen del tipo de material ferromagnético y la energía perdida en el proceso de magnetización, si el volumen y el área del circuito magnético es muy grande tiende a tener más pérdidas por el ciclo de magnetización y des-magnetización por histéresis del material [3], por otro lado las corrientes parásitas, son corrientes que circulan dentro del material en forma de torbellino, las cuales dependen del tamaño del

área, a mayor área, mayores corrientes de torbellino, por lo tanto mayores pérdidas, una técnica para disminuir este tipo de pérdidas es la laminación por ejemplo de acero al silicio en chapas delgadas, de tal manera que sean pequeñas [3].

Se observa en la figura 1.12 el efecto que se tendría en una lámina de material ferromagnético, de mayor área, y como pueden tratarse dichas corrientes.

La tecnología de materiales ha mejorado el diseño de las chapas ferromagnéticas, como su estructura molecular y las distintas aleaciones que estas presentan, con la finalidad de reducir las pérdidas, utilizan alrededor del 3% al 5% de silicio en Aceros al silicio, y laminado en caliente, como se elaboraban y laminado en frío [3].

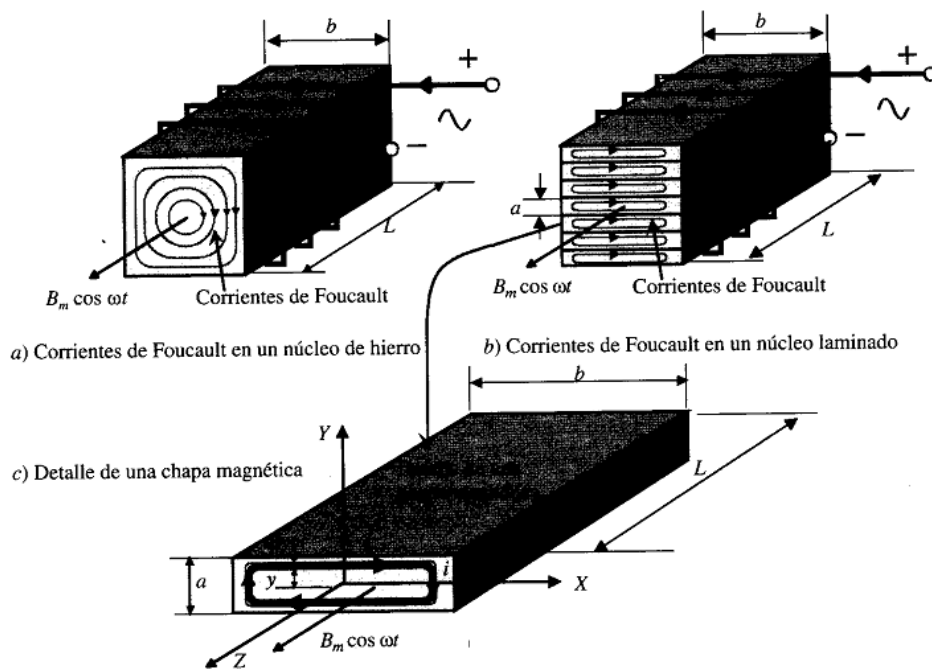


Figura 1.12 Definición de corrientes Parásitas - Máquinas eléctricas Jesús Fraile Mora quinta edición [3].

Se han mencionado algunos de los tipos de pérdidas que presentan los materiales ferromagnéticos como las chapas de acero al silicio, posteriormente se harán las definiciones de los demás tipos de pérdidas que conllevan las máquinas eléctricas.

Ahora que se conoce de forma general algunos parámetros que contemplan los circuitos eléctricos y magnéticos, se describe el concepto de máquinas eléctricas y sus casos particulares: son el resultado de la aplicación inteligente y práctica de los principios de la teoría electromagnética, puntualmente la Ley de Faraday, estas máquinas se caracterizan por tener entrelazados circuitos eléctricos y magnéticos, que propiciaron, dentro de la ingeniería aplicaciones en la generación de energía eléctrica, además de transporte y distribución de ésta, dichas máquinas realizan un proceso de conversión de energía de una forma a otra, de las cuales, al menos una energía es eléctrica, en base a un punto de vista energético, se pueden definir de la siguiente manera.

Sobre máquinas eléctricas, existen dos clases principales sobre corriente alterna: las máquinas síncronas y las máquinas de inducción.

Las máquinas síncronas son generadores y motores, cuya corriente de campo magnético, es suministrada por una fuente de c.c separada, mientras que las máquinas de inducción son motores y generadores, cuya corriente de campo magnético es suministrada por inducción magnética (acción transformadora) en sus devanados de campo. Los circuitos de campo de la mayoría de las máquinas síncronas y de inducción están localizados en sus rotores.

### **1.7. PRINCIPIO DEL FUNCIONAMIENTO DE MÁQUINAS ELÉCTRICAS.**

#### **Espira sencilla en un campo magnético uniforme.**

En el estudio de las máquinas eléctricas se considera comenzar por analizar una espira sencilla de alambre que rota dentro de un campo magnético uniforme, ésta es la máquina más sencilla posible que produce un tensión sinusoidal alterno, aunque es necesario decir que este caso no es representativo de las máquinas eléctricas de a.c. reales puesto que el flujo en estas máquinas no es constante ni en magnitud ni en dirección; sin embargo, los factores que controlan el tensión y el par (par de torsión o par motor) sobre la espira, serán los mismos que controlan el tensión y el par en las máquinas de a.c. reales [2].

La figura 1.13 muestra una máquina sencilla formada por un magneto estacionario que produce un campo magnético constante y uniforme, y una espira de alambre conductor que rota dentro de ese campo, la parte que rota se le denomina rotor (término que se ampliará en secciones posteriores); la parte estacionaria de la máquina se denomina estator. Ahora se determinan la tensión presente en el rotor a medida que gira dentro del campo magnético.<sup>4</sup>

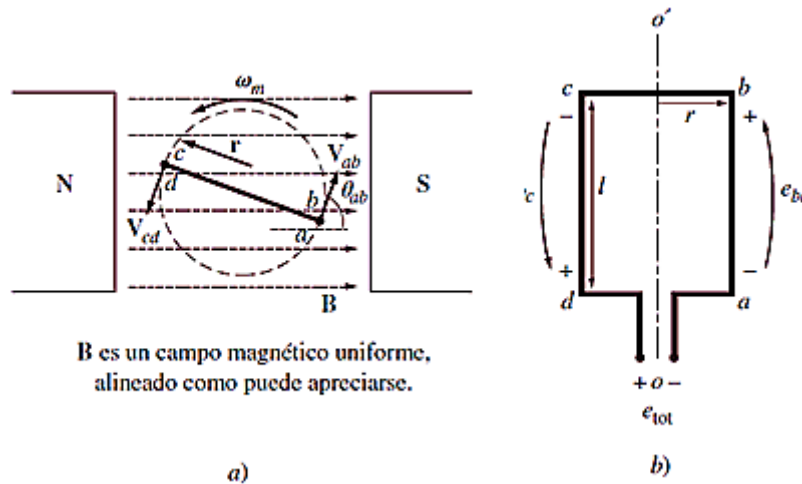


Figura 1.13 Espira sencilla giratoria en un campo magnético uniforme a) vista frontal, b) vista de la bobina - Máquinas eléctricas Chapman quinta edición [2].

---

<sup>4</sup> Para mayor información en detalle lea Capítulo 4 Máquinas Eléctricas por S. Chapman tercera edición paginas 233-269.



## 1.8. MÁQUINAS ELÉCTRICAS – GENERALIDADES.

- **Generadores:**

Dispositivo que transforma energía mecánica en eléctrica, la acción se desarrolla por el movimiento de una bobina en un campo magnético, resultado de la f.e.m. inducida, que al aplicarla a un circuito externo produce una corriente que interacciona con el campo y desarrolla una fuerza mecánica que se opone al movimiento, en consecuencia, el generador necesita una energía mecánica de entrada para producir a la salida la energía eléctrica correspondiente [3].

- **Motores:**

Que transforma energía eléctrica en mecánica, la acción se desarrolla induciendo una corriente en la máquina por medio de una fuente externa, que interacciona con el campo produciendo un movimiento en la máquina, aparece entonces una f.e.m. inducida que se opone a la corriente y por ello se denomina fuerza contra-electromotriz, en consecuencia, el motor necesita energía eléctrica para generar energía mecánica [3].

- **Transformador:**

Que transforma energía eléctrica de entrada (corriente alterna) con determinadas magnitudes de tensión y corriente en otra energía eléctrica de salida (siempre de corriente alterna) con magnitudes diferentes.

Los generadores y los motores tienen un acceso mecánico, y por ello son máquinas dotadas de movimiento, que normalmente es de rotación, por el contrario, de los transformadores que son máquinas eléctricas con acceso únicamente eléctrico y sin movimiento. Cada máquina cumple un principio de reciprocidad electromagnética, es decir, conlleva un proceso reversible, teóricamente, dado que en la práctica se requiere de distintos arreglos necesarios para lograr su funcionamiento [3].

Elementos básicos de las máquinas eléctricas Generador/Motor:

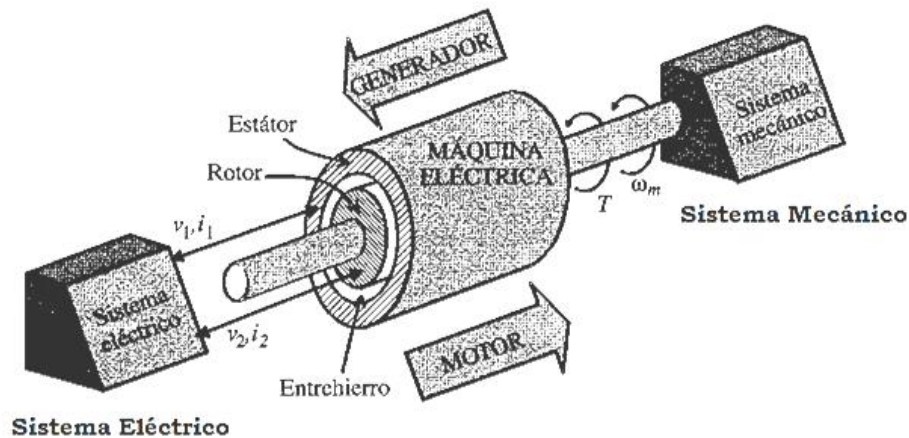


Figura 1.14 Principio de conversión de energía electromecánica - Máquinas eléctricas Jesús Fraile Mora quinta edición [3].

De la estructura de la máquina eléctrica se sabe que se compone de dos partes, las cuales son, el estator que se define como la parte fija de la máquina posee una cavidad en la cual se ensambla la otra parte de la máquina, y el rotor, parte en giratoria dentro del funcionamiento de la máquina eléctrica, tiene forma cilíndrica y varía en tamaño en base a la aplicación final que le corresponda, de igual manera el tamaño de su diámetro, por ejemplo en máquinas de gran velocidad el cilindro es largo a comparación de su diámetro, y en caso de que se requiera velocidades más lentas, su diámetro es mayor comparado con su longitud, el rotor se apoya en pedestales o forman parte de la culata de la máquina [3].

Hay un espacio que separa estator de rotor y se denomina entrehierro, necesario para hacer girar la máquina, define además el medio que permite el acoplamiento magnético entre estator y rotor. Estator y rotor están compuestos con devanados hechos de conductores de cobre por los que circulan corrientes suministradas o cedidas a un circuito exterior que constituye el sistema eléctrico [3].

Uno de los devanados se constituye como el inductor, que se encarga de crear el flujo necesario en el entrehierro, se denomina inductor, excitación o campo, el otro devanado, el que recibe el flujo ocasionado por el primero y cierra el circuito externo se le conoce como inducido, teóricamente puede colocarse ya sea el inductor en el rotor, y en el estator el inducido, o viceversa, pero en la práctica lo determina las condiciones

tecnológicas para la facilidad de su construcción, aislamiento etc., estos se construyen de material ferromagnético, de tal forma que para evitar pérdidas en el hierro suelen realizarse con chapas magnéticas de acero al silicio, convencionalmente ranuradas para alojar en su interior los devanados correspondientes [3].

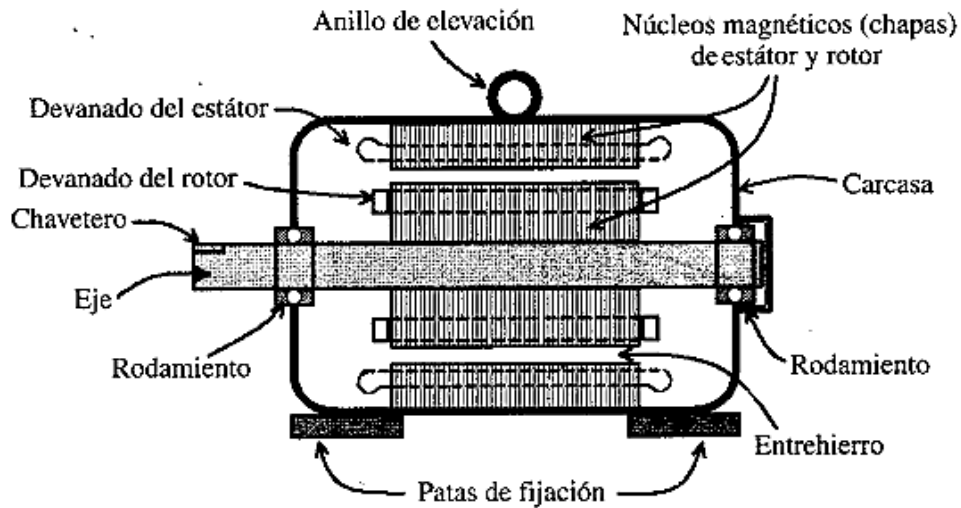


Figura 1.15 Aspectos constructivos de la máquina eléctrica - Máquinas eléctricas Jesús Fraile Mora quinta edición [3].

La Figura 1.15 muestra las partes de la máquina eléctrica, y como se ha mencionado, puede trabajar en régimen de motor o de generador.

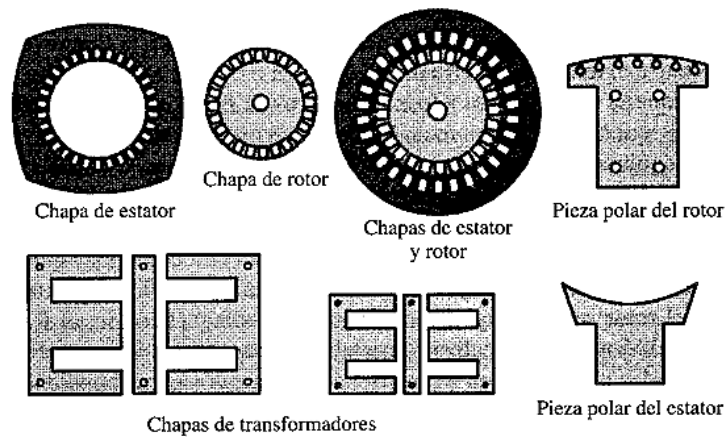


Figura 1.16 Tipos de Chapas magnéticas - Máquinas eléctricas Jesús Fraile Mora quinta edición [3].

Las máquinas eléctricas adoptan tres posibles configuraciones las cuales son las que se muestran en la figura 1.17 [3].

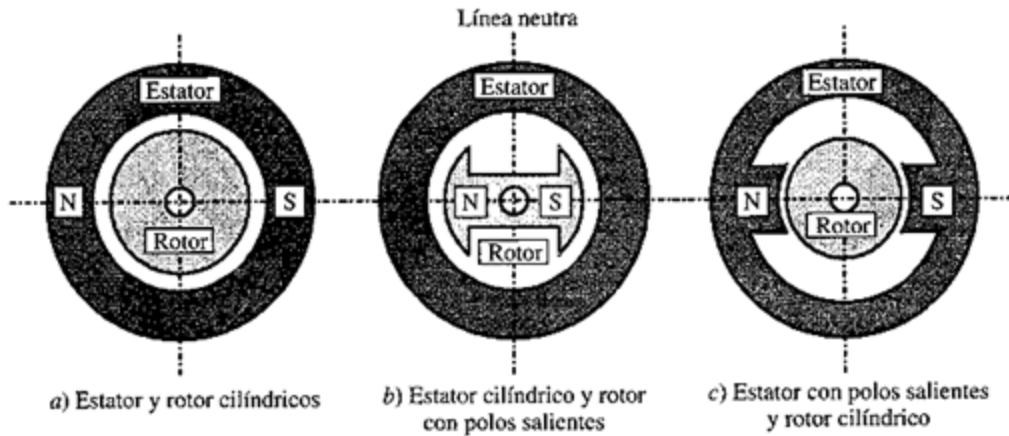


Figura 1.17 Configuraciones básicas del Estator-Rotor - Máquinas eléctricas Jesús Fraile Mora quinta edición [3].

En Figura 1.17a) se tienen superficies totalmente cilíndricas, con un entrehierro uniforme en el primario, esta disposición se encuentra en las máquinas síncronas, estando situado el inductor en el rotor y en el primario, se emplea en turboalternadores de las centrales térmicas. En la figura 1.17b) y 1.17c) la superficie del rotor y estator presenta unos “salientes” magnéticos denominados polos situados con cuerpos polares, se sitúa el devanado del inductor recorrido normalmente por una corriente continua y creando un campo magnético **que podría ser similar a un imán permanente**, la figura 1.17b) se emplea en máquinas síncronas, y la de la figura 1.17c) en las máquinas de corriente continua [3].

Las máquinas eléctricas se diseñan en pares de polo, es decir, una máquina con dos polos es una máquina bipolar, con cuatro polos es una máquina tetra-polar, además el número de polos definen los ángulos eléctricos que difieren de los ángulos geométricos, no es lo mismo decir  $180^\circ$  geométrico a  $180^\circ$  eléctricos, dado que el paso de grados eléctricos está indicado por el número el cambio de polos, es decir una máquina con un par de polos, si podría decirse que los ángulos eléctricos son los mismos que los ángulos geométricos ya que concuerdan con la misma posición angular, pero una máquina tetra polar presenta  $180^\circ$  eléctricos en  $90^\circ$  geométricos por lo que  $360^\circ$  grados eléctricos se representan en  $180^\circ$  geométricos de la máquina eléctrica [3].

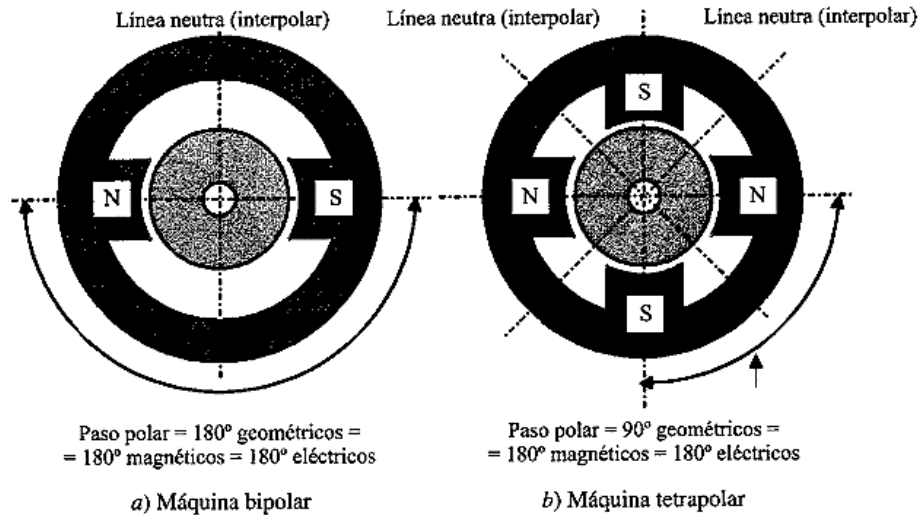


Figura 1.18 Máquinas Polares, definición de ángulos eléctricos y geométricos - Máquinas eléctricas Jesús Fraile Mora quinta edición [3].

Haciendo una pequeña descripción, hay algunas máquinas que presentan colector de delgas y de anillos que tienen cierta función, los colectores de delgas permiten convertir la forma de onda pulsante generado por ejemplo por un dinamo en una forma de onda constante, es decir, una forma de corriente continua, a cierta amplitud, el colector de anillos facilita la conducción del sistema [3].

Los devanados tienen distintas configuraciones las cuales son:

**Devanado concentrado en el polo**, devanando una bobina alrededor de los polos, utilizados en los transformadores [3].

**Devanado distribuido en anillos**, devanado donde se arrolla un hilo sobre un anillo cilíndrico recorriendo la periferia del inducido, el defecto que no se aprovecha nada más que los conductores de la periferia del inducido.

Devanados de tambor, de donde la totalidad de los conductores están colocados en la superficie exterior del cilindro ferromagnético que forma el inducido [3].

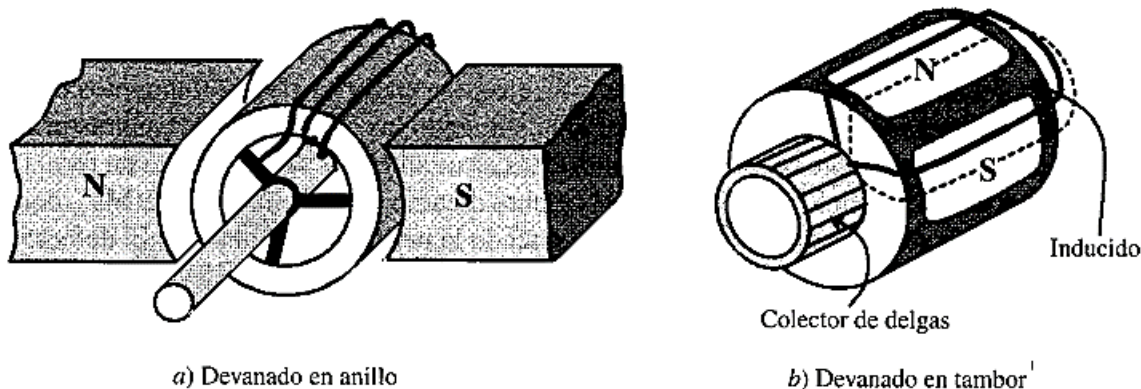


Figura 1. 19 Tipos de inducido devanado - Máquinas eléctricas Jesús Fraile Mora quinta edición [3].

Además los devanados se pueden clasificar, según el punto de vista de la forma de los boninas como:

- Concéntricos y excéntricos, utilizados en corriente alterna.
- Ondulados e imbricados, utilizados en corriente continua [3].

### 1.9. PÉRDIDAS DEL SISTEMA ELECTROMAGNÉTICO.

Las máquinas eléctricas presentan pérdidas las cuales se describen a continuación:

La transformación electromecánica de la energía que tiene lugar en una máquina eléctrica, una fracción de la potencia transformada se convierte en calor y prácticamente no se utiliza, que constituye las pérdidas de la máquina. Existen las pérdidas en el cobre o pérdidas por efecto Joule, pérdidas en el hierro y pérdidas mecánicas [3].

#### **Pérdidas en el cobre $P_{Cu}$ :**

Son consecuencia de la inevitable resistencia que presentan los conductores eléctricos dando lugar a las pérdidas en forma de calor por efecto Joule, se define como  $R$  [3].

#### **Pérdidas en el Hierro $P_{FE}$ :**

Se producen en los órganos de las máquinas que son recorridos por un flujo variable, estas se componen de las pérdidas por histéresis y por corrientes parásitas [3].

**Pérdidas Mecánicas  $P_m$ :**

Son debidas a los rozamientos de los cojinetes, a la fricción de las escobillas y a la ventilación (rozamiento con el aire), pérdidas que solo se encuentran en las máquinas que disponen de partes giratorias, existen además dentro de esta categoría, pérdidas fijas y pérdidas variables [3].

**Potencia asignada o nominal:**

**Valor asignado:** valor de una magnitud, asignado generalmente por un fabricante, para una condición de funcionamiento especificada de una máquina.

**Potencia asignada:** valor numérico de la potencia incluido en las características asignadas [3].

Se puede definir las potencias asignadas de la forma siguiente:

En **generadores de c.c.:** La potencia asignada es la potencia eléctrica en los bornes, y debe expresarse en watts (W).

En **generadores de a.c.:** La potencia asignada es la potencia eléctrica aparente en los bornes, y debe expresarse en voltio-amperios (V.A) junto con la indicación del factor de potencia. El factor de potencia asignado para los generadores síncronos debe de ser 0.8 sobre-excitado, es decir, en atraso, salvo especificación contraria.

En **motores:** la potencia asignada es la potencia mecánica disponible en el eje, y debe expresarse en watts (W).

En **Transformadores:** la potencia asignada es la potencia eléctrica aparente en bornes del primario o del secundario y debe expresarse en voltio-amperios (V.A) [3].

**Rendimiento:**

Como ya se ha indicado, las máquinas eléctricas, como en cualquier otro dispositivo de transformación de energía existen pérdidas de tal forma que solo se entrega a la salida una parte absorbida a la entrada [3], rendimiento se define con el cociente de:

$$\eta = \frac{\text{Potencia útil}}{\text{Potencia total}}$$

Considerando los tipos de pérdidas que presente la máquina eléctrica podría variar la estimación del rendimiento de esta, se ampliara esta información posteriormente [3].

Una consideración más es determinar el par electromagnético en las máquinas eléctricas, es en términos sencillos la fuerza por unidad de longitud necesaria para mover el rotor de una máquina eléctrica rotativa, es la consecuencia de la acción que tiene lugar entre ambas ondas de fuerza magnetomotriz para intentar alinear sus ejes magnéticos [3].

### **Par electromagnético:**

Desde el punto de vista físico es en el movimiento rectilíneo una fuerza aplicada a un objeto ocasiona un cambio en la velocidad de este. Si no se ejerce una fuerza neta sobre el objeto, su velocidad permanece constante. Cuando mayor sea la fuerza aplicada al objeto, más rápido cambiará su velocidad [2].

En el movimiento rotatorio existe un concepto similar, cuando un objeto rota, su velocidad angular (en revoluciones por minuto o radianes por segundo) permanece constante, a menos que se ejerza un par sobre él, cuando mayor sea el par aplicado al objeto, más rápidamente cambiará su velocidad angular, es decir, la tasa de cambio del desplazamiento angular (posición angular  $\theta$  de un objeto es el ángulo en que se sitúa, medido desde un punto de referencia arbitrario, medido en radianes o en grados, equivalente al desplazamiento en movimiento rectilíneo), por lo que se puede definir el termino Par como la fuerza de torsión aplicada a un objeto [2].

En un generador real el par se comporta de esta forma: al aplicar un par al eje en la dirección del movimiento, la velocidad del eje se incrementa, el tensión interno se aumenta, y fluye corriente desde el generador hacia la carga, la cantidad de potencia mecánica convertida en potencia eléctrica en el generador rotacional real está dada por el par por la velocidad angular  $\omega$ :

$$P_{conv} = t_{ind}\omega$$



Las máquinas eléctricas presentan una velocidad de sincronismo que viene dada de la siguiente manera:

$$n = \frac{60f}{p}; \text{ Válido para los valores } p \text{ en pares de polos.}$$

$$\text{o bien: } n = \frac{120f}{p}; \text{ Válido para los valores } p \text{ en número total de polos.}$$

Donde  $n$  es la velocidad en revoluciones por minuto, rpm,  $f$  de la frecuencia del sistema en hertzios (Hz) y  $p$  es el número de pares de polos de la máquina, definición que permite establecer diferencias entre las máquinas eléctricas, se considera además en la siguiente ecuación el total de polos de la máquina eléctrica [3].

La f.e.m. inducida en un devanado de una máquina eléctrica, establece ciertas características que se deben tomar muy en cuenta, en los devanados de las máquinas eléctricas se inducen f.e.m. debido a las variaciones de flujo enlazados por los arrollamientos, a razón de:

1. La variación con el tiempo de la magnitud del flujo, lo que da lugar a la llamada f.e.m. de pulsación o acción transformadora.
2. Del movimiento del circuito inducido, respecto al flujo, resultado de una f.e.m. de rotación, velocidad o movimiento.
3. Una combinación de los numerales anteriores [3].

Además de considerar que el flujo del inductor  $\phi$ , varia senoidalmente con el tiempo, y para ello induce en el estator una corriente alterna de frecuencia  $f$  y pulsación  $\omega$ .

El flujo inductor se distribuye senoidalmente por la periferia del entrehierro, el bobinado del inducido se encuentra en circuito abierto, para considerar únicamente el efecto de la generación de f.e.m. la frecuencia de la señal será considerada como  $f$  que corresponde a  $\omega$  [3].

Una forma de relacionar la frecuencia del inducido con el inductor está dada de la siguiente manera:

$$f_2 = f_1 \pm \frac{np}{60}; \text{ Donde } p \text{ es el número de pares de polos}$$

Con lo cual se podría definir el tipo de máquina eléctrica tomando en cuenta las ecuaciones anteriores [3].

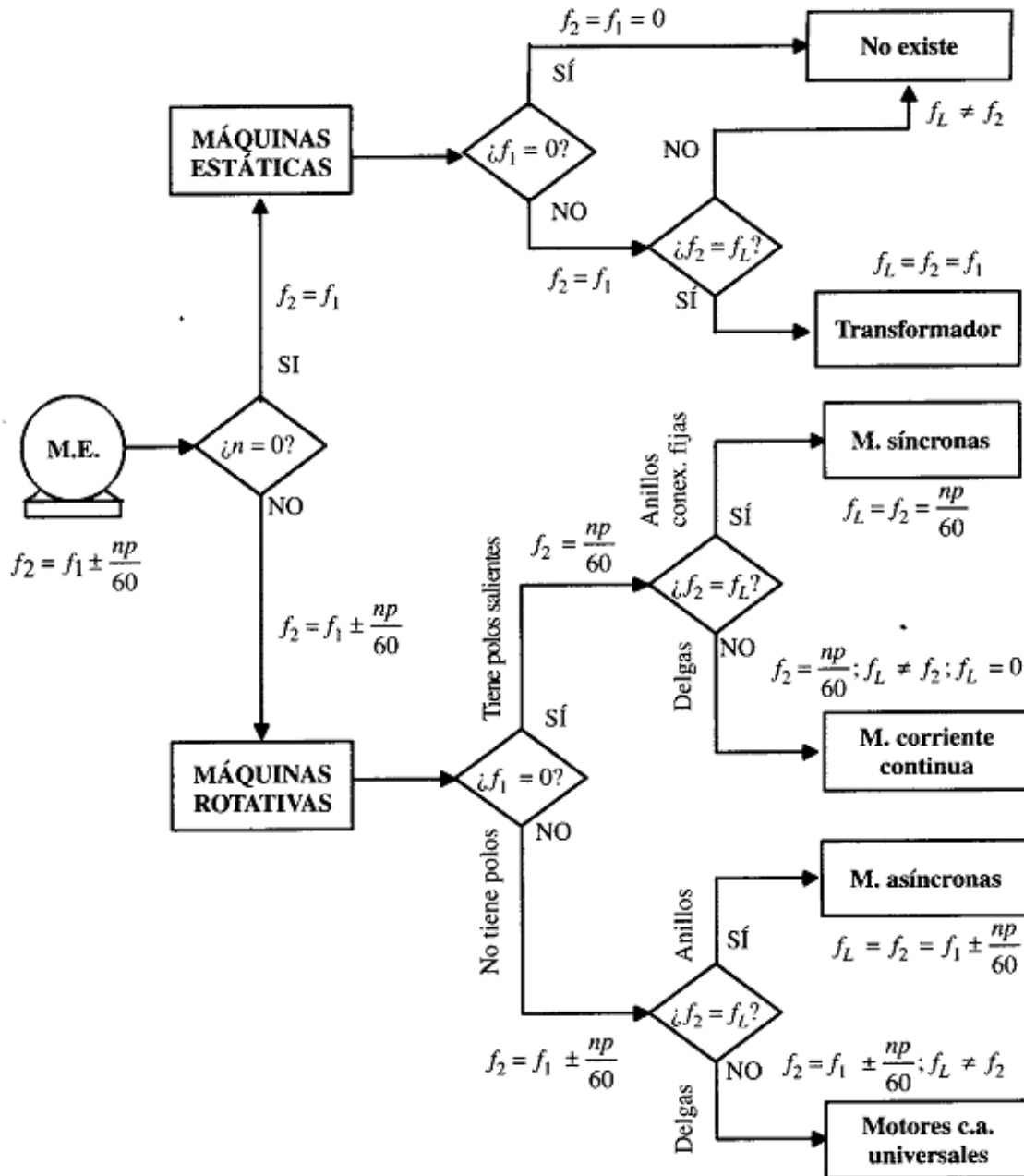


Diagrama 1.2 Flujograma que define el tipo de máquina eléctrica en base al tipo de inductor e inducido afectado por la frecuencia, cortesía en Máquinas Eléctricas por Jesús Fraile Mora 5ta edición [3].

Existe un parámetro que determina la finalidad de las máquinas eléctricas, atendiendo una serie de criterios selectivos y ordenados que toman en cuenta el movimiento de la máquina (movimiento del rotor) el tipo de corriente aplicada al inductor e inducido y la forma física de la conexión, la Diagrama 1.2 muestra un flujograma de desarrollo de la selección de la máquina eléctrica pero a continuación se definen los criterios de selección.

## 1.10. CRITERIOS DE DISEÑO DE MÁQUINAS ELÉCTRICAS.

### 1.10.1. MOVIMIENTO DEL INDUCTOR O INDUCIDO.

- a. Si no existen partes móviles dentro del sistema, es decir,  $n = 0$  de acuerdo [3] a la ecuación:

$$f_2 = f_1 \pm \frac{np}{60}; \quad p: \text{pares de polos}$$

Indica que las frecuencias coinciden, es decir la frecuencia del inducido con el inductor, establece como resultado una máquina estática [3].

- b. En caso de que  $n$  sea distinto de cero  $n \neq 0$ , [3]se sigue conservando la expresión:

$$f_2 = f_1 \pm \frac{np}{60}; \quad p: \text{pares de polos}$$

El cual define el término máquinas rotativas [3].

#### 1. Características del flujo inductor.

- a. Si el flujo inductor es constante, es decir, independiente del tiempo, indica que la corriente que alimenta al devanado es  $f_1 = 0$ , en el caso de las máquinas estáticas, se cumplirá  $f_1 = f_2 = 0$ . **No existe ninguna máquina que cumpla esta condición**, ya que al no aparecer variaciones de flujo en el inducido no se tiene conversión de energía [3].

Para las máquinas dotadas de movimiento, la condición  $f_1 = 0$ , da lugar a la expresión:

$$f_2 = \pm \frac{np}{60}; \quad p: \text{pares de polos}$$

Lo que significa que la frecuencia del inducido es función directa de la velocidad del rotor. Normalmente cuando el inductor esta recorrido por una corriente continua ( $f_1 = 0$ ) la máquina tiene una estructura física de forma de polos salientes, los cuales van arrolladas en las bobinas inductoras [3].

- b. Si el flujo inductor es variable, es  $f_1 \neq 0$ , lo que indica en el caso de las máquinas estáticas que  $f_1 = f_2 \neq 0$  además que para las máquinas rotativas se siga cumpliendo la expresión general  $f_1 = f_2$ .

### 1.10.2. DISPOSITIVO DE CONEXIÓN AL CIRCUITO EXTERIOR.

- a. Si la máquina tiene un inducido cuya unión con el circuito exterior se realiza por medio de conexiones fijas (caso de que el inducido está situado en el estator) o por anillos (inducido en el rotor) la frecuencia del circuito exterior está definida por  $f_L$  es igual a la frecuencia del inducido  $f_2$ , es decir,  $f_L = f_2$ . En el caso de máquinas estáticas se obtiene el transformador y el regulador de inducción monofásico, por lo que en el caso de las máquinas móviles con  $f_1 = 0$ , [3] teniendo en cuenta además que:

$$f_L = f_2 = \pm \frac{np}{60}; \quad p: \text{pares de polos}$$

Que da origen a las máquinas síncronas constituidas por generadores síncronos o alternador y el motor síncrono [3].

En el caso de que  $f_1 \neq 0$  se cumplirá que:

$$f_L = f_2 = f_1 \pm \frac{np}{60}; \quad p: \text{pares de polos}$$

Que da lugar a las máquinas asíncronas o de inducción, constituida por generadores asíncronos, el motor asíncrono y los convertidores asíncronos [3].

- b. Si la máquina tiene un inducido cuya unión con el circuito exterior se realiza por medio de colector de delgas, por lo que la frecuencia del circuito exterior es de diferente valor que la del inducido por lo que:  $f_L \neq f_2$  y el colector de delgas siempre se coloca en el rotor y por ello en las máquinas estáticas esta combinación no existe, en las máquinas móviles en que  $f_1 = 0$ , [3] se cumplirá que:

$$f_L \neq f_2 \pm \frac{np}{60}; \quad p: \text{pares de polos}$$

Que da origen a las máquinas de corriente continua denominadas así porque en ellas se cumple  $f_L = 0$ , estas máquinas contemplan: generador de c.c. o dinamo, motor de c.c. la conmutatriz y otras máquinas especiales como la amplidina, la metadina, rototrol, etc [3].

En las máquinas móviles en las que  $f_1 \neq f_2 = f_1 = \pm np/60$  que da lugar a los motores de c.a. con conmutador o con colector de delgas, se puede apreciar de mejor manera en el flujo-grama de la Figura 1.17 [3].

Se había mencionado antes algunas características de las máquinas eléctricas, pero a continuación se define un poco más el concepto en base a lo explicado anteriormente.

### 1.11. TRANSFORMADORES:

Según la definición que se ha establecido antes, se define un transformador como una máquina eléctrica estática, es decir,  $n = 0$ , constituida por dos devanados, inductor e inducido. El devanado inductor se conecta a una fuente de corriente alterna de frecuencia  $f_1$  y se denomina primario, el devanado inducido tiene una frecuencia  $f_2 = f_1$  y entrega energía eléctrica a un circuito exterior por medio de conexiones fijas, es decir,  $f_L = f_2$  este arrollamiento inducido recibe el nombre de secundario [3].

Para aumentar la inducción magnética del sistema y mejorar el acoplamiento entre ambos devanados, éstos van arrollados sobre un núcleo cerrado común, constituido por un acoplamiento de chapas magnéticas de acero al silicio [3].

Si la tensión entre los terminales de arrollamiento primario  $V_1$ , es menor que la tensión secundaria  $V_2$ , es decir  $V_1 < V_2$ , el transformador se denomina elevador, en el caso contrario  $V_1 > V_2$  se denomina reductor. Se podría considerar que la tensión en un transformador ideal, sin pérdidas ni caídas de tensión se cumplirá que:

$$E_1 = V_1 = 4.44N_1f_1\phi_{\text{máx}} \ ; \ E_2 = V_2 = 4.44N_2f_2\phi_{\text{máx}}$$

Se cumplirá tanto en el primario como el secundario, siendo el flujo máximo que atraviesa ambos arrollamientos y  $N_1$  y  $N_2$  los números de espiras [3], a partir de lo cual se deduce que:

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{N_1}{N_2} = m$$

Donde  $m$  se denomina relación de transformación, además se puede designar con  $I_1$  e  $I_2$  las corrientes primarias y secundarias, en el caso ideal por supuesto, dará como resultado la siguiente expresión:

$$V_1I_1 = V_2I_2$$

Que define la igualdad de potencias de entrada y salida, lo que conlleva a la siguiente relación:

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{I_2}{I_1}$$

Lo que indica que al aumentar la tensión  $V_2 > V_1$  a determinada potencia a transmitir se obtiene que  $I_2 < I_1$  la conveniencia de instalar transformadores de potencia que al manejar altas tensiones se reduce la corriente eléctrica, lo que conlleva a reducir el área de sección transversal de los conductores en los alimentadores de cobre y reducción de costos económicos [3].

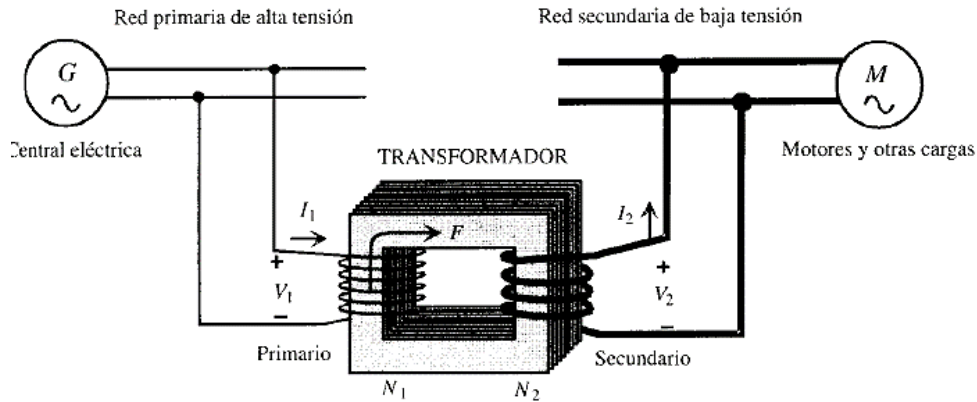


Figura 1.20 Principio del transformador - Máquinas eléctricas Jesús Fraile Mora quinta edición [3].

### 1.12. MÁQUINAS SÍNCRONAS:

Se definen como máquinas rotativas,  $n \neq 0$ , y se caracteriza por la siguiente expresión:

$$f_1 = 0 ; f_2 = \pm \frac{np}{60} ; f_L = f_2; p: \text{pares de polos}$$

Es decir, que consiste en un inductor alimentado por una corriente continua, ( $f_1 = 0$ ) que se domina a su vez devanado de excitación o de campo, que suele colocarse en el rotor, alimentado por medio de dos anillos [3], como se muestra en la Figura 1.21, donde se describe el tipo físico de máquinas síncronas:

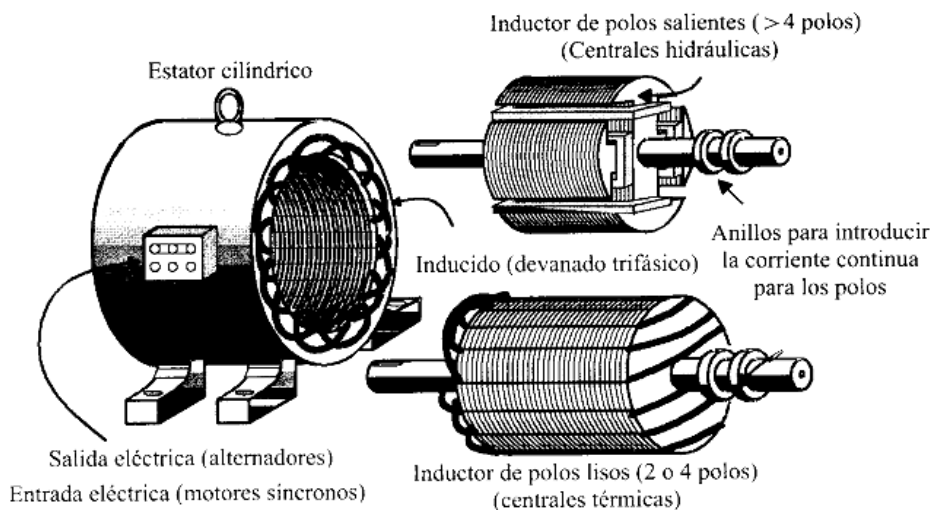


Figura 1.21 Tipos de Máquinas síncrona - Máquinas eléctricas Jesús Fraile Mora quinta edición [3].

El inducido normalmente es trifásico, y suele colocarse en el estator (las máquinas de pequeña potencia se utiliza en posición inversa, el inducido en el rotor y el inductor en el estator). Cuando funciona como generador (alternador), se introduce energía mecánica en el eje, y al aplicar una c.c. al inductor, se obtiene en el inducido una f.e.m. de frecuencia  $f_2 = \pm \frac{np}{60}$ , que se aplica a la carga [3].

La corriente continua necesaria para alimentar el inductor se obtiene de un pequeño Dinamo excitatriz que está situada en el mismo eje de la máquina. En general, el alternador es con mucho, la máquina generadora más importante que existe, y que proporciona la mayor cantidad de energía eléctrica que se consume en la actualidad, están situados en las centrales Hidroeléctricas, térmicas y nucleares con potencia de 1000MW<sup>5</sup>.

Además se puede observar que la frecuencia de la carga  $f_L$  coincide con la del inducido  $f_L = f_2 = \pm \frac{np}{60}$  es directamente proporcional a la velocidad, pero la frecuencia es una magnitud que debería permanecer esencialmente constante debido a las posibles interconexiones con otros sistemas de generación de energía eléctrica, pues es preciso que los motores primarios, es decir, turbinas hidráulicas del tipo Pelton, Francis y Kaplan, turbinas térmicas, etc., giren a velocidad constante [3]

Las máquinas síncronas pueden funcionar además en régimen de motor, introduciendo una c.a. de frecuencia  $f_2$  por el inducido, (teniendo el inductor  $f_1 = 0$ ) apareciendo un par en el rotor que lo hará girar a velocidad:

$$n = \frac{60f_2}{p}; \quad p: \text{pares de polos}$$

Cuya magnitud es función directa de la frecuencia o velocidad de sincronismo, el inconveniente de este motor que gira a una velocidad fija, lo que conlleva a problemas de arranque y pérdida de sincronismo cuando se producen pares de frenado bruscos [3].

---

<sup>5</sup> Máquinas Eléctricas por Jesús Fraile Mora Quinta Edición capítulo 2 sección 2.12.2.



### 1.13. MÁQUINAS ASÍNCRONAS O DE INDUCCIÓN.

Son máquinas rotativas,  $n \neq 0$ , y se caracteriza por:

$$f_1 \neq 0 ; f_2 = f_1 \pm \frac{np}{60} ; f_L = f_2 ; p: \text{pares de polos}$$

Están constituidas por un devanado inductor situado en el estator por el que se introduce una corriente alterna de frecuencia  $f_1$ . En el caso de máquinas de potencia superior 1/2HP, el devanado anterior es trifásico, al igual que la corriente de alimentación, apareciendo [3], un campo magnético giratorio cuya velocidad viene dada por:

$$n_1 = \frac{60f_1}{p} ; p: \text{pares de polos}$$

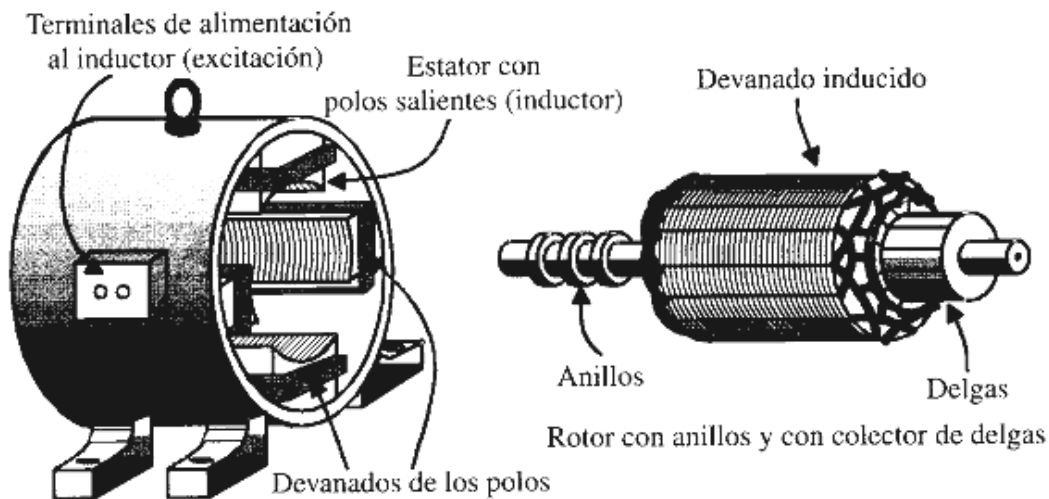


Figura 1.22 Construcción de una máquina eléctrica asíncrona - Máquinas eléctricas Jesús Fraile Mora quinta edición [3].

En la mayoría de los casos está formado por una serie de conductores puesto en cortocircuito por dos anillos externos, formando un devanado que se conoce como jaula de ardilla [3].

Esta máquina puede funcionar en régimen de motor, el cual es el caso más normal de este tipo de máquina, es decir, el campo giratorio del estator induce f.e.m. en el devanado del rotor y al estar este en cortocircuito (jaula de Ardilla) o cerrado por medio de un reóstato de arranque (rotor devanado o con anillos) aparecen corrientes en el rotor que, que al reaccionar con el campo giratorio del estator, [3] mueven la máquina a una velocidad  $n$  muy cercana y por debajo de la velocidad de sincronismo  $n_1$  de tal forma que:

$$f_2 = f_1 - \frac{np}{60}; \quad p: \text{pares de polos}$$

Y se denomina deslizamiento “s” al cociente:

$$s = \frac{n_1 - n}{n_1} \quad ; \quad s = \frac{\frac{60f_1}{p} - n}{\frac{60f_1}{p}} = \frac{f_2}{f_1}$$

Los deslizamientos a plena carga de estos motores que giran a una velocidad asíncrona respecto al campo giratorio del estator varían entre el 3% y 8% y es difícil de regular, sin embargo, la simplicidad y robustez de estos motores (sobre todo en el caso del rotor de jaula de ardilla) los hacen aptos para todo tipo de trabajos en el que no sea necesario un control preciso de velocidad, como grúas, ascensores, herramientas máquina (taladros pulidoras), etc., lo que conlleva a la máquina electromagnética de mayor aplicación [3].

Para que la máquina asíncrona funcione en régimen de generador, deben cumplir algunas condiciones, si girando la máquina asíncrona como motor, a una velocidad de  $n < n_1$ , se obliga al rotor, por medio exterior, a una velocidad superior a la de sincronismo y en un mismo sentido, podría hacerse el deslizamiento negativo por lo que la máquina absorbe energía mecánica del eje que lo convierte a energía eléctrica, devuelta la red en una frecuencia  $f_1$ , este tipo de sistema no es muy utilizado ya que necesita una corriente de magnetización suministrada por la red de conexión eléctrica por lo que no lo hace un sistema autónomo [3].

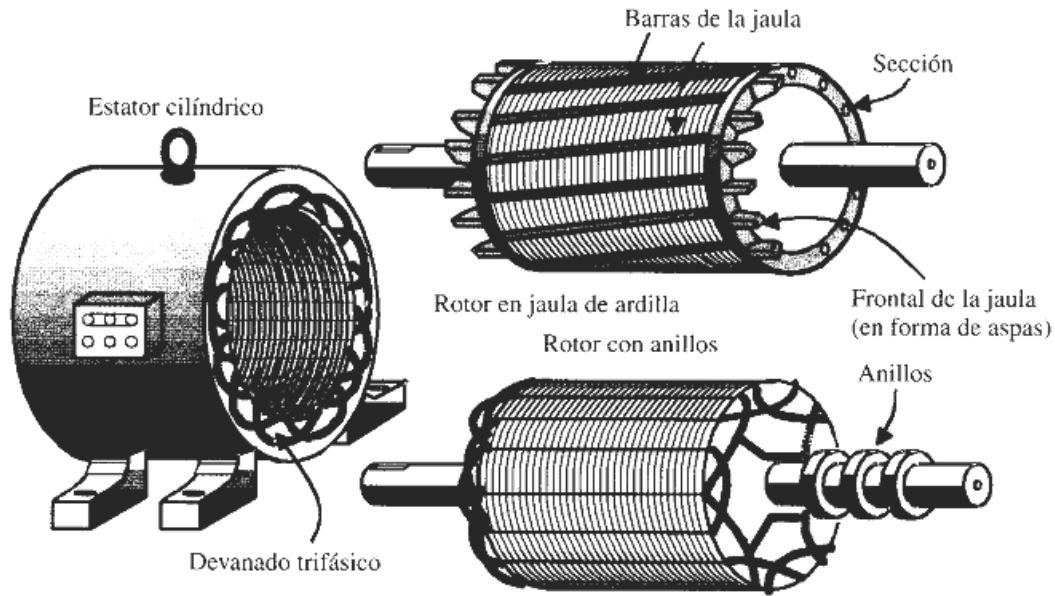


Figura 1.23 Tipos de máquinas asíncronas o de inducción - Máquinas eléctricas Jesús Fraile Mora quinta edición [3].

#### 1.14. MÁQUINAS DE CORRIENTE CONTINUA.

Son máquinas rotativas  $n \neq 0$  de acuerdo a eso se caracteriza por:

$$f_1 = 0 ; f_2 = \pm \frac{np}{60} ; f_L \neq f_2; p: \text{pares de polos}$$

El nombre de corriente continua se debe al valor de la frecuencia de carga  $f_L = 0$ , el cual se consigue con la acción rectificadora del colector de delgas, además que este tipo de máquina dispone de un inductor alimentado por c.c.  $f_1 = 0$ , que al igual que en las máquinas síncronas denomina devanado de excitación o de campo, situada en el estator [3].

En régimen de generador se suministra energía mecánica de rotación al eje y se aplica una c.c. a la excitación obteniéndose en el inducido una corriente alterna de frecuencia:

$$f_2 = \pm \frac{np}{60}; p: \text{pares de polos}$$

Y debido al proceso de rectificación producido por el colector de delgas, se obtiene una c.c. entre las escobillas de la salida, energía que es aplicada a la carga  $f_L$ , de frecuencia  $f_L = 0$ , este tipo de configuración se conoce como “Dinamo” y tiene la importancia historia de ser el primer tipo de generador empleado para obtener energía eléctrica en gran escala, actualmente se han sustituido en régimen de generador por rectificadores que permiten obtener una c.c. a partir de la conversión de a.c. de la red [3].

En régimen de motor de c.c. es necesario inducir c.c. por el inductor y por las escobillas del inducido, el cual establece un par que hace girar el rotor de la máquina, la velocidad de giro puede regularse con facilidad, controlando la corriente del inductor o del inducido, o ambas a la vez. Esta facilidad de regulación de velocidad en los motores de c.c. además de los altos pares de arranque que se pueden obtener, ha hecho que este tipo de motor fuera insustituible en aquellas aplicaciones que como los trenes de laminación [3].

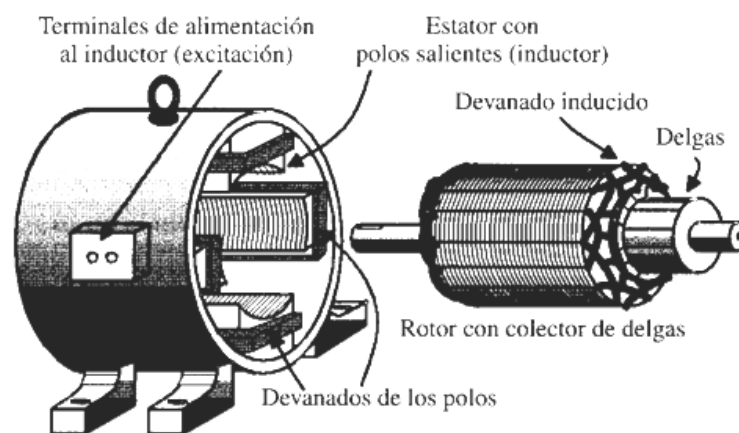


Figura 1.24 Ejemplo de diseño de máquina eléctrica de corriente continua - Máquinas eléctricas Jesús Fraile Mora quinta edición [3].

Si los devanados inductor e inducido llevan alimentaciones separadas, se llaman máquinas con excitación independiente, normalmente ambos circuitos se conectan entre si, cuando se conecta en paralelo se denomina “shunt” o derivación, en la que el inductor está formado por un devanado de muchas espiras de hilo delgado el cual es atravesado por una pequeña corriente [3].

Cuando se conecta en serie, el inductor tiene pocas espiras además de un hilo grueso, en el cual circula toda la corriente del inducido, y en combinación de ambos, una conexión mixta, serie-paralelo, se le denomina compound o compuesta [3].

Estos sistemas de conexión se emplean para producir la autoexcitación de la máquina, a partir del magnetismo remanente de los polos inductores, es frecuente aunque no de norma general, que la conexión en serie sea empleada en motores, y la shunt y compuesta en generadores [3].

Así como también, existen factores que afectan a la f.e.m. inducida en un devanado los cuales se citan a continuación:

Factor de forma: Aparece debido a que el flujo no tiene una distribución Senoidal en el entrehierro, definido por:

$$K_f = \frac{\text{Valor Eficaz}}{\text{Valor Medio}} = 1.11$$

El valor de 1.1 corresponde al caso en el que la onda de flujo se reparta senoidalmente por el entrehierro [3].

Factor de distribución: de acuerdo al número de ranuras que presente a lo largo de toda la periferia visto en los arrollamientos de tal forma que la f.e.m. en el bobinado van desfasadas y su suma no es aritmética sino vectorial [3].

Para hacer que la f.e.m. inducida se asemeje a una función Senoidal siempre existe más de una bobina en un grupo de fase, puesto que las bobinas están desplazadas espacialmente una de otra, las f.e.m. inducidas en ellas no se encuentran en fase, el factor de distribución es igual a uno solamente cuando todas la bobinas están ubicadas en la misma ranura [3].

Por último se menciona el factor de paso o de acortamiento.

Estos factores afecta a la máquina eléctrica, en caso de que se utilice en régimen de generador síncrono, en el cual se establecen armónicos de orden 3 y sus respectivos múltiplos ajustando estos factores se disminuye en número de armónicos que tiende a mejorar la forma de onda del sistema [3].

Algunas máquinas eléctricas utilizan el factor de paso, en paso fraccionario, y por lo que los generadores se devanan de esta forma por las razones siguientes:

1. La bobina de paso fraccionario diseñada en forma apropiada reduce los armónicos que generan distorsión y produce una forma de onda más apegada a la Senoidal [1].
2. El paso fraccionario acorta las conexiones finales de los devanados, por lo que no solo se ahorra cobre sino que además reduce las pérdidas en el cobre de la bobina (efecto Joule) [1].
3. Es más fácil manejar una bobina más corta y reduce la acumulación de espiras finales en ambos lados del cuerpo del estator, lo cual disminuye la longitud total del generador y reduce al mínimo la dispersión de flujo [1].
4. La eliminación de los armónicos de alta frecuencia también disminuye las pérdidas magnéticas del generador [1].

Las desventajas del bobinado de paso fraccionario es que la f.e.m. inducida en ella es más pequeña que una bobina de paso completo, debido a que el flujo total que enlaza la bobina de paso fraccionario es más pequeño que la de paso total, la razón de flujo que enlaza la bobina de paso fraccionario respecto al flujo que enlazaría el paso completo se denomina factor de paso. El factor de distribución y el factor de paso son valores menores que uno  $k_d$  y  $k_p$ .

Un ejemplo de esto, es que los alternadores (máquinas síncronas) en las centrales eléctricas se conectan en estrella para evitar las corrientes de tercer armónico, que estarían presentes si los devanados se conectan en delta, y como ya se mencionaba, se pueden reducir aún más manejando los factores que se dijeron anteriormente [3].

## CAPÍTULO II – MÁQUINA SÍNCRONA – GENERADOR SÍNCRONO.

### 2.1. GENERALIDADES.

Por lo que se ha descrito, el estator o armadura es la parte fija, es en esencia un cilindro hueco que varía en diámetro y longitud de acuerdo a su aplicación, por medio de sus devanados suministra la corriente eléctrica, el rotor es la parte de la máquina que se monta sobre el eje de esta y rota dentro del estator hueco, el devanado sobre el rotor se denomina **devanado de campo** y se alimenta con una corriente de c.c. la f.m.m. de muy alta intensidad producida por la corriente de campo se combina con la f.m.m. por la corrientes en los devanados de armadura por lo que el flujo resultante en el entrehierro (espacio de aire que existe entre el estator y el rotor) genera tensión en las bobinas de los devanados de la armadura (estator) y conlleva al desarrollo del par electromagnético generado.[4]

Los generadores de corriente alterna, se les denomina como generadores síncronos o alternadores, cuyo propósito es establecer una conversión de energía mecánica en energía eléctrica, de corriente alterna, en un generador síncrono se aplica una corriente de c.c. al devanado del rotor, la cual produce un campo magnético, entonces el rotor del generador gira mediante un motor primario y produce un campo magnético rotacional dentro de la máquina, este campo magnético rotacional induce un grupo trifásico de tensión en los devanados del estator del generador [2], opera a una velocidad de sincronismo que está dada por la siguiente ecuación:

$$n_s = \frac{120f}{p}; \quad p: \text{número total de polos}$$

Como se había mencionado **p** es el número total de polos del sistema, hay quienes consideran el número de pares de polos por lo que la ecuación cambia la constante de 120 a 60 [2].

La frecuencia de trabajo para el sistema americano es de **60Hz**, en cambio para el sistema europeo es de **50Hz**, es decir, para un generador tetra polar operando a una frecuencia de 60Hz, su velocidad de rotación en revoluciones por minuto es de 1800rpm.

Los generadores síncronos o denominados sincrónicos, el cual define que la frecuencia eléctrica producida esta entrelazada o sincronizada con la tasa mecánica de rotación del generador, es decir, **las r.p.m. de rotación mecánica están en sincronismo con las r.p.m. de la máquina eléctrica**, en una descripción básica del generador, éste consta de un electroimán al cual se suministra corriente directa. [2]

## 2.2. DESCRIPCIÓN ESTATOR-ROTOR.

Esta máquina la constituye dos partes, la parte fija denominada estator o armadura, así como la parte giratoria o móvil denominada rotor que proporciona la corriente del campo, es decir, el campo magnético principal para establecer una f.e.m. inducida en la armadura, se les conoce además como inductor a la parte móvil, e inducido a la parte fija, en régimen de generador [2].

Sus componentes básicos del alternador son elaborados con chapas de hierro magnéticas de acero al silicio en la mayoría de aplicaciones los cuales se habían descrito anteriormente en las generalidades de máquinas eléctricas.

El funcionamiento del sistema de generación, es que se produce un campo magnético en el rotor, ya sea por la aplicación de una corriente de c.c. a su devanado o por imanes permanentes para crear un electroimán, el rotor del generador gira mediante un motor primario, que establece un campo magnético giratorio dentro de la máquina, este campo induce un conjunto de tensión trifásicos dentro de los devanados del estator o armadura del generador, como se ha mencionado anteriormente, al devanado del rotor se le conoce como devanado de campo y al del estator, devanado de armadura, en el cual se aplica a los devanados donde es inducido el tensión principal.[2]



El rotor de un generador síncrono, se le conoce como un electroimán grande (un electroimán simple consiste en una bobina de alambre aislado envuelto alrededor de un núcleo de hierro, para el caso un núcleo ferromagnético que determina el aumento del campo magnético generado, la fuerza del campo magnético generado es proporcional a la cantidad de corriente que atraviesa los arrollamientos), los polos magnéticos del rotor pueden ser salientes como no salientes, se les conoce como rotor de polos lisos y rotor de polos salientes, un rotor de polos lisos es aquel que tiene al mismo nivel de la superficie del rotor los polos magnéticos, y el de polos salientes, sobresale de la superficie del rotor [2].

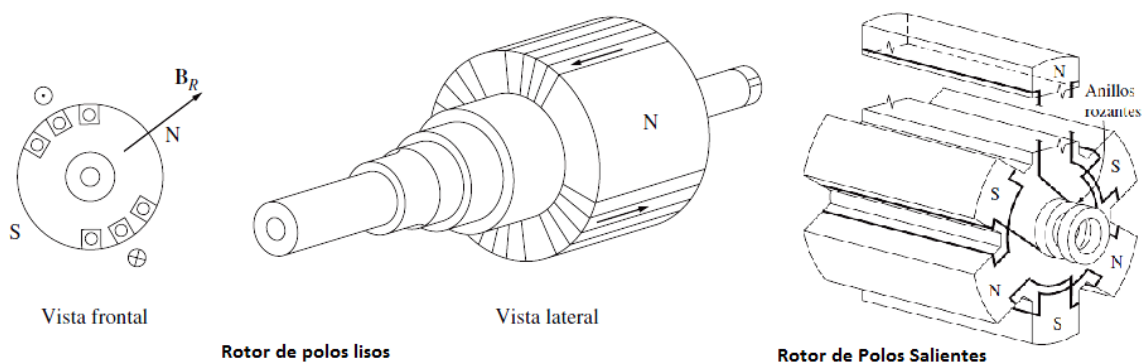


Figura 2.1 Tipos de Rotor, rotor de polos lisos y rotor de polos salientes - Máquinas eléctricas Chapman quinta edición [2].

Dado que el rotor está sujeto a campos magnéticos variables, se construyen con láminas delgadas para disminuir las pérdidas producidas por corrientes parásitas, acero al silicio.

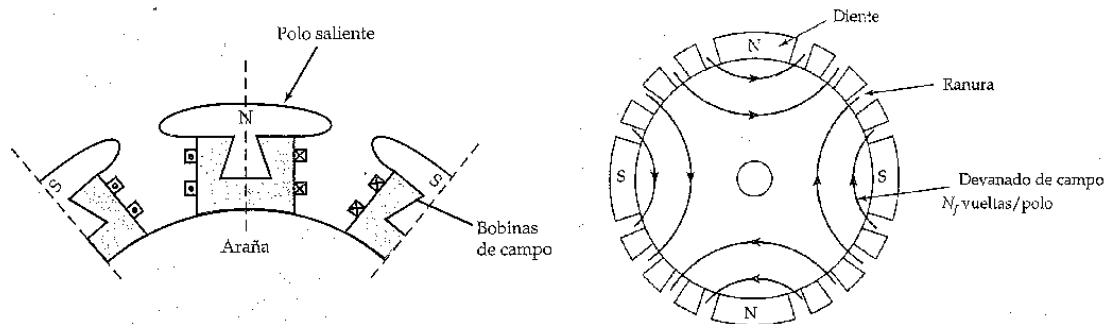


Figura 2.2 Detalles del rotor de polos salientes y rotor de polos lisos – Máquinas eléctricas y transformadores Guru tercera edición [1].

Para suministrar una potencia de c.c. al circuito de campo se puede hacer de dos maneras:

1. Suministrar al rotor la potencia de c.c. desde una fuente externa de c.c. por medio de anillos rozantes y escobillas [2].
2. Suministrar una potencia de c.c. desde una fuente de potencia de c.c. especial, montada en el eje del generador síncrono [2].

La manera convencional de un generador procede a la excitación de un dinamo excitatriz del tipo “shunt” que está montada en el eje del grupo y cuya salida se aplica al rotor del alternador por medio de anillos rozantes con sus correspondientes escobillas (términos que se definen más adelante), de tal manera de establecer la potencia de la corriente de campo [3].

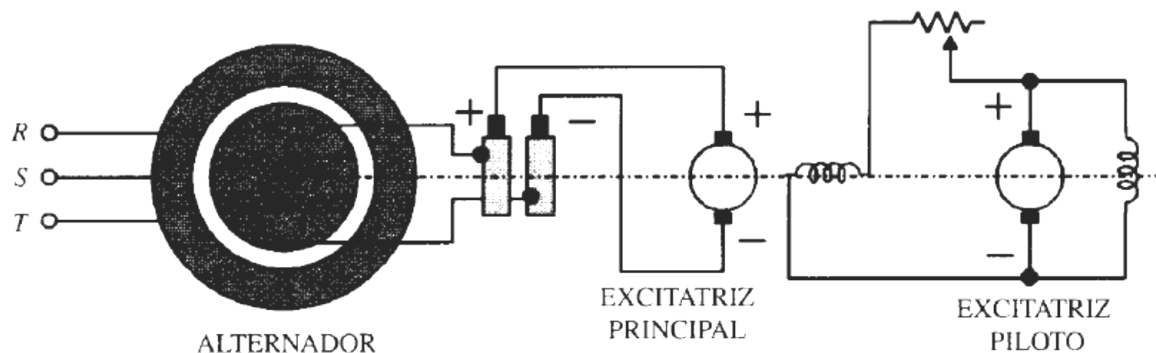


Figura 2.3 Sistemas de excitación con dinamo excitatriz - Máquinas eléctricas Jesús Fraile Mora quinta edición [3].

### Anillos rozantes:

Anillos de metal, que circundan por completo al eje de la máquina pero se encuentran aislados de él, están de tal manera que un extremo del devanado del rotor de c.c. está unido a cada uno de los dos anillos rozantes del eje de la máquina síncrona y una escobilla estacionaria se desliza sobre cada anillo rozante [2].

### Escobilla:

Es un bloque compuesto de carbón parecido al grafito que conduce electricidad libremente pero tiene una fricción muy baja, colocado cerca de la posición del anillo rozante, y por lo que no presenta un desgaste en el anillo.

La función de estos componentes es la de generar y compensar la corriente de campo dentro del eje del rotor, si el extremo positivo de una fuente de tensión de c.c. se conecta a una escobilla y el extremo negativo se conecta a la otra, entonces se aplicara el mismo tensión de c.c. al devanado de campo en todo momento, sin importar la posición angular o velocidad del rotor [2].

El funcionamiento de la combinación de escobillas-anillos rozantes conlleva una revisión constante de su estado físico el cual implica un incremento en la cantidad de mantenimiento que requiere la máquina debido al desgaste de las escobillas, además de considerar en el desgaste la caída de tensión presentada en las escobillas que implica un aumento en las pérdidas de la potencia de campo del rotor, pero en máquinas eléctricas pequeñas, este sistema es muy utilizado, dado que en costos, es el método más eficiente de suministrar potencia de campo al sistema. Para un generador de potencia, se puede aplicar una técnica distinta para suministrar una corriente de campo de c.c. con excitadores o excitatriz sin escobillas [2].

#### **Excitador sin escobillas:**

Es un pequeño generador de a.c. que contiene un pequeño circuito de campo montado en el estator y un circuito de armadura acoplado al eje del rotor, la salida trifásica del generador excitador es rectificadora a corriente directa por medio de un circuito de electrónica de potencia rectificadora, que además está montado en el eje del generador, para alimentar al circuito de campo principal, por lo que es posible ajustar la corriente de campo en la máquina principal sin anillos rozantes y escobillas por lo que debido a que no presenta contacto mecánico entre rotor y estator, los excitadores sin escobillas requieren mucho menos mantenimiento que los anillos rozantes y escobillas [2].

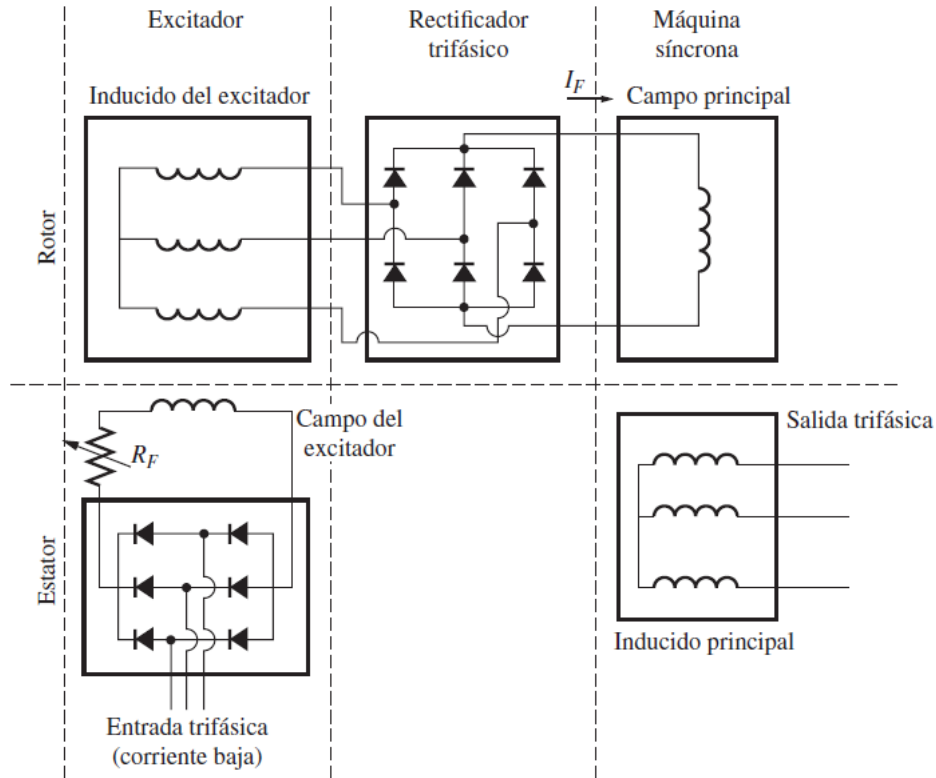


Figura 2.4 Circuito excitador sin escobillas - Máquinas eléctricas Chapman quinta edición [2].

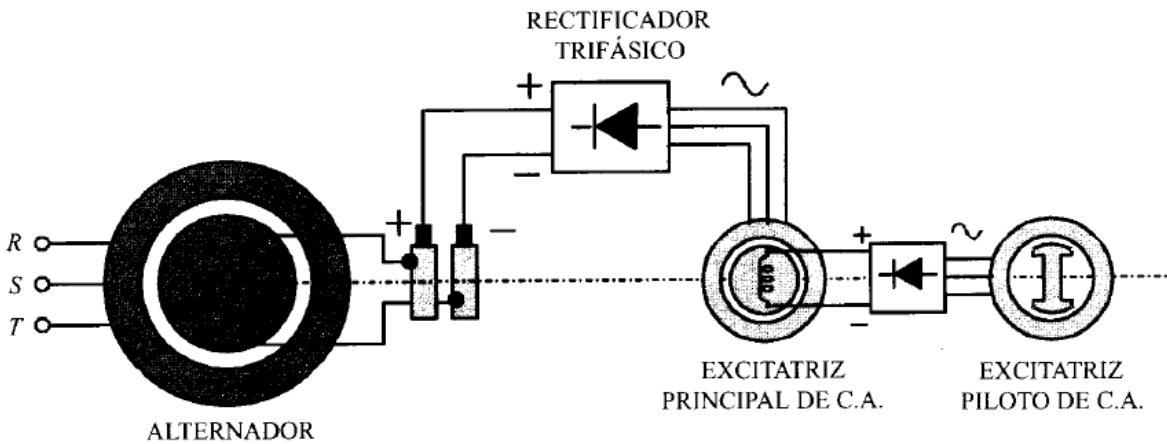


Figura 2.5 Sistema de excitación electrónico o sistema de excitación sin escobillas - Máquinas eléctricas Jesús Fraile Mora quinta edición [3].

Se suministra una pequeña corriente trifásica y se utiliza para suministrar el circuito de campo del excitador que se encuentra en el estator, entonces se rectifica la salida del circuito del inducido del excitador, (en el rotor) y se utiliza para suministrar una corriente de campo para la máquina principal [2].

Para que la excitación de un generador sea completamente independiente de cualquier fuente de potencia externa, a menudo se incluye un pequeño excitador piloto en el sistema [2].

**Un excitador piloto (aplicación de imanes permanentes):**

Es un pequeño generador de a.c. con imanes permanentes montados en el eje del rotor y un devanado trifásico en el estator, produce la potencia para el circuito de campo del excitador, que a su vez controla el circuito de campo de la máquina principal y si se incluye un excitador piloto en el eje del generador, no se requiere de potencia eléctrica externa para accionar el generador, el tema de los imanes permanentes en el sistema de corriente de campo se analizara posteriormente [2].

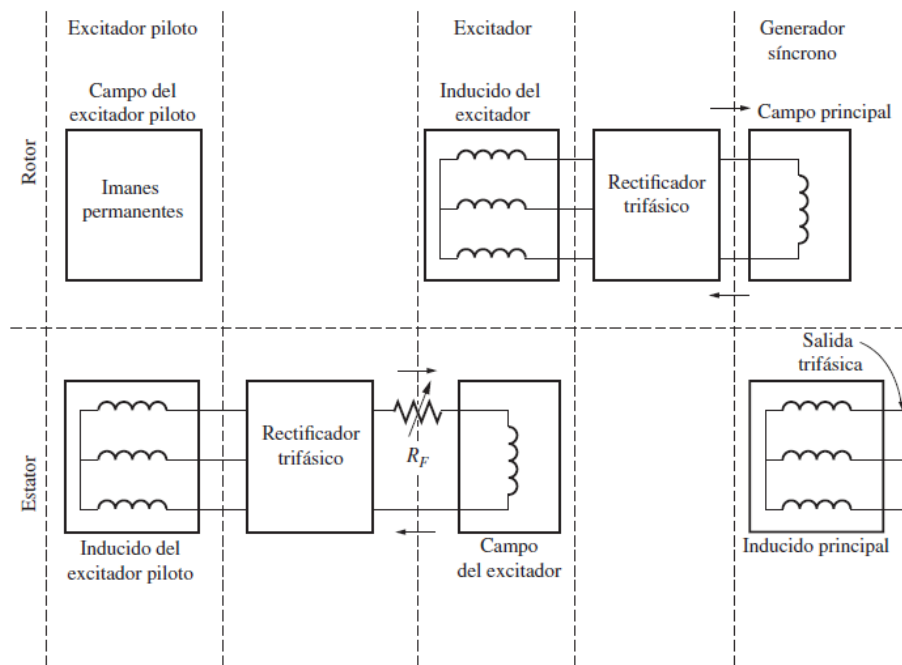


Figura 2.6 Esquema de un excitador sin escobillas que incluye un excitador piloto - Máquinas eléctricas Chapman quinta edición [2].

Los imanes permanentes del excitador piloto producen la corriente de campo del excitador, que a su vez produce la corriente de campo de la máquina principal. Generalmente, los grandes generadores de corriente alterna tienen excitadores que consisten en una fuente de a.c. con rectificadores de estado sólido [2].

Normalmente el eje es impulsado por una fuente de energía mecánica que por lo general es una turbina de vapor o hidráulica, de esta forma se genera un par electromecánico opuesto al movimiento generado por la fuente de energía mecánica, de ser el mismo par de acción-reacción no habrían pérdidas en el sistema, lo cual es un sistema ideal, la diferencia entre el par ocasiona pérdidas de energía [2].

Las máquinas síncronas pequeñas no suelen tener excitatriz piloto y la excitatriz principal trabaja en forma de derivación (shunt), alimentado directamente el inductor o campo del alternador, debido a las dificultades de conmutación de los dinamos cuando estas giran a grandes velocidades, y en general para evitar la presencia del colector de delgas de las mismas, se han desarrollado excitadores de a.c. con ayuda de rectificadores de silicio que alimentan con c.c. los polos del alternador [2].

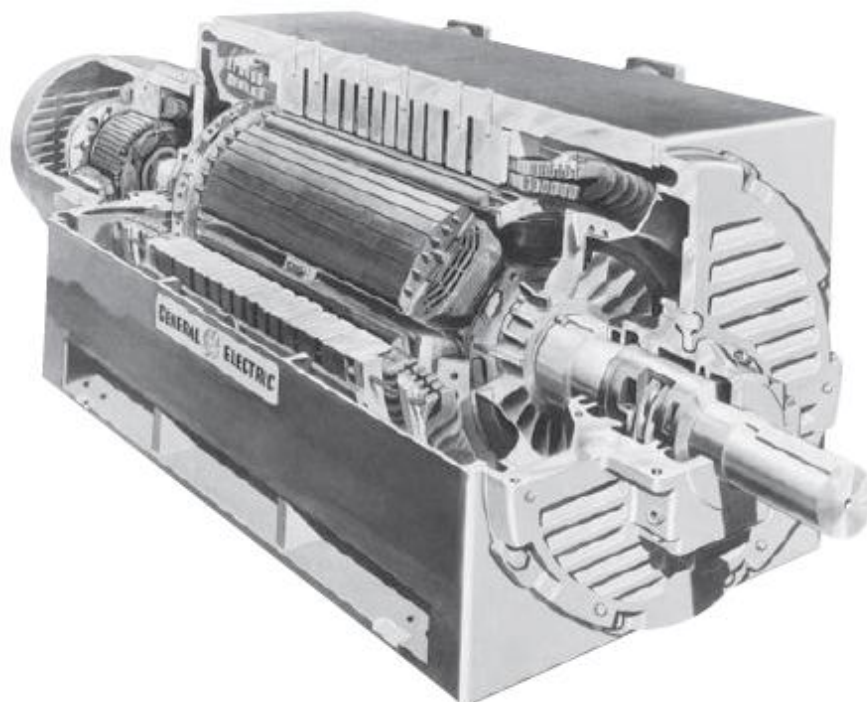


Figura 2.7 Dibujo en corte de un generador síncrono grande, nótese la construcción de los polos salientes y el excitador del eje [2] Cortesía en Champan quinta edición.

La Figura 2.7 muestra la construcción física de un generador, se muestra el circuito de campo y su excitatriz.

Se ha mencionado que existen dos tipos de rotores:

El rotor de polos salientes, el rotor de polos salientes se utiliza en generadores de baja y media velocidad, pues la pérdida en los devanados es pequeña además de colocar los devanados sobre la superficie de los polos salientes [1].

En cambio el rotor de polos lisos o rotor cilíndrico se emplea en turbogeneradores bipolares o tetra-polares, de alta velocidad hecho de acero forjado, con cierto número de ranuras sobre su periferia exterior, las cuales alojan las bobinas del devanado de campo. [1].

|                              | Rotor Polos Lisos o rotor cilíndrico  | Rotor Polos salientes.  |
|------------------------------|---|---|
| Aplicaciones/Características | Alta velocidad debido a que son de tipo bipolares o tetra-polares, utilizado en turbogeneradores, es decir, un generador eléctrico movido por una turbinas de vapor o de gas. | Bajas velocidades de giro debido al número de polos que contiene la máquina, mayor a cuatro polos, utilizadas en generadores hidráulicas. |

**Tabla 2.1** Definición de aplicaciones de rotor cilíndrico o polos lisos y rotor de polos salientes - Máquinas eléctricas Jesús Fraile Mora quinta edición [3].

La selección del tipo de rotor viene impuesta por la velocidad de rotación de la máquina la cual a su vez depende del tipo de motor primario que la hace girar, y así, se distinguen los turbogeneradores, hidrogeneradores y los generadores acoplados a motores diésel. Un ejemplo claro de selección del tipo de rotor es en la aplicación de un turbogenerador que es movido por vapor, el cual presenta un gran rendimiento si se mueven a velocidades elevadas, estos alternadores poseen dos polos (máquinas bipolares) lo que corresponde a una velocidad de 3600rpm a una frecuencia de trabajo de 60Hz, el eje turbina-alternador podría ser horizontal y construyen unidades de potencia de 1MVA o superiores [3].

Como quiera que la potencia asignada de una máquina es proporcional a su volumen, los turbogeneradores al ser de gran velocidad, se construyen con un pequeño diámetro y una gran velocidad axial de esta forma se reducen las fuerzas centrífugas a que están sometidos los devanados del rotor, por ejemplo estos pueden tener de 1 a 2m de diámetro del rotor y de 10 a 12m de longitud axial, por otro lado los generadores hidráulicos, como presentan una menor velocidad debido al número de polos que contiene la máquina, poseen un mayor diámetro y una menor longitud axial, por ejemplo para una máquina de 200MVA presenta un diámetro de alrededor de los 5-7m y una longitud axial de 2 a 3m [3].

A partir de la conversión de energía mecánica a eléctrica se generan niveles de tensión, estas tensiones generadas son de alrededor de los **15kVA** para potencias inferiores a los 200MVA, para potencias superiores a las tensiones elevadas a los 25-30kVA con el objetivo de reducir el calibre del conductor empleado en la construcción del inducido, las corrientes de fase pueden llegar a los **20kA**, por lo que es imprescindible la utilización de devanados con circuitos en paralelo, las corrientes de excitación pueden llegar a valores de 2.5kA para valores de 1kV para generadores de potencia de 750MVA, este tipo de corrientes ocasionan pérdidas en el sistema de conversión de energía mediante el efecto Joule, el cual podría dañar el aislamiento, para evitar esto en unidades pequeñas basta con la ventilación del aire en convección natural; para unidades mayores es preciso recurrir a intercambiadores de calor aire-agua colocados en el exterior de la estructura del estator, puede utilizarse agua o hidrogeno en el proceso de enfriamiento.

Se analizara posteriormente la definición electromagnética y matemática que conlleva el uso de rotor de polos lisos y el rotor de polos salientes.

En las máquinas pequeñas para potencias que no superan los **10kVA**, el devanado del inductor se coloca normalmente en el estator [3], en forma concentrada, sobre expansiones salientes, (polos salientes), estando situado el inducido en el rotor, que forman generalmente tres fases que tienen tres salidas al exterior por medio de tres anillos, las máquinas más grandes, para el caso de los alternadores de potencia, la colocación de los devanados es inversa a lo que se mencionó anteriormente.



### **Devanados de la armadura.**

Los estatores o armaduras, de casi todos los generadores síncronos están devanados con tres arrollamientos distintos e independientes para generar energía eléctrica trifásica. Se dice que cada devanado representa una fase del generador trifásico, los tres devanados son exactamente iguales en su forma pero desplazados  $120^\circ$  en tiempo de fase,  $120^\circ$  eléctricos [3].

Estos devanados pueden estar conectados internamente en delta ( $\Delta$ ) o estrella (Y), al conectarse en estrella, el punto común del centro puede llevarse fuera y ser conectado a tierra de modo apropiado para una operación del sistema con la seguridad de la referencia a tierra en caso de falla [3].

### 2.3. PRINCIPIO DEL FUNCIONAMIENTO DEL ALTERNADOR.

#### 2.4. ECUACIÓN DE LA F.E.M. INDUCIDA DE LA MÁQUINA SÍNCRONA EN RÉGIMEN DE GENERADOR.

[1] Se asume un flujo total por polo que emana de un rotor cilíndrico, que gira a una velocidad angular  $\omega_s$  es  $\Phi_p$ . el flujo máximo que enlaza la bobina de paso fraccionario es  $\Phi_p k_p$ , donde  $k_p = \text{sen}(\rho/2)$  es el factor de paso y  $\rho$  es el alcance de la bobina en grados eléctricos, a medida que el flujo gira, el flujo se enlaza a la bobina en cualquier momento "t" que puede expresarse como:

$$\varphi_c = \varphi_p k_p \cos(\omega t) \quad ; \quad \text{Donde } \omega = 2\pi f \text{ es frecuencia angular en rad/s}$$

Para una bobina de  $N_c$  vueltas, con base a la ley de Faraday la f.e.m. inducida en la bobina es:

$$e_c = N_c k_p \omega \varphi_p \text{sen}(\omega t)$$

De donde el valor máximo de la f.e.m. inducida (es decir  $\text{Sen}(90) = 1$ ) es:

$$E_m = N_c k_p \omega \varphi_p \quad ; \quad \text{y el valor rms esta dado por: } E_c = \frac{1}{\sqrt{2}} E_m$$

$$E_c = 4.44 f N_c k_p \varphi_p \quad ; \quad \text{De donde 4.44 es el valor aproximado de } \sqrt{2}\pi$$

Puesto que en general un grupo de fases tiene más de una bobina conectada en serie y cada una de ellas esta desplazada por un paso de ranura, la f.e.m. inducida en el grupo considera el factor de desplazamiento y de distribución antes mencionado que conlleva a la siguiente expresión:

$$E_a = 4.44 f N_e \varphi_p \quad ; \quad \text{donde } N_e = \frac{P n N_c k_\omega}{a}$$

$K_\omega$  es factor de devanado, la expresión  $N_e$  se considera las vueltas efectivas por fase [1].

$E_a$  se considera el valor de la tensión por fase sin carga, que es una relación matemática similar a la ecuación de tensión sin carga del transformador, el número efectivo de vueltas es el mismo que el número real porque cada uno de los devanados consta de una bobina que abarca el flujo total en el núcleo magnético [1].

La tensión interna generada de vacío  $E_a$  es directamente proporcional al flujo y a la frecuencia síncrona pero el flujo generado depende en sí de la corriente que fluye por el circuito de campo del rotor. La relación de  $E_a$  con la corriente de campo puede denominarse curva de magnetización o característica de vacío de la máquina, posteriormente se detallara estas características [1].

## 2.5. CIRCUITO EQUIVALENTE DE UN GENERADOR SÍNCRONO.

Para poder establecer un circuito equivalente, deberá definirse primero los parámetros involucrados en el fenómeno, al igual que en un transformador, que presenta impedancias características, la máquina eléctrica síncrona en régimen de generador presenta características similares [2].

La tensión  $E_a$  es la tensión interna que se genera y produce en una fase de un generador síncrono. Sin embargo, por lo general esta tensión  $E_a$  no es el tensión que se presenta en las terminales del generador [2].

De hecho, el único momento en que el tensión interno  $E_a$  es igual al tensión de salida en los terminales  $V_a$  de una fase es cuando no fluye corriente de armadura en la máquina. ¿Por qué el tensión de salida  $V_a$  de una fase no es igual a  $E_a$  y cuál es la relación entre estos dos tensión? La respuesta a esta pregunta lleva al modelo de circuito equivalente de un generador síncrono [2].

Factores que intervienen en la relación  $V_a$  y  $E_a$ :

1. La distorsión del campo magnético del entrehierro debida a la corriente que fluye en el estator, llamada reacción del inducido o reacción de armadura [2].
2. La autoinducción de las bobinas del inducido o armadura [2].
3. La resistencia de las bobinas del inducido o armadura [2].
4. El efecto de la forma del rotor [2].

La disposición del campo magnético producida en la armadura, cuando el rotor de un generador síncrono gira, se induce una tensión  $E_a$  en los devanados del estator del generador y al añadirse una carga a los terminales de la máquina la corriente fluye, pero el flujo de corriente de un estator trifásico produce su propio campo magnético en la máquina [2].

Este campo magnético del estator distorsiona el campo magnético original del rotor y altera la tensión de fase resultante. A este efecto se le llama reacción armadura porque la corriente del inducido (estator) afecta el campo magnético que lo produjo en primera instancia [2].

## 2.6. REACCIÓN DE ARMADURA.

El flujo producido por el devanado de armadura reacciona con el flujo establecido por los polos del rotor, lo que ocasiona que el flujo total cambie, a esta interacción entre flujos se le denomina reacción de armadura, para comprender este fenómeno [1], a continuación se definen algunas características del enlace de estos flujos:

- a) Si el flujo por polo en el generador sin carga, establece que la tensión generada  $E_a$  debe estar en atraso respecto al flujo del polo en  $90^\circ$  [1].
- b) Cuando el factor de potencia es unitario la corriente de fase  $I_a$  está en fase con el tensión de fase en los terminales  $V_a$  [1].

- c) A medida que la corriente de fase  $I_a$  pasa a través del devanado de armadura, su fuerza magnetomotriz **f.m.m.** produce un flujo de armadura  $\phi_{ar}$  que está en fase con  $I_a$ , el flujo efectivo  $\phi_e$  o flujo resultante por polo en el generador es la suma algebraica de los dos flujos, es decir,  $\phi_e = \phi_p + \phi_{ar}$  [1].
- d) A su vez, el flujo  $\phi_{ar}$  induce una f.e.m.  $E_{ar}$  en el devanado de la armadura, se le conoce además como **f.e.m.** de reacción a la armadura, la  $E_{ar}$  está en atraso respecto del flujo  $\phi_{ar}$  en  $90^\circ$ . Luego el tensión efectivo generado por fase  $E_e$  es la suma algebraica del tensión sin carga  $E_a$  y la f.e.m. de reacción de armadura  $E_{ar}$ , es decir,  $E_e = E_a + E_{ar}$  [1].

### 2.7. CAÍDA DE TENSIÓN EN LA RESISTENCIA DE ARMADURA.

Sea  $E_a$  el tensión generado por fase de un generador síncrono e  $I_a$  la corriente de fase suministrada por este a la carga, si  $R_a$  es la resistencia por fase del devanado de armadura, entonces  $I_a R_a$  representa la caída de tensión a través de ella, esta tensión está en fase con la corriente de carga  $I_a$ . Como  $R_a$  también ocasiona una pérdida de potencia en el generador, se mantiene tan pequeña como sea posible, en especial para máquinas grandes [1].

### 2.8. CAÍDA DE TENSIÓN POR REACTANCIA DE DISPERSIÓN EN LA ARMADURA.

La corriente  $I_a$  en el devanado de la armadura produce un flujo. Una parte de este llamada flujo de dispersión, solo enlaza al devanado de la armadura y origina una reactancia de dispersión  $X_a$ , la reactancia de dispersión ocasiona una caída de tensión  $jI_a X_a$  la cual está en adelanto respecto a  $I_a$  en  $90^\circ$  [1].

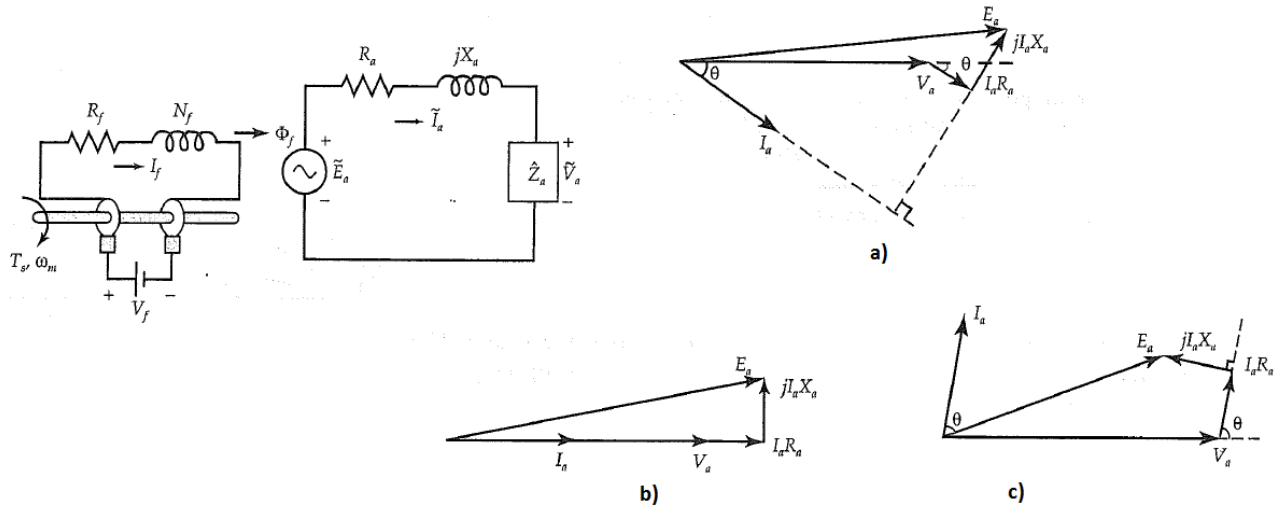


Figura 2.8 Circuito equivalente y diagrama fasorial de un generador síncrono, con factor de potencia en atraso, unitario y adelanto - Máquinas eléctricas y transformadores Guru tercera edición [1].

La Figura 2.8 ilustra el factor de potencia al cual podría ser sometido el generador, en atraso  $I_a$  respecto al tensión, unitario y cuando  $I_a$  adelanta al tensión  $V_a$  en un ángulo  $\theta$  [1].

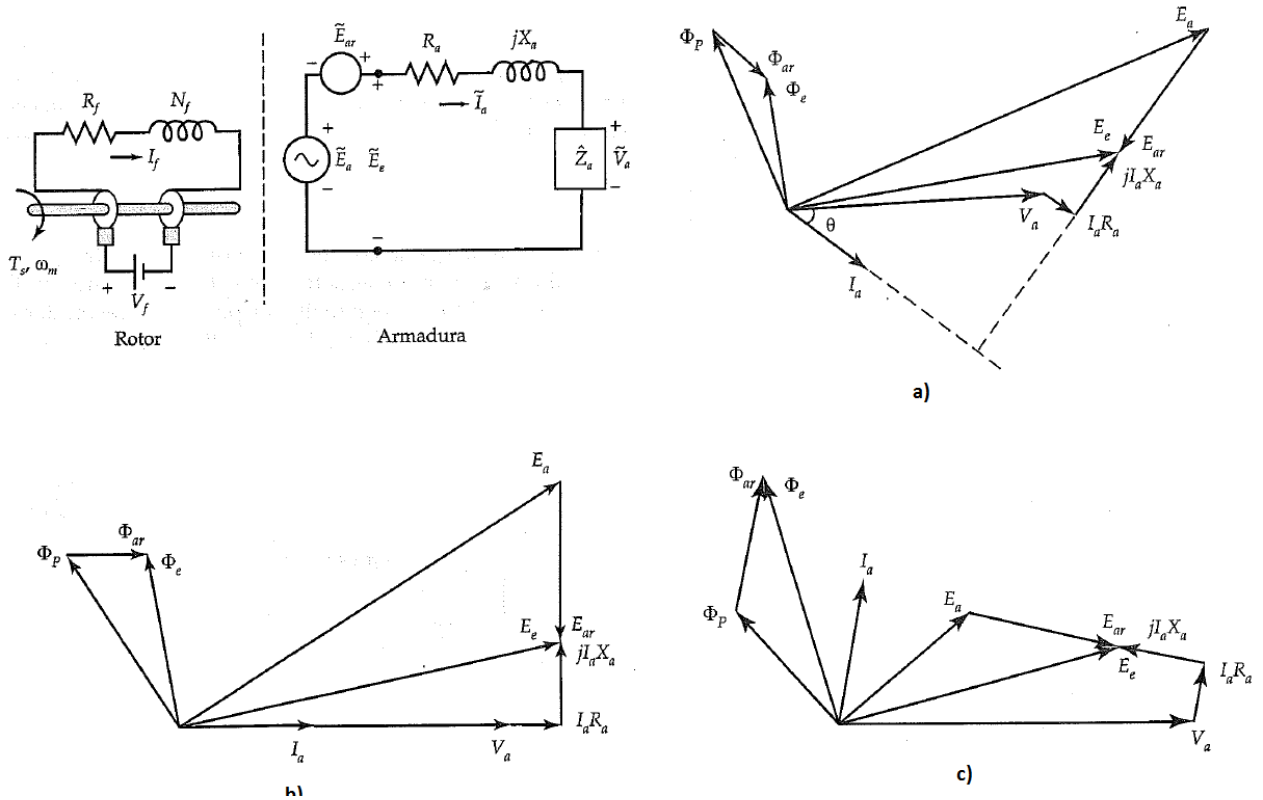


Figura 2.9 Relación de la reacción de armadura con la fuerza magnetomotriz, a) en atraso, b) en factor de potencia unitario, c) en adelanto - Máquinas eléctricas y transformadores Guru tercera edición [1].

Por lo que la tensión en los terminales  $V_a$  se obtiene restando las caídas de tensión  $I_a R_a$  y  $jI_a X_a$  de  $E_a$  [1] de la siguiente manera:

$$E_a = V_a + I_a(R_a + jX_a)$$

Del diagrama fasorial debe resultar evidente que la reacción de armadura ha reducido el flujo efectivo por polo cuando el factor de potencia es unitario así mismo el tensión en los terminales es menor que el tensión generado, además es posible determinar de los diagramas fasoriales que el flujo resultante es menor con la reacción de armadura para un factor de potencia en atraso, además el tensión en los terminales  $V_a$  es más alto que el tensión generado  $E_a$  cuando el factor de potencia está en adelanto, a su vez el flujo resultante es mayor con la reacción de armadura para el factor de potencia en adelanto, además el tensión en los terminales  $V_a$  es más bajo que el tensión generado  $E_a$  cuando el factor de potencia está en atraso [1].

Así que el flujo por polo  $\Phi_p$  o flujo del inductor es diferente para cada una de las tres distintas cargas además que conlleva un ajuste en la corriente de campo  $I_f$  cada vez que se modifica la carga [3].

El análisis hasta ahora visto, se ha considerado para una máquina síncrona con entrehierro uniforme, es decir, rotor cilíndrico.

Se deduce además del diagrama fasorial que la **f.e.m.** de reacción de armadura  $E_{ar}$  está en atraso respecto de la corriente  $I_a$  en  $90^\circ$  que puede expresarse como:

$$E_{ar} = -jI_a X_m \quad ; \quad \text{donde } X_m \text{ es reactancia de magnetización.}$$

$X_m$  es una constante de proporcionalidad denominada reactancia de magnetización que es además la auto-inductancia del inducido [1].

Tanto la reactancia de magnetización como la de dispersión están presentes al mismo tiempo, lo cual resulta muy difícil separar una de la otra [1], por lo que se combinan y a ese resultado se le denomina como reactancia síncrona:

$$X_S = X_m + X_a$$

Esta reactancia es una magnitud ficticia que representa en un único término los efectos combinados de dispersión y reactancia del inducido o armadura, y para una máquina en la zona de impedancia síncrona no saturada (régimen lineal) además que conlleva a una magnitud constante [1]. Dicha reactancia síncrona suele ser muy grande en comparación con la resistencia de la armadura, por lo que puede referirse a una impedancia síncrona denominada:

$$Z_S = R_a + jX_S$$

Lo que determina en función de la tensión en los terminales como:

$$V_a = E_a - I_a(R_a + jX_S) = E_a - I_a Z_S$$

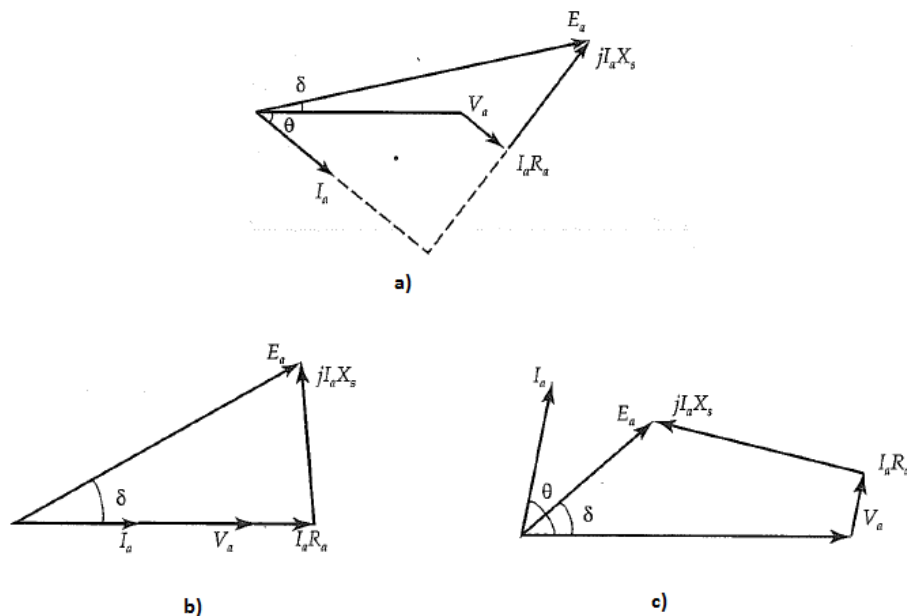


Figura 2.10 Relación de reactancia síncrona en función la tensión de los terminales y la tensión en vacío, a) en atraso, b) unitario y c) en adelante - Máquinas eléctricas y transformadores Guru tercera edición [1].



Es necesario aclarar que el tensión en los terminales varía dependiendo de la conexión trifásica del sistema, es decir si es en delta o estrella [2], de ser una configuración estrella Y el tensión en los terminales está dado por:

$$V_t = V_L = \sqrt{3}V_a$$

[2] Si se conecta en delta  $\Delta$  la tensión sería:

$$V_t = V_a$$

Aunque generalmente las generadoras disponen de un sistema conectado en configuración estrella, [5] se prefiere una conexión en estrella y el neutro conectado a tierra que una conexión en delta por las siguientes razones:

1. El tensión por fase es de sólo  $\frac{1}{\sqrt{3}}$  o 58% del tensión entre líneas. Esto significa que la tensión más alta entre un conductor del estator y el núcleo de éste conectado a tierra es de sólo el 58% de la tensión de línea. Por consiguiente, podemos reducir la cantidad de aislante en las ranuras, lo que, a su vez, nos permite incrementar el diámetro de los conductores. Un conductor más grande nos permite incrementar la corriente y, por ende, la salida de potencia de la máquina [5].
2. Cuando un generador síncrono está sometido a carga, la tensión inducida en cada fase se distorsiona y la forma de onda deja de ser sinusoidal. La distorsión se debe principalmente a un indeseado tensión de tercer armónico cuya frecuencia es tres veces la frecuencia fundamental. Con una conexión en Y, los armónicos de línea a neutro distorsionantes no aparecen entre las líneas porque se cancelan entre sí. Por consiguiente, las tensiones de línea permanecen sinusoidales en todas las condiciones de carga. Desafortunadamente, cuando se utiliza una conexión delta, las tensiones armónicas no se cancelan, sino que se acumulan. Como la conexión delta es cerrada, producen una corriente circulante de tercer armónico, la cual incrementa las pérdidas eléctricas  $I^2R$  [5].

## 2.9. REGULACIÓN DE TENSIÓN.

La regulación de tensión en un generador síncrono se define como la razón de cambio en la tensión en los terminales desde la tensión sin carga hasta plena carga [1], ya que  $E_a$  es la tensión sin carga y  $V_a$  la tensión con carga plena en los terminales la regulación porcentual de tensión es:

$$RV\% = \frac{E_a - V_a}{V_a} * 100$$

## 2.10. POTENCIA Y PAR EN LOS GENERADORES SÍNCRONOS.

El rotor de un generador síncrono está conectado a una máquina impulsora que puede ser un motor de c.c., una turbina de vapor, una turbina de gas, un motor diésel o equipos similares. Si el impulsor ejerce un par de  $T_s$  en el eje con una velocidad angular  $\omega_s$  la potencia mecánica suministrada al rotor viene dada por  $T_s\omega_s$  en consecuencia la potencia mecánica alimentada al generador está dada [1]:

$$P_{inmec} = T_s\omega_s$$

La potencia de entrada de c.c. a un rotor devanado es  $V_f I_f$ ,  $V_f$  es la tensión de c.c. a través del devanado de campo e  $I_f$  la corriente a través de este, lo que conlleva a la potencia total alimentada [1]:

$$P_{in} = T_s\omega_s + V_f I_f$$

Las pérdidas en un generador síncrono consiste en las pérdidas por rotación (perdida mecánica y magnética) la perdida en el cobre en el devanado de armadura, la perdida por excitación del campo en el devanado del campo, además de las pérdidas por corrientes parásitas se restan de la entrada de potencia para obtener la potencia desarrollada por la armadura. Al restar las pérdidas en el cobre en la armadura de la potencia desarrollada se obtiene la potencia de salida de un generador síncrono [1].

Si  $V_a$  es la tensión de la carga por fase,  $I_a$  es la corriente de carga por fase y  $\theta$  es el ángulo de fase entre  $V_a$  y  $I_a$  la potencia de salida de un generador síncrono está dada por [1]:

$$P_o = 3V_a I_a \cos \theta$$

La pérdida en el cobre en el devanado de armadura es:

$$P_{co} = 3I_a^2 R_a$$

Las pérdidas por rotación  $P_r$  y las pérdidas por cargas parásitas  $P_{st}$ , entonces la potencia de entrada es:

$$P_{in} = 3V_a I_a \cos \theta + 3I_a^2 R_a + P_r + P_{st} + V_f I_f$$

Como el rotor gira a una velocidad constante, las pérdidas de rotación es constante, las pérdidas de devanado de campo es constante, además de suponer que las pérdidas parásitas son constantes, es posible agrupar estas pérdidas y trasladarlas como una pérdida total constante  $P_c$ , la cual se denomina [1]:

$$P_c = P_r + P_{st} + V_f I_f$$

Puesto que las pérdidas en el cobre en la armadura dependen de la corriente de carga, se considera una pérdida variable, por lo que la eficiencia del generador se define de la siguiente manera:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{3V_a I_a \cos \theta}{3V_a I_a \cos \theta + 3I_a^2 R_a + P_c}$$

Para establecer un punto de máxima eficiencia se debe cumplir la condición:

$$P_c = 3I_a^2 R_a$$

Se establece que la potencia  $P_c$ , es decir, las pérdidas total constante que consiste las pérdidas por rotación, parásitas y de campo, se define entonces, que al ser igual a las pérdidas en el cobre, se tendrá la máxima eficiencia del sistema de generación eléctrica, a mayores pérdidas constantes el sistema bajará su eficiencia [1].

Del diagrama fasorial de la figura 2.10 se pueden establecer parámetros para una relación de potencia aproximada, tomando el ángulo  $\delta$  entre  $\mathbf{V}_a$  y  $\mathbf{E}_a$ , además como se indicó anteriormente que la resistencia por fase del generador síncrono suele ser muy pequeña en comparación con la reactancia síncrona por lo que podría despreciarse, por lo tanto se puede establecer la siguiente ecuación [1].

Relación de potencia aproximada:

$$P_o = \frac{3V_a E_a \text{sen } \delta}{X_s}$$

Cuando un generador síncrono opera a una velocidad constante con una corriente de campo constante  $X_s$  y  $E_a$  son constantes además del valor  $V_a$  es constante bajo estas condiciones por lo que la potencia de salida varía en función del ángulo  $\delta$  que es la separación angular de  $E_a$  y  $V_a$ . La ecuación anterior se denomina relación del ángulo de potencia, en función de  $\delta$  [1].

Para una cantidad de corriente de campo específica y cierta tensión en los terminales [1], la potencia máxima de salida  $P_{om}$  (o potencia desarrollada  $P_{dm}$ ) de un generador síncrono es:

$$P_{dm} = P_{om} = \frac{3V_a E_a}{X_s}$$

En función de la potencia desarrollada aproximada [1] se establece el par desarrollado:

$$T_d = \frac{3V_a E_a \text{sen} \delta}{X_s \omega_s} ; \text{ En función del ángulo de potencia } \delta.$$

Además se define [1] el par máximo desarrollado aproximado el cual es:

$$T_{dm} = \frac{3V_a E_a}{X_s \omega_s}$$

## **2.11. MEDICIÓN DE PARÁMETROS ELÉCTRICOS DEL MODELO DEL GENERADOR SÍNCRONO.**

Pruebas a los generadores síncronos, para obtener estos parámetros se llevan a cabo tres pruebas las cuales son:

- La prueba de resistencia [1].
- Prueba de circuito abierto [1].
- Prueba de corto circuito [1].

### **2.12. PRUEBA DE RESISTENCIA.**

Esta prueba se realiza para medir la resistencia del devanado en la armadura de un generador síncrono cuando se halla en reposo y el devanado de campo está abierto, la resistencia se mide entre dos líneas al mismo tiempo y se toma el promedio de tres lecturas de resistencia como el valor medio de la resistencia  $R_L$  de línea a línea [1].

Para un generador síncrono en configuración en estrella Y la resistencia de fase  $R_a$  se calcula:

$$R_a = 0.5R_L$$

Para un generador síncrono en configuración delta  $\Delta$  la resistencia de fase  $R_a$  se calcula:

$$R_a = 1.5R_L$$

### **2.13. PRUEBA DE CIRCUITO ABIERTO.**

La prueba de circuito abierto, o prueba sin carga se efectúa impulsando el generador a su velocidad nominal al tiempo que se deja abierto el devanado de armadura. La corriente de campo se varía en pasos apropiados y se registran los valores correspondientes del tensión de circuito abierto entre dos pares cualquiera de terminales de devanado de armadura, la corriente de campo puede aumentarse hasta que el tensión a circuito abierto sea el doble del valor especificado, de los datos registrados para el tensión a circuito abierto es posible calcular el tensión por fase (circuito abierto) [1].

Graficar la corriente de campo contra el tensión por fase de circuito abierto, es decir el tensión en función de la corriente de campo, se obtiene la gráfica denominada curva de saturación a circuito abierto, con el nombre de CCA [1].

Dicha curva sigue una tendencia de línea recta en tanto el circuito magnético del generador síncrono no se sature, debido a que en la región lineal el entrehierro consume la mayor parte de la **f.m.m.**, la recta recibe el nombre de línea del entrehierro, a medida que la línea de saturación se establece la curva de circuito abierto comienza a desviarse de la línea del entrehierro, se considera como curva de magnetización del generador síncrono en condiciones sin carga [1].

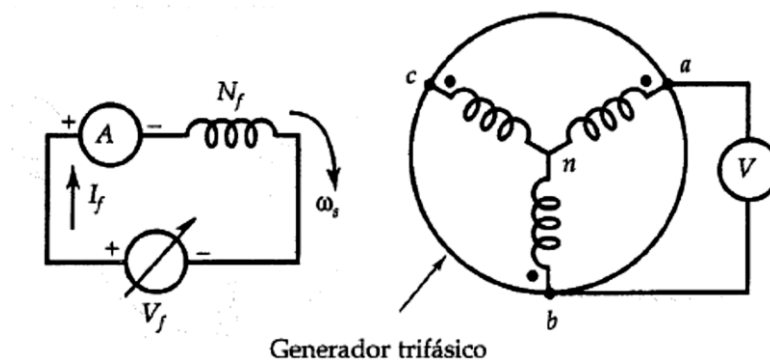


Figura 2.11 Diagrama del circuito en configuración estrella Y, para realizar la prueba de circuito abierto - Máquinas eléctricas y transformadores Guru tercera edición [1].

#### 2.14. PRUEBA DE CORTOCIRCUITO.

Esta prueba brinda información acerca de las potencialidades de corriente de un generador síncrono, se lleva a cabo impulsando el generador a su velocidad nominal, con las terminales del devanado de la armadura en cortocircuito, se coloca un amperímetro en serie con una de las tres líneas de cortocircuito, entonces se incrementa gradualmente la corriente de campo y se registra el valor correspondiente de la corriente. La corriente máxima de armadura en cortocircuito no debe exceder el doble de la corriente especificada del generador, con base a estos datos se calcula la corriente por fase en cortocircuito, a partir de los cuales se hace la gráfica en función de la corriente de campo, dicha grafica recibe el nombre de característica en corto circuito de un generador, CCC [1].

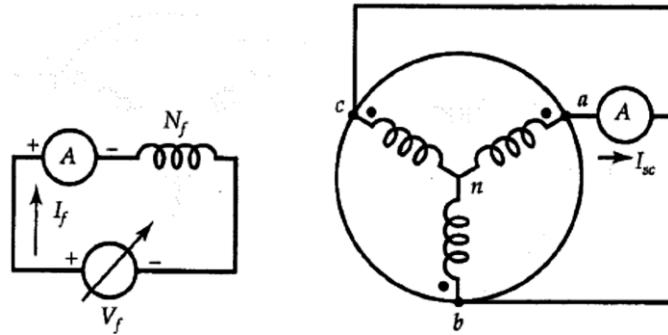


Figura 2.12 Diagrama del circuito en estrella Y, para ejecutar una prueba de corto circuito - Máquinas eléctricas y transformadores Guru tercera edición [1].

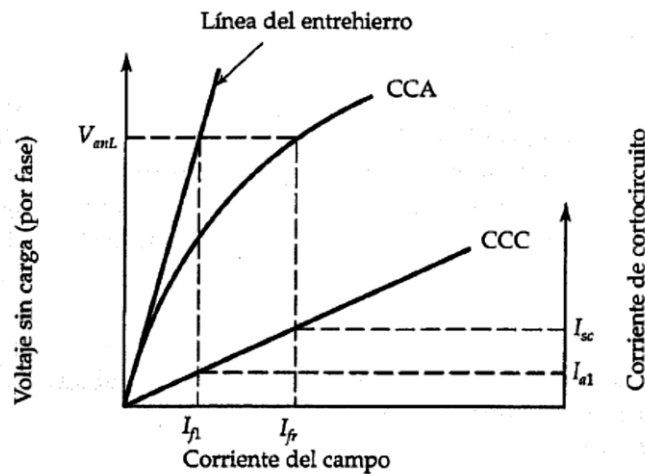


Figura 2.13 Graficas características de circuito abierto y de corto circuito - Máquinas eléctricas y transformadores Guru tercera edición [1].

Puesto que la tensión en los terminales en condiciones de cortocircuito es igual a cero, la tensión por fase generada debe ser igual a la caída de tensión a través de la impedancia síncrona, para calcular la impedancia por fase síncrona a partir de las características de circuito abierto y cortocircuito [1] se lleva a cabo el siguiente procedimiento:

1. Se encuentra el valor de corriente de campo  $I_{fr}$  correspondiente a la tensión especificado por fase  $V_{anL}$ , a partir de la curva de circuito abierto.
2. Se encuentra el valor de la corriente en cortocircuito  $I_{sc}$  a partir de la curva de cortocircuito para el mismo valor de corriente de campo  $I_{fr}$ .
3. La magnitud de la impedancia síncrona es igual al tensión a circuito abierto dividido entre la corriente de corto circuito, es decir:

$$Z_s = \frac{V_{anL}}{I_{sc}}$$

Como la resistencia de cada devanado por fase de la armadura ya se conoce dada la prueba de resistencia, la reactancia síncrona del generador es (este método es casi exacto para la zona no saturada dada su tendencia lineal [1]):

$$X_s = \sqrt{Z_s^2 - R_a^2}$$

En realidad, a partir de ambas curvas, es decir, la curva de circuito abierto y la curva de cortocircuito, es posible graficar la impedancia síncrona en función de la corriente de campo, la forma de la curva de impedancia síncrona se muestra en la figura siguiente:

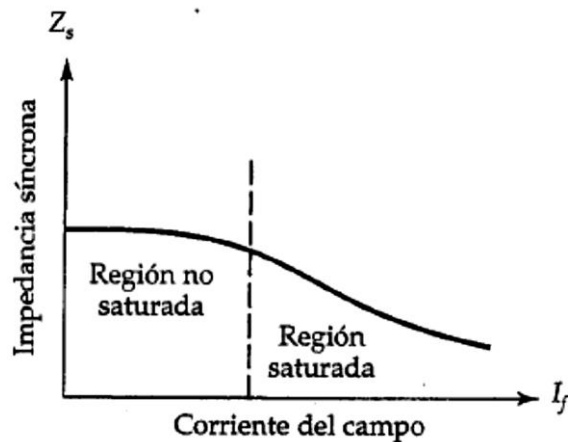


Figura 2.14 Curva característica de la impedancia síncrona en función de la corriente de campo - Máquinas eléctricas y transformadores Guru tercera edición [1].

En tanto la densidad de flujo se encuentra por debajo del punto de inflexión de la curva de saturación, el flujo es proporcional a la **f.m.m.** aplicada, la impedancia síncrona es casi constante y se conoce como impedancia síncrona no saturada. Cuando el generador opera arriba del punto de inflexión de su curva de saturación, el tensión generado es más pequeño de lo que hubiera sido sin saturación, en consecuencia la impedancia síncrona saturada es menor que su valor no saturado, esta impedancia puede determinarse al nivel de tensión nominal del generador, la línea del entrehierro proporciona la corriente de campo necesaria  $I_{f1}$  al tensión nominal  $V_{anL}$  para la impedancia síncrona no saturada y la corriente de cortocircuito correspondiente a  $I_{a1}$  por tanto la impedancia síncrona no saturada [1] está dada por:

$$Z_{su} = \frac{V_{anL}}{I_{a1}}$$



En consecuencia, debe resultar evidente que la impedancia síncrona de un generador síncrono puede variar en forma considerable desde carga ligera hasta plena carga [1].

## 2.15. CARACTERÍSTICAS EXTERNAS AL GENERADOR SÍNCRONO.

La tensión de línea nominal de un generador síncrono depende de su capacidad. En general, mientras más grande es la capacidad de potencia, más alto es la tensión. Sin embargo, la tensión nominal entre líneas rara vez excede los 25 kV porque el aislamiento incrementado en las ranuras ocupa un valioso espacio a expensas de los conductores de cobre [5]. Las características externas de un generador síncrono muestran la variación de tensión en las terminales con la carga de un generador independiente. Puesto que  $E_a$  y  $X_s$  son constantes, el tensión en los terminales  $V_a$  depende de la magnitud de la corriente de carga y de su factor de potencia, aunque la magnitud de tensión de fase  $E_a$  es constante, su fase o ángulo de potencia tiene libertad para cambiar.

### ➤ Factor de potencia en atraso:

Para una carga inductiva  $Z_L = R_L + jX_L$  la corriente de carga está en atraso respecto del tensión en los terminales en un ángulo  $\theta$ , para un ángulo dado  $\theta$  del factor de potencia, el aumento en la corriente de la carga ocasiona la disminución de tensión en las terminales, sin embargo para una magnitud constante de la corriente de la carga, esa tensión disminuye aún más con el decremento del factor de potencia [1].

### ➤ Factor de potencia unitario:

Para una carga resistiva  $Z_L = R_L$ , el tensión en los terminales  $V_a$  y la corriente de la carga  $I_a$  están en fase, el incremento de la corriente de carga ocasiona que se incremente la caída de tensión a través de la reactancia síncrona además de aumentar el ángulo de potencia y que disminuya el tensión en los terminales [1].

➤ **Factor de potencia en adelanto:**

Para una carga capacitiva  $Z_L = R_L + jX_C$ , la corriente de carga adelanta a la tensión en los terminales  $V_a$  en un ángulo  $\theta$ , el tensión en los terminales se incrementa con el aumento de la corriente de carga, además que al aumentar el ángulo del factor de potencia aumenta el valor del tensión en los terminales. Para que un generador opere independientemente es posible ajustar la corriente de campo (excitación) para cada carga, de modo que el generador alimente la carga especificada a su tensión nominal, al variar la corriente de la carga sin hacer algún ajuste en la corriente de excitación se observa que [1]:

- Para una carga resistiva, la tensión en los terminales se incrementa con la disminución de la corriente de carga.
- Para una carga inductiva, el tensión en los terminales también se incrementa con la disminución de la corriente de carga, sin embargo, el incremento es mayor para una carga inductiva que para una resistiva.
- Para una carga capacitiva, la tensión en los terminales decrece con la disminución de la corriente de línea [1].

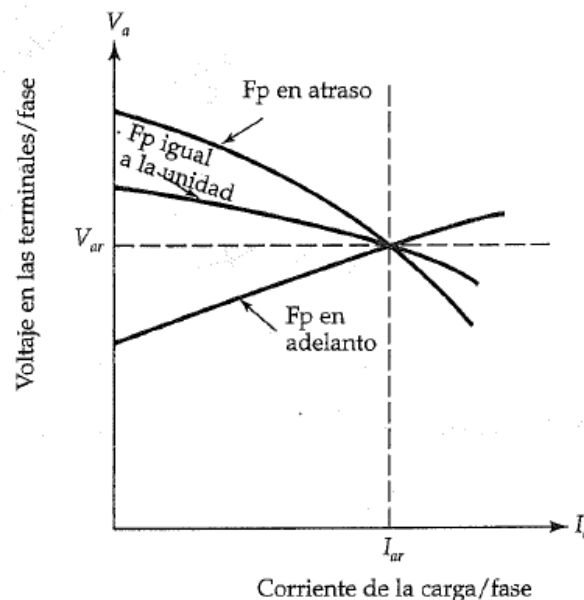


Figura 2.15 Características externas de un generador síncrono independiente ajustado para operar con carga nominal sujeta a distintas condiciones de carga - Máquinas eléctricas y transformadores Guru tercera edición [1].

## 2.16. ANÁLISIS NO LINEAL DE LA MÁQUINA SÍNCRONA: MÉTODO DE POTIER O DEL FACTOR DE POTENCIA NULO.

Se aplica en las máquinas síncronas de rotor cilíndrico que trabajan en la zona de saturación, debido a que las **f.e.m.s.** no son proporcionales a los valores de **f.m.m.** ni de los flujos resultantes, el flujo del inducido o de armadura, el flujo del inductor o del polo y el flujo efectivo o resultante, los flujos están en fase con la **f.m.m.** resultante en los polos, armadura y su suma combinada, esto debido a la no linealidad de de la impedancia síncrona, en la zona de saturación. El método de Potier determina el valor de la caída de la reactancia de dispersión  $I_a X_a$  y la **f.m.m.** que produce la reacción del inducido o reacción de armadura, que establece el cálculo del nivel de regulación [3].

Para calcular la regulación por **el método de Potier** es preciso conocer la curva de vacío que representa la **f.e.m.**  $E_a$  en función de la **f.m.m.** de excitación  $F_e$  (proporcional a  $\phi_e$ , flujo efectivo), y además es necesario realizar un ensayo con carga inductiva pura, representando en un gráfico la curva tensión de salida respecto a la **f.m.m.** de excitación, para una corriente de inducido constante e igual a la intensidad asignada. En la Figura 2.16 se muestra el diagrama de conexiones de este ensayo con carga reactiva o de factor de potencia nulo [3].

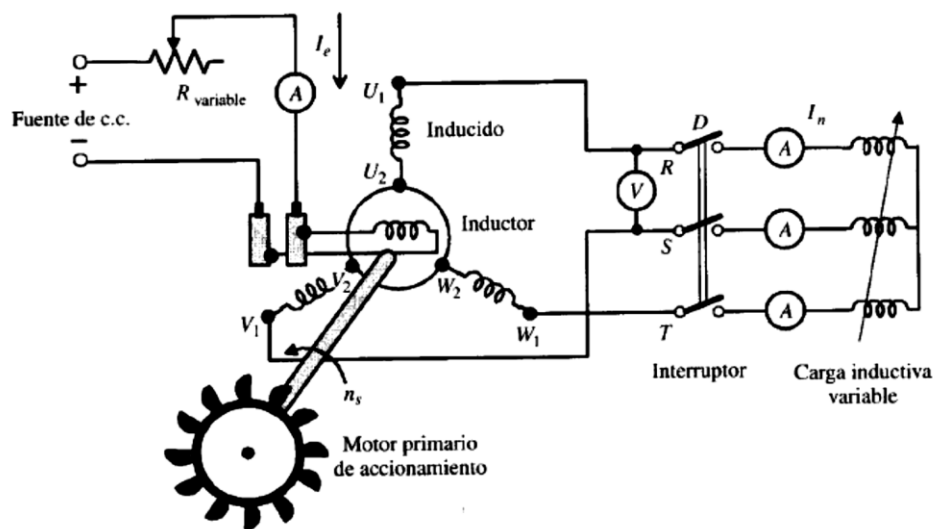


Figura 2.16 Ensayo de carga inductiva pura, es decir, factor de potencia nulo, en el alternador - Máquinas eléctricas Jesús Fraile Mora quinta edición [3].

En el supuesto de despreciar la resistencia de armadura frente a su reactancia del diagrama fasorial general conlleva a un ajuste en las f.m.m. resultantes.

De la Figura 2.17, se establecen ciertos parámetros que surgen a la vista, se observa que los fasores  $V$  equivalente a  $V_a$ ,  $X_\sigma I$  que equivale a  $X_a I_a$  y  $E_r$  están en fase y de igual manera las f.m.m. resultantes  $F_e$  ( $F_{\text{efectivo}}$ ),  $F_r$  ( $F_{\text{polo o rotor}}$ ) y  $-F_i$  ( $F_{\text{armadura}}$ ), en consecuencia tienen la relación [3] siguiente:

$$F_e = F_r + F_i ; \text{ Fuerza magnetomotriz Equivalente a los flujos } \varphi_e = \varphi_p + \varphi_{ar}$$

Además de:

$$E_r = V + X_\sigma I ; E_r = V_a + X_a I_a$$

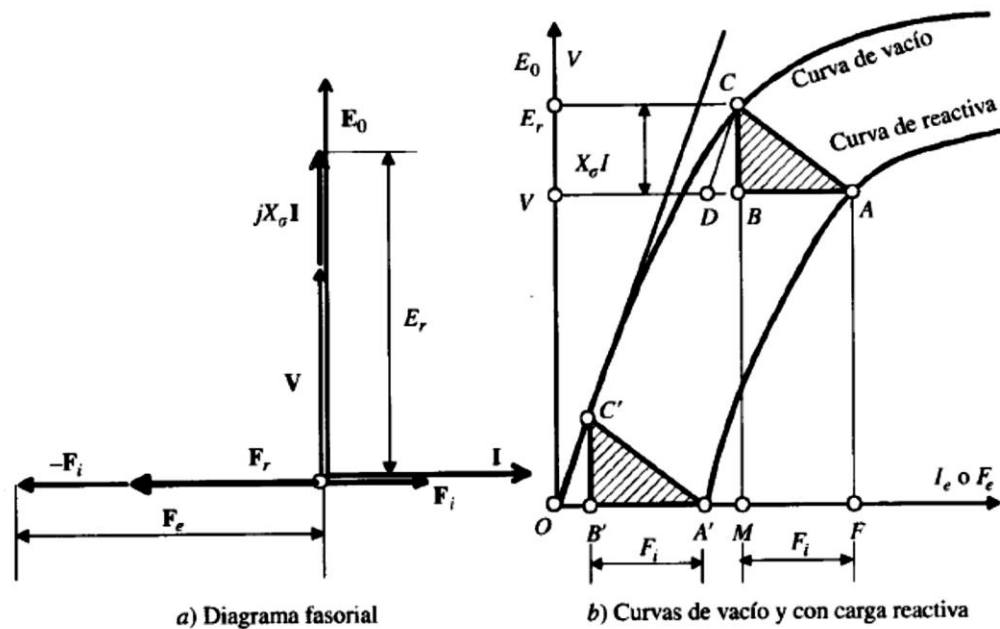


Figura 2.17 2.17 Determinación de la reactancia de Potier - Máquinas eléctricas Jesús Fraile Mora quinta edición [3].

Se deduce de la Figura 2.17 que la reacción de inducido o armadura es contraria a la f.m.m. efectiva, lo que era de esperar al ser la carga inductiva, ya que produce un efecto desmagnetizante [3].

En la Figura 2.17b se ha representado la característica reactiva junto con la de vacío. Se observa que las dos curvas son semejantes, lo cual es lógico, ya que en ambas el circuito magnético es el mismo. El desplazamiento entre ambas curvas se debe a la **f.m.m.** de reacción de inducido y a la **f.m.m.** necesaria para compensar la caída de tensión por reactancia de dispersión.

De la curva reactiva se deduce que cuando se tiene la tensión asignada en bornes **V**, la **f.m.m.** necesaria en la excitación **F<sub>e</sub>** es igual a *OF*; si *MF* indica la **f.m.m.** de reacción de inducido **F<sub>i</sub>**, la **f.m.m.** resultante **F<sub>r</sub>**, de acuerdo con  $\mathbf{F}_e = \mathbf{F}_r + \mathbf{F}_i$  corresponderá al segmento *OM*. Esta **f.m.m.** induce una f.e.m. resultante **E<sub>r</sub>** = *MC*, teniendo en cuenta  $\mathbf{E}_r = \mathbf{V} + \mathbf{X}_\sigma \mathbf{I}$  la representación gráfica en la figura 2.17b, de donde se deduce la caída de tensión por reactancia de dispersión viene definida por el segmento *CB*. Si se supone constante la reactancia **X<sub>σ</sub>** (independiente de la saturación de la máquina) y la corriente de carga **I (I<sub>a</sub>)**, se pueden obtener los demás puntos de la característica reactiva, desplazando paralelamente el triángulo *ABC*, denominado triángulo de Potier, de tal forma que si el vértice *C* recorre la curva de vacío, el vértice *A* describirá la curva reactiva. En particular, cuando la base del triángulo se apoya en el eje de abscisas se obtiene el punto *A'* de la curva de carga. Este punto tiene una gran importancia, ya que corresponde a la excitación *OA'* necesaria para que circule la corriente de plena carga en cortocircuito, por lo que la magnitud *OA'* puede obtenerse de la característica de cortocircuito.

Esta propiedad geométrica permite resolver el problema inverso, que es deducir la caída **X<sub>σ</sub>I (I<sub>a</sub>X<sub>σ</sub>)** y la **f.m.m.** **F<sub>i</sub>** a la tensión asignada, sin necesidad de conocer la característica completa de cortocircuito.

En efecto, conociendo únicamente los puntos A y A' puede construirse el triángulo ABC, que permite determinar las dos magnitudes citadas. Si en la Figura 2.17b se traza en la ordenada correspondiente a la tensión asignada, desde el punto A, el segmento AD = A'O (Determinado por la característica de cortocircuito para el valor dado de la corriente I ( $I_a$ )) y se traza la línea DC paralela a la recta del entrehierro, entonces se obtiene el punto C de intersección con la de vacío. De esta construcción se observa que:

$$CB = X_\sigma I ; AB = F_i$$

Conocidas estas magnitudes, podrá construirse el diagrama fasorial del alternador, para deducir posteriormente la regulación de la máquina y la f.e.m.  $E_a$  de vacío. Desde el punto de vista riguroso, el segmento CB no da realmente la caída de tensión en la reactancia de dispersión, sino en una nueva reactancia denominada reactancia de Potier, que es algo superior a  $X_\sigma$ . Esto se debe a que la curva de vacío que expresa en general la relación  $E_o = f(F_e)$  no es la misma que la que define la f.e.m. resultante  $E_r$  en función de  $F_r$  y que se han considerado idénticas. Esta divergencia se explica por el aumento del flujo de dispersión del rotor a medida que aumenta la corriente de excitación. La diferencia entre la reactancia de dispersión y de Potier no es muy grande en las máquinas de rotor cilíndrico, y este método da resultados bastante correctos en los turboalternadores. Inclusive, la experiencia demuestra que el empleo de este diagrama de Potier en máquinas con polos salientes da resultados bastante aceptables, si se efectúa la construcción del triángulo de Potier para valores de la excitación correspondientes a 1.2-1.3 veces la tensión asignada. Por ello este método que teóricamente sólo es exacto para las máquinas de rotor cilíndrico, se aplica en la práctica también a las máquinas con polos salientes. [3]<sup>6</sup>.

---

<sup>6</sup> Para un ejemplo de aplicación revisar Máquinas eléctricas por Jesús Fraile Mora 5ta Edición paginas 410-415

## 2.17. GENERADOR SÍNCRONO DE POLOS SALIENTES.

## 2.18. CIRCUITO EQUIVALENTE GENERADOR DE POLOS SALIENTES.

La explicación precedente de un generador síncrono sólo es satisfactoria cuando el rotor tiene construcción cilíndrica. Un rotor cilíndrico presenta un entrehierro casi uniforme, y la variación en la reluctancia del entrehierro alrededor de su periferia, debida a las ranuras, es despreciable. Por otro lado, un rotor de polos salientes tiene un entrehierro más grande en la región entre los polos que en la región apenas por arriba de ellos, como resulta evidente en la figura 2.18. Por tanto, cabe esperar que las reluctancias de las dos regiones en un generador de polos salientes difieran en forma significativa [1].

Para explicar tal diferencia, la reactancia síncrona se divide en dos reactancias. La componente de la reactancia síncrona a lo largo del eje polar (eje  $d$ ) comúnmente se llama reactancia síncrona del eje directo,  $X_d$ , y la otra componente a lo largo del eje entre los polos (eje  $q$ ) se denomina reactancia síncrona del eje de cuadratura,  $X_q$ . La corriente de la armadura  $I_a$  también se reduce a dos componentes, la componente directa  $I_d$  y la componente de cuadratura  $I_q$ . La componente directa  $I_d$  produce el campo a lo largo del **eje  $d$**  y está en atraso respecto de  $E_d$  en  $90^\circ$ . La componente de cuadratura  $I_q$  produce el campo a lo largo del **eje  $q$**  y está en fase con  $E_a$  [1].

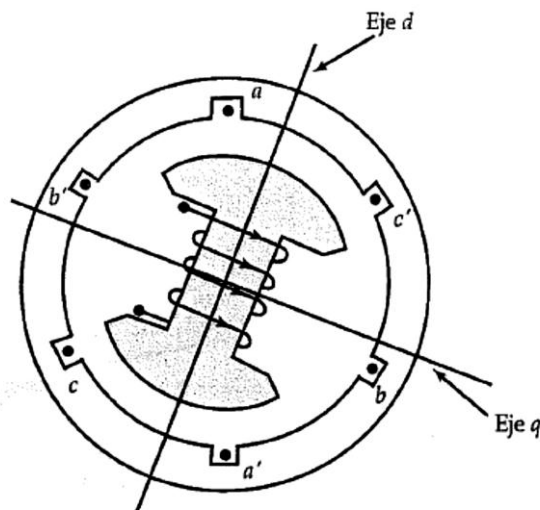


Figura 2.18 Generador síncrono bipolar con rotor de polos salientes - Máquinas eléctricas y transformadores Guru tercera edición [1].

Si  $E_a$  es la tensión generada por fase en condiciones sin carga y  $E_d$  y  $E_q$  son la **f.e.m.s** inducidas en el devanado de la armadura por las componentes de la corriente  $I_d$  e  $I_q$ , en el eje de directa y cuadratura respectivamente, por lo que conlleva a la tensión en los terminales como:

$$V_a = E_a + E_d + E_q - I_a R_a$$

Sin embargo, las **f.e.m.s.** inducidas  $E_d$  y  $E_q$  pueden expresarse en términos de  $X_d$  y  $X_q$  de la siguiente manera:

$$E_d = -jI_d X_d \quad ; \quad E_q = -jI_q X_q$$

Lo que conlleva a la siguiente sustitución:

$$E_a = V_a + jI_d X_d + jI_q X_q + I_a R_a$$

Si se expresa  $jI_d X_d$  como:

$$jI_d X_d = jI_d X_q + jI_d (X_d - X_q)$$

Por lo que se tiene que:

$$E_a = V_a + I_a R_a + jI_d X_q + jI_q X_q + jI_d (X_d - X_q)$$

$$E_a = V_a + I_a R_a + jI_a X_q + jI_d (X_d - X_q) \quad ; \quad E'_a = V_a + I_a R_a + jI_a X_q;$$

$$E_a = E'_a + jI_d (X_d - X_q) \quad ; \quad I_a = I_d + I_q$$

Con base a estas ecuaciones puede representarse un generador síncrono de polos salientes con un circuito equivalente [1].



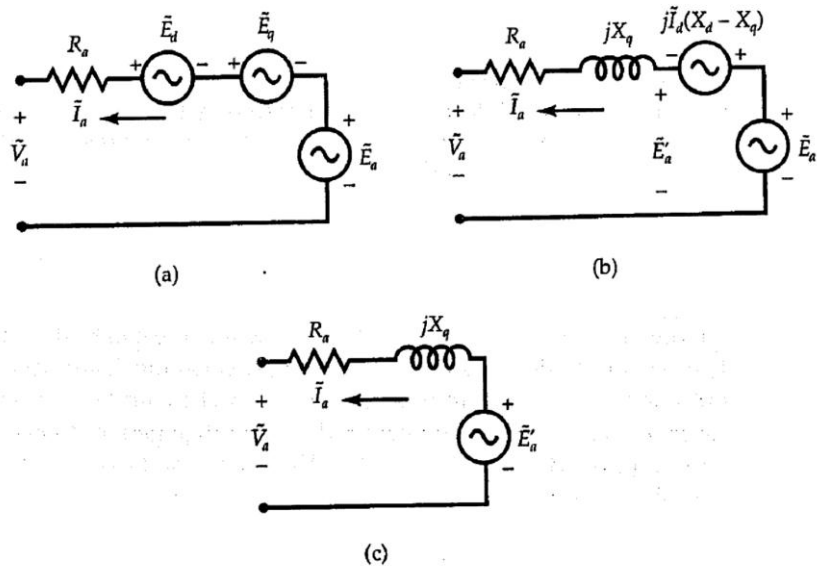


Figura 2.19 Representación del circuito equivalente de un generador síncrono de polos salientes - Máquinas eléctricas y transformadores Guru tercera edición [1].

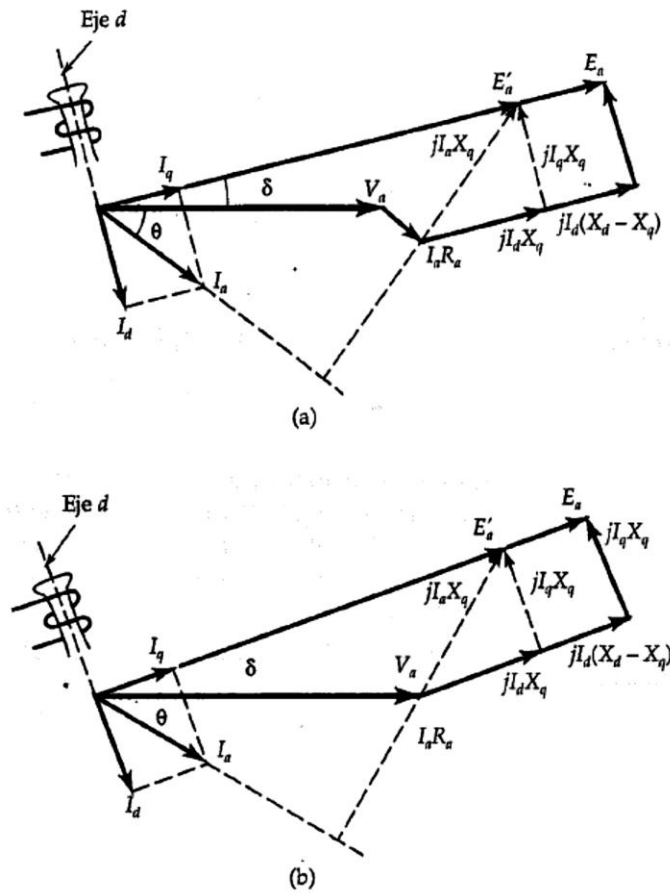


Figura 2.20 a) Diagrama fasorial de un generador síncrono de rotor de polos salientes, que tiene resistencia finita en el devanado de armadura y factor de potencia en atraso b) Diagrama fasorial de un generador síncrono de rotor de polos salientes con resistencia despreciable en el devanado de armadura y factor de potencia en atraso - Máquinas eléctricas y transformadores Guru tercera edición [1]

Puesto que  $\mathbf{E}'_a$  está en fase con  $\mathbf{E}_a$ , el ángulo de con el que  $\mathbf{E}'_a$  está en adelanto respecto del tensión en los terminales  $\mathbf{V}_a$  es el ángulo de potencia  $\delta$  por tanto  $\mathbf{E}'_a = \mathbf{V}_a + \mathbf{I}_a \mathbf{R}_a + \mathbf{jI}_a \mathbf{X}_q$  sirve para determinar el ángulo de potencia en los terminales, la corriente de la carga y los parámetros del generador, el tensión generado por fase  $\mathbf{E}_a$  puede determinarse a partir de  $\mathbf{E}_a = \mathbf{E}'_a + \mathbf{jI}_d(\mathbf{X}_d - \mathbf{X}_q)$  [1]. Del diagrama fasorial se obtiene la ecuación siguiente para determinar el ángulo de potencia  $\delta$ :

$$\tan \delta = \frac{I_a X_q \cos \theta - I_a R_a \sin \theta}{V_a + I_a (R_a \cos \theta + X_q \sin \theta)}$$

La potencia de salida puede calcularse como:

$$P_o = 3V_a [I_d \sin \delta + I_q \cos \delta]$$

La potencia desarrollada está dada por:

$$P_d = \frac{3V_a E_a \sin \delta}{X_d} + \frac{3(X_d - X_q)}{2X_d X_q} * V_a^2 \sin 2\delta$$

El par desarrollado por un generador de polos salientes:

$$T_d = \frac{3V_a E_a \sin \delta}{X_d \omega_s} + \frac{3(X_d - X_q)}{2X_d X_q \omega_s} * V_a^2 \sin 2\delta$$

[1].



Al igual que en el caso de la teoría de rotor cilíndrico, cada tensión de reacción del inducido es directamente proporcional a su corriente del estator y está retrasado  $90^\circ$  [2].

Por lo que se define cada tensión de reacción del inducido de la siguiente manera:

$$E_d = -jI_d X_d \quad ; \quad E_q = -jI_q X_q$$

Y la tensión del estator es:

$$V_a = E_a - jI_d X_d - jI_q X_q$$

Ahora se deben incluir la resistencia y reactancia del inducido. Puesto que la auto-inductancia del inducido es  $X_a$  es dependiente del ángulo del rotor, por lo general se añade a las reactancias de reacción del inducido directas y en cuadratura para producir la reactancia síncrona directa y la reactancia síncrona en cuadratura, del generador:

$$X_d = x_d + X_a \quad \wedge \quad X_q = x_q + X_a$$

La caída de tensión por resistencia del inducido es igual a la resistencia del inducido multiplicada por la corriente del inducido  $I_a$  [2].

Por lo que, la expresión final de la tensión en los terminales  $V_a$  de un generador de polos salientes es la siguiente:

$$V_a = E_a - jI_d X_d - jI_q X_q - I_a R_a$$

Del cual [2] resulta el siguiente diagrama fasorial:

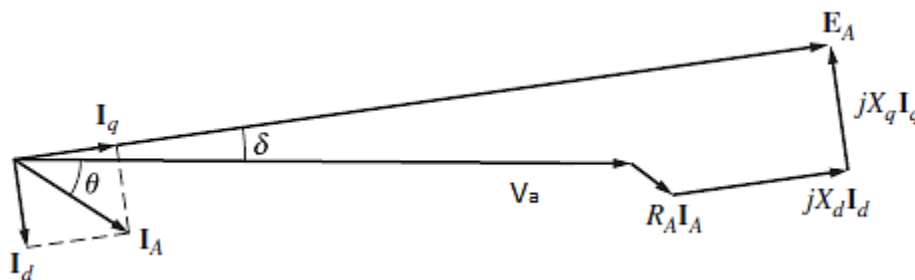


Figura 2.22 Diagrama fasorial de un generador síncrono de un generador de polos salientes - Máquinas eléctricas Chapman quinta edición [2].

Nótese que este diagrama fasorial requiere que se separe la corriente del inducido en componentes que están en paralelo y en cuadratura con  $E_a$ . Sin embargo, el ángulo entre  $E_a$  y  $I_a$  es  $\delta + \theta$ , que casi nunca se conoce hasta que se construye el diagrama.

Normalmente se conoce con anticipación el ángulo del factor de potencia  $\theta$ .

Se puede construir un diagrama fasorial sin saber de antemano el ángulo  $\delta$  como se muestra en la figura 2.23, las líneas solidas de esta figura son las mismas que se observan en la figura 2.22 mientras que las líneas punteadas presentan el diagrama fasorial como si la máquina tuviera un rotor cilíndrico con reactancia síncrona  $X_d$  [2].

Se puede encontrar el ángulo  $\delta$  de  $E_a$  si se utiliza la información conocida de los terminales del generador. Nótese que el fasor  $E_a''$  que está dado por:

$$E_a'' = V_a + R_a I_a + jX_q I_A$$

El cual es colineal a la tensión interna generado  $E_a$ . Puesto que  $E_a''$  está determinado por la corriente en las terminales del generador, es posible encontrar el ángulo  $\delta$  si se conoce la corriente del inducido  $I_a$ . Una vez que se conoce el ángulo  $\delta$ , se puede dividir la corriente del inducido en sus componentes directos y en cuadratura y se puede determinar la tensión interno generado [2].

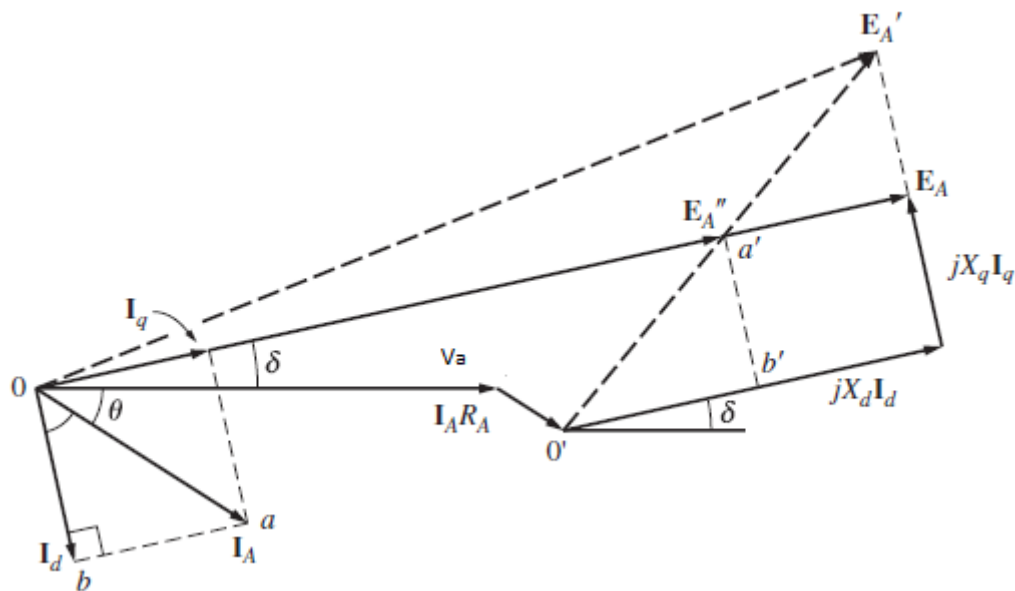


Figura 2.23 Construcción de un diagrama fasorial sin conocimiento previo de  $\delta$ .  $E_a''$  tiene el mismo ángulo que  $E_a$  y solo se puede determinar  $E_a''$  con la información que se obtiene en los terminales del generador. Por lo tanto, es posible encontrar el ángulo  $\delta$  y se puede dividir la corriente en los componentes d y q - Máquinas eléctricas Chapman quinta edición [2].

Cabe agregar que las componentes de corriente de directa y en cuadratura se pueden calcular de la siguiente manera:

$$I_d = \frac{E_a - V_a \cos \delta}{X_d} \qquad I_q = \frac{V_a \sin \delta}{X_q}$$

Se parte tomando como base el diagrama fasorial anterior, el cual arroja las componentes de corrientes de directa y cuadratura para establecer una ecuación que defina la potencia y el par desarrollado por la máquina síncrona de polos salientes [2].

## **2.20. OPERACIÓN EN PARALELO DE GENERADORES SÍNCRONOS.**

La generación, transmisión y distribución de energía eléctrica deben efectuarse en forma eficiente y confiable a un costo razonable con el menor número de interrupciones. Por eficiente se entiende que un alternador debe operar no sólo a su eficiencia máxima, sino que la eficiencia debe ser máxima a plena carga o cerca de ella. Como la demanda de energía eléctrica puede fluctuar desde una carga ligera hasta una considerable y viceversa, varias veces al día, es casi imposible operar solamente un alternador a su eficiencia máxima todo el tiempo [1].

El término confiable supone que los consumidores nunca deben darse cuenta de una pérdida de energía eléctrica. Un solo alternador no puede garantizar una operación con ese grado de confiabilidad debido a la posibilidad de que falle o a interrupciones deliberadas para darle mantenimiento periódico. Por tanto, un alternador único que suministra una carga variable no puede ser muy eficiente, rentable ni confiable [1].

En el mundo actual es muy raro que sólo un generador suministre su propia carga, independiente de otros generadores. Tal situación se encuentra en algunas aplicaciones que se salen de lo normal, como en la generación de emergencia. En todas las aplicaciones usuales de los generadores, más de un generador operan en paralelo para suministrar la potencia demandada por las cargas. Un ejemplo extremo de esta situación es la red de potencia de los Estados Unidos en la cual literalmente miles de generadores comparten la carga del sistema [2].

## **2.21. VENTAJAS DE LA OPERACIÓN EN PARALELO DE GENERADORES SÍNCRONOS:**

1. Varios generadores pueden suministrar más carga que una sola máquina [2].
2. Al tener muchos generadores se incrementa la confiabilidad del sistema puesto que la falla de uno cualquiera de ellos no causa la pérdida de la totalidad de la carga [2].
3. Al tener muchos generadores operando en paralelo es posible retirar uno o varios de ellos para efectuar mantenimiento preventivo [2].
4. Si se utiliza un solo generador y éste no se encuentra operando cerca de plena carga, será relativamente ineficiente. Sin embargo, al emplear varias máquinas pequeñas es posible operar sólo una fracción de ellas. Las que operan lo hacen a cargas cerca de la plena carga y, por tanto con más eficiencia [2].

Otras ventajas de sistemas interconectados:

**Estabilidad:** Los sistemas que están interconectados tienen una mayor reserva de potencia que un sistema que trabaja solo. De hecho, un sistema grande es más capaz de soportar una gran perturbación y, por consiguiente, es inherentemente más estable [5].

**Continuidad del servicio:** Si una planta de generación se avería, o si se tiene que cerrar para inspección y mantenimiento anuales, las dos plantas restantes pueden abastecer a los clientes a los que da servicio aquélla. La energía que fluye por las líneas de interconexión se mide y se acredita automáticamente a la planta que la surte, menos cualesquier cargos de transporte. Un cargo de transporte es la suma pagada a otra compañía de electricidad cuando se utilizan sus líneas de transmisión para suministrar potencia a una tercera parte [5].

Economía: Cuando varias regiones están interconectadas, la carga puede ser compartida entre las diversas plantas de generación para que el costo total de operación se reduzca al mínimo. Por ejemplo, en lugar de que operen las tres plantas a capacidad reducida durante la noche cuando la demanda es baja, se puede parar completamente una planta y dejar que las otras soporten la carga. De este modo se reduce en gran medida el costo de operación de una planta al mismo tiempo que mejora la eficiencia de las otras plantas, porque ahora funcionan casi a su capacidad nominal [5].

Sistema de generación eléctrica, generadores en paralelo:

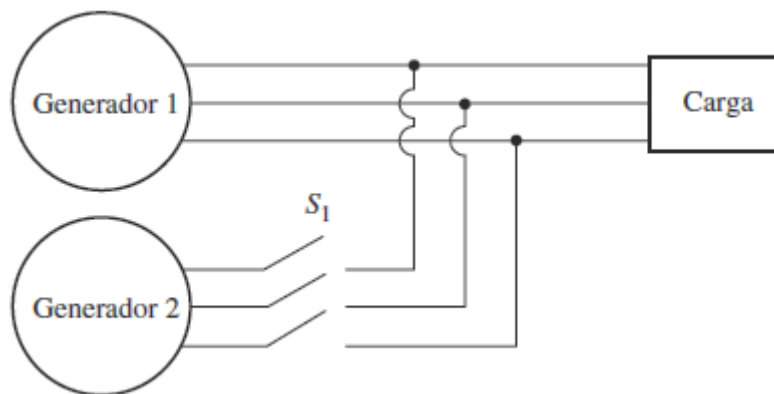


Figura 2.24 Generador que se conecta en paralelo con un sistema de potencia en operación - Máquinas eléctricas Chapman quinta edición [2].

Para garantizar la confiabilidad y la continuidad del servicio eléctrico se hace necesario generar energía eléctrica en una ubicación central donde estén conectados varios alternadores en paralelo para satisfacer la demanda. Cuando ésta es reducida, algunos alternadores pueden retirarse de la línea en tanto que los restantes quedan operando a sus eficiencias máximas. A medida que la demanda se incrementa, puede incorporarse otro alternador a la línea sin interrupción del servicio [1].

Si se cierra arbitrariamente el interruptor en cualquier momento en la Figura 2.24, los generadores están sujetos a daños severos y la carga puede perder potencia. Si los tensiones no son exactamente iguales en los conductores conectados conjuntamente, habrá un flujo de corriente muy grande cuando el interruptor se cierre [2].



Para evitar este problema, la magnitud y el ángulo de fase de la tensión de cada una de las tres fases deben ser exactamente iguales a las del conductor al cual se está conectando. En otras palabras, en la fase la tensión debe ser exactamente igual a la tensión de la fase a' y así sucesivamente para las fases b-b' y c-c'. Para llevar a cabo este emparejamiento, deben cumplirse las siguientes condiciones de puesta en paralelo [2]:

1. La tensión de línea rms de los dos generadores deben ser iguales [2].
2. Los dos generadores deben tener la misma secuencia de fase [2].
3. Los ángulos de fase de las dos fases a deben ser iguales [2].
4. La frecuencia del generador nuevo, llamado generador en aproximación, debe ser un poco mayor que la frecuencia del sistema en operación [2].

Estas condiciones de emparejamiento requieren alguna explicación [2].

La condición 1: es obvia pues para que dos grupos de tensión sean idénticos, deben tener la misma magnitud rms. La tensión en las fases a y a' serán completamente idénticos todo el tiempo si sus magnitudes y ángulos son iguales, lo cual explica la condición 3.

La condición 2: afirma que la secuencia en la cual las tensiones de fase alcanzan su valor máximo en los dos generadores es igual. Si la secuencia de fases es diferente (como se muestra en la figura 2.25a), aunque un par de tensiones (los de las fases a) estén en fase, los otros dos pares de tensiones están desfasados  $120^\circ$ .

Si se conectaran en la misma forma los generadores no habría problema con la fase a, pero en las fases b y c podrían fluir muy altas corrientes, que averiarían ambas máquinas [2].

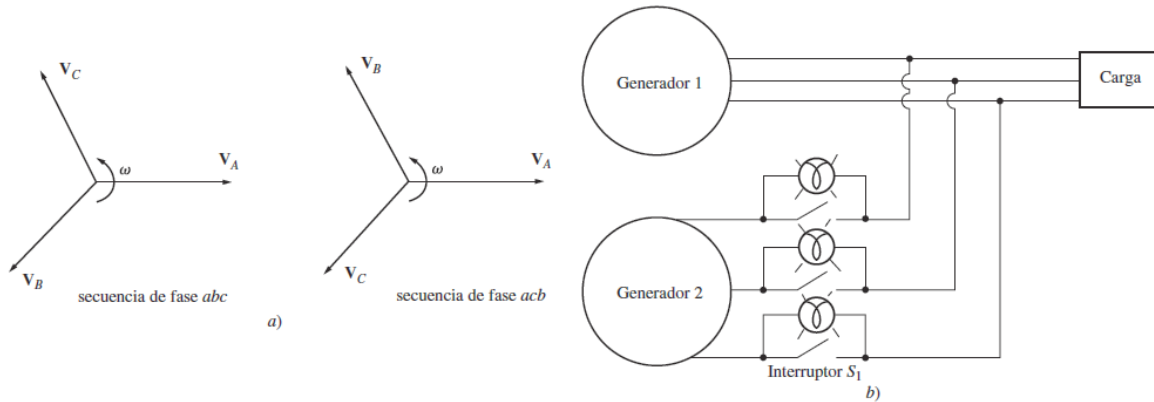


Figura 2.25 a) Las dos secuencias de fases posibles en un sistema trifásico. b) Método de las tres lámparas para encontrar la secuencia de fase - Máquinas eléctricas Chapman quinta edición [2].

Para corregir el problema de secuencia de fases se conmutan dos cualesquiera de las tres fases de una de las máquinas. Si las frecuencias de los generadores no son muy cercanas cuando se conectan entre sí, ocurrirán grandes transitorios de potencia hasta que los generadores se estabilicen a una frecuencia común. Las frecuencias de las dos máquinas deben ser casi iguales pero no exactamente iguales. Ellas diferirán una pequeña cantidad tal que los ángulos de fase de la máquina en aproximación cambiarán con lentitud respecto de los ángulos de fase del sistema en funcionamiento. De esta forma, los ángulos entre las tensiones pueden ser observados y el interruptor  $S_1$  puede cerrarse cuando el sistema esté en fase [2].

## 2.22. PROCEDIMIENTO PARA CONECTAR GENERADORES EN PARALELO.

Supóngase que se va a conectar el generador  $G_2$  al sistema en operación que se muestra en la figura 4.24. Se deben seguir los siguientes pasos para conectarlos en paralelo [2].

Primero, por medio de voltímetros se debe ajustar la corriente de campo del generador en aproximación hasta que su tensión en las terminales sea igual a la tensión en línea del sistema en operación [2].

Segundo, la secuencia de fase del generador en aproximación se debe comparar con la secuencia de fase del sistema en operación. La secuencia de fase se puede revisar de muchas maneras. Una de ellas es conectar alternativamente un pequeño motor de inducción a las terminales de cada uno de los dos generadores. Si el motor gira en la misma dirección en ambas ocasiones, entonces la secuencia de fase es la misma. Si el motor gira en direcciones opuestas, entonces las secuencias de fase son diferentes y se deben invertir dos de los conductores del generador en aproximación [2].

Otra manera de revisar la secuencia de fase es el método de las tres lámparas. En este método, se conectan tres lámparas a través de las terminales abiertas del interruptor que conecta el generador al sistema, como se muestra en la figura 4.25b). Conforme la fase cambia entre los dos sistemas, las lámparas lucirán primero brillantes (una gran diferencia de fase) y luego tendrán una luz tenue (una diferencia de fase pequeña). Si las tres lámparas lucen brillantes y se apagan al mismo tiempo, los sistemas tienen la misma secuencia de fase. Si las lámparas lucen brillantes sucesivamente, los sistemas tienen secuencias de fase opuestas y se debe invertir una de las secuencias [2].

A continuación, la frecuencia del generador en aproximación se ajusta para que sea un poco más alta que la frecuencia del sistema en operación. Esta tarea se lleva a cabo primero observando un medidor de frecuencia hasta que las frecuencias sean similares y entonces se observan los cambios de fase entre los sistemas. Se ajusta el generador en aproximación a una frecuencia un poco más alta para que cuando se conecte a la línea suministre potencia como generador [2].

Una vez que las frecuencias son casi iguales, las tensiones en los dos sistemas cambian de fase muy lentamente con respecto al otro. Se observan los cambios de fase y cuando los ángulos de fase son iguales, se apaga el interruptor que conecta a los dos sistemas [2].

¿Cómo se puede saber cuándo los dos sistemas están por fin en fase? Una manera sencilla es observar las tres lámparas que se describieron cuando se explicó la secuencia de fase. Cuando se apagan las tres lámparas, la diferencia de tensiones a través de ellas es cero y los sistemas están en fase. Este sencillo esquema funciona, pero no es muy exacto. Un método mejor es la utilización de un sincronoscopio. Un sincronoscopio es un medidor que mide la diferencia en los ángulos de fase entre las fases a de los dos sistemas. En la figura 4.26 se puede ver el esquema de la parte frontal de un sincronoscopio [2].

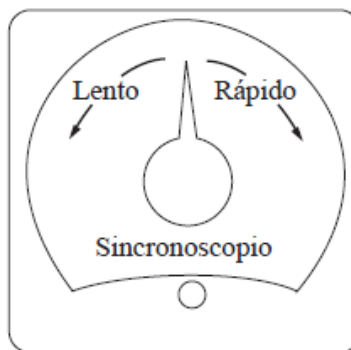


Figura 2.26 Sincronoscopio - Máquinas eléctricas Chapman quinta edición [2].

El cuadrante muestra la diferencia de fase entre las dos fases a: el 0 (que significa en fase) se ubica en la parte superior y el  $180^\circ$  en la parte inferior. Debido a que las frecuencias de los dos sistemas son un poco diferentes, el ángulo de fase en el medidor cambiara lentamente. Si el generador o sistema en aproximación es más rápido que el sistema en operación (situación deseada), el ángulo de fase avanza y la aguja del sincronoscopio gira en el sentido de las manecillas del reloj [2].

Si la máquina en aproximación es más lenta, la aguja gira en sentido contrario a las manecillas del reloj. Cuando la aguja del sincronoscopio está en una posición vertical, las tensiones están en fase y se puede cerrar el interruptor para conectar el sistema. Sin embargo, nótese que un sincronoscopio verifica las relaciones en sólo una fase. No brinda información sobre la secuencia de fases [2].

En los generadores más grandes que pertenecen a sistemas de potencia, todo el proceso de conectar un generador nuevo en paralelo está automatizado y una computadora lleva a cabo esta tarea. Sin embargo, en generadores más pequeños el operador ejecuta a mano los pasos antes descritos de conexión en paralelo [2].

## CAPÍTULO III – GENERADOR SÍNCRONO DE IMANES PERMANENTES (GSIP).

### 3.1. INTRODUCCIÓN SOBRE IMANES PERMANENTES.

Un imán es el cuerpo capaz de producir un campo magnético propio, de forma tal que permita atraer al hierro, el cobalto y el níquel. Los imanes se clasifican en **naturales** y **artificiales**. De los naturales la magnetita es el más importante. Los artificiales pueden a su vez dividirse en permanentes y temporales [10].

**Los imanes naturales:** se refiere a los minerales naturales que tienen la propiedad de atraer elementos como el hierro, el níquel, etc. La magnetita es un ejemplo, compuesto por óxido ferroso férrico, cuya particularidad principal consiste en atraer fragmentos de hierro natural [10].

**Los imanes artificiales:** son aquellos cuerpos magnéticos que pueden adquirir propiedades magnéticas, por ejemplo, al friccionarse con magnetita o al estar expuestos a algún campo magnético se transforman de manera artificial en imanes [10].

Estos imanes se clasifican en:

- **Imanes temporales:** se caracterizan por poseer una atracción magnética de corta duración.
- **Imanes permanentes:** son aquellos imanes los cuales conservan la propiedad magnética por un tiempo perdurable [10].

### 3.2. CARACTERÍSTICAS Y PROPIEDADES DE LOS IMANES PERMANENTES.

Las características que presentan los imanes permanentes, así como otro tipo de materiales con propiedades magnéticas son:

La densidad de flujo magnético representado por  $\mathbf{B}$ , es el campo total dentro del material. La intensidad de magnetización representado por  $\mathbf{H}$  es el campo magnético inductor originado, por ejemplo, debido a una corriente que circula por una bobina o por un conductor. La temperatura de Curie representada por  $T_c$  es la temperatura a la cual se pierden las propiedades magnéticas de los metales o materiales [10].

Cuando se aplica un campo magnético a un material con propiedades magnéticas y después se retira ese campo, por ejemplo, a un material ferromagnético, permanece un flujo residual también conocido como magnetismo remanente representado por  $\mathbf{B}_r$ ; para forzar este magnetismo remanente o flujo residual a ser cero se requiere aplicar una intensidad de campo magnético coercitivo representada por  $\mathbf{H}_c$ , con polaridad opuesta a la de la intensidad de magnetización [10].

Estas características son fácilmente observables en la curva de magnetización de los materiales o ciclo de histéresis antes mencionado, para observar y detallar mejor esta característica, se tiene que en la figura 3.1, un ejemplo de la curva de magnetización de un material ferromagnético en donde se explica su funcionamiento [10].

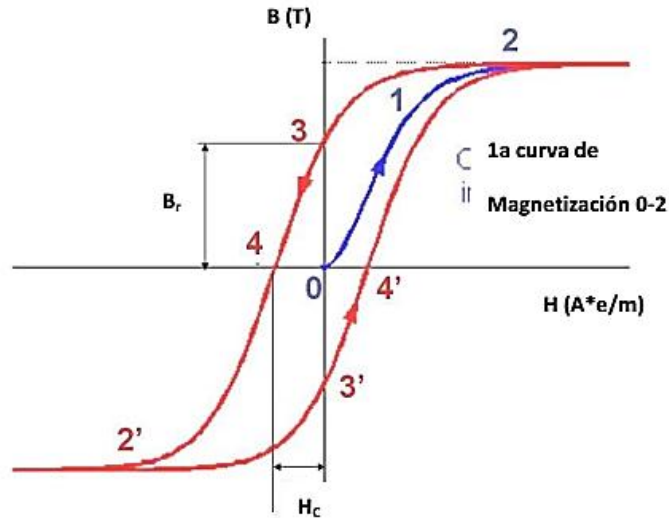


Figura 3. 1 Ejemplo de la curva de magnetización de un material ferromagnético – Propuesta de un sistema de generación de energía eléctrica empleando imanes permanentes politécnico nacional México [10].

Zona 0-1: en el punto 0 no hay ni  $H$  ni  $B$ , porque nunca se ha magnetizado conforme aumentamos  $H$ ,  $B$  aumenta linealmente hasta llegar al punto 1.

Zona 1-2: a partir de 1,  $B$  no es lineal con  $H$  (codo de saturación), y los incrementos de  $H$  no producen el incremento equivalente de  $B$ . Al llegar al punto 2,  $B$  no aumenta más aunque lo haga  $H$ , y se dice que el material está totalmente saturado.

Zona 2-3: al disminuir  $H$  los valores de  $B$  son mayores que en la zona 1-2, donde se realizó la primera magnetización. Al anular  $H$  ( $H=0$ ), el campo magnético no se anula (punto 3). A este valor se le llama “magnetismo remanente ( $B_r$ )”. Es decir, aunque se anule la excitación magnética ( $H$ ), el campo magnético no se anula y el núcleo de hierro queda imantado con magnetismo remanente.

Zona 3-4: se invierte la excitación ( $H<0$ ), pero hasta que no se llegue al punto 4,  $B$  no se anula. A esta excitación magnética negativa se la llama excitación coercitiva ( $H_c$ ). A partir de este punto 4, ocurre lo mismo pero en sentido contrario (puntos 2', 3' y 4'). A partir de 4', la zona 1-2 de primera magnetización, no se repite [10].



Para los imanes permanentes, la parte importante de la curva de histéresis es la situada en el segundo cuadrante pues su flujo remanente y el campo magnético coercitivo deben ser tan grandes como sea posible para que su campo magnético tenga mayor densidad y se prolongue por un periodo largo [10].

### 3.3. CLASIFICACIÓN DE IMANES PERMANENTES.

Los imanes permanentes se pueden clasificar de la siguiente manera:

- Imanes cerámicos o ferritas.
- Imanes de AlNiCo.
- Imanes de Tierras raras.

**Los imanes cerámicos o ferritas** tienen un aspecto liso y color grisáceo y suelen ser de los más utilizados debido a su maleabilidad. Aunque, por otro lado, al ser frágiles, corren el riesgo de romperse con facilidad. Están fabricados de ferrita de bario (**BaFe<sub>12</sub>O<sub>19</sub>**) o de ferrita de estroncio (**SrFe<sub>12</sub>O<sub>19</sub>**) [10].

Los valores de flujo remanente de los imanes de ferrita son unas 2 o 3 veces menores que los imanes de Neodimio, Samario-Cobalto y AlNiCo. Los imanes de ferrita poseen una intensidad de campo magnético coercitivo de gran magnitud, lo que posibilita utilizarlos en presencia de grandes campos magnéticos. Además, pueden encontrarse a temperaturas altas sin perder sus propiedades magnéticas, contrario a las temperaturas bajas con las que pierde rápidamente su propiedad coercitiva [10].

Las aplicaciones básicas de los imanes de ferrita son: motores, generadores, electrónica (por ej. altavoces, micrófonos, alarmas), juguetes mecánicos y cerraduras magnéticas (muebles), separadores, elevadores y mucho más, en particular donde lo permite el espacio constructivo accesible y no se requiere miniaturización ni alta estabilidad térmica [10].

**A los imanes de AlNiCo** se les llama de esta forma debido los elementos que lo componen, el aluminio, níquel y cobalto. El imán AlNiCo se caracteriza por su más alta estabilidad térmica de todos los imanes permanentes, así como por su elevada temperatura de Curie. Presenta también la más alta resistencia a la corrosión. Su flujo remanente es parecido al de los imanes de Samario – cobalto (SmCo). Sin embargo, su baja coercitividad imposibilita utilizar los imanes AlNiCo en presencia de grandes campos magnéticos, lo que limita su uso [10].

El imán AlNiCo se utiliza principalmente en: aparatos de medición, aparatos de control, muchos tipos de transductores y sensores, motores y generadores, y muchos otros aparatos que requieren estabilidad magnética frente a la temperatura, y el espacio constructivo suficientemente grande para poder contener el imán.

**Los imanes de tierras raras** clasifican en dos categorías de acuerdo al material químico del que se componen, ellos son los de Samario – cobalto y los de Neodimio [10].

Entre las ventajas del imán de Samario-Cobalto destacan la alta estabilidad térmica (parecida a la de los imanes de AlNiCo), a la cual le acompañan los valores altos de magnetización, coercitividad y remanencia. Estos imanes presentan una alta resistencia a la corrosión, y gracias a su propiedad coercitiva muy grande pueden utilizarse en presencia de grandes campos magnéticos [10].

Los imanes de Samario-Cobalto son utilizados en motores pequeños y generadores, aparatos de medición y control, varios tipos de transductores y sensores, y muchos otros aparatos que requieren estabilidad magnética frente a los cambios de temperatura (**-60 °C a 250 °C**). La aplicación de estos imanes posibilita la miniaturización de los aparatos, que en la actualidad se fabrican con imanes de ferrita y de AlNiCo [10].

| Tipo de PM (Permanent Magnet - Imán permanente) | $B_r$ | $H_c$ | Funcionamiento                      | Costo                  |
|---|-------|-------|-------------------------------------|------------------------|
| AlNiCo  | Alto  | Bajo  | Excelente resistencia mecánica      | Barato                 |
| Ferrita   | Bajo  | Medio | Frágil                              | Moderadamente barato.  |
| NdFeB (Neodimio)                                | Alto  | Alto  | Excelente rendimiento               | Moderadamente costoso. |
| Tierras raras Samario-Cobalto                   | Alto  | Alto  | Coefficiente de temperatura pequeño | Muy Costoso            |

Tabla 3.1 Características de imanes permanentes, Remanencia - coercitividad – Power electronics for renewalve and distributed energy system Sudipta [8].

| Imán Permanente | Temperatura de Curie $T_c$ | Temperatura máxima de operación $T_{MÁX}$ |
|-----------------|----------------------------|---|
| Neodimio        | 310 °C (590 °F)            | 150 °C (302 °F)                           |
| Samario-Cobalto | 750 °C (1382 °F)           | 300 °C (572 °F)                           |
| AlNiCo          | 860 °C (1580 °F)           | 540 °C (1004 °F)                          |
| Cerámico        | 450 °C (860 °F)            | 300 °C (572 °F)                           |

Tabla 3.2 Comparación de temperaturas entre los imanes permanentes<sup>7</sup>.

| Imán Tipo NdFeB  | Imán Tipo Samario-Cobalto Sm-Co   |
|--|---|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>Factor de temperatura: Soporta temperatura de trabajo que oscila entre los 80 °C hasta los 180 °C.</li> <li>Factor de corrosión: Problemas con la oxidación, se resuelve utilizando un recubrimiento que puede ser de Níquel, resina de Zinc o Epoxi.</li> <li>Precio: menor que los de Samario-Cobalto.</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>Factor de temperatura: Soportan temperaturas de trabajo que abarcan desde los 200 °C hasta los 350 °C.</li> <li>Factor de corrosión: No presentan problemas por oxidación.</li> <li>Precio: Mayor que los de Nd-Fe-B.</li> </ul> |

Tabla 3.3 Diferencias fundamentales y características físicas de los imanes de Neodimio (NdFeB) y de tierras raras (Samario-Cobalto)<sup>7</sup>.

Otra característica de estos imanes, y que puede llegar a ser un problema, es la desimanación que se puede producir con el paso del tiempo y con la temperatura. Sin embargo, en contra de lo que pueda parecer, esta desimanación no es un problema si se toman las precauciones adecuadas en el diseño, de manera que la máquina no debe sobrepasar la temperatura máxima de operación<sup>7</sup>.

Con el tiempo es inevitable una cierta desimantación, pero si el diseño de la refrigeración es correcto, esta pérdida de propiedades magnéticas será leve, y desde luego despreciable a corto y medio plazo, manteniéndose la máquina en un estado operativo adecuado<sup>7</sup>.

El desarrollo rápido de nuevos materiales magnéticos y su disponibilidad comercial han incrementado su uso en el diseño de máquinas de c.c. y máquinas síncronas. En todas las máquinas se utilizan imanes permanentes para establecer el flujo magnético que se quiere, es deseable que el material que se usa para los imanes permanentes posea las características siguientes:

- a) Retentividad (remanencia, densidad de flujo residual) alta, de modo que el imán sea poderoso y provea el flujo que se necesita.
- b) Coercitividad (de fuerza electromagnética que se requiere para magnetizar un material) alta, de manera que lo fácil que los campos magnéticos espurios (falsos o no auténticos) lo desmagnetice.

La condición inicial de todo imán permanente es tener una estabilidad perfecta, es decir, guardar mucho tiempo sin variación sus propiedades magnéticas. Debe pues tener un magnetismo remanente intenso y una fuerza coercitiva importante. Para poder crear un imán o imantar una barra se enrolla a su alrededor espiras conductoras repartidas regularmente por toda la superficie y se hace circular durante un tiempo una corriente continua [3].

La evolución, de los imanes permanentes ha sido considerable, en los últimos años, al principio únicamente solo se utilizaba acero al carbono; actualmente se utilizan aleaciones especiales a base de hierro, níquel, cobalto e incluso elementos de tierras raras [3].

Un material magnético permanente ideal muestra una curva de histéresis amplia, aplanada, de modo que el magnetismo residual permanece en un nivel alto cuando se elimina el campo aplicado, es decir, el área encerrada por la curva de histéresis es muy grande, la práctica, muy pocos materiales satisfacen estos requerimientos [1].

---

<sup>7</sup> DISEÑO DE GENERADOR DE ELEVADO PAR DE EXCITACIÓN POR IMANES PERMANENTES PARA AEROGENERACIÓN – POR GERMAN PEREZ UNIVERSIDAD PONTIFICA COMILLAS Pág. 56-60.

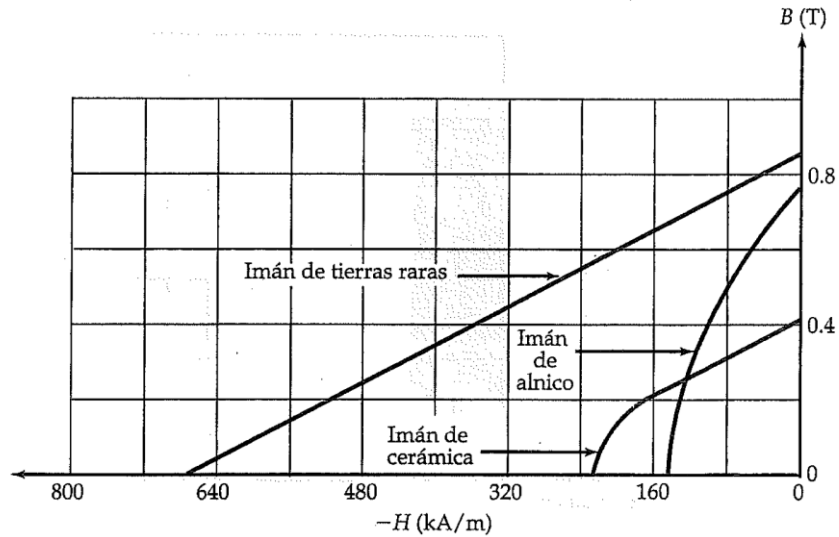


Figura 3.2 Características de desmagnetización para imanes de AlNiCo, cerámica y tierras raras - Máquinas eléctricas y transformadores Guru tercera edición [1].

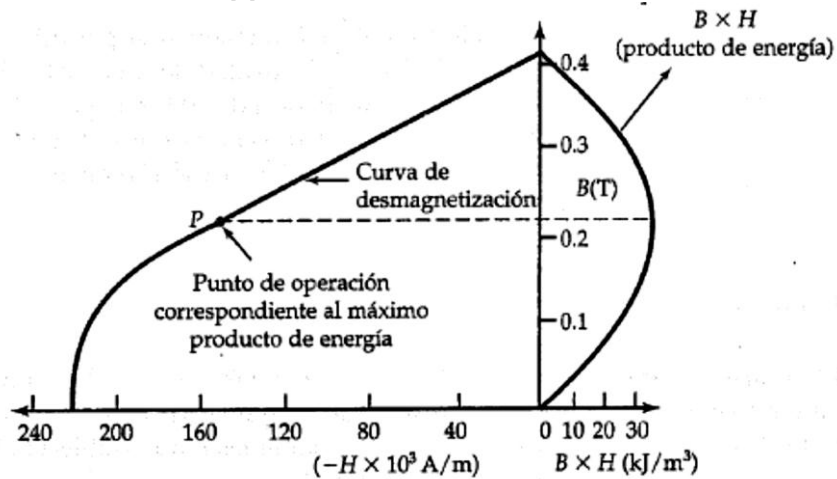


Figura 3.3 Desmagnetización típica y curvas de producto de energía de un imán permanente - Máquinas eléctricas y transformadores Guru tercera edición [1].

Para poder establecer un uso adecuado a un imán permanente, se debe observar su ciclo de desmagnetización, es decir, el comportamiento que ocurre en un material en el segundo cuadrante de ciclo de histéresis, en la Figura 3.2 se muestra las características de desmagnetización de imanes fabricados con alnico, cerámica y samario (perteneciente a las tierras raras), todos ellos con alto contenido de cobalto [1].

A simple vista se puede observar que hay una gran diferencia entre las curvas de desmagnetización de materiales magnéticos que pertenecen a diferentes grupos de aleaciones [1].

En el diseño de circuitos magnéticos que utilizan imanes permanentes también sería posible buscar la operación del imán de manera que suministrara el máximo de energía, la densidad de energía, es en palabras simples, el área del ciclo de histéresis (**B.H**), esta área es llamada producto de energía y junto con la curva de desmagnetización, se describe en la Figura 3.3, define el punto de operación en su máximo nivel del producto de energía se indica en la figura con la línea punteada [1].

Los imanes permanentes son los elementos esenciales para las máquinas **GSIP**. En las últimas dos décadas, la tecnología de imanes permanentes se ha mejorado sustancialmente. Cuando un imán permanente se ha magnetizado por un campo magnético externo, seguirá siendo magnetizado incluso si la intensidad del campo magnético se ha ido. La densidad de flujo magnético en este punto se llama las remanencias denotado por **B<sub>r</sub>**, la remanencia es la densidad de flujo máxima que el imán puede producir por sí mismo. Por otro lado, si la intensidad del campo magnético se ha aumentado en la polaridad opuesta, la densidad de flujo eventualmente se convertirá en cero. La intensidad del campo magnético en este punto es llamado coercitividad, denotado **H<sub>c</sub>**. El valor absoluto del producto de la densidad de flujo magnético, **B<sub>r</sub>** y la intensidad del campo magnético, **H<sub>c</sub>** en cada punto a lo largo de la curva de magnetización en la segunda región cuadrante se llama el producto de energía, o la densidad de energía magnética [8].

Cuanto mayor sea la densidad de energía magnética, menores serán las dimensiones de la máquina y pérdidas en el núcleo. El punto de funcionamiento se puede determinar por la intersección entre la línea de permeancia y la curva de histéresis en la segunda región cuadrante (véase figura 3.2 y 3.3).

La línea de permeabilidad se determina por las características de la estructura de la máquina: La línea de permeabilidad se determina por las características de la estructura de la máquina: La longitud del entrehierro, longitud de la trayectoria magnética, y el número de vueltas de la bobina [8].

### 3.4. EXCITACIÓN ELÉCTRICA CONTRA IMANES PERMANENTES.

De entre las posibilidades que se contemplan para el uso de una máquina síncrona surgen dos opciones que rivalizan para conformar el sistema de excitación.

Éstas son la excitación eléctrica y la excitación por imanes permanentes. Se demuestra que las máquinas de imanes permanentes pueden operar con las mismas características desde el lado de la red que una máquina de excitación eléctrica, por lo que la elección ha de basarse en criterios de máquina y de su integración en el sistema. La Tabla 3.2 muestra una síntesis de las ideas más importantes [11].

| Tipo de excitación | Ventajas  | Desventajas  |
|--------------------|---|--|
| Eléctrica          | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Permite regular la tensión de la máquina mediante la excitación del propio rotor de esta.</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Existen pérdidas eléctricas por la resistividad del bobinado de campo.</li> <li>• Los pasos polares muy pequeños no son admisibles, no se puede ir a muchos polos sin incrementar las pérdidas en demasía en el cobre del rotor. Adicionalmente el flujo disperso crece en caso de pasos polares pequeños.</li> </ul> |

|                           |  |  |
|---------------------------|--|--|
| <p>Imanes permanentes</p> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Incrementan la eficiencia al eliminar parte de las pérdidas.</li> <li>• Rotores ligeros que, en función del precio de los imanes permanentes, pueden ser más económicos.</li> <li>• Permiten pasos polares pequeños.</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• La regulación de la tensión es limitada, y ha de realizarse desde el estator de la máquina.</li> <li>• Existe riesgo de desmagnetización que inutiliza la máquina o degrada su comportamiento.</li> <li>• Se complican los procesos constructivos y de montaje de la máquina, añadiéndose restricciones adicionales, especialmente en máquinas con imanes pre-magnetizados.</li> <li>• Costo incierto de los imanes permanentes.</li> </ul> |
|---------------------------|--|--|

Tabla 3.4 Análisis de los distintos tipos de fuentes de campo empleadas en máquinas síncronas – Sistema de conversión electromecánica de alta potencia específica para generación eléctrica de origen renovable por Luis González Politécnico de Valencia [11].

Una vez analizados los puntos anteriores, se considera que las ventajas del empleo de máquinas de imanes permanentes son muy importantes en cuanto a tamaño, peso, coste, sencillez y fiabilidad de las máquinas que los usan respecto de las máquinas de excitación eléctrica. Las desventajas se pueden asumir como de menor entidad y tratar de superarlas mediante un diseño apropiado de la máquina [11].

### 3.5. EXCITACIÓN MEDIANTE IMANES PERMANENTES.

Resulta de fundamental importancia, en la elección de excitación mediante imanes permanentes, el hecho de que no haya pérdidas por efecto Joule asociadas a la creación del campo magnético, que permite incrementar la eficiencia de la máquina respecto a la excitación eléctrica. En el caso de una máquina lenta, en la que, la mayor parte de las pérdidas se generan en el cobre, el devanado de excitación puede ser responsable de casi la mitad de todas las pérdidas. La excitación por imanes puede por tanto reducir la irreversibilidad de la máquina a prácticamente la mitad [11].



Un inconveniente de la utilización de los imanes permanentes como sistema de excitación es la posible desmagnetización. Para evitar este comportamiento las máquinas han de diseñarse a prueba de ello, siendo tolerantes a las situaciones que producen que esto ocurra, lo cual incrementa su coste. Por otro lado, la complejidad adicional de usar imanes permanentes, crece con el tamaño de la máquina, ha de ser valorada, puesto que condiciona los procesos de montaje de la máquina misma y los de instalación de ésta en el sistema de generación, introduciendo restricciones adicionales [11].

Respecto a la capacidad de desarrollar un par por unidad de volumen hay que mencionar además que la ausencia de las pérdidas en el cobre del rotor hace requerir a las máquinas de imanes permanentes menos refrigeración que las máquinas de excitación eléctrica, por lo que se pueden obtener las mismas características en un tamaño menor de máquina [11].

Adicionalmente su fiabilidad se incrementa y sus requisitos de mantenimiento se reducen, al ser posible evitar los sistemas de excitación por anillos rozantes [11].

### **3.6. TOPOLOGÍAS DEL GENERADOR DE IMÁN PERMANENTE.**

- Máquinas de flujo radial.

Esta topología de flujo es la más usada de forma clásica para máquinas eléctricas. 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 máquina 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 [11].

La simplicidad del montaje mecánico llevó desde un principio a que fuera el estándar de uso. Además hay que considerar la robustez y rigidez del mismo, y la facilidad de producir componentes como laminaciones ferromagnéticas y bobinas adaptables a dicha topología [11].

Esta topología permite contar con cierta flexibilidad al momento de elegir dimensiones de la máquina. El par depende de forma independiente del diámetro del entrehierro y de la longitud axial de éste, y ambas magnitudes se pueden variar de forma independiente [11].

Dicha dependencia va con el cuadrado de dicho diámetro y en proporción directa a la longitud. Una misma carga lineal de corriente será más útil para convertir energía electromecánica que otra en función del diámetro del entrehierro. En aplicaciones donde la eficiencia y el desarrollo de un alto par específico son importantes, la tendencia es ir a diseños tipo anillo, en los que se tiene un gran diámetro y longitud corta, aprovechándose más una misma carga de corriente [11].

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 espacio en dicho plano [11].

Así ocurre en cualquier máquina de flujo radial o axial. La capacidad limitada para cargar en campo los materiales magnéticos, es decir la existencia de saturación, supone requerir una determinada sección de paso para un flujo dado. Además, la capacidad limitada para cargar en corriente los materiales conductores, por el calor generado conocido como efecto Joule, hace que sea necesario dotar de mayor sección de paso de corriente a los conductores cuando se quiere incrementar la carga de corriente en la máquina [11].

Existen diversas variantes principales de esta topología, la usual configuración con rotor interno, la de rotor externo, y configuraciones derivadas que hacen uso de dos estatores o dos rotores [11].

Particularizando para máquinas de imanes permanentes, las características más importantes de cada una de ellas son:

- Rotor interno. Los imanes se distribuyen en el rotor, cuya envolvente es cilíndrica, y que gira en el interior del estator. Es la configuración más común y utilizada. El estator es el típico de cualquier máquina eléctrica. Se fabrica con láminas de material magnético y los devanados se distribuyen idealmente de forma Senoidal por su superficie [11].
- Rotor externo. En esta configuración el rotor lo conforma un tambor exterior. El soportado del rotor constituye una de las mayores complejidades de ésta máquina, y se puede resolver de distintas maneras, bien con un rodamiento en la periferia o con uno sobre el eje y consiguiendo una rigidez del rotor muy alta. El estator se encuentra en el interior del rotor. Si bien en apariencia supone tener una mejor ventilación de los imanes, al estar el rotor en el exterior y directamente expuesto al medio refrigerante, se empeora la refrigeración del estator. En caso de motores encapsulados la complejidad es aún mayor [11].

Para máquinas de muy alta velocidad, se obtiene una mejor sujeción de los imanes por el tambor exterior (la fuerza centrífuga trabaja en sentido de mantener los imanes pegados al rotor) por lo que la fiabilidad de las fijaciones es mayor, incluso en configuración de imanes superficiales. Hay que mencionar además que para un mismo diámetro de entrehierro, el diámetro exterior de la máquina es menor, ahorrándose dos veces la diferencia entre la altura de las ranuras y la de los imanes [11].

- Máquinas de flujo axial.

En este caso el campo magnético que cruza el entrehierro tiene dirección fundamentalmente paralela al eje de giro de la máquina, presentando distinto módulo para distintas posiciones angulares tomadas desde un sistema polar centrado en el eje de la máquina. Estator y rotor permanecen a ambos lados del entrehierro, el cual está contenido en un plano perpendicular al eje de giro [11].

En este tipo de máquinas la longitud axial no es un parámetro que condicione la conversión electromecánica en el entrehierro por sí mismo, sino que está relacionada con los espesores y secciones de paso necesarias para el flujo magnético, así como con la configuración mecánica del conjunto [11].

Es por esto complicado reducir el radio resultante del diseño, ya que para mantener el par habría que aumentar la relación entre radio exterior y radio interior. En cualquier caso eso lleva, para una misma dimensión exterior, a una máquina de muy poco radio interior, siendo en ese caso el aprovechamiento de la carga de corriente y de campo magnético menor [11].

Las principales ventajas que presentan son:

- Los imanes siempre son planos, lo que simplifica su fabricación [11].
- El diseño apenas se ve afectado por la dilatación térmica, puesto que las dimensiones de la máquina perpendiculares al entrehierro son pequeñas [11].

En cuanto a los inconvenientes más importantes, se pueden citar:

- La eficiencia de la topología está limitada por la menor capacidad de la parte del radio interno de generar un par, a igualdad de esfuerzo cortante de entrehierro generado [11].
- La capacidad de cargar con corriente la máquina en toda la extensión del entrehierro está limitada por la carga de corriente en el radio interior, reduciéndose ésta a medida que nos acercamos al radio exterior del entrehierro de la máquina [11].
- En configuraciones en las que el estator (o estatores) está rodeado por rotores, se complica la refrigeración de la máquina, puesto que parte del calor generado tenderá a ser evacuado a través de los rotores, dónde se encuentran los imanes, muy sensibles a la temperatura de operación [11].

- Máquinas de flujo transversal.

En este caso el campo magnético tiene una distribución tridimensional, no siendo posible confinarlo en una región del espacio plana. Independientemente de la forma del entrehierro, en el caso de una máquina de flujo transversal se cumple que las regiones por las que atraviesan el entrehierro dos polos consecutivos de flujo magnético de la máquina definen un segmento que va de una a otra de dichas regiones cuya proyección sobre el vector velocidad relativa entre un punto del plano mediatriz de dicho segmento perteneciente a la parte fija o estator de la máquina respecto de otro punto en el plano mediatriz perteneciente a la parte móvil es nula. Ésto no ocurre en las máquinas de flujo radial o axial, en las que dichos vector y segmento son paralelos [11].

Se puede conseguir por tanto muy alta densidad de esfuerzos transmitidos a través del entrehierro. Debido a la configuración tridimensional del campo magnético, precisan ser construidas con materiales compuestos con propiedades ferromagnéticas blandas y de baja conductividad, con objeto de evitar la aparición de corrientes inducidas. Esto encarece este tipo de máquinas, además de hacerse menos fiables estructuralmente, ya que estos componentes no tienen unas características mecánicas como para ser utilizados con finalidad estructural [11].

### **3.7. GEOMETRÍA DEL ROTOR EN MÁQUINAS DE IMANES PERMANENTES.**

Otra de las elecciones fundamentales para definir la máquina es la geometría del rotor. Desde este punto de vista pueden considerarse varias opciones, los imanes superficiales, insertados, e interiores [11].

- Rotores de imanes superficiales.

En este tipo de configuración, los imanes se unen a la superficie del rotor. Su característica es un alto entrehierro magnético sea cual sea la fase de la fuerza magnetomotriz del estator. Esto ayuda a filtrar los armónicos altos, reduciendo pérdidas y vibraciones. El entrehierro geométrico es variable con la posición, si bien el entrehierro magnético es en la práctica constante, asumiendo una permeabilidad magnética de los imanes parecida a la del aire [11].

- Rotores de imanes insertados.

En este caso los imanes se unen a la superficie del rotor insertados en una ranura o cajeadado. De esta manera el entrehierro geométrico es constante, si bien el magnético es cambiante, dado que en la superficie de rotor donde no hay imán se puede encontrar material ferromagnético. La variación de entrehierro magnético en distintas posiciones relativas al rotor supone la posibilidad de usar dicho efecto para incrementar el par de la máquina mediante la generación de un par de reluctancia [11].

Dicho par de reluctancia suele incrementar el par electromagnético de la máquina en un 10-15%. La validez de dicho valor se ha comprobado mediante modelos propios, la mayor inductancia de magnetización hace que la máquina llegue a saturar en caso de sobre corriente, lo cual protege los imanes durante faltas. Las máquinas de imanes insertados son más resistentes a la desmagnetización por cortocircuito que las de imanes superficiales para una misma inductancia de dispersión, además de presentar una más baja corriente de cortocircuito [11].

- Rotores de imanes interiores.

En este tipo de configuración los imanes están alojados en huecos interiores del rotor. Esta geometría es de especial interés cuando la sujeción y/o protección de los imanes es un asunto importante, como en máquinas de alta velocidad [11].

El entrehierro geométrico es constante, mientras que el magnético es variable, si bien disjuncto, puesto que el imán y el aire no están a continuación el uno del otro y por tanto el flujo magnético atraviesa alternativamente regiones ferromagnéticas y regiones de baja permeabilidad, bien sea al paso por los imanes o por el propio entrehierro entre parte fija y parte móvil. La variabilidad del entrehierro magnético hace que, al igual que en las máquinas de imanes insertados, se pueda obtener una componente de par reluctante [11].

Al estar el imán en el interior del rotor, se hace necesario evitar caminos de cortocircuito magnético que pudieran ser utilizados por el flujo del imán para cerrarse sin concatenar el estator de la máquina. A este efecto se usan las llamadas barreras de flujo, que no son más que regiones interiores al rotor en las que la permeabilidad magnética es baja, la del aire, y que por tanto el flujo no cruza fácilmente. En cualquier caso aparecen caminos de fugas de flujo, que hacen desaprovechar parte del potencial del imán. Es por otra parte de relevancia, de cara a analizar en detalle el efecto de dichas barreras de flujo, considerar la saturación cruzada entre los caminos magnéticos de los ejes directo y de cuadratura del rotor [11].

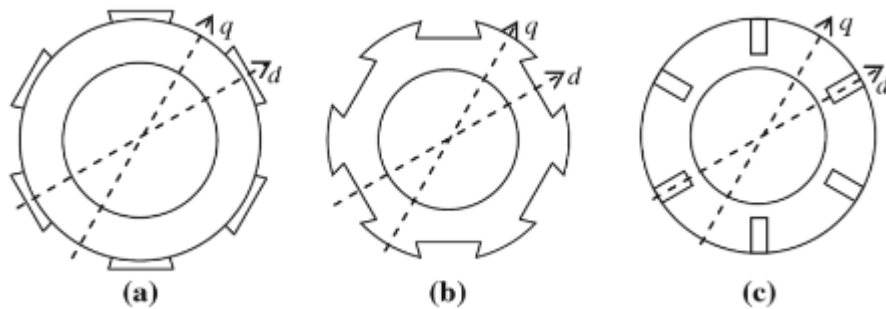


Figura 3.4 Vista en sección transversal de los tipos de imanes permanentes de rotor: a) un imán montado en la superficie, b) imán montando en interiores, c) imán empotrado o incrustado - Power electronics for renewalve and distributed energy system Sudipta [8].

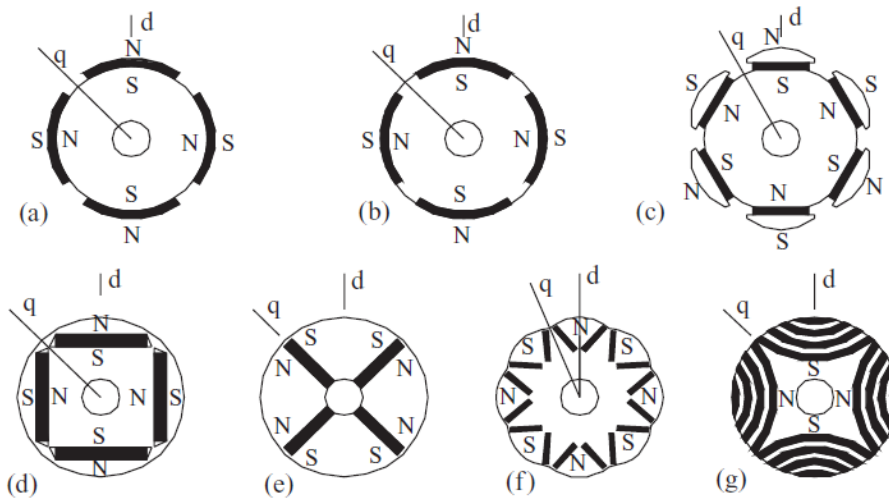


Figura 3.5 Los rotores de las máquinas de imanes permanentes. (a) Imanes montados en la superficie del rotor, (b) imanes empotrados en la superficie, (c) rotor de pieza polar, (d) Imanes integrados tangencialmente, (e) imanes incrustados radialmente, (f) dos imanes por polo en la posición de V, (g) Un rotor de reluctancia síncrona equipado con imanes permanentes. - Reproducido con permiso de Tanja Hedberg, basado en Morimoto, Sanada y Taniguchi (1994) [9] – Diferentes configuraciones de imanes permanentes colocados en el rotor – Desing of rotating electrical machine Tapani Jokinen [9].





La desmagnetización en un punto del imán significa la pérdida de remanencia y de coercitividad, y el paso a una nueva característica B-H que, regida por cómo ha sido la desmagnetización y por la permeabilidad magnética del compuesto, será determinante para localizar el punto de operación del imán y por tanto de la máquina [11].

El proceso de desmagnetización puede explicarse en base a la Figura 3.6. El valor del campo coercitivo  $H_c$  puede ser (en términos absolutos) superior o inferior al valor de campo  $H$  que limita la zona lineal. En caso de que dicho campo coercitivo sea inferior, el imán tendrá una característica lineal en el segundo cuadrante. Ese es el caso de la Figura 3.6. Los imanes de tierras raras contemplados para máquinas eléctricas pueden ser totalmente lineales en el segundo cuadrante o no, en función del estado máximo de desmagnetización que se puede esperar sufran [11].

La curva 1 representa una desmagnetización parcial, mientras que la curva 2 representa una desmagnetización total. Como se puede ver la curva de retorno que nace en el punto en el que el imán alcanza su campo coercitivo intrínseco  $H_{c-int}$  (curva 2), concluye en un valor de campo remanente nulo [11].

### **3.9. LA DESMAGNETIZACIÓN POR CORTOCIRCUITO.**

Existe 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 éste. 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 [11].

La corriente de cortocircuito en una máquina síncrona depende fundamentalmente de los valores de inductancias presentes en la máquina, estos son:

- Inductancia de dispersión de estator
- Inductancia mutua estator-rotor.
- Inductancia sub-transitoria.
- Inductancia transitoria.

Las dos primeras son inductancias de régimen permanente, mientras que las dos últimas se convierten en reactancias para así modelar con fasores un fenómeno transitorio como es la inducción de corrientes en devanados amortiguadores y de excitación.

En el caso de las máquinas de imanes permanentes no hay presente devanado de excitación, labor que corre a cargo de los imanes. Por otra parte, si la máquina se diseña para trabajar alimentada por un convertidor y no directamente acoplada a la red, no se dispone sistema de amortiguación alguno, y el efecto de las corrientes inducidas en los componentes conductores del rotor es pequeño en comparación con el que aparece en un devanado amortiguador al uso, por lo que se desprecia su efecto, siendo la reactancia sub-transitoria de prácticamente igual valor que la de régimen permanente [11].

### **3.10. USO DE IMANES PERMANENTES EN GENERACIÓN DE ENERGÍA RENOVABLE.**

En las últimas décadas, el precio de los imanes se ha reducido para la fabricación de generadores síncronos con excitación o excitatriz de imanes permanentes (GSIP, es decir, Permanent Magnet Synchronous Generator), también conocido como generador de c.c. sin escobillas, una alternativa atractiva para la generación de energía hidroeléctrica. En comparación con los tipos de excitación convencionales, el imán permanente de excitación, favorece una reducción de activa de peso, disminución de pérdidas en el cobre, así también la salida de la energía es un poco más alta [8].

Los imanes permanentes pueden ser imanes de ferrita de grano orientado o de mayor calidad y de neodimio y samario-cobalto o imanes de AlNiCo. El generador de imanes permanente funciona de la misma manera que los generadores síncronos [7].

Un generador eléctrico es un dispositivo que convierte la energía mecánica en energía eléctrica, en el cual los devanados del rotor han sido reemplazados con imanes permanentes. Estos dispositivos no requieren una alimentación separada para el circuito de excitación o tienen anillos colectores y escobillas de contacto. Una de las ventajas importantes es que estas máquinas no requieren cualquier entorno de trabajo específico y por lo tanto puede ser utilizado en máquinas de viento y de agua, es decir, generadores eólicos y los hidro-generadores.

La demanda de estos dispositivos está aumentando día a día. Con el aumento del costo de la electricidad personas están buscando una fuente alternativa de energía y el generador de imanes permanentes encaja perfectamente en ese lugar, estos dispositivos no utilizan los recursos ambientales para producir energía<sup>8</sup>.

Los generadores sincrónicos son la fuente de la mayoría de la energía eléctrica comercial, ellos son comúnmente utilizados para convertir la potencia mecánica de las turbinas de vapor, turbinas de gas, motores alternativos y turbinas hidráulicas en energía eléctrica para la red.

Esta topología está siendo utilizada comercialmente disponibles con el nombre generadores de imán permanente de accionamiento-directo. Una serie de estudios se han llevado a cabo para la investigación de las diferentes topologías de GSIP adecuado para accionamiento-directo para generadores de baja velocidad como usados en generación eólica e hidroeléctrica [8].

---

<sup>8</sup> <http://www.alxion.com/permanent-magnet-generator/>

El principal problema operativo es la desmagnetización de los imanes permanentes en el caso de un cortocircuito. El uso de imanes permanentes reduce el tamaño del generador y simplifica significativamente la construcción al eliminar la necesidad de suministrar el rotor con corriente continua [7].

El GSIP es sobre todo un pequeño dimensionamiento, bajo mantenimiento, y bajo peso con los mismos parámetros que su contraparte. Son especialmente adecuados para muchas aplicaciones, como pequeñas plantas eléctricas, en área remota con fuente de alimentación aislada de la red, y cargas aisladas [8].

### 3.11. APLICACIÓN HIDROELÉCTRICA.

Los generadores GSIP son especialmente adecuados para turbinas hidroeléctricas ya que las máquinas principales dependen del fluido en movimiento a través de sus aspas. La diferencia básica entre los generadores c.c. convencionales y GSIP es en relación con la función del conmutador colocado en el exterior del campo magnético en movimiento cíclico en el eje, y eliminando así las escobillas [8].

Típicamente, el número de polos podría ser tres o un múltiplo de tres, como se muestra en la figura 3.7. Este generador se puede modelar al igual que el generador síncrono de polo saliente con el estator conectado en estrella y los dos polos del rotor visto como un electroimán. Los devanados del estator están sinusoidalmente distribuidos y desplazados entre sí por  $120^\circ$  [8].

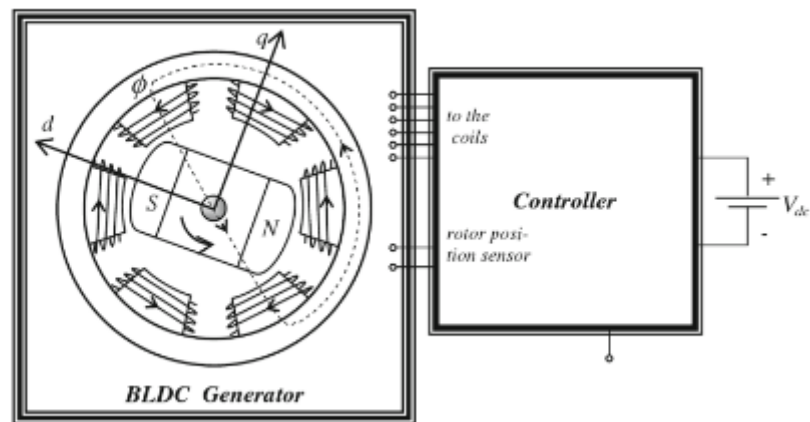


Figura 3.7 Estructura de un generador de imán permanente típico de polos múltiples en múltiplo de tres - Power electronics for renewalve and distributed energy system Sudipta [8].

### 3.12. APLICACIÓN EÓLICA.

La figura 3.8 muestra una turbina eólica conectada directamente a un alternador de imán permanente. Los convertidores (4) y (5) y el transformador (6) desempeñan la misma función que los convertidores (5) y (6) y el transformador (7) en la figura 3.8. La frecuencia  $f_1$  generada por el convertidor (4) impone la velocidad de rotación óptima al generador [5].

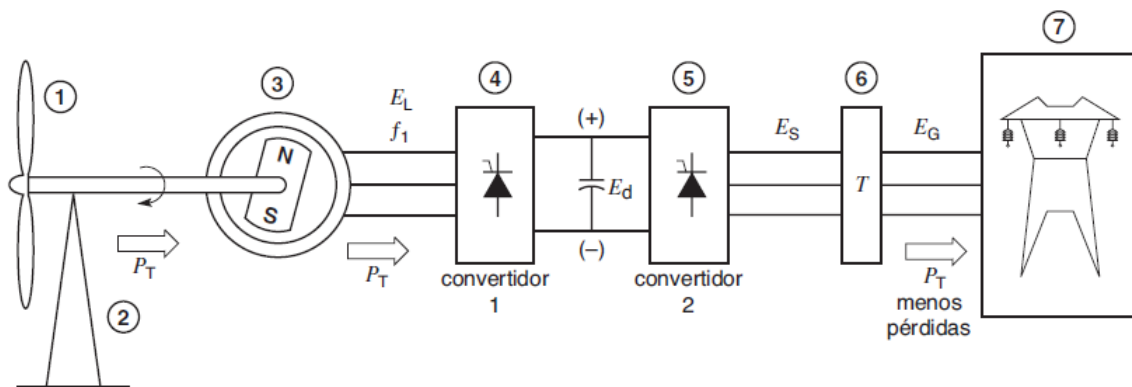


Figura 3.8 Turbina que impulsa directamente un alternador de imán permanente de alta potencia. La ausencia de una caja de velocidades elimina un componente que en ocasiones requiere mantenimiento – Máquinas eléctricas y sistemas de potencia Theodore Wildi sexta edición [5].

Se observa que los convertidores tienen que transportar toda la potencia desarrollada por la turbina. La propulsión directa tiene la ventaja de eliminar la caja de velocidades. Sin embargo, como la velocidad de la turbina es del orden de 30 rpm o menos, el alternador tiene que ser mucho más grande que si estuviera diseñado para funcionar, digamos, a 1200 rpm. No obstante, el alternador de imán permanente no requiere escobillas y las pérdidas en el rotor son nulas. Por estas razones, en ocasiones se prefiere la configuración de la figura 3.8 en turbinas que generan potencia en el rango de 2 a 5 MW [5].

### 3.13. MODELOS TÉRMICOS DE LAS MÁQUINAS DE IMANES PERMANENTES.

En el caso de la generación eléctrica renovable las máquinas son dimensionadas térmicamente en base a la carga máxima admisible continuamente, donde el régimen permanente de temperaturas es lo importante. Para accionamientos destinados a otras aplicaciones con arranques o sobrecargas esporádicos y de poca duración en comparación con las constantes de tiempo térmicas de la máquina, el estudio de los regímenes transitorios es de suma importancia [11].

Los modos de enfriamiento de una máquina son múltiples. Si bien se pueden emplear fluidos refrigerantes varios, en máquinas pequeñas y medianas, como son las destinadas a la generación renovable, no es interesante utilizar otro fluido que no sea aire. Hay dos formas principales de refrigerar con aire:

- Enfriamiento directo. Contacto de las fuentes de calor con el ambiente. Propio de las máquinas con paso de aire exterior a través de sus componentes, lo cual supone un índice de protección bajo, y sólo es apropiado cuando la calidad del aire ambiente está garantizada [11].
- Enfriamiento indirecto. Se presentan elementos a través de los cuales el calor ha de pasar desde las zonas en las que se genera hasta el foco frío. Esto significa que no hay contacto del aire del ambiente con el interior de la máquina. La carcasa es cerrada, y se usa la conducción hasta el exterior o la circulación interior de aire con paso por un intercambiador. Está asociado a índices de protección altos, apropiados para ambientes hostiles [11].

### **3.14. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL GENERADOR GSIP.**

#### **3.15. VENTAJAS.**

El generador de GSIP ofrece muchas ventajas. La máquina GSIP es el más eficiente de todas las máquinas eléctricas, ya que tiene una fuente magnética móvil dentro de sí mismo. El uso de imanes permanentes para la excitación no consume energía eléctrica adicional. Por lo tanto, la pérdida de cobre del excitador de campo no existe y la ausencia de conmutador y escobillas mecánicas o anillos de deslizamiento significa pérdidas de baja fricción mecánicas. Otra ventaja es su compacidad [8].

La reciente introducción de imanes de alta densidad energética (imanes de tierras raras) ha permitido la consecución de extremadamente altas densidades de flujo en el generador de GSIP, por lo tanto, de rotor bobinado no se requiere. Éstos a su vez permiten que el generador sea de pequeño, ligero, y la estructura robusta. Como no hay circulación de corriente en el rotor para crear un campo magnético, el rotor de un generador de GSIP no se calienta. La única producción de calor es en el estator, que es más fácil de enfriar que el rotor, ya que está en la periferia del generador y de la estática. La ausencia de escobillas, conmutadores mecánicos, y los anillos de deslizamiento suprime la necesidad de que el mantenimiento regular asociado y suprime el riesgo de falla en estos elementos. Tienen un aislamiento del devanado duradero, soporte, y de la vida del imán muy larga. Dado que no hay ruido que está asociado con los contactos mecánicos y la frecuencia de conmutación del convertidor de accionamiento podría estar por encima de 20 kHz produciendo sólo inaudible ultrasonido para los seres humanos [8].

Puesto que los imanes permanentes o electroimanes están situados en el rotor, se mantienen más frías y por lo tanto tienen una vida más larga, una mayor eficiencia para la generación de corriente eléctrica sin escobillas y ajuste flexible, controlado digitalmente del generador de velocidad con menos fricción, un menor número de componentes móviles, menos calor y ruido eléctrico reducido [8].

### 3.16. DESVENTAJAS.

El generador de GSIP tiene algunas desventajas inherentes, dos de ellas están relacionados con el alto costo de los imanes permanentes y la disponibilidad comercial. Otro problema es la operación de atenuación de campo para la máquina de GSIP resulta algo difícil debido a la utilización de imanes permanentes. Un aumento accidental de la velocidad podría dañar los componentes electrónicos de potencia [8].

Además, los generadores de imán permanente montados en la superficie no pueden alcanzar altas velocidades debido a la resistencia mecánica limitada del conjunto de entre el yugo del rotor y los imanes permanentes. Por último, la desmagnetización del imán permanente es posible gracias a la gran fuerza de oposición magnetomotriz (f.m.m.) y altas temperaturas [8].

### 3.17. ALGUNAS CARACTERÍSTICAS DE LA MÁQUINA SÍNCRONA DE IMÁN PERMANENTE.

Lo que se ha escrito anteriormente acerca de las máquinas síncronas es en muchos casos válidos también para máquinas de imanes permanentes. Por ejemplo, los diagramas de fasores son similares excepto que en GSIP, los imanes crean un  $\phi_{PM}$  constante en lugar de controlable  $\phi_f$ . El  $\phi_{PM}$  induce una f.e.m.  $E_{PM}$  en lugar de  $E_f$ . La excitación de imán permanente hace que sea posible el diseño de máquinas de muy alta eficiencia. Como, en principio, no hay pérdidas en la excitación, la eficiencia debe inherentemente ser alta.

Desafortunadamente, los imanes permanentes están las pérdidas conductoras, y por lo tanto Joule. Las máquinas de imanes permanentes han ganado popularidad en baja velocidad, unidades de alto par, que se adaptan muy bien.



El GSIP la magnetización está dispuesto por imanes permanentes. A medida que los imanes permanentes son muy conductores, aplicaciones de baja velocidad son fáciles también para los imanes de rotor de superficie, ya que, a bajas velocidades, las pérdidas en los imanes siguen siendo bajas. En las aplicaciones de mayor velocidad, la atención se debe tener especial cuidado para evitar pérdidas de material de imán permanente. Las características de una máquina de imán permanente se determinan a partir de la construcción del rotor.

La Figura 3.4 ilustra diferentes construcciones de rotor de imán permanente. Si los imanes se montan en la superficie del rotor, el rotor está en principio polos no salientes, es decir polos lisos.

Imanes integrados en la construcción del rotor producen casi sin excepción una máquina para que la inductancia síncrona de cuadratura del eje es mayor que la inductancia síncrona del eje directo. Además, la construcción pieza polar produce una relación de inductancia similar.

En el montaje empotrado, se puede emplear dos imanes por polo (Figura 3.5f), en cuyo caso es posible llegar a una densidad de flujo más alta entrehierro en condiciones sin carga. Si hay hierro en la superficie del rotor de una máquina de imán permanente, una reacción del inducido se produce considerable, algo debilitar las características de la máquina.

Los materiales de imanes permanentes se utilizan mejor en máquinas de imán de superficie (Figura 3.4a). Debido a la alta reluctancia circuito magnético, las inductancias síncronas son bajas y las máquinas de este tipo producen el par proporcionalmente más alta de extracción. Sin embargo, los imanes de la superficie del rotor están sujetos a tensiones mecánicas y magnéticas y también pérdidas por corrientes parásitas. En algunos casos, incluso los imanes de NdFeB pueden ser desmagnetizados.

### **3.18. MODELO DEL CIRCUITO EQUIVALENTE Y ECUACIONES DEL GENERADOR SÍNCRONO DE IMÁN PERMANENTE.**

Como se ha mencionado en los apartados anteriores, se ha establecido un modelo y diagrama fasorial con su circuito equivalente, con las variables que intervienen en el fenómeno electromagnético para la máquina síncrona tradicional, es decir, de rotor de polos lisos y rotor de polos salientes, ahora se debe establecer un modelo matemático además de un circuito equivalente que describa el fenómeno de utilizar imanes permanentes en el rotor, bajo ciertas consideraciones y aproximaciones, dado que el generador de imanes permanentes presenta distintos arreglos, como lo son los imanes montado en la superficie del rotor, los imanes insertados en el rotor y los imanes incrustados o empotrados, además de definir su flujo axial o radial, se debe considerar el aporte de flujo magnético en el eje q y eje d respectivamente en función de los tensiones vistos desde el estator, el cual se conlleva un análisis y el uso de herramientas matemáticas que faciliten su comprensión, a continuación se detalla el procedimiento a seguir para el análisis de este tipo de generador.

La popularidad de las máquinas síncronas de imanes permanentes [12] está dada por las siguientes características:

- Alta eficiencia [12].
- Alta relación de par - Inercia.
- Alta relación de par - Volumen.
- Alta densidad de flujo magnético.
- Alta relación de aceleración y desaceleración.
- Bajo costo de mantenimiento.
- Estructura compacta.
- Respuesta lineal en relación a la tensión de entrada [12].

A pesar de esto, el elevado costo inicial, su limitada temperatura de operación, además del riesgo de desmagnetizar los imanes permanentes en caso de sobre-corrientes son los principales inconvenientes de su uso pero presenta características que sin duda se puede considerar el uso de este tipo de tecnología [12].

La Figura 3.9 muestra un diagrama conceptual del generador sincrónico de imanes permanentes de un par de polos. En ésta se observa la distribución simétrica de los bobinados en el estator de las fases  $abc$ , que están desfasadas  $120^\circ$  entre ellas. La distribución es sinusoidal y las bobinas del estator están conectadas en estrella. Cada devanado tiene  $N_s$  espiras y una resistencia equivalente  $r_s$ , los ejes  $abc$ , son los ejes magnéticos respectivamente. Los imanes del rotor están situados en el interior de éste [12].

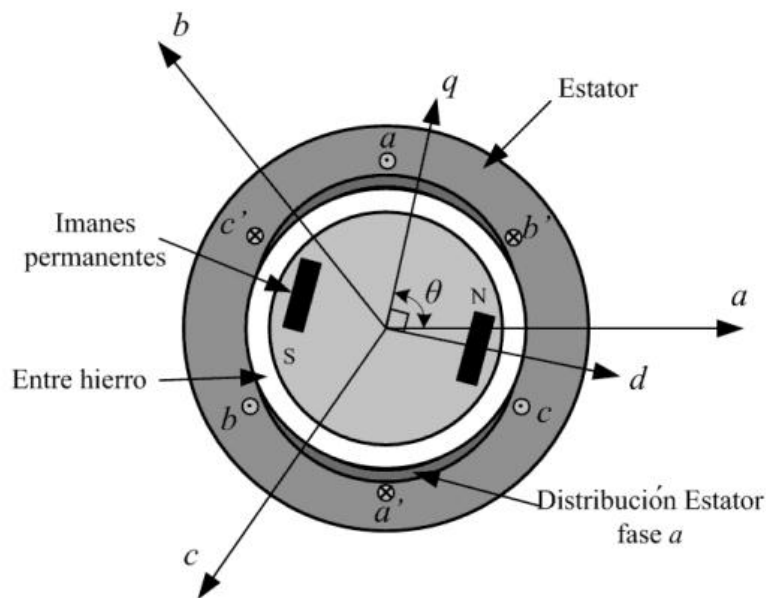


Figura 3.9 Diagrama conceptual del generador sincrónico de imanes permanentes – Mejora de la eficiencia y de las prestaciones dinámicas en procesadores electrónicos de potencia para pequeños aerogeneradores síncronos operando en régimen de velocidad variable Tesis doctoral por Luis Gonzáles [12].

En la Figura 3.9, también puede verse los ejes  $abc$ , llevados al sistema de referencia síncrono  $dq$ , el cual simplifica el análisis del generador [12].

Existen algunas simplificaciones [12] que se utilizan sin degradar la validez del modelo en el rango de funcionamiento del generador. Estas suposiciones y simplificaciones son:

- En los devanados del generador se asume que presentan una distribución espacial de forma sinusoidal [12].
- No es considerado ningún tipo de efecto térmico, ni sobre los devanados, ni sobre los imanes permanentes [12].
- El material magnético se supone que tiene un comportamiento lineal. Por tanto no se tiene en cuenta la saturación magnética, o por lo menos, su rango de operación presenta un comportamiento lineal [12].
- No se consideran las pérdidas en el hierro [12].

### SISTEMA DE ECUACIONES PARA EL GENERADOR SÍNCRONO DE IMANES PERMANENTES DE POLOS SALIENTES

A continuación, tomando en cuenta las simplificaciones anteriores, se puede llegar al arreglo de ecuaciones siguiente:

$$\vec{v}_{abc} = -r_s \cdot \vec{i}_{abc} + \frac{d}{dt} \vec{\Psi}_{abc} \quad (3.1)$$

Donde  $\vec{v}_{abc}$  es el vector de tensiones del estator,  $r_s$  es la matriz de resistencia del estator,  $\vec{i}_{abc}$  es el vector de corrientes del estator, y  $\vec{\Psi}_{abc}$  es el vector de flujo [12].

Los vectores y matrices de la ecuación (3.1), se definen en (3.2).

$$\vec{v}_{abc} = \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix}; \quad r_s = \begin{bmatrix} r_s & 0 & 0 \\ 0 & r_s & 0 \\ 0 & 0 & r_s \end{bmatrix}; \quad \vec{i}_{abc} = \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}; \quad \vec{\Psi}_{abc} = \begin{bmatrix} \Psi_a \\ \Psi_b \\ \Psi_c \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

El vector de flujos está compuesto por el flujo producto de la corriente e inductancia de cada fase y el flujo creado por los imanes permanentes del rotor, expresado mediante la ecuación (3.3).

$$\vec{\Psi}_{abc} = \vec{\Psi}_{abc|L} + \vec{\Psi}_{abc|M} \quad (3.3)$$

En la ecuación (3.3),  $\vec{\Psi}_{abc|L}$  es el flujo creado por las propias corrientes del estator, y está definido en la ecuación (3.4) [12].

$$\vec{\Psi}_{abc|L} = - \begin{bmatrix} L_{aa} & L_{ab} & L_{ac} \\ L_{ba} & L_{bb} & L_{bc} \\ L_{ca} & L_{cb} & L_{cc} \end{bmatrix} \vec{i}_{abc} \quad (3.4)$$

Donde,  $L_{aa}$  es la inductancia propia del devanado de la fase a, y  $L_{ab}$ ,  $L_{ac}$  son las inductancias mutuas entre los devanados de la fase a, b y c respectivamente. Para las inductancias propias de las fases b, c y las interacciones entre devanados, también se utiliza la misma notación [12].

Por otra parte,  $\vec{\Psi}_{abc|M}$ , representa el flujo, creado por los imanes del rotor, y se define de la siguiente manera en la ecuación (3.5) [12]:

$$\vec{\Psi}_{abc|M} = \Psi_m \begin{bmatrix} \cos(\theta) \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

Donde  $\Psi_m$  representa la amplitud de flujo magnético expresado en (v/rad/s.), creada por los imanes permanentes del rotor y  $\theta$  depende de la posición angular de las componentes eléctricas expresadas en rad. Esta posición angular depende a su vez de posición angular del rotor y el número de polos de la máquina [12].

El caso general de las máquinas sincrónicas de imanes permanentes corresponde al tipo de polo saliente, donde las tensiones y corrientes difieren de señales sinusoidales por la geometría de los imanes permanentes en el rotor. Además el espacio entre el hierro no es uniforme, las inductancias propias y mutuas de los devanados en el estator son función de la posición del rotor [12]. El generador de rotor liso corresponde a un caso particular de estas máquinas de polo saliente. Por esta razón, es modelado un caso general, cuya descripción simplificada se muestra a continuación:

Las inductancias propias de los devanados del estator se puede expresar mediante el conjunto de ecuaciones (3.6) [12].

$$\begin{aligned} L_{aa} &= L_l + L_A - L_B \cos(2\theta) \\ L_{bb} &= L_l + L_A - L_B \cos\left(2\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ L_{cc} &= L_l + L_A - L_B \cos\left(2\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \end{aligned} \quad (3.6)$$

Donde  $L_l$  es la inductancia de dispersión y es igual para todos los devanados [12].

$L_A$  Y  $L_B$  están determinadas por las ecuaciones (3.7) y (3.8)

$$L_A = \left(\frac{N_s}{2}\right)^2 \pi \mu_0 Y l \varepsilon_1 \quad (3.7)$$

$$L_B = \left(\frac{N_s}{2}\right)^2 \pi \mu_0 Y l \varepsilon_2 \quad (3.8)$$

Donde:

$Y$  : es el radio desde el centro de la máquina hasta el fin de la circunferencia interior del estator [12].

$N_s$ : es el número de espiras del estator.

$l$ : es la longitud axial del entrehierro de la máquina.

$\mu_0$ : es la permeabilidad del aire [12].

$\varepsilon_1$  Y  $\varepsilon_2$  están definidas por (3.9).

$$\varepsilon_1 = \frac{1}{2} \left( \frac{1}{g_{\min}} + \frac{1}{g_{\max}} \right) \quad (3.9)$$

$$\varepsilon_2 = \frac{1}{2} \left( \frac{1}{g_{\min}} - \frac{1}{g_{\max}} \right)$$

Donde  $g_{\min}$  es la longitud del entrehierro mínimo y  $g_{\max}$  es la longitud de entrehierro máximo. Las inductancias mutuas entre los devanados del estator se pueden expresar de la forma (3.10) [12].

$$\begin{aligned}
L_{ab} &= L_{ba} = -\frac{1}{2}L_A - L_B \cos\left(2\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\
L_{ac} &= L_{ca} = -\frac{1}{2}L_A - L_B \cos\left(2\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\
L_{bc} &= L_{cb} = -\frac{1}{2}L_A - L_B \cos(2\theta)
\end{aligned} \tag{3.10}$$

Finalmente, en el caso general del generador de polos salientes, la matriz de flujos es expresado de la siguiente forma (3.11).

$$\bar{\Psi}_{abc} = \begin{bmatrix} \Psi_a \\ \Psi_b \\ \Psi_c \end{bmatrix} = -L_M \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \Psi_m \begin{bmatrix} \cos(\theta) \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \tag{3.11}$$

Donde  $L_M$  está determinada por la ecuación (3.12):

$$L_M = \begin{pmatrix} L_1 + L_A - L_B \cos(2\theta) & -\frac{L_A}{2} - L_B \cos\left(2\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\frac{L_A}{2} - L_B \cos\left(2\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\frac{L_A}{2} - L_B \cos\left(2\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & L_1 + L_A - L_B \cos\left(2\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & -\frac{L_A}{2} - L_B \cos(2\theta) \\ -\frac{L_A}{2} - L_B \cos\left(2\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & -\frac{L_A}{2} - L_B \cos(2\theta) & L_1 + L_A - L_B \cos\left(2\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \end{pmatrix} \tag{3.12}$$

### 3.19. ECUACIONES DEL GENERADOR DE IMANES PERMANENTES DE POLOS SALIENTES EN EL SISTEMA DE REFERENCIA SÍNCRONO.

A partir de las ecuaciones matriciales antes mencionadas se puede establecer un nuevo conjunto de ecuaciones a partir del sincronismo que existe entre la posición del rotor y el flujo electromagnético, que permite simplificar el análisis en el dominio del tiempo [12].

Para obtener las ecuaciones del generador en el sistema de referencia síncrono [12] es necesario utilizar la Transformada de Park, donde un vector en sistemas de coordenadas abc puede ser convertida en un vector al sistema de referencia síncrono dq y viceversa, mostradas en la ecuación (3.13) y (3.14).

El significado físico de la Transformada de Park es colocarse en un marco de referencia fijo o giratorio, la Transformada de Park permite obtener valores trifásicos de un sistema de referencia fijo de una magnitud expresada en un sistema de referencia ortonormal giratorio y conociendo el ángulo de desfase entre los sistemas. La transformada inversa permite hacer lo contrario, si se tiene un sistema ortonormal con eje de referencia fijo, y el desfase, se puede obtener el sistema con eje de referencia giratorio. La transformada de Park es la combinación de la Transformada de Clarke y el giro. Transformada que convierte un sistema trifásico estacionario en un sistema trifásico ortogonal que gira en sincronismo con la  $\theta_r$  del rotor. Al Respecto, Park, es una transformación, que permite como tal un cambio de coordenadas, desde un sistema trifásico estacionario al sistema coordenado giratorio. La Transformada de Park utiliza la de Clarke para obtener el equivalente en cuadratura q de los ejes fijos a los giratorios con un ángulo<sup>9</sup>.

---

<sup>9</sup>Transformación de Park y Clarke aplicado a las máquinas eléctricas por Elba Sandoval, Jorge Saavedra Catherine Gascon y Carlos Gómez, Principiantes de la Maestría Ingeniería Automatización y control Pág. 1.



Una vez definido el uso de la transformada de Park [12], que procede la combinación de giro con la transformada de Clarke se procede al siguiente análisis:

$$\mathbf{f}_{dq0} = \mathbf{T} \cdot \mathbf{f}_{abc} \quad (3.13)$$

$$\mathbf{f}_{dq0} = \mathbf{T}^{-1} \cdot \mathbf{f}_{abc} \quad (3.14)$$

Donde las Transformadas de Park con conservación de potencia  $\mathbf{T}$  y su inversa  $\mathbf{T}^{-1}$  están dadas por (3.16) y (3.17).

$$\mathbf{T} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin(\theta) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

$$\mathbf{T}^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

Pre-multiplicando la ecuación del modelo del generador en el sistema de referencia  $abc$  [12] de la ecuación (3.1) y la Transformada de Park, mostrada en la ecuación (3.15), se obtiene la ecuación (3.17):

$$\mathbf{T} \cdot \vec{v}_{abc} = -\mathbf{T} \cdot r_s \cdot \vec{i}_{abc} - \mathbf{T} \cdot \frac{d}{dt} (L_M \cdot \vec{i}_{abc}) + \mathbf{T} \cdot \frac{d}{dt} \vec{\Psi}_{abc|_M} \quad (3.17)$$

Rescribiendo la ecuación (3.17), y utilizando las ecuaciones (3.13) y (3.14), además de aplicar la regla de la cadena para la derivada se obtiene la ecuación (3.18).

$$\vec{v}_{dq0} = -\mathbf{T} \cdot r_s \cdot \mathbf{T}^{-1} \cdot \vec{i}_{dq0} - \mathbf{T} \cdot \frac{d}{dt} (L_M) \cdot \mathbf{T}^{-1} \cdot \vec{i}_{dq0} - \mathbf{T} \cdot L_M \cdot \frac{d}{dt} (\mathbf{T}^{-1}) \cdot \vec{i}_{dq0} - \mathbf{T} \cdot L_M \cdot \mathbf{T}^{-1} \cdot \frac{d}{dt} (\vec{i}_{dq0}) + \mathbf{T} \cdot \frac{d}{dt} (\vec{\Psi}_{abc|M}) \quad (3.18).$$

Donde  $\vec{v}_{dq0}$ ,  $\vec{i}_{dq0}$ ,  $\vec{\Psi}_{dq0}$ , son las variables transformadas en el sistema de referencia síncrono y están definidas como se muestra en la ecuación (3.19).

$$\vec{v}_{dq0} = \begin{bmatrix} v_d \\ v_q \\ v_0 \end{bmatrix}; \quad \vec{i}_{dq0} = \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \end{bmatrix}; \quad \vec{\Psi}_{dq0} = \begin{bmatrix} \Psi_d \\ \Psi_q \\ \Psi_0 \end{bmatrix} \quad (3.19)$$

El resto de términos [12] de la ecuación (3.18), se definen en el conjunto de ecuaciones (3.20).

$$\begin{aligned} \mathbf{T} \cdot r_s \cdot \mathbf{T}^{-1} &= \begin{bmatrix} r_s & 0 & 0 \\ 0 & r_s & 0 \\ 0 & 0 & r_s \end{bmatrix} \\ \mathbf{T} \cdot \frac{d}{dt} (L_M) \cdot \mathbf{T}^{-1} &= \begin{bmatrix} 0 & -3\omega L_B & 0 \\ -3\omega L_B & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \\ -\mathbf{T} \cdot L_M \cdot \frac{d}{dt} (\mathbf{T}^{-1}) &= \omega \cdot \begin{bmatrix} 0 & -L_{ls} - \frac{3L_A}{2} + \frac{3L_B}{2} & 0 \\ L_{ls} + \frac{3L_A}{2} + \frac{3L_B}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \\ \mathbf{T} \cdot L_M \cdot \mathbf{T}^{-1} &= \begin{bmatrix} L_{ls} + \frac{3L_A}{2} - \frac{3L_B}{2} & 0 & 0 \\ 0 & L_{ls} + \frac{3L_A}{2} + \frac{3L_B}{2} & 0 \\ 0 & 0 & L_{ls} \end{bmatrix} \\ \mathbf{T} \cdot \frac{d}{dt} (\vec{\Psi}_{abc|M}) &= \begin{bmatrix} \Psi_d \\ \Psi_q \\ \Psi_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{\frac{3}{2}} \omega \Psi_m & 0 \\ 0 & \sqrt{\frac{3}{2}} \omega \Psi_m \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \\ L_d &= L_l + \frac{3}{2} (L_A - L_B) \\ L_q &= L_l + \frac{3}{2} (L_A + L_B) \end{aligned} \quad (3.20)$$

Finalmente [12] el sistema lineal que modela el generador síncrono de imanes permanentes en el sistema de referencia síncrono viene dado por la ecuación mostrada en (3.21).

$$\vec{v}_{dq0} = \mathbf{A} \cdot \vec{i}_{dq0} - \mathbf{B} \cdot \frac{d \vec{i}_{dq0}}{dt} + \vec{\Psi}_{dq0} \quad (3.21)$$

Donde las matrices de A y B, están definidas en la ecuación (3.22).

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -r_s & \omega \cdot L_q & 0 \\ -\omega \cdot L_d & -r_s & 0 \\ 0 & 0 & -r_s \end{bmatrix}; \mathbf{B} = \begin{bmatrix} L_d & 0 & 0 \\ 0 & L_q & 0 \\ 0 & 0 & L_{ls} \end{bmatrix}; \vec{\Psi}_{dq0} = \begin{bmatrix} \sqrt{\frac{3}{2}} \omega \Psi_m \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.22)$$

Rescribiendo el modelo del generador síncrono de imanes permanentes [12], en el sistema de referencia síncrono mostrado en la ecuación (3.21), se obtienen las ecuaciones diferenciales de las corrientes y tensiones en (3.23)-(3.25).

$$\begin{aligned} v_d &= -r_s i_d + \omega L_q i_q - L_d \frac{di_d}{dt} & (3.23) \\ v_q &= -r_s i_q + \omega L_d i_d - L_q \frac{di_q}{dt} + \sqrt{\frac{3}{2}} \omega \Psi_m & (3.24) \\ v_0 &= -r_s i_0 - L_{ls} \frac{di_0}{dt} & (3.25) \end{aligned}$$

En general [12] en los generadores de corriente alterna trifásicos, sin importar su tipo de conexión estrella-triángulo, la componente homopolar es despreciable dado que se considera que sus cargas son equilibradas, por tanto es posible considerar  $v_0 = 0$  e  $i_0 = 0$ .

A partir del conjunto de ecuaciones del modelo del GSIP en el sistema de referencia síncrono dq, se obtiene el circuito equivalente mostrado en la Figura 3.10 [12].

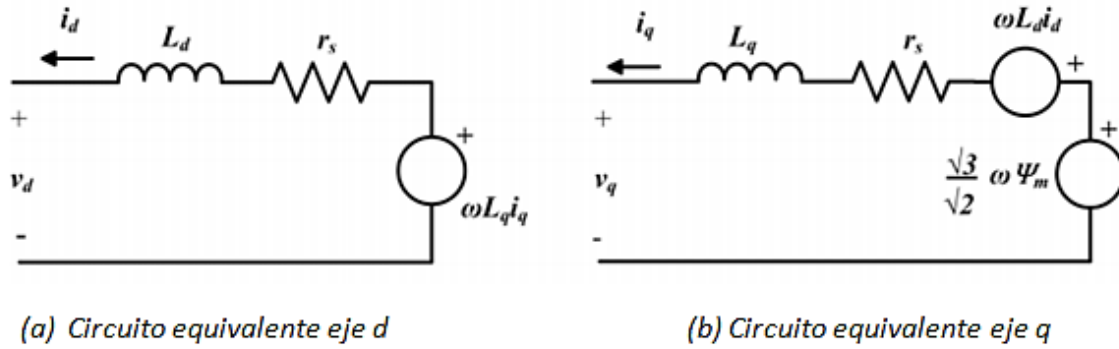


Figura 3.10 Circuito equivalente del GSIP en el sistema de referencia síncrono - Mejora de la eficiencia y de las prestaciones dinámicas en procesadores electrónicos de potencia para pequeños aerogeneradores síncronos operando en régimen de velocidad variable Tesis doctoral por Luis Gonzáles [12].

Dentro de las ventajas que se obtiene con el circuito equivalente del GSIP en el sistema de referencia síncrono, destaca la capacidad de poder regular por separado las potencias activas y reactivas en el generador, así como el hecho de que el punto de operación es continuo y no senoidal, lo que facilita el diseño de reguladores [12].

### 3.20. ECUACIONES MECÁNICAS DEL GENERADOR SÍNCRONO DE IMANES PERMANENTES DE POLOS SALIENTES.

Desde el punto de vista eléctrico [12], la potencia manejada en el GSIP está dada por la ecuación (3.26).

$$p_e = (v_d i_d + v_q i_q) \quad (3.26)$$

Después de sustituir las tensiones  $v_d$ ,  $v_q$ , de las ecuaciones (3.23) y (3.24) en la ecuación (3.27), el balance de energía puede re-expresarse de la siguiente manera (3.27).

$$p_e = \underbrace{(r_s i_d^2 + r_s i_q^2)}_{\text{Perdidas en Conductores}} + \underbrace{\left( \frac{L_d}{2} \frac{d}{dt} (i_d^2) + \frac{L_q}{2} \frac{d}{dt} (i_q^2) \right)}_{\text{Variación de energía magnética}} + \underbrace{\omega \left( \frac{\sqrt{3}}{2} \Psi_m i_q + (L_d - L_q) i_d i_q \right)}_{\text{Potencia mecánica de salida}} \quad (3.27)$$

De la ecuación anterior, el primer término representa las pérdidas por el efecto joule en los conductores de los devanados en el estator, el segundo término representa la variación de energía almacenada, y el tercer y último término es la conversión a potencia eléctrica efectiva [12].

La potencia aprovechable en términos mecánicos y eléctricos del generador en régimen permanente está determinada [12] por la ecuación (3.28).

$$p_{ef} = \omega_r T_e = \omega \left( \sqrt{\frac{3}{2}} \Psi_m i_q + (L_d - L_q) i_d i_q \right) \quad (3.28)$$

[12] La relación entre la velocidad mecánica del rotor  $\omega_r$  y la velocidad angular de las señales eléctricas del generador  $\omega$  están relacionadas por el número de pares de polos del rotor,  $p$ , de la forma mostrada en la ecuación (3.29):

$$\omega = p \omega_r \quad (3.29)$$

Sustituyendo (3.29) en (3.28), se obtiene el par electromagnético asociado al generador en función de las corrientes en el **sistema de referencia dq** [12].

$$T_e = p \left( \sqrt{\frac{3}{2}} \Psi_m i_q + (L_d - L_q) i_d i_q \right) \quad (3.30)$$

Como se puede observar en la ecuación (3.30), el par asociado al generador es el producto de la suma de dos términos. El primero de ellos, es el producto de los imanes permanentes del rotor ( $T_m$ ), y el segundo es el producto del llamado par de reluctancia ( $T_{re}$ ), proveniente de la diferencia de las inductancias de los ejes dq, las expresiones de estos términos son mostradas en las ecuaciones (3.31) y (3.32), respectivamente [12].

$$T_m = p \left( \sqrt{\frac{3}{2}} \Psi_m i_q \right) \quad (3.31)$$

$$T_{re} = p(L_d - L_q) i_d i_q \quad (3.32)$$

Ecuaciones fasoriales para el tensión de vacío  $\mathbf{E}_a$  en un GSIP a partir de las ecuaciones 3.23 y 3.24.

$$v_d = -r_s i_d + \omega L_q i_q - L_d \frac{di_d}{dt} = \mathbf{E}_d$$

$$v_q = -r_s i_q + \omega L_d i_d - L_q \frac{di_q}{dt} + \sqrt{\frac{3}{2}} \omega \Psi_m = \mathbf{E}_q$$

$$\mathbf{E}_d = -r_s \mathbf{I}_d + \omega L_q \mathbf{I}_q - j\omega L_d \mathbf{I}_d$$

$$\mathbf{E}_q = -r_s \mathbf{I}_q + \omega L_d \mathbf{I}_d - j\omega L_q \mathbf{I}_q + \sqrt{\frac{3}{2}} \omega \Psi_m$$

$$\text{Si: } X_L = \omega L$$

$$\mathbf{E}_d = -r_s \mathbf{I}_d + X_q \mathbf{I}_q - jX_d \mathbf{I}_d$$

$$\mathbf{E}_q = -r_s \mathbf{I}_q + X_d \mathbf{I}_d - jX_q \mathbf{I}_q + \sqrt{\frac{3}{2}} \omega \Psi_m$$

Además:

$$\mathbf{V}_T = \mathbf{E}_a + \mathbf{E}_d + \mathbf{E}_q \text{ donde } V_T \text{ es el voltaje en los terminales y } E_a \text{ de vacío.}$$

Para:

$$\mathbf{E}_a = \mathbf{V}_T - \mathbf{E}_d - \mathbf{E}_q$$

$$\mathbf{E}_a = \mathbf{V}_T + r_s \mathbf{I}_a + jX_d \mathbf{I}_d + jX_q \mathbf{I}_q - (X_d \mathbf{I}_d + X_q \mathbf{I}_q + \sqrt{\frac{3}{2}} \omega \Psi_m)$$

Si:

$$jX_d \mathbf{I}_d = jX_q \mathbf{I}_d + j(X_d - X_q) \mathbf{I}_d$$

Por lo que:

$$\mathbf{E}_a = \mathbf{V}_T + r_s \mathbf{I}_a + jX_q \mathbf{I}_a + j(X_d - X_q) \mathbf{I}_d - (X_d \mathbf{I}_d + X_q \mathbf{I}_q + \sqrt{\frac{3}{2}} \omega \Psi_m)$$

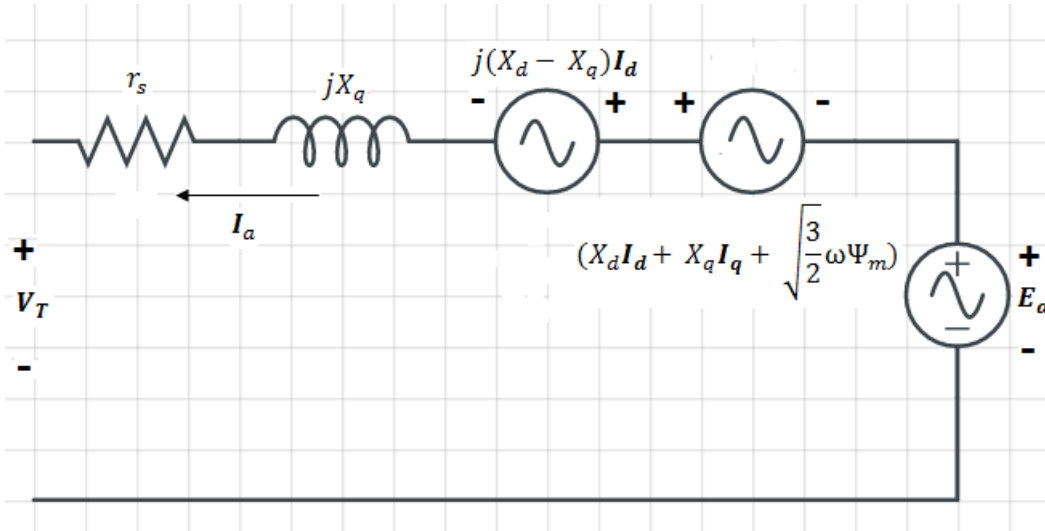


Figura 3.11 Diagrama del circuito equivalente para un GSIP de polos salientes – Elaboración propia.  
Ecuación fasorial para definir el diagrama del circuito equivalente.

$$\mathbf{E}_a = \mathbf{V}_T + r_s \mathbf{I}_a + jX_q \mathbf{I}_a + j(X_d - X_q) \mathbf{I}_d - X_d \mathbf{I}_d - X_q \mathbf{I}_q - \sqrt{\frac{3}{2}} \omega \Psi_m$$

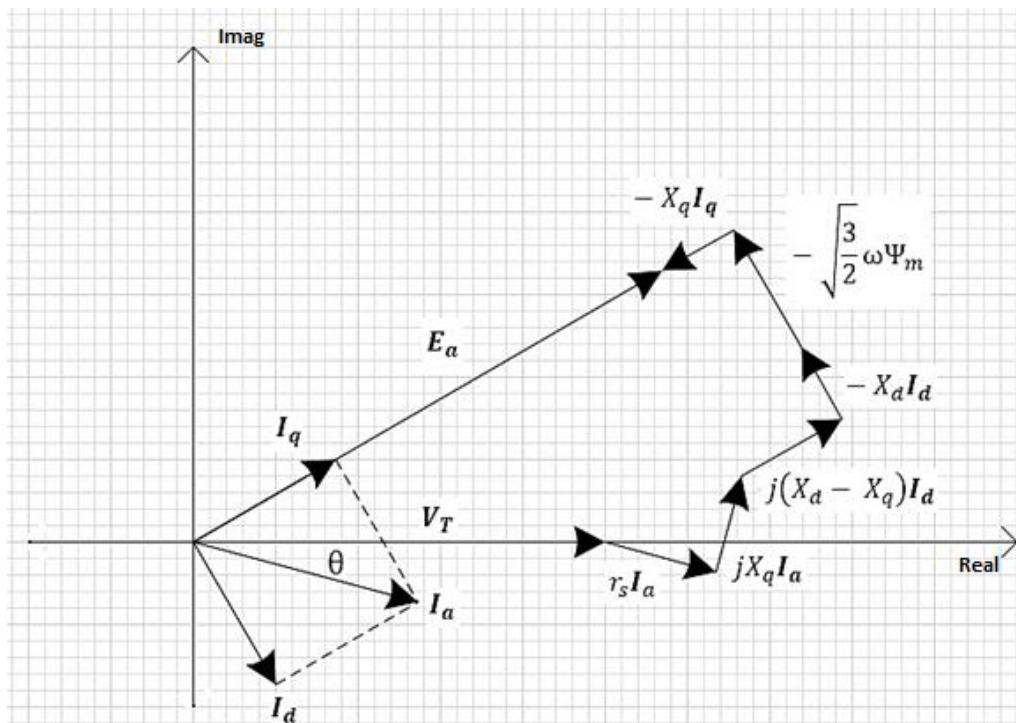


Figura 3.12 Diagrama fasorial del circuito equivalente para un GSIP – Elaboración propia.

El diagrama fasorial de la figura 3.12 es a partir del circuito equivalente de la figura 3.11 para el análisis de los GSIP del que se dedujo la ecuación fasorial, con la interpretación de un sistema de generador síncrono de polos salientes, a partir de la deducción de la transformada de Park del cambio de ejes abc, a un eje coordinado dq, es decir, en directa d y en cuadratura q. El flujo magnético es paralelo al eje d.

### 3.21. SISTEMA DE ECUACIONES PARA EL GENERADOR SÍNCRONO DE IMANES PERMANENTES DE POLOS LISOS.

Estas ecuaciones son un caso particular de las de polos salientes, las ecuaciones de polos salientes con las de polos lisos son idénticas desde la ecuación (3.1) hasta la ecuación (3.5) En el caso generador síncrono de imanes permanentes de rotor de polos lisos se cumple que  $g_{\min} = g_{\max}$ , haciendo que  $\varepsilon_2 = 0$  por tanto las inductancias propias de cada fase y mutuas mostradas en la ecuación

$$L_M = \begin{pmatrix} L_1 + L_A & -\frac{L_A}{2} & -\frac{L_A}{2} \\ -\frac{L_A}{2} & L_1 + L_A & -\frac{L_A}{2} \\ -\frac{L_A}{2} & -\frac{L_A}{2} & L_1 + L_A \end{pmatrix}$$



**3.22. ECUACIONES DEL GENERADOR DE IMANES PERMANENTES DE POLOS LISOS EN EL SISTEMA DE REFERENCIA SÍNCRONO.**

$$\mathbf{T} \cdot \vec{v}_{abc} = -\mathbf{T} \cdot r_s \cdot \vec{i}_{abc} - \mathbf{T} \cdot \frac{d}{dt} (L_M \cdot \vec{i}_{abc}) + \mathbf{T} \cdot \frac{d}{dt} \vec{\Psi}_{abc|M}$$

$$\vec{v}_{dq0} = -\mathbf{T} \cdot r_s \cdot \mathbf{T}^{-1} \cdot \vec{i}_{dq0} - \mathbf{T} \cdot L_M \cdot \frac{d}{dt} (\mathbf{T}^{-1}) \cdot \vec{i}_{dq0} - \mathbf{T} \cdot L_M \cdot \mathbf{T}^{-1} \cdot \frac{d}{dt} (\vec{i}_{dq0}) + \mathbf{T} \cdot \frac{d}{dt} (\vec{\Psi}_{abc|M})$$

$$\mathbf{T} \cdot r_s \cdot \mathbf{T}^{-1} = \begin{bmatrix} r_s & 0 & 0 \\ 0 & r_s & 0 \\ 0 & 0 & r_s \end{bmatrix}$$

$$-\mathbf{T} \cdot L_M \cdot \frac{d}{dt} (\mathbf{T}^{-1}) = \omega \cdot \begin{bmatrix} 0 & -L_{ls} - \frac{3L_A}{2} & 0 \\ L_{ls} + \frac{3L_A}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{T} \cdot L_M \cdot \mathbf{T}^{-1} = \begin{bmatrix} L_{ls} + \frac{3L_A}{2} & 0 & 0 \\ 0 & L_{ls} + \frac{3L_A}{2} & 0 \\ 0 & 0 & L_{ls} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{T} \cdot \frac{d}{dt} (\vec{\Psi}_{abc|M}) = \begin{bmatrix} \Psi_d \\ \Psi_q \\ \Psi_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{\frac{3}{2}} \omega \Psi_m & 0 \\ \sqrt{\frac{3}{2}} \omega \Psi_m & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{L}_d = \mathbf{L}_q = \mathbf{L} = L_l + \frac{3}{2} L_A$$

El sistema lineal que modela el generador síncrono de imanes permanentes en el sistema de referencia síncrono viene dado por la ecuación mostrada.

$$\vec{v}_{dq0} = \mathbf{A} \cdot \vec{i}_{dq0} - \mathbf{B} \cdot \frac{d}{dt} \vec{i}_{dq0} + \vec{\Psi}_{dq0}$$

Donde las matrices de A y B, están definidas en

$$A = \begin{bmatrix} -r_s & \omega \cdot L & 0 \\ -\omega \cdot L & -r_s & 0 \\ 0 & 0 & -r_s \end{bmatrix}; B = \begin{bmatrix} L & 0 & 0 \\ 0 & L & 0 \\ 0 & 0 & L_{ls} \end{bmatrix}; \vec{\Psi}_{dq0} = \begin{bmatrix} \sqrt{\frac{3}{2}} \omega \Psi_m \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Rescribiendo el modelo del generador síncrono de imanes permanentes [12], en el sistema de referencia síncrono se obtienen las ecuaciones diferenciales de las corrientes y tensiones:

$$v_d = -r_s i_d + \omega L i_q - L \frac{di_d}{dt}$$

$$v_q = -r_s i_q + \omega L i_d - L \frac{di_q}{dt} + \sqrt{\frac{3}{2}} \omega \Psi_m$$

$$v_t = v_d + v_q$$

$$v_t = -r_s i_d + \omega L i_q - L \frac{di_d}{dt} - r_s i_q + \omega L i_d - L \frac{di_q}{dt} + \sqrt{\frac{3}{2}} \omega \Psi_m$$

$$i_a = i_d + i_q$$

$$v_t = -r_s (i_d + i_q) + \omega L (i_d + i_q) - L \frac{d}{dt} (i_d + i_q) + \sqrt{\frac{3}{2}} \omega \Psi_m$$

$$v_t = -r_s i_a + \omega L i_a - L \frac{di_a}{dt} + \sqrt{\frac{3}{2}} \omega \Psi_m$$

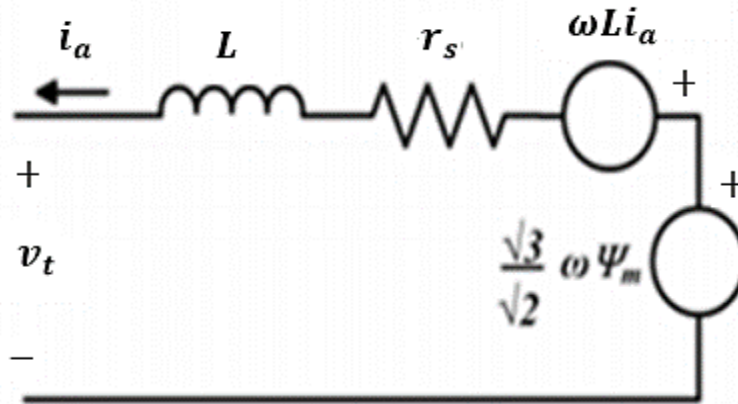


Figura 3.13 Diagrama del circuito equivalente para un GSIP de polos lisos - Mejora de la eficiencia y de las prestaciones dinámicas en procesadores electrónicos de potencia para pequeños aerogeneradores síncronos operando en régimen de velocidad variable Tesis doctoral por Luis Gonzáles [12].

### 3.23. ECUACIONES MECÁNICAS DEL GENERADOR SÍNCRONO DE IMANES PERMANENTES DE POLOS LISOS.

La potencia manejada en el GSIP está dada por

$$p_e = (v_d i_d + v_q i_q)$$

Después de sustituir las tensiones  $v_d$ ,  $v_q$  en la ecuación anterior se obtiene:

$$p_e = \underbrace{(r_s i_d^2 + r_s i_q^2)}_{\text{Perdidas en Conductores}} + \underbrace{\left( \frac{L}{2} \frac{d}{dt} (i_d^2) + \frac{L}{2} \frac{d}{dt} (i_q^2) \right)}_{\text{Variación de energía magnética}} + \underbrace{\omega \left( \sqrt{\frac{3}{2}} \Psi_m i_q \right)}_{\text{Potencia mecánica de salida}}$$

La potencia aprovechable en términos mecánicos y eléctricos del generador en régimen permanente está determinada por:

$$p_{ef} = \omega_r T_e = \omega \left( \sqrt{\frac{3}{2}} \Psi_m i_q \right)$$

El par electromagnético asociado al generador en función de las corrientes en el sistema de referencia dq.

$$T_e = p \left( \sqrt{\frac{3}{2}} \Psi_m i_q \right)$$

## **CAPÍTULO IV – APLICACIONES ELÉCTRICAS DE LOS GENERADORES SÍNCRONOS.**

Se ha descrito anteriormente las características físicas y eléctricas que conlleva un generador síncrono, ya sea con o sin escobillas (excitatriz con escobillas o carbones o con electrónica de potencia) o con excitatriz de imanes permanentes, pero es necesario establecer diferencias entre el tipo de tecnología además de definir ventajas y desventajas de los parámetros eléctricos establecidos de una sobre la otra. Por lo que es necesario conocer los tipos de generadores que se utilizan comúnmente en las plantas generadoras, ya sea de vapor, hidroeléctricas o térmicas, por lo que indicar el panorama del sector energético del país, identificar los tipos de generación para definir cuáles podrían utilizar generadores sin escobillas o generadores de excitatriz de imanes permanentes.

El sector eléctrico salvadoreños, enfocado en el área de generación eléctrica está compuesto de la siguiente manera:

Empresas generadoras: Las cuales poseen las centrales de producción de energía eléctrica y la comercializan en forma total o parcial [13].

A continuación se muestra los distintos tipos de generación eléctrica del país, el cual contiene, generación Hidroeléctrica, Geotérmica, Térmica y Biomasa, estos datos son parte del informe del sector eléctrico 2015 del Consejo Nacional de Energía – CNE.

#### 4.1. CAPACIDAD DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN EL SALVADOR.

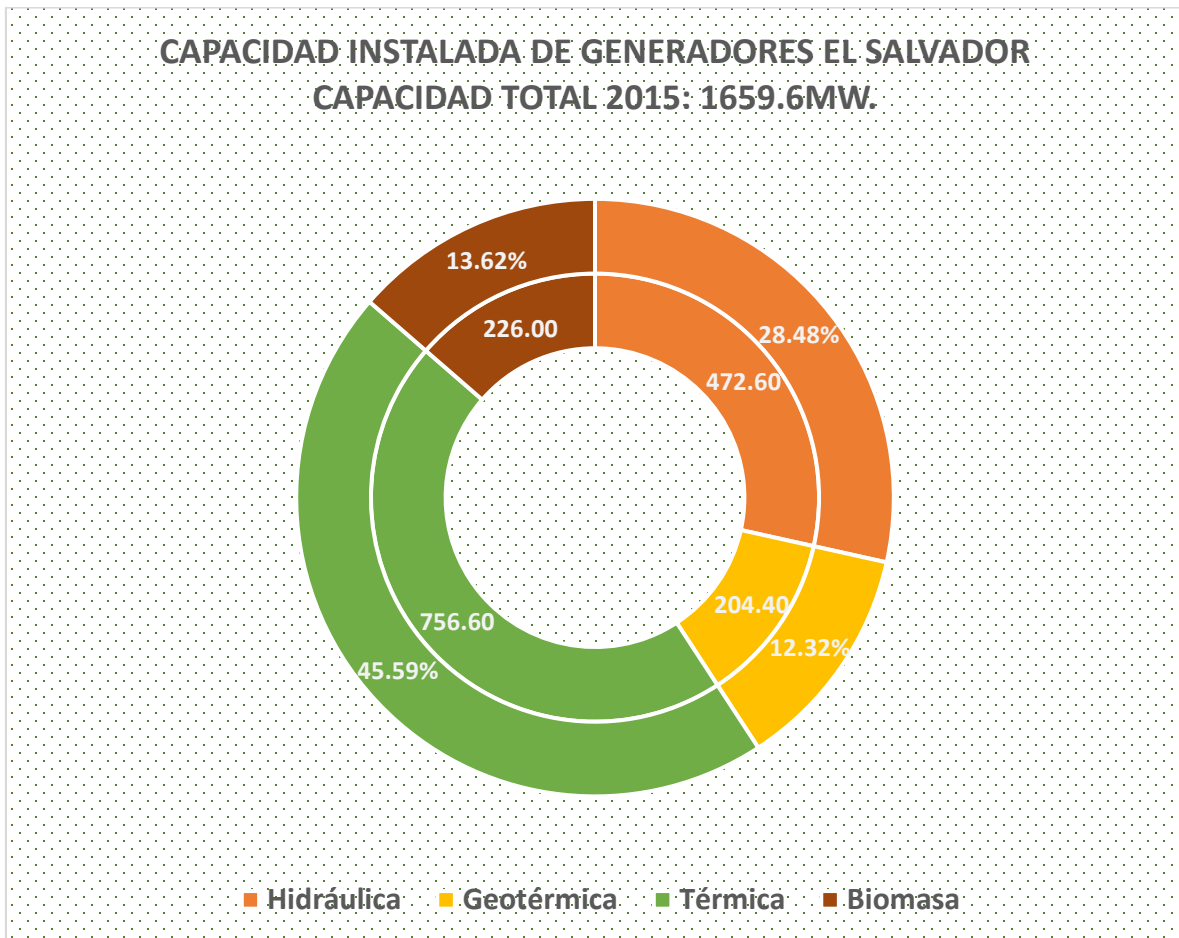


Figura 4.1 Tipo de generación eléctrica en El Salvador – Sector eléctrico de El Salvador Informe PROESA-CNE 2015 [13].

La tabla 4.1 muestra la contribución de las distintas generadoras en MW y su aporte porcentual que componen el sistema de generación eléctrica de El Salvador, con esto se logra establecer la finalidad de los distintos tipos de generadores utilizados en el ramo, es decir, las cuatro fuentes de energéticas las cuales son: Geotérmica, Hidroeléctrica, Biomasa y Térmica, respectivamente, lo que permite definir algunos parámetros del estudio realizado sobre generadores síncronos de imanes permanentes para poder ser comparados con los generadores tradicionales.





|  <b>HIDRÁULICA</b> | Potencia [MW] | %            |
|---|---------------|--------------|
| Guajoyo   | 19.80         | 1.2%         |
| Cerrón Grande   | 172.80        | 10.4%        |
| 5 de Noviembre  | 100.00        | 6.0%         |
| 15 de Septiembre  | 180.00        | 10.8%        |
|   | <b>472.60</b> | <b>28.4%</b> |
|  <b>GEOTÉRMICA</b> | Potencia [MW] | %            |
| Ahuachapán  | 96.00         | 5.7%         |
| Berlín  | 109.40        | 6.6%         |
|   | <b>205.40</b> | <b>12.3%</b> |
|  <b>BIOMASA</b>    | Potencia [MW] | %            |
| Cassa   | 107.50        | 6.5%         |
| El Ángel  | 97.50         | 5.9%         |
| La Cabaña   | 21.00         | 1.3%         |
|   | <b>226.00</b> | <b>13.7%</b> |
|  <b>TÉRMICA</b>  | Potencia [MW] | %            |
| DUKE ENERGY   | 338.30        | 20.4%        |
| Nejapa Power  | 144.00        | 8.7%         |
| HOLCIM  | 25.90         | 1.6%         |
| INE   | 100.20        | 6.0%         |
| TEXTUFIL  | 42.50         | 2.6%         |
| GECSA   | 11.60         | 0.7%         |
| Energías Borealis   | 13.60         | 0.8%         |
| Hilcasa   | 6.80          | 0.4%         |
| Termopuerto   | 73.70         | 4.4%         |
|   | <b>756.60</b> | <b>45.6%</b> |

Tabla 4.1 Composición de las distintas generadoras de energía eléctrica en El Salvador año 2015 – Sector eléctrico de El Salvador Informe PROESA-CNE 2015 [13].

## Evolución de la generación eléctrica - Unidades de generación en GWh.

En El Salvador, la principal fuente de generación disponible para atender la demanda de energía, en la última década, ha sido el combustible fósil asociado a la generación térmica. Con el tiempo se ha aumentado la producción con recursos hidroeléctricos, geotérmicos y biomasa [13].

La participación de la hidroelectricidad era mayoritaria para el final de la década de los 80's; sin embargo, este sector fue perdiendo peso por el aumento considerable de la tecnología térmica [13].

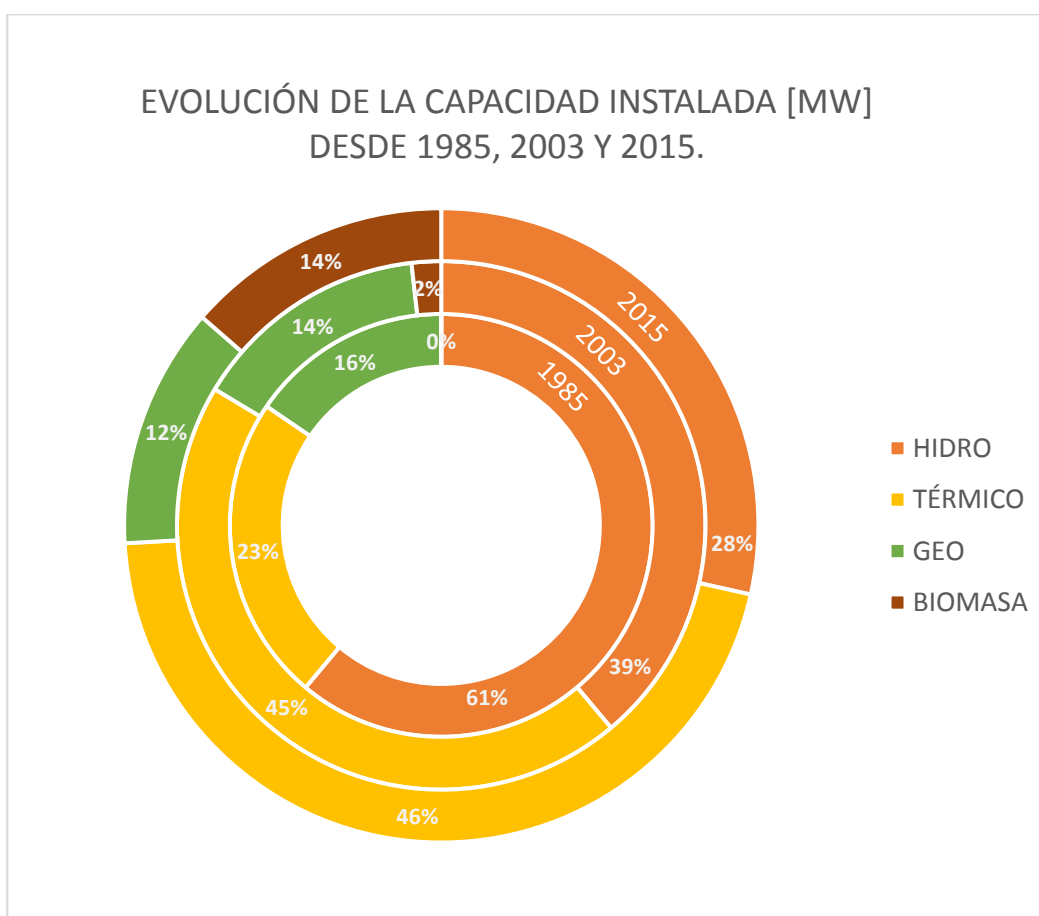


Figura 4.2 Evolución de la capacidad instalada en El Salvador para los años 1985, 2003 y 2015 - Sector eléctrico de El Salvador Informe PROESA-CNE 2015 [13].

La demanda de energía eléctrica ha sido creciente durante las últimas décadas, por lo que se lleva pequeño un registro [13] el cual se puede mencionar en la Figura 4.2, desde 1985, solamente se contaba con generación del tipo Hidroeléctrica, geotérmica y Térmica respectivamente, con el tiempo se ha implementado los deshechos de la caña que en su mayoría es la Biomasa, a partir del año 2003 que se tiene un registro de generación a partir de la Biomasa, y en el 2015 finalmente se tiene un recuento del total de MW que se aportan a la red por los cuatro sistemas de generación antes mencionados.

Por ahora solo se ha mencionado la capacidad instalada del sistema, es decir, la potencia que la máquina es capaz de entregar nominalmente o máxima carga acorde a las especificaciones del fabricante, pero dada la eficiencia del sistema de generación se habla además de la capacidad disponible, es decir, la potencia que las unidades generadoras pueden entregar, basadas en restricciones técnicas como: demanda máxima, disponibilidad de combustible, tasa de salida forzada, entre otros [13].



Figura 4.3 Mapa de las Generadoras de energía eléctrica de El Salvador 2015 – Plan maestro para el desarrollo de la energía renovable en El Salvador mayo 2012 CNE [14].



A continuación se presenta el panorama del Plan Maestro para el desarrollo de la Energía renovable en El Salvador [14] sobre la integración de pequeñas centrales Hidroeléctricas y energía eólica.

### **PLAN DE DESARROLLO DE ENERGÍAS RENOVABLES EN EL SALVADOR.**

En El Salvador se describe un informe denominado “Plan Maestro” para el desarrollo de las energías renovables que ha sido elaborado en base a las investigaciones y conclusiones obtenidas de los estudios y reuniones de trabajo realizadas.

El Plan Maestro se elaboró sobre la base de siete tipos de energías renovables y pretende ser un Plan Indicativo de Desarrollo para 15 años distribuidos en tres fases que abarcan desde el 2012 hasta el 2026. En la siguiente tabla se presenta la capacidad estimada en cada una de las fases del Plan Maestro.

| Tipo de energía   | Existentes | Fase 1<br>(2012 - 2016) | Fase 2<br>(2017 - 2021) | Fase 3<br>(2022 - 2026) | Fase 1 a 3<br>Total |
|---|------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|---------------------|
| <b>Pequeñas centrales Hidroeléctricas (Hasta 20 MW)</b> | 35 MW      | 102.5 MW                | 51.8 MW                 | 16.0 MW                 | 170.3 MW            |
| <b>Eólica</b>   | -          | 10 MW                   | 20 MW                   | 30 MW                   | 60 MW               |
| Solar Fotovoltaica                                      | 0.5 MW     | 18 MW                   | 21 MW                   | 51 MW                   | 90 MW               |
| Solar Térmica   | -          | 60 MW                   | 80 MW                   | 60 MW                   | 200 MW              |
| Geotérmica  | 204.4 MW   | 5 ~ 9 MW                | 55 ~ 80 MW              | -                       | 60 ~ 89 MW          |
| Biomasa   | 109.5 MW   | 45 MW                   | -                       | -                       | 45 MW               |
| Biogás  | 6.3 MW     | 10 MW                   | -                       | 25 MW                   | 35 MW               |

Tabla 4.2 Plan indicativo de desarrollo de energías renovables de El Salvador 2012-2026 - Plan maestro para el desarrollo de la energía renovable en El Salvador mayo 2012 CNE [14].

Las fases contempladas en el diseño del plan de desarrollo para las pequeñas centrales Hidroeléctricas, menores a los 20 MW así como la generación eólica son proyectos establecidos al mediano plazo para poder aportar al mercado eléctrico las potencias establecidas.

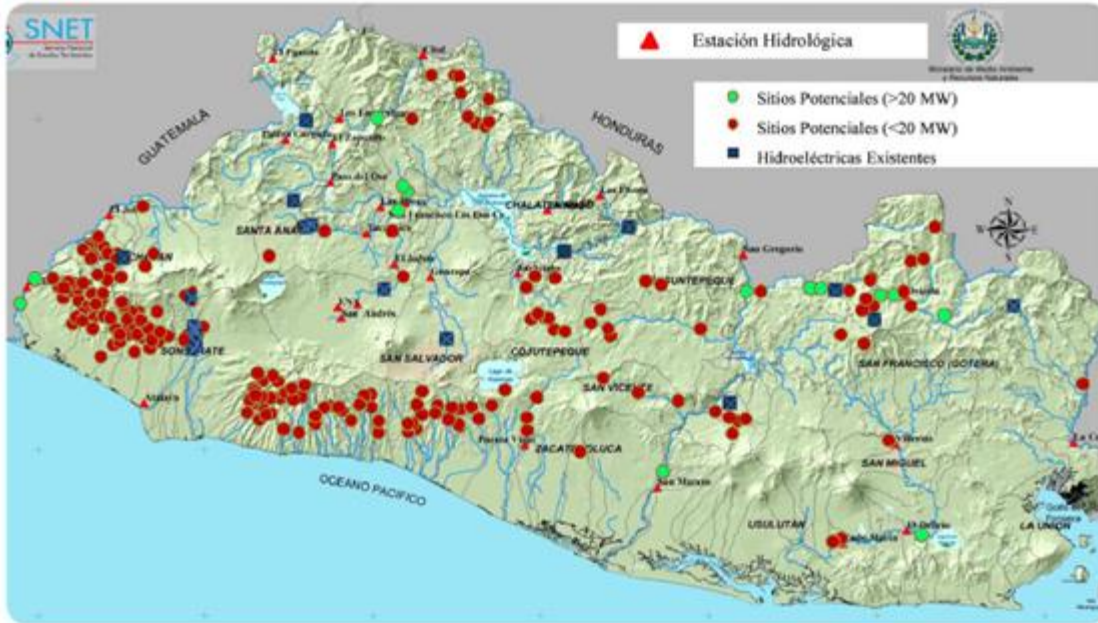


Figura 4.4 Ubicación de potencial energético para generación Hidroeléctrica - Plan maestro para el desarrollo de la energía renovable en El Salvador mayo 2012 CNE [14].

La figura 4.4 muestra el mapa energético de la posible aplicación del recurso hídrico en la generación eléctrica, dado que el plan maestro abarca desde el 2012 hasta el 2026, por supuesto para ello, el llevar a cabo la implementación de nuevas mini-plantas de generación hidroeléctricas debe de llevarse a cabo un estudio de factibilidad que permita establecer el beneficio costo que conlleva la inversión, de ser posible utilizando generadores síncronos de excitatriz de imanes permanentes.

De acuerdo con el Laboratorio Nacional de Energías Renovables de los Estados Unidos (**NREL**, por sus siglas en ingles) el área donde la densidad de energía eólica se convierte en más de  $320 \text{ W/m}^2$  a 30 metros sobre el nivel del suelo, y más de  $400 \text{ W/m}^2$  a 50 m sobre el nivel del suelo; es suficiente para desarrollar proyectos que utilicen el viento como fuente para producción de energía eléctrica. La siguiente tabla muestra una evaluación estándar del potencial de energía eólica y la velocidad del viento [14].

| Clase | Potencial del recurso | Velocidad del viento (m/s) 30m de altura | Densidad de potencia del viento ( $W/m^2$ ) 30m de altura | Velocidad del viento (m/s) 50m de altura | Densidad de potencia del viento ( $W/m^2$ ) 50m de altura |
|-------|-----------------------|--|---|--|---|
| 1     | Pobre                 | 0.0 - 5.1                                | 0 – 160   | 0 - 5.6                                  | 0 – 200   |
| 2     | Marginal              | 5.1 - 5.9                                | 160 – 240   | 5.6 - 6.4                                | 200 – 300   |
| 3     | Considerable          | 5.9 - 6.5                                | 240 – 320   | 6.4 - 7.0                                | 300 – 400   |
| 4     | Buena                 | 6.5 - 7.0                                | 320 – 400   | 7.0 - 7.5                                | 400 – 500   |
| 5     | -                     | 7.0 - 7.4                                | 400 – 480   | 7.5 - 8.0                                | 500 – 600   |
| 6     | -                     | 7.4 - 8.2                                | 480 – 640   | 8.0 - 8.8                                | 600 – 800   |
| 7     | -                     | 8.2 - 11                                 | 640 – 1600  | 8.8 - 11.9                               | 800 – 2000  |

Tabla 4.3 Definiciones estándar de clases de viento según el NREL - Plan maestro para el desarrollo de la energía renovable en El Salvador mayo 2012 CNE [14].

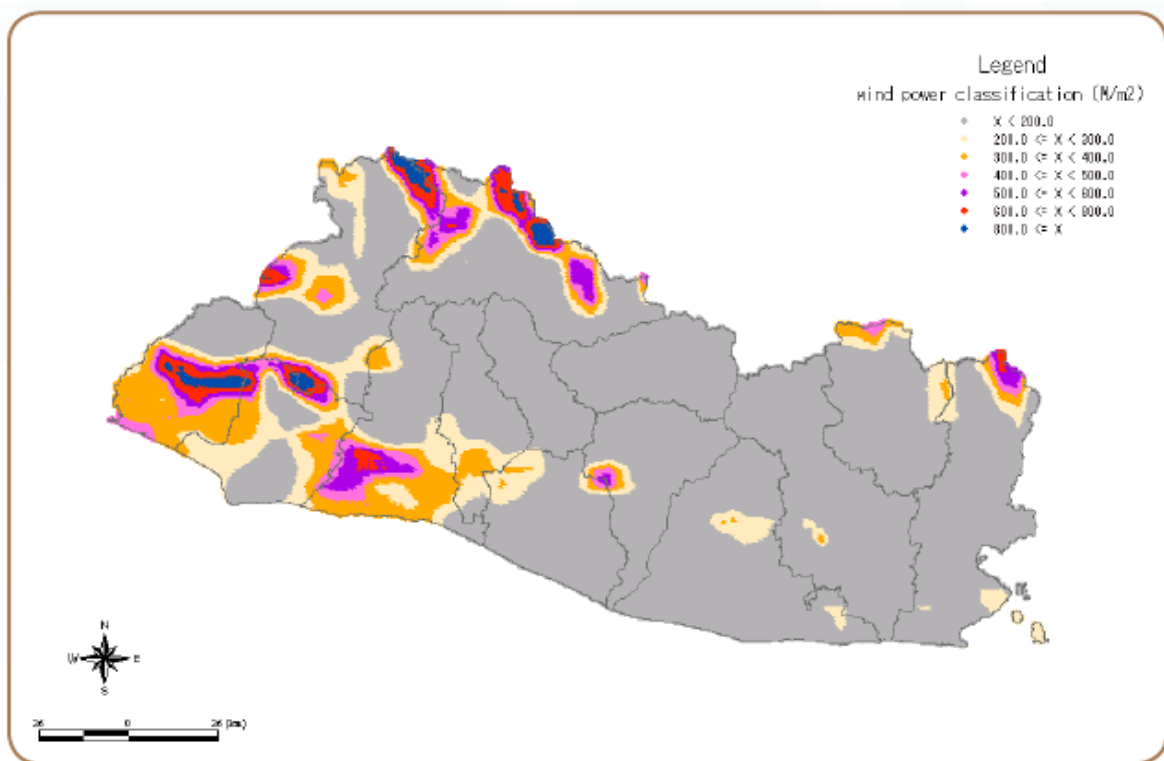


Figura 4.5 Mapa de potencial eólico de El Salvador a 30 m sobre el nivel del suelo - Plan maestro para el desarrollo de la energía renovable en El Salvador mayo 2012 CNE [14].

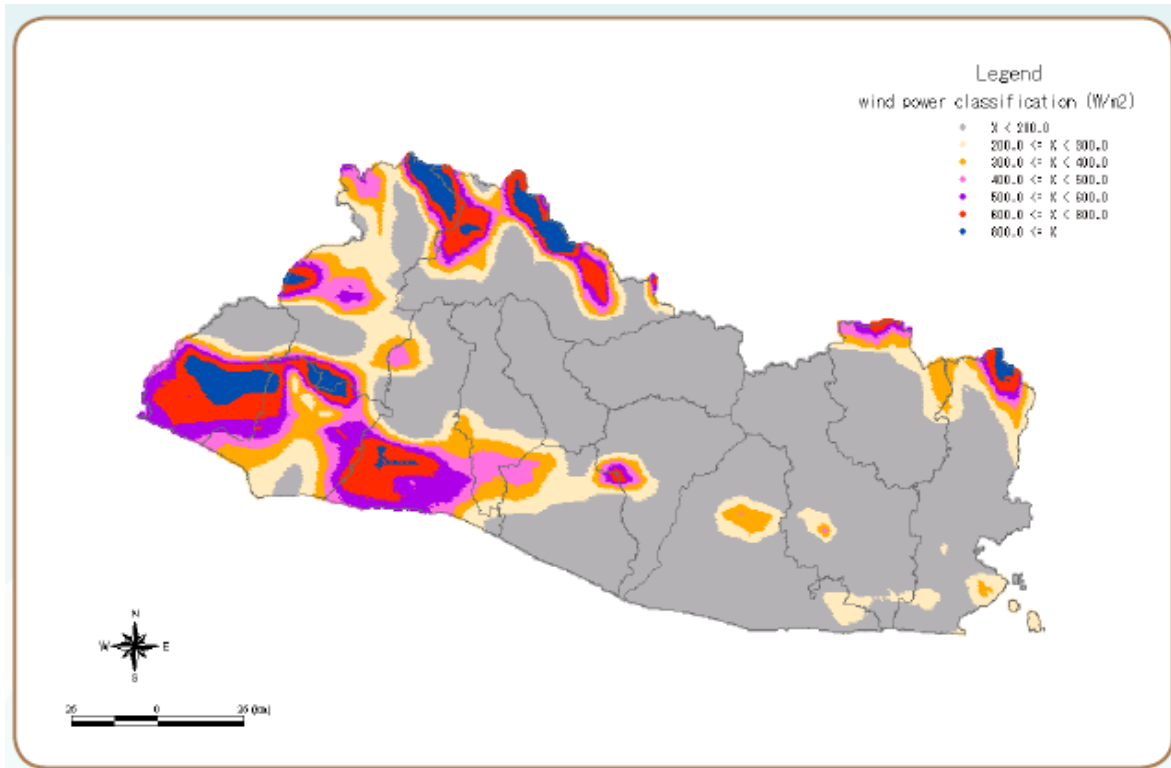


Figura 4.6 Mapa de potencial eólico de El Salvador a 50 m sobre el nivel del suelo - Plan maestro para el desarrollo de la energía renovable en El Salvador mayo 2012 CNE [14].

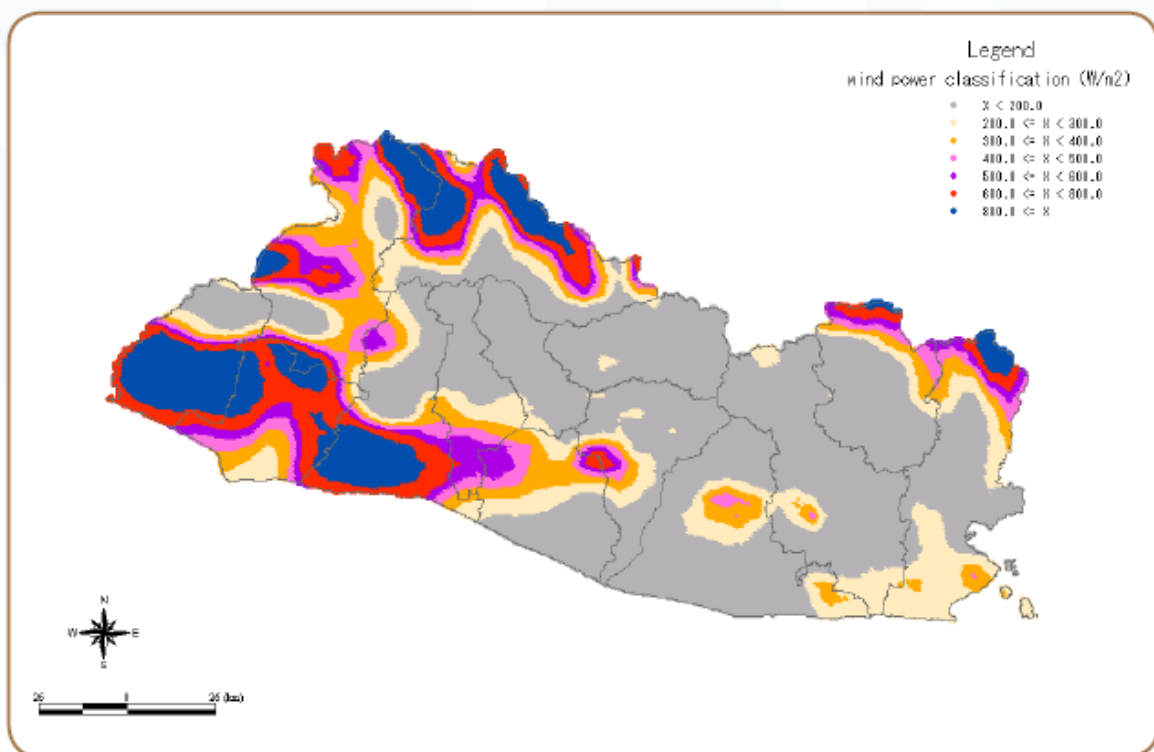


Figura 4.7 Mapa de potencial eólico de El Salvador a 80 m sobre el nivel del suelo [14] - Plan maestro para el desarrollo de la energía renovable en El Salvador mayo 2012 CNE.

El desarrollo de la energía eólica en El Salvador, según el informe está siendo analizado, gestionando los diversos estudios que conlleva el plan maestro [14] por lo que el uso de GIS puede ser parte del estudio de factibilidad que conlleva el análisis de este tipo de generación de energía eléctrica.

#### **Situación actual de la energía eólica en El Salvador.**

Los proyectos de energía eólica se muestran en la Tabla 4.4, a una velocidad promedio anual del viento a 60 metros sobre el nivel del suelo y la capacidad planificada dentro del plan de desarrollo de CEL.

|            | Velocidad promedio anual del viento a 60m sobre el nivel del suelo [m/s] | Capacidad [MW] |
|------------|--|----------------|
| Metapán    | 6.43   | 42             |
| San Julián | 5.38   | 30             |

**Tabla 4.4 Parques eólicos candidatos de CEL - Plan maestro para el desarrollo de la energía renovable en El Salvador mayo 2012 CNE [14].**

Actualmente hay solo un plan de desarrollo realizado por la Comisión Ejecutiva Hidroeléctrica del Río Lempa (CEL). El plan de desarrollo comprende desde 2012 hasta 2016 una potencia de 10 MW, de 2017 a 2021 20 MW y de 2022 a 2026 instalar una potencia de 30 MW, se elaboró para su implementación entre los años 2012 y 2026.

## **4.2. TIPOS DE ENERGÍA PARA EL ESTUDIO DE GENERADORES SÍNCRONOS DE IMANES PERMANENTES GSIP.**

La aplicación final de los GSIP y su comparación se realizarán en base al tipo de generación hidroeléctrica y generación eólica y de ser posible la generación geotérmica dadas las características de los GSIP que han sido mencionadas en el capítulo anterior.

### **Generación de energía Hidráulica.**

Las centrales hidroeléctricas aportan un modesto porcentaje a la producción de energía, sin embargo juegan un papel fundamental ya que, dada su flexibilidad de operación, pueden adaptarse a las variaciones de demanda. Por lo tanto, la energía hidroeléctrica es clave para la estabilidad y la garantía del sistema eléctrico [15].

La industria hidroeléctrica necesita un aporte masivo de agua, aunque estos caudales retornan íntegramente a las masas de agua tras su uso, el funcionamiento característico de las centrales hidroeléctricas supone una importante presión por las fuertes variaciones en los caudales circulantes en los cauces [15].

Una central hidroeléctrica puede definirse como instalaciones mediante las que se consigue aprovechar la energía contenida en una masa de agua situada a una cierta altura, transformándola en energía eléctrica. Esto se logra conduciendo el agua desde el nivel en el que se encuentra, hasta un nivel inferior en el que se sitúan una o varias turbinas hidráulicas que son accionadas por el agua y que a su vez hacen girar uno o varios generadores produciendo energía eléctrica [15].

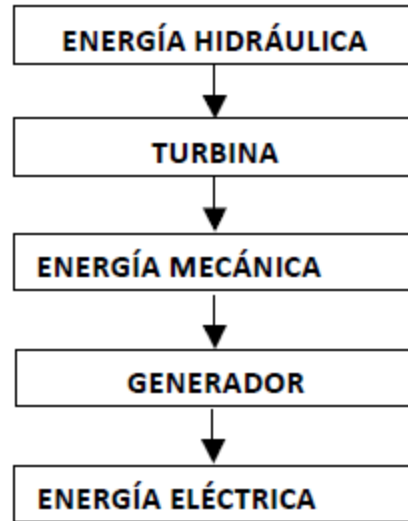


Figura 4.8 Cadena de transformación de energía hidráulica en energía eléctrica – Centrales de generación de energía eléctrica Universidad de Cantabria España por Diego Inmaculada [15].

### **Generación de energía Eólica.**

La energía eólica es conocida como una fuente de energía producida por el viento y se busca aplicar estudios enfocados en el desarrollo de la eficiencia de transformar esta energía y su producción dadas sus características, esta energía representa un recurso autónomo, barato e inagotable que no contamina el medio ambiente eliminando hasta cierto punto el uso y la dependencia del combustible fósil.

La transformación de la energía eólica a energía eléctrica es por medio de la utilización de un aerogenerador; generador de energía que es accionado por medio de la fuerza del viento conectado a redes de distribución de energía eléctrica o sistemas aislados a la red.

La cadena de conversión conlleva de energía eólica a aerogenerador a energía eléctrica, disponible para un sistema de transmisión o distribución<sup>10</sup>.

---

<sup>10</sup> UNIVERSIDAD POLITECNICA SALESIANA SEDE CUENCA – TESIS MODELACIÓN DE UN AEROGENERADOR DE IMÁN PERMANENTE Y SU CONTROLADOR POR CARLOS MÉNDEZ MARCILLO Y JUAN SEGARRA PÁG 2-3.

### 4.3. EQUIPO GENERAL ELÉCTRICO DE POTENCIA EN UNA PLANTA DE GENERACIÓN.

Este equipo está formado por los elementos necesarios para una vez obtenida la energía eléctrica en bornes del generador [15], poder entregarla en el lugar exigido con las características adecuadas:

#### **Generador:**

El generador tiene como misión transformar en energía eléctrica la energía mecánica suministrada por la turbina. En función de la red que debe alimentar, se puede escoger entre generadores síncronos o asíncronos. Ambos tipos de máquina están formados por una parte estática, denominada estator, y una parte móvil, denominada rotor. En cada uno de ellos existe un circuito eléctrico denominado devanado: devanado estatórico y devanado rotórico. El diseño del devanado estatórico es el mismo en ambas máquinas; sin embargo, el devanado rotórico es muy diferente [15].

El rotor, a través de los acoplamientos necesarios, se encuentra unido al eje de la turbina, o del multiplicador, y recibe la energía mecánica producida por la turbina. Esta energía es convertida en energía magnética y transmitida al devanado estatórico, que en forma de corriente eléctrica la entrega a la red a la que se conecta [15].

#### **Transformador de potencia:**

Los transformadores son máquinas eléctricas estáticas formadas por dos devanados eléctricos (por cada fase) arrolladas sobre un mismo núcleo ferromagnético. Uno de los arrollamientos, llamado primario, recibe energía eléctrica con unos determinados valores de tensión e intensidad ( $V_1$ ,  $I_1$ ). Esta energía es convertida en energía magnética, que posteriormente vuelve a transformarse en energía eléctrica, con unos valores de tensión y corriente ( $V_2$ ,  $I_2$ ) distintos, en el segundo devanado, llamado secundario [15].



Por tanto, se transforma la energía eléctrica absorbida en otra energía eléctrica por medio de un campo magnético que hace de medio de acoplamiento. La tensión de trabajo de los generadores es media o baja, y si el transporte de la energía se realizara a estos niveles de tensión, las corrientes eléctricas circulantes serían demasiado altas, lo que implicaría un tremendo derroche por pérdidas en los conductores, además de que estos deberían ser de elevada sección. La misión de los transformadores es elevar el valor de la tensión generada de manera que la corriente a transmitir se reduzca en la misma proporción, reduciéndose así las pérdidas y la sección en los conductores [15].

Otros elementos que contiene una planta de generación hidroeléctrica y en general de los demás tipos plantas generadoras:

Interruptores automáticos, Seccionadores, Elementos de mando y protección, Servicios auxiliares [15]. Solamente se describe de forma muy general lo que contiene una planta generadora, ya que en realidad se desea abordar puntualmente las máquinas síncronas y sus distintas aplicaciones.

## **GENERALIDADES SOBRE NORMAS PARA GENERADORES SÍNCRONOS [16].**

### **ALCANCE**

Las normas de esta Parte 32 de la Sección IV cubren generadores síncronos del tipo de campo giratorio a velocidades y en las clasificaciones cubiertas por las Tablas 4.5 y 4.6. (Tablas 32-1 y 32-2. Según la norma) [16].

### **CALIFICACIONES DE KILOVOLTIO-AMPERE (kVA) Y KILOWATTS (kW)**

Las clasificaciones de los generadores síncronos de 60 y 50 Hertz, con factor de potencia de 0.8 (sobre excitado) [16].

| kVA  | kW  | kVA  | kW   | kVA   | kW    |
|------|-----|------|------|-------|-------|
| 1.25 | 1.0 | 250  | 200  | 4375  | 3500  |
| 2.5  | 2.0 | 312  | 250  | 5000  | 4000  |
| 3.75 | 3.0 | 375  | 300  | 5625  | 4500  |
| 6.25 | 5   | 438  | 350  | 6250  | 5000  |
| 9.4  | 7.5 | 500  | 400  | 7500  | 6000  |
| 12.5 | 10  | 625  | 500  | 8750  | 7000  |
| 18.7 | 15  | 750  | 600  | 10000 | 8000  |
| 25   | 20  | 875  | 700  | 12500 | 10000 |
| 31.3 | 25  | 1000 | 800  | 15625 | 12500 |
| 37.5 | 30  | 1125 | 900  | 18750 | 15000 |
| 50   | 40  | 1250 | 1000 | 25000 | 20000 |
| 62.5 | 50  | 1563 | 1250 | 31250 | 25000 |
| 75   | 60  | 1875 | 1500 | 37500 | 30000 |
| 93.8 | 75  | 2188 | 1750 | 43750 | 35000 |
| 125  | 100 | 2500 | 2000 | 50000 | 40000 |
| 156  | 125 | 2812 | 2250 | 62500 | 50000 |
| 187  | 150 | 3125 | 2500 | 75000 | 60000 |
| 219  | 175 | 3750 | 3000 |       |       |

Tabla 4.5 Calificaciones de Kilovatio-Ampere y Kilowatts – Norma NEMA MG-1-2009 Motors and Generators Part 32 Sec IV [16].

VALORES DE VELOCIDADES.

Las clasificaciones de velocidad deben ser como se muestra en la Tabla 4.6 (Tabla 32-2. Según la norma).

| Number of Poles | Speed, Rpm |          |
|-----------------|------------|----------|
|                 | 60 Hertz   | 50 Hertz |
| 2               | 3600       | 3000     |
| 4               | 1800       | 1500     |
| 6               | 1200       | 1000     |
| 8               | 900        | 750      |
| 10              | 720        | 600      |
| 12              | 600        | 500      |
| 14              | 514        | 429      |
| 16              | 450        | 375      |
| 18              | 400        | 333      |
| 20              | 360        | 300      |
| 22              | 327        | 273      |
| 24              | 300        | 250      |
| 26              | 277        | 231      |
| 28              | 257        | 214      |
| 30              | 240        | 200      |
| 32              | 225        | 188      |
| 36              | 200        | 167      |
| 40              | 180        | 150      |
| 44              | 164        | 136      |
| 48              | 150        | ---      |
| 52              | 138        | ---      |

Tabla 4.6 Calificación de velocidad - Norma NEMA MG-1-2009 Motors and Generators Part 32 Sec IV [16].

## CALIFICACIONES DE TENSIÓN.

| Three-Phase Broad Voltage | Three-Phase Discrete Voltage | Single-Phase Discrete Voltage |
|---------------------------|------------------------------|-------------------------------|
| 208-240/416-480           | 208Y/120                     | 120                           |
|                           | 240                          | 120/240                       |
|                           | 480                          | 240                           |
|                           | 480Y/277                     |                               |
|                           | 240/480                      |                               |
|                           | 600                          |                               |
|                           | 2400                         |                               |
|                           | 4160Y/2400                   |                               |
|                           | 4800                         |                               |
|                           | 6900                         |                               |
|                           | 13800                        |                               |

Tabla 4.7 Valores de tensión para circuitos de 60 Hz, voltios - Norma NEMA MG-1-2009 Motors and Generators Part 32 Sec IV [16].

| Three-Phase Broad Voltage | Single-Phase Broad Voltage | Three-Phase Discrete Voltage | Single-Phase Discrete Voltage |
|---------------------------|----------------------------|------------------------------|-------------------------------|
| 190-220/380-440           | 110-120/220-240            | 190                          | 127                           |
|                           |                            | 200Y/115                     | 115/230                       |
|                           |                            | 220Y/127                     | 220                           |
|                           |                            | 380                          | 250                           |
|                           |                            | 400Y/230                     |                               |
|                           |                            | 415                          |                               |
|                           |                            | 440                          |                               |
|                           |                            | 690                          |                               |
|                           |                            | 3300Y/1905                   |                               |
|                           |                            | 6000                         |                               |
|                           |                            | 11000                        |                               |
| 12470                     |                            |                              |                               |

Tabla 4.8 Valores de tensión para circuitos de 50 Hz, voltios - Norma NEMA MG-1-2009 Motors and Generators Part 32 Sec IV [16].

## EFICIENCIA

La eficiencia y los resultados se determinarán de acuerdo con la norma **IEEE Std 115**. La eficiencia se determinará a las condiciones nominales Las pérdidas siguientes se incluirán en la determinación de la eficiencia [16].

Pérdida de armadura, Pérdida de campo, Pérdida del núcleo.


## GENERADORES DE IMANES PERMANENTES.

El desarrollo de materiales de imán permanente de alta calidad en la producción comercial ha alentado a varios fabricantes a lanzar varias máquinas síncronas de imanes permanentes (GSIP) en el mercado. Las máquinas síncronas de imanes permanentes ya han sido aplicadas a los servo accionamientos durante mucho tiempo, y hoy en día hay máquinas síncronas de imanes permanentes bastante grandes también en uso industrial, el desarrollo ha estado en la dirección de la energía eólica implementado por generadores de imanes permanentes.

Las características de una máquina de imán permanente dependen en gran medida de la estructura del rotor. El rotor puede ser implementado de varias maneras. Cuando se emplean los modernos materiales de imán permanente, el rotor se puede construir incluso completamente sin hierro.

## CAPACIDADES DE GENERADORES DE IMANES PERMANENTES.

En los siguientes cuadros se muestra las capacidades de generadores con tecnología de imanes permanentes de algunos fabricantes y la aplicación para la cual están hechos.



| ESPECIFICACIONES TECNICAS   | APLICACIONES  | FABRICANTE  |
|---|---|---|
| <ul style="list-style-type: none"><li>• Capacidades de salida: 10 kW a 20 MW.</li><li>• Tensiones de operación: 120 V a una tensión alta de 13.8 kV.</li><li>• Velocidades de rotación: 10 rpm a 5,000 rpm de 2 a 400 polos.</li><li>• Fases de conexión: 1 y 3 fases</li><li>• Velocidad: constante y variable</li><li>• Frecuencia de operación: 50 y 60 Hz</li></ul> | <ul style="list-style-type: none"><li>• Turbinas eólicas</li><li>• Turbinas hidroeléctricas</li><li>• Energía generada por el oleaje.</li><li>• Turbinas geotérmicas/de vapor.</li><li>• Turbinas de gas y motores de combustión interna.</li></ul> |  |

|  |  |   |
|--|--|---|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• Capacidades de salida: 1 MW a 7 MW.</li> <li>• Tensiones de operación: 690V a 3.3kV.</li> <li>• Velocidades de rotación: 100 rpm a 2,000 rpm.</li> <li>• Fases de conexión: 1 y 3 fases</li> <li>• Frecuencia de operación: 50 y 60 Hz</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Turbinas Eólicas</li> <li>• Turbinas hidroeléctricas</li> </ul> | <p>Power and productivity for a better world™ </p>   |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• Capacidades de salida: 500 kVA a 4 MVA.</li> <li>Tensiones de operación: 400V a 6.6KV</li> <li>Velocidades de rotación: 100 rpm a 1,500 rpm.</li> <li>• Fases de conexión: 1 y 3 fases</li> <li>• Frecuencia de operación: 50 y 60 Hz</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Turbinas Eólicas</li> <li>• Turbinas hidroeléctricas</li> </ul> |   <p>Máquinas eléctricas</p> |

Tabla 4.9 Diferentes fabricantes de máquinas eléctricas síncronas de imanes permanentes<sup>11</sup>.

<sup>11</sup> <http://www.abb.com/sv/product/>  
<http://www.potenciaindustrial.com.mx/html/permanent-sp.html>  
<http://www.tes.cz/es/tem/generadores-sincronos/>

Generadores sin escobillas (Brushless) diferentes aplicaciones.

| APLICACIONES   | ESPECIFICACIONES TÉCNICAS   | FABRICANTE  |
|--|---|---|
| <p><b>Alternadores síncronos</b></p>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Potencias: a partir de 7.5 kVA.</li> <li>• Carcasas: a partir de la 160 (IEC).</li> <li>• Tensiones: 110 a 15,000 V.</li> <li>• Frecuencia: 50, 60, 120 y 400 Hz.</li> <li>• Grados de protección: IP21 a IP56 W.</li> <li>• Clases de aislamiento: 155 (F) y 180 (H).</li> <li>• <b>Excitación:</b> brushless con bobina auxiliar, brushless con PMG, brushless shunt.</li> <li>• Número de polos: 4, 6, 8, 10, 12, 20, 24 y 26.</li> </ul> |    |
| <p><b>Turbogeneradores</b><br/>Los turbogeneradores son aplicados en turbinas a vapor, a gas, entre otras.</p> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Potencias: hasta 150,000 kVA</li> <li>• Carcasas: 630 a 1250 (IEC)</li> <li>• Tensiones: hasta 13,800 V</li> <li>• Grados de protección: IP23 a IP56/IP65<sup>12</sup></li> <li>• Rotaciones: 3,600 e 1,800 rpm</li> </ul>   |  |

<sup>12</sup> Definición del grado/índice de protección acorde a DIN EN IEC-60529. Los niveles de protección están indicados por un código compuesto por dos letras constantes "IP" y dos números que indican el grado de protección. IP65 Primer índice: Protección contra el ingreso de sólidos, segundo índice: protección contra líquidos - [http://www.hellermannntyton.es/site/binaries/content/assets/downloads/es/el-catalogo-2011---2012/ht\\_es\\_chapter7.2.pdf](http://www.hellermannntyton.es/site/binaries/content/assets/downloads/es/el-catalogo-2011---2012/ht_es_chapter7.2.pdf) .

|   |   |   |
|---|---|---|
| <p><b>Hidrogeneradores</b></p> <p>Los hidrogeneradores son aplicados, en conjunto con turbinas hidráulicas, en la generación de energía eléctrica. Los hidrogeneradores pueden ser aplicados a turbinas Kaplan, Francis, Pelton, entre otras, con diversas posibilidades de configuraciones mecánicas y eléctricas.</p> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Potencias: hasta 150,000 kVA</li> <li>• Carcasas: 355 a 4,000 (IEC)</li> <li>• Tensiones: hasta 13,800 V</li> <li>• Grados de protección: IP21 a IP44</li> <li>• Rotaciones: 1,200 a 90 rpm</li> </ul>   |    |
| <p><b>Aerogeneradores</b></p> <p>Energía eólica.</p> <p>Los aerogeneradores AGW poseen control activo del ángulo de paso de los álabes y rotación variable del rotor, con un generador síncrono de imanes</p>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Potencia: 2.1 MW</li> <li>• Tensión: 34.5 kV</li> <li>• Grado de protección del generador: IP54</li> <li>• Grado de protección de la góndola: IP54 (versión maximizada) IP24 (versión normal)</li> </ul> |  |

|  |  |  |
|--|--|--|
| permanentes y acoplamiento directo con el rotor, sin necesidad de un multiplicador de velocidades. También cuenta con convertor de potencia plena, | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Potencia desde 0.55MW hasta 1.6MW</li> <li>• Rotaciones: 1000 a 1500 rpm</li> <li>• Tensión: 690 V</li> <li>• Factor de potencia: 0.91 hasta 0.98</li> <li>• Eficiencia a plena carga: 96.8% hasta 97.8%</li> </ul> |  |
|  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Potencia desde 1.65MW hasta 6.4MW</li> <li>• Rotaciones: 150 a 400 rpm</li> <li>• Tensión: 690 V</li> <li>• Factor de potencia: 0.92 hasta 0.95</li> <li>• Eficiencia a plena carga: 96.4% hasta 98%</li> </ul>     |  |
|  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Potencia desde 1.65MW hasta 6.3MW</li> <li>• Rotaciones: 11.4 a 17 rpm</li> <li>• Tensión: 690 V</li> <li>• Factor de potencia: 0.9 hasta 0.94</li> <li>• Eficiencia a plena carga: 94% hasta 94.6%</li> </ul>      |  |

Tabla 4. 10 Línea de productos y soluciones WEG catalogo en español<sup>13</sup>.

#### 4.4. PEQUEÑA COMPARACIÓN DE COSTOS DE GENERADORES EÓLICOS

El siguiente análisis es sobre un estudio donde se discute la viabilidad de sustituir generadores de inducción por generadores síncronos de imanes permanentes m a partir de cuatro aspectos diferentes:

- A. Costo Inicial
- B. Eficiencia
- C. Costo de mantenimiento
- D. Ahorro en la generación de energía

<sup>13</sup> WEG – ENERGÍA LINEA DE PRODUCTOS Y SOLUCIONES – MOTORES Y GENERADORES.  
<http://theswitch.com/wind-power/permanent-magnet-generators/>



### A - Costo inicial

La siguiente tabla muestra algunos costos de algunos tipos y capacidades de generadores eólicos de forma ilustrativa

| COSTO INICIAL | CAPACIDAD | TIPO DE GENERADOR                                 |
|---------------|-----------|---|
| \$ 263000     | 600 kW    | Inducción con caja de velocidad                   |
| \$ 223000     | 750 kW    | Síncrono de imán permanente con caja de velocidad |
| \$ 577000     | 1.5 MW    | Síncrono de imán permanente con caja de velocidad |

Tabla 4.11 Costos de generación eólica – Feasibility study for replacing Asynchronous Generators with synchronous generators in wind farm power stations.

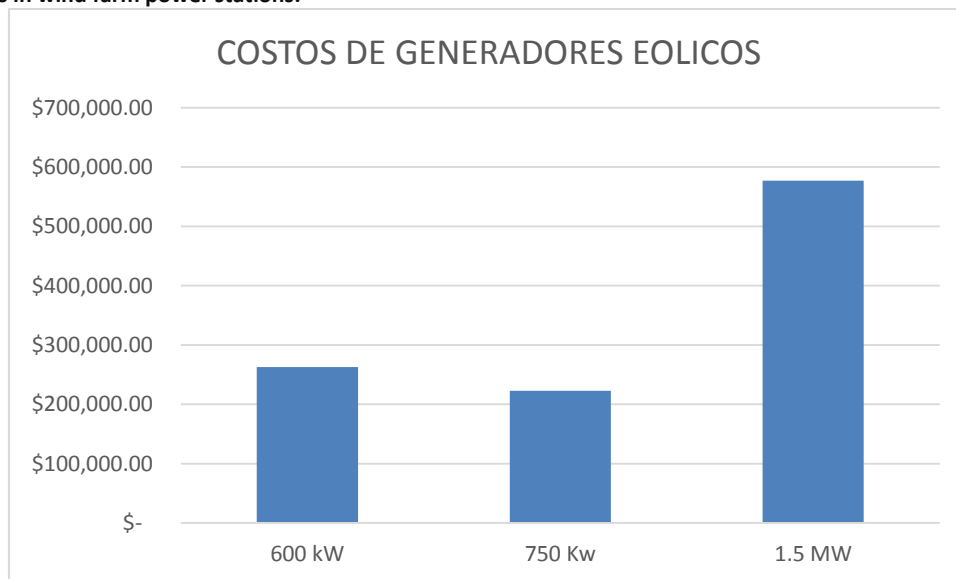
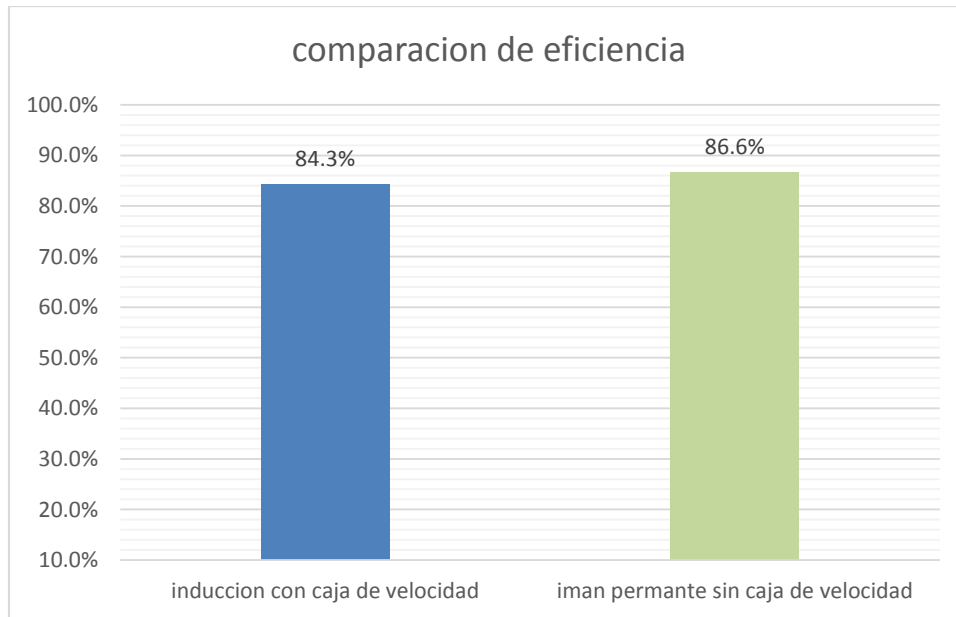


Tabla 4.12 Grafica de costos – Feasibility study for replacing Asynchronous Generators with synchronous generators in wind farm power stations.

### B- Eficiencia

La eficiencia de un generador síncrono de imanes permanentes promedio sin caja de cambios es del 86.6%, mientras que la eficiencia de los generadores de inducción de velocidad variable con caja de cambios (planificada) es del 84.3%. Vea la Figura



**Tabla 4.13 Comparación de eficiencia aerogeneradores – Feasibility study for replacing Asynchronous Generators with synchronous generators in wind farm power stations.**

### **C- Costo de Mantenimiento.**

El costo de mantenimiento de los generadores síncronos de imán permanente sin caja de cambios es la mitad del costo de los generadores de inducción equivalentes que incluyen cajas de engranajes.

Eliminación de costos de mantenimiento en la caja de velocidades por avería en engranajes.

### **D- Ganancia del poder generador.**

Se basa en la eficiencia del generador tras una comparación con 20 unidades de generadores de inducción contra 20 generadores síncronos de imanes permanentes ambos generadores de 660 kW.

**GENERADOR DE INDUCCION.**

Capacidad: 20 UNIDADES DE 660 kW

Eficiencia: 84.3%

$$\text{Potencia de salida total} = 20 * 660 \text{ kW} = 13,200 \text{ kW}$$

$$\text{salida efectiva de los generadores} = \text{potencia de salida total} * \text{eficiencia}$$

$$\text{salida efectiva de los generadores} = 13,200 \text{ kW} * 0.843$$

$$\text{salida efectiva de los generadores} = 11,127.6 \text{ kW}$$

**GENERADOR SINCRONO DE IMANES PERMANENTES.**

Capacidad: 20 UNIDADES DE 660 kW

Eficiencia: 86.6%

$$\text{Potencia de salida total} = 20 * 660 \text{ kW} = 13,200 \text{ kW}$$

$$\text{salida efectiva de los generadores} = \text{potencia de salida total} * \text{eficiencia}$$

$$\text{salida efectiva de los generadores} = 13,200 \text{ kW} * 0.866$$

$$\text{salida efectiva de los generadores} = 11,431.2 \text{ kW}$$

$$\text{Ganancia} = 11,431.2 \text{ kW} - 11,127.6 \text{ kW} = 303.6 \text{ kW}$$

## CONCLUSIONES.

- Determinar las variables físicas que conlleva el análisis de circuitos electromagnéticos en función de la aplicación de una máquina eléctrica permite diferenciar que parámetros hacen más efecto en el fenómeno físico de conversión de energía electromecánica.
- Definir el concepto de máquina eléctrica permite establecer su finalidad, ya que dependiendo del tipo de inducido e inductor este podría funcionar en régimen estático, es decir, transformador, o en régimen de máquina rotativa, es decir, en régimen de motor o en régimen de generador, ya sea una máquina rotativa como un motor/generador de c.c. o un motor/generador síncrono o motor/generador de inducción o asíncrono, y así definir su aplicación, en la industria se utilizan con frecuencia los motores de inducción debido a su fácil aplicación, a nivel de generación eléctrica se utilizan los generadores síncronos para la conversión de energía electromecánica.
- Saber aplicar las técnicas de análisis en circuitos electromagnéticos en función de la máquina eléctrica permite determinar un modelo matemático del fenómeno, la relación de f.e.m. inducida respecto a las corrientes de carga, además de establecer los niveles de tensión dentro de un diagrama fasorial que permita relacionar corrientes y tensiones dentro de la máquina eléctrica como transformadores, motores y generadores, con el cual es posible establecer un nivel de regulación de tensión, dentro de una máquina estática (transformador) o máquina rotativa, además de cómo afecta el tipo de factor de potencia aplicado del sistema, ya sea en atraso, unitario o adelanto.

- La construcción de una máquina eléctrica, en específico de un generador síncrono está dada por una parte fija denominada estator y una parte móvil denominada rotor, dicho rotor puede ser de rotor de polos lisos o cilíndrico y se encuentra además el rotor de polos salientes, dicha selección de rotor está dada por el tipo de aplicación que conlleva, el rotor de polos lisos establece alta velocidad debido a que son de tipo bipolares o tetra-polares, utilizado en turbogeneradores, es decir, un generador eléctrico movido por una turbinas de vapor o de gas. En cuanto al rotor de polos salientes funciona a bajas velocidades de giro debido al número de polos que contiene la máquina, mayor a cuatro polos, utilizadas en generadores hidráulicas.
- La potencia desarrollada como la potencia de entrada y de salida definen la eficiencia del sistema del generador síncrono, parámetros como el par desarrollado determinan dicha potencia, así como el par.
- Definir además el tipo de pruebas físicas que se le pueden hacer a una máquina eléctrica permite conocer su zona de trabajo y funcionamiento, como lo son las pruebas de resistencia, circuito abierto y cortocircuito, pruebas que se llevan a cabo en generadores síncronos, el cual permite establecer impedancias síncronas que determinan los diagramas fasoriales en función de tensiones y corrientes además de incluir el factor de potencia de trabajo, tanto en régimen de la zona no saturada de la impedancia síncrona y en régimen de saturación por medio del análisis del triángulo de Potier.
- En un momento de fallas, los generadores presentan reactancias que definen el comportamiento de ésta, las cuales llevan por nombre reactancia sub-transitoria o momentánea  $X_s''$  y transitoria  $X_s'$  en régimen de estado estable de la falla, dichos parámetros son necesarios para el análisis de cortocircuito y coordinación de protecciones.

- El uso de un solo generador no es un sistema de generación eléctrica confiable debido a que si se producen fallas, y se desconecta del sistema este causa inconveniente a los usuarios por lo que el colocar en paralelo generadores aumenta la confiabilidad del sistema.
- Conocer las características físicas de los imanes permanentes como sus propiedades eléctricas permite definir la finalidad de la aplicación que pueden tener en una excitatriz de un generador síncrono, para poder aprovechar mejor su capacidad magnética, capacidad energética, así como por ejemplo la diferencia de un imán permanente de ferrita hasta de Samario-Cobalto o de AlNiCo, en eficiencia y costos.
- Establecer la dirección del flujo magnético producido por los imanes permanentes, depende en cierta forma, además de la capacidad magnética del imán, de estructura que lo contenga, es decir, la forma del rotor, si el imán se considera colocarse superficial al rotor de chapas magnéticas o si se coloca empotrado a la superficie del rotor o imanes incrustados radialmente, además que depende de la finalidad del generador, si es para alta o baja velocidad, es decir, las revoluciones por minuto.
- Definir y utilizar ecuaciones a través de un circuito equivalente permite estudiar el fenómeno de la implementación de imanes permanentes en las excitatrices de los generadores síncronos, así como se estudió en la máquina eléctrica síncrona tradicional y el análisis fasorial que conlleva.

- Cabe señalar que el uso de GSIP comparado con un generador síncrono tradicional, teóricamente, presenta una ventaja en función de los costos de mantenimiento, dado que la excitatriz tradicional de circuito de campo con escobillas presenta un mantenimiento y costo constante, que se ahorra con el GSIP, de igual manera con el uso de generadores Brushless (sin escobillas), teóricamente existe un pequeño ahorro en el costo por mantenimiento comparado con el GSIP.
- El conocer la capacidad instalada para la generación de energía eléctrica y el mapa energético del que dispone El Salvador, permite decir qué clase de generadores síncronos son los más utilizados en las centrales de generación por lo que puede conllevar estudios que permitan utilizar los GSIP.
- El documento “SECTOR ELÉCTRICO DE EL SALVADOR - INFORME PROESA-CNE 2015” explica la capacidad energética actual además detalla los tipos de generación eléctrica de El Salvador así como también, la capacidad instalada que permite conocer de forma general que clase de generadores síncronos se utilizan dada su aplicación, es decir, si son generadores de polos lisos o de polos salientes.
- El documento “CONSEJO NACIONAL DE ENERGÍA DE EL SALVADOR CNE – RESUMEN DE DOCUMENTO PLAN MAESTRO PARA EL DESARROLLO DE LA ENERGIA RENOVABLE EN EL SALVADOR - MAYO 2012” detalla el plan de crecimiento del mapa energético del país, que abarca desde el 2012 hasta el 2026 y expone acerca de los tipos de generación eléctrica, es decir, implementación de pequeñas centrales hidroeléctricas, energía solar fotovoltaica, energía solar térmica, energía eólica, geotermia, biomasa, y biogás, a partir del cual se podría implementar los GSIP en los tipos de generación como la hidroeléctrica o eólica.

- La normativa NEMA MG-1-2009 sugiere algunos parámetros para la implementación de generadores síncronos, como niveles de tensión y tipos de conexión y potencias para generadores síncronos trifásicos que permite establecer una base para el uso de generadores en centrales de generación.
- Debido a las propiedades magnéticas que presentan los imanes permanentes de tierras raras son los más apropiados para aplicaciones en generadores síncronos.
- Los generadores de flujo axial son adecuadas para generación de energía eléctrica en turbinas eólicas y generación hidroeléctrica que tienen baja velocidad de rotación.



## **RECOMENDACIONES.**

El conocer el funcionamiento de generadores síncronos tradicionales, conlleva a comprender de mejor manera la implementación teórica de los GSIP, el definir su modo de operación, su factor de potencia, los niveles de tensión a los que opera el nivel de generación eléctrica, lo que hace necesario recolectar diferente información sobre generadores síncronos tradicionales y resaltar una forma analítica una nomenclatura general que describa este tipo de maquina eléctrica. El uso de bibliografía acerca de generadores síncronos de imanes permanentes así como los textos de máquinas eléctricas que conlleva al compilado de este trabajo de graduación, ha sido complicado puesto que la información no es de tan libre alcance, por lo que se sugiere al departamento de biblioteca de la Universidad de El salvador, actualice esta línea de libros texto para posteriores investigaciones.

Se recomienda, de ser posible, gestionar y establecer diálogos con entidades públicas o privadas que estén al cargo de algún tipo de generación de energía eléctrica, para poder definir y diseñar una posible implementación de un estudio de factibilidad para el uso de generadores síncronos con excitatriz de imanes permanentes en los sistemas de generación de El Salvador, dado que el alcance de este trabajo de graduación no conlleva ese análisis, dado que, los datos necesarios no fueron proporcionados por alguna entidad, de esta manera se buscaba el comparar, para este trabajo, el ahorro en costos de generación, operación y mantenimiento pero se recomienda un análisis más detallado como lo es un estudio de factibilidad, se sugiere encarecidamente una gestión de dialogo con una entidad de generación eléctrica. Se debe realizar un análisis cuantitativo para una comparación más detallada en cuanto a eficiencia de generadores síncronos de imanes permanentes contra generadores síncronos tradicionales.

Gestionar un apoyo por parte de una empresa de generación eléctrica para conocer datos placa, costos de operación y mantenimiento, y si es posible establecer un estudio de factibilidad para GSIP.

## BIBLIOGRAFIA

### LIBROS DE TEXTO:

[1] MÁQUINAS ELÉCTRICAS Y TRANSFORMADORES - BHAG S. GURU HÜSEYIN R. HIZIROGLU TERCERA EDICIÓN CAPÍTULOS 2, 3 Y 7.

[2] MÁQUINAS ELÉCTRICAS – STEPHEN J. CHAPMAN QUINTA EDICIÓN CAPÍTULOS 1, 3 Y 4 – APÉNDICE A, B Y C.

[3] MÁQUINAS ELÉCTRICAS – JESÚS FRAILE MORA QUINTA EDICIÓN CAPÍTULOS 1, 2 Y 4 – APÉNDICE 1 Y 3.

[4] ANÁLISIS DE SISTEMAS DE POTENCIA – JOHN J. GRAINGER, WILLIAM D. STEVENSON Jr CAPÍTULOS 1 Y 3.

[5] MÁQUINAS ELÉCTRICAS Y SISTEMAS DE POTENCIA – THEODORE WILDI SEXTA EDICIÓN PEARSON PRENTICE HALL.

[6] ELEMENTOS DE ELECTROMAGNETISMO – MATTHEW N. O SADIKU – TERCERA EDICIÓN – CAPITULO 9, SECCIÓN 9.3.

[7] ELECTRICAL ENERGY CONVERSION AND TRANSPORT: AN INTERACTIVE COMPUTER-BASED APPROACH – GEORGE G. KARADY, KEITH E HOLBERT SEGUNDA EDICIÓN.

[8] POWER ELECTRONICS FOR RENEWABLE AND DISTRIBUTED ENERGY SYSTEMS: A SOURCEBOOK OF TOPOLOGIES, CONTROL AND INTEGRATION – EDITION BY: SUDIPTA CHAKRABORTY, MARCELO G. SIMÕES, AND WILLIAM E. KRAMER.

**[9]** DESING OF ROTATING ELECTRICAL MACHINE - JUHA PRYHÖNEN, TAPANI JOKINEN, VALÉRIA HRABOVCOVÁ AND HANNA NIEMELÄ - FIRST EDITION.

**[10]** PROPUESTA DE UN SISTEMA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA EMPLEANDO IMANES PERMANENTES – TESIS DE GRADO POR URCID FILIBERTO, FLORES CASTILLO OSWALDO Y PEÑA RIVERA CARLOS EDUARDO – INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL MÉXICO.

**[11]** SISTEMA DE CONVERSIÓN ELECTROMECAÁNICA DE ALTA POTENCIA ESPECÍFICA PARA GENERACIÓN ELÉCTRICA DE ORIGEN RENOVABLE – TESIS DOCTORAL POR ING. MANUEL PINILLA MARTÍN UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID.

**[12]** MEJORA DE LA EFICIENCIA Y DE LAS PRESTACIONES DINÁMICAS EN PROCESADORES ELECTRÓNICOS DE POTENCIA PARA PEQUEÑOS AEROGENERADORES SINCRÓNICOS OPERANDO EN RÉGIMEN DE VELOCIDAD VARIABLE. – TESIS DOCTORAL POR LUIS GERARDO GONZÁLEZ MORALES, UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA.

**[13]** SECTOR ELÉCTRICO DE EL SALVADOR - INFORME PROESA-CNE 2015.

**[14]** CONSEJO NACIONAL DE ENERGÍA DE EL SALVADOR CNE – RESUMEN DE DOCUMENTO PLAN MAESTRO PARA EL DESARROLLO DE LA ENERGÍA RENOVABLE EN EL SALVADOR - MAYO 2012.

**[15]** UNIVERSIDAD DE CANTABRIA ESPAÑA – CENTRALES DE GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA – UNIDAD DIDÁCTICA 3: CENTRALES HIDRÁULICAS – POR DIEGO INMACULADA, ARSENIO ROBLES.

**[16]** NORMA NEMA MG-1-2009 - MOTORS AND GENERATORS PARTE 32 - SECCION IV SYNCHRONOUS GENERATORS PERFORMANCE STANDARDS APPLYING TO ALL MACHINE - GENERADORES SÍNCRONOS (EXCLUSIVO DE GENERADORES CUBIERTOS POR LAS NORMAS ANSI C50.12, C50.13, C50.'14 Y 050,15 SUPERIOR A 5000 kVA).