



TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE MÉRIDA
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

**APUNTES MATERIA:
MÁQUINAS SINCRÓNICAS Y DE CD**

ELABORADO POR:

ING. BEATRIZ AURORA GARCÍA CRISTIANO

FEBRERO 2023

Contribución académica

La contribución de la asignatura de Máquinas Síncronas y de CD a los objetivos educacionales y al perfil de egreso del estudiante de la carrera de Ingeniería Eléctrica son los siguientes:

1. Planea, diseña, instala y opera sistemas eléctricos, conforme a la normatividad para el desarrollo de proyectos eléctricos eficientes y sustentables.
2. Planea, diseña, instala y opera sistemas de control y automatización, utilizando tecnología de punta, para el desarrollo de proyectos eléctricos.
3. Participa en la administración y toma de decisiones de los recursos humanos, económicos y materiales para la realización de proyectos y obras eléctricas.
4. Incorpora nuevas tecnologías para la mejora de los procesos industriales, equipos y obras eléctricas.
5. Analiza y realiza mantenimiento de equipos e instalaciones eléctricas para que las condiciones de operación sean seguras, eficientes y económicas.
6. Participa en equipos interdisciplinarios y multidisciplinarios para el desarrollo de proyectos integrales.

Esta asignatura aporta al perfil del Ingeniero Eléctrico la capacidad de explicar el funcionamiento de las máquinas síncronas y de corriente directa, así como su contribución, junto con asignaturas posteriores, como Modelado de los Sistemas Eléctricos de Potencia, en donde se requiere analizar, diagnosticar y presentar soluciones a problemas relacionados con máquinas síncronas y de corriente directa buscando una mejor eficiencia.

El alumno debe conocer físicamente una máquina síncrona y una máquina de C.D. en sus funciones de generador y motor, para que al término del curso pueda seleccionarlos, operarlos y mantenerlos.

De manera específica el objetivo de la asignatura de Máquinas Síncrona y de CD es aplicar los fundamentos de las máquinas síncronas y las máquinas de corriente directa para analizar su operación de acuerdo con su aplicación.

Introducción

La finalidad de este trabajo es servir de apoyo de estudios de los temas de la materia Máquinas sincrónicas y de CD que se encuentra en el sexto semestre de la carrera de Ingeniería Eléctrica.

En el primer tema, se establecerán una serie de definiciones y conceptos que se utilizan en el análisis del campo magnético giratorio que se produce en los devanados de las máquinas trifásicas, la fuerza electromotriz inducida en una máquina elemental de corriente alterna, así como los factores que afectan la fuerza electromotriz en una máquina de corriente alterna. Se describen los aspectos constructivos de las máquinas sincrónicas. Esto permite establecer las bases para los siguientes temas de la asignatura.

En el segundo tema se considera el circuito equivalente y cómo determinar los parámetros de la máquina sincrónica, las características del ángulo de par y su relación con las potencias en estado estacionario, así como la operación del generador trabajando aislado.

En el tercer tema se describe la forma en que se conecta el generador con un sistema eléctrico de potencia y se menciona los problemas de estabilidad en generadores sincrónicos. Se deben conocer las condiciones necesarias para conectarlos en paralelo y utilizar herramientas computacionales para simular su comportamiento ante diferentes condiciones de operación.

En el cuarto tema se estudia la operación del motor sincrónico empleando su modelado en estado estacionario. También se estudian los métodos de arranque de los motores síncronos en forma teórica y práctica.

En el quinto tema se tratan los fundamentos teóricos de la máquina de corriente directa, las conexiones y la operación de estas máquinas como generadores. En forma práctica se comprueban los efectos de la velocidad y corriente de excitación sobre la tensión generada, así como las características carga-tensión para los diferentes tipos de generadores.

El sexto tema trata la máquina conectada como motor, realizando su modelado para determinar su característica par-velocidad, así como se mencionan los métodos de arranque y control de velocidad.

Se recomienda realizar las practicas de laboratorio para complementar los conceptos que se describen en este documento.

Índice

Tema 1 Fundamentos de la máquina sincrónica	9
1.1 Aspectos constructivos de las máquinas sincrónicas	10
1.1.1 Rotor	11
1.1.2 Estator	15
1.2 Fuerzas magnetomotrices giratorias en máquinas trifásicas	18
1.2.1 Factor de paso	23
1.2.2 Factor de distribución	25
1.3 Fuerza electromotriz inducida en una máquina elemental de corriente alterna	26
1.4 Factores que afectan la fuerza electromotriz en una máquina de corriente alterna	31
Ejercicios del Tema 1	35
Tema 2 Generador sincrónico	39
2.1 Circuito equivalente	39
2.1.1 Caída de voltaje en la resistencia de la armadura	40
2.1.2 Caída de voltaje por reactancia de dispersión en la armadura	40
2.1.3 Reacción de la armadura	41
2.2 Determinación de parámetros de la máquina sincrónica	44
2.2.1 Prueba de resistencia	44
2.2.2 Prueba de circuito abierto	45
2.2.3 Prueba de cortocircuito	46
2.2.4 Característica externa de un generador síncrono	48
2.2.5 Regulación de voltaje	54
2.2.6 Relaciones de potencia	54
2.3 Característica del ángulo de potencia en operación en estado estacionario	56
2.4 Operación en estado estacionario en condiciones aisladas	60
2.5 Teoría de las componentes en cuadratura aplicada a las máquinas sincrónicas de polos salientes	64
2.6 La máquina sincrónica como fuente de reactivos	69
2.6.1 Componentes simétricas en sistemas trifásicos	69
2.6.2 Descomposición de un sistema asimétrico en tres sistemas simétricos	71
2.7 Modelado del generador sincrónico	75
2.8 Selección y aplicación de generadores sincrónicos	79
Ejercicios del Tema 2	81
Tema 3 Sincronización	109
3.1 Conexión de máquinas sincrónicas en paralelo	109

3.2 Sincronización de una máquina sincrónica a un bus infinito.	116
3.2.1 Operación de Generador – Sistema Eléctrico de Potencia	116
3.2.2 Operación Generador – Generador	118
3.3 Problemas de estabilidad en generadores sincrónicos.	119
Ejercicios del Tema 3	125
Tema 4 Motor sincrónico.....	132
4.1 Operación en estado estacionario de los motores sincrónicos.	132
4.1.2 Circuito equivalente.....	135
4.1.3 Curva característica par-velocidad.....	138
4.2 Arranque del motor sincrónico.....	140
4.3 Curvas “V” del motor sincrónico.....	143
4.4 Modelado del motor sincrónico.	146
4.5 Selección y aplicación de motores sincrónicos.	149
4.5.1 Aplicación de los motores síncronos	149
4.5.2 Diversos tipos de motores síncronos trifásicos	150
Ejercicios del Tema 4	158
Tema 5 Máquinas de corriente directa, operación como generador	166
5.1 Aspectos constructivos de las máquinas de corriente directa.	167
5.2 Principio de funcionamiento. (acción generadora, acción motora).....	172
5.3 Devanados de armadura.	175
5.4 Reacción de armadura.	186
5.5 Flujo de potencia en máquinas de corriente directa.	191
Ejercicios del Tema 5	204
Tema 6 Análisis y control de los motores de corriente directa	212
6.1 Característica velocidad contra par de los diferentes motores de corriente directa. .	212
6.2 Aplicaciones de los motores de cd.	218
6.3 Arranque de los motores de cd.	219
6.4 Control de velocidad.	221
6.5 Modelado del motor de cd.....	222
6.6 Aplicación y selección de máquinas de corriente directa.	223
Ejercicios del Tema 6	237
Bibliografía	242
Anexos	243
PRESENTACIONES.....	243
FORMULARIOS.....	244

Índice de figuras

Figura 1. Constitución general de una máquina síncrona de rotor cilíndrico ...	10
Figura 2. Vistas de los rotores de una máquina síncrona	11
Figura 3. Rotores de polos lisos	12
Figura 4. Máquina síncrona de polos salientes	12
Figura 5. Rotor de un hidroalternador	13
Figura 6. a) Máquina de polos salientes b) Máquina de rotor cilíndrico.....	13
Figura 7. Corte de un polo saliente con entrehierro variable y con devanado amortiguador	14
Figura 8. Estator de generador síncrono.....	15
Figura 9. Hidrogenerador trifásico de la central de Itaipú (824 MVA, 90 rpm, 60 Hz)	17
Figura 10. a) Rotor cilíndrico con densidad de flujo del entrehierro que varía senoidalmente. b) Fuerza magnetomotriz o intensidad de campo magnético como función del ángulo α en el entrehierro. c) Densidad de flujo como función del ángulo α en el entrehierro.	18
Figura 11. a) Máquina de ca con el devanado del estator distribuido, b) Distribución de fuerza magnetomotriz resultante del devanado.....	19
Figura 12. Laminaciones del estator de un generador síncrono	20
Figura 13. Máquina rotatoria bipolar.....	21
Figura 14. Flujo máximo que enlaza una bobina de paso fraccionario.....	24
Figura 15. Diagrama fasorial para la fem inducida en un grupo de fase	25
Figura 16. Líneas de flujo magnético en la máquina rotatoria	27
Figura 17. Comportamiento de un conductor donde circula una corriente	28
Figura 18. a) Campo magnético de rotor giratorio dentro de una bobina de estator estacionaria. Detalle de la bobina. b) El vector de densidades de flujo magnético y velocidades en los lados de la bobina. c) La distribución de densidad de flujo en el entrehierro.....	28
Figura 19. Producción de voltajes trifásicos con tres bobinas separadas por 120°	30
Figura 20. Máquina de ca simplificada con una distribución de flujo del estator senoidal y una sola bobina de alambre montada en el rotor.	31
Figura 21. Los componentes de densidad de flujo magnético dentro de la máquina	32
Figura 22. Máquina síncrona simplificada que muestra los campos magnéticos de su rotor y de su estator	33
Figura 23. Circuito equivalente por fase de un generador síncrono sin reacción a la armadura, con el campo revolvente producido por el rotor.....	40
Figura 24. Diagramas fasoriales de un generador síncrono sin reacción de la armadura para un factor de potencia a) en atraso, b) unitario y c) en adelanto	40
Figura 25. Diagrama fasorial que describe el efecto de la reacción de la armadura cuando el factor de potencia es igual a la unidad en un generador	

síncrono	41
Figura 26. Circuito equivalente por fase mostrando la fem inducida en el devanado de la armadura debida a la reacción de esta	41
Figura 27. Diagrama fasorial mostrando el efecto de la reacción de la armadura cuando el factor de potencia está en atraso	42
Figura 28. Diagrama fasorial mostrando el efecto de la reacción de la armadura cuando el factor de potencia de la carga está en adelante.....	42
Figura 29. Circuito equivalente por fase de un generador síncrono con reacción de la armadura	43
Figura 30. Diagramas fasoriales correspondientes para el factor de potencia de cargas a) en atraso, b) igual a la unidad y c) en adelante	44
Figura 31. Diagrama del circuito para realizar la prueba de circuito abierto...	45
Figura 32. Características de circuito abierto y de corto circuito de un generador síncrono	46
Figura 33. Diagrama del circuito para ejecutar una prueba de cortocircuito...	46
Figura 34. Impedancia síncrona como función de la corriente del campo	47
Figura 35. Circuito equivalente aproximado de un generador síncrono y su diagrama fasorial para una carga con factor de potencia en atraso	49
Figura 36. Efecto de la carga resistiva sobre el voltaje en las terminales de un generador síncrono independiente para corrientes en la armadura a) pequeñas y b) grandes	50
Figura 37. Características externas de un generador síncrono en distintas condiciones de carga	50
Figura 38. Efecto de la carga inductiva sobre el voltaje en las terminales de un generador síncrono independiente para corrientes de carga a) pequeñas y b) grandes	51
Figura 39. Efecto de un factor de potencia en atraso sobre el voltaje en las terminales de un generador síncrono independiente para ángulos de factor de potencia a) pequeños y b) grandes	51
Figura 40. Efecto de la carga capacitiva sobre el voltaje en las terminales de un generador síncrono independiente par corrientes de carga a) pequeñas y b) grandes	52
Figura 41. Efecto de un factor de potencia en adelante sobre el voltaje en las terminales de un generador síncrono independiente para ángulos de factor de potencia a) pequeños y b) grandes	52
Figura 42. Características externas de un generador síncrono independiente ajustado para operar con carga nominal sujeta a distintas condiciones de carga	53
Figura 43. Diagrama de flujo de potencia de un generador de ca trifásico.....	55
Figura 44. Diagrama de flujo de potencia de un motor de ca trifásico	56
Figura 45. a) Impedancia que conecta dos voltajes b) Diagrama fasorial ...	56
Figura 46. Representación de un circuito equivalente de una máquina síncrona conectada a un sistema externo	59
Figura 47. Forma característica de las curvas de composición de un generador síncrono	60
Figura 48. Curvas de capacidad de un turbogenerador enfriado por hidrógeno con un índice de 0.80 de cortocircuito y 0.85 de factor de potencia. La base en MVA se registra MVA a 0.5 psig hidrógeno.....	61
Figura 49. Estructura aplicada a la derivación de una curva de capacidad de un	

generador síncrono	62
Figura 50. Forma típica de las curvas V de un generador síncrono	63
Figura 51. Generador síncrono bipolar de polos salientes	64
Figura 52. Representaciones de circuito equivalente de un generador síncrono de polos salientes	66
Figura 53. Diagrama fasorial de un generador síncrono de polos salientes que tiene resistencia finita en el devanado de la armadura y factor de potencia en atraso	66
Figura 54. Diagrama fasorial de un generador síncrono de polos salientes con resistencia despreciable en el devanado de la armadura y factor de potencia en atraso.	67
Figura 55. Par desarrollado por un generador síncrono de polos salientes como función del ángulo del par	69
Figura 56. Vectores secuencia positiva.....	70
Figura 57. Vectores secuencia positiva.....	71
Figura 58. Secuencias positiva, secuencia negativa y secuencia cero	72
Figura 59. Componente simétrico de ca de la corriente de falla.....	74
Figura 60. Modelo de un generador síncrono en un sistema de generación de energía eléctrica	78
Figura 61. Diagrama de las variables de interacción en un sistema de generación de energía eléctrica	78
Figura 62. Modelo mecánico del rotor	79
Figura 63. Generadores en paralelo.....	110
Figura 64. Diferencia de voltajes de línea	111
Figura 65. Oscilación de voltaje resultante	112
Figura 66. Secuencia de fases	113
Figura 67. Indicador de secuencia de fases por medio de lámparas	113
Figura 68. Desfase de ángulos de la misma línea.....	114
Figura 69. Sincronoscopio.....	115
Figura 70. Transformador sincronizador especial	115
Figura 71. Operación Generador – Sistema eléctrico de potencia.....	116
Figura 72. Diagrama Frecuencia-Potencia a) frecuencia del generador ligeramente mayor al sistema b) frecuencia generador menor a la del sistema	117
Figura 73. Efecto del incremento de frecuencia con corriente de campo constante	117
Figura 74. Efecto de incremento de corriente de campo con potencia activa constante	118
Figura 75. Operación Generador – Generador	118
Figura 76. Gráfica frecuencia-potencia a) Generador 1 – Generador 2 en paralelo b) Efecto de aumentar la frecuencia en el generador 2	119
Figura 77. Estudio de estabilidad angular en un SEP	124
Figura 78. Operación del motor síncrono.....	132
Figura 79. Estator y rotor, en este último se detalla los anillos rozantes, rodamientos y devanado amortiguador de motor síncrono	133
Figura 80. Motor síncrono de dos polos.....	134
Figura 81. Simulación motor síncrono.....	134
Figura 82. Circuito equivalente por fase del motor síncrono.....	135
Figura 83. Diagramas fasoriales motor síncrono	136

Figura 84. Diagrama vectorial del motor síncrono	137
Figura 85. Curva característica Par VS Velocidad	139
Figura 86. Esquema Arranque motor Síncrono	142
Figura 87. Devanado amortiguador trifásico en el rotor de un motor síncrono	143
Figura 88. Esquema Curvas en V	144
Figura 89. Curvas Características en V.....	145
Figura 90. Diagrama de una máquina síncrona.....	147
Figura 91. Circuito equivalente del modelo de motor síncrono.....	148
Figura 92. Motor síncrono sin escobillas	151
Figura 93. Devanados del motor de reluctancia	154
Figura 94. Motores de reluctancia	155
Figura 95. Máquina de corriente directa	168
Figura 96. Estator y rotor de una máquina de corriente continua durante el proceso de fabricación	169
Figura 97. Componentes de la máquina de corriente directa.....	170
Figura 98. Máquina de corriente directa	171
Figura 99. Colector de una máquina de cd.....	171
Figura 100. Comportamiento de una espira en el campo magnético, graficando la fem inducida	173
Figura 101. Comportamiento de una espira con conmutador	173
Figura 102. Comportamiento de una espira en el campo magnético conectada a un conmutador, graficando la fem inducida	174
Figura 103. Voltajes de bobina rectificadas y voltaje resultante entre las escobillas en una máquina de cd.....	175
Figura 104. Estructura del inducido	175
Figura 105. Identificación de los pasos en el devanado imbricado.....	176
Figura 106. Forma esquemática de un devanado imbricado incompleto	177
Figura 107. Esquema simplificado correspondiente al dínamo tetrapolar de 16 ranuras	177
Figura 108. Paso de ranura en un inducido	178
Figura 109. Devanado desplegado de un devanado imbricado doble y un devanado imbricado triplex.....	179
Figura 110. Representación circular del esquema de bobinado de un dínamo tetrapolar de 16 ranuras	180
Figura 111. Disposición al devanar puede ser a) regresivo ó b) progresivo. 180	
Figura 112. Ranuras mostrando un lado de bobina en cada una de ellas y la numeración correspondiente	181
Figura 113. Ranuras mostrando los lados de bobina en cada una de ellas y la numeración correspondiente	181
Figura 114. Ranuras mostrando cuatro lados de bobina en cada una de ellas y la numeración correspondiente.....	181
Figura 115. Identificación de los pasos en el devanado ondulado	183
Figura 116. Forma esquemática de un devanado ondulado incompleto.....	183
Figura 117. Comportamiento de la espira en el campo magnético para obtener la fem	184
Figura 118. Máquina de cd funcionando como generador	185
Figura 119. Máquina de cd funcionando como motor.....	186
Figura 120. Reacción de inducido en una máquina de cd.....	187

Figura 121. Distribuciones del campo magnético en una máquina de cd	187
Figura 122. Comportamiento de la máquina de cd trabajando en vacío	188
Figura 123. Reacción del inducido cuando coincide con el eje de las escobillas	188
Figura 124. Devanado de los interpolos de un generador de cc	189
Figura 125. Devanado compensador de un generador de cc	189
Figura 126. (a) Flujo por polo sin carga. (b) Fuerza magnetomotriz (fmm) y el flujo debido a la reacción de la armadura. (c) Flujo resultante.	190
Figura 127. Conmutador con escobillas de una máquina de cd.....	191
Figura 128. Circuito del generador de cd o dinamo	191
Figura 129. Balance de potencias en el generador de cd	193
Figura 130. Balance de potencias en el motor de cd.....	193
Figura 131. Tipos de excitación de las máquinas de cd	195
Figura 132. Dinamo con excitación independiente.....	195
Figura 133. Curva de vacío de un generador de cd para distintas velocidades	196
Figura 134. Característica externa de un generador de cd con excitación independiente.....	197
Figura 135. Generador con excitación en derivación o shunt.....	198
Figura 136. Determinación de la tensión de funcionamiento de un dinamo derivación.....	198
Figura 137. Característica externa de un generador shunt.....	200
Figura 138. Generador con excitación en serie	200
Figura 139. Característica externa del generador con excitación en serie	201
Figura 140. Generador con excitación compuesta corta	202
Figura 141. Generador con excitación compuesta larga	202
Figura 142. Características externas de un generador compound	203
Figura 143. Balance de potencias en el motor de cd.....	213
Figura 144. Motor con excitación independiente	214
Figura 145. Motor con excitación en derivación o shunt	214
Figura 146. Características par-velocidad de un motor derivación o shunt ..	215
Figura 147. Motor de cd en serie	215
Figura 148. Característica par-velocidad de un motor de cd en serie.....	216
Figura 149. Motor de cd con excitación compuesta	217
Figura 150. Característica par-velocidad de un motor de cd con excitación compuesta	218
Figura 151. Comportamiento de la regulación de velocidad de una máquina en derivación o shunt.....	221
Figura 152. Esquema general para el modelado de un motor DC.....	223
Figura 153. Generador de corriente continua de gasolina	224
Figura 154. Generador de corriente continua monofásico	224
Figura 155. Generador de corriente continua trifásico.....	225
Figura 156. Motor sin escobillas.....	226
Figura 157. Motor paso a paso de reluctancia variable.....	227
Figura 158. Motor paso a paso de imán permanente	227
Figura 159. Bobina simple	228
Figura 160. Paso completo.....	229
Figura 161. Medio paso	229
Figura 162. Diagrama básico del funcionamiento de un servomotor.....	232

Figura 163. Partes de un servomotor.....	233
Figura 164. Motor de corriente directa sin núcleo	234
Figura 165. Partes del motor de corriente directa sin núcleo.....	234

Tema 1 Fundamentos de la máquina sincrónica

En nuestro país, así como en el resto del mundo, la operación del sistema eléctrico de potencia requiere la conversión de grandes cantidades de energía primaria (petróleo, gas natural, agua, carbón, uranio), en energía y potencia eléctrica. La energía eléctrica puede ser transportada y convertida en otras formas de energía en forma limpia y económica. La máquina sincrónica es hoy por hoy, la más ampliamente utilizada para convertir grandes cantidades de energía eléctrica y mecánica.

Dependiendo del sistema mecánico de accionamiento, las máquinas sincrónicas pueden construirse de rotor liso cuando deban operar en altas velocidades, o con rotor de polos salientes cuando son accionadas a menor velocidad.

Aun cuando un gran porcentaje de máquinas sincrónicas son utilizadas como generadores en las plantas de producción de energía eléctrica, debido fundamentalmente al alto rendimiento que es posible alcanzar con estos convertidores y a la posibilidad de controlar la tensión, en numerosas ocasiones se emplea industrialmente como elemento motriz.

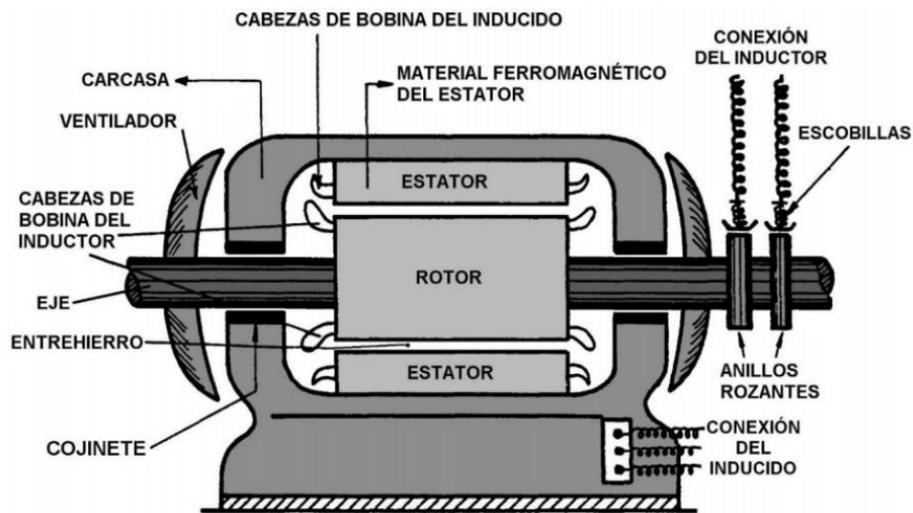
La máquina sincrónica es completamente reversible y se incrementa día a día el número de aplicaciones donde puede ser utilizada con grandes ventajas, especialmente cuando se controla mediante fuentes electrónicas de frecuencia y tensión variable.

Es por ello, que iniciaremos viendo los aspectos constructivos de las máquinas sincrónicas, clasificación y principios fundamentales, realizando ejemplos de sobre la importancia relacionada con la velocidad de sincronismo y de acuerdo a su construcción (número de polos, ranuras, devanados) los diferentes factores que involucran en su operación.

Otro factor para considerar es la frecuencia de la red, en gran parte del mundo es de 50Hz y tienden a usar 220-240V y en partes de América y partes de Asia es de 60Hz usando 110-127V, en nuestro país se considera 60Hz. En los ejercicios si es necesario se indicará la frecuencia a utilizar.

1.1 Aspectos constructivos de las máquinas sincrónicas.

Figura 1. Constitución general de una máquina síncrona de rotor cilíndrico



Es una máquina eléctrica rotativa de corriente alterna cuya velocidad de rotación del eje y la frecuencia eléctrica están sincronizadas y son mutuamente dependientes, la máquina puede operar tanto como motor y generador. Como motor síncrono convierte la energía eléctrica en energía mecánica y la velocidad de rotación del eje dependerá de la frecuencia de la red eléctrica que se le suministre o bien convierte energía mecánica en energía eléctrica, siendo en este caso utilizada como generador síncrono y la frecuencia entregada en las terminales dependerá de la velocidad en la que el eje esté girando.

La máquina síncrona tiene dos partes básicas, así:

- La estructura del campo magnético que lleva un devanado excitado por corriente continua.
- La armadura, que tiene generalmente un devanado trifásico, en el que se genera la fem de corriente alterna, también conocido como estator (la mayoría de las veces)

Las máquinas sincrónicas se utilizan en mayor medida como generadores de corriente alterna que como motores de corriente alterna, ya que no presentan par de arranque y hay que emplear diferentes métodos de arranque y aceleración hasta la velocidad de sincronismo. También se utilizan para controlar la potencia reactiva de la red por su capacidad para, manteniendo la potencia

activa desarrollada constante, variar la potencia reactiva que absorbe o cede a la red.

CLASIFICACIÓN DE LAS MÁQUINAS SÍNCRONAS

Según el número de fases del inducido

- Monofásicas
- Polifásicas (generalmente trifásicas)

Por la construcción del rotor

- Máquinas de polos salientes
- Máquinas de rotor cilíndrico

Según el tipo de su sistema inductor

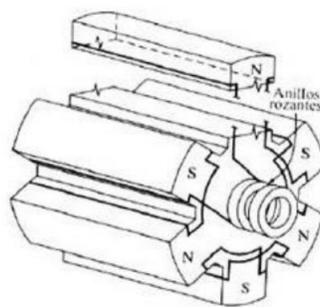
- Heteropolares: El devanado del inducido es concatenado por flujos alternos (polaridades norte y sur)
- Homopolares: Las bobinas del inducido son concatenadas por un flujo cuya magnitud fluctúa entre un máximo y un mínimo, pero con un mismo sentido de polaridad

1.1.1 Rotor

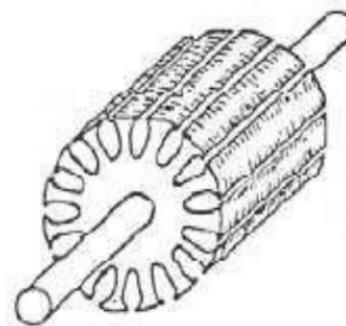
Dentro del orificio del estator se encuentra el rotor que está magnetizado por un devanado que transporta corriente continua.

Dependiendo de la construcción del rotor, una máquina síncrona puede ser del tipo de rotor liso o cilíndrico y de polos salientes.

Figura 2. Vistas de los rotores de una máquina síncrona



Rotor de polos salientes



Rotor cilíndrico

El tipo de rotor liso tiene un rotor cilíndrico uniforme que lleva su devanado de excitación distribuido en varias ranuras alrededor de su periferia. Esta construcción no es adecuada para máquinas multipolares, pero es muy sólida mecánicamente.

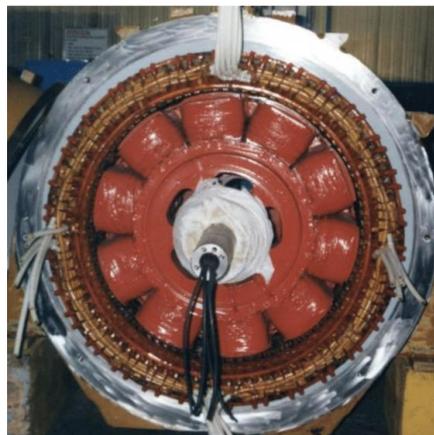
Figura 3. Rotores de polos lisos



Por lo tanto, está particularmente bien adaptado para máquinas eléctricas de alta velocidad son máquinas de pocos números de polos (2 o 4), tal como los generadores de turbinas a vapor o turbogeneradores, que se utilizan en las centrales térmicas o similares. El devanado de campo está distribuido en varias bobinas situadas en diferentes ángulos.

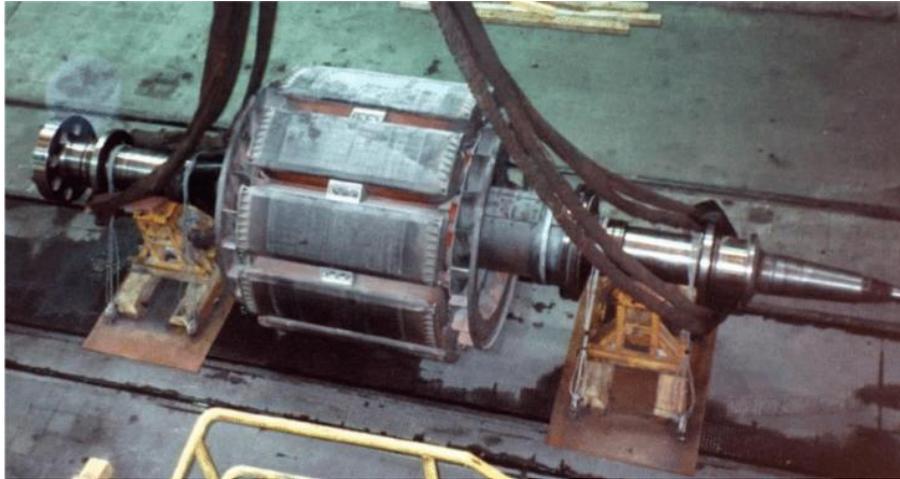
El tipo de polo saliente tiene polos que están físicamente separados, cada uno con un devanado de excitación concentrado. Este tipo de construcción es en muchos sentidos complementario al del rotor cilíndrico y se emplea en máquinas que tienen 4 polos o más.

Figura 4. Máquina síncrona de polos salientes



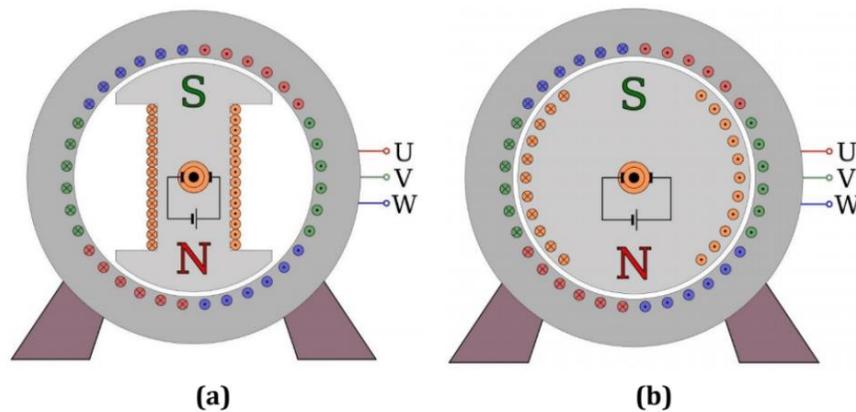
Las máquinas de polos salientes son adecuadas para generadores de gran número de polos, de baja velocidad, que se utilizan en las centrales hidráulicas. Este rotor no requiere una resistencia mecánica muy grande, lo que permite que pueda ser laminado, de poca longitud, de gran diámetro, con devanado de tipo concentrado.

Figura 5. Rotor de un hidroalternador



Por el contrario, las máquinas síncronas de polos lisos deben tener una gran resistencia mecánica que se consigue reduciendo el diámetro y aumentando la longitud. A su motor macizo se le debe practicar un tratamiento térmico adecuado, para reducir las pérdidas en el hierro. El devanado de campo es normalmente de tipo distribuido.

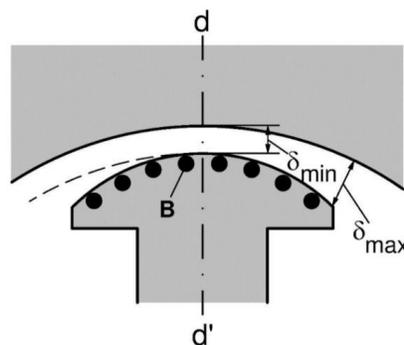
Figura 6. a) Máquina de polos salientes b) Máquina de rotor cilíndrico



En resumen, las principales diferencias entre los rotor cilíndrico y polo saliente máquinas son las siguientes:

En el tipo de polo saliente, el rotor consta de un gran número de polos proyectados, es decir, polos salientes montados en una rueda magnética. La construcción de un rotor de polo saliente se muestra en la *Figura 6 a*). Como el rotor está sometido a un campo magnético constante se puede fabricar de hierro macizo, los polos proyectados se componen de laminaciones de acero o hierro macizo. El devanado del rotor se encuentra en estos polos y se apoya en zapatas polares. El entrehierro es variable para conseguir que el campo magnético se distribuya sinusoidalmente a lo largo del entrehierro.

Figura 7. Corte de un polo saliente con entrehierro variable y con devanado amortiguador



B: Barra del devanado amortiguador

- Los rotores de polos salientes tienen un diámetro grande y una longitud axial más corta.
- Generalmente se usan en máquinas eléctricas de baja velocidad, digamos de 100 RPM a 1500 RPM.
- A medida que la velocidad del rotor es menor, se requiere más número de polos para alcanzar la frecuencia requerida. ($N = 120f/P$). Normalmente, el número de polos salientes es de 4 a 60.
- La distribución de flujo es relativamente pobre que la del rotor de polo no saliente, por lo tanto, la forma de onda de fem generada no es tan buena como la del rotor cilíndrico.
- Los rotores de polos salientes generalmente necesitan devanados amortiguadores para evitar las oscilaciones del rotor durante el funcionamiento.
- Los generadores síncronos de polo saliente se utilizan principalmente en centrales hidroeléctricas.

Los rotores de polo liso o cilíndrico tienen forma cilíndrica y tienen ranuras paralelas para colocar los devanados del rotor, está hecho de acero sólido, se muestra en la *Figura 6 b*). A veces, también se les llama rotor de tambor.

- Tienen un diámetro más pequeño, pero tienen una longitud axial más larga.
- Los rotores cilíndricos se utilizan en máquinas eléctricas de alta velocidad, generalmente de 1500 RPM a 3000 RPM.
- La pérdida por efecto del viento y el ruido son menores en comparación con los rotores de polos salientes.
- Su construcción es robusta en comparación con los rotores de polos salientes.
- El número de polos suele ser 2 o 4.
- Los devanados amortiguadores no son necesarios en rotores de polos no salientes.
- La distribución de flujo es sinusoidal y, por lo tanto, proporciona una mejor fem.
- Los rotores de polos no salientes se utilizan en centrales nucleares, de gas y térmicas.

1.1.2 Estator

El estator, o parte estática, de una máquina síncrona es similar al de una máquina asíncrona (inducción), que consta de dos partes:

El yugo que es un marco estacionario cilíndrico exterior y está hecho de acero o hierro fundidos y por el núcleo magnético que se encuentra ranurado para acomodar un devanado trifásico de corriente alterna denominado devanado inducido y un circuito magnético formado por apilamiento de chapas magnéticas.

Figura 8. Estator de generador síncrono



El conjunto de devanados aislados se coloca dentro de la ranura del núcleo del estator como se muestra en la *Figura 8*. Los tres juegos de devanados, uno para cada fase conectado en estrella. El área de la sección transversal de estos devanados debe ser suficiente para transportar la corriente nominal de la máquina.

El campo magnético presente en el estátor de una máquina sincrónica gira con una velocidad constante. La velocidad de giro en régimen permanente está ligada con la frecuencia de la tensión en bornes y el número de pares de polos.

$$n = \frac{60f}{P} = \frac{120f}{p}$$

donde:

f: Frecuencia de la red a la que está conectada la máquina (Hz)

P: Número de pares de polos que tiene la máquina

p: Número de polos que tiene la máquina

n: Velocidad de sincronismo de la máquina (revoluciones por minuto)

El espacio comprendido entre el rotor y el estator es conocido como entrehierro. La máquina sincrónica tiene la particularidad de poder operar ya sea como generador o como motor.

Su operación como alternador se realiza cuando se aplica un voltaje de c-c en el campo de excitación del rotor y a su vez éste es movido o desplazado por una fuente externa, que da lugar a tener un campo magnético giratorio que atraviesa o corta los conductores del estator, induciéndose con esto un voltaje entre terminales del generador

Su operación como motor síncrono se realiza cuando el estator es alimentado con un voltaje trifásico de c-a y consecutivamente el rotor es alimentado con un voltaje de c-c.

Según la disposición del devanado del inducido y del devanado de campo, las máquinas síncronas se clasifican en dos tipos: tipo de inducido giratorio y tipo de campo giratorio.

- En el tipo de armadura giratoria, el devanado de la armadura está alojado en el rotor. La fem generada o la corriente se suministra a la carga a través de un anillo deslizante y un conjunto de escobillas de carbón. Este tipo

de máquina síncrona solo se construye para máquinas de clasificación pequeña.

- En la máquina síncrona de campo giratorio, el devanado archivado se enrolla en el rotor. El suministro de CC se extiende al devanado de campo mediante el ensamblaje del anillo deslizante y la escobilla de carbón. La energía eléctrica se suministra a la carga mediante terminales fijos montados en el estator. Este tipo es más famoso y ampliamente utilizado en máquinas síncronas de gran tamaño.

Según el tipo de motor primario, los generadores síncronos se clasifican en:

- Hidrogeneradores: Los generadores que son accionados a través de hidroturbinas se denominan hidrogeneradores. Estos son básicamente del tipo de polo saliente y funcionan a una velocidad más lenta del orden de 1000 rpm o menos.
- Turbogeneradores: Estos generadores son accionados a través de una turbina de vapor y convierten la energía térmica del vapor en energía eléctrica. Estos son del tipo de rotor de polo cilíndrico y funcionan a mayor velocidad. Normalmente, la velocidad del rotor se rige por la frecuencia del sistema o de la red (en alguna bibliografía internacional se pueden encontrar como frecuencia de Grid). Si la frecuencia de la red es de 50 Hz, la velocidad del rotor del generador de dos polos es de 3000 rpm ($N_s = 120 \times 50 / 2 = 3000$).
- Generadores accionados por motor: Estos generadores son accionados por un motor IC y su velocidad es inferior a 1500 rpm.

Figura 9. Hidrogenerador trifásico de la central de Itaipú (824 MVA, 90 rpm, 60 Hz)



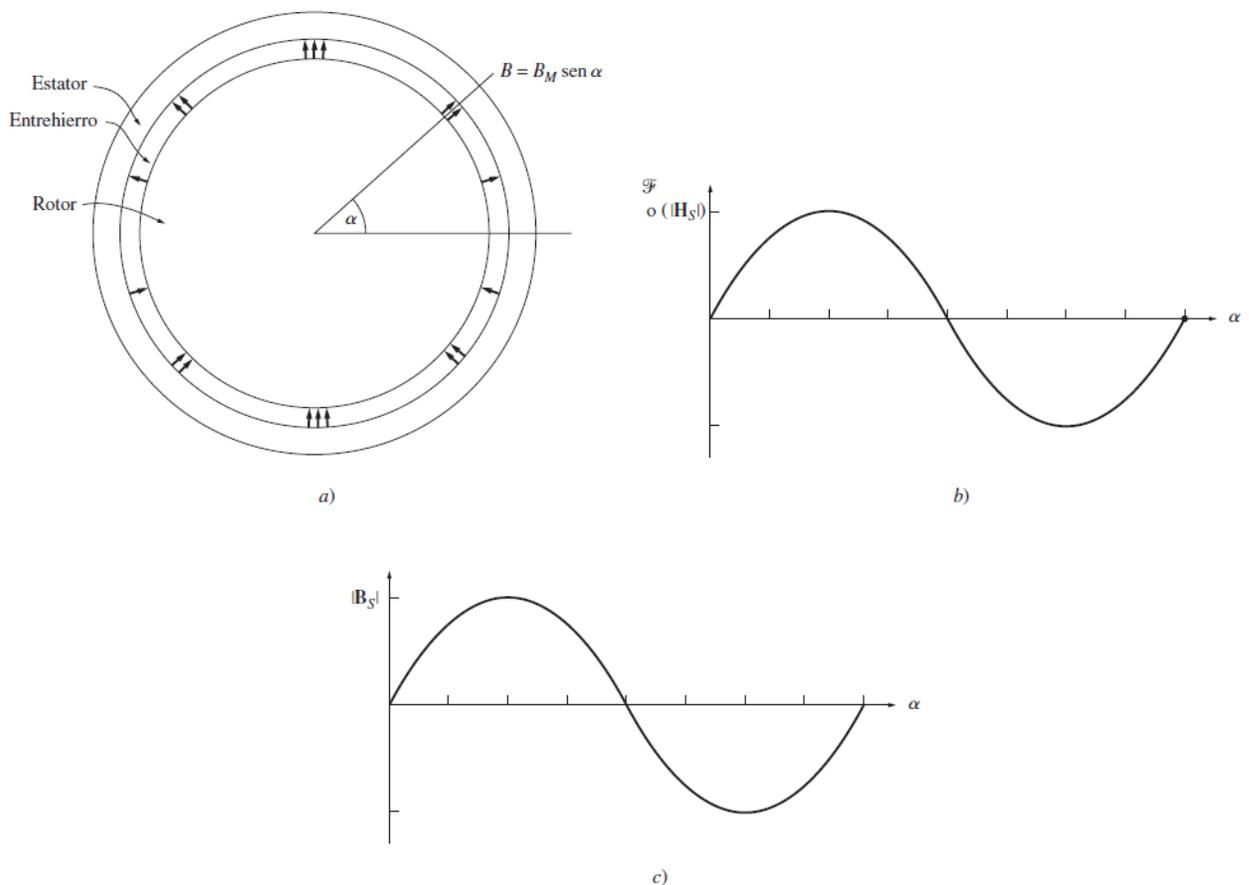
1.2 Fuerzas magnetomotrices giratorias en máquinas trifásicas.

El flujo en una máquina rotatoria debido a que hay un rotor ferromagnético en el centro de la máquina con un pequeño entrehierro entre el rotor y el estator. El rotor puede ser cilíndrico o puede tener caras polares proyectadas hacia afuera de su superficie. Las máquinas con rotores cilíndricos son más fáciles de entender y analizar que las máquinas con rotores de polos salientes.

En las máquinas de rotores salientes, la reluctancia del entrehierro en esta máquina es mucho más alta que las reluctancias en el rotor y en el estator, por lo que el vector de densidad de flujo B debe variar de manera senoidal a lo largo de la superficie del entrehierro.

La densidad de flujo varía senoidalmente sólo si la intensidad de magnetización H (y la fuerza magnetomotriz F) varía de manera senoidal a lo largo de la superficie del entrehierro. *Figura 10*

Figura 10. a) Rotor cilíndrico con densidad de flujo del entrehierro que varía senoidalmente. b) Fuerza magnetomotriz o intensidad de campo magnético como función del ángulo α en el entrehierro. c) Densidad de flujo como función del ángulo α en el entrehierro.

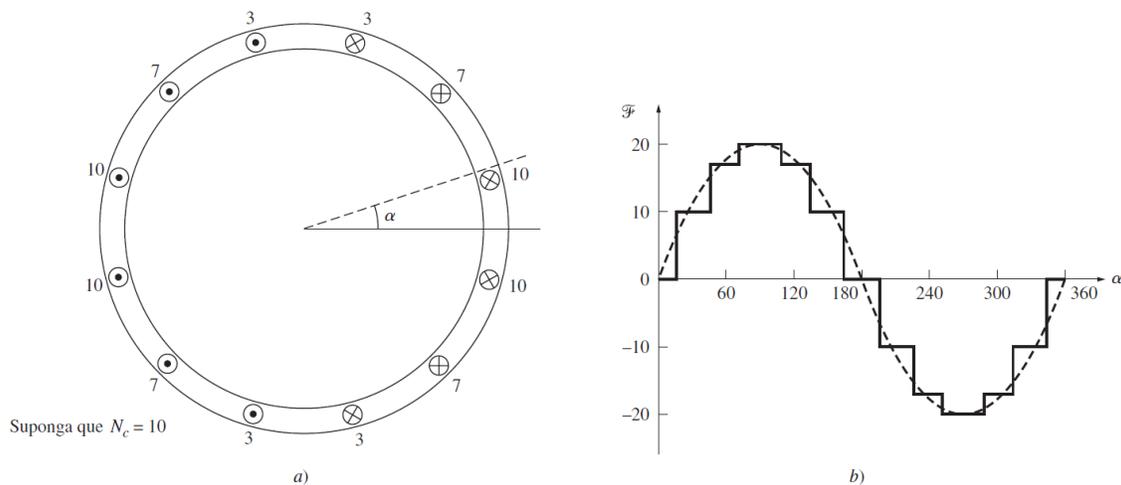


Para obtener una variación senoidal de la fuerza magnetomotriz a lo largo de la superficie del entrehierro consiste en distribuir las vueltas del devanado que produce la fuerza magnetomotriz en ranuras espaciadas muy cercanas alrededor de la superficie de la máquina y variar el número de conductores en cada ranura de manera senoidal, la *Figura 11a*) muestra una máquina de ca con el devanado del estator distribuido, el cual ha sido diseñado para producir una densidad de flujo del entrehierro que varíe senoidalmente. El número de conductores en cada ranura se indica en el diagrama. El número de conductores en cada ranura se obtiene con la ecuación:

$$n_c = N_c \cos \alpha$$

donde N_C es el número de conductores en un ángulo de 0° .

Figura 11. a) Máquina de ca con el devanado del estator distribuido, b) Distribución de fuerza magnetomotriz resultante del devanado



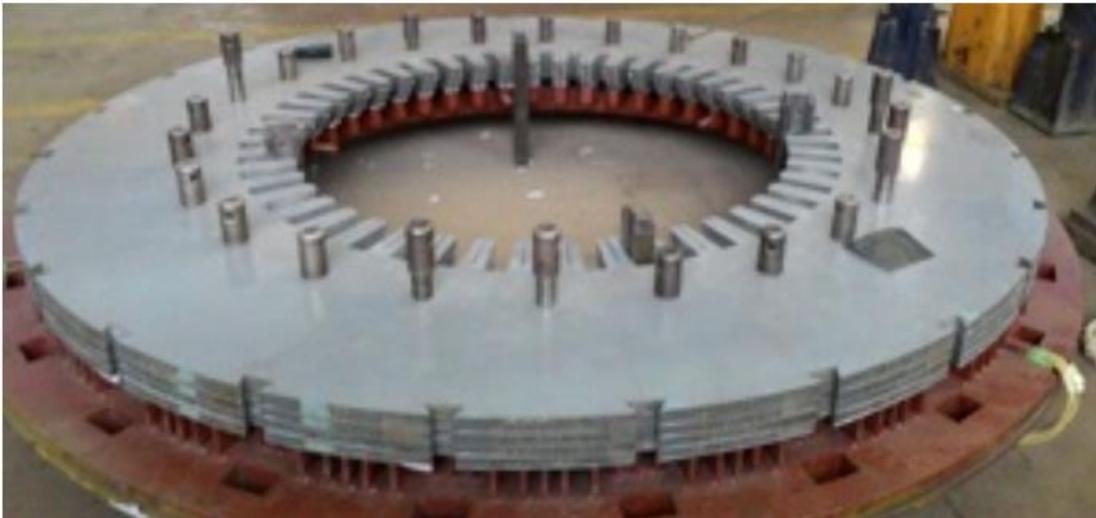
En la *Figura 11b*), se muestra la distribución de conductores que produce una aproximación muy cercana a una distribución senoidal de fuerza magnetomotriz. En la práctica no es posible distribuir los devanados exactamente, debido a que hay un número finito de ranuras en una máquina real y a que sólo se pueden incluir números enteros de conductores en cada ranura.

En la mayoría de las máquinas de rotación, el estator y el rotor se fabrican de acero eléctrico, y los devanados se instalan en ranuras elaboradas en dichas estructuras, la utilización de estos materiales de alta permeabilidad maximiza el acoplamiento entre las bobinas e incrementa la densidad de energía magnética

que se asocia con la interacción electromecánica. El flujo de variación temporal que está presente en las estructuras de los devanados de estas máquinas tiende a inducir las corrientes, conocidas como corrientes de Eddy, en el acero eléctrico.

Las corrientes de Eddy pueden ser una enorme fuente de pérdida en dichas máquinas, además pueden reducir de manera significativa el funcionamiento de la maquinaria. Con el fin de minimizar los efectos de las corrientes de Eddy, la estructura del devanado generalmente se fabrica a partir de delgadas láminas de acero electrolítico aisladas entre sí.

Figura 12. Laminaciones del estator de un generador síncrono



El campo magnético rotatorio en el estátor está formado por la suma vectorial del campo magnético producido por tres devanados conectados entre sí, comúnmente se le denomina devanado de armadura o inducido. En las máquinas de corriente alterna, como son las máquinas de inducción o síncronas, el devanado de armadura o inducido se encuentra en la porción estacionaria del motor conocido como el estator, en cuyo caso a estos devanados también se les denominará devanados estatóricos.

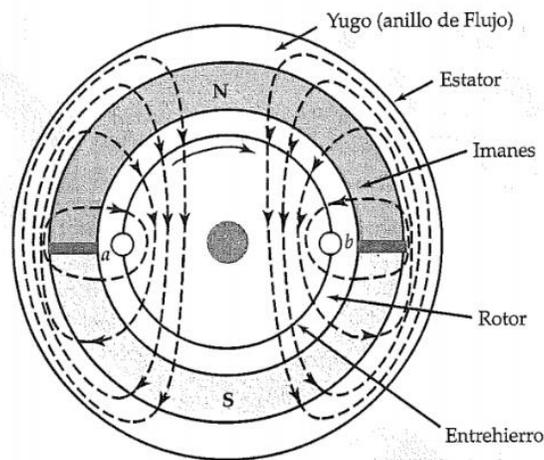
Las máquinas síncronas y de corriente directa por lo general incluyen un devanado secundario (o un conjunto de devanados) que llevan corriente directa y se utilizan para producir el flujo principal de operación en la máquina. A un devanado como éste comúnmente se le denomina devanado de excitación. En una máquina de corriente directa, el devanado de excitación casi siempre se

localiza en el estator, mientras que en una máquina síncrona dicho devanado se ubica en el motor, en cuyo caso la corriente deberá abastecer al devanado de excitación a través de un contacto de rotación mecánica.

Los imanes permanentes también producen un flujo magnético de corriente directa y se emplean en lugar de los devanados de excitación en algunas máquinas.

Figura 13. Máquina rotatoria bipolar

Bobina en un campo magnético uniforme



Específicamente los generadores síncronos están devanados con tres arrollamientos distintos e independientes para generar energía trifásica, cada devanado representa una fase de un generador trifásico.

Los tres devanados son exactamente iguales en su forma, pero desplazados exactamente 120° eléctricos uno del otro para garantizar que las fem inducidas en tales devanados estén exactamente a 120° en tiempo de fase. Los devanados trifásicos pueden conectarse para formar una conexión en estrella o en delta. Si los devanados están conectados internamente para formar una conexión en estrella, el punto neutro también se lleva afuera de modo que pueda referirse a tierra para operar con seguridad. El devanado de doble capa se usa con frecuencia para devanar la armadura de un generador síncrono.

El devanado de doble capa precisa tantas bobinas idénticas como ranuras haya en el estator.

Un lado de cada bobina se sitúa en la mitad inferior de una ranura y el otro lado de la misma bobina llena la mitad superior de otra ranura, éstas deben devanarse previamente

sobre formas especiales para el propósito y después insertarse en las ranuras.

La cantidad de bobinas por fase (o el número de ranuras por fase para un devanado de doble capa) debe ser un número entero. Como las bobinas deben estar distribuidas igualmente entre los polos, el número de bobinas (ranuras) por polo y por fase también debe ser un entero.

$$n = \frac{S}{Pq}$$

n = número entero de bobinas por polo y por fase (grupo de fase o cinturón de fase)

S = número de ranuras en la armadura

P = número de polos

q = número de fases

Cada bobina en un grupo de fase puede devanarse como bobina de paso completo. Sin embargo, rara vez se usa una bobina de paso completo, los generadores se devanan con bobinas de paso fraccionario por las razones siguientes:

1. Una bobina de paso fraccionario diseñada en forma apropiada reduce las armónicas que generan distorsión y produce una forma de onda más apegada a la senoidal.
2. Una bobina de paso fraccionario acorta las conexiones finales de los devanados, por lo que no sólo ahorra cobre sino también reduce la pérdida en el cobre de la bobina.
3. Es más fácil manejar una bobina más corta y reduce la acumulación de espiras finales en ambos lados del cuerpo del estator, disminuyendo la longitud total del generador y reduce al mínimo la dispersión del flujo.
4. La eliminación de las armónicas de alta frecuencia también disminuye las pérdidas magnéticas en el generador.

La desventaja de una bobina de paso fraccionario es que la fem inducida en ella es más pequeña que en una bobina de paso completo. La razón del flujo que enlaza la bobina de paso fraccionario respecto al flujo que enlazaría la de paso completo se llama factor de paso.

La colocación de los devanados de fase en las ranuras se considera lo siguiente:

- a) Todas las bobinas son idénticas
- b) Cada bobina es de paso fraccionario en tanto un grupo de fase contenga más de una bobina y se conectan en serie

- c) Cada grupo de fase se extiende 180° eléctricos (un paso completo), las bobinas en un grupo de fase deben situarse en forma tal que el extremo inicial de la primera quede bajo el principio de un polo y el extremo final de la n-ésima bobina quede bajo el extremo de salida del polo

El ángulo eléctrico desde el centro de una ranura al centro de otra adyacente se conoce como alcance de ranura o paso de ranura.

El alcance de bobina o paso de bobina, que es el número de ranuras que abarca cada bobina, puede expresarse en términos de grados eléctricos o del número de ranuras.

1.2.1 Factor de paso

A causa de la distribución espacial de los devanados de campo en cada polo de un rotor cilíndrico, es posible aproximar la densidad del flujo que emana de la superficie de un polo de la manera siguiente:

$$B = B_m \cos \theta$$

B = Densidad del flujo

B_m = Densidad del flujo máximo por polo

El flujo total que enlaza una bobina de paso completo es

$$\Phi_P = \int_S B \, ds$$

donde

$$ds = Lrd\theta_m = \frac{2Lrd\theta}{P}$$

L = Longitud axial de la bobina (rotor)

r = Radio del rotor

P = Número de polos

θ = Varía de $-\pi/2$ a $\pi/2$

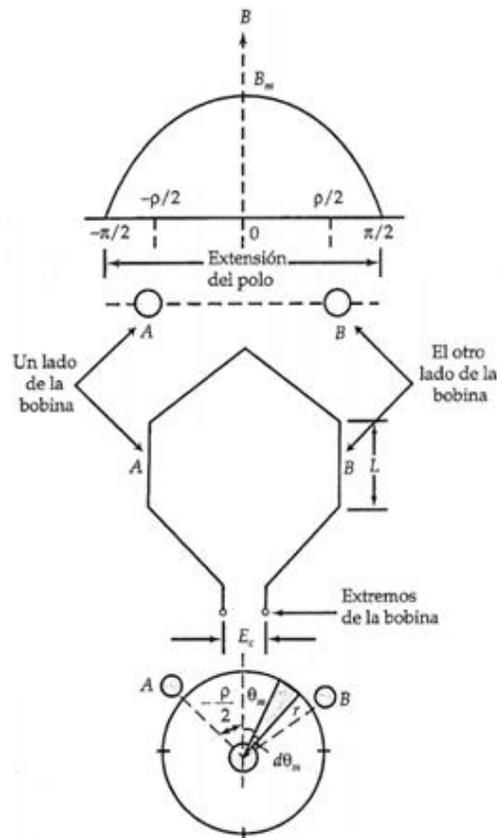
Al evaluar la integral se obtiene

$$\theta_P = \frac{4LrB_m}{P}$$

El alcance de bobina para una bobina de paso fraccionario es ρ . El flujo que enlaza la

bobina es máximo cuando está colocada en forma simétrica con el eje magnético del polo.

Figura 14. Flujo máximo que enlaza una bobina de paso fraccionario



$$\theta_{cm} = \int_{-\frac{\rho}{2}}^{\frac{\rho}{2}} B_m \cos\theta \, 2Lr \frac{d\theta}{P}$$

$$\Theta_{cm} = \frac{4LrB_m}{P} \operatorname{sen}\left(\frac{\rho}{2}\right)$$

$$\Theta_{cm} = \theta_P \operatorname{sen}\left(\frac{\rho}{2}\right) = \theta_P k_p$$

Donde:

k_p = es el factor de paso y $k_p < 1$

e_c = fem inducida en una bobina de paso completo

La fem inducida en una bobina de paso fraccionario será $k_p e_c$.

1.2.2 Factor de distribución

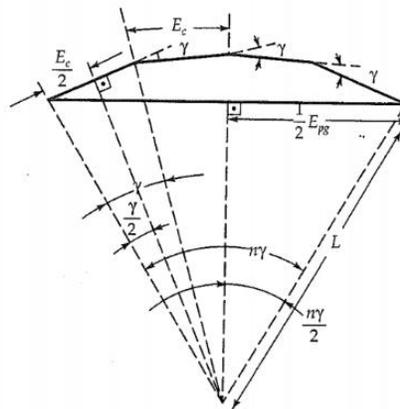
Las bobinas están desplazadas espacialmente una de otra, las fem inducidas en ellas no están en fase. Si E_c es la fem inducida en una bobina y n es el número de bobinas en un grupo de fase, la fem inducida en el grupo de fase E_{pg} es:

$$E_{pg} = k_d n E_c$$

donde k_d se denomina factor de distribución y $k_d \leq 1$. El factor de distribución es igual a la unidad solamente cuando todas las bobinas están ubicadas en las mismas ranuras.

Existen n bobinas conectadas en serie para formar un grupo de fase y el valor medio cuadrático (rms) de la fem inducida en cada bobina es E_c . Las bobinas están distribuidas, la fem inducida en cada una de ellas está fuera de fase con la siguiente por un paso de ranura, igual a γ .

Figura 15. Diagrama fasorial para la fem inducida en un grupo de fase



La fem inducida por grupo de fase es

$$E_{pg} = n \frac{\text{sen} \left(\frac{n\gamma}{2} \right)}{n \text{sen} \left(\frac{\gamma}{2} \right)} E_c = n k_d E_c$$

El factor de distribución es

$$k_d = \frac{\text{sen} \left(\frac{n\gamma}{2} \right)}{n \text{sen} \left(\frac{\gamma}{2} \right)}$$

1.3 Fuerza electromotriz inducida en una máquina elemental de corriente alterna.

La máquina síncrona es el mismo que rige el funcionamiento de la máquina de corriente directa y se basa en la aplicación de las siguientes leyes:

- Ley de Faraday o de Inducción
- Ley de Lenz
- Ley de Ampere
- Ley de Biot-Savart

Ley de Faraday.

Si el flujo magnético eslabonado por un circuito eléctrico cerrado varía con respecto al tiempo, una fem es inducida en el circuito.

Si ϕ representa el flujo eslabonado por el circuito y $d\phi$ el cambio de flujo durante un tiempo dt , la magnitud de fem será:

$$\varepsilon = \frac{d\phi}{dt}$$

Donde ϕ esta dado en Webber o Maxwell y t en segundos, entonces la ecuación anterior se puede expresar como:

$$\varepsilon = \frac{d\phi}{dt} \times 10^{-8} \quad \text{Volts}$$

Hay que hacer notar que $\frac{d\phi}{dt}$ puede obtenerse de dos maneras que son:

Por movimiento mecánico que es el que se tiene en todas las máquinas rotatorias
 Cuando la excitación es variable con el tiempo que es la que ocurre en el caso del transformador.

VIDEO

<https://youtu.be/d6Ak1ZHj10A>

Ley de Lenz.

La fem inducida es de tal sentido que la corriente inducida se opone al cambio

del flujo. La combinación de las dos leyes anteriores se expresa mediante la siguiente ecuación:

$$\varepsilon = -\frac{d\phi}{dt} \times 10^{-8} \quad \text{Volts}$$

VIDEO

https://youtu.be/Hph2_7I3AsA

Ley de Ampere.

La integral de línea cerrada de la intensidad magnética H , alrededor de un contorno cerrado es igual a la suma de los amperes espiras a los cuales esta trayectoria eslabona.

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 I$$

Donde:

B : campo magnético

$d\vec{l}$: segmento infinitesimal del trayecto de integración

μ_0 : permeabilidad del espacio libre

I : corriente encerrada por el trayecto

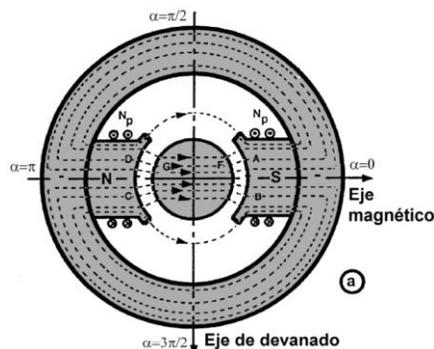
En cualquier instante la integral de línea de la intensidad de campo magnético (H) a lo largo de cualquier camino cerrado es igual a la cantidad total de corrientes encerrada en el camino.

$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = \Sigma i$$

Suponiendo el circuito magnético de dos polos como el que se muestra en la siguiente figura, se tiene la sumatoria:

$$\int H dl = 2 \int H dl \text{ entrehierro} + 2 \int H dl \text{ polos} + 2 \int H dl \text{ dientes} + 2 \int H dl \text{ yugo armadura} + 2 \int H dl \text{ yugo estator}$$

Figura 16. Líneas de flujo magnético en la máquina rotatoria



VIDEO

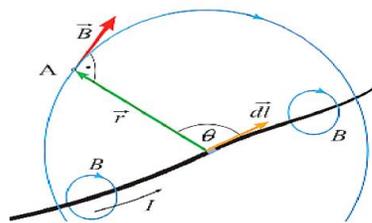
https://youtu.be/_14MvhTjR04

Ley de Biot Savart.

Todo conductor bajo la acción de un campo magnético y por el cual circula una corriente eléctrica queda sometido a la acción de una fuerza que lo hace desplazarse a través del campo. La cual puede expresarse como:

$$dB = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{i \, dl \cdot \text{Sen}\theta}{r^2} \quad \vec{B} = \frac{\mu_0 i}{4\pi} \int \frac{d\vec{l} * \hat{r}}{r^2}$$

Figura 17. Comportamiento de un conductor donde circula una corriente

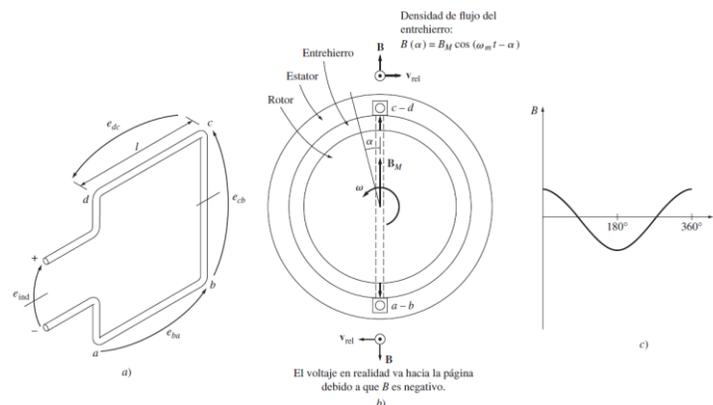


VIDEO

<https://youtu.be/WSDVvHvIEk4>

Un conjunto de corrientes trifásicas en un estator puede producir un campo magnético giratorio, un campo magnético giratorio puede producir un conjunto de voltajes trifásicos en las bobinas de un estator. *Figura 18*

Figura 18. a) Campo magnético de rotor giratorio dentro de una bobina de estator estacionaria. Detalle de la bobina. b) El vector de densidades de flujo magnético y velocidades en los lados de la bobina. c) La distribución de densidad de flujo en el entrehierro



Considerando un rotor giratorio con un campo magnético distribuido senoidalmente en el centro de una bobina estacionaria. La magnitud del vector de densidad de flujo B en el entrehierro entre el rotor y el estator varía senoidalmente con un ángulo mecánico, mientras que la dirección de B siempre se dirige de manera radial hacia afuera.

Si α es el ángulo medido desde la dirección de la densidad de flujo pico del rotor, entonces la magnitud del vector de densidad de flujo B en un punto alrededor del rotor es:

$$B = B_M \cos \alpha$$

Debido a que el rotor gira dentro del estator con una velocidad angular de ω_M , la magnitud del vector de densidad de flujo B en cualquier ángulo α alrededor del estator será:

$$B = B_M \cos(\omega t - \alpha)$$

La ecuación para obtener el voltaje inducido en un alambre es:

$$e = (v \times B) \cdot l$$

donde

v velocidad del alambre en relación con el campo magnético

B vector de densidad de flujo magnético

l longitud del conductor en el campo magnético

Sin embargo, esta ecuación se dedujo para el caso de un alambre en movimiento en un campo magnético estacionario. Pero para este otro caso, el alambre es estacionario y el campo magnético está en movimiento, por lo que la ecuación no se puede aplicar directamente.

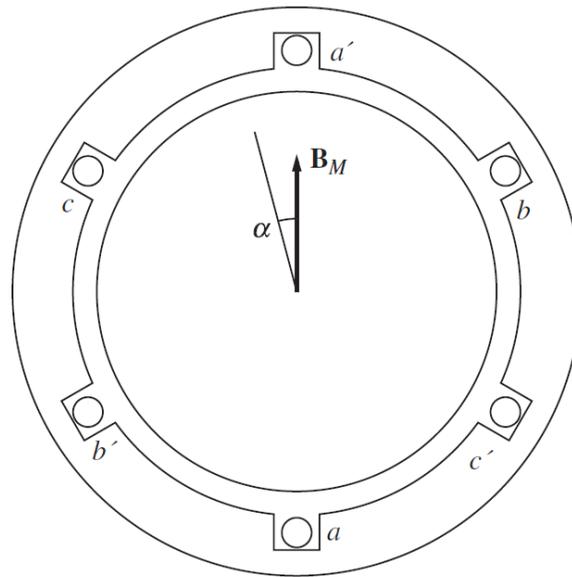
El voltaje total inducido en la bobina es la suma de los voltajes inducidos en cada uno de sus cuatro lados.

El voltaje inducido en una bobina de una sola vuelta. Si la bobina en el estator tiene N_C vueltas de alambre, entonces el voltaje inducido total en ella es:

$$e_{ind} = N_C \phi \omega \cos \omega t$$

Si se colocan tres bobinas, cada una con N_C vueltas, alrededor del campo magnético del rotor, como se muestra en la [Figura 19](#), entonces los voltajes inducidos en cada una de ellas serán iguales en magnitud, pero la diferencia de fase será de 120° .

Figura 19. Producción de voltajes trifásicos con tres bobinas separadas por 120°



Los voltajes resultantes en cada una de estas tres bobinas son:

$$\begin{aligned} e_{aa'} &= N_C \phi \omega \operatorname{sen} \omega t \quad \text{V} \\ e_{bb'} &= N_C \phi \omega \operatorname{sen}(\omega t - 120^\circ) \quad \text{V} \\ e_{cc'} &= N_C \phi \omega \operatorname{sen}(\omega t - 240^\circ) \quad \text{V} \end{aligned}$$

Por lo tanto, un conjunto de bobinas trifásico puede generar un campo magnético giratorio uniforme en el estator de una máquina y un campo magnético giratorio uniforme puede producir un conjunto de voltajes trifásicos en el estator.

El voltaje pico en cualquier fase de un estator trifásico de este tipo es:

$$E_{m\acute{a}x} = N_C \phi \omega$$

Debido a que $v = 5/2\pi f$, esta ecuación también se puede escribir así

$$E_{m\acute{a}x} = 2\pi N_C \phi f$$

Por lo tanto, el voltaje rms en cualquier fase de este estator trifásico es:

$$E_A = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} N_C \phi f$$

$$E_A = \sqrt{2} \pi N_C \phi f$$

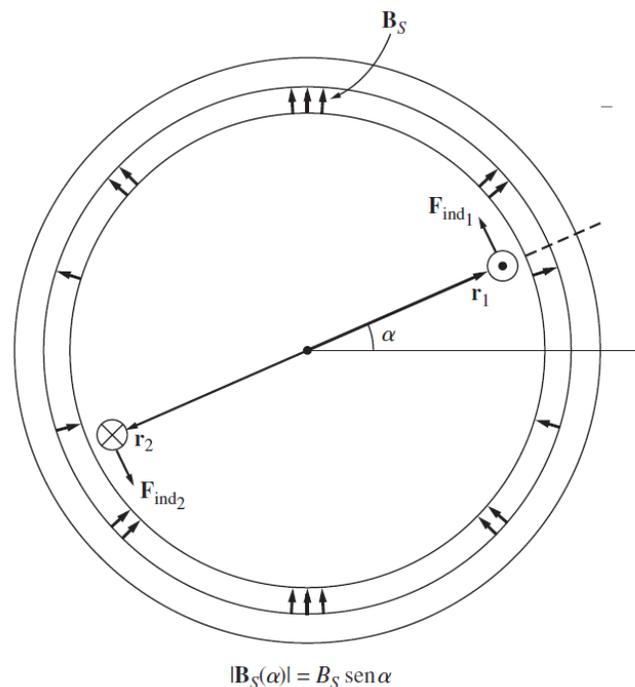
El voltaje rms en los terminales de la máquina depende de si el estator tiene una conexión en Y o en Δ . Si la máquina tiene una conexión en Y, entonces el voltaje del terminal será $\sqrt{3}$ veces E_A ; si la tiene en Δ , entonces el voltaje del terminal será igual a E_A .

1.4 Factores que afectan la fuerza electromotriz en una máquina de corriente alterna.

En las máquinas de ca, bajo condiciones normales de operación, hay dos campos magnéticos: uno por el circuito del rotor y otro por el circuito del estator. La interacción entre estos dos campos magnéticos produce un par en la máquina, de la misma manera que la cercanía de dos imanes permanentes genera un par que los alinea.

La *Figura 20* muestra una máquina de ca simplificada con una distribución senoidal de flujo del estator que tiene su pico en la dirección que apunta hacia arriba y una bobina de alambre simple montada sobre el rotor.

Figura 20. Máquina de ca simplificada con una distribución de flujo del estator senoidal y una sola bobina de alambre montada en el rotor.



La distribución del flujo del estator en esta máquina es

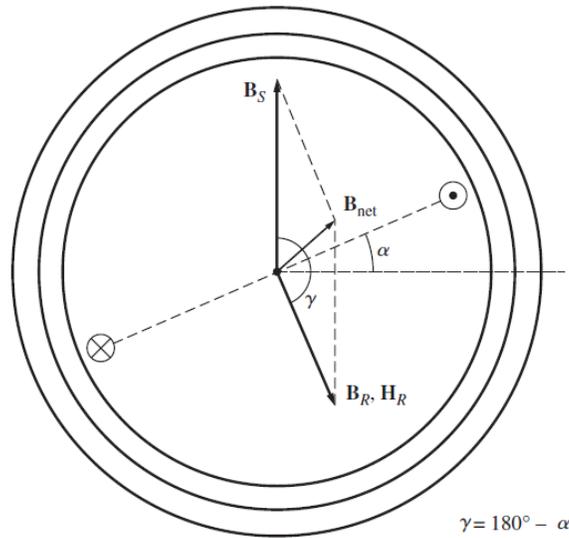
$$B_s(\alpha) = B_s \text{ sen } \alpha$$

donde B_S es la magnitud de la densidad de flujo pico; $B_S(\alpha)$ es positivo cuando el vector de densidad de flujo apunta radialmente hacia afuera de la superficie del rotor hacia la superficie del estator.

El par en la espira del rotor es:

$$T_{ind} = 2rilB_S \text{ sen } \alpha \quad \text{en sentido contrario a las manecillas del reloj}$$

Figura 21. Los componentes de densidad de flujo magnético dentro de la máquina



Examinando la [Figura 21](#) se pueden ver dos aspectos:

1. La corriente i que fluye en la bobina del rotor produce su propio campo magnético. La dirección del pico de este campo magnético se obtiene por medio de la regla de la mano derecha y la magnitud de su intensidad de magnetización H_R es directamente proporcional a la corriente que fluye en el rotor:

$$H_R = Ci$$

donde C es una constante de proporcionalidad.

2. El ángulo entre el pico de la densidad de flujo del estator B_S y el pico de la intensidad de magnetización del rotor H_R es γ . Además,

$$\gamma = 180^\circ - \alpha$$

$$\text{sen } \gamma = \text{sen } (180^\circ - \alpha) = \text{sen } \alpha$$

Al combinar estas dos observaciones, el par en la espira se puede expresar como:

$$T_{ind} = K H_R B_S \text{ sen } \alpha \quad \text{en sentido contrario a las manecillas del reloj}$$

donde K es una constante que depende de la construcción de la máquina.

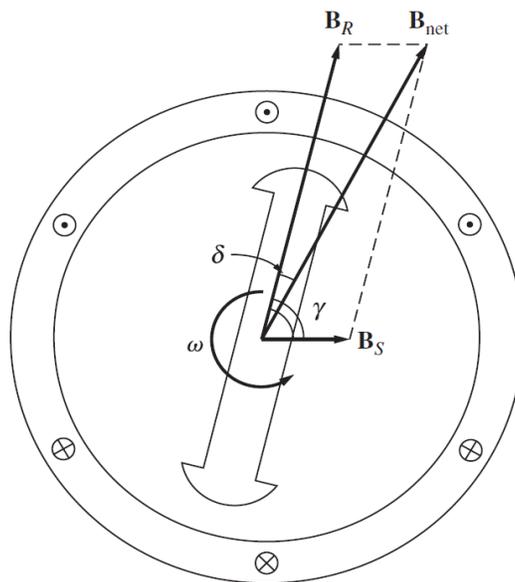
Si se sustituye K por $k = K/\mu$, considerando que la permeabilidad magnética μ varía de acuerdo con la cantidad de saturación magnética en la máquina. El par inducido queda:

$$T_{ind} = k B_R B_{net} \text{ sen } \delta$$

donde δ es el ángulo entre B_R y B_{net} . *Figura 22*

El par inducido tiene la dirección de las manecillas del reloj o la dirección opuesta a la rotación del rotor. Por lo tanto, esta máquina debe estar actuando como un generador.

Figura 22. Máquina síncrona simplificada que muestra los campos magnéticos de su rotor y de su estator



Para encontrar la ecuación de la fem inducida se considera el flujo total que emana por polo de un rotor cilíndrico que gira a velocidad angular de ω_s es θ_p . El flujo máximo que enlaza la bobina de paso fraccionario es $\theta_p k_p$ donde $k_p = \text{sen}(\rho/2)$ es el factor de paso y ρ es el alcance de bobina en grados eléctricos. A medida que el flujo gira, el flujo que enlaza a la bobina en cualquier momento t puede expresarse como:

$$\Theta_c = \theta_p k_p \cos \omega t$$

donde $\omega = 2 \pi f$ es la frecuencia angular en rad/s.

Para una bobina con N_c vueltas, con base en la ley de Faraday la fem inducida en la bobina es

$$e_c = N_c k_p \omega \theta_p \text{ sen } \omega t$$

El valor máximo de la fem inducida es

$$E_m = N_c k_p \omega \theta_p$$

y su valor medio cuadrático (rms) es

$$\begin{aligned} E_c &= \frac{1}{\sqrt{2}} E_m \\ &= 4.44 f N_c k_p \theta_p \end{aligned}$$

Donde el factor $\sqrt{2} \pi$ se ha aproximado a 4.44.

Puesto que en general un grupo de fase tiene más de una bobina conectada en serie y cada una de ellas está desplazada por un paso de ranura, la fem inducida en el grupo de fase:

$$E_{pg} = n k_d E_c = 4.44 n N_c k_p k_d f \theta_p$$

Donde n es el número de bobinas en un grupo de fase y k_d es el factor de distribución. El factor del devanado para un generador específico es

$$k_w = k_p k_d$$

El valor medio cuadrático (rms) de la fem inducida en cada grupo de fase puede expresarse en términos del factor del devanado como

$$E_{pg} = 4.44 n N_c k_w f \theta_p$$

Para un generador con P polos y a trayectorias paralelas, la fem inducida por fase (voltaje de fase) es

$$E_a = \frac{P}{a} 4.44 n N_c k_w f \theta_p$$

Ejercicios del Tema 1

EJERCICIO 1

Desarrollar una tabla que muestre la velocidad de rotación del campo magnético en máquinas de ca de 2, 4, 6, 8 ,10 ,12 y 14 polos operando a una frecuencia de 50, 60 y 400 Hz. Usando la fórmula:

$$n = \frac{120f}{p}$$

Solución

# of poles	$f_e = 50 \text{ Hz}$	$f_e = 60 \text{ Hz}$	$f_e = 400 \text{ Hz}$
2	$n_s = \frac{120 (50\text{Hz})}{2} = 3000 \text{ RPM}$	$n_s = \frac{120 (60\text{Hz})}{2} = 3600 \text{ RPM}$	$n_s = \frac{120 (400\text{Hz})}{2} = 24000 \text{ RPM}$
4	$n_s = \frac{120 (50\text{Hz})}{4} = 1500 \text{ RPM}$	$n_s = \frac{120 (60\text{Hz})}{4} = 1800 \text{ RPM}$	$n_s = \frac{120 (400\text{Hz})}{4} = 12000 \text{ RPM}$
6	$n_s = \frac{120 (50\text{Hz})}{6} = 1000 \text{ RPM}$	$n_s = \frac{120 (60\text{Hz})}{6} = 1200 \text{ RPM}$	$n_s = \frac{120 (400\text{Hz})}{6} = 8000 \text{ RPM}$
8	$n_s = \frac{120 (50\text{Hz})}{8} = 750 \text{ RPM}$	$n_s = \frac{120 (60\text{Hz})}{8} = 900 \text{ RPM}$	$n_s = \frac{120 (400\text{Hz})}{8} = 6000 \text{ RPM}$
10	$n_s = \frac{120 (50\text{Hz})}{10} = 600 \text{ RPM}$	$n_s = \frac{120 (60\text{Hz})}{10} = 720 \text{ RPM}$	$n_s = \frac{120 (400\text{Hz})}{10} = 4800 \text{ RPM}$
12	$n_s = \frac{120 (50\text{Hz})}{12} = 500 \text{ RPM}$	$n_s = \frac{120 (60\text{Hz})}{12} = 600 \text{ RPM}$	$n_s = \frac{120 (400\text{Hz})}{12} = 4000 \text{ RPM}$
14	$n_s = \frac{120 (50\text{Hz})}{14} = 428.57 \text{ RPM}$	$n_s = \frac{120 (60\text{Hz})}{14} = 514.28 \text{ RPM}$	$n_s = \frac{120 (400\text{Hz})}{14} = 3428.57 \text{ RPM}$

EJERCICIO 2

Un generador síncrono con devanado de doble capa, trifásico, de 16 polos y 144 ranuras, conectado en Y tiene 10 vueltas. El rotor se impulsa a una velocidad de 375 rpm. El flujo por polo es de 25 mWb. Cada devanado de fase está conectado en dos trayectorias paralelas. Determine:

- la frecuencia de la fem inducida
- el voltaje de fase
- el voltaje de línea

Solución

El número de bobinas en un grupo de fase es,

$$n = \frac{144}{16 \times 3} = 3$$

El número de ranuras por polo es,

$$S_p = \frac{144}{16} = 9$$

El alcance de ranura es,

$$\gamma = \frac{180}{9} = 20^\circ \text{ eléctricos}$$

Ya que hay nueve ranuras por polo y tres bobinas en un grupo de fase, cada bobina debe extenderse siete ranuras.

Así, el paso de bobina es $20 \times 7 = 140^\circ$ eléctricos

El factor de paso y los factores de distribución y del devanado son:

$$k_p = \text{sen} \left(\frac{140}{2} \right) = 0.94$$

$$k_d = \frac{\text{sen} \left(\frac{3 \times 20}{2} \right)}{3 \text{sen} \frac{20}{2}} = 0.96$$

$$k_w = 0.94 \times 0.96 = 0.902$$

El número de vueltas efectivas por fase es

$$N_d = \frac{16 \times 3 \times 10 \times 0.902}{2} = 216.48$$

a) la frecuencia de la fem inducida

$$f = \frac{375 \times 16}{120} = 150 \text{ Hz}$$

b) El valor medio cuadrático (rms) del voltaje generado por fase es

$$E_a = 4.44 \times 50 \times 216.48 \times 0.025 = 1201.46 \text{ V}$$

c) El valor medio cuadrático (rms) del voltaje de línea es

$$E_L = \sqrt{3} \times 1201.46 = 2081 \text{ V}$$

EJERCICIO 3

Calcule el factor de paso para un devanado de 48 ranuras, trifásico y tetrapolar.

Solución

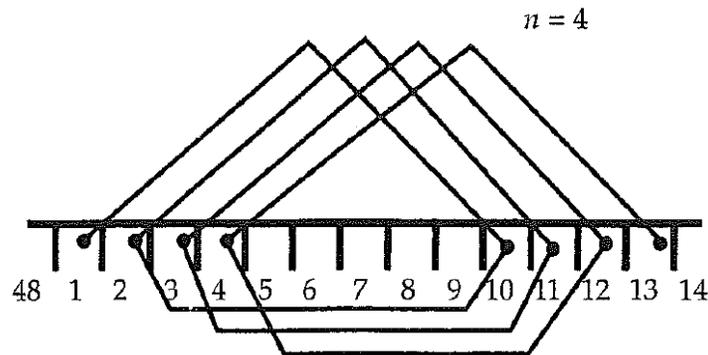
El número de ranuras por polo es $48/4 = 12$

La extensión de la ranura es $180/12 = 15^\circ$ eléctricos

El número de bobinas en un grupo de fase es

$$n = \frac{48}{4 \times 3} = 4$$

Como hay 12 ranuras por polo y cuatro bobinas en un grupo de fase, un lado de la bobina 1 debe colocarse en la ranura 1 y el otro lado en la ranura 10. El alcance de bobina es de 9 ranuras o $9 \times 15 = 135^\circ$ eléctricos.



El factor de paso es $k_p \sin \frac{135^\circ}{2} = 0.924$

La fem inducida en cada bobina de paso fraccionario es 92.4% de la fem inducida en una bobina de paso completo.

EJERCICIO 4

Calcule el factor de distribución para un devanado trifásico con 108 ranuras y 12 polos.

Solución

El número de bobinas en un grupo de fases es

$$n = \frac{108}{12 \times 3} = 3$$

Como hay $\frac{108}{12} = 9$ ranuras por polo, el alcance de ranura en grados eléctricos es

$$\gamma = \frac{180}{9} = 20^\circ$$

El factor de distribución es

$$k_d = \frac{\text{sen} \left(\frac{3 \times 20}{2} \right)}{3 \text{sen} \left(\frac{20}{2} \right)} = 0.96$$

Tema 2 Generador sincrónico

Las grandes cantidades de energía generadas por las compañías eléctricas toman con seriedad la eficiencia de sus generadores, debido a que entre mayor sea la eficiencia del generador mayores ingresos obtendrán. Por lo que el tamaño del generador es de gran importancia para las compañías suministradoras de energía eléctrica esto es porque entre mayor capacidad tenga el generador, mayor será la eficiencia, así como los ingresos obtenidos.

Por ejemplo, si un generador síncrono de 1kW tiene una eficiencia de 50%, uno de capacidad mayor, pero modelo similar teniendo una capacidad de 10 MW inevitablemente tendrá una capacidad cercana a 90%.

Si consideramos que entre mayor sea la capacidad de la máquina, mayor será la eficiencia de esta, al igual que la magnitud de las pérdidas en forma de calentamiento, teniendo que considerar el enfriamiento de los devanados. Entre mayor sea la capacidad del generador, el sistema de enfriamiento será más sofisticado y a su vez de un costo mayor, por lo que esta es la limitante principal del tamaño del generador.

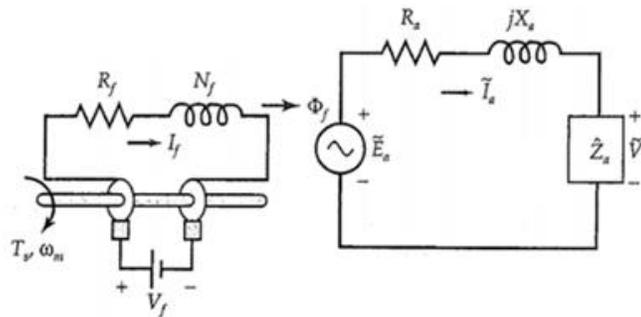
Es por ello, la importancia de conocer las variables que afectan a la máquina sincrónica y el comportamiento de acuerdo con su diseño al someterse a la conversión de la energía, encontrar su potencia, eficiencia, regulación de voltaje, pérdidas y valores en determinadas situaciones de operación se mostraran en este tema.

2.1 Circuito equivalente

Para estudiar la máquina síncrona es necesario tener en cuenta el efecto de la reacción del inducido, lo que requiere, el uso simultáneo de magnitudes eléctricas: fem, tensión y corriente, con magnitudes magnéticas: fmms, y flujo.

El voltaje en las terminales de un generador de ca depende de la carga y puede ser mayor que el voltaje generado cuando el factor de potencia es en adelanto. Para factores de potencia iguales a la unidad y en atraso, el voltaje en las terminales es menor que el voltaje generado. Describiéndose a continuación las magnitudes del circuito equivalente *Figura 23*.

Figura 23. Circuito equivalente por fase de un generador síncrono sin reacción a la armadura, con el campo revolvente producido por el rotor



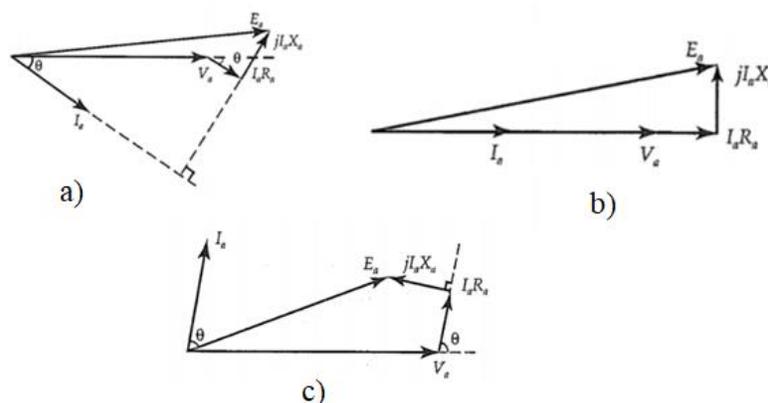
2.1.1 Caída de voltaje en la resistencia de la armadura

El voltaje generado por fase \tilde{E}_a de un generador síncrono e \tilde{I}_a la corriente por fase suministrada por éste a la carga. Si R_a es la resistencia por fase del devanado de la armadura, entonces $\tilde{I}_a R_a$ es la caída de voltaje a través de ella. La caída de voltaje $\tilde{I}_a R_a$ está en fase con la corriente de la carga \tilde{I}_a . Como R_a también ocasiona una pérdida de potencia en el generador, se mantiene pequeña especialmente para máquinas grandes.

2.1.2 Caída de voltaje por reactancia de dispersión en la armadura

La corriente \tilde{I}_a en el devanado de la armadura produce un flujo, una parte de éste se llama flujo de dispersión y origina una reactancia de dispersión X_a , esta ocasiona una caída de voltaje $j\tilde{I}_a X_a$, la cual está en adelanto de \tilde{I}_a en 90° . En la muestra diagramas fasoriales que muestran las relaciones entre el voltaje generado por fase \tilde{E}_a , el voltaje en las terminales por fase \tilde{V}_a y las caídas de voltaje $\tilde{I}_a R_a$ y $j\tilde{I}_a X_a$ para tres tipos de carga.

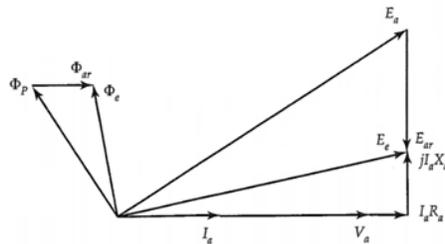
Figura 24. Diagramas fasoriales de un generador síncrono sin reacción de la armadura para un factor de potencia a) en atraso, b) unitario y c) en adelanto



2.1.3 Reacción de la armadura

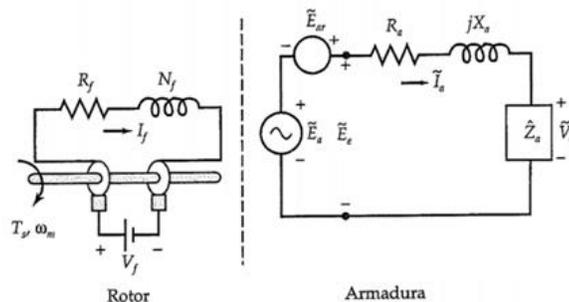
El flujo producido por el devanado de la armadura reacciona con el flujo establecido por los polos sobre el rotor, ocasionando que el flujo total cambie. Esta interacción entre los dos flujos se conoce como reacción de la armadura. En la *Figura 25* se muestra el comportamiento del generador alimenta una carga con un factor de potencia igual a la unidad, describiéndose a continuación:

Figura 25. Diagrama fasorial que describe el efecto de la reacción de la armadura cuando el factor de potencia es igual a la unidad en un generador síncrono



- Si θ_p es el flujo por polo en el generador sin carga, entonces el voltaje generado E_a debe estar en atraso respecto de θ_p en 90° .
- Siendo que el factor de potencia es igual a la unidad, la corriente de fase \tilde{I}_a está en fase con el voltaje de fase en las terminales \tilde{V}_a .
- La corriente de fase \tilde{I}_a pasa a través del devanado de la armadura, su fuerza magnetomotriz (fmm) produce un flujo θ_{ar} que está en fase con \tilde{I}_a . El flujo efectivo θ_e por polo en el generador es la suma algebraica de los dos flujos, es decir $\theta_e = \theta_p + \theta_{ar}$.
- El flujo θ_{ar} induce una fem \tilde{E}_{ar} en el devanado de la armadura. \tilde{E}_{ar} se conoce como fem de reacción de la armadura. La fem de reacción en la armadura E_{ar} está en atraso respecto del flujo θ_{ar} en 90° . El voltaje efectivo generado por fases E_e es la suma algebraica del voltaje sin carga \tilde{E}_a y la fem de reacción de la armadura \tilde{E}_{ar} , es decir $\tilde{E}_e = \tilde{E}_a + \tilde{E}_{ar}$. Como se muestra en la *Figura 26*:

Figura 26. Circuito equivalente por fase mostrando la fem inducida en el devanado de la armadura debida a la reacción de esta

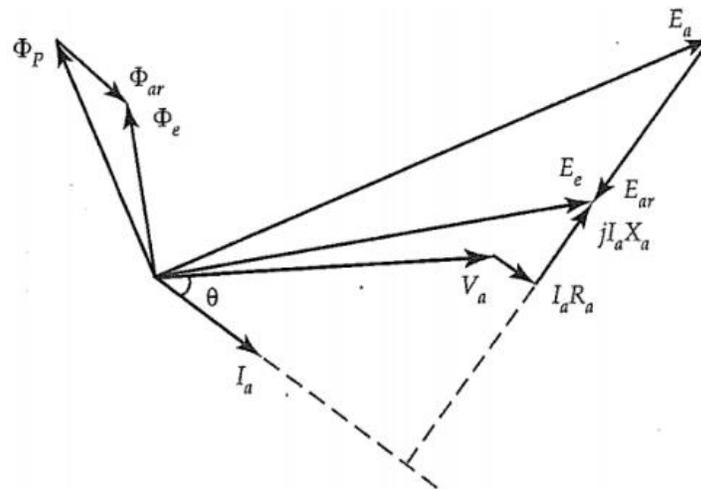


- El voltaje en las terminales por fase \tilde{V}_a se obtiene restando las caídas de voltaje $\tilde{I}_a R_a$ y $j\tilde{I}_a X_a$ de \tilde{E}_e , quedando como sigue:

$$\tilde{E}_e = \tilde{V}_a + \tilde{I}_a(R_a + jX_a)$$

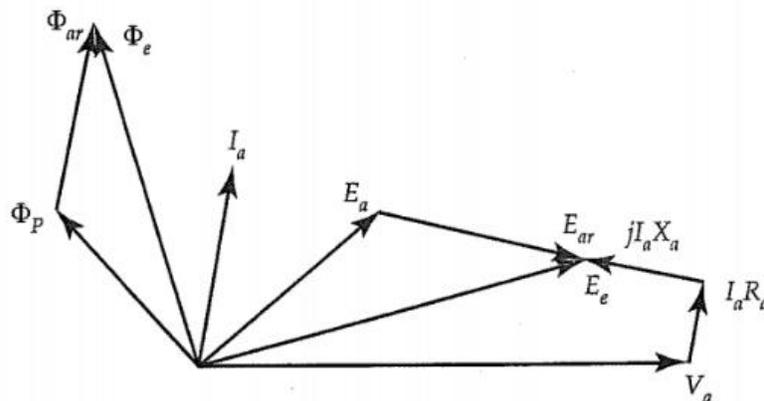
Los diagramas fasoriales para los factores de potencia en atraso y en adelante se muestran en la [Figura 27](#):

Figura 27. Diagrama fasorial mostrando el efecto de la reacción de la armadura cuando el factor de potencia está en atraso



El flujo resultante es menor con la reacción de la armadura para el factor de potencia en atraso que sin ella. Además, el voltaje en las terminales \tilde{V}_a es más alto que el voltaje generado \tilde{E}_a cuando el factor de potencia está en adelante.

Figura 28. Diagrama fasorial mostrando el efecto de la reacción de la armadura cuando el factor de potencia de la carga está en adelante



El flujo resultante es mayor con la reacción de la armadura para el factor de potencia en adelanto que sin ella. Además, el voltaje en las terminales \tilde{V}_a es más bajo que el voltaje generado \tilde{E}_a cuando el factor de potencia está en atraso.

El flujo por polo θ_p es diferente para cada una de las tres condiciones de carga, la corriente de campo I_f , debe ajustarse cada vez que sea modifica la carga.

Como la fem de reacción de la armadura \tilde{E}_{ar} está en atraso respecto de la corriente \tilde{I}_a en 90° , también puede expresarse de la siguiente manera:

$$\tilde{E}_{ar} = -j \tilde{I}_a X_m$$

Donde X_m es una constante de proporcionalidad conocida como reactancia de magnetización.

Tanto la reactancia de magnetización como la de dispersión están presentes al mismo tiempo. Es difícil separarlas por lo que se combinan y la suma se conoce como reactancia síncrona y queda así:

$$X_S = X_m + X_a$$

La reactancia síncrona suele ser muy grande en comparación con la resistencia del devanado de la armadura, puede definirse la impedancia síncrona por fase, como sigue:

$$\hat{Z}_S = R_a + j X_S$$

El circuito equivalente de un generador síncrono por fase que incorpora la reactancia síncrona se muestra en la [Figura 29](#), teniendo en las terminales por fase la fórmula siguiente:

$$\tilde{V}_a = \tilde{E}_a - \tilde{I}_a (R_a + j X_S) = \tilde{E}_a + \tilde{I}_a \hat{Z}_S$$

Figura 29. Circuito equivalente por fase de un generador síncrono con reacción de la armadura

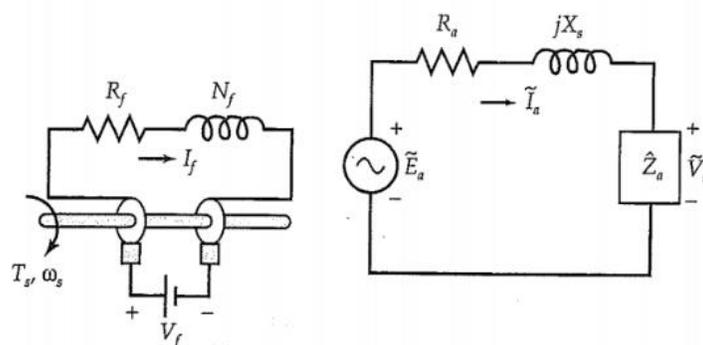
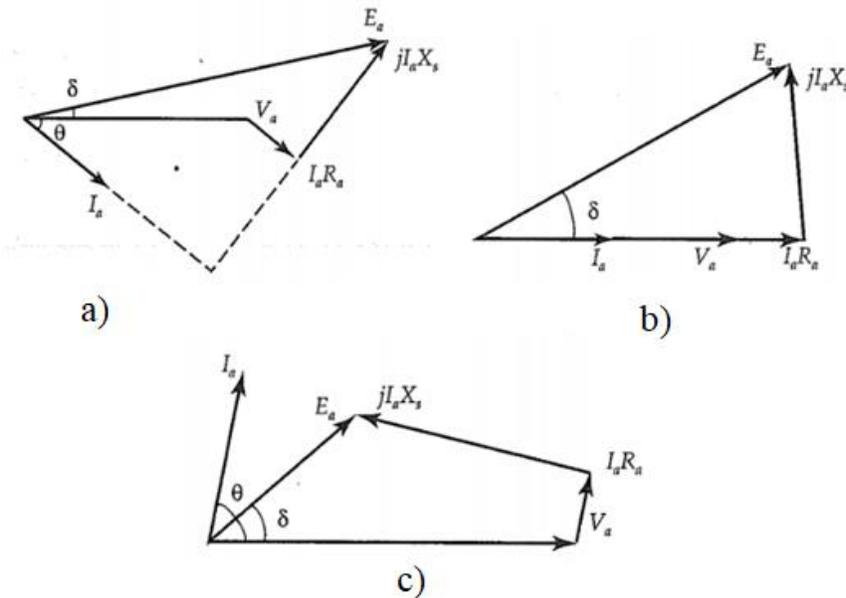


Figura 30. Diagramas fasoriales correspondientes para el factor de potencia de cargas a) en atraso, b) igual a la unidad y c) en adelanto



2.2 Determinación de parámetros de la máquina síncrona.

Los parámetros de un generador síncrono se obtienen por tres pruebas:

- Prueba de resistencia
- Prueba de circuito abierto
- Prueba en cortocircuito

2.2.1 Prueba de resistencia.

Se realiza para medir la resistencia del devanado de 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 medido de la resistencia R_L de línea a línea.

Si el generador está conectado en Y, la resistencia de fase es

$$R_a = 0.5 R_L$$

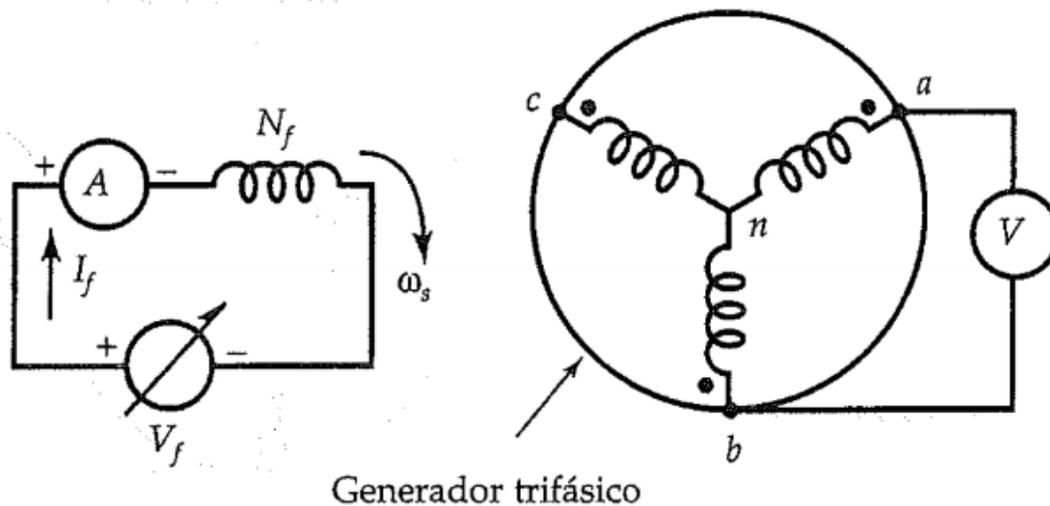
Para un generador conectado en Δ , la resistencia por fase es

$$R_a = 1.5 R_L$$

2.2.2 Prueba de circuito abierto.

Esta prueba se efectúa impulsando el generador a su velocidad nominal al tiempo que se deja abierto el devanado de la armadura. La corriente del campo se varía en pasos apropiados y se registran los valores correspondientes del voltaje a circuito abierto entre dos pares cualesquiera de terminales de los devanados de la armadura para un generador conectado en Y.

Figura 31. Diagrama del circuito para realizar la prueba de circuito abierto



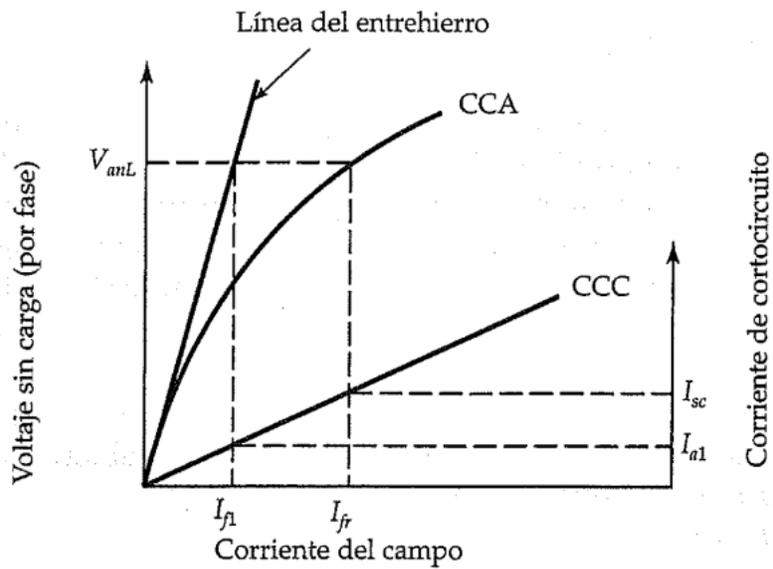
La corriente del campo puede aumentarse hasta que el voltaje a circuito abierto sea el doble del valor especificado. De los datos registrados para el voltaje a circuito abierto es posible calcular el voltaje por fase (circuito abierto).

Cuando se grafica el voltaje por fase (circuito abierto) como función de la corriente de campo, obteniéndose la gráfica característica (curva) de saturación a circuito abierto (CCA).

La CCA sigue una relación en 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 fmm, la recta recibe el nombre de línea del entrehierro.

A medida que la saturación se establece, la CCA comienza a desviarse de la línea del entrehierro *Figura 32*. La CCA se considera la curva de magnetización del generador en condiciones sin carga.

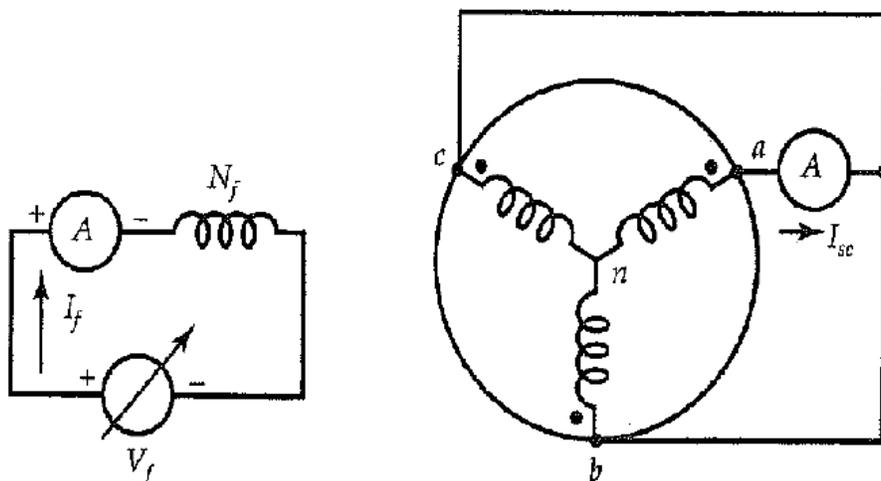
Figura 32. Características de circuito abierto y de corto circuito de un generador síncrono



2.2.3 Prueba de cortocircuito.

La prueba en cortocircuito da la información 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, para un generador conectado en Y. Se coloca un amperímetro en serie con una de las tres líneas en cortocircuito [Figura 33](#). Se incrementa gradualmente la corriente del campo y se registra el valor correspondiente de la corriente.

Figura 33. Diagrama del circuito para ejecutar una prueba de cortocircuito



La corriente máxima de la armadura en cortocircuito no debe exceder el doble de la corriente especificada del generador, a la gráfica se llama característica en cortocircuito (CCC) de un generador, *Figura 32*.

Para calcular la impedancia por fase síncrona a partir de la CCA y de la CCC de un generador síncrono a su voltaje nominal se lleva el siguiente procedimiento:

1. Se encuentra el valor de la corriente del campo (I_{fr}) que corresponde al voltaje especificado por fase (V_{anL}) a partir de la CCA del generador.
2. Se encuentra el valor de la corriente en cortocircuito (I_{sc}) a partir de la CCC para el mismo valor de corriente del campo I_{fr} .
3. La magnitud de la impedancia síncrona es igual al voltaje a circuito abierto dividido entre la corriente en cortocircuito.

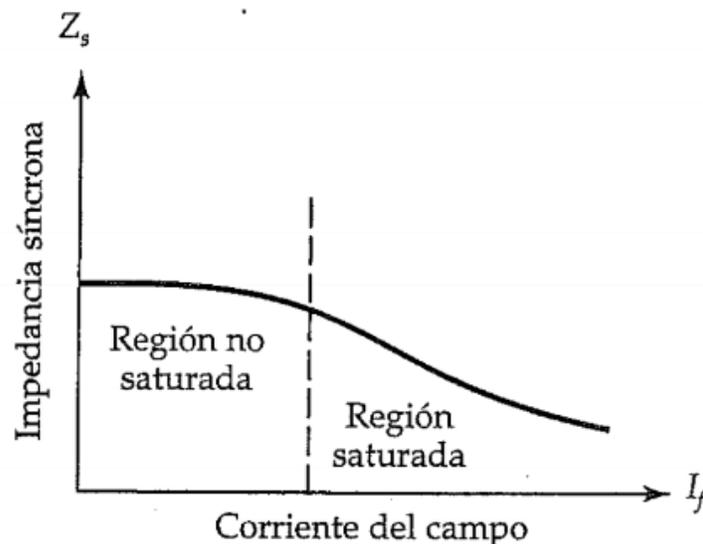
$$Z_s = \frac{V_{anL}}{I_{sc}}$$

Con la prueba de resistencia se conoce el valor de la resistencia de cada devanado de fase de la armadura, la reactancia síncrona del generador es.

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

A partir de la CCA y la CCC se puede graficar la impedancia síncrona como función de la corriente del campo.

Figura 34. Impedancia síncrona como función de la corriente del campo



Como se muestra en la *Figura 34*, la densidad de flujo se encuentra abajo del punto de inflexión de la curva de saturación, la impedancia síncrona es casi constante y se conoce como impedancia síncrona no saturada. En consecuencia, la impedancia síncrona saturada es menor que su valor no saturado.

La magnitud de la impedancia síncrona no saturada es:

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

La línea del entrehierro proporciona la corriente de campo necesaria I_{f1} al voltaje nominal V_{anL} para la impedancia síncrona no saturada y la corriente en cortocircuito correspondiente I_{a1} .

La magnitud de la impedancia síncrona (saturada) es:

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

Excepto en máquinas muy pequeñas, la reactancia síncrona es mucho mayor que la resistencia de la armadura y el valor saturado así como el valor no saturado de la reactancia síncrona se considera igual a la magnitud de la impedancia síncrona, es decir,

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

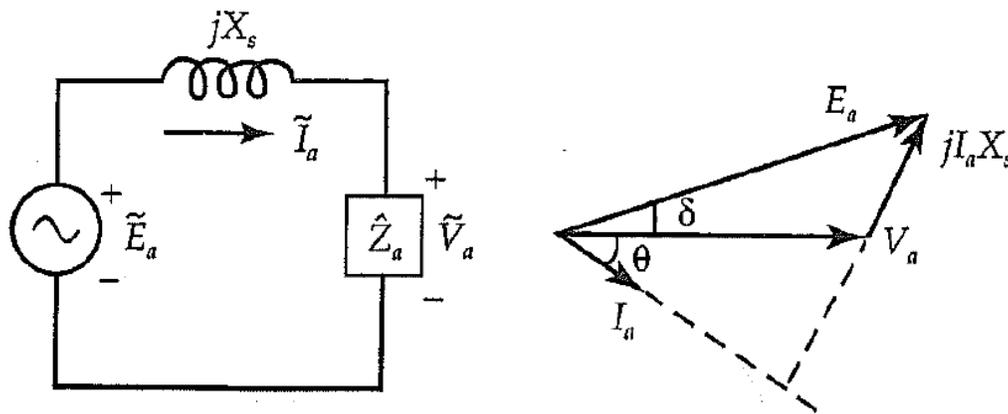
Para la corriente del campo puede obtenerse para un voltaje dado en las terminales, corriente de carga y factor de potencia. Esto se hace calculando E_a y haciendo uso de la reactancia síncrona saturada como sigue:

$$E_a = V_a + Z_s I_a$$

2.2.4 Característica externa de un generador síncrono

La característica externa de un generador síncrono muestra la variación del voltaje en las terminales con la carga de un generador independiente, este es el que es capaz de suministrar energía eléctrica en forma independiente. Su voltaje en terminales varía con la carga. Si la corriente de excitación se mantiene constante, el voltaje generado por fase será constante.

Figura 35. Circuito equivalente aproximado de un generador síncrono y su diagrama fasorial para una carga con factor de potencia en atraso



A partir del circuito equivalente aproximado y del diagrama fasorial del generador síncrono correspondiente a una carga en atraso, *Figura 35*, se puede determinar que el voltaje en las terminales es

$$\tilde{V}_a = \tilde{E}_a - j\tilde{I}_a X_S$$

Puesto que \tilde{E}_a y X_S son constantes, el voltaje en las terminales \tilde{V}_a depende de la magnitud de la corriente de la carga y de su factor de potencia. Aunque la magnitud del voltaje de fase \tilde{E}_a es constante, su fase (el ángulo de potencia) tiene libertad para cambiar. Por tanto, debe resultar obvio que el lugar geométrico de \tilde{E}_a debe ser un círculo. A continuación, se verán los cambios en \tilde{V}_a de acuerdo a la carga con factor de potencia igual a la unidad, en atraso y en adelanto.

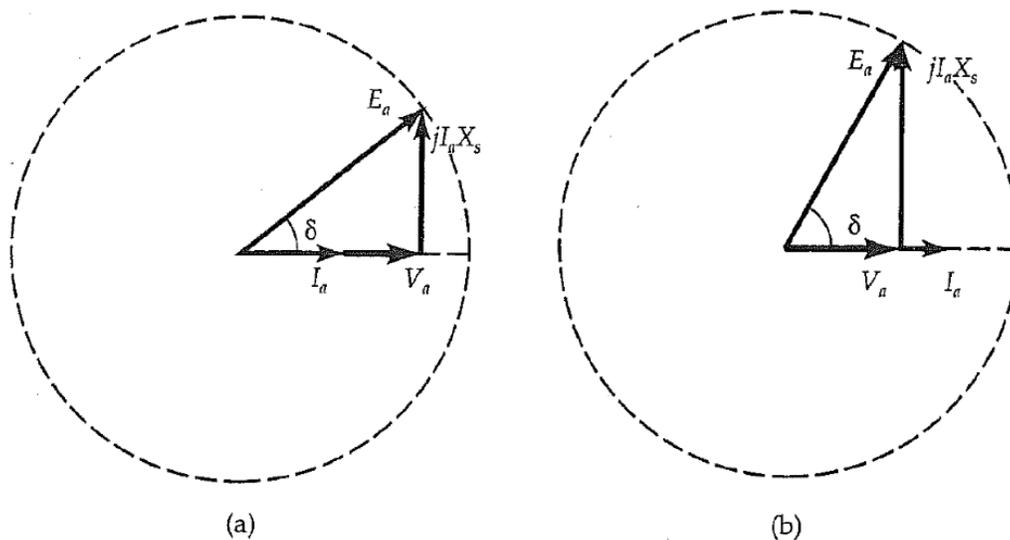
Factor de potencia igual a la unidad

Para una carga puramente resistiva, $\hat{Z}_L = R_L$, el voltaje en las terminales \tilde{V}_a y la corriente de la carga \tilde{I}_a están en fase. El incremento en la corriente de la carga ocasiona que:

- se incremente la caída del voltaje a través de la reactancia sincrónica,
- aumente el ángulo de potencia y
- disminuya el voltaje en las terminales

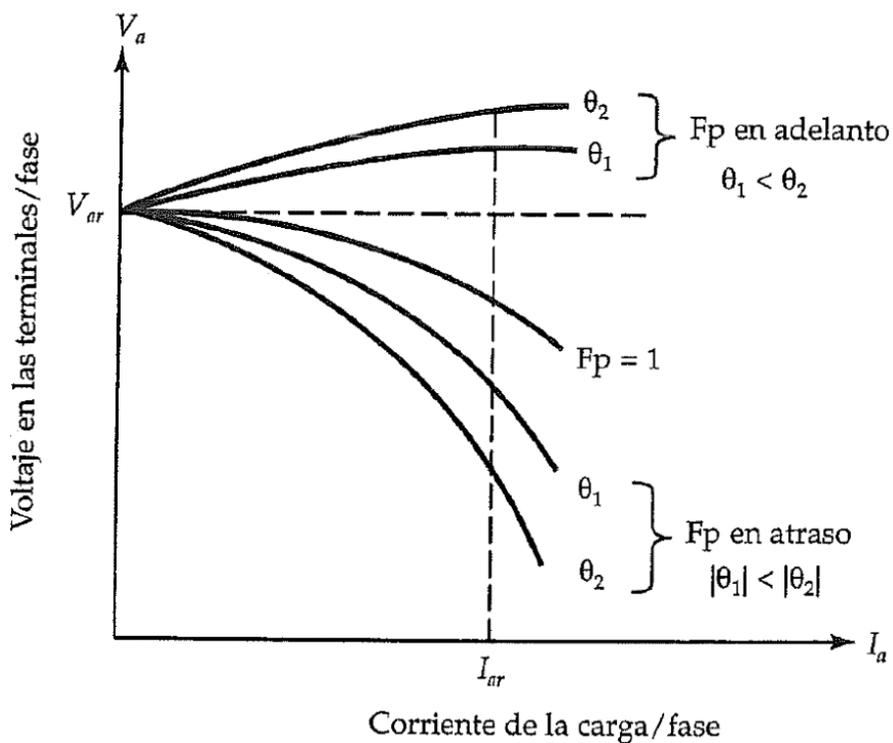
Ver *Figura 36*

Figura 36. Efecto de la carga resistiva sobre el voltaje en las terminales de un generador síncrono independiente para corrientes en la armadura a) pequeñas y b) grandes



La característica externa, es decir el voltaje en las terminales como función de la carga para el factor de potencia unitario, se muestra en la [Figura 37](#).

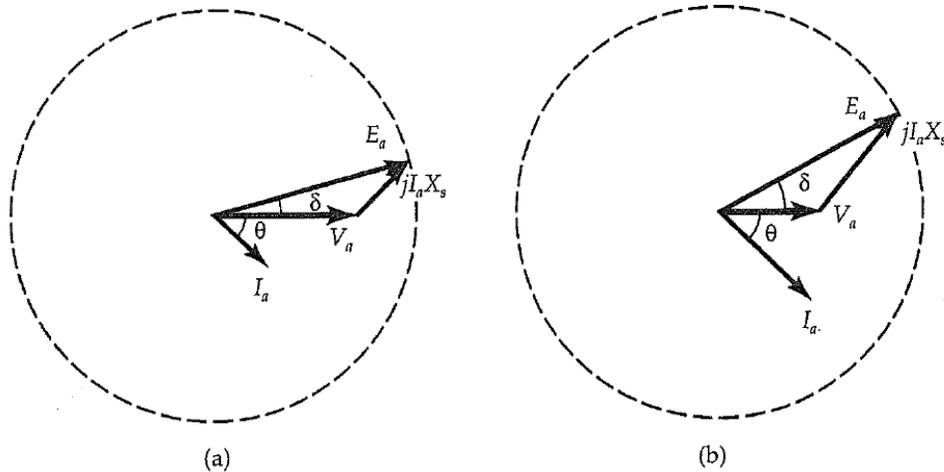
Figura 37. Características externas de un generador síncrono en distintas condiciones de carga



Factor de potencia en atraso

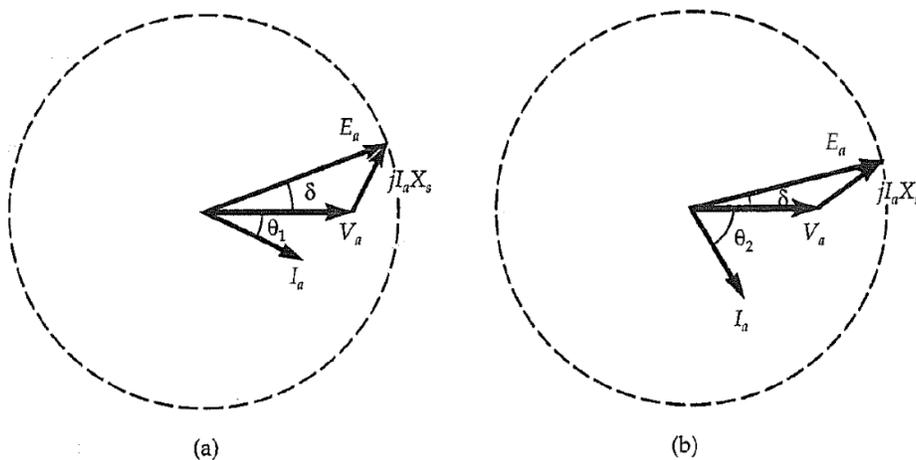
Para una carga inductiva, $\hat{Z}_L = R_L + jX_L$, la corriente de la carga está en atraso respecto del voltaje en las terminales en un ángulo de θ . Para un ángulo dado θ del factor de potencia, el aumento en la corriente de la carga ocasiona la disminución del voltaje en las terminales, como se muestra en la [Figura 38](#).

Figura 38. Efecto de la carga inductiva sobre el voltaje en las terminales de un generador síncrono independiente para corrientes de carga a) pequeñas y b) grandes



Para una magnitud constante de la corriente de la carga, ese voltaje disminuye aún más con el decrecimiento del factor de potencia, como se muestra en la [Figura 39](#). Las características externas para los dos factores de potencia en atraso se muestran en la [Figura 37](#)

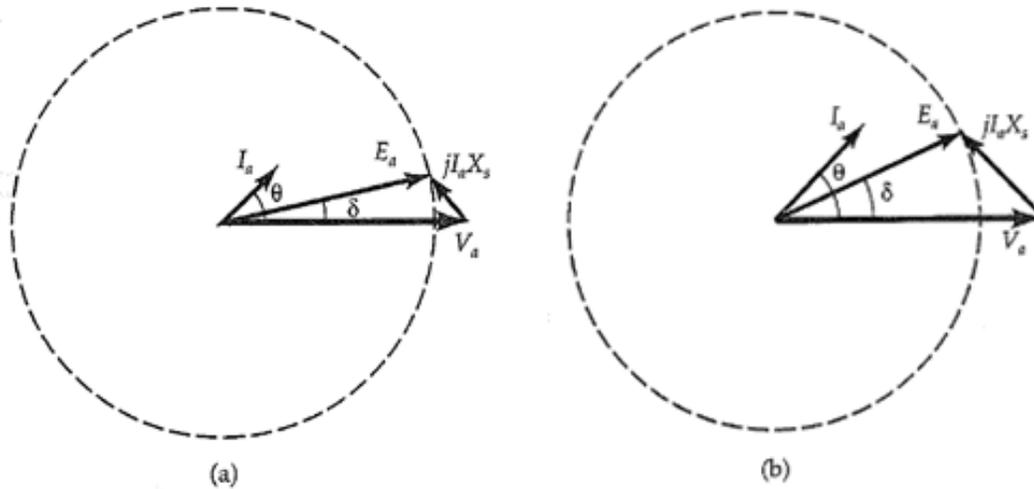
Figura 39. Efecto de un factor de potencia en atraso sobre el voltaje en las terminales de un generador síncrono independiente para ángulos de factor de potencia a) pequeños y b) grandes



Factor de potencia en adelanto

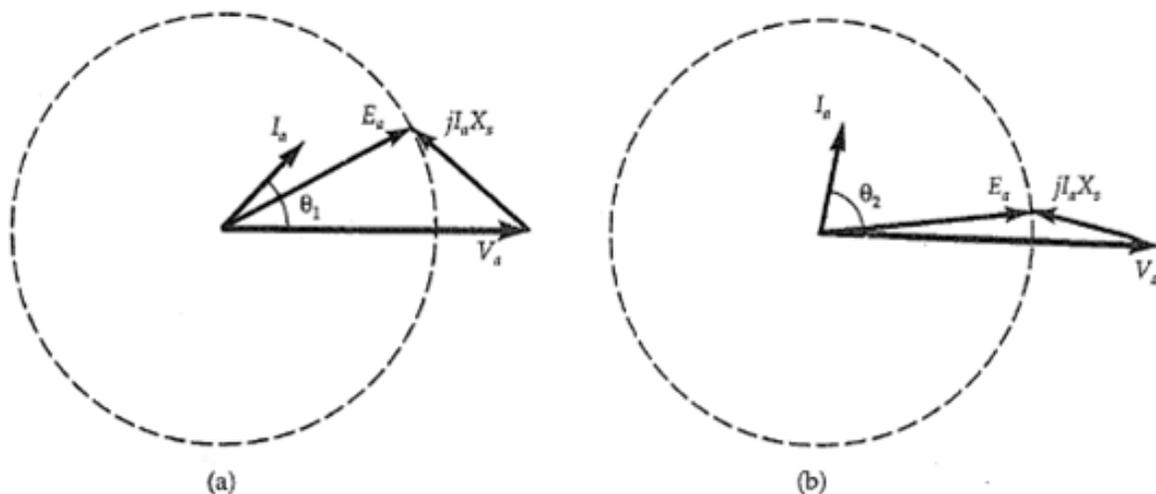
Para una carga capacitiva $\hat{Z}_L = R_L + jX_C$, la corriente de la carga se adelanta al voltaje en las terminales en un ángulo θ . En la [Figura 40](#) se muestran los diagramas fasoriales para corrientes en la armadura pequeñas y grandes para un ángulo del factor de potencia. El voltaje en las terminales se incrementa con el aumento en la corriente de la carga.

Figura 40. Efecto de la carga capacitiva sobre el voltaje en las terminales de un generador síncrono independiente par corrientes de carga a) pequeñas y b) grandes



En la [Figura 41](#) se muestran los diagramas fasoriales para ángulos pequeños y grandes del factor de potencia para la misma magnitud de la corriente de carga. El voltaje en las terminales se incrementa aún más con el aumento en el ángulo del factor de potencia.

Figura 41. Efecto de un factor de potencia en adelanto sobre el voltaje en las terminales de un generador síncrono independiente para ángulos de factor de potencia a) pequeños y b) grandes

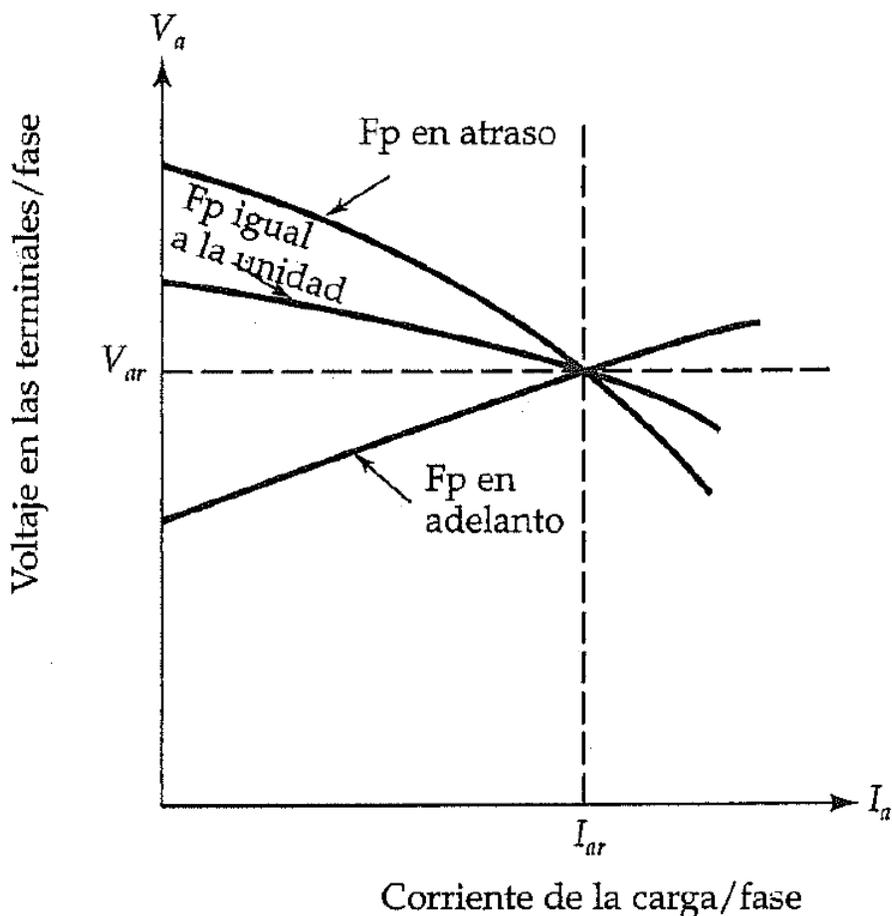


Para un generador que opere independientemente es posible ajustar la corriente del campo (excitación) para cada carga de modo que el generador alimente la carga especificada a su voltaje nominal. Si se varia la corriente de la carga sin efectuar otros ajustes en la corriente de excitación, se observa lo siguiente:

1. Para una carga resistiva, el voltaje en las terminales se incrementa con la disminución en la corriente de la carga.
2. Para una carga inductiva, el voltaje en las terminales también se incrementa con la disminución en la corriente de la carga. Sin embargo, el incremento es mayor para una carga inductiva que para una carga resistiva.
3. Para una carga capacitiva, el voltaje en las terminales decrece con la disminución en la corriente de línea.

En la *Figura 42* se ilustran las características externas de un generador independiente ajustado para operar a su voltaje y carga especificados.

Figura 42. Características externas de un generador síncrono independiente ajustado para operar con carga nominal sujeta a distintas condiciones de carga



2.2.5 Regulación de voltaje.

Si V_a es el voltaje nominal en las terminales para una carga y factor de potencia dados y velocidad nominal, E_a es el voltaje de circuito abierto a velocidad nominal cuando la carga se quita sin cambiar la corriente de campo, entonces la regulación de voltaje (RV%) esta dado por la ecuación:

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

2.2.6 Relaciones de potencia.

El rotor de un generador síncrono está conectado a una máquina impulsora que puede ser un motor de cc, una turbina de vapor o de gas, un motor diesel o un equipo similar. Si el impulsor primario ejerce un par de T_s en el eje con una velocidad angular de ω_s , la potencia mecánica suministrada del rotor es $T_s \omega_s$.

La potencia mecánica alimentada al generador es:

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

La potencia de entrada de cc a un rotor devanado es $V_f I_f$ donde V_f es el voltaje de cc a través del devanado del campo e I_f es la corriente continua a través de éste.

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

Las pérdidas en un generador síncrono consisten en la pérdida por rotación (pérdidas mecánicas y magnética), la pérdida en el cobre en el devanado de la armadura, la pérdida por excitación del campo en el devanado del campo y la pérdida por carga parásita, si la hay.

La pérdida por rotación, la pérdida en el devanado del campo y la pérdida por carga parásita 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.

Si V_a es el voltaje de la carga por fase, I_a es la corriente de la carga por fase y θ es el ángulo de fase entre V_a e I_a , la potencia de salida de un generador síncrono es:

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

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

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

Si P_r es la pérdida por rotación de un generador síncrono y P_{st} es la pérdida por carga parásita, entonces la potencia de entrada es

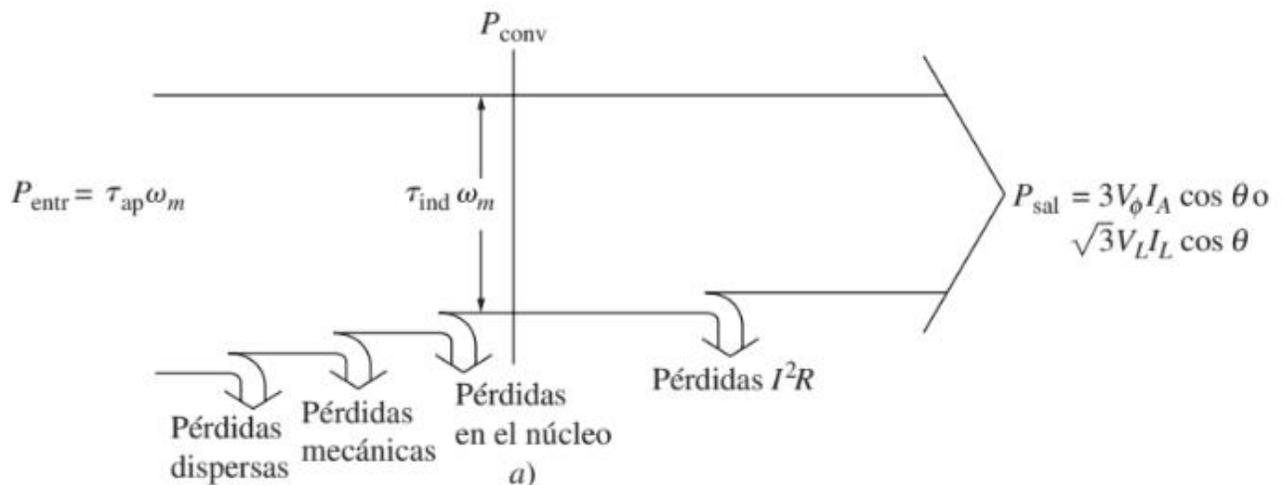
$$P_{in} = 3 V_a I_a \cos \theta + 3 I_a^2 R_a + P_r + P_{st} + V_f I_f$$

Como el rotor gira a velocidad constante, la pérdida por rotación es constante. La pérdida por el devanado del campo es constante. Suponiendo que la pérdida por carga parásita fuera constante, es posible agrupar esas pérdidas y tratarlas como una pérdida constante que es:

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

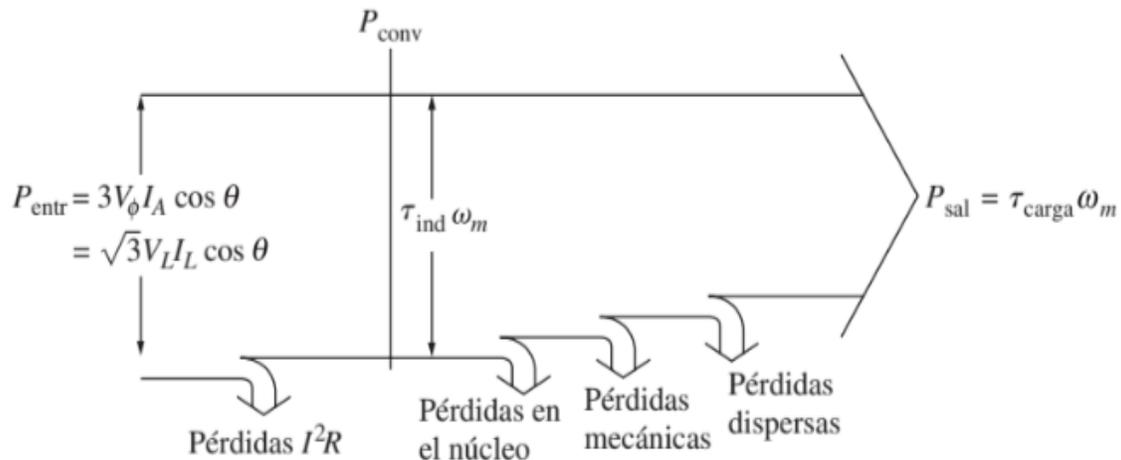
Ya que la pérdida en el cobre en la armadura depende de la corriente de la carga, se considera una pérdida variable. La [Figura 43](#) muestra el diagrama de flujo de un generador de ca trifásico:

Figura 43. Diagrama de flujo de potencia de un generador de ca trifásico



En los motores de ca, este diagrama de flujo de potencia se invierte, como se muestra en la [Figura 44](#):

Figura 44. Diagrama de flujo de potencia de un motor de ca trifásico

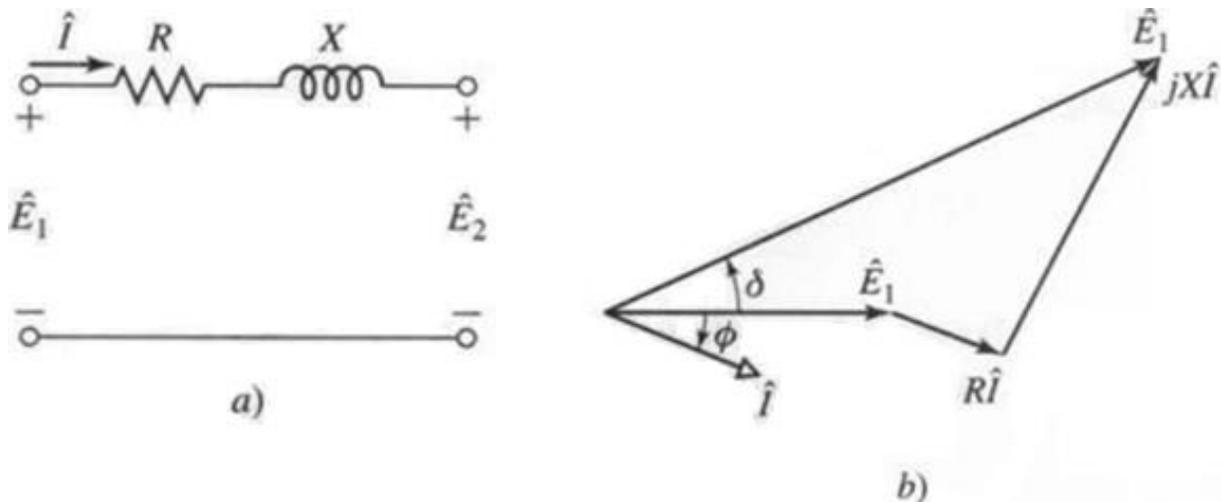


2.3 Característica del ángulo de potencia en operación en estado estacionario.

La potencia máxima de una máquina síncrona se determina mediante el par máximo que puede aplicarse sin pérdida de sincronía con respecto al sistema externo al cual se conecta, este sistema se representa como la impedancia en serie con una fuente de voltaje.

El sistema externo y la máquina pueden representarse como una impedancia en serie con una fuente de voltaje, el estudio de los límites de la potencia se convierte sólo en un caso especial del problema más general que abarca los límites del flujo de potencia a través de la impedancia en serie. Por lo tanto, la impedancia incluirá la impedancia síncrona de la máquina síncrona, así como una impedancia equivalente del sistema externo.

Figura 45. a) Impedancia que conecta dos voltajes b) Diagrama fasorial



Considerando un circuito simple como se muestra en la *Figura 45 a*), el cual consta de dos voltajes de corriente alterna \hat{E}_1 y \hat{E}_2 conectados mediante una impedancia $Z = R + jX$ a través de la cual la corriente es \hat{I} . El diagrama fasorial *Figura 45 b*), se presenta junto al circuito. En este diagrama, la dirección de referencia para los ángulos positivos es en contra de las manecillas del reloj. El ángulo δ es positivo mientras que el ángulo ϕ es negativo.

La potencia P_1 que corre a través de la impedancia a una fuente de voltaje de carga parásita \hat{E}_2 es

$$P_2 = E_2 I \cos \phi$$

Donde ϕ representa el ángulo de fase de \hat{I} con respecto a \hat{E}_2 . La corriente del fasor es

$$\hat{I} = \frac{\hat{E}_1 - \hat{E}_2}{Z}$$

Si los voltajes fasores y la impedancia se expresan en forma polar,

$$\hat{E}_1 = E_1 e^{j\delta}$$

$$\hat{E}_2 = E_2$$

$$Z = R + jX = |Z|e^{j\phi_z}$$

Donde δ es el ángulo de fase mediante el que \hat{E}_1 conduce a \hat{E}_1 y $\phi_z = \tan^{-1}(\frac{X}{R})$ representa el ángulo de fase de la impedancia Z , por lo tanto

$$\hat{I} = I e^{j\phi} = \frac{E_1 e^{j\delta} - E_2}{|Z| e^{j\phi_z}} = \frac{E_1}{|Z|} e^{j(\delta - \phi_z)} - \frac{E_2}{|Z|} e^{-j\phi_z}$$

Al tener participación real en la ecuación anterior se obtiene la siguiente expresión:

$$I \cos \phi = \frac{E_1}{|Z|} \cos(\delta - \phi_z) - \frac{E_2}{|Z|} \cos(-\phi_z)$$

$$\cos(-\phi_z) = \cos \phi_z = \frac{R}{|Z|}$$

$$P_2 = \frac{E_1 E_2}{|Z|} \cos(\delta - \phi_z) - \frac{E_2^2 R}{|Z|^2}$$

$$P_2 = \frac{E_1 E_2}{|Z|} \sin(\delta + \alpha_z) - \frac{E_2^2 R}{|Z|^2}$$

Donde

$$\alpha_z = 90^\circ - \phi_z = \tan^{-1}\left(\frac{R}{X}\right)$$

La potencia P_1 en el extremo de la fuente de la impedancia puede expresarse de la siguiente forma

$$P_1 = \frac{E_1 E_2}{|Z|} \sin(\delta - \alpha_z) + \frac{E_1^2 R}{|Z|^2}$$

De igual manera que sucede con la frecuencia, la resistencia presenta un valor insignificante, entonces $R \ll |Z|$, $|Z| \approx X$ y $\alpha_z \approx 0$, quedando:

$$P_1 = P_2 = \frac{E_1 E_2}{X} \sin \delta$$

Esta es la ecuación característica del ángulo de potencia para una máquina síncrona y el ángulo δ se llama ángulo de potencia.

Si la resistencia presenta un valor insignificante y los voltajes son constantes, la transferencia máxima de potencia quedaría:

$$P_{1,m\acute{a}x} = P_{2,m\acute{a}x} = \frac{E_1 E_2}{X}$$

Ocurre cuando $\delta = \pm 90^\circ$.

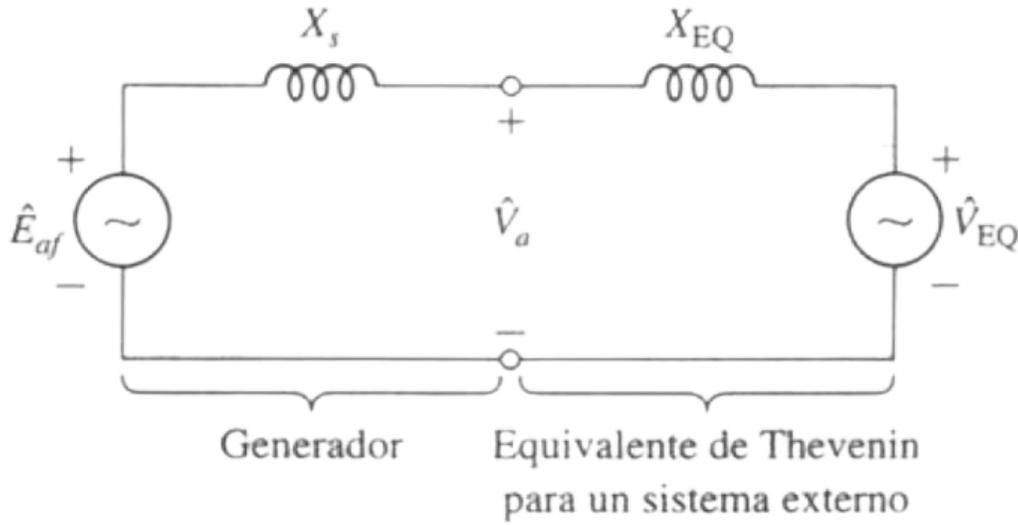
Si δ tiene un valor positivo, \hat{E}_1 conduce a \hat{E}_2 y, la potencia fluye de una fuente \hat{E}_1 hacia \hat{E}_2 .

Si δ tiene un valor negativo, \hat{E}_1 defasa a \hat{E}_2 y, la potencia fluye de \hat{E}_2 hacia \hat{E}_1 .

La ecuación característica es válida para cualquier fuente de voltaje \hat{E}_1 y \hat{E}_2 separadas por una impedancia reactiva jX .

La *Figura 46* presenta una máquina síncrona con un voltaje generado \hat{E}_{af} y una reactancia síncrona X_S que se conectan a un sistema cuyo equivalente de Thevenin representa una fuente de voltaje \hat{V}_{EQ} en serie con una impedancia reactiva $j\hat{X}_{EQ}$.

Figura 46. Representación de un circuito equivalente de una máquina síncrona conectada a un sistema externo



La característica de la potencia del ángulo se escribe como sigue:

$$P = \frac{E_{af} V_{EQ}}{X_s + X_{EQ}} \sin \delta$$

Donde P representa la potencia que se transfiere de una máquina síncrona a un sistema, y δ representa el ángulo de fase de \hat{E}_{af} con respecto a \hat{V}_{EQ} . Es posible formular la característica del ángulo de potencia en términos de X_{EQ} , E_{af} , el voltaje terminal V_a y el ángulo relativo entre ambos, o de manera alternativa X_{EQ} , V_a y V_{EQ} y su ángulo relativo.

Para un sistema trifásico balanceado, si E_1 y E_2 representan los voltajes de línea a neutro, los resultados deberán multiplicarse por tres para obtener la potencia total de las tres fases; de manera alternativa E_1 y E_2 pueden expresarse en términos del voltaje en cuyo caso las ecuaciones proporcionan directamente la potencia trifásica.

La transferencia máxima de potencia que se asocia con el funcionamiento de una máquina síncrona es proporcional a la magnitud del voltaje del sistema que corresponde a V_{EQ} , así como a la magnitud del voltaje interno del generador E_{af} .

Para un voltaje de sistema constante, la transferencia máxima de potencia puede incrementarse al aumentar la corriente de campo de la máquina síncrona y por lo tanto el voltaje interno.

Las condiciones de estabilidad dictan que una máquina síncrona alcanza un funcionamiento de estado estacionario para un ángulo de potencia considerablemente menor a los 90° . De esta forma, para una configuración de sistema establecido, es necesario asegurar que la máquina será capaz de alcanzar su nivel de funcionamiento, el cual se encontrará dentro de los límites de operación para la máquina y para el sistema.

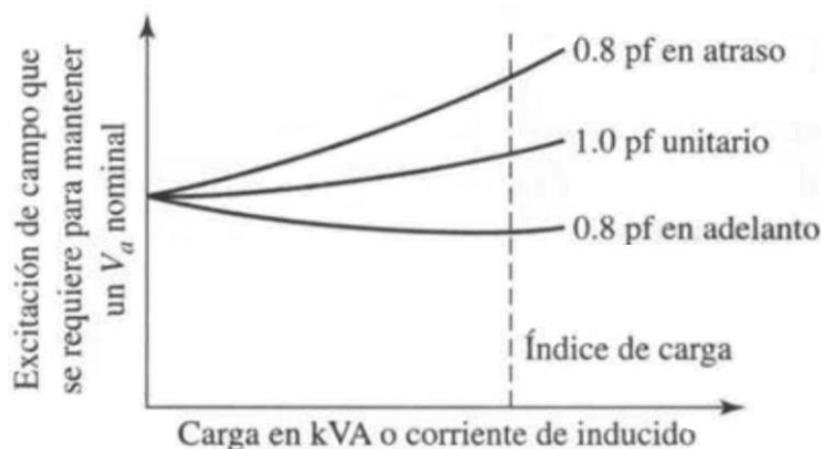
2.4 Operación en estado estacionario en condiciones aisladas.

Las principales características de operación del estado estacionario de una máquina síncrona es mediante la interrelación que hay entre el voltaje nominal, la corriente de campo, la corriente del inducido, el factor de potencia y la eficiencia.

Para una mejor explicación se considera un generador síncrono que genera potencia a una frecuencia constante y un voltaje terminal proporcional a una carga cuyo factor de potencia es constante.

La curva que muestra la corriente de campo que se requiere para mantener proporcional el voltaje terminal mientras que la carga del factor de potencia constante varía y se denomina curva de composición. La forma característica de las tres curvas de composición a diferentes factores de potencia constante se presenta en la *Figura 47*:

Figura 47. Forma característica de las curvas de composición de un generador síncrono



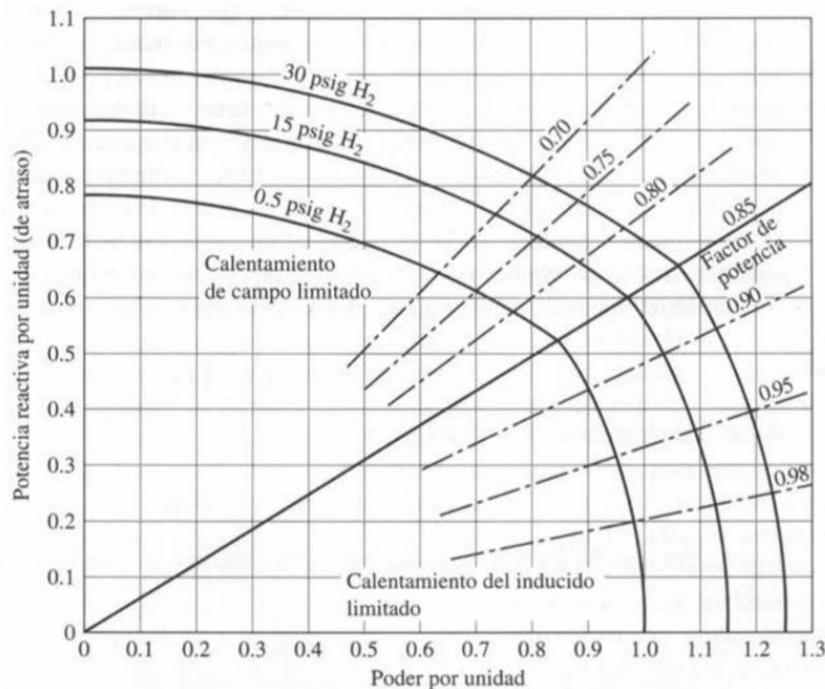
Los generadores síncronos generalmente se evalúan en términos de la carga de potencia máxima aparente a un determinado voltaje y factor de potencia que puedan llevar a manera continua sin sobrecalentarse. La salida de potencia real del generador se limita a

un valor dentro del índice de potencia aparente por medio de la capacidad del motor principal.

El sistema de regulación de voltaje (que controla la corriente de campo en respuesta al valor que se midió del voltaje terminal), la máquina normalmente opera a un voltaje terminal constante cuyo valor se encuentra dentro de $\pm 5\%$ del voltaje proporcional. Cuando la carga de potencia real y el voltaje se fijan, la carga de potencia reactiva permitida se limita por el calentamiento del devanado de inducido o de campo.

La derivación de las curvas de capacidad como las que se presentan en la *Figura 48*, la operación bajo condiciones de voltaje terminal constante y de corriente de inducido corresponde a un valor constante de la potencia de salida aparente determinada por el producto del voltaje terminal y de la corriente.

Figura 48. Curvas de capacidad de un turbogenerador enfriado por hidrógeno con un índice de 0.80 de cortocircuito y 0.85 de factor de potencia. La base en MVA se registra MVA a 0.5 psig hidrógeno



Dado que la potencia en el sistema por unidad se obtiene de la siguiente manera:

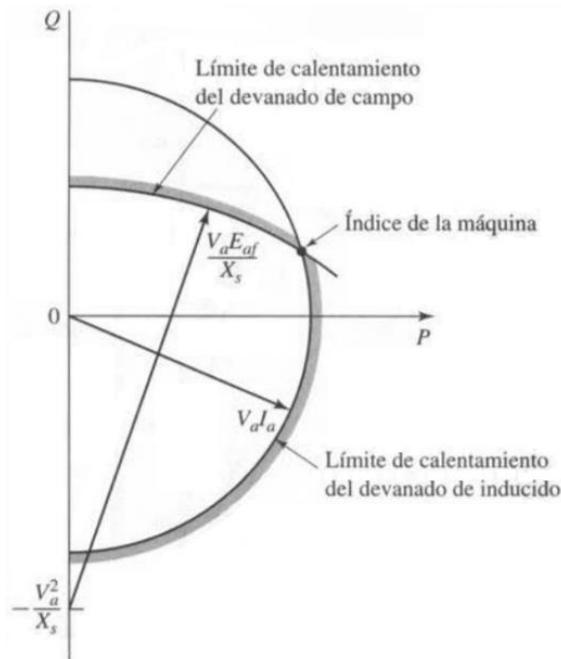
$$\text{Potencia aparente} = \sqrt{P^2 + Q^2} = V_a I_a$$

donde P representa la potencia real por unidad

Q representa la potencia reactiva por unidad

La potencia aparente constante corresponde a un círculo centrado sobre el origen en una gráfica de potencia reactiva frente a la potencia real. Para un voltaje terminal constante, la potencia aparente constante corresponde a una corriente del devanado constante y como consecuencia a un calentamiento del devanado inducido o armadura. En la *Figura 49* se muestra el nivel máximo aceptable de calentamiento del inducido.

Figura 49. Estructura aplicada a la derivación de una curva de capacidad de un generador síncrono



Cuando el voltaje terminal es constante y la corriente de campo se limita a un valor máximo, que también es determinado por limitaciones de calentamiento. En valores por unidad,

$$P - jQ = \hat{V}_a \hat{I}_a$$

De la ecuación del voltaje en terminales del circuito equivalente:

$$V_a = -R_a I_a - j X_s I_a + E_{af}$$

Con $R_a = 0$, queda la ecuación como sigue,

$$E_{af} = V_a + j X_s I_a$$

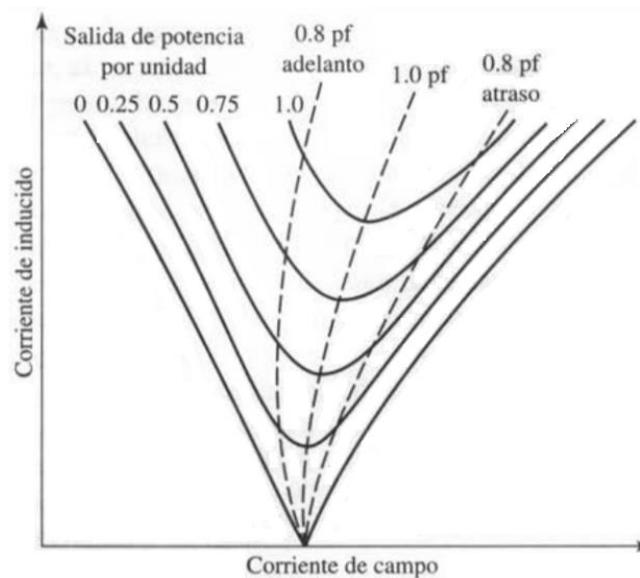
Dando como resultado la siguiente ecuación:

$$P^2 + \left(Q + \frac{V_a^2}{X_s} \right)^2 = \left(\frac{V_a E_{af}}{X_s} \right)^2$$

Esta ecuación corresponde a un círculo centrado en $Q = - \left(\frac{V_a^2}{X_s} \right)$ y determina el límite de calentamiento en el devanado de campo del funcionamiento de la máquina. Es común especificar la potencia aparente y factor de potencia de la máquina, al igual que como el punto de intersección de las curvas de limitación del devanado de inducido y de campo.

Para una carga de potencia real dada, el factor de potencia al que la máquina opera, y como consecuencia su corriente de inducido o armadura, se controlan mediante el ajuste de su excitación de campo. La curva que muestra la relación entre la corriente del inducido y la corriente de campo a un voltaje terminal constante y con una potencia real constante se le denomina curva V debido a su forma característica, *Figura 50*.

Figura 50. Forma típica de las curvas V de un generador síncrono



Para una potencia de salida constante, la corriente de inducido es mínima a un factor de potencia unitario y se incrementa a medida que el factor de potencia disminuye. Las líneas intermitentes representan lugares geométricos del factor de potencia constante; además son las curvas de composición del generador síncrono que muestran cómo la corriente de campo debe variar al tiempo que la carga cambia para mantener constante el factor de potencia.

Los puntos, a la derecha del factor de potencia unitario de la curva de composición, corresponden a la sobreexcitación y al factor de potencia en atraso; los puntos de la

izquierda corresponden a la subexcitación y al factor de potencia de conducción.

Las curvas V del motor síncrono y las curvas de composición son muy similares a aquellas que presentan los generadores síncronos, si no fuera por los efectos menores de la resistencia del inducido, las curvas de composición del motor y del generador serían idénticas, con la excepción de que las curvas del factor de potencia de atraso y de adelanto se intercambian.

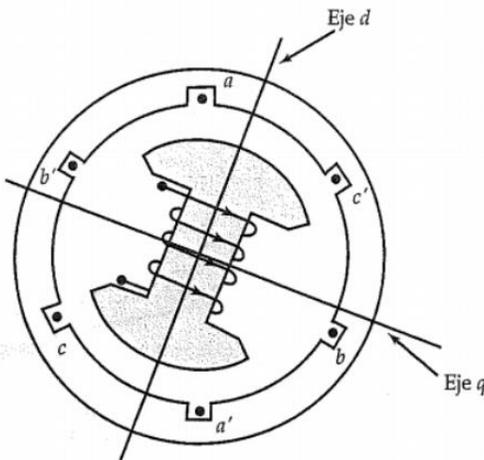
La eficiencia de una máquina síncrona en cualquier punto de operación se determina por las pérdidas que consisten en: pérdidas en los devanados, pérdidas en el núcleo, las pérdidas de carga por dispersión y pérdidas mecánicas.

2.5 Teoría de las componentes en cuadratura aplicada a las máquinas síncronas de polos salientes.

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.

En cambio, en 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, por lo tanto, las reluctancias de las dos regiones en un generador de polos salientes difieren en forma significativa. Para explicar esta 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 .

Figura 51. Generador síncrono bipolar de polos salientes



La corriente de la armadura \tilde{I}_a también se reduce a dos componentes, la componente directa \tilde{I}_d y la componente de cuadratura \tilde{I}_q . La componente directa \tilde{I}_d produce el campo a lo largo del eje d y está en atraso respecto de \tilde{E}_d en 90° . La componente de cuadratura \tilde{I}_q produce el campo a lo largo del eje q y está en fase con \tilde{E}_a .

Si \tilde{E}_a es el voltaje generado por fase en condiciones sin carga y \tilde{E}_d y \tilde{E}_q son las fem inducidas en el devanado de la armadura por las componentes de la corriente \tilde{I}_d e \tilde{I}_q , respectivamente, entonces el voltaje por fase en las terminales del generador es:

$$\tilde{V}_a = \tilde{E}_a + \tilde{E}_d + \tilde{E}_q - \tilde{I}_a R_a$$

Sin embargo, la fem inducidas \tilde{E}_d y \tilde{E}_q pueden expresarse en términos de X_d y X_q como sigue:

$$\tilde{E}_d = -j \tilde{I}_d X_d$$

$$\tilde{E}_q = -j \tilde{I}_q X_q$$

Al sustituir las expresiones anteriores en la fórmula del voltaje de fase se obtiene:

$$\tilde{E}_a = \tilde{V}_a + \tilde{I}_a R_a + j \tilde{I}_d X_d + j \tilde{I}_q X_q$$

Si se expresa $j \tilde{I}_d X_d$ como sigue:

$$j \tilde{I}_d X_d = j \tilde{I}_d X_q + j \tilde{I}_d (X_d - X_q)$$

Se tiene que

$$\begin{aligned} \tilde{E}_a &= \tilde{V}_a + \tilde{I}_a R_a + j \tilde{I}_d X_q + j \tilde{I}_q X_q + j \tilde{I}_d (X_d - X_q) \\ &= \tilde{V}_a + \tilde{I}_a R_a + j \tilde{I}_d X_q + j \tilde{I}_q X_q + j \tilde{I}_d X_d - j \tilde{I}_d X_q \\ &= \tilde{V}_a + \tilde{I}_a R_a + j \tilde{I}_d X_q + j \tilde{I}_d (X_d - X_q) \end{aligned}$$

donde

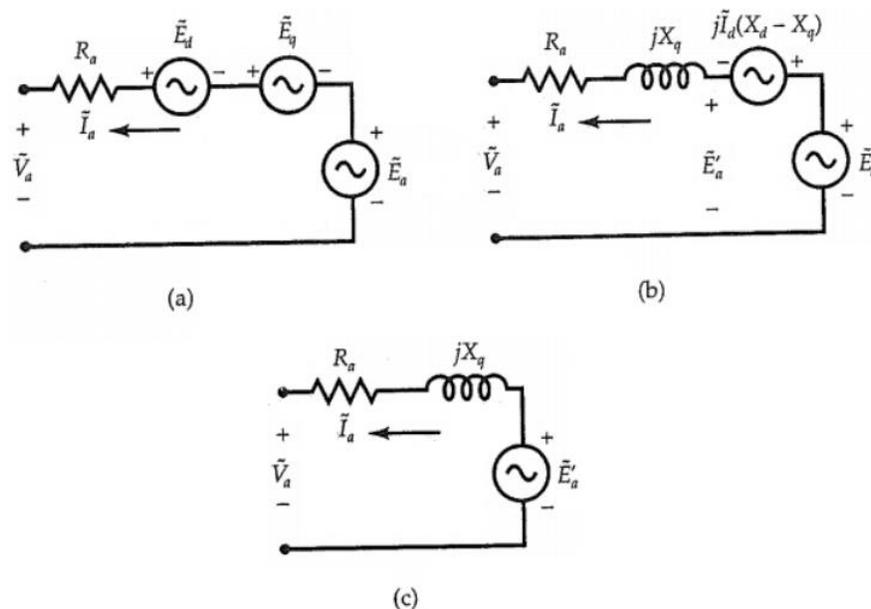
$$\tilde{E}_a' = \tilde{V}_a + \tilde{I}_a R_a + j \tilde{I}_d X_q$$

e

$$\tilde{I}_a = \tilde{I}_d + \tilde{I}_q$$

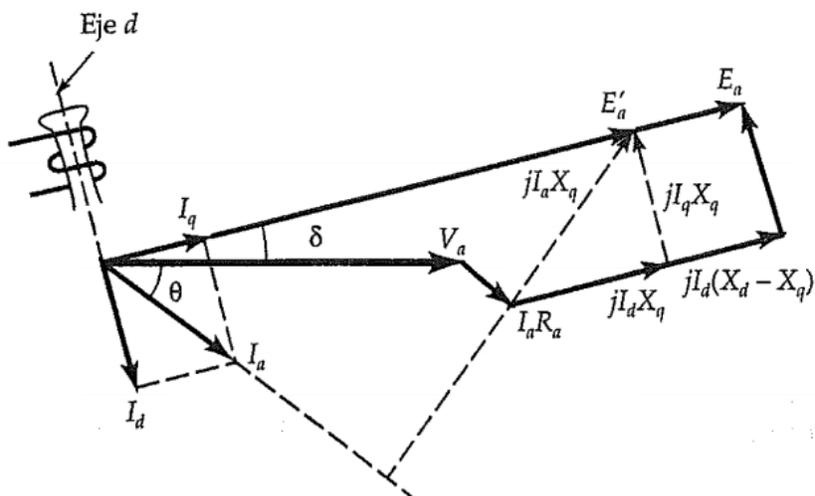
El generador síncrono de polos salientes se puede representar con el siguiente circuito equivalente. Siendo que considera a \tilde{E}'_a como la fem generada (voltaje de excitación), quedando el circuito equivalente semejante al de un generador de rotor cilíndrico. *Figura 52*

Figura 52. Representaciones de circuito equivalente de un generador síncrono de polos salientes



En la *Figura 53* muestra el diagrama fasorial para una carga con factor de potencia en atraso, ya que la fem generada \tilde{E}'_a está en fase con \tilde{E}_a , el ángulo de fase con el que \tilde{E}'_a está en adelanto respecto del voltaje en las terminales \tilde{V}_a es el ángulo de potencia δ .

Figura 53. Diagrama fasorial de un generador síncrono de polos salientes que tiene resistencia finita en el devanado de la armadura y factor de potencia en atraso



Para determinar el ángulo de potencia δ cuando se conocen el voltaje en las terminales, la corriente de la carga y los parámetros del generador se puede sacar por medio de las ecuaciones y el diagram fasorial:

$$\widetilde{E}'_a = \widetilde{V}_a + \widetilde{I}_a R_a + j \widetilde{I}_a X_q \quad \text{y} \quad \widetilde{I}_a = \widetilde{I}_d + \widetilde{I}_q$$

Queda el ángulo de potencia δ :

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

Para obtener de \widetilde{I}_d e \widetilde{I}_q en términos de \widetilde{I}_a , como sigue:

$$\widetilde{I}_d = I_a \sin(\delta + \theta) \quad |\delta - 90^\circ$$

$$\widetilde{I}_q = I_a \cos(\delta + \theta) \quad |\delta$$

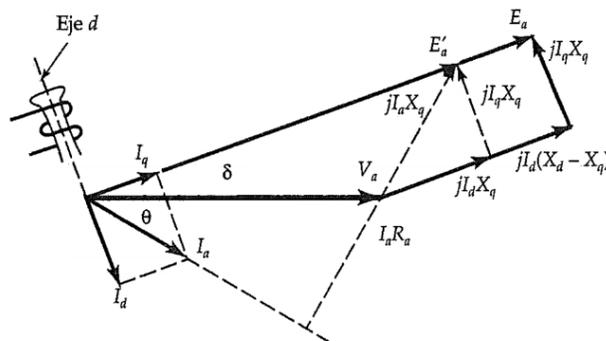
Donde I_a es el valor medio cuadrático (rms) de la corriente de la armadura.

La potencia de salida puede calcularse como sigue:

$$\begin{aligned} P_o &= 3 \operatorname{Re} [\widetilde{V}_a \widetilde{I}_a^*] = 3 \operatorname{Re} [\widetilde{V}_a (\widetilde{I}_d^* + \widetilde{I}_q^*)] \\ &= 3 V_a [I_d \sin \delta + I_q \cos \delta] \end{aligned}$$

Cuando la resistencia en la armadura es tan pequeña que puede despreciarse, la potencia de salida es igual que la potencia desarrollada, en la [Figura 54](#) se muestra el diagrama fasorial para una carga con factor de potencia en atraso:

Figura 54. Diagrama fasorial de un generador síncrono de polos salientes con resistencia despreciable en el devanado de la armadura y factor de potencia en atraso.



A partir de este diagrama se obtiene

$$I_q = \frac{V_a \sin \delta}{X_q}$$

e

$$I_d = \frac{E_a - V_a \cos \delta}{X_d}$$

Luego,

$$\tan \delta = \frac{I_a X_q \cos \theta}{V_a + I_a X_q \sin \theta}$$

Sustituyendo I_d e I_q , en la formula de la potencia desarrollada (salida):

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

El término $\frac{3 V_a E_a \sin \delta}{X_d}$ es el mismo obtenido para un generador de rotor cilíndrico.

Representa la potencia debida a la excitación del campo (voltaje generado E_a).

El término $\frac{3 (X_d - X_q)}{2 X_d X_q} V_a^2 \sin 2\delta$ resalta el efecto de los polos salientes. Indica la potencia de reluctancia y es independiente de la excitación del campo.

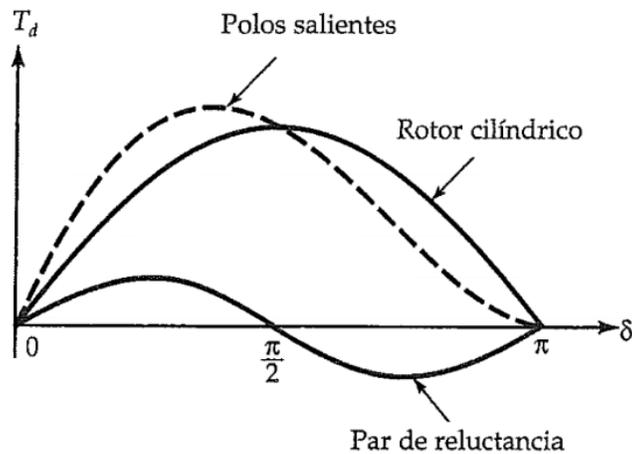
Un generador de polos salientes puede entregar una potencia mayor que otro de rotor cilíndrico, con ángulos de potencia menores de 90° para los mismos voltajes en las terminales y de excitación.

El par desarrollado por un generador de polos salientes es:

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

En la *Figura 55* se muestra el par desarrollado por un generador de polos salientes como función del ángulo de par δ . También se indican las variaciones en el par de excitación y el par de reluctancia.

Figura 55. Par desarrollado por un generador síncrono de polos salientes como función del ángulo del par



2.6 La máquina síncrona como fuente de reactivos.

2.6.1 Componentes simétricas en sistemas trifásicos

Este método, está basado en el teorema de Fortescue que permite analizar fallas en sistemas trifásicos de tipo asimétricas, pero puede ser usado para resolver cualquier sistema cuyas condiciones sean asimétricas en un momento dado.

Las fallas asimétricas a las que nos referiremos son:

- Falla monofásica a tierra
- Falla Bifásica a tierra
- Falla bifásica
- Pérdida de un conductor

Pero también se podrá utilizar este método, cuando sea necesario resolver sistemas con cargas asimétricas.

El método establece que " Cualquier sistema asimétrico de n vectores, puede ser descompuesto en n sistemas simétricos con n vectores, cada uno".

Como cada vector, puede ser correspondido en el plano complejo de Gauss por un número complejo, el método puede servir para representar tensiones, corrientes, flujos magnéticos, impedancias y reactancias.

Los sistemas simétricos se designan con números de orden, esos números estarán dentro del conjunto de los naturales, incluido el cero: 0, 1, 2, 3, 4,

Para el orden 0, el desfase entre cada vector del sistema es de cero grados 0° .

Para el orden 1, el desfase es $n 2\pi$, para el orden 2, será $n 2x 2\pi$.

En los sistemas trifásicos, habrá 3 ordenes, el 0, 1 y 2.

Orden 0.

En este caso, el desfase es 0° , obtenidos de la operación:

$$\frac{0 * 2\pi}{n} = 0$$

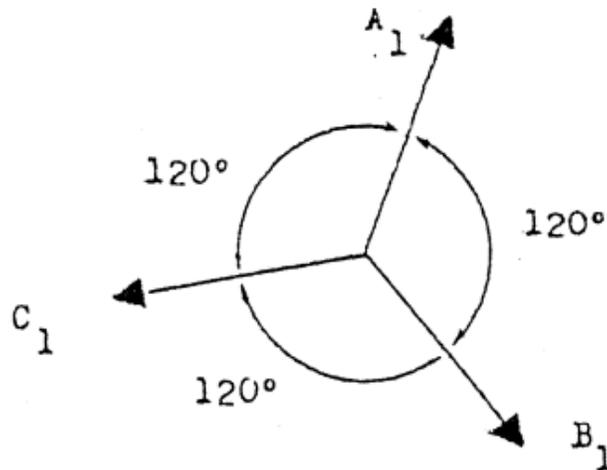
Los vectores serán colineales, con el mismo modulo, sentido y argumento. Es conocido como sistema homopolar por las condiciones de fase de los vectores (o fasores)

Orden 1.

En los sistemas de orden 1, los vectores estarán desfasados en $\frac{2\pi}{n} = \frac{2\pi}{3} = 120^\circ$.

Este orden también conocido como secuencia directa o positiva ordena a los vectores (fasores) de las fases a 120° entre sí y en orden R-S-T, por ejemplo. Posee el sentido de giro principal del sistema eléctrico.

Figura 56. Vectores secuencia positiva

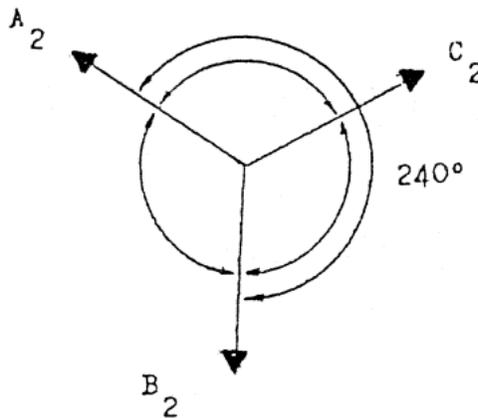


Orden 2.

En los sistemas de orden 2, los vectores están desfasados $\frac{2 \cdot 2\pi}{n} = \frac{2 \cdot 2\pi}{3} = 240^\circ$, esto implica que el orden las fases estará invertido respecto de un sistema de orden 1.

El sistema de orden 2, es conocido también como secuencia negativa o secuencia inversa. El sistema de vectores gira en sentido contrario al de secuencia positiva.

Figura 57. Vectores secuencia positiva



La ventaja presentada es que el tratamiento de los circuitos asimétricos trifásicos se facilita al descomponerse en 3 circuitos trifásicos simétricos, permitiendo resolver circuitos monofásicos.

2.6.2 Descomposición de un sistema asimétrico en tres sistemas simétricos

Para aplicar el método, referiremos cada una de las fases a una de ellas tomándola como "fase de referencia", en lo siguiente, se referirán los sistemas de ecuaciones a la fase R o A, pero puede llegarse a idénticas conclusiones si se refirieran a cualquier otra de las dos fases.

Ahora debemos definir el factor de fase, que es un operador que al multiplicarlo por otro vector, origina un cambio en la fase del mismo, sin alterar el módulo.

Este factor es llamado con $a = 1|120^\circ$

Este operador, es entonces un fasor con argumento de 120° y módulo igual a 1 o sea un versor con fase de 120° .

Cualquiera sea el ángulo de la fase tomada como referencia, podemos referir las otras fases de un sistema simétrico trifásico, separando una fase de otra en 120° y 240° tomados desde la fase de referencia.

Recordando la operación de producto de vectores, podemos escribir:

$$a \cdot R[30^\circ = 1 \cdot |R| [120^\circ + 30^\circ = |R| [150^\circ$$

Este factor de fase a , posee algunas propiedades

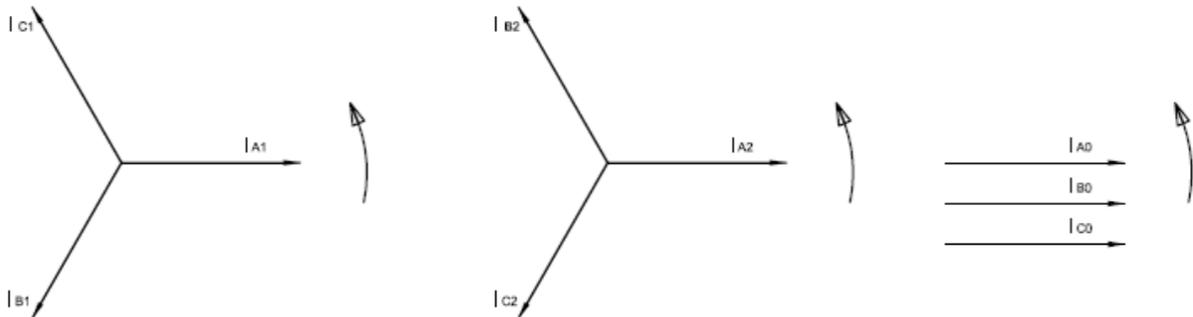
$$a = 1 [120^\circ$$

$$1 + a + a^2 = 0$$

$$1 + a^3 + a^3 = 3$$

De esta forma, un conjunto de corrientes podrá ser descompuesta inicialmente en las tres secuencias como se muestra en la siguiente figura

Figura 58. Secuencias positiva, secuencia negativa y secuencia cero



Notar que la secuencia negativa tiene un sentido de giro diferente, esto se ha establecido al invertir dos de las fases.

Las ecuaciones de las corrientes de fase serán:

$$I_A = I_{A0} + I_{A1} + I_{A2}$$

$$I_B = I_{B0} + I_{B1} + I_{B2}$$

$$I_C = I_{C0} + I_{C1} + I_{C2}$$

Luego, las corrientes de fase podrán ser escritas por las sumas de las corrientes de secuencia, pero referidas a la fase A.

$$\begin{aligned} I_A &= I_{A0} + I_{A1} + I_{A2} \\ I_B &= I_{A0} + a^2 I_{A1} + a I_{A2} \\ I_C &= I_{A0} + a I_{A1} + a^2 I_{A2} \end{aligned}$$

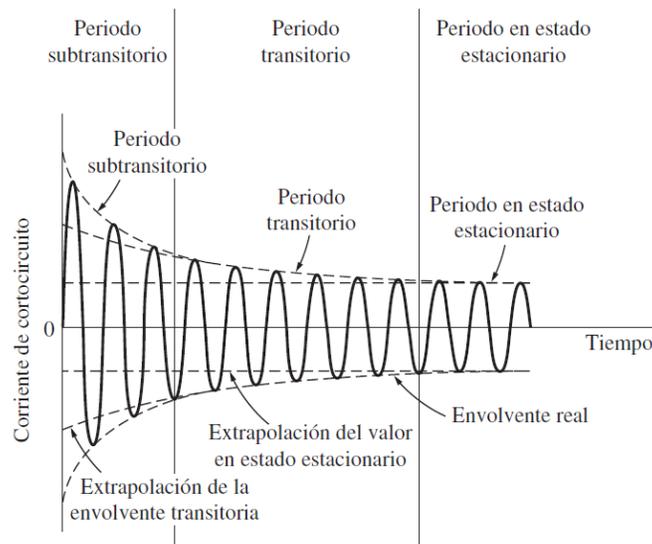
De esta forma podemos obtener el valor de cada corriente de secuencia sumando el juego de ecuaciones y operando adecuadamente.

$$\begin{aligned} I_A + I_B + I_C &= 3 I_{A0} \\ \\ I_A &= I_{A0} + I_{A1} + I_{A2} \\ a I_B &= I_{A0} + a^2 I_{A1} + a I_{A2} \\ a^2 I_C &= I_{A0} + a I_{A1} + a^2 I_{A2} \\ \hline I_A + a I_B + a^2 I_C &= 3 I_{A1} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I_A &= I_{A0} + I_{A1} + I_{A2} \\ a I_B &= I_{A0} + a^2 I_{A1} + a I_{A2} \\ a^2 I_C &= I_{A0} + a I_{A1} + a^2 I_{A2} \\ \hline I_A + a^2 I_B + a I_C &= 3 I_{A2} \end{aligned}$$

En cada uno de los casos anteriores se obtuvieron las corrientes de secuencia positiva, negativa y homopolar.

Figura 59. Componente simétrico de ca de la corriente de falla



Aplicando para un generador trifásico conectado en Y se impulsa a velocidad de régimen y con una excitación suficiente para desarrollar su tensión nominal a circuito abierto, un cortocircuito repentino en dos cualesquiera de sus bornes o entre línea y neutro, la obligará a funcionar como una máquina monofásica.

Produce una fmm que alterna a frecuencia normal, pero que está fija con respecto al devanado del inducido, puede descomponerse en dos componentes, cada una de las cuales tendrá la mitad de la amplitud de la primitiva fmm alterna, una de ellas girando a velocidad de sincronismo en el mismo sentido que el rotor y la otra a igual velocidad en sentido opuesto. Por tanto, el primer componente, moviéndose con el rotor reaccionará con el arrollamiento de excitación del rotor de la misma forma que en el caso de un circuito trifásico equilibrado, por lo que es de esperar que la forma de onda de la corriente de cortocircuito del inducido tenga como componente una curva del tipo de la [Figura 59](#).

La fmm del inducido que gira en sentido inverso, produce un flujo que varía desde un valor máximo cuando está alineada con los polos, hasta un mínimo cuando se encuentra en una posición intermedia entre los polos.

Por tanto, inducirá en el arrollamiento de excitación del rotor una fem y una corriente de doble frecuencia, pero con amplitudes que decrecen exponencialmente hasta las magnitudes características de las condiciones de régimen permanente en el generador monofásico. La componente de doble frecuencia de la corriente resultante de excitación producirá un armónico de triple frecuencia en la onda de tensión del inducido.

La solución más efectiva resolviendo la corriente desequilibrada por el método de

componentes simétricas en una serie de corrientes de secuencia positiva, negativa y cero.

Las componentes de secuencia positiva constituyen un conjunto equilibrado de corrientes trifásicas que produce una fmm que se mueve con el campo del rotor.

Las componentes de secuencia negativa producirán una fmm del inducido que gira a velocidad de sincronismo en sentido opuesto al del rotor, por lo que establecerá fems y corrientes de doble frecuencia en el arrollamiento de excitación, en el devanado amortiguador y en los caminos de las corrientes parásitas.

Pero las impedancias que corresponden a las corrientes de secuencia negativa no son iguales que las correspondientes a las corrientes de secuencia positiva, por lo menos cuando se trata de máquinas de polos salientes, en las máquinas de rotor cilíndrico no existe gran diferencia.

Las componentes de secuencia cero de la corriente del inducido, tendrán todas ellas la misma fase, con resultado de que las fmms debidas a estas corrientes de fase de secuencia cero están separadas mutuamente 120° en fase espacial, por lo que se anulan. Las impedancias correspondientes a estas corrientes de secuencia cero son diferentes de las que corresponden a cualquiera de las otras series.

2.7 Modelado del generador sincrónico.

En la actualidad el generador interviene en muchos tipos de estudio de la ingeniería eléctrica y dependiendo de la aplicación es el modelo que se usa. La IEEE considera que las principales áreas de aplicación de modelos de máquinas síncronas para estudios del sistema de potencia son:

- Estudios de corto circuito, fallas y aplicación de relevadores
- Estudios de estabilidad (grandes disturbios, modelado no lineal)
- Estudios de estabilidad (pequeños disturbios, modelado lineal)
- Estudios de resonancia subsíncrona (SSR)

Además, existen algunas otras áreas relacionadas con los sistemas de potencia que también utilizan modelos de máquinas síncrona para sus estudios como:

- Diseño de máquinas
- Transitorios electromagnéticos
- Pruebas, evaluación y sintonización del sistema de excitación

- Capacitación en la operación tanto del sistema eléctrico de potencia como de la central de generación

Los modelos con mayor grado de detalle son los sofisticados modelos tridimensionales y bidimensionales de elemento finito usados para diseño. Otro modelo detallado es propuesto por Slemon en el cual cada parámetro está directamente relacionado a una forma geométrica particular o propiedad de material. El número de parámetros está típicamente en el intervalo de 30 a 100 en contraste con sólo 13 a 19 en modelos lineales convencionales o con 2000 a 10000 para análisis de elemento finito.

Los modelos en coordenadas de fase son modelos de parámetros concentrados, pero representando los devanados reales de la máquina. En el pasado no fueron muy atractivos debido al esfuerzo de cómputo requerido para su solución, ya que las ecuaciones diferenciales tienen coeficientes variantes en el tiempo. En la actualidad, con mayores recursos de cómputo, esta tendencia de modelado deja de lado las ventajas y desventajas de la teoría de Park y aprovecha sus propias ventajas para aplicaciones tales como fallas internas en los devanados.

Otra tendencia interesante ha sido la aplicación de redes neuronales artificiales en el modelado de la máquina. En uno de los trabajos publicados se utilizan para modelar la parte de comportamientos transitorios.

Sin embargo, la tendencia más importante de desarrollo de modelos de máquina síncrona se ha dado en los modelos transformados a los ejes d , q y 0 (ejes directo, cuadratura y cero), basados en la teoría de Park. Esta teoría llamada de las dos reacciones lleva bajo ciertas suposiciones las cantidades de los devanados reales de las fases en el estator a cantidades en devanados ficticios que giran a la velocidad síncrona de la máquina. Estos devanados ficticios se disponen por conveniencia sobre dos ejes ortogonales, los cuales coinciden con el eje polar del campo (eje d) y con eje interpolar del mismo (eje q). Con este artificio matemático, llamado transformación de Park, se logra tener ecuaciones diferenciales con coeficientes constantes, las cuales requieren menos poder de cálculo para su solución que aquellas para un modelo en coordenadas de fase. Los modelos transformados se convirtieron en la única forma de modelar la máquina síncrona en forma práctica. Sin embargo, el uso de este tipo de modelos se extiende hasta hoy ya que se ha desarrollado mucho alrededor de ellos y las ventajas antes necesarias todavía son atractivas para muchas aplicaciones.

Aun dentro de esta tendencia de modelado también existen diferentes grados de detalle. Es posible que el modelo publicado más detallado sea el modelo de Jackson-Winchester el cual incluye los efectos de las más importantes trayectorias de corriente en un rotor

cilíndrico en cuñas, dientes de ranura, etc. Pero por su complejidad no es precisamente el más adecuado para cualquier aplicación, es posible que para muy pocas. De hecho, a pesar de que actualmente se dispone de herramientas de cómputo y solución muy poderosas se siguen utilizando los modelos más simples que sólo cumplen con los requerimientos demandados, esto debido a que las aplicaciones son cada día más complejas.

Las ecuaciones del modelo del generador tienen como parámetros las inductancias y las resistencias de los circuitos de estator y el rotor. Estos se refieren como parámetros fundamentales o básicos y se identifican por los elementos de los circuitos equivalentes de los ejes d y q. Mientras que los parámetros fundamentales especifican completamente las características eléctricas de la máquina, no pueden determinarse directamente a partir de mediciones de la máquina. Por lo tanto, la forma tradicional para asignar parámetros a los modelos de máquinas ha sido expresarlos en términos de parámetros derivados o estándar que se obtienen de mediciones realizadas bajo adecuadas condiciones de prueba.

Los parámetros estándar son:

Para el eje directo: reactancia síncrona X_d , reactancia transitoria X'_d , reactancia subtransitoria X''_d , constante de tiempo transitoria a circuito abierto T'_{d0} y constante de tiempo subtransitoria a circuito abierto T''_{d0} .

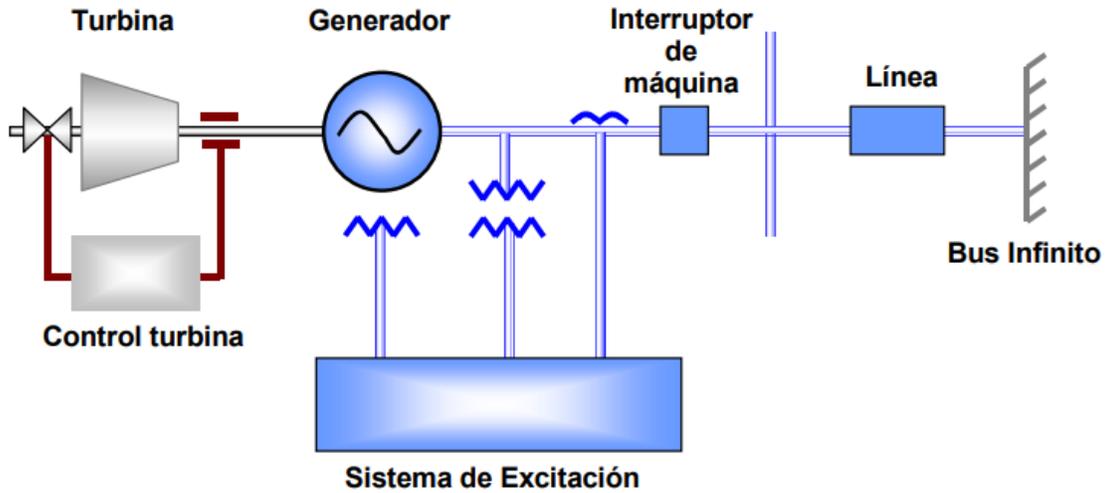
Para el eje cuadratura: reactancia síncrona X_q , reactancia transitoria X'_q , reactancia subtransitoria X''_q , constante de tiempo transitoria a circuito abierto T'_{q0} y constante de tiempo subtransitoria a circuito abierto T''_{q0} .

Las reactancias normalmente son dadas en valores por unidad con valores base de estator iguales a los correspondientes valores nominales del generador. En por unidad, las reactancias síncronas, transitorias y subtransitorias son iguales a sus correspondientes inductancias.

Se utilizan intervalos de tiempo donde ocurren los comportamientos transitorios de interés para diferentes tipos de estudios en los sistemas eléctricos de potencia, las constantes de tiempo normalmente están en segundos.

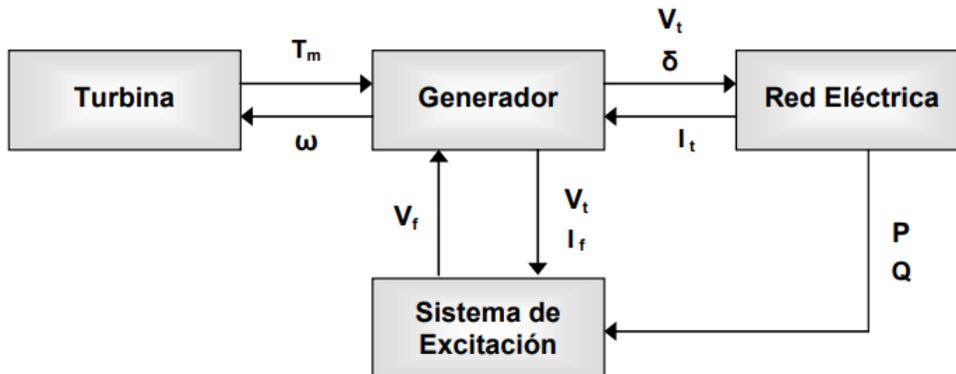
Los comportamientos transitorios propios de la máquina se observan principalmente en el intervalo de las centésimas de segundo hasta unos pocos segundos (como en estabilidad transitoria). Pero la continua interacción con equipos de dinámica más lenta como calderas y reactores nucleares y, las acciones de operación de la central y de los centros de despacho de generación involucran al generador en respuestas transitorias más lentas, que en ocasiones se les considera como estados estacionarios o cuasiestacionarios. *Figura 60*

Figura 60. Modelo de un generador síncrono en un sistema de generación de energía eléctrica



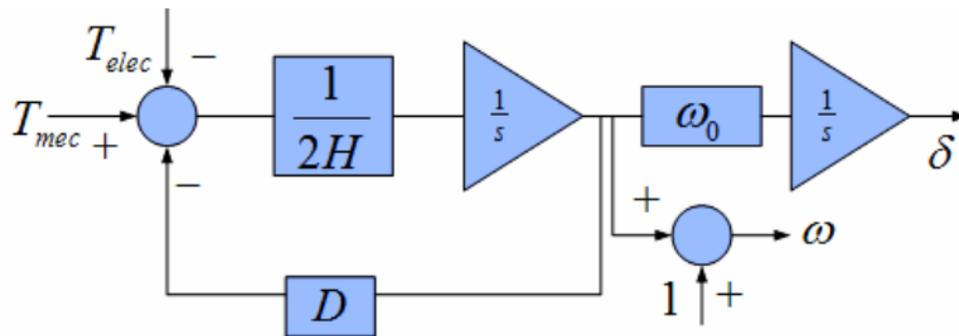
La *Figura 61* muestra las principales variables de interacción del generador con los equipos y sistemas con los que interactúa. V_t es el voltaje en terminales, I_t es la corriente de campo, T_m es el par mecánico, ω es la velocidad mecánica, δ es el ángulo de carga, P es la potencia activa y Q es la potencia reactiva.

Figura 61. Diagrama de las variables de interacción en un sistema de generación de energía eléctrica



Considerando el modelo básico del generador síncrono consiste dos partes fundamentales: las ecuaciones de aceleración del rotor del conjunto turbina-generador y la dinámica del flujo eléctrico del generador.

Figura 62. Modelo mecánico del rotor



Fuente: Grigsby, L.L. *The electric power engineering handbook*. E.E.U.U.: CRC Press & IEEE Press.

pp. 11.7-3.

Las ecuaciones de aceleración son la segunda ley de Newton de movimiento aplicada a la masa rotativa del rotor del conjunto turbina-generator y se siguen estas observaciones:

La constante de inercia (H) representa la energía almacenada en el rotor en MW-seg, normalizada con respecto a la potencia nominal del generador.

Algunas veces la potencia mecánica y la potencia eléctrica se utilizan en el modelo en lugar de los torques correspondientes.

La mayoría de los modelos incluyen el factor de amortiguamiento (D), este se utiliza para modelar efectos de amortiguamiento de oscilaciones que no están explícitamente representados en ninguna otra parte del modelo. En la práctica se evita utilizar este parámetro incluyendo las fuentes de amortiguación en los modelos, por ejemplo, los devanados de amortiguación, corrientes de Eddy, sensibilidad de la frecuencia, etc.

2.8 Selección y aplicación de generadores sincrónicos.

La selección de los generadores síncronos es según la aplicación que tengan, principalmente operan en los diferentes sistemas de generación de energía (centrales eléctricas, plantas de cogeneración y generación de energía eólica en combinación con turbinas, etc).

Considerando las principales áreas de aplicación de modelos de máquinas síncronas para estudios de los sistemas de potencia son:

- Estudios de corto circuito, fallas y aplicación de relevadores

- Estudios de estabilidad (grandes disturbios, modelado no lineal)
- Estudios de estabilidad (pequeños disturbios, modelado lineal)
- Estudios de resonancia subsíncrona (SSR)

Además, existen algunas otras áreas relacionadas con los sistemas de potencia que también utilizan modelos de máquinas síncrona para sus estudios como:

- Diseño de máquinas
- Transitorios electromagnéticos
- Pruebas, evaluación y sintonización del sistema de excitación
- Capacitación en la operación tanto del sistema eléctrico de potencia como de la central de generación

Las grandes cantidades de energía generadas por las compañías eléctricas han tomado con la debida seriedad la eficiencia de sus generadores, debido a que entre mayor sea la eficiencia del generador mayores ingresos obtendrán. Por lo que el tamaño del generador es de gran importancia para las compañías suministradoras de energía eléctrica esto es porque entre mayor capacidad tenga el generador, mayor será la eficiencia, así como los ingresos obtenidos.

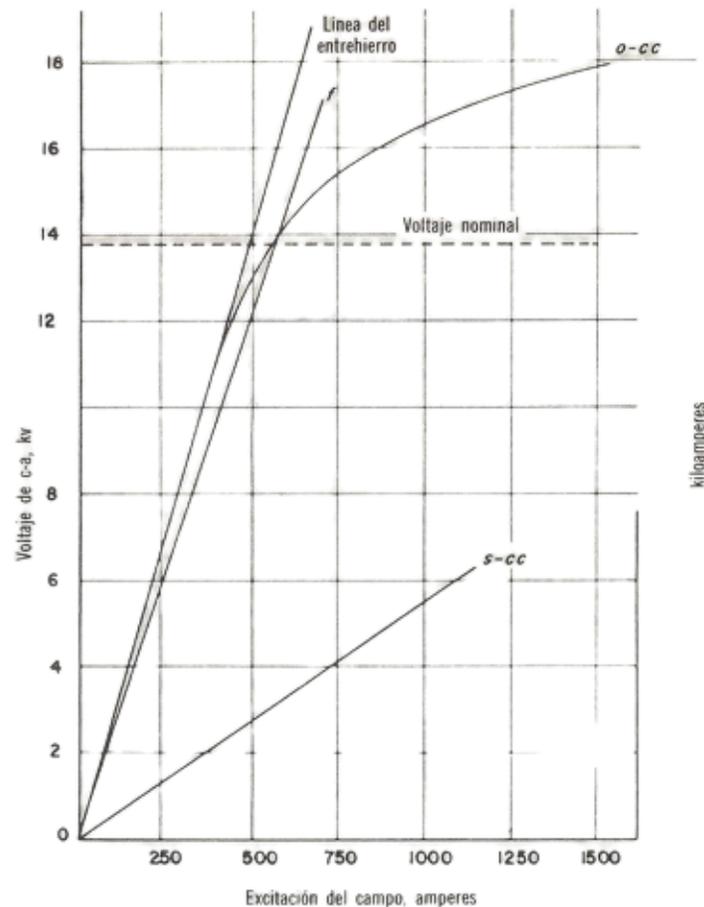
Por ejemplo, si un generador síncrono de 1 kW tiene una eficiencia de 50%, uno de capacidad mayor, pero modelo similar teniendo una capacidad de 10 MW inevitablemente tendrá una capacidad cercana a 90%.

Si consideramos que entre mayor sea la capacidad de la máquina mayor será la eficiencia de esta al igual que la magnitud de las pérdidas en forma de calentamiento, teniendo que considerar el enfriamiento de los devanados. Entre mayor sea la capacidad del generador, el sistema de enfriamiento será más sofisticado y a su vez de un costo mayor, por lo que esta es la limitante principal del tamaño del generador.

Ejercicios del Tema 2

Ejercicio 1

Las características de circuito abierto y corto circuito para un generador de ca 60 Hz, 133,689 kVA, 3 fases, 13.8 kV se muestran en la siguiente figura. Encuentre a) la reactancia sincrónica no saturada, b) la reactancia sincrónica saturada aproximada, c) la corriente de campo estimada para voltaje nominal, corriente nominal a un factor de potencia de 0.80 atrasado y d) la regulación de voltaje.



Ejercicio 2.1 Características de circuito abierto y cortocircuito de un generador de turbina y enfriamiento de hidrógeno de 133,689 kVA, tres fases, 13.8 kV, 60 Hz.

Solución

- a) La corriente de campo de aproximadamente 485 amp requerida para un voltaje nominal de 13.8 kV línea a línea en la línea del entrehierro produce una corriente de corto circuito de 3,400 amperes por fase, por lo tanto

$$X_{su} = \frac{13800}{\sqrt{3} \times 3400} = 2.34 \text{ ohms por fase}$$

- b) Una corriente de campo de aproximadamente 550 amp produce un voltaje nominal en la característica de circuito abierto y una corriente de corto circuito de 3900 amp, de donde la reactancia sincrónica aproximada se encuentra ser

$$X_s = \frac{13800}{\sqrt{3} \times 3900} = 2.04 \text{ ohms por fase}$$

- c) En la figura, la fem inducida (línea a línea) en la Of da aproximadamente el valor de la corriente de campo. La fem inducida por fase en esa base es

$$E_a = V_a + jX_s I_a$$

La corriente nominal es

$$I = \frac{133689}{\sqrt{3} \times 13.8} = 5594$$

y

$$\begin{aligned} E_a &= \frac{13800}{\sqrt{3}} + j 2.04 \times 5594 (0.80 - j0.60) \\ &= 7.970 + 6.840 + j9.120 = 17.350 \angle 31.7^\circ \end{aligned}$$

y la magnitud de línea a línea de la fem inducida es

$$\sqrt{3} E_a = \sqrt{3} \times 17.350 = 30100 \text{ volts}$$

la corriente de campo requerida para producir este voltaje en la línea Of en la figura es de 1200 amp

- d) Una corriente de campo de 1200 amp produce un voltaje de no carga de línea a línea de 17300 volts ($\sqrt{3} E_{oc}$) en la característica de circuito abierto y la regulación es

$$R_{eg} = \frac{17300 - 13800}{13800} = 0.254$$

Ejercicio 2

Un generador síncrono, trifásico de 9 kVA, 208 V, 1200 rpm, 60 Hz y conectado en Y tiene una resistencia en el devanado del campo de 4.5Ω . La impedancia del devanado de la armadura es de $0.3 + j5\Omega$ /fase. Cuando el generador opera a plena carga con un factor de potencia de 0.8 en atraso, la corriente en el devanado del campo es de 5 A. La pérdida por rotación es de 500W. Determine:

- la regulación del voltaje,
- la eficiencia del generador
- el par aplicado por el impulsor primario.

Solución

El voltaje por fase en las terminales es:

$$V_a = \frac{208}{\sqrt{3}} = 120 \text{ V}$$

La potencia aparente por fase del generador es $9/3 = 3$ kVA. Por tanto, la corriente especificada por fase es de $3000/120 = 25$ A. Para un factor de potencia de 0.8 en atraso,

$$I_a = 25 \angle -36.87^\circ \text{ A}$$

Luego, el voltaje por fase generado es

$$E_a = 120 + (0.3 + j5) \times 25 \angle -36.87^\circ = 222.534 \angle 25.414^\circ \text{ V}$$

- la regulación del voltaje

$$RV\% = \frac{222.534 \times 120}{120} \times 100 = 85.45 \%$$

- la eficiencia del generador, es necesario sacar la potencia y pérdidas:

La potencia de salida es:

$$P_o = 3 \times 120 \times 25 \times 0.8 = 7200 \text{ W}$$

La pérdida en el cobre es:

$$P_{co} = 3 \times 25^2 \times 0.3 = 562.5 \text{ W}$$

La potencia desarrollada es:

$$P_d = 7200 + 562.5 = 7762.5 \text{ W}$$

La potencia desarrollada también puede calcularse como sigue:

$$P_d = 3 \times \operatorname{Re} [222.534 \angle 25.414^\circ \times 25 \angle 36.87^\circ] = 7762.4 \text{ W}$$

La pérdida constante es:

$$P_c = 500 + 5^2 \times 4.5 = 612.5 \text{ W}$$

La potencia total de entrada es:

$$P_{in} = 7762.5 + 612.5 = 8375 \text{ W}$$

La eficiencia del generador es:

$$\eta = \frac{7200}{8375} \approx 0.86 \text{ u } 86 \%$$

- c) para el par aplicado por el impulsor primario, se obtiene primero la velocidad angular:

$$\omega_s = \frac{2\pi \times 1200}{60} = 40\pi \text{ rad/s}$$

La potencia mecánica en términos de la potencia eléctrica de

$$P_{inm} = P_d + P_r = 7762.5 + 500 = 8262.5 \text{ W}$$

El par que aplica el impulsor primario es

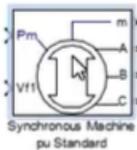
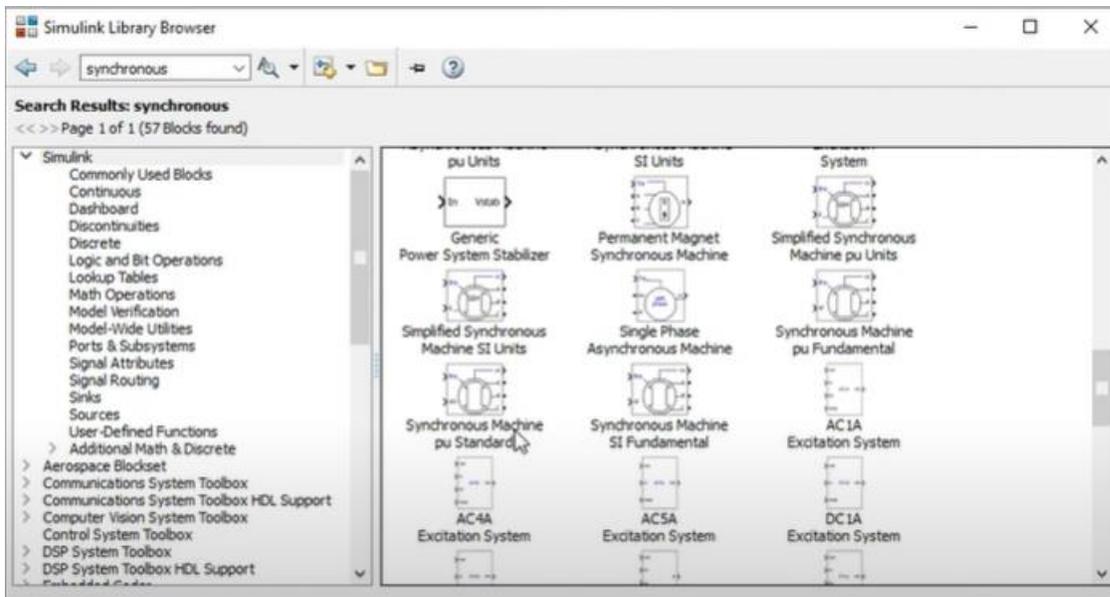
$$T_s = \frac{8262.5}{40\pi} = 65.75 \text{ Nm}$$

Ejercicio 3 (simulación MatLab)

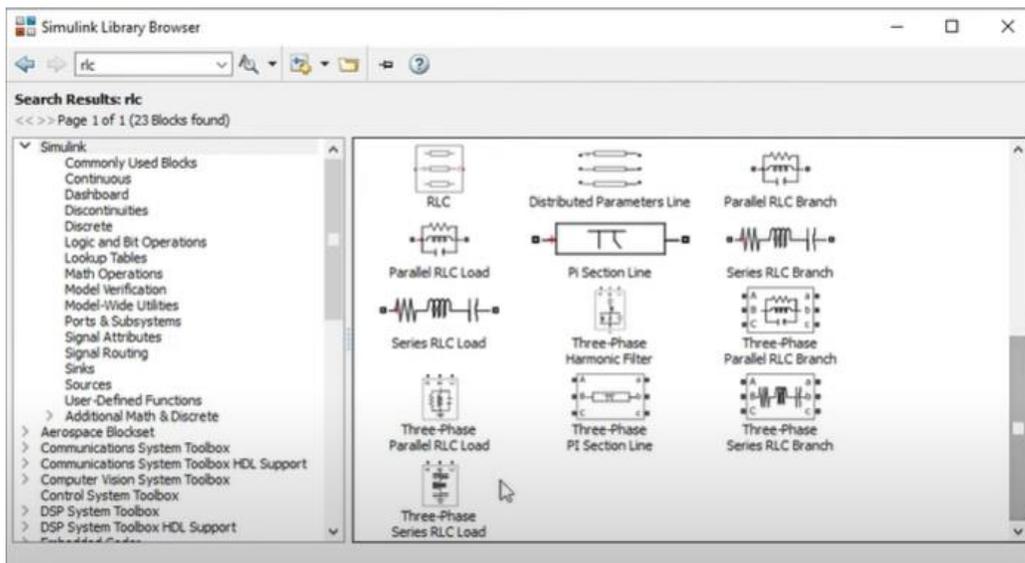
Operando una máquina sincrónica en Simulink en MatLab.

Esta es una descripción genérica, ya que las imágenes no se pueden visualizar de manera nítida en el presente escrito, se describirá en clase directamente en el simulador.

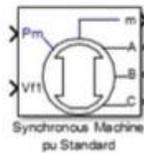
Se selecciona la máquina síncrona pu estándar en la librería:



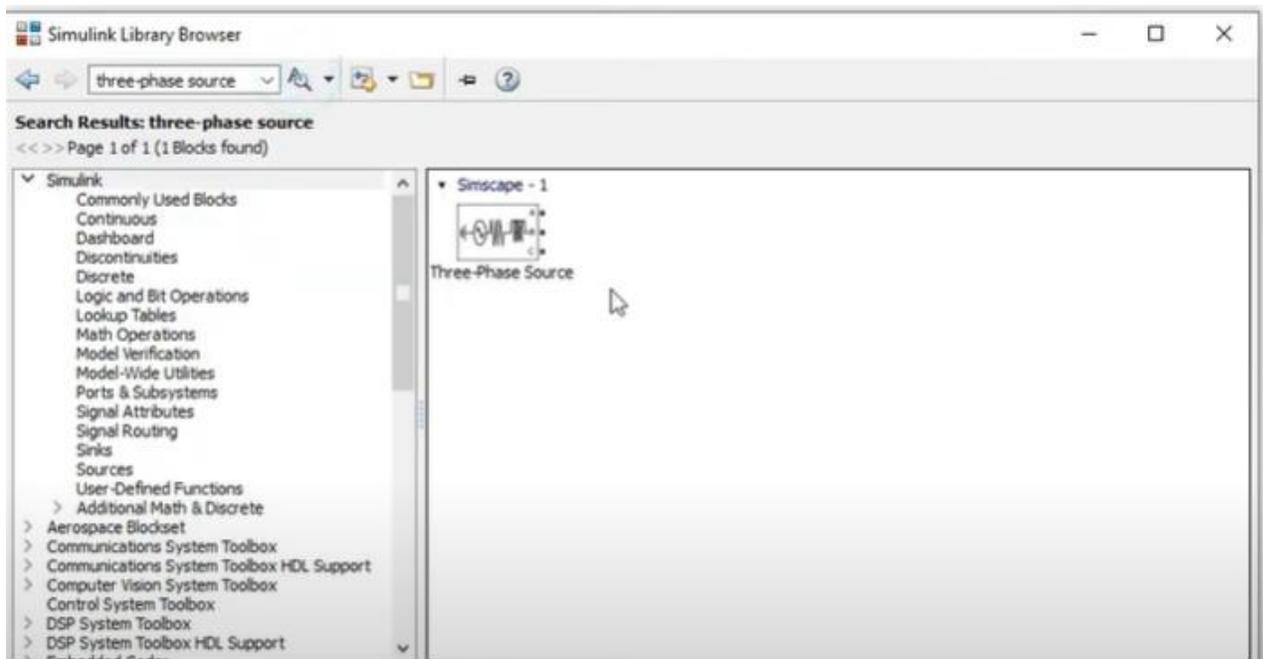
Se selecciona la carga, en este caso será un circuito trifásico RLC en paralelo:



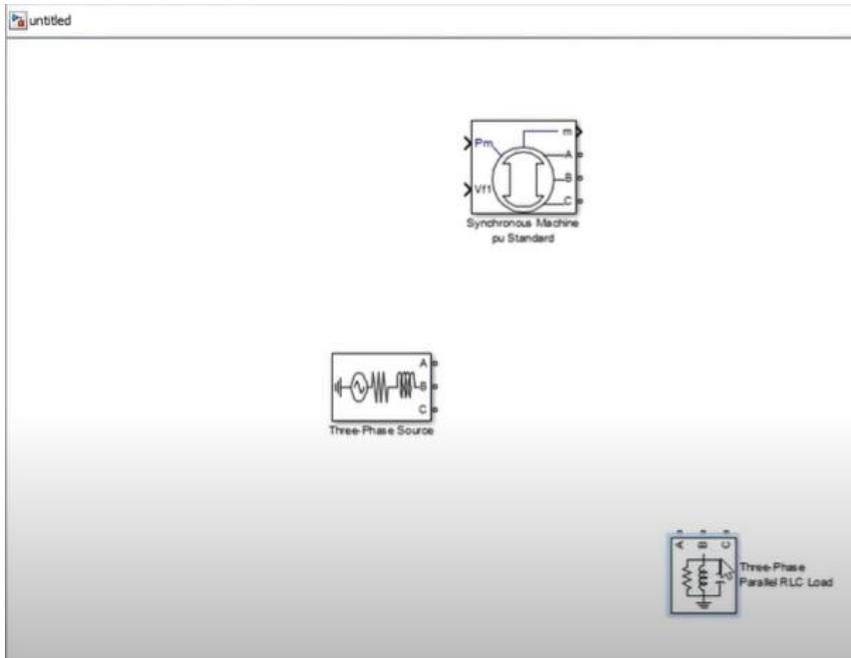
Se colocan ambos elementos para implementar el circuito:



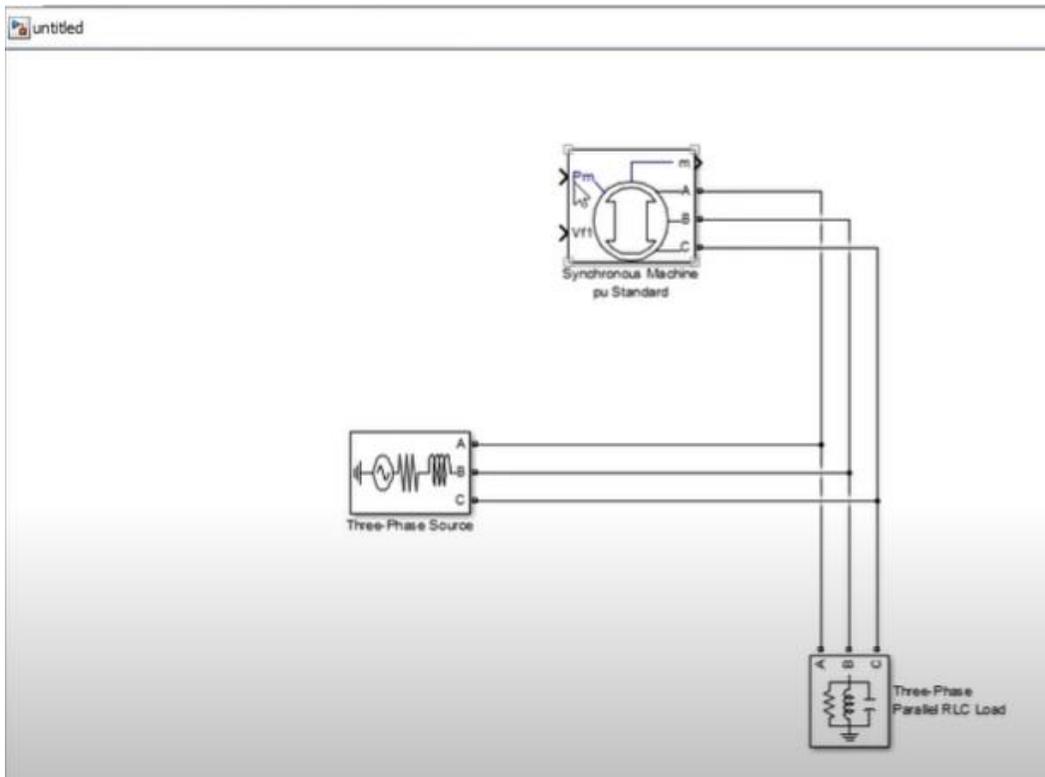
Se selecciona la fuente de alimentación trifásica:



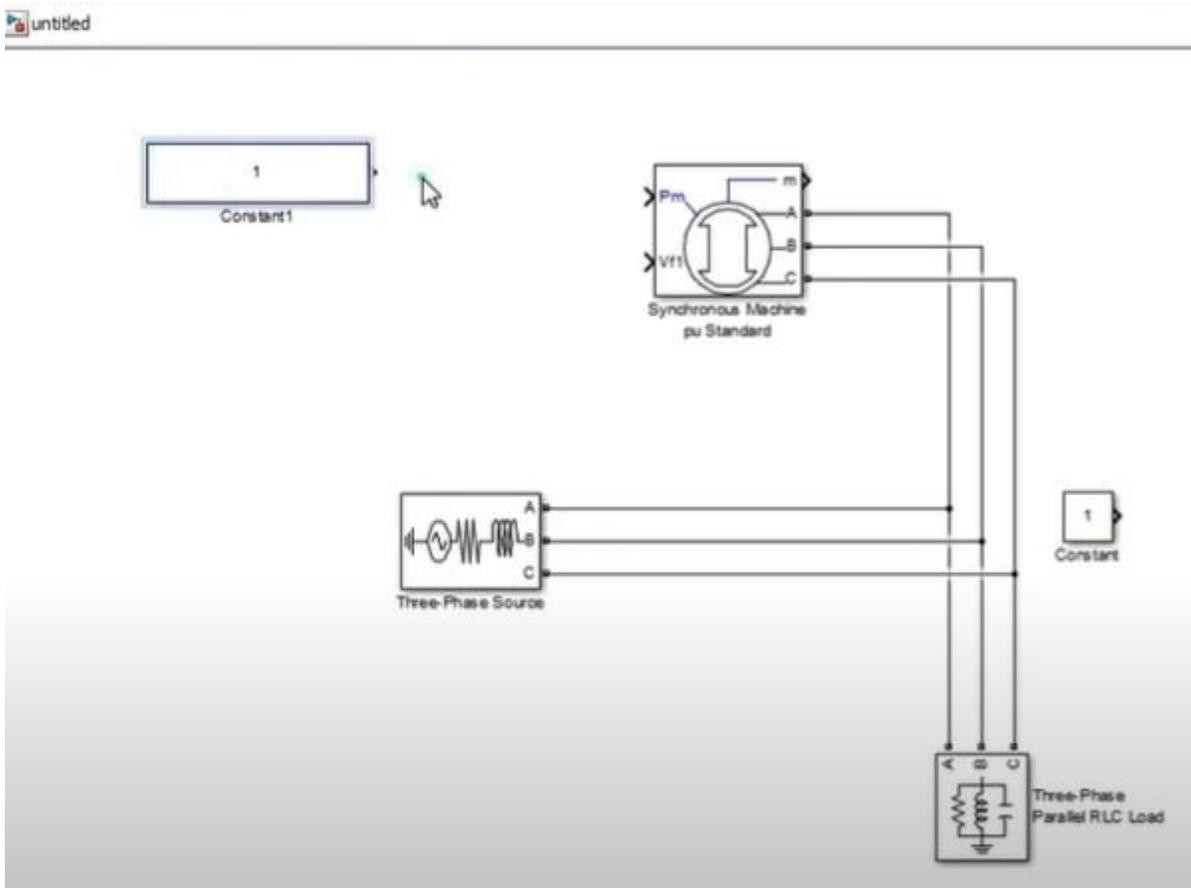
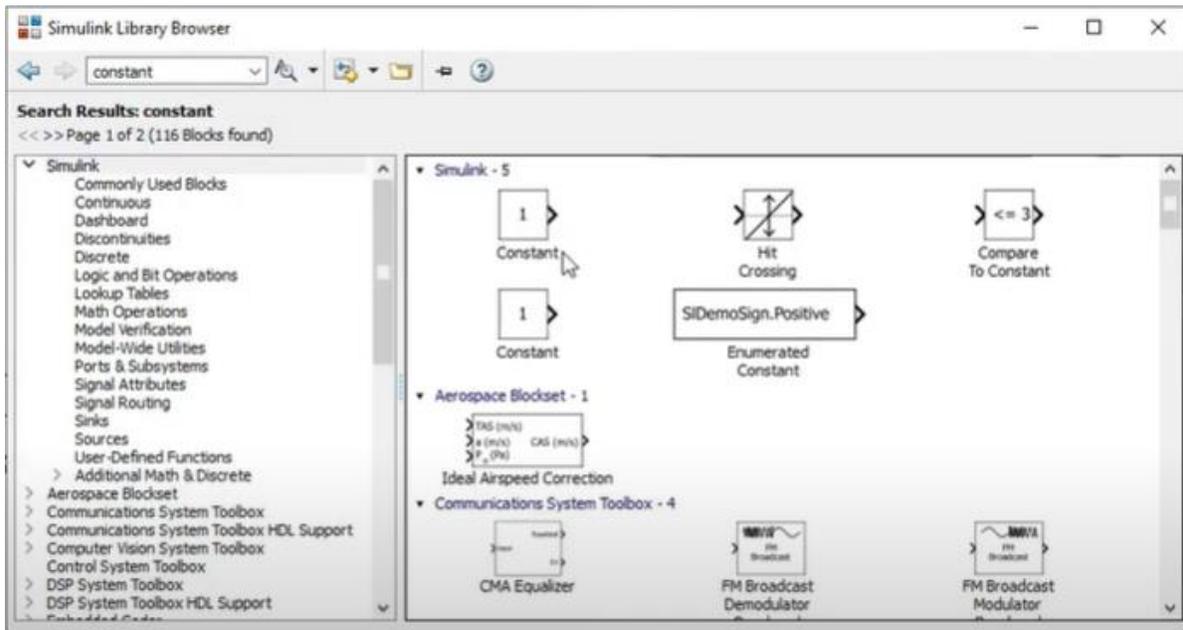
Se acomodan los elementos para la conexión:

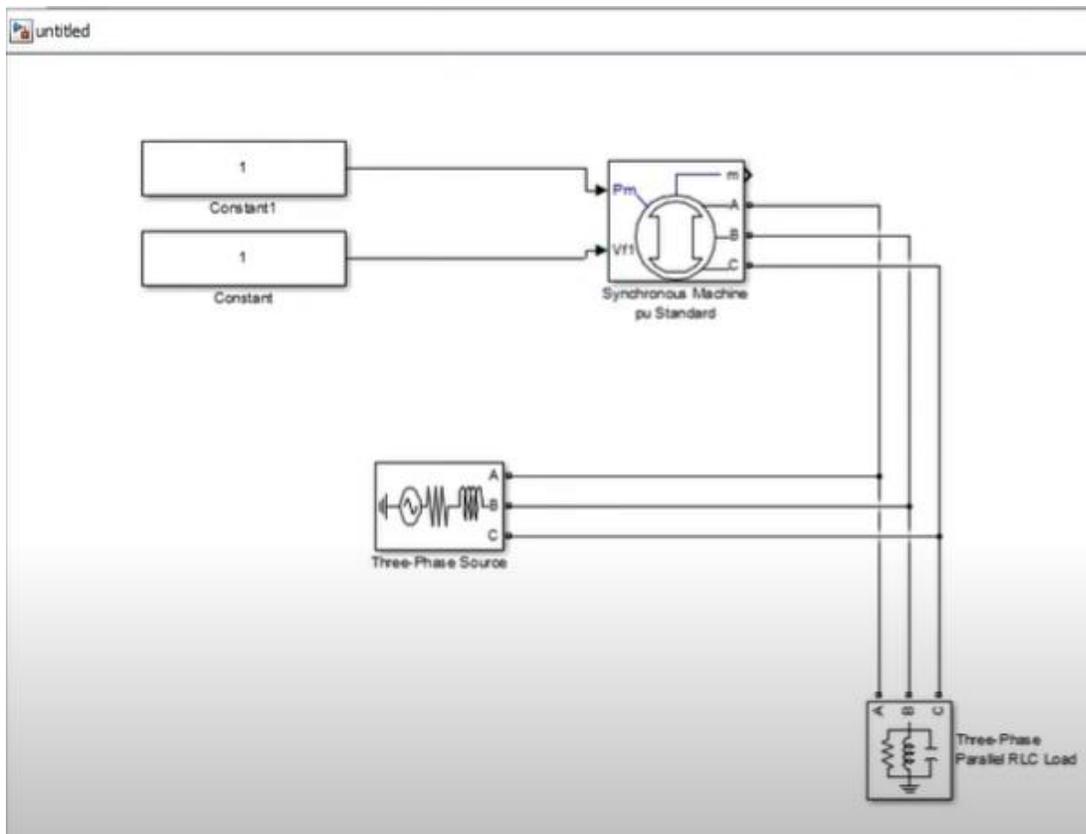


Se realizan las conexiones respetando las fases correspondientes:

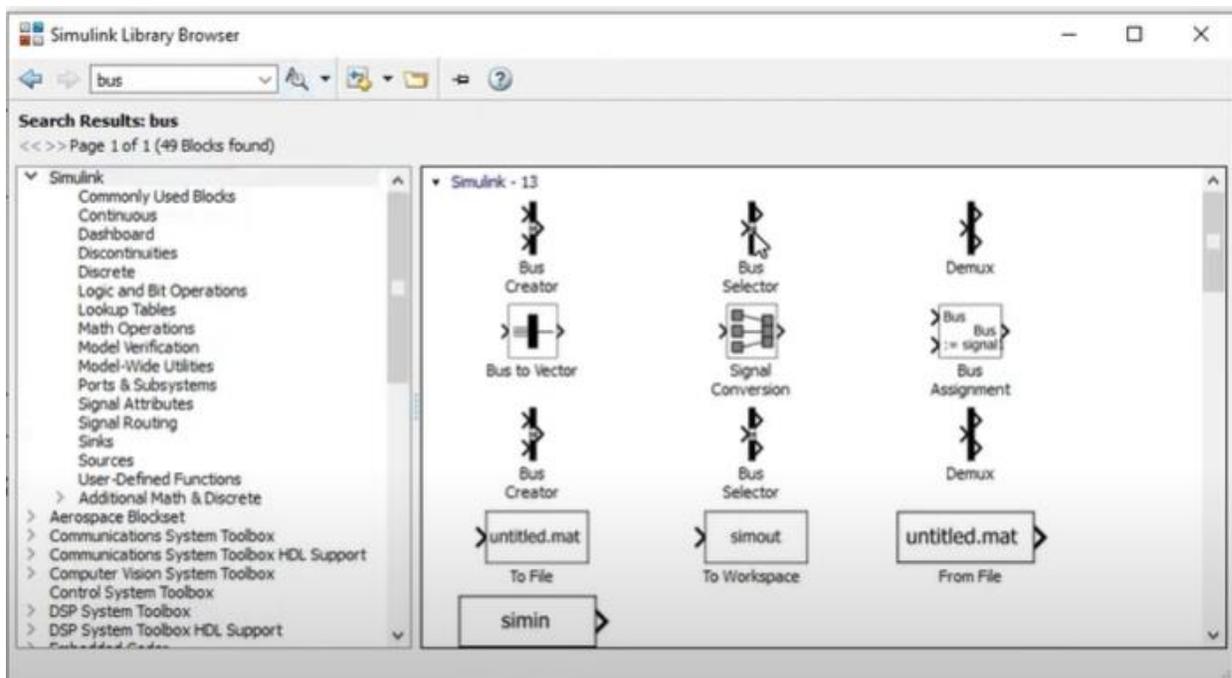


Se selecciona los parámetros de entrada a la máquina que serán la potencia mecánica y la fuerza de campo por unas constantes en la librería del simulador:

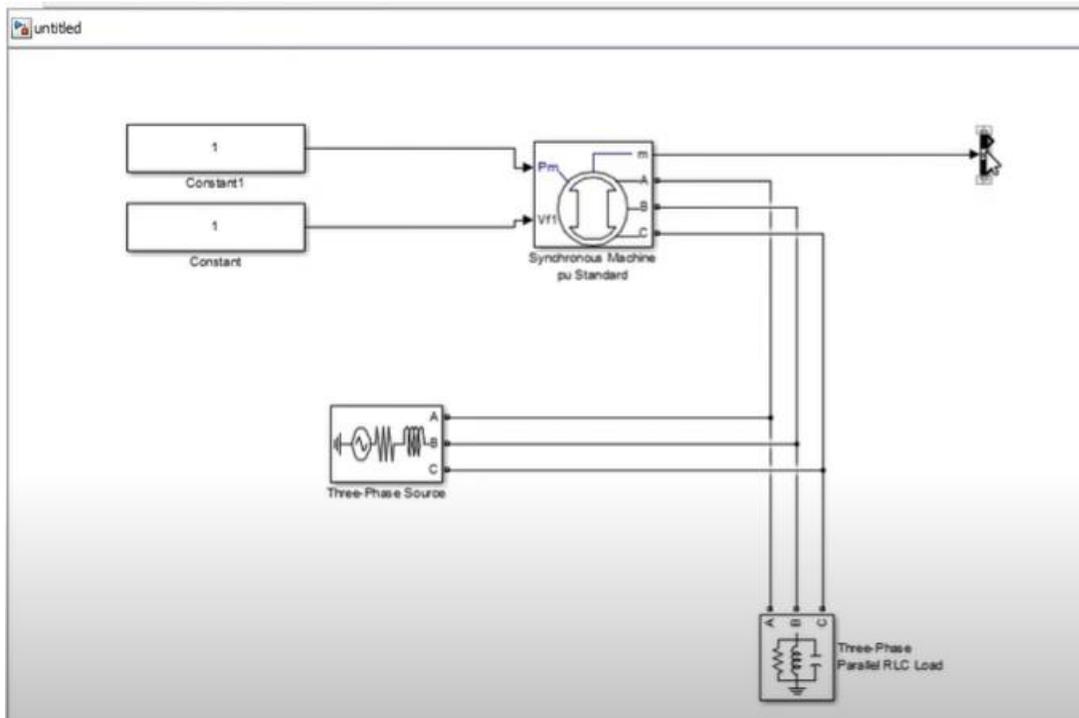




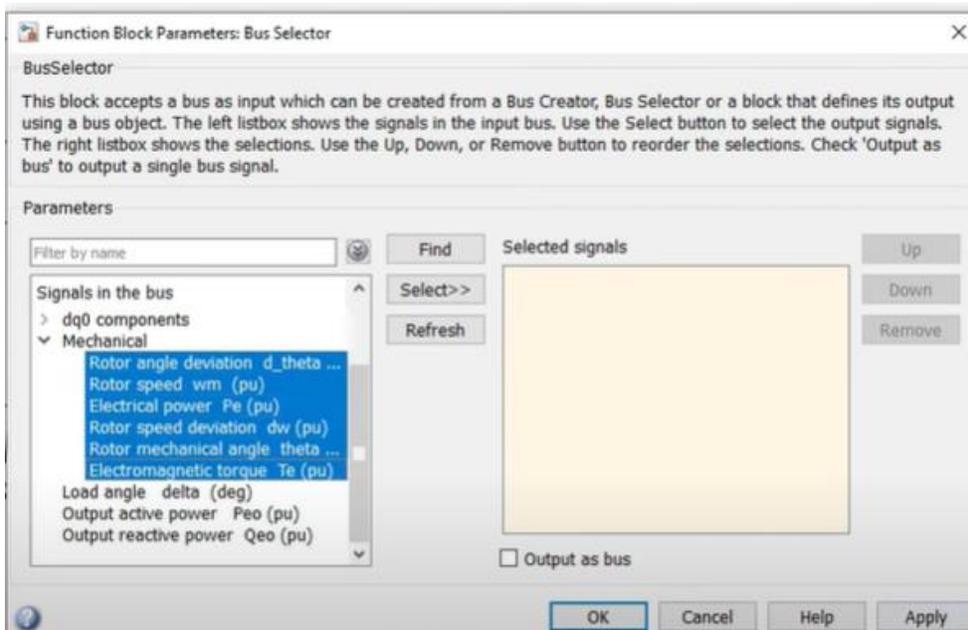
Se escoge el bus selector que se coloca en la salida de la máquina sincrónica:

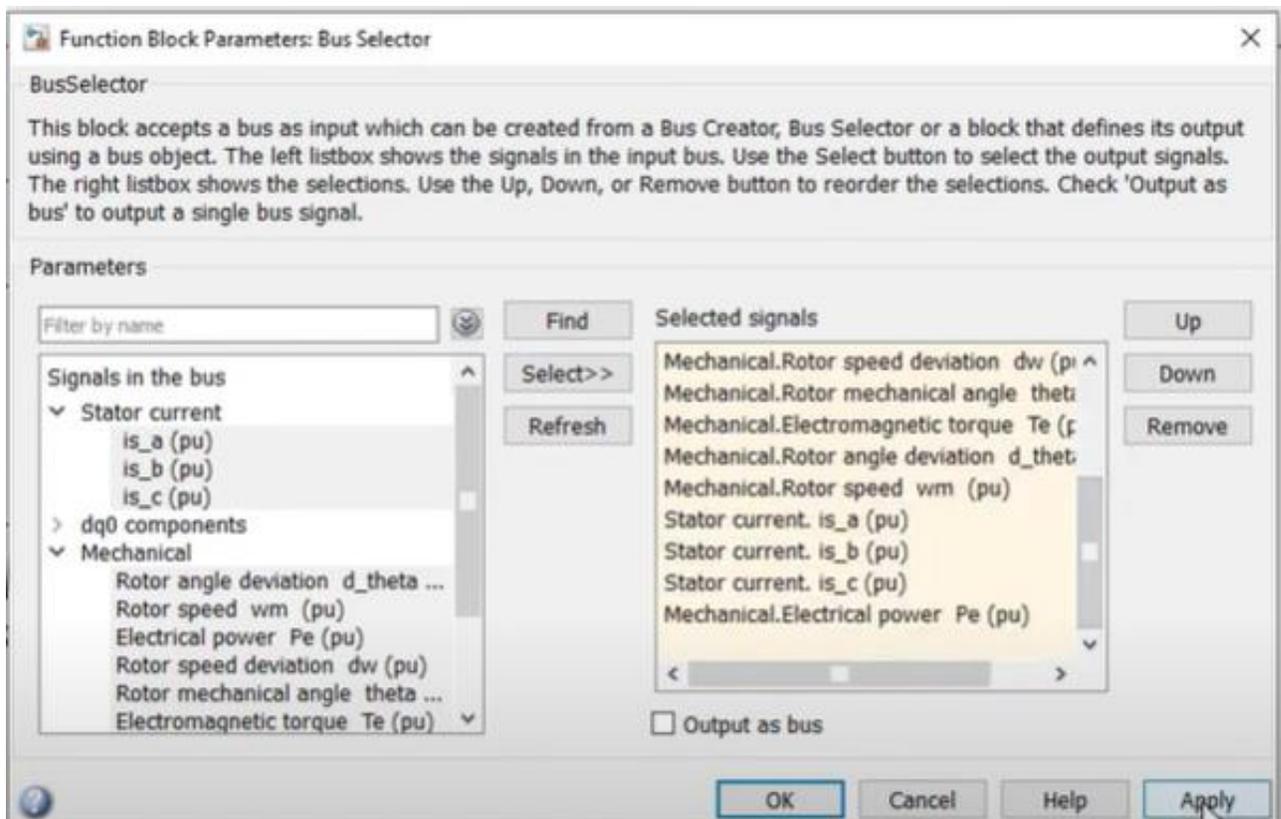
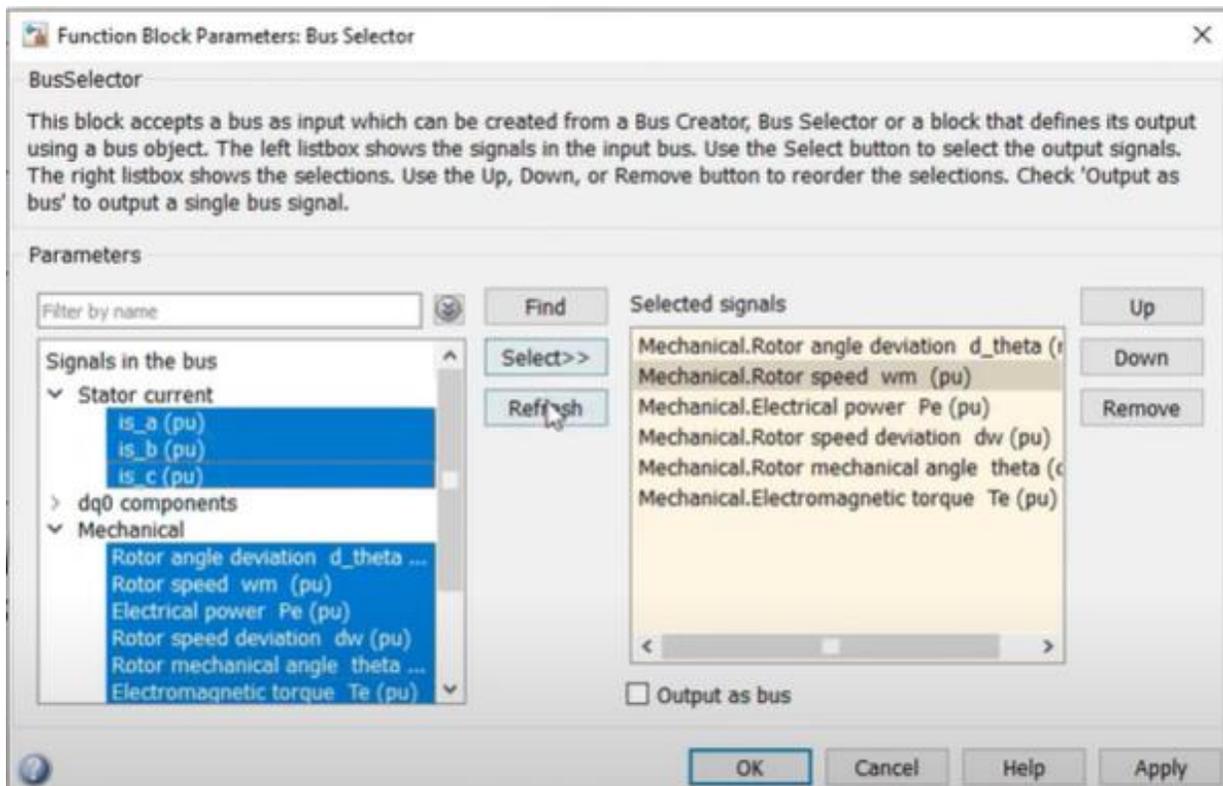


Se acomoda en el circuito eléctrico y se ajusta

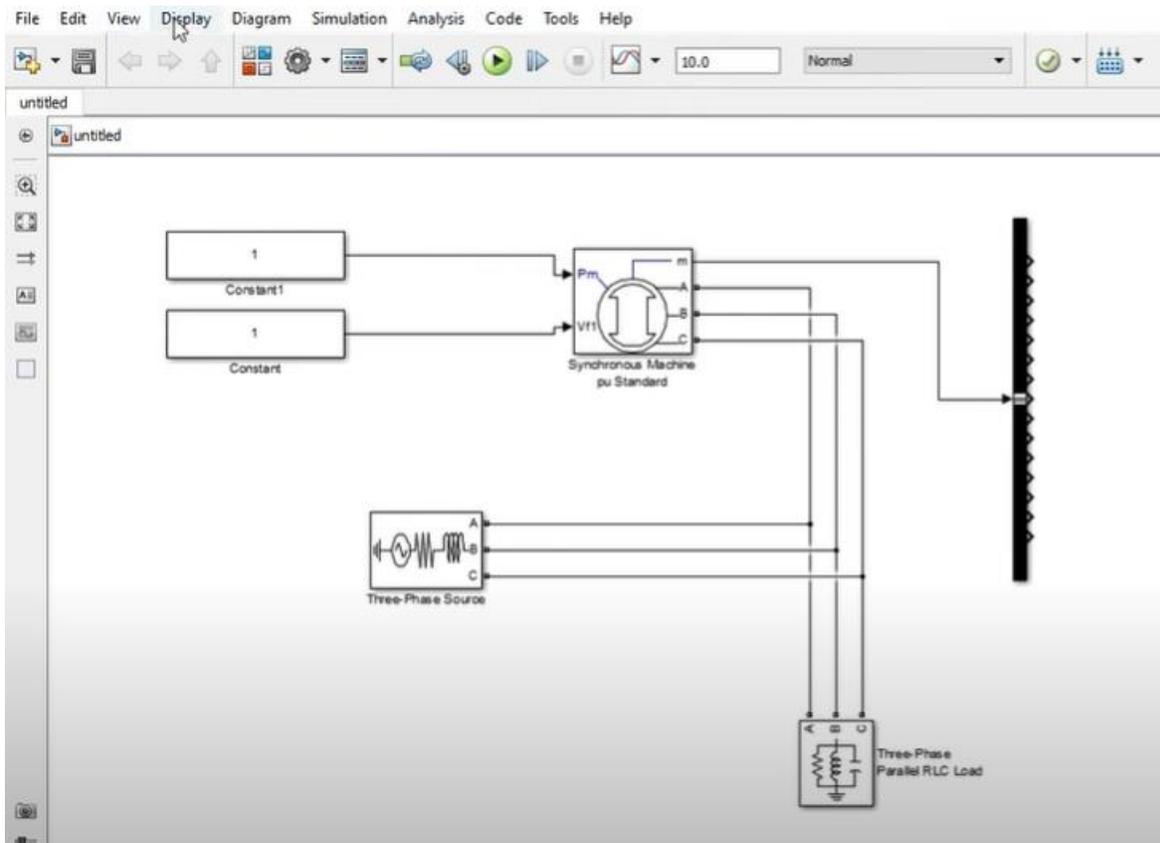


Se seleccionan los parámetros a medir del rotor y se agregan las corrientes en el estator para medir:

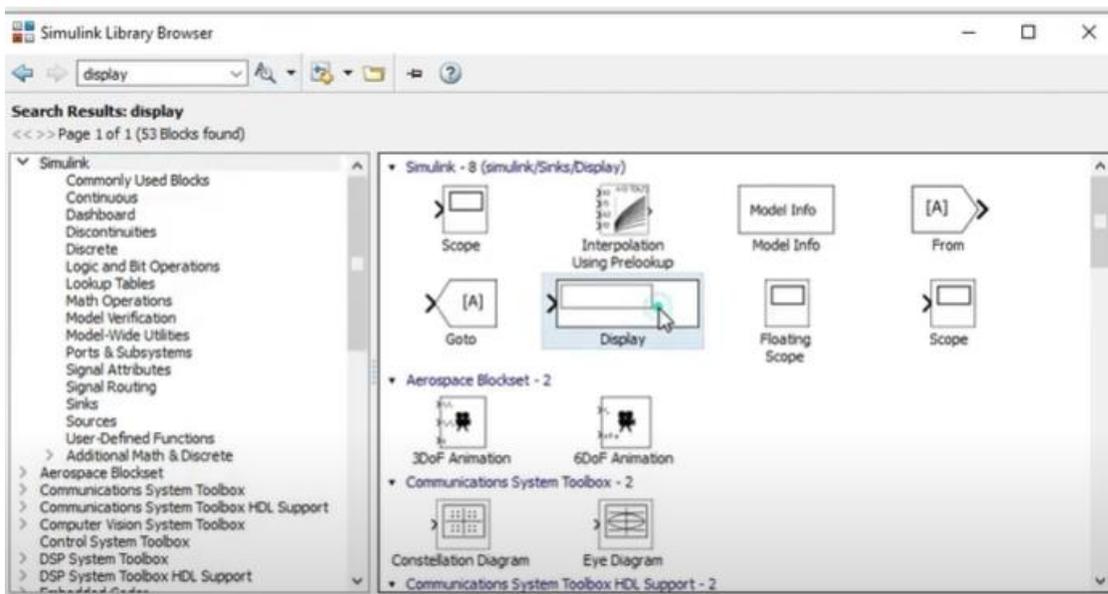


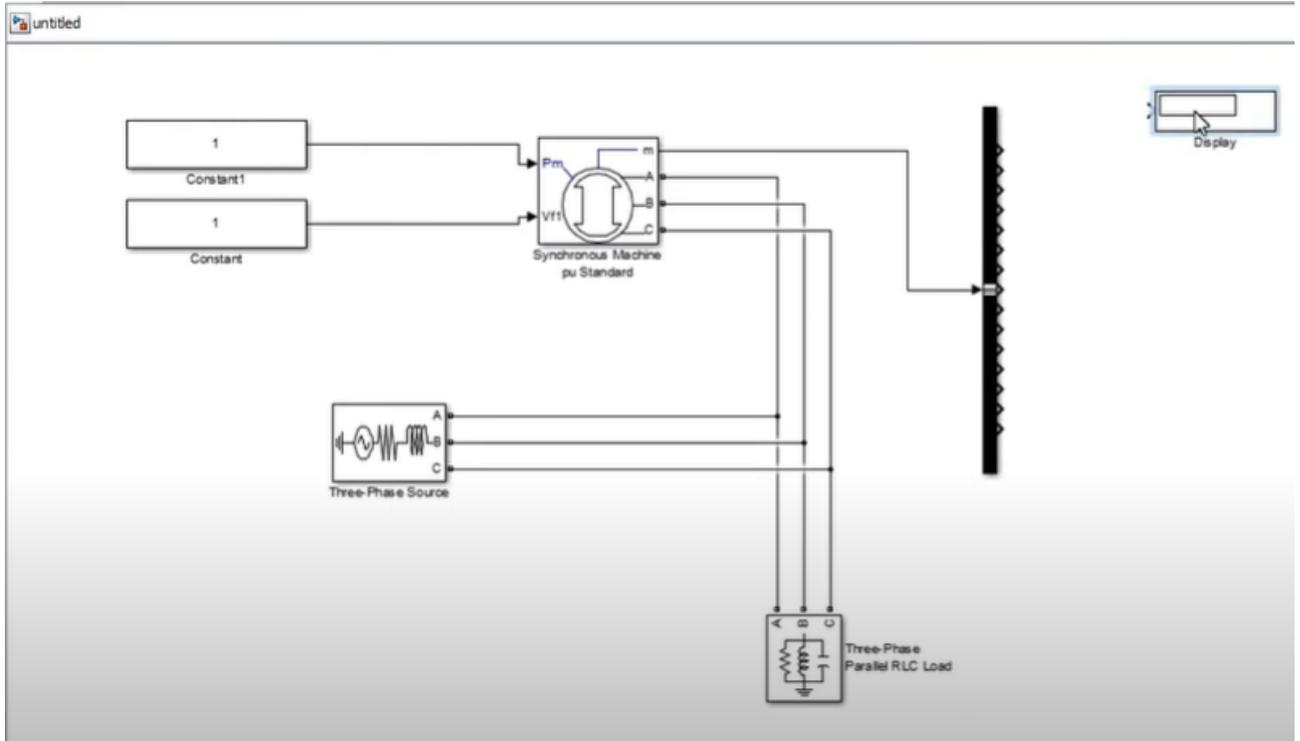


Se agranda el bus para ver las lecturas de los parámetros en los displays

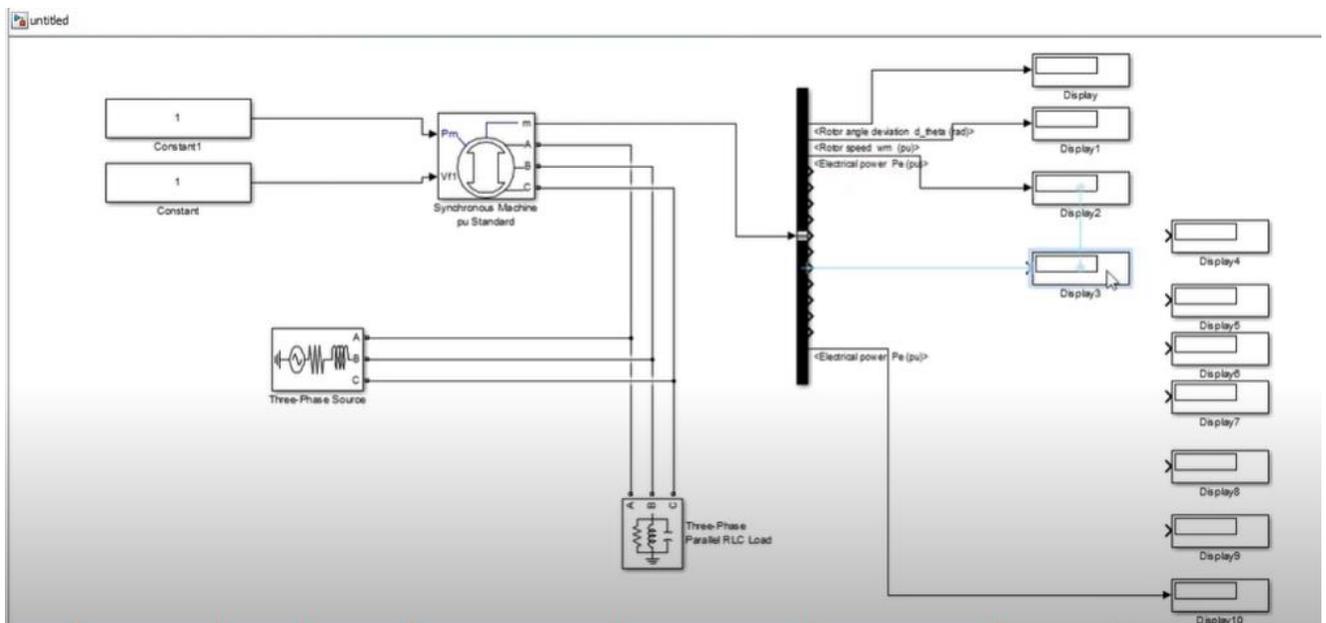


Se selecciona el tipo de display, se colocan en la platilla:

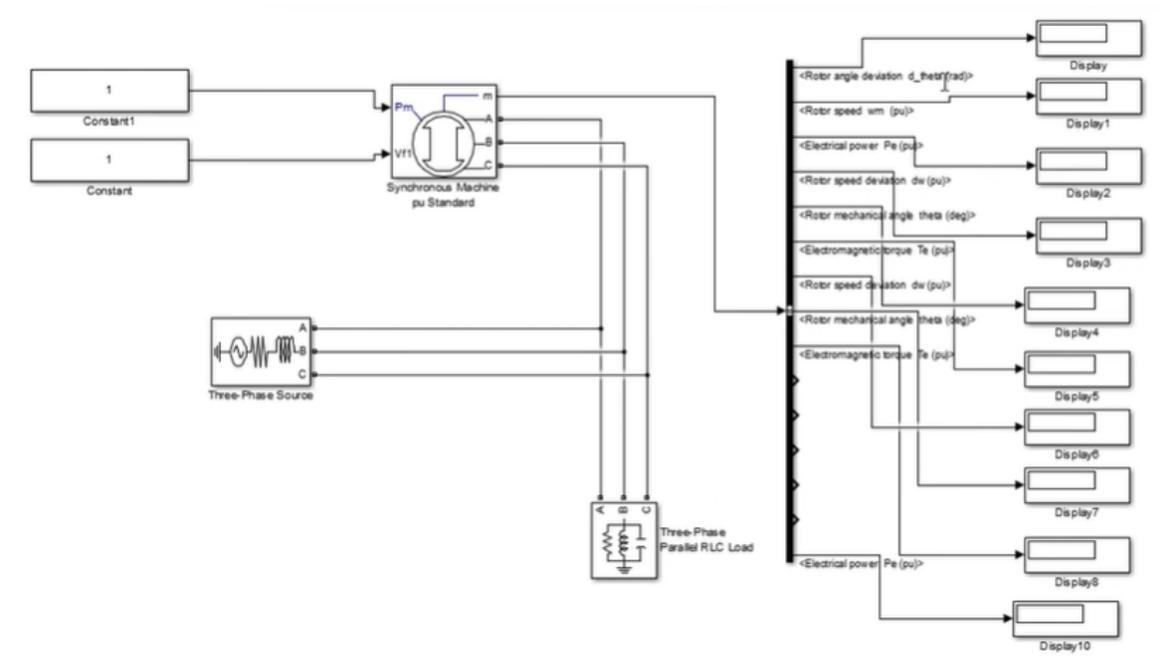




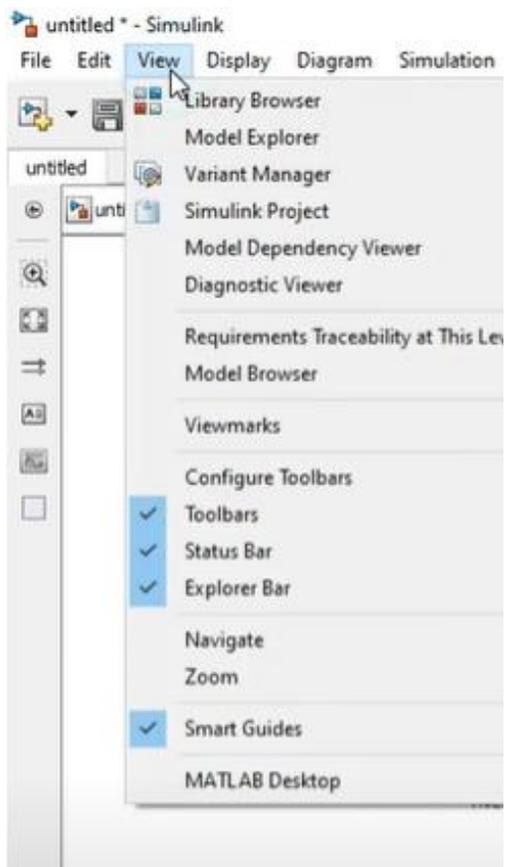
Se hacen las conexiones al bus:

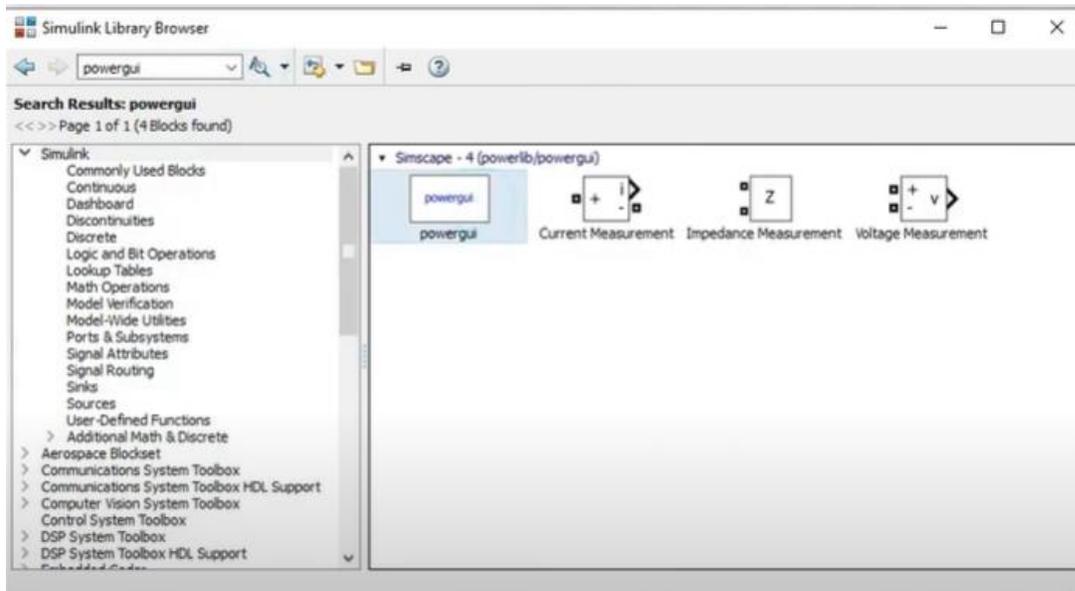


Que dando así:

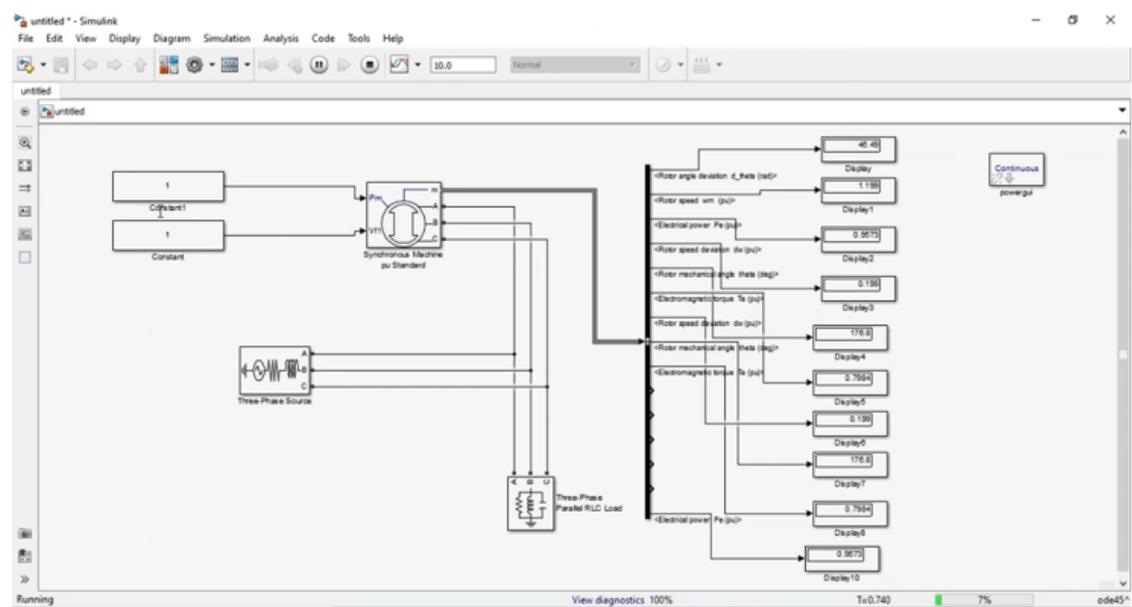
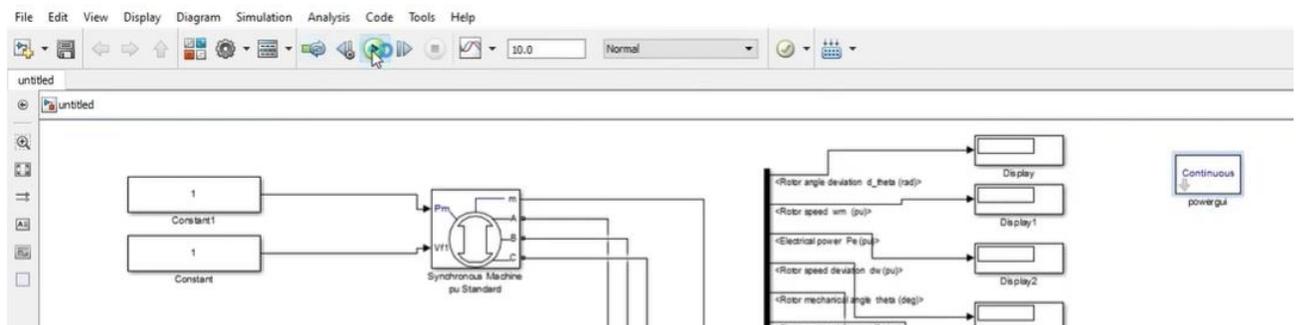


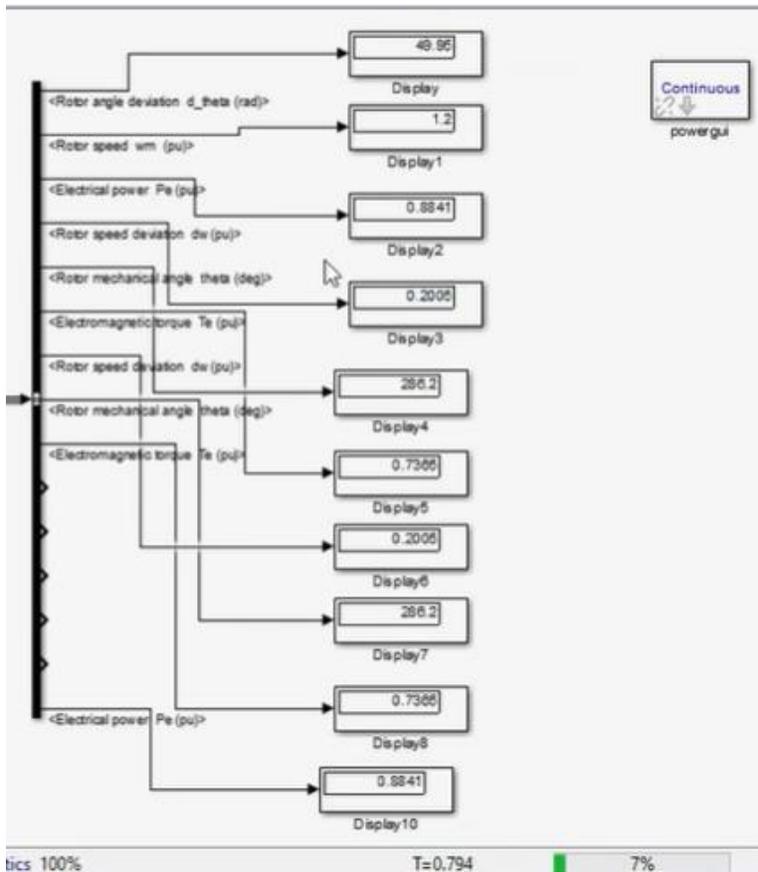
Se selecciona para poder ver los parámetros en los display, en Library Browser:





Y se corre el simulador:





Ejercicio 4

Un generador síncrono de 75MVA, 13.8 kV, trifásico con una reactancia síncrona de $X_S = 1.35$ por unidad y una reactancia síncrona no saturada de $X_{S,u} = 1.56$ por unidad, se conecta a un sistema externo con reactancia equivalente a $X_{EQ} = 0.23$ por unidad y un voltaje $V_{EQ} = 1.0$ por unidad, ambos sobre la base del generador. Esta máquina alcanza su voltaje de circuito abierto nominal a una corriente de campo de 297 amperes.

- Determine la potencia máxima P_{max} (en MW y por unidad) que puede abastecer a un sistema externo si el voltaje interno del generador se mantiene igual a 1.0 por unidad.
- Grafique con un simulador el voltaje terminal del generador, mientras que la salida de éste varía de cero a P_{max} bajo las condiciones del inciso a)
- Asumiendo que el generador se equipa con un regulador de voltaje automático que controla la corriente de campo con el fin de mantener constante el voltaje terminal. Si el generador se carga su valor nominal, calcule el ángulo de potencia correspondiente, el voltaje terminal por unidad y la corriente de campo. Grafique E_{af} por unidad como una función de la potencia por unidad.

Solución

- a) La fórmula de la característica de la potencia, aunque es un generador trifásico, no se requiere un factor de 3 debido a que se realizan los cálculos en el sistema por unidad, la máquina opera con un voltaje terminal aproximado a su valor nominal, P_{max} se debe expresar en términos de la reactancia síncrona saturada.

$$P = \frac{E_{af} V_{EQ}}{X_S + X_{EQ}}$$

$$P = \frac{1}{1.35 + 0.23} = 0.633 \text{ por unidad} = 47.5 \text{ MW}$$

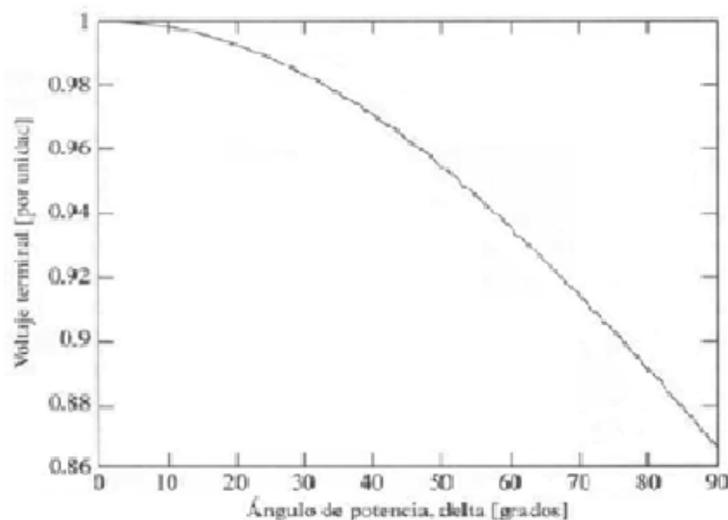
- b) La corriente terminal del generador se obtiene por

$$\tilde{I}_a = \frac{\hat{E}_{af} - \hat{V}_{EQ}}{j(X_S + X_{EQ})} = \frac{E_{af} e^{j\delta} - V_{EQ}}{j(X_S + X_{EQ})} = \frac{e^{j\delta} - 1.0}{j1.58}$$

El voltaje terminal del generador se obtiene por

$$\hat{V}_a = \hat{V}_{EQ} + j X_{EQ} I_a = 1.0 + \frac{0.23}{1.58} (e^{j\delta} - 1.0)$$

Al graficar en el simulador se observa en la figura [Ejercicio 2.4.1](#), el voltaje terminal varía de 1.0 a $\delta = 0^\circ$ hasta 0.87 a $\delta = 90^\circ$.



Ejercicio 2.4.1 Gráfica del simulador del voltaje terminal frente al ángulo de potencia δ para el inciso b)

- c) Con el voltaje terminal manteniendo constante a $V_a = 1.0$ por unidad, la potencia puede expresarse:

$$P = \frac{V_a V_{EQ}}{X_{EQ}} \sin \delta_t = \frac{1}{0.23} \sin \delta_t = 4.35 \sin \delta_t$$

Donde δ_t representa el ángulo del voltaje terminal con respecto a \hat{V}_{EQ} .

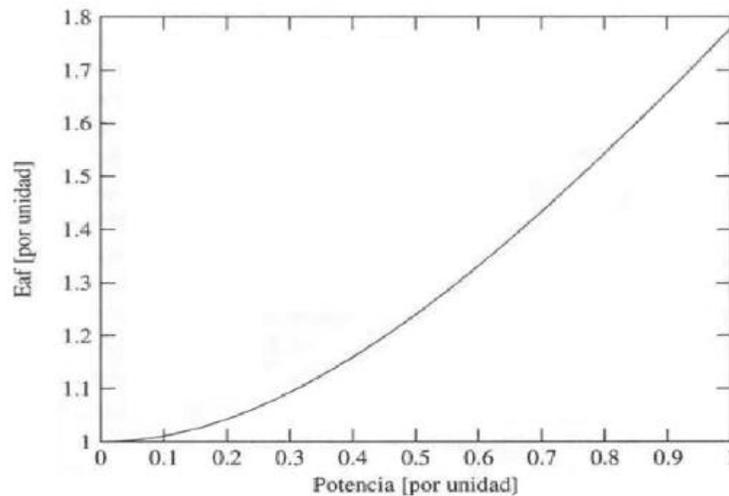
Para $P = 1.0$ por unidad, $\delta_t = 13.3^\circ$ y por lo tanto \hat{I} es igual a:

$$\tilde{I}_a = \frac{V_a e^{j\delta_t} - V_{EQ}}{j X_{EQ}} = 1.007 e^{j6.65^\circ}$$

$$\hat{E}_{af} = \hat{V}_{EQ} + j(X_{EQ} + X_S)\hat{I}_a = 1.78 e^{j6.65^\circ}$$

O $E_{af} = 1.78$ por unidad, que corresponde a una corriente de campo de $I_f = 1.78 \times 297 = 529$ amperes. El ángulo de potencia correspondiente es 62.7° .

En la gráfica del simulador se puede apreciar que E_{af} varía de 1.0 a $P = 0$ hasta 1.78 a $P = 1.0$.

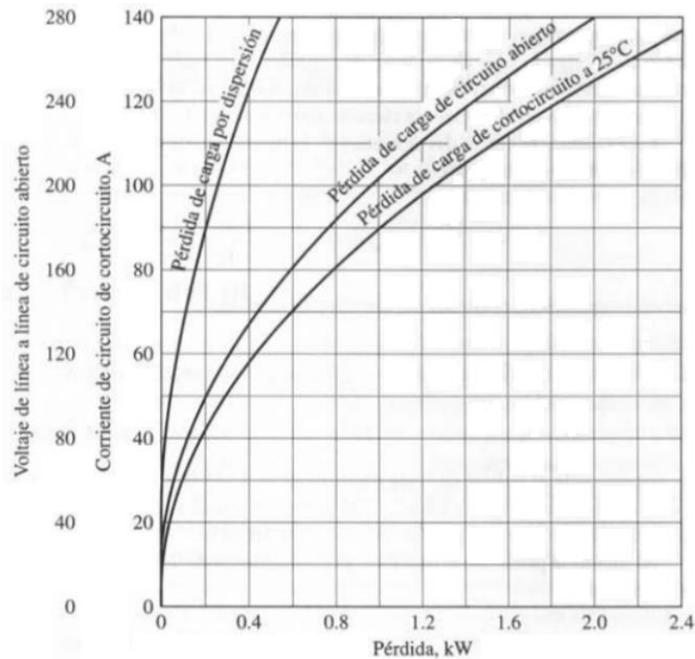


Ejercicio 2.4.2 Gráfica del simulador de E_{af} frente a la potencia para el inciso c)

Ejercicio 5

La siguiente figura muestra las pérdidas de una máquina síncrona trifásica. Calcule la eficiencia cuando funciona como un motor síncrono con un voltaje terminal de 230 V y con una entrada de potencia a su inducido de 45 kVA a un factor de potencia de 0.80 en

atraso. La corriente de excitación que se mide en una prueba de carga bajo estas condiciones es I_f (prueba) = 5.50 A. Suponga que los devanados de campo y de inducido se encuentran a una temperatura de 75°C.



Ejercicio 2.5.1 Pérdidas en una máquina síncrona hexapolar de 220V, de 60 Hz, conectada en Y, de 45 kVA trifásica

Pérdida por fricción o rozamiento = 0.91kW

Resistencia de corriente directa de inducido a 25°C = 0.0335 Ω por fase

Resistencia del devanado de campo a 25°C = 29.8 Ω

Solución

La corriente de inducido es

$$I_a = \frac{45 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 230} = 113 \text{ A}$$

Las pérdidas I^2R debe calcularse sobre la base de las resistencias de los devanados a 75°C. Al corregir las resistencias de devanado por medio de las ecuaciones, se tiene:

$$\frac{R_T}{R_t} = \frac{234.5+T}{234.5+t} \quad \text{y} \quad R_{a,ef} = \frac{\text{pérdida de carga de corto circuito}}{(\text{cortocircuito corriente de inducido})^2}$$

Resistencia del devanado de campo R_f a $75^\circ\text{C} = 35.5 \Omega$

Resistencia de corriente directa del inducido R_a a $75^\circ\text{C} = 0.0399 \Omega/\text{fase}$

La pérdida de campo I^2R es:

$$I_f^2 R_f = 5.50^2 \times 35.5 = 1.07 \text{ kW}$$

Las pérdidas en el sistema de campo, incluyendo aquellas en cualquier reóstato regulador del campo, no se cargan en contra de la máquina.

Por lo tanto, la pérdida de campo I^2R es:

$$3I_a^2 R_a = 3 \times 113^2 \times 0.0399 = 1.53 \text{ kW}$$

A partir de la gráfica $I_a = 113 \text{ A}$, la pérdida de carga por dispersión = 0.37 kW. Se considera que la pérdida de carga por dispersión forma parte de las pérdidas causadas por la dispersión de flujo del inducido.

Las pérdidas en el núcleo bajo carga son principalmente una función del flujo del núcleo primario en el motor. No se conoce la reactancia de dispersión de la máquina.

Suponiendo que el voltaje del entrehierro es igual al voltaje terminal y determinar las pérdidas en el núcleo bajo carga a partir de la curva de pérdidas en el núcleo de acuerdo con el valor equivalente al voltaje terminal.

El voltaje terminal del motor es 230 V de línea a línea y por lo tanto las pérdidas en el núcleo de circuito abierto son de 1.30 kW.

Para calcular el efecto del descenso de la reactancia de dispersión, se asumirá que dicho valor en el motor es de 0.20 por unidad o

$$X_{al} = 0.2 \left(\frac{220^2}{45 \times 10^3} \right) = 0.215 \Omega$$

El voltaje del entrehierro equivale a

$$V_a - jX_{al}I_a = \frac{230}{\sqrt{3}} - j0.215 \times 141 (0.8 + j0.6)$$

$$= 151 - j 24.2 = 153 e^{-j9.1^\circ} \text{ V, de línea a neutro}$$

Que corresponde al voltaje de línea a neutro de $\sqrt{3} (153) = 265 \text{ V}$

Las pérdidas en el núcleo correspondiente son 1.8 kW, 500W mayor que el valor determinado al emplear el voltaje terminal.

Al incluir la pérdida por fricción y por rozamiento de 0.91 kW, ya se han calculado todos los valores de las pérdidas

$$\text{Total de pérdidas} = 1.07 + 1.53 + 0.37 + 1.80 + 0.91 = 5.68 \text{ kW}$$

La potencia de entrada al motor total es la potencia de entrada al inducido, más la potencia de campo.

$$\text{Potencia de entrada} = 0.8 \times 45 + 1.07 = 37.1 \text{ kW}$$

La potencia de salida es igual a la potencia de entrada menos las pérdidas totales

$$\text{Potencia de salida} = 37.1 - 5.68 = 31.4 \text{ kW}$$

Por lo tanto,

$$\text{Eficiencia} = \frac{\text{Potencia de salida}}{\text{Potencia de entrada}} = 1 - \frac{5.68}{37.1} = 0.846 = 84.6\%$$

Ejercicio 6

Un generador síncrono, trifásico, de 70 MVA, 13.8 kV, 60 Hz, conectado, en Y, de polos salientes tiene $X_d = 1.83 \Omega$ y $X_q = 1.21 \Omega$. Alimenta la carga especificada con un factor de potencia de 0.8 en atraso. La resistencia de la armadura es despreciable. Determine:

- La regulación del voltaje
- La potencia desarrollada por el generador

Solución

Sobre una base por fase, los valores medios cuadráticos (rms) de los voltajes en las terminales y la corriente de la carga son

$$V_a = \frac{13800}{\sqrt{3}} = 7967.43 \text{ V}$$

$$I_a = \frac{70 \times 10^6}{\sqrt{3} \times 13800} = 2928.59 \text{ A}$$

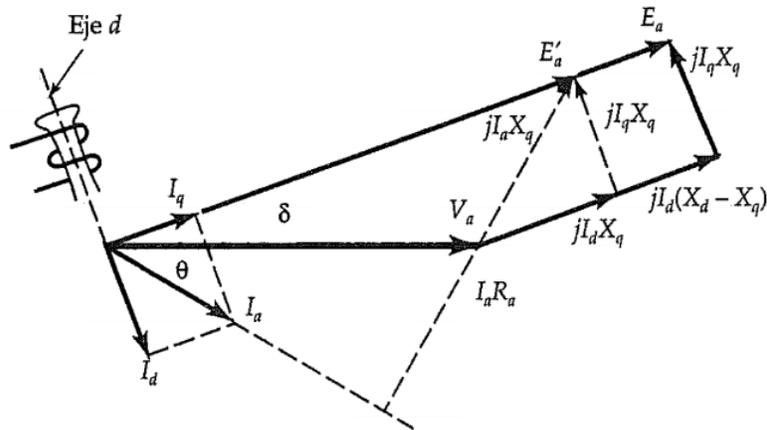
El ángulo del factor de potencia es: $\theta = -\cos^{-1}(0.8) = -36.87^\circ$

Para el ángulo del par δ se obtiene:

$$\tan \delta = \frac{I_a X_q \cos \theta}{V_a + I_a X_q \sin \theta}$$

$$\tan \delta = \frac{2928.59 \times 1.21 \times 0.8}{7967.43 + 2928.59 \times 1.21 \times 0.6} = 0.28$$

$$\delta = \tan^{-1} 0.28 = 15.69^\circ$$



Ejercicio 2.6.1 Diagrama fasorial de un generador síncrono de polos salientes con resistencia despreciable en el devanado de la armadura y factor de potencia en atraso.

Considerando \tilde{V}_a como factor de referencia, se tiene que \tilde{E}_a se adelanta a \tilde{V}_a en 15.69° e \tilde{I}_a se atrasa respecto de \tilde{V}_a en 36.87° . Por tanto,

$$\tilde{V}_a = 7967.43 [0^\circ \text{ V}]$$

$$\tilde{I}_a = 2928.59 \angle -36.87^\circ \text{ A}$$

Las corrientes en los ejes d y q son:

$$\tilde{I}_d = I_a \sin(\delta + \theta) \angle \delta - 90^\circ$$

$$\begin{aligned} \tilde{I}_d &= I_a \sin(15.69 + 36.87) \angle [15.69 - 90^\circ] \\ &= I_a \sin(52.56) \angle -74.31^\circ \\ &= 2325.27 \angle -74.31^\circ \text{ A} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \tilde{I}_q &= I_a \cos(\delta + \theta) \angle \delta \\ \tilde{I}_q &= I_a \cos(15.69 + 36.87) \angle 15.69 \\ &= I_a \cos(52.56) \angle 15.69 = 1780.38 \angle 15.69 \text{ A} \end{aligned}$$

El voltaje generado por fase es:

$$\tilde{E}_a = \tilde{V}_a + \tilde{I}_a R_a + j \tilde{I}_d X_d + j \tilde{I}_q X_q$$

$$\tilde{E}_a = 7967.43 \angle 0^\circ + (2325.27 \angle -74.31^\circ)(j1.83) + (1780.38 \angle 15.69^\circ)(j1.21)$$

$$\tilde{E}_a \approx 11925.8 \angle 15.69^\circ \text{ V}$$

a) La regulación porcentual del voltaje es:

$$RV \% = \frac{11925.8 - 7967.43}{7967.43} \times 100 \approx 49.68 \%$$

b) La potencia desarrollada es la misma que la potencia de salida

$$\begin{aligned} P_d &= P_o = 3 \times 7967.43 \times 2928.59 \times 0.8 \\ &= 56 \text{ MW} \end{aligned}$$

Ejercicio 7 (Simulación)

Simulación del comportamiento magnético del generador síncrono de imanes permanentes con los siguientes datos técnicos:

Tipo	Motor
Potencia (kW)	5
Voltaje (Vac)	220
Corriente nominal (N.M)	13.1
Frecuencia (Hz)	60
Polos	24
Velocidad (rpm)	300
Profundidad (mm)	210
Diametro del rotor (mm)	253.48
Par de arranque (N.M)	2.4
Par nominal (N.M)	161.6
Tipo de iman	NdFeB

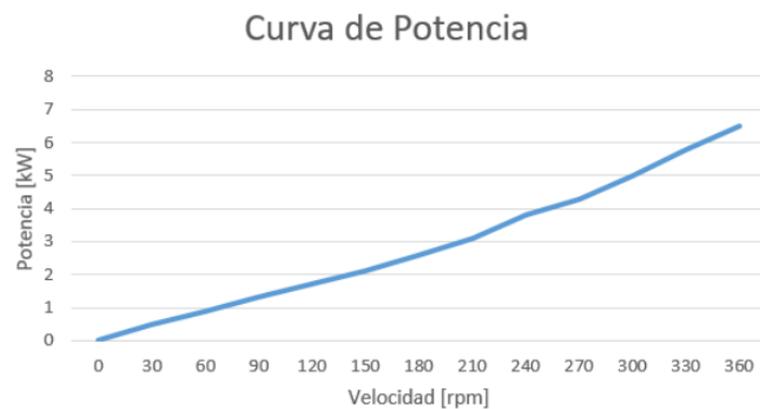
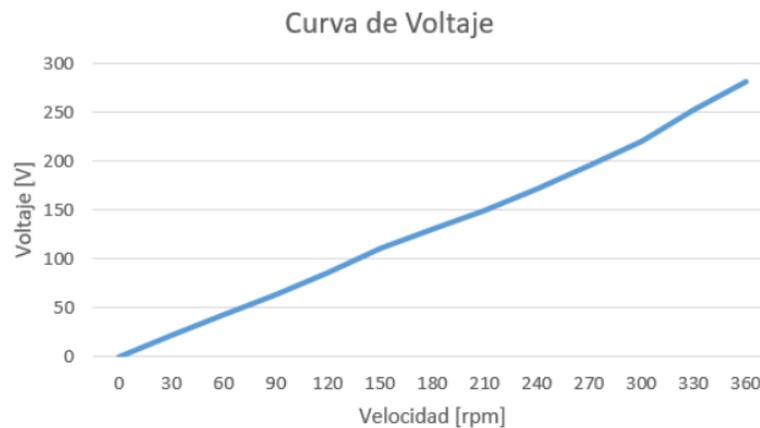
Datos del fabricante

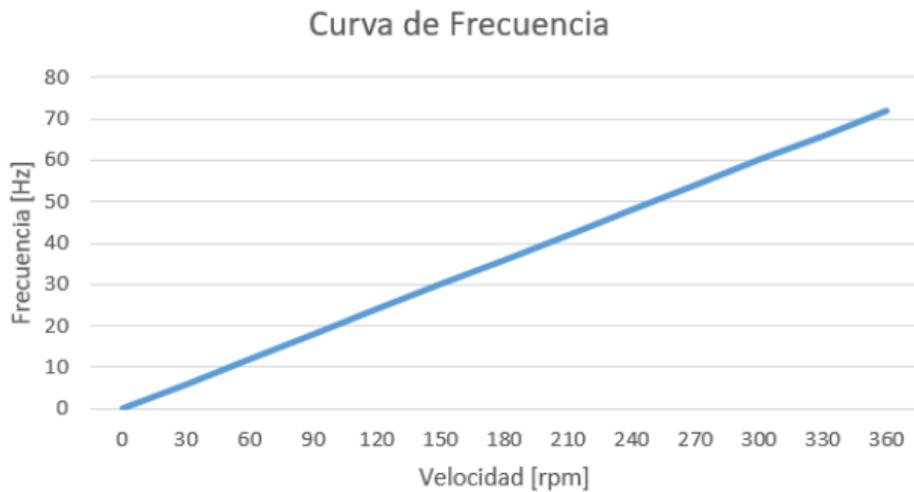
Nº	Velocidad (rpm)	Frecuencia (Hz)	Voltaje (V)	Potencia (kW)
1	0	0	0	0
2	30	6	22	0.5
3	60	12	42	0.9
4	90	18	64	1.3
5	120	24	86	1.7
6	150	30	110	2.1
7	180	36	130	2.6
8	210	42	150	3.1
9	240	48	172	3.8
10	270	54	196	4.3
11	300	60	220	5
12	330	66	253	5.8
13	360	72	282	6.5

Datos del simulador:

Nº	Velocidad(rpm)	Corriente(A)	Voltaje(V)	Frecuencia(Hz)	Potencia(kW)
1	0	0	0	0	0
2	30	9.63	15.97	6.01	0.27
3	60	11.19	37.99	12.09	0.74
4	90	11.27	61.48	18.1	1.20
5	120	11.29	85.06	24.1	1.66
6	150	11.54	109.31	30	2.19
7	180	11.75	132.15	36	2.68
8	210	12.34	155.21	42	3.32
9	240	13.18	178.19	48.1	4.07
10	270	13.94	202.37	54	4.64
11	300	13.39	226.13	60	5.24
12	330	13.02	2250.52	66	5.65
13	360	12.85	274.71	72	6.11

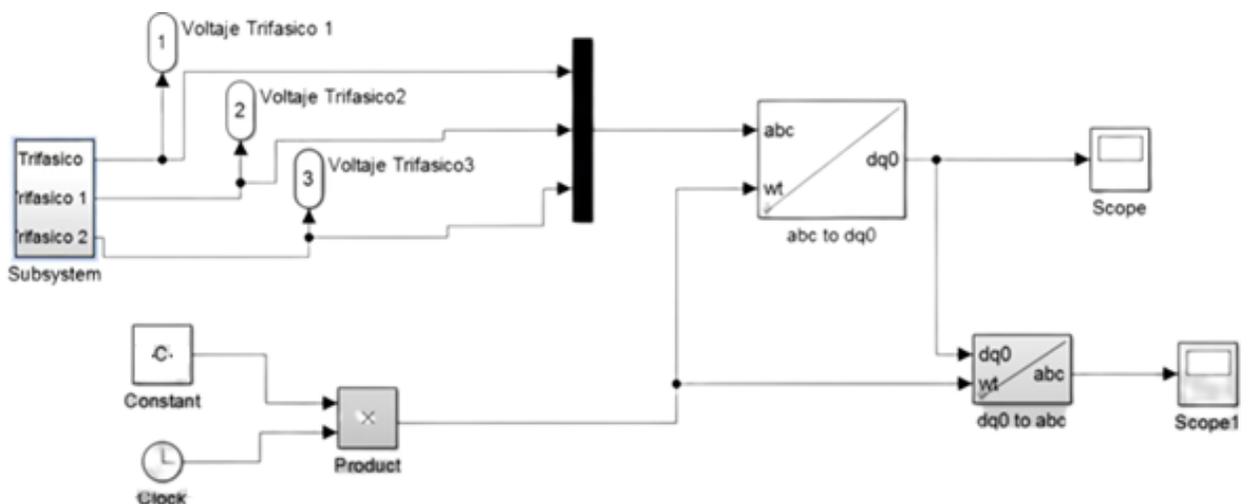
Graficas:



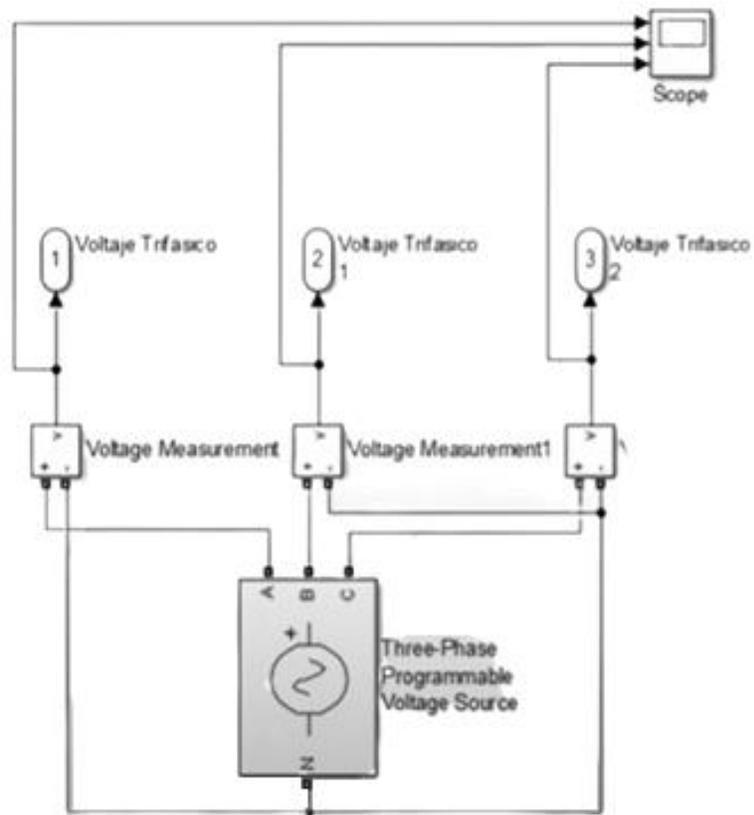
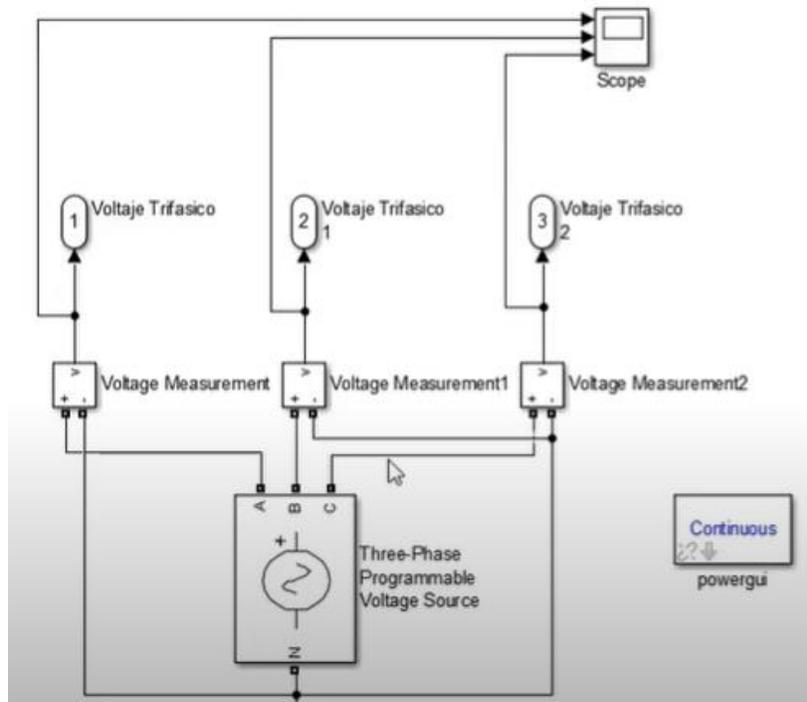


Ejercicio 8

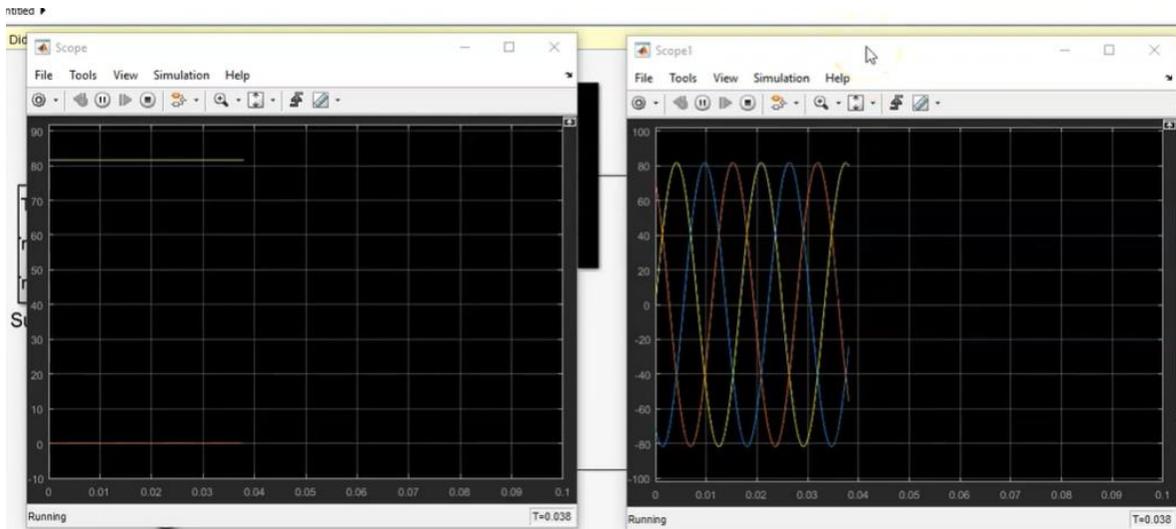
Simulación de un generador síncrono de imanes permanentes en Simulink de MatLab. Esta es una descripción genérica, ya que las imágenes no se pueden visualizar de manera nítida en el presente escrito, se describirá en clase directamente en el simulador.



Se generan las señales de salida



Se corre el programa y se generan las señales del comportamiento del generador síncrono



Tema 3 Sincronización

En los temas anteriores se mencionó la importancia del uso de la máquina sincrónica en las centrales generadoras de energía, de acuerdo con la demanda de energía eléctrica en la comunidad es necesario agregar o quitar estas centrales de energía, por lo que es necesario que esta operación sea de manera segura, ya que si no hay una coordinación adecuada provocaría una inestabilidad en la red de suministro de energía y podría causar daños en los diferentes niveles de operación.

La sincronización nos permite conectar una o más plantas de generación eléctrica a una red de distribución ya existente, se tienen varios tipos de sincronización puede ser de una planta eléctrica con una red comercial para servir a una carga o sincronismo de dos plantas eléctricas entre sí para servir a un sistema de distribución conectado a un barraje común sin la red comercial o sincronismo de dos o más plantas eléctricas entre sí con la red comercial para dar servicio a un barraje de distribución común.

En este tema se trata de manera general las condiciones que deben cumplir para la sincronización de la máquina sincrónica conectada en paralelo y a una red de distribución y se menciona los problemas de estabilidad que puedan tener, esto es un preámbulo de lo que se verá con detalle en materias posteriores, como Modelado de Sistema Eléctricos de Potencia, etc.

3.1 Conexión de máquinas sincrónicas en paralelo.

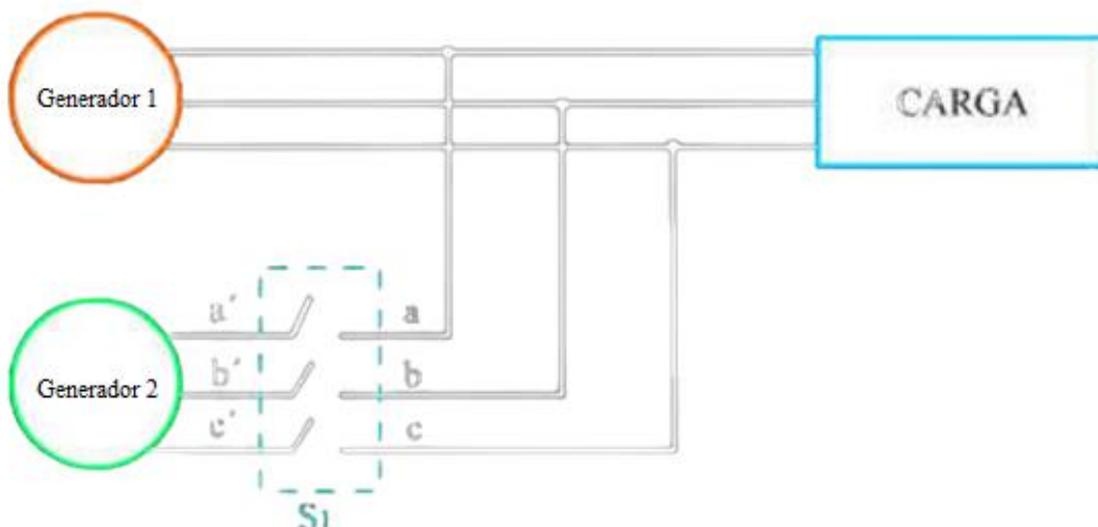
En la actualidad es muy raro encontrar que un generador síncrono suministre energía eléctrica exclusivamente a su propia carga. Esta situación solo se encuentra en algunas aplicaciones que se salen de lo normal, tales como los generadores de emergencia. En todas las demás aplicaciones de generadores hay más de un generador que opera en paralelo para suministrar la potencia que requieren las cargas.

Un sistema eléctrico, generalmente consta de varias centrales generadoras, funcionando todas ellas en paralelo. En cada una de las centrales puede haber varios alternadores de corriente alterna y/o generadores de corriente continua funcionando en paralelo. Existen numerosas ventajas en la subdivisión de un sistema de generación en varias centrales más pequeñas, tanto desde el punto de vista económico como estratégico. Estas ventajas se aplican también al uso de varios generadores más pequeños en lugar de una única máquina grande, aunque esta última tiene mejor rendimiento cuando funciona a su carga nominal. Las principales ventajas del sistema en paralelo con respecto a un solo generador son:

1. Si solo hay un grupo generador suministrando potencia y queda por fuera del sistema por cualquier razón, se perdería toda la potencia de la central; mientras que, si se necesita reparar una de varias unidades más pequeñas, todavía quedan disponibles las demás unidades generadoras para prestar el servicio según las necesidades.
2. Una sola unidad grande, para conseguir máximo rendimiento, debe funcionar a su carga nominal, pero desde el punto de vista económico hacer funcionar una unidad grande con cargas pequeñas no es viable. En cambio, con varias unidades pequeñas funcionando en paralelo puede seguirse la demanda según sea su fluctuación, de modo que cada máquina puede hacerse funcionar lo más cerca de su capacidad nominal, proporcionando así máximo rendimiento de la central y del sistema.
3. Al aumentar la demanda media del sistema y de la central, pueden instalarse nuevos grupos. La inversión es inicialmente menor y su crecimiento sigue al de la demanda.
4. Existe un límite físico y económico a la posible capacidad de un solo generador.

La *Figura 63* muestra un generador síncrono G1 suministrando potencia a una carga con otro generador G2 a punto de conectarse en paralelo con G1 por medio del cierre del interruptor S1.

Figura 63. Generadores en paralelo



Si el interruptor se cierra de manera arbitraria en cualquier momento, es posible que los generadores se dañen severamente. Si los voltajes no son exactamente iguales en cada

uno de los generadores que se conectarán juntos, habrá un flujo de corriente muy grande cuando se cierre el interruptor. Para evitar este problema, cada una de las 3 fases debe tener exactamente la misma magnitud de voltaje y ángulo de fase en el conductor al que se conectará.

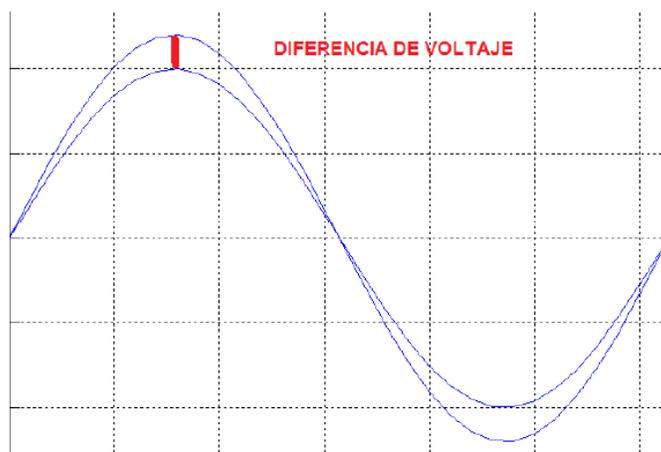
En otras palabras, el voltaje en la fase a debe ser exactamente igual al voltaje en la fase a' y así en forma sucesiva para las fases b -b' y c-c'. Para lograr lo anterior, se deben cumplir las siguientes condiciones de puesta en paralelo:

1. El voltaje del generador entrante debe ser igual al voltaje del otro generador
2. La frecuencia de los dos generadores debe ser igual
3. Los dos generadores deben tener la misma secuencia de fase
4. Se debe conseguir igualdad de ángulos de fase

Estas condiciones de puesta en paralelo requieren ciertas explicaciones:

1. *El voltaje del generador entrante debe ser igual al voltaje del otro generador.* Los voltajes de línea de los generadores deben ser iguales, esta condición es necesaria debido a que no debe existir diferencia de voltaje entre las fases homónimas tal como se indica en la [Figura 64](#), porque podría producir un flujo de corriente alto que puede dañar los generadores.

Figura 64. Diferencia de voltajes de línea



Para lograr igualar el voltaje terminal del generador entrante con el voltaje terminal de otro generador, se debe variar la corriente de campo, la medición del voltaje se da por medio de voltímetro conectados.

2. *La frecuencia de los dos generadores debe ser igual.* El generador eléctrico debe tener la misma frecuencia del sistema al que va ser conectado, con el fin de que

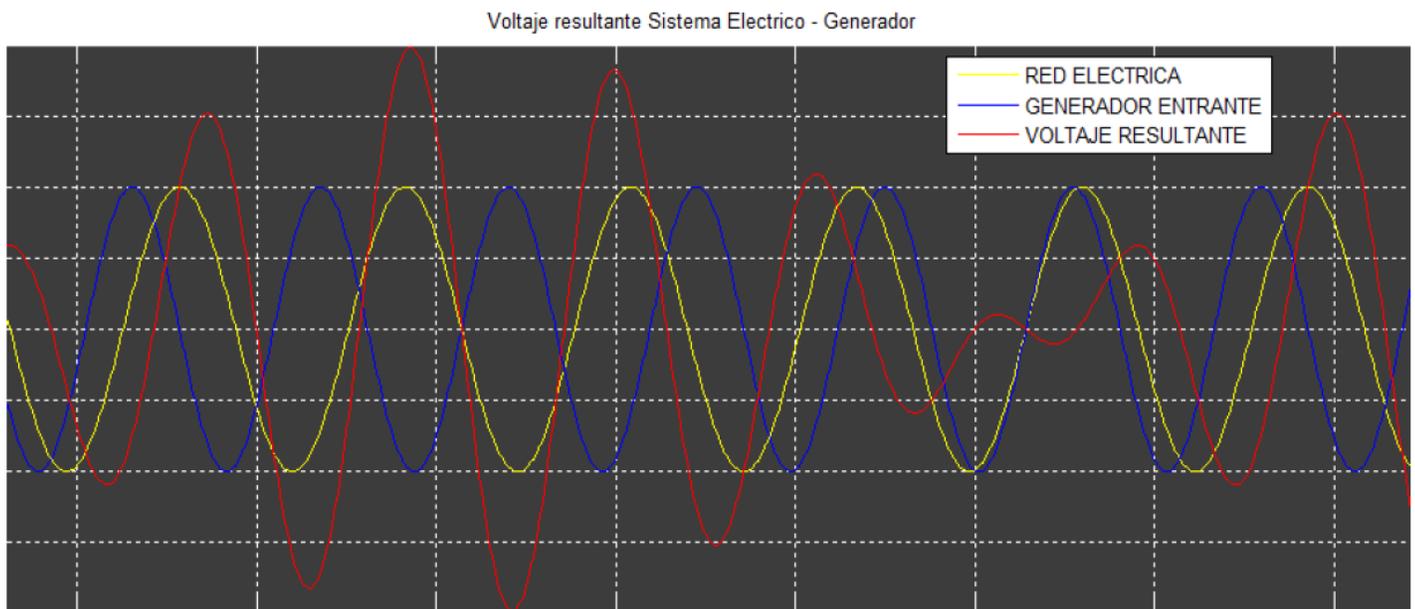
no existan transitorios de potencia, los cuales pueden ocasionar el deterioro y la disminución de la vida útil de las máquinas.

La variación de la velocidad de la máquina motriz provoca el incremento o decremento de la frecuencia del generador y se visualiza por medio de la conexión de frecuencímetros.

La *Figura 65* muestra las oscilaciones del voltaje resultante entre el sistema y la máquina a acoplar, cuando la magnitud de los voltajes de las señales es la misma, mientras su frecuencia es distinta.

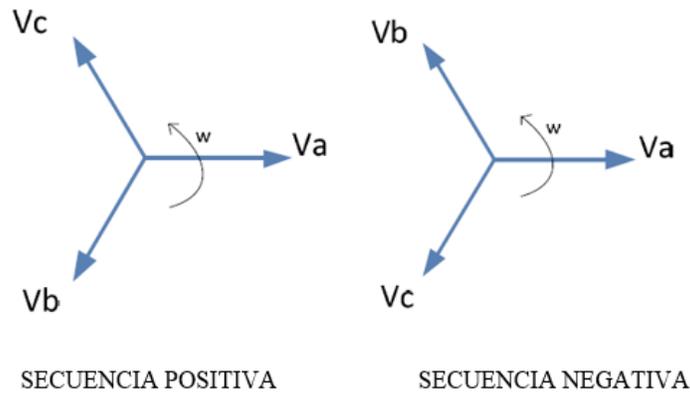
El voltaje resultante oscila entre un valor máximo (suma de las dos señales), y un valor nulo, mientras la frecuencia de la envolvente del voltaje resultante es la diferencia de frecuencias de las señales de los generadores.

Figura 65. Oscilación de voltaje resultante



3. *Los dos generadores deben tener la misma secuencia de fase.* La secuencia de fase está definida por el orden de aparición de los picos de voltaje de cada una de las fases de un sistema de generación. Se llama secuencia positiva o directa cuando el orden de aparición de los fasores es en secuencia ABC, en cambio si los fasores de voltaje aparecen en orden ACB se denomina secuencia inversa o negativa, en la *Figura 66* se muestra las secuencias existentes que pueden tener los sistemas trifásicos.

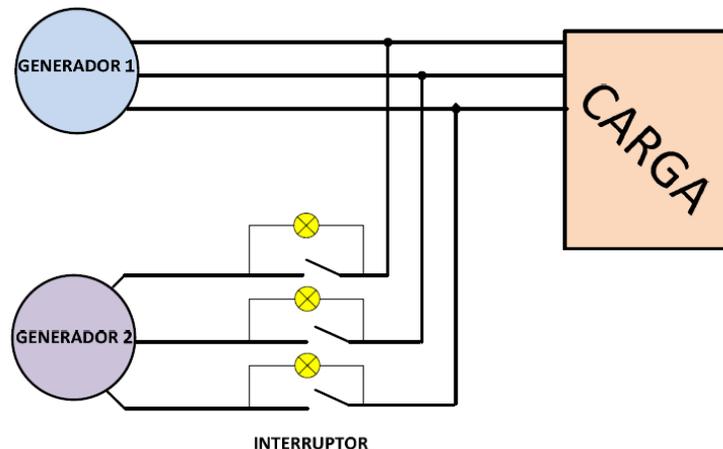
Figura 66. Secuencia de fases



Si en el momento de entrar dos generadores en paralelo, la secuencia de fases de los mismos difiere, dos fases homónimas de los generadores estarían desfasados 120° provocando un voltaje diferencial muy grande, que ocasionaría la avería de ambas máquinas, este problema se corrige conmutando dos de tres fases de un generador.

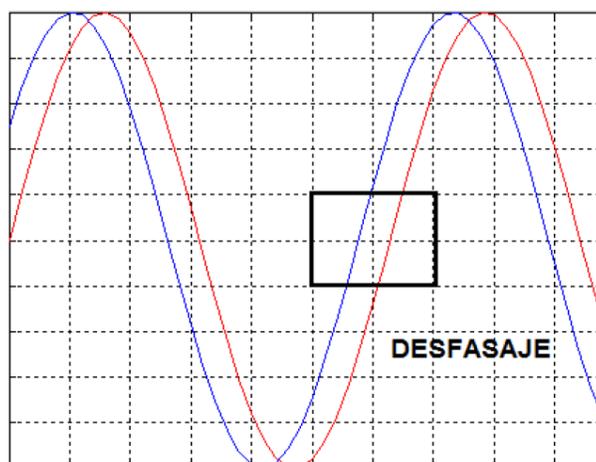
La comprobación de la secuencia de fases se la puede realizar por medio del método de las 3 lámparas, como se muestra en la [Figura 65](#), en este método se conectan 3 lámparas a través de los terminales abiertos del interruptor que conecta el generador entrante al sistema, como la fase cambia entre los dos sistemas, las lámparas lucirán brillantes debido a la diferencia de fases, y luego se oscurecerán, ya que exista una pequeña diferencia de fases, la comprobación de secuencia de fase se da si las tres lámparas se encienden o se apagan al mismo instante, si las lámparas brillan sucesivamente indica que los dos sistemas tienen diferentes secuencias de fase.

Figura 67. Indicador de secuencia de fases por medio de lámparas



4. Se debe conseguir igualdad de ángulos de fase. Cuando se consigue que las magnitudes de voltaje y la frecuencia de los generadores a entrar en paralelo sean iguales, se debe comprobar que entre fases homónimas el ángulo de desfase tienda a cero, en la *Figura 68* se muestra dos señales de voltaje homónimas desfasadas.

Figura 68. Desfase de ángulos de la misma línea



La manera más sencilla de observar la cantidad de desfase que tiene el generador el sistema se da por medio de la utilización de las tres lámparas usadas para detectar la secuencia de fases, cuando las tres lámparas se apagan al mismo tiempo, la diferencia de voltaje a través de ellas es cero, por tanto, los sistemas están en fase. Este esquema es muy práctico, pero no es muy exacto, un método más preciso consiste en la utilización de un sincronoscopio.

Los instrumentos utilizados para sincronizar generadores dependen de la potencia de las máquinas a ser acopladas, es decir para grupos de emergencia se utilizan lámparas para el proceso de sincronización y por lo general el proceso de sincronización es manual, mientras tanto en centrales de generación de gran potencia se utilizan sincronoscopios analógicos, o digitales y los procesos de puesta en paralelo son completamente automatizados.

Un sincronoscopio es un instrumento de medida que permite visualizar el desfase existente entre dos sistemas. Los sincronoscopios están desarrollados con una aguja giratoria, la cual indica si la máquina a conectarse va lenta o rápida, con un índice fijo que señala el instante preciso de sincronización de los dos sistemas tal como se indica en la *Figura 69*.

Figura 69. Sincronoscopio

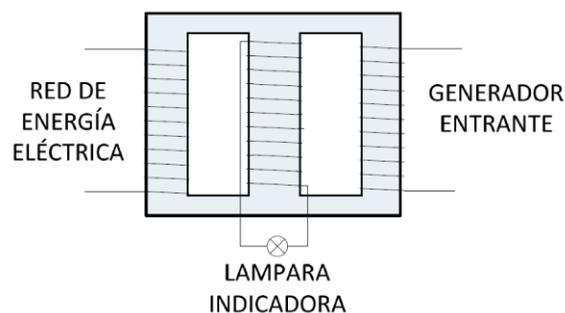


La aguja giratoria muestra la diferencia entre las dos fases homónimas, si la aguja está alineada verticalmente indica que los sistemas estén en fase y puede entrar en paralelo. Si el generador entrante es más rápido que el sistema en funcionamiento, entonces el ángulo de fase aumenta y las agujas del sincronoscopio rotan en sentido de las manecillas del reloj, si el generador entrante es más lento que el sistema la aguja del sincronoscopio rotara en sentido antihorario.

Un sincronoscopio únicamente verifica las relaciones de ángulo en una fase, por tanto, no indica información de la secuencia de fases de un sistema.

El transformador sincronizador especial es un tipo especial de transformador formado por tres devanados, dos devanados laterales y un devanado central, uno conectado a la de red de energía eléctrica o a un generador, mientras el otro devanado se conecta al generador entrante, y el devanado central consta de una lámpara indicadora, como se visualiza en la [Figura 70](#).

Figura 70. Transformador sincronizador especial

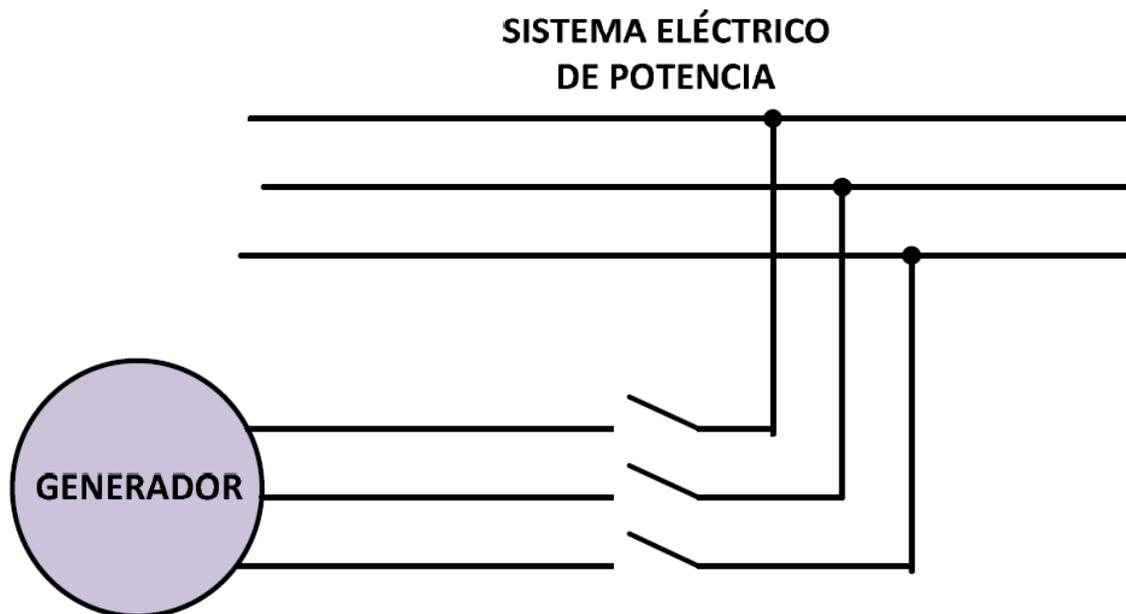


Cuando los voltajes del generador entrante están en fase con los voltajes del de la red eléctrica, harán que los flujos magnéticos de los devanados laterales se neutralicen en la rama central, por tanto la lámpara conectada a dicha rama permanecerá apagada, si existiera alguna diferencia de fase entre los voltajes de la red y el generador a sincronizar, existirá un flujo en el devanado central provocando el encendido de la lámpara.

3.2 Sincronización de una máquina sincrónica a un bus infinito.

Debido a la gran funcionalidad de los generadores síncronos estos pueden ser puestos en paralelos a grandes sistemas eléctricos de potencia (barra infinita), o a otros generadores de igual tamaño para abastecer una pequeña carga local, *Figura 71*.

Figura 71. Operación Generador – Sistema eléctrico de potencia

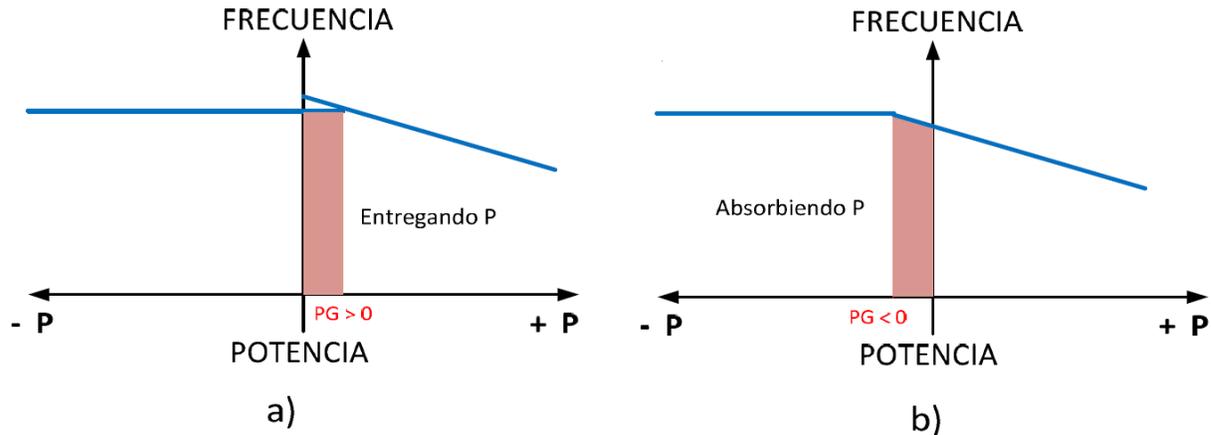


3.2.1 Operación de Generador – Sistema Eléctrico de Potencia

Un gran sistema de potencia se considera una barra infinita, debido a que mantiene siempre constante la frecuencia y el voltaje, independiente de la cantidad de potencia activa o reactiva que se absorba o inyecte al mismo.

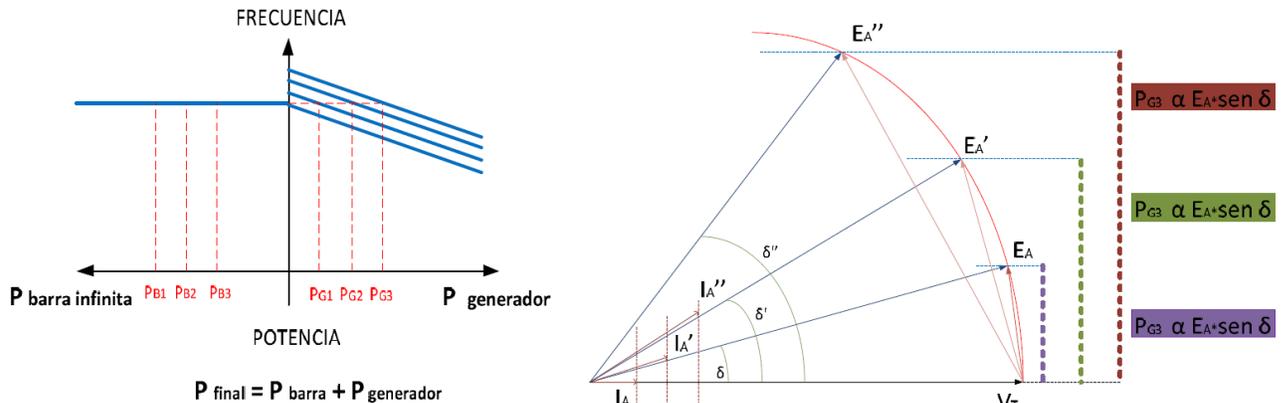
Cuando ingresa un generador a un sistema, se debe tomar en cuenta que la frecuencia sea ligeramente mayor a la del sistema en operación, en este caso el generador se acoplará al sistema aportando potencia activa, el caso opuesto se tiene cuando la frecuencia del generador está ligeramente debajo de la frecuencia del sistema, el generador consume potencia activa (funcionamiento como motor), estos dos casos se muestran en la *Figura 72*. En las centrales de generación los generadores están provistos de dispositivos de protección de potencia inversa, por tanto, evitan que los generadores ingresen al sistema absorbiendo potencia activa.

Figura 72. Diagrama Frecuencia-Potencia a) frecuencia del generador ligeramente mayor al sistema b) frecuencia generador menor a la del sistema



Al aumentar la velocidad de la máquina motriz sujeta al generador entrante, la frecuencia del sistema no variara, por tanto se consigue aumentar la potencia que suministra el generador y que puede ser proporcionado a la carga del sistema con se indica en la [Figura 73](#).

Figura 73. Efecto del incremento de frecuencia con corriente de campo constante

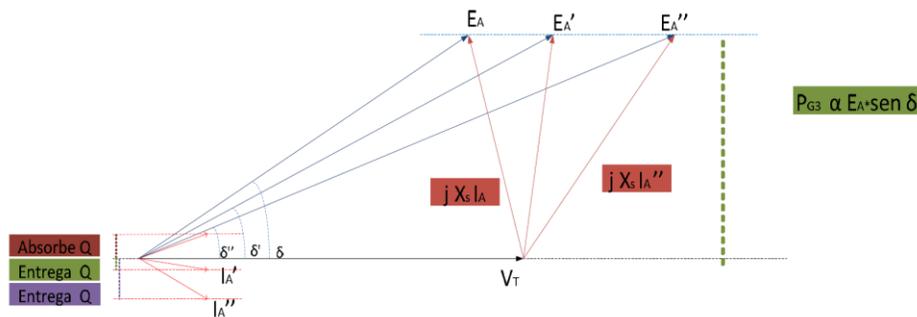


En el diagrama fasorial de la [Figura 73](#), cuando el voltaje terminal no cambia debido a la acción de la barra infinita y la corriente de campo no varía manteniendo constante el voltaje interno de la máquina, se puede notar que $E_A \sin \delta$ va incrementando y es proporcional a la potencia generada por la máquina.

Con el fin de controlar la absorción o inyección de potencia reactiva, se controla la

corriente de campo de la máquina síncrona, ya que al aumentar la corriente de campo (I_f), el flujo magnético se incrementa, incrementando el voltaje interno generado. Si se mantiene constante la potencia generada, mientras varía la corriente de campo, se mantiene constante $E_A \sin \delta$ por ende el fasor de voltaje interno se mueve a lo largo de la línea de potencia constante, como muestra la *Figura 74*, al mantenerse constante el voltaje terminal, el fasor $jX_S I_A$ cambia provocando una variación en magnitud y ángulo de la corriente de armadura, es decir variando el factor de potencia de la máquina.

Figura 74. Efecto de incremento de corriente de campo con potencia activa constante



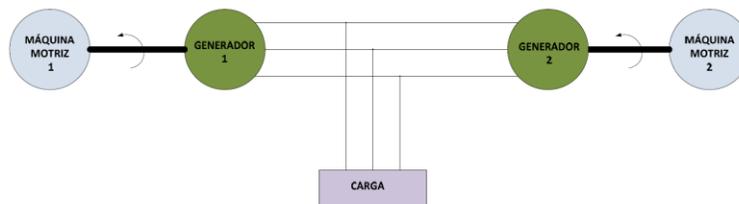
La operación de un generador acoplado a un sistema de potencia se resume en:

- Frecuencia y voltaje terminal del generador son controlados por la barra infinita
- Variación de la corriente de campo controla el suministro (factor de potencia inductivo) o absorción de potencia reactiva (factor de potencia capacitivo)
- La variación de la velocidad de la máquina motriz controla el suministro de potencia activa del generador al sistema

3.2.2 Operación Generador – Generador

Cuando se realiza la conexión de dos generadores síncronos en paralelo la potencia activa y reactiva total del sistema es la suma de los aportes de cada uno de los generadores tal como se dicha en la ecuación (3.1) y la ecuación (3.2) respectivamente, además en la *Figura 75* se muestra la conexión y operación de dos generadores en paralelo.

Figura 75. Operación Generador – Generador

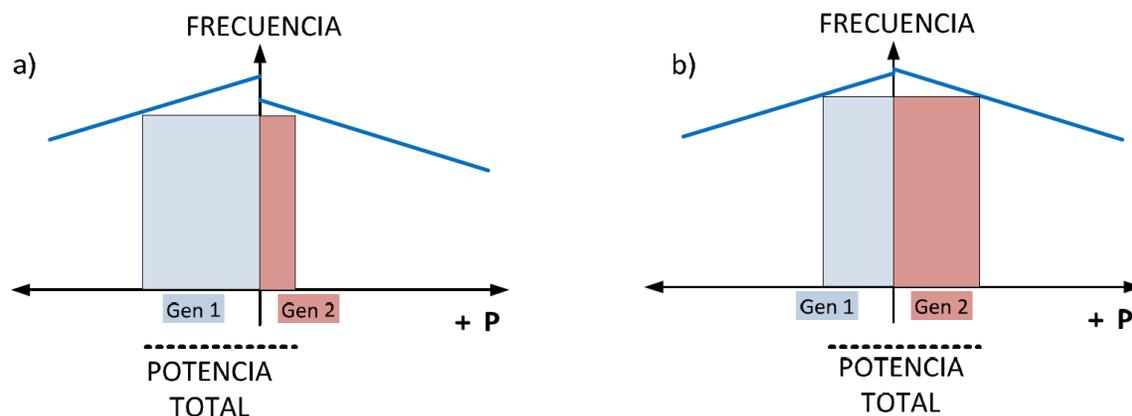


$$P_{TOTAL} = P_{G1} + P_{G2} \quad (3.1)$$

$$Q_{TOTAL} = Q_{G1} + Q_{G2} \quad (3.2)$$

Cuando ocurre una variación en la velocidad de la máquina motriz de cualquiera de los generadores puestos en paralelo, se tiene cambios en la frecuencia de los generadores síncronos, provocando que un generador suministre más potencia activa que el otro en *Figura 76* se muestra el efecto del aumento de velocidad en la máquina motriz del generador 2.

Figura 76. Gráfica frecuencia-potencia a) Generador 1 - Generador 2 en paralelo b) Efecto de aumentar la frecuencia en el generador 2



Al incrementar la corriente de campo provoca que se incremente el voltaje interno del generador 1, por tanto, aumenta el voltaje en los terminales, y el aumento en el suministro de potencia reactiva, mientras disminuye la potencia reactiva suministrada por el otro generador.

3.3 Problemas de estabilidad en generadores sincrónicos.

En los últimos años, la industria eléctrica está pasando por un proceso de reestructuración en todo el mundo, con una clara tendencia de cambiar la producción de energía eléctrica desde grandes plantas de generación centralizadas hacia relativamente pequeños sistemas descentralizados. De hecho, la desregularización del mercado eléctrico, los requerimientos de continuidad de servicio, el interés de reducir las pérdidas y sobrecarga de los conductores en los sistemas de transmisión y distribución, el desarrollo de nuevas tecnologías y la preocupación por el medio ambiente, han dado paso a la interconexión

de fuentes de generación de energía de mediana y baja potencia en diferentes puntos de la red eléctrica, desarrollando lo que se conoce actualmente como generación distribuida.

Es importante tener en cuenta que, aunque el tipo más común de generación distribuida está relacionada con la generación asíncrona conectada a la red a través de inversores, los generadores distribuidos sincrónicos son muy comunes; en particular en plantas industriales, donde el uso de producción combinada de calor y electricidad (cogeneración) brinda mejoras substanciales en eficiencia y ahorro de energía, además de beneficios económicos.

Las máquinas sincrónicas usadas para generación distribuida son más vulnerables a perder su estabilidad comparadas con los grandes generadores de la red interconectada, debido a los tiempos de despeje de falla relativamente altos y su baja inercia. Además, estos complejos industriales con autogeneración, al estar conectados a la red externa, no solo están expuestos a perturbaciones dentro de la planta, sino también a perturbaciones ocasionadas por eventos externos en el sistema interconectado. Sin embargo, los estudios de estabilidad transitoria prácticamente no son requeridos en la etapa de diseño de sistemas industriales, y este proceso se basa principalmente en estudios como son flujos de carga, cortocircuito, coordinación de protecciones y arco eléctrico.

El propósito de los estudios de estabilidad transitoria es analizar el comportamiento de un sistema de potencia ante contingencias, perturbaciones y/o eventos transitorios y con base en estos estudios determinar las acciones que habrán de tomarse para permitir al sistema afrontar la ocurrencia de dichos eventos, y mantener su operación con las menores desviaciones posibles respecto de la condición de operación de pre-disturbio (en estado estable). Algunas de las acciones correctivas que pueden ser determinadas a partir de los estudios de estabilidad transitoria son: el tiempo crítico de liberación de falla para ajuste de protecciones y el diseño de esquemas para deslastre de carga.

Hoan y Chow (1986), discuten el diseño de una planta de emergencia en un complejo industrial, revisando problemas de estabilidad como sobrecargas, caídas de voltaje y frecuencia, que pueden causar la pérdida del suministro de energía eléctrica del complejo en condiciones de emergencia, determinando esquemas de deslastre y arranque de cargas para evitar problemas de estabilidad en operaciones de contingencia en el sistema analizado. Dunki-Jacobs y Davis (1994), muestran la importancia de los estudios de estabilidad en complejos industriales mediante un ejemplo real, en el cual, debido a la mala planificación del sistema, fue necesario realizar un rediseño de este, debido a que las corrientes aportadas por los generadores instalados en la planta hacían indispensable el uso de limitadores de corriente y estos no permitían aprovechar el 100% de la capacidad de potencia de los generadores.

Zimmermannetal (2000), llevaron a cabo un estudio de estabilidad transitoria en un parque industrial, proponiendo un esquema de deslastre de carga por bajo voltaje, restringido por la exportación de corriente hacia la red externa. Además, evalúan los tiempos críticos para el despeje de fallas externas, para así establecer los retardos de cada escalón del esquema de deslastre de carga por bajo voltaje y evitar la operación de las protecciones por eventos en la red externa.

Salimetal (2011), concluyen que los problemas de estabilidad en sistemas de distribución con generadores sincrónicos distribuidos, si no son resueltos, pueden traer otros inconvenientes al sistema. En especial las oscilaciones electromecánicas, las cuales causan problemas relacionados con la calidad de potencia. En el caso de los complejos industriales, donde la generación se encuentra cerca de los centros de consumo; las variaciones tanto en frecuencia como en voltaje generadas por dichas oscilaciones pueden afectar cargas sensibles.

Bidrametal (2012), muestran a partir de simulaciones en un complejo industrial con dos centros de generación interconectados con la red externa, como con restricciones de carga para generación distribuida con máquinas sincrónicas, se puede asegurar la estabilidad de su primera oscilación después de una falla.

Los sistemas eléctricos de grandes complejos industriales, como lo son las refinerías, cementeras, papeleras, etc., usualmente cuentan con generación propia, el diseño y análisis de estos sistemas de potencia industriales se fundamenta principalmente en los estudios de corto circuito, flujos de carga, coordinación de protecciones, arranque de motores y arco eléctrico. Sin embargo, los estudios de estabilidad transitoria son raramente requeridos durante el diseño de este tipo de sistemas, a pesar de que estos estudios resultan fundamentales para determinar la naturaleza de las medidas correctivas necesarias que permitan mitigar los efectos negativos en el comportamiento del sistema, causados por la ocurrencia de ciertos eventos durante la operación del mismo.

La estabilidad es uno de los casos más importantes de estudio cuando se refiere a los sistemas eléctricos de potencia (SEP), ya que permite estudiar el comportamiento de este ante una perturbación física, garantizando su operación en condiciones normales, confiabilidad, calidad y seguridad. Los sistemas eléctricos de potencia son vulnerables debido a la naturaleza del evento de la falla, el lapso de tiempo que dure la perturbación, provocando inestabilidad en el sistema.

Al referirse a máquinas sincrónicas interconectadas entre si se debe tener presente que pueden perder su estabilidad debido al: tipo de falla, localización y tiempo de despeje. Si la duración de la perturbación del sistema es alta, mayor es la desviación de la frecuencia y ángulo del rotor, implicando inestabilidad.

La estabilidad angular está relacionada con el comportamiento de los ángulos de los rotores ante una perturbación sea de gran o pequeña magnitud. Durante la perturbación, el ángulo de rotor del generador comienza a oscilar, si la falla no es tan severa el sistema llega a estabilizarse hasta que el ángulo del rotor regrese a su estado original o un nuevo estado estable, mientras que, si la falla es demasiado grande el ángulo del rotor oscila sin amortiguación, lo que conlleva a la inestabilidad del sistema.

Partiendo del estudio de estabilidad se puede determinar algunas acciones correctivas, entre las cuales se tiene: el tiempo crítico de liberación de falla, el diseño de esquemas para pérdida de carga y el diseño de esquemas de disparo transferido. Cuando un generador pierde el sincronismo gira a una velocidad distinta con respecto al sistema, por consecuencia los rotores de las máquinas comienzan a oscilar produciendo cambios en la aceleración de los generadores.

Para el estudio de la estabilidad se considera un generador sincrónico, el cual está ligado a conceptos mecánicos, matemáticos y físicos. En donde, si se pretende garantizar dicha estabilidad se debe relacionar a los generadores con las ecuaciones de oscilación, que se producen por una perturbación transitoria en el SEP.

El Sistema Eléctricos de Potencia se encuentra en cambios constantes, por ello es necesario garantizar niveles óptimos de voltaje, potencias activas, potencias reactivas, frecuencia de operación y ángulos de rotores de las máquinas. En donde a pesar de sufrir una perturbación, esta no debe implicar ningún cambio.

En los SEP se considera tres factores que afectan la estabilidad del sistema. La estabilidad de voltaje que se refiere en conservar niveles óptimos de voltaje garantizando la operación del SEP, la estabilidad de frecuencia que trata de mantener un balance entre generación carga y la estabilidad angular tiene como finalidad mantener en sincronismo los generadores.

La estabilidad transitoria de un sistema eléctrico de potencia puede ser definida como la habilidad del sistema para permanecer en sincronismo cuando experimenta la ocurrencia de un disturbio severo, los estudios de estabilidad transitoria tienen como objetivo fundamental el determinar la respuesta dinámica del sistema, durante y después de la ocurrencia de un "gran disturbio". En el caso de los sistemas de potencia industriales, el objetivo de este tipo de estudios es evaluar el comportamiento dinámico del sistema ante la ocurrencia de disturbios tales como; corto circuitos en su red de distribución, pérdida súbita de grandes volúmenes de carga, pérdida de generación propia en el caso de sistemas interconectados con la red de transmisión, además de los eventos antes mencionados. Resultan también de interés, la pérdida de la interconexión con la red de

transmisión y fallas en la red de transmisión eléctricamente cercanas al punto de interconexión, con el propósito de implementar acciones que permitan en lo posible, mantenerla continuidad del suministro de energía eléctrica de mandado por los diferentes procesos del complejo industrial.

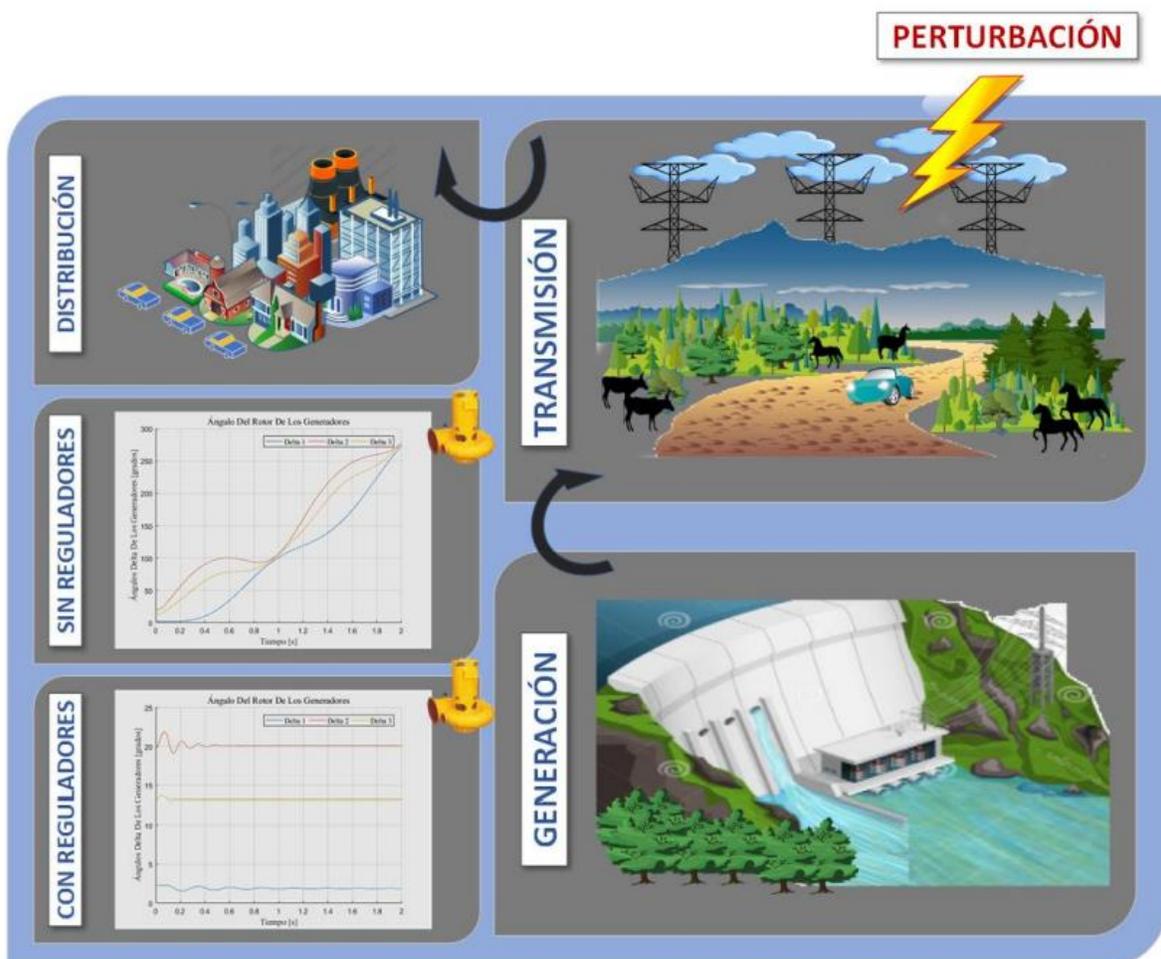
En México, los sistemas eléctricos de potencia de los complejos de refinación fueron diseñados para operar en forma aislada de la red de transmisión, con una capacidad de generación propia equivalente al doble de la carga del complejo, a fin de mantenerla continuidad en el servicio. En el presente artículo, se evalúa el comportamiento dinámico de un sistema eléctrico de potencia industrial interconectado al sistema de transmisión para diferentes condiciones de operación.

En general, la estabilidad en un sistema es una condición de equilibrio entre las fuerzas de oposición. Si un disturbio produce un desbalance sostenido entre las fuerzas de oposición, se presenta la condición de inestabilidad, la cual se manifiesta de formas diversas. En un Sistema Eléctrico de Potencia (SEP) ésta puede presentar se como pérdida de sincronismo u oscilaciones de magnitud creciente, por mencionar algunas. La naturaleza de los sistemas eléctricos de potencia es altamente no-lineal y operan en ambiente de cambio continuo. Algunos ejemplos son las variaciones normales en la carga, salidas de generadores y cambios en la topología de la red. Ante la ocurrencia de algún disturbio, la estabilidad del SEP es función de la magnitud del disturbio, la topología de la red de transmisión y de la condición de operación inicial del SEP. Los disturbios a los que se encuentra expuesto un SEP pueden ser clasificados de acuerdo a la magnitud de los mismos, como "disturbios de magnitud pequeña" y "disturbios severos o de gran magnitud", (los disturbios de magnitud pequeña, son las variaciones normales en la carga del sistema y la pérdida de generadores de pequeña capacidad, mientras que los disturbios de gran magnitud o severos, se consideran por la pérdida de generadores importantes y la ocurrencia de algún corto circuito en el sistema de transmisión). El problema de estabilidad en SEPs es un problema único, esto es, el SEP es estable o inestable. Sin embargo, como la inestabilidad puede manifestarse de diversas formas, resulta impráctico y poco útil el analizar la condición de estabilidad de un SEP como un problema único, debido a las grandes dimensiones y complejidad del modelo del SEP. En estudios de estabilidad, es necesario utilizar modelos simplificados con suficiente grado de detalle que permitan analizar únicamente determinadas manifestaciones de inestabilidad, usando las técnicas de análisis adecuadas. El problema de estabilidad transitoria involucra el análisis de oscilaciones electromecánicas inherentes al SEP, por lo que la forma en que varía la potencia de salida de los generadores ante cambios en el ángulo de sus rotores es fundamental. En estado "estable" existe un equilibrio entre el par mecánico y el electromagnético de cada generador y su velocidad permanece constante, al ocurrir un disturbio, el equilibrio se pierde y se presentan aceleraciones y desaceleraciones de los rotores de los generadores. Así pues, si un generador gira a mayor velocidad que otro, la

posición angular relativa de éste con respecto al generador que gira a menor velocidad se incrementará. Esta diferencia angular provoca que parte de la carga del generador que gira a menor velocidad sea transferida al generador que gira a mayor velocidad conforme a su relación "potencia—ángulo". Esta transferencia de carga tiende a "frenar" al generador que gira a mayor velocidad reduciendo la diferencia de velocidades entre ambos, y por consiguiente, la correspondiente diferencia angular.

Para analizar la estabilidad angular, mediante la integración de reguladores de velocidad y voltaje, con el detalle que se puede presentar el desempeño de cada uno de los generadores del sistema y sus características de mayor importancia para el estudio que son: ángulo del rotor, voltaje interno generado y las potencias mecánica y eléctrica, lo cual permite apreciar gráficamente si el generador llegó a perder el sincronismo con los demás generadores del sistema.

Figura 77. Estudio de estabilidad angular en un SEP



Ejercicios del Tema 3

EJERCICIO 1

Los datos de las características de cortocircuito y circuito abierto de una máquina síncrona de 60 Hz, de 6 polos, de 220 V (de línea a línea), conectada en Y, 45 KVA trifásica. De acuerdo con la característica de circuito abierto:

Voltaje de línea a línea: 220 V Corriente de campo: 2.84 A

A partir de la característica de cortocircuito:

Corriente de inducido, A	118	152
Corriente de campo, A	2.20	2.84

A partir de la línea de entrehierro:

Corriente de campo = 2.20 A Voltaje de línea a línea = 202 V

Calcule el valor no saturado de la reactancia síncrona, su valor saturado a un voltaje nominal y el índice de cortocircuito. Exprese la reactancia sincrónica en ohms por fase, y en el sistema por unidad, determínela con base en el índice de la máquina.

Solución

Una corriente de campo de 2.20 A, el voltaje de línea a neutro en la línea de entrehierro es:

$$V_f = \frac{202}{\sqrt{3}} = 116.7 \text{ V}$$

y para la misma corriente de campo la corriente de inducido en cortocircuito es

$$I = 118 \text{ A}$$

La reactancia síncrona no saturada:

$$X_s = \frac{116.7}{118} = 0.987 \Omega/\text{fase}$$

La corriente de inducido nominal es

$$I = \frac{45000}{\sqrt{3} * 220} = 118 \text{ A}$$

Por lo tanto, $I = 1.00$ por unidad. El voltaje correspondiente de la línea de entrehierro es

$$V_{A,U} = \frac{202}{202} = 0.92 \text{ por unidad}$$

En el sistema por unidad

$$X_{S,U} = \frac{0.92}{1.00} = 0.92 \text{ por unidad}$$

La reactancia síncrona saturada se determina a partir de las características de cortocircuito y de circuito abierto y la reactancia síncrona queda:

$$X_s = \frac{V_{a,nominal}}{I'_a} = \frac{220 / \sqrt{3}}{152} = 0.836 \Omega/\text{fase}$$

En el sistema por unidad $I'_a = \frac{152}{118} = 1.29$, quedando la reactancia síncrona:

$$X_s = \frac{1.00}{1.29} = 0.775 \text{ por unidad}$$

A partir de las características de circuito abierto y de cortocircuito, el índice de cortocircuito (SCR) se obtiene

$$SCR = \frac{2.84}{2.20} = 1.29$$

El valor inverso al índice de cortocircuito es igual a la reactancia síncrona saturada por unidad

$$X_s = \frac{1}{SCR} = \frac{1}{1.29} = 0.775 \text{ por unidad}$$

EJERCICIO 2

A un juego de barras comunes de una red trifásica de 5000 V, 50 Hz quiere acoplarse un alternador con el inducido conectado en estrella. La resistencia del inducido por fase se considera despreciable y la reactancia síncrona es de 2 Ω . Se cierra el interruptor de conexión en paralelo cuando el alternador está en perfecto sincronismo con la red y con tensión de línea en bornes de 5004 V. Calcular la intensidad de corriente por fase del inducido en el instante de conexión (intensidad de corriente sincronizante).

Solución

En sincronismo la f.e.m. está desfasada 180° con la tensión en barras.

La tensión de fase en barras:

$$V_f = \frac{V_L}{\sqrt{3}} = \frac{5000}{\sqrt{3}} = 2886.75 \text{ V}$$

La fem de fase:

$$E_f = \frac{E_L}{\sqrt{3}} = \frac{5004}{\sqrt{3}} = 2889.06 \text{ V}$$

La intensidad por fase en el momento de conexión

$$I_f = \frac{2889.06 - 2886.75}{2} = 1.155 \text{ A}$$

EJERCICIO 3

Dos alternadores de 3500 kW, 11 kV, conectados en paralelo suministran una carga de 5000kW, con un factor de potencia de 0.8. La excitación de uno de los alternadores se ha ajustado para que una corriente de 150 A con un $\cos \theta$ inductivo y los reguladores de los motores primarios para que ambos motores trabajen a igualdad de potencia. Determinar:

1. El factor de potencia de cada alternador
2. La fem inducida E_o y el ángulo de carga θ de cada alternador

Las impedancias síncronas, que aceptaremos constantes, de cada alternador son:

$$G1: z_{S1} = 0.8 + j 15 \Omega \quad ; \quad G2: z_{S2} = 0.6 + j 20 \Omega$$

Solución

Si la potencia de los motores primarios es la misma, también serán sensiblemente iguales las potencias efectivas que ceden los alternadores.

Por tanto, el $\cos \theta$ del alternador G1 será:

$$\cos \theta_1 = \frac{P_1}{\sqrt{3} V I_1} = \frac{2500}{\sqrt{3} 11 * 150} = 0.875$$

$$\theta = \cos^{-1} 0.875 = 29^\circ$$

La corriente total cedida por las dos máquinas vale:

$$I_T = \frac{P_T}{\sqrt{3} V \cos \theta} = \frac{5000}{\sqrt{3} * 11 * 0.8} = 328 \text{ A}$$

Aun cuando por un trazado vectorial podríamos obtener la corriente y el $\cos \theta$ del alternador G2, analíticamente por el método complejo, tomando como eje real el del vector tensión V, tenemos:

$$I = 328(0.8 - j0.6) = 262 - j 195$$

$$I_1 = 150 (0.875 - j0.485) = 131 - j72.7$$

$$I_2 = I - I_1 = 131 - j 122.3 = 179 \angle -43^\circ \text{ A}$$

2. Siguiendo con el mismo método de cálculo complejo obtenemos:

Alternador G1

Fem

$$\begin{aligned} E_{O1} &= V + (R_1 + jX_{S1}) I_1 = \frac{11000}{\sqrt{3}} + (0.8 + j15)(131 - j 72.7) = \\ &= 7545.3 + j 1906.84 = 7782.5 \angle 14.18^\circ \text{ V} \end{aligned}$$

Angulo de par:

$$\theta = 14.18^\circ$$

Alternador G2

Fem

$$\begin{aligned} E_{O2} &= V + (R_2 + jX_{S2}) I_2 = \frac{11000}{\sqrt{3}} + (0.6 + j20)(131 - j122.3) = \\ &= 8874.60 + j 2546.2 = 9232.6 \angle 16^\circ \text{ V} \end{aligned}$$

Angulo de par:

$$\theta = 16^\circ$$

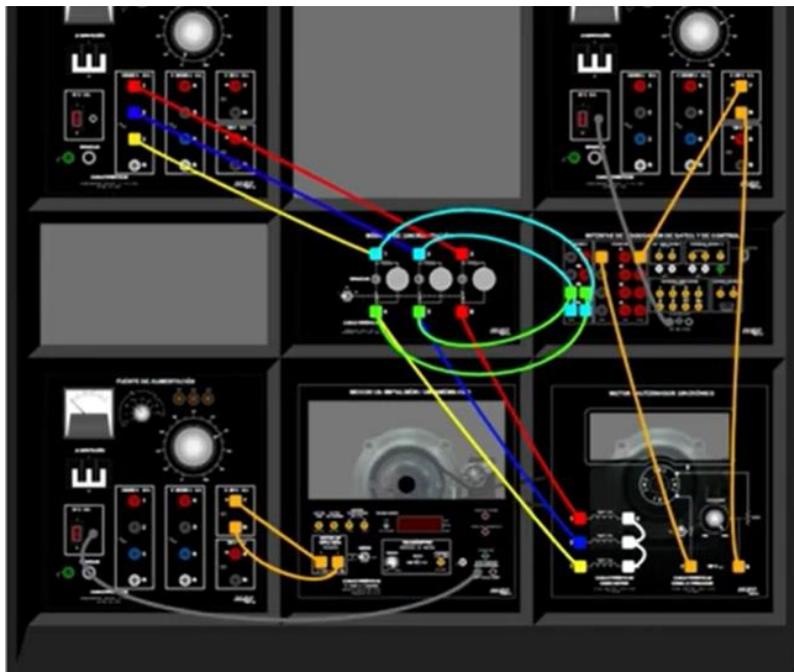
EJERCICIO 4

Sincronización de un generador síncrono a la red en el simulador de LabVolt de Festo.
Siguiendo diagrama de conexiones del manual de prácticas

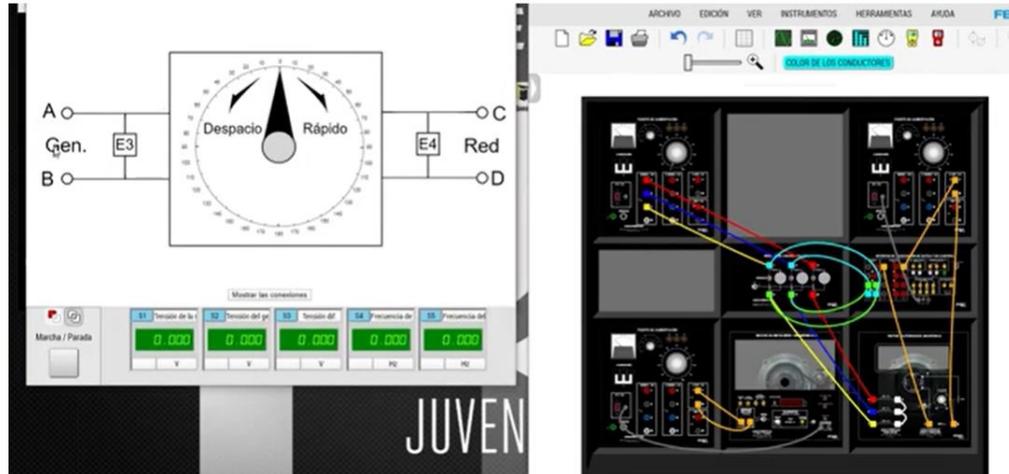
Se colocan los módulos a utilizar



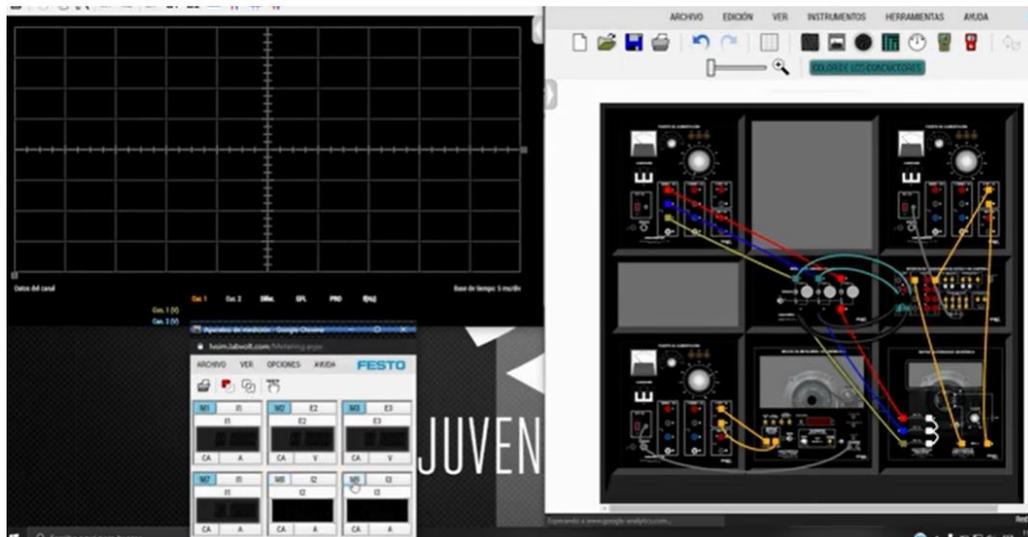
Realizar las conexiones



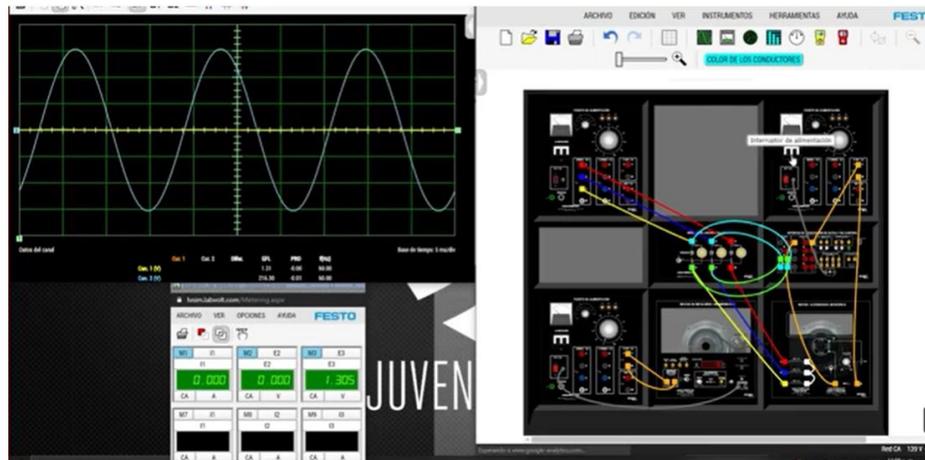
Colocar el sincronoscopio

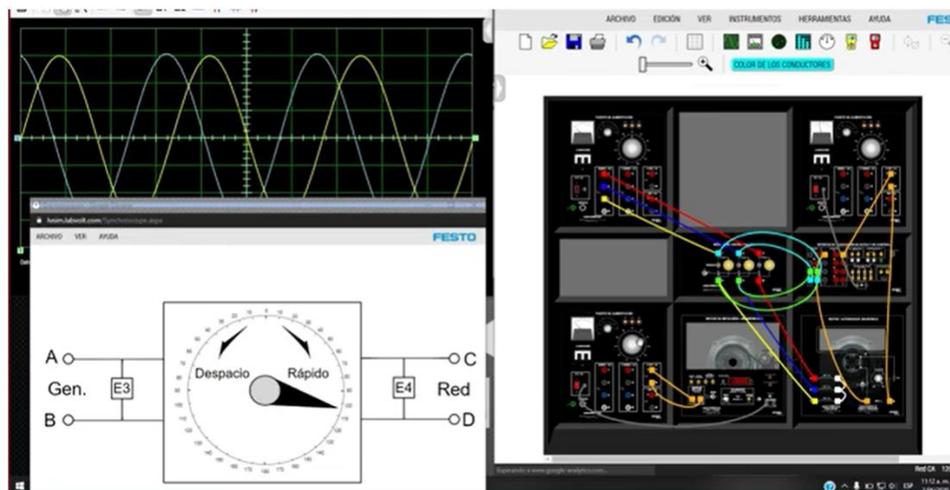
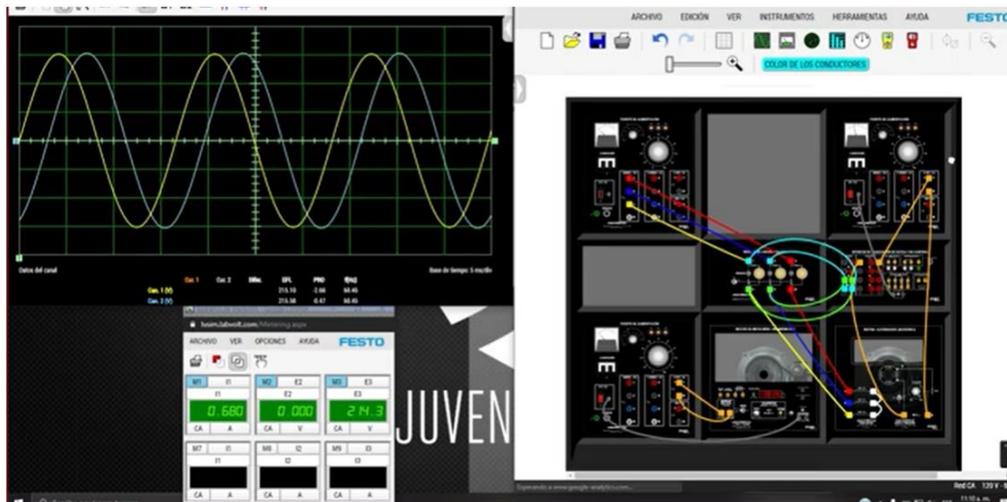


Colocar los mulos de los aparatos de medición

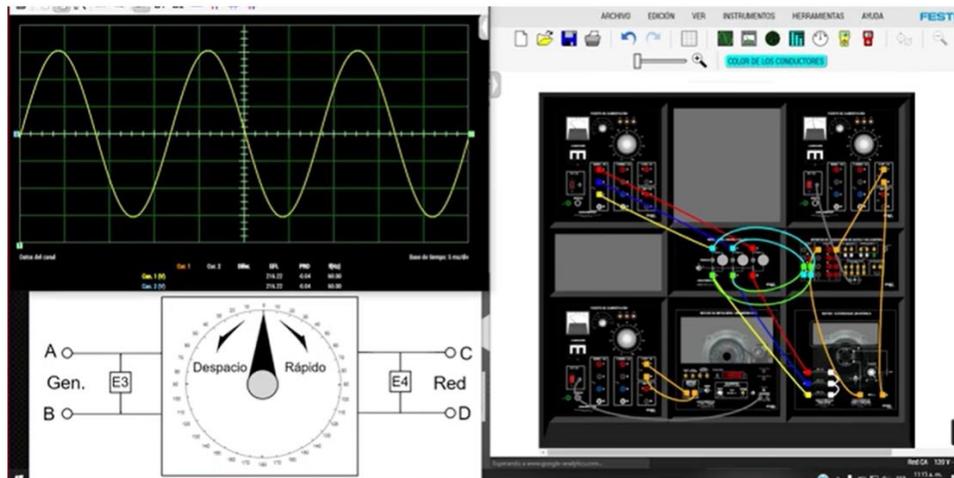


Empezar con la sincronización





Sincronización del generador síncrono con la red



Tema 4 Motor sincrónico

Los motores sincrónicos, así como los generadores también tienen su gran importancia ya que tiene aplicaciones típicas como motores de compresores en la industria del petróleo y el gas, bombas centrífugas, bombas alternativas, etc.

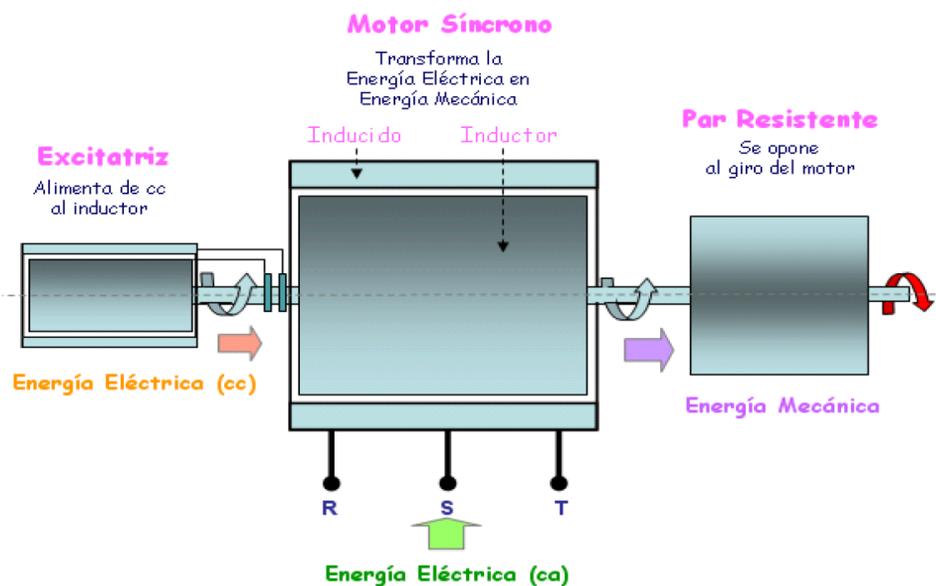
En este apartado está dedicado a ver su principio de funcionamiento, operación y diferentes formas de arranque ya que por si solo no puede operar, sus curvas “V”, se mencionará diferentes aplicaciones y tipos de motores de esta clase.

4.1 Operación en estado estacionario de los motores sincrónicos.

Un motor síncrono tiene el mismo aspecto constructivo que un generador síncrono y de hecho un generador síncrono podría trabajar como motor síncrono alimentándolo con corriente alterna y excitándolo con corriente directa.

El caso de un motor síncrono la estructura del campo (rotor) se alimenta con corriente directa en forma semejante al caso del generador; mientras que el devanado del estator se conecta a una alimentación de corriente alterna. *Figura 78*

Figura 78. Operación del motor síncrono



Por lo tanto, se requieren dos fuentes de alimentación; una de corriente alterna y otro de corriente directa. La de corriente alterna para accionar la armadura y la de corriente directa para excitar el campo.

La corriente directa para la excitación del rotor se puede tomar de una fuente independiente, o bien en el caso de motores que operan con alta velocidad con excitatrices acopladas directamente al eje del rotor.

La velocidad síncrona del motor está dada por:

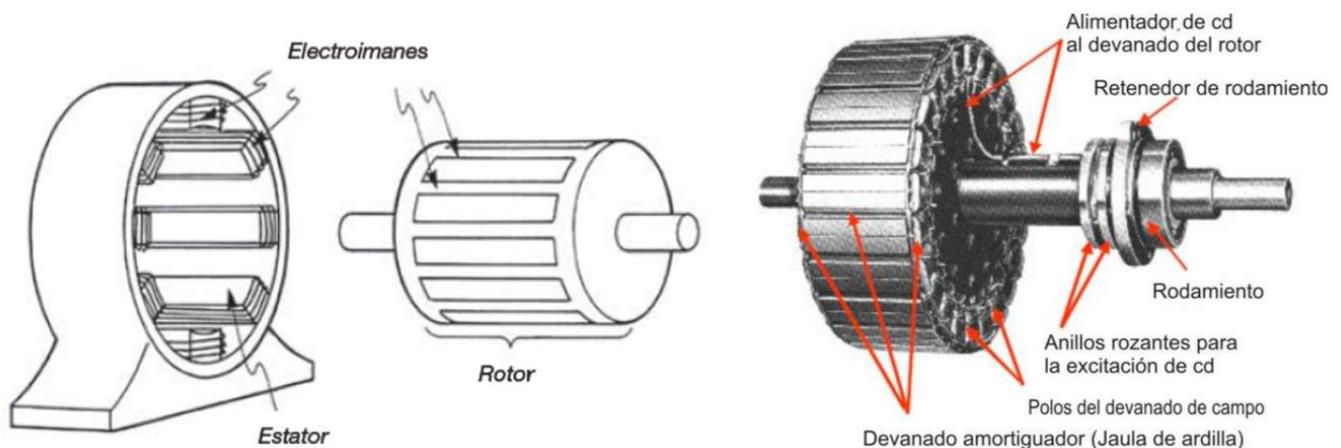
$$\omega_{sin} = \frac{120f}{P}$$

Donde ω_{sin} : velocidad síncrona
 f: frecuencia eléctrica
 P: número de polos

Las partes esenciales de un motor síncrono trifásico (*Figura 79*) son:

- El núcleo laminado del estator en donde se aloja el devanado trifásico de corriente alterna.
- La estructura giratoria formada por el estator en donde se alojan las bobinas del devanado de campo que se excita con corriente directa. Con su flecha correspondiente y los anillos rozantes montados en esta.
- El portaescobillas y escobillas para conexión a la fuente de excitación en la misma forma que los generadores.
- En el rotor, en algunas ocasiones, se alojan en los polos los llamados devanados de amortiguamiento.
- Dos apoyos con sus chumaceras para soportar el eje del rotor.

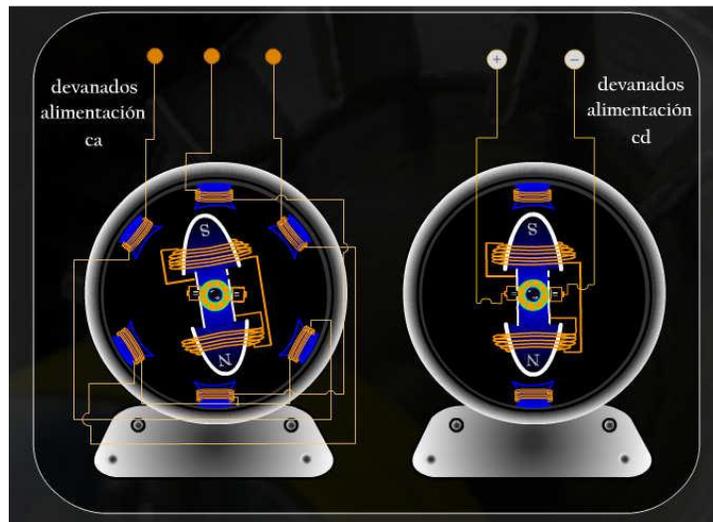
Figura 79. Estator y rotor, en este último se detalla los anillos rozantes, rodamientos y devanado amortiguador de motor síncrono



4.1.1 Principio de operación

En la *Figura 80* se muestra un motor síncrono de dos polos. La corriente de campo I_f del motor produce un campo magnético de estado estacionario B_r . Un conjunto trifásico de voltajes se aplica al estator de la máquina, que produce un flujo de corriente trifásica en los devanados. Un conjunto trifásico de corrientes en el devanado del inducido produce un campo magnético uniforme rotacional B_s . Entonces, hay dos campos magnéticos presentes en la máquina.

Figura 80. Motor síncrono de dos polos

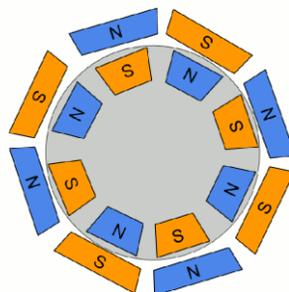


Donde el campo rotórico tenderá a alinearse con el campo estático. Puesto que el campo magnético del estator es rotante, el campo magnético del rotor (y el rotor en sí mismo) tratará constantemente de emparejarse con él. Cuanto mayor sea el ángulo entre los dos campos magnéticos (hasta cierto máximo), mayor es el par sobre el rotor de la máquina.

El principio básico de operación del motor síncrono es que el rotor “persigue” el campo magnético rotante del estator alrededor de un círculo sin emparejarse del todo con él.

Figura 81

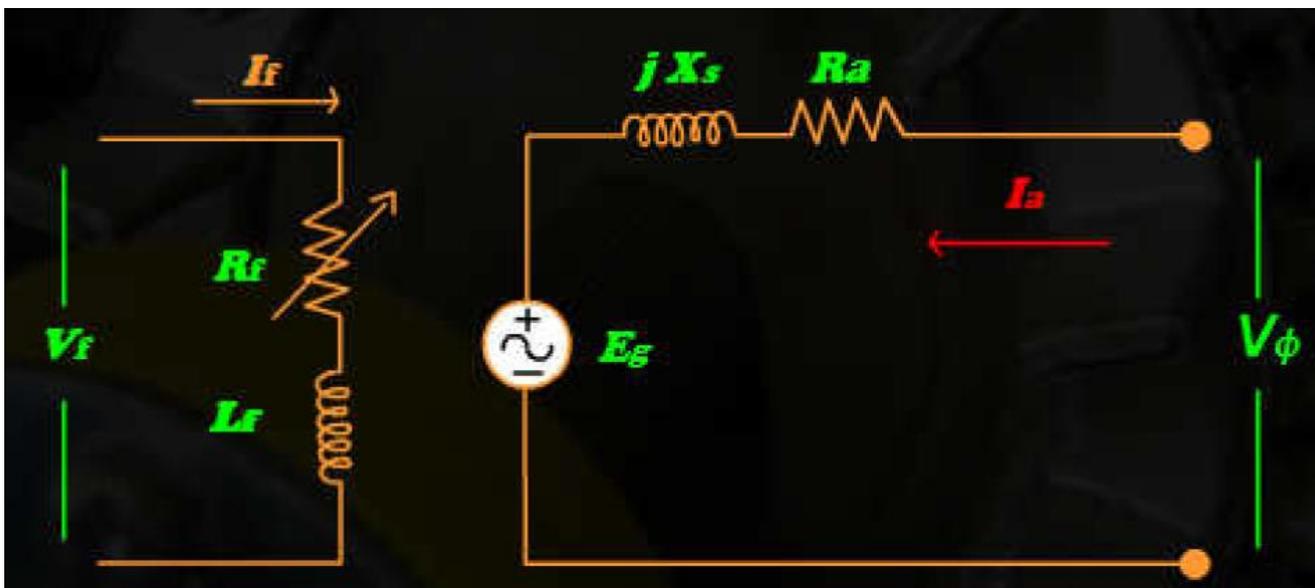
Figura 81. Simulación motor síncrono



4.1.2 Circuito equivalente

Un motor síncrono es igual en todos sus aspectos a un generador síncrono, excepto en que la dirección del flujo de potencia en la máquina es invertida. Puesto que la dirección del flujo de potencia de la máquina está invertida, cabe esperar que también se invierta la dirección del flujo de corriente en el estator del motor. El circuito equivalente de un motor síncrono es exactamente igual al del generador síncrono, excepto que la dirección de referencia I_a está invertida. El circuito equivalente del motor síncrono por fase se muestra en la *Figura 82*.

Figura 82. Circuito equivalente por fase del motor síncrono



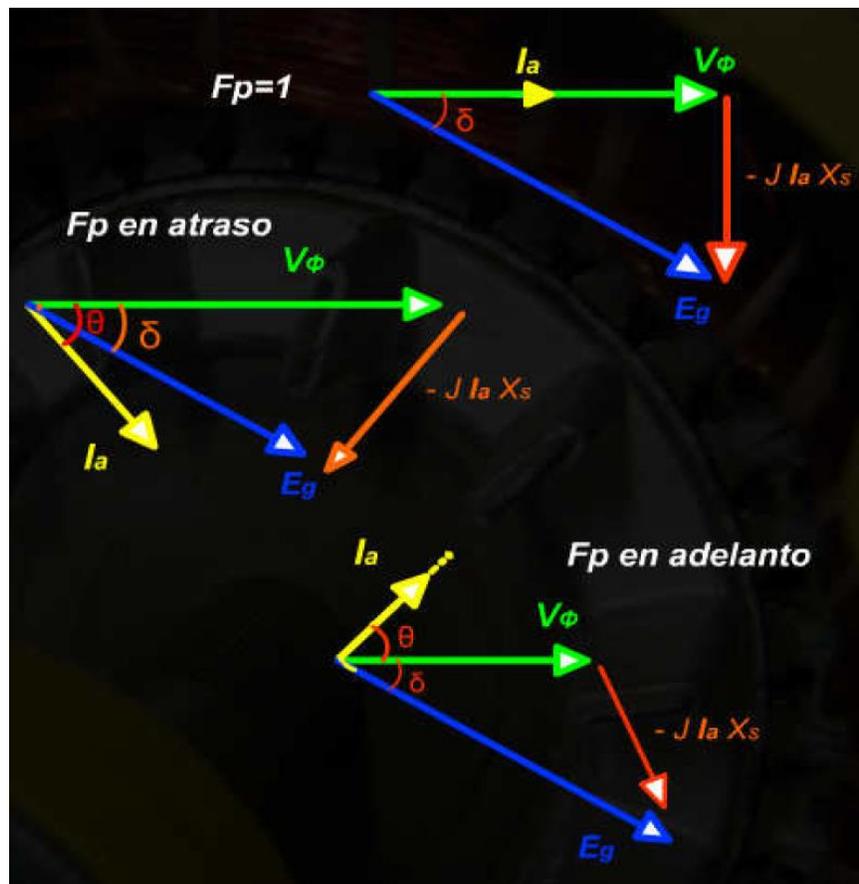
Debido al cambio de dirección de I_a , cambia también la ecuación correspondiente a la ley de voltajes de Kirchhoff para el circuito equivalente por fase. Por lo tanto:

$$V_\phi = E_g + jX_s I_a + R_a I_a$$

Diagrama de fase

Una máquina trabaja como motor si el ángulo de fase entre el voltaje y la corriente se encuentra en el primer o cuarto cuadrante, ya que en este caso el factor de potencia es positivo y entonces la potencia eléctrica de entrada al motor es positiva. En los siguientes diagramas fasoriales (*Figura 83*) se muestran diferentes condiciones de operación del motor considerando la resistencia de armadura despreciable.

Figura 83. Diagramas fasoriales motor síncrono

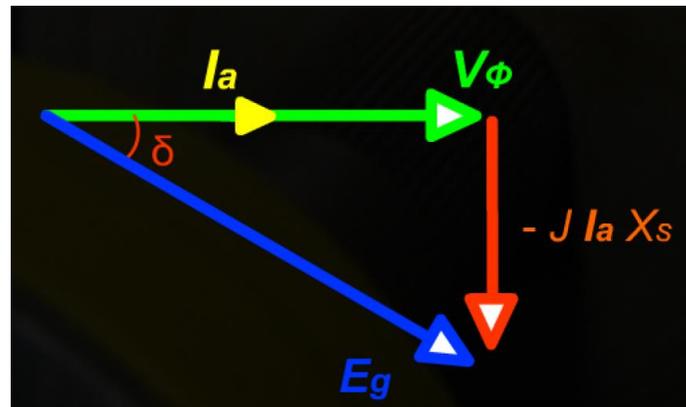


Se puede notar de los tres diagramas anteriores se asumió $R_a = 0$. El voltaje E_g es el que se induce en la armadura (estator) por el flujo debido únicamente a la corriente de campo, es decir, en ausencia de cualquier corriente en la armadura, por lo que la magnitud de E_g depende solo de la corriente de campo I_f .

También se puede observar que el ángulo de fase θ (ángulo cuyo coseno es el factor de potencia) depende de la excitación en el campo en el sentido cualitativo o el voltaje de armadura E_g o la corriente de campo I_f , ya que aumentando uno se incrementa el otro y viceversa.

Para una carga mecánica que demanda una cierta potencia, el factor de potencia del motor se puede ajustar variando la excitación en el campo. Por ejemplo, si se desea que un motor síncrono que acciona una cierta carga opere con una corriente a un factor de potencia unitario, entonces se debe elaborar un diagrama vectorial como el de la [Figura 84](#); o bien por un procedimiento analítico similar se calcula la excitación requerida para cumplir con tal requerimiento.

Figura 84. Diagrama vectorial del motor síncrono



Esto se conoce como la excitación normal para una carga. Si la excitación de campo es mayor que esto, se dice que el motor está “sobreexcitado” y entonces la corriente de armadura I_a esta adelantada con respecto al voltaje de fase, se dice que el motor opera “subexcitado”.

Efecto de la carga en los motores síncronos

Dado que un motor síncrono no tiene par de arranque propio, inicialmente debe ser accionado por algún medio externo como si se tratara de un generador y se sincroniza con el campo producido por la fuente de alimentación.

En el instante de la sincronización la fuerza electromotriz “fem” inducida en el circuito del estator del motor, es igual al voltaje de línea aplicado en sus terminales V_L pero de sentido opuesto vectorialmente.

Dado que $V_L = E_g$ el voltaje resultante es cero y por lo tanto no hay corriente de armadura y tampoco carga y pérdidas que alimentar.

Después de la sincronización el medio de accionamiento externo se retira y el motor tiene la tendencia a bajar sus características de operación, es decir a frenarse, no obstante, no hay cambio en la velocidad, pero hay un desplazamiento en la posición relativa del rotor continuando su operación a la velocidad de sincronismo. El rotor se desplaza ligeramente con respecto a la posición del estator. Al desplazamiento entre los polos del rotor y del estator se le designa como el ángulo δ (grados eléctricos) y se le conoce como el ángulo de par.

En condiciones de vacío el motor demanda una potencia por fase que es suficiente para hacer operar al motor a la velocidad de sincronismo y cuyo valor es:

$$P_{\phi} = V_{\phi} I_a \cos \theta$$

Cuando al motor se le aplica carga en su eje reduce su velocidad momentáneamente, al ajustar por sí mismo en forma momentánea el cambio a las condiciones de carga, de esta manera el rotor cae un poco más atrás con respecto a la posición relativa del estator.

Es decir, el ángulo de par aumenta al aumentar la carga, el voltaje resultante a través del circuito de armadura, y en consecuencia la corriente que se demanda de la fuente de alimentación aumenta, es decir, que el motor síncrono está en posición de aumentar su carga mecánica cambiando su posición relativa entre los ejes del rotor y estator, sin reducir su velocidad.

Cuando la carga mecánica que se aplica a la flecha o eje del rotor en el motor síncrono es muy grande, el rotor puede tener una pérdida transitoria de sincronismo, después de la cual regresa a sus condiciones de estado permanente.

Al valor máximo del par que un motor puede desarrollar sin pérdida de sincronismo se le llama el par de arrastre y su valor puede variar entre el 125% y el 350% del par a plena carga.

La potencia bajo cualquier estado de carga es:

$$P_{\phi} = V_{\phi} I_a \cos \theta ; \text{ potencia por fase}$$

$$P_{3\phi} = \sqrt{3} V_L I_L \cos \theta ; \text{ potencia trifásica}$$

4.1.3 Curva característica par-velocidad

Los motores síncronos suministran potencia a cargas que son básicamente dispositivos de velocidad constante. Al estar conectados a sistemas de potencia mucho más grandes que los motores individuales, los sistemas de potencia aparecen como barrajes infinitos frente a los motores. Esto significa que el voltaje en terminales y la frecuencia del sistema serán constantes, independientemente de la cantidad de potencia tomada por el motor.

La velocidad de rotación del motor está asociada a la frecuencia eléctrica aplicada, de modo que la velocidad del motor será constante, independientemente de la carga; como lo muestra la *Figura 85*.

Figura 85. Curva característica Par VS Velocidad



La velocidad de estado estacionario del motor es constante desde vacío hasta el par máximo que puede suministrar el motor, tal que la regulación de velocidad de este motor es 0%. La ecuación del par es:

$$T_{ind} = \frac{3 V_{\phi} E_g \sin \delta}{\omega_m X_S}$$

El par máximo cuando $\delta = 90^\circ$. Sin embargo, los pares normales de plena carga son muchos menores que aquellos. En efecto, el par máximo puede triplicar el par de plena carga de la máquina.

Cuando el par aplicado en el eje de un motor síncrono excede el par máximo, el rotor no puede permanecer más enlazado a los campos magnéticos estatórico y neto. En cambio, el rotor comienza a disminuir la velocidad frente a ellos. Como el rotor disminuye la velocidad, el campo magnético estatórico se entrecruza con el repetidamente, y la dirección del par inducido en el rotor se invierte con cada paso. El enorme par resultante oscila primero en una forma y luego en otra causando que el motor entero vibre con fuerza. La pérdida de sincronización después que se ha excedido el par máximo, se conoce como deslizamiento de polos. El par máximo del motor está dado por:

$$T_{out} = \frac{3 V_{\phi} E_g}{\omega_m X_S}$$

Esta ecuación indica que cuanto mayor sea la corriente de campo (y por tanto E_g), mayor será el máximo par del motor. Por tanto, hay una ventaja en la estabilidad, si se opera el motor con una gran corriente de campo o un gran E_g .

4.2 Arranque del motor sincrónico.

Los motores síncronos no tienen par de arranque propio, por lo que cada motor se debe llevar primero a la velocidad de sincronismo por algún medio externo antes de ser cargado. De hecho, existen tres métodos básicos para el arranque seguro de un motor síncrono:

1. Reducir la velocidad del campo magnético del estator a un valor suficientemente bajo para que el rotor pueda acelerar y se enlace con él durante medio ciclo de rotación del campo magnético. Esto se puede llevar a cabo *reduciendo la frecuencia de la potencia eléctrica aplicada*.
2. *Utilizar un motor primario externo* para acelerar el motor síncrono hasta la velocidad de sincronismo, pasar por el proceso de entrada de sincronismo y convertir la máquina al instante en un generador. Entonces, apagando o desconectando el motor primario, la máquina síncrona se convertirá en un motor.
3. *Utilizando devanados de amortiguación*.

1. Arranque del motor reduciendo la frecuencia eléctrica.

Si el campo magnético de un rotor síncrono rota a una velocidad suficientemente baja, no habrá dificultad para que el rotor acelere y se enlace con el campo magnético del estator. La velocidad de los campos magnéticos estatóricos se puede aumentar hasta la velocidad de operación, incrementando gradualmente la frecuencia eléctrica hasta alcanzar su valor normal de 50 o 60 Hz.

Este método de arranque de los motores síncronos tiene un gran sentido, pero también tiene un problema grave ¿de dónde se obtiene la frecuencia eléctrica variable?

Los sistemas normales de potencia se regulan cuidadosamente a 50 o 60 Hz por lo que, hasta hace poco, cualquier fuente de voltaje de frecuencia eléctrica variable debería provenir de un generador específico. Tal situación no era práctica, excepto en algunas circunstancias opcionales. Hoy día las cosas son diferentes. Los rectificadores inversores y los ciclos convertidores, que pueden utilizarse para convertir una entrada de frecuencia constante a cualquier frecuencia de salida deseada.

El desarrollo de tal accionamiento de estado sólido y frecuencia variable moderna posibilita el control continuo de la frecuencia eléctrica aplicada al motor en todo el rango desde una fracción de Hertz hasta la frecuencia nominal más elevada. Si tal unidad controladora de frecuencia variable se incluye en un circuito motor—control para controlar la velocidad, entonces es muy fácil poner en marcha los motores síncronos:

simplemente se ajusta la frecuencia a un valor muy bajo para el arranque y luego se eleva hasta la frecuencia de operación deseada por el funcionamiento normal.

Cuando se opera un motor síncrono a una velocidad más baja que la nominal, su voltaje interno generado E_g será menor que el normal. Si E_g se reduce en magnitud, debe reducirse el voltaje aplicado a los terminales del motor para mantener la corriente del estator en niveles seguros.

En todo controlador de frecuencia variable o circuito arrancador de frecuencia variable, el voltaje debe variar casi linealmente con la frecuencia aplicada.

2. Arranque del Motor mediante un Motor Primario Externo

Consiste en fijarle un motor externo de arranque y llevar la máquina hasta su velocidad plena con ese motor. Entonces, la máquina síncrona se puede conectar en paralelo con su sistema de potencia como un generador, y el motor de arranque puede desacoplarse del eje de la máquina. Desconectado el motor de arranque, el eje de la máquina se desacelera, el campo magnético del rotor queda atrás del campo neto y la máquina síncrona comienza a actuar como motor. Una vez completado el proceso de sincronización, el motor síncrono se puede cargar de manera normal.

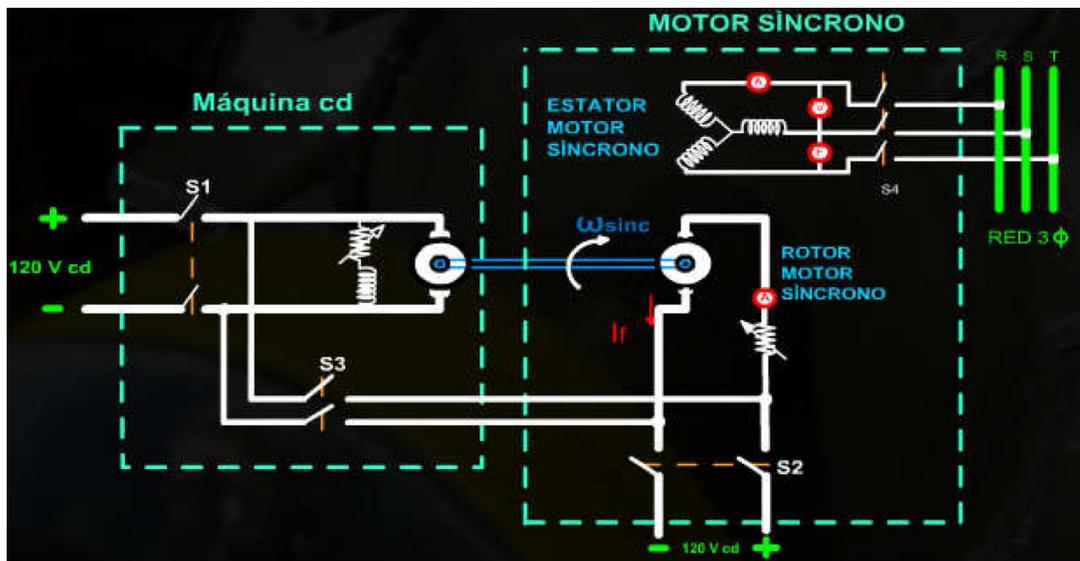
Este proceso completo no es tan absurdo como parece pues muchos motores síncronos forman parte de conjuntos motor—generador y, en estos conjuntos, la otra máquina puede servir como motor de arranque de la máquina síncrona.

Además, el motor de arranque sólo necesita vencer la inercia de la máquina síncrona en vacío, sin carga impuesta hasta que el motor se sincronice con el sistema de potencia. Puesto que únicamente debe ser vencida la inercia del motor, el motor de arranque puede tener una capacidad mucho menor que la del motor síncrono que arranca.

Dado que la mayoría de los motores síncronos tienen sistemas de excitación sin escobillas montados en sus ejes, con frecuencia es posible utilizar esos excitadores como motores de arranque.

Para muchos motores síncronos de mediana y gran potencia, la única solución posible puede ser un motor externo de arranque o arrancador que utiliza el excitador ya que los sistemas de potencia a los que están unidos no están en capacidad de soportar las corrientes de arranque requeridas al utilizar la técnica de los devanados de amortiguación. El esquema utilizado para este método de arranque del motor síncrono es el mostrado en la *Figura 86*.

Figura 86. Esquema Arranque motor Síncrono



3. Arranque de Motores utilizando Devanados de Amortiguación

Es la técnica más popular para el arranque de motores síncronos es emplear devanados de amortiguación o devanados amortiguadores. Estos devanados son barras especiales dispuestas en ranuras labradas en la cara del rotor del motor síncrono y cortocircuitadas en cada extremo por un gran anillo de cortocircuitado.

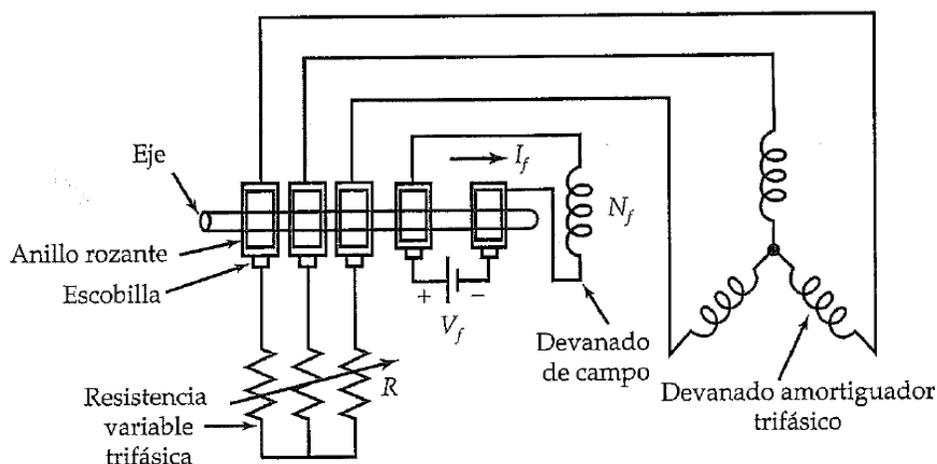
Si se adicionan devanados de amortiguación a una máquina síncrona para el arranque, se obtiene una ventaja gratuita: aumento en la estabilidad de la máquina. El campo magnético del estator rota a velocidad constante, que cambia solo cuando varía la frecuencia del sistema. Si el rotor gira a velocidad constante, los devanados de amortiguación no tienen voltaje inducido alguno. Si el rotor gira más lento que la velocidad síncrona, habrá movimiento relativo entre los campos magnéticos del rotor y del estator, y se inducirá un voltaje en los devanados.

Este voltaje produce un flujo de corriente que, a su vez, produce un campo magnético. La interacción de los dos campos magnéticos produce un par que tiende a acelerar la máquina de nuevo. Si el rotor gira más rápidamente que el campo magnético del estator, se producirá un par que intenta frenar al rotor. En consecuencia, el par producido por los devanados de amortiguación acelera las máquinas lentas y desacelera las rápidas.

Si una máquina tiene devanados de amortiguación, se puede arrancar mediante el siguiente procedimiento:

- Desconecte los devanados de campo de su fuente de potencia DC y cortocircuitélos.
- Aplique un voltaje trifásico al estator del motor y deje acelerar el rotor hasta cerca de la velocidad síncrona. El motor no deberá tener carga en su eje para que su velocidad llegue a ser lo más cercana posible a la velocidad síncrona.
- Conecte el circuito DC de campo a la fuente de potencia. Luego, el motor se pondrá a paso a la velocidad síncrona y las cargas podrán ser acopladas a su eje.

Figura 87. Devanado amortiguador trifásico en el rotor de un motor síncrono



4.3 Curvas “V” del motor síncrono.

Durante la operación en estado permanente de las máquinas síncronas, existen características de operación relevantes que presenta la interacción entre el voltaje terminal, la corriente de campo, la corriente de armadura, el factor de potencia y la eficiencia.

Este tipo de características se puede representar por medio de curvas que tienen aplicación práctica en el caso particular de los motores síncronos; estas curvas se denominan curvas V.

El principio de elaboración de las curvas V parte de la consideración de que, cuando se varía la excitación de un motor síncrono trifásico que demanda potencia constante de una fuente de alimentación con voltaje constante, el factor de potencia del motor cambia. Es decir, el factor de potencia al que opera un motor síncrono y de aquí, su corriente de armadura se puede controlar ajustando su corriente de excitación.

La curva que muestra la relación entre la corriente de armadura y la corriente de campo a voltaje terminal constante, con potencia constante en el eje, se conoce como curva V debido a su forma.

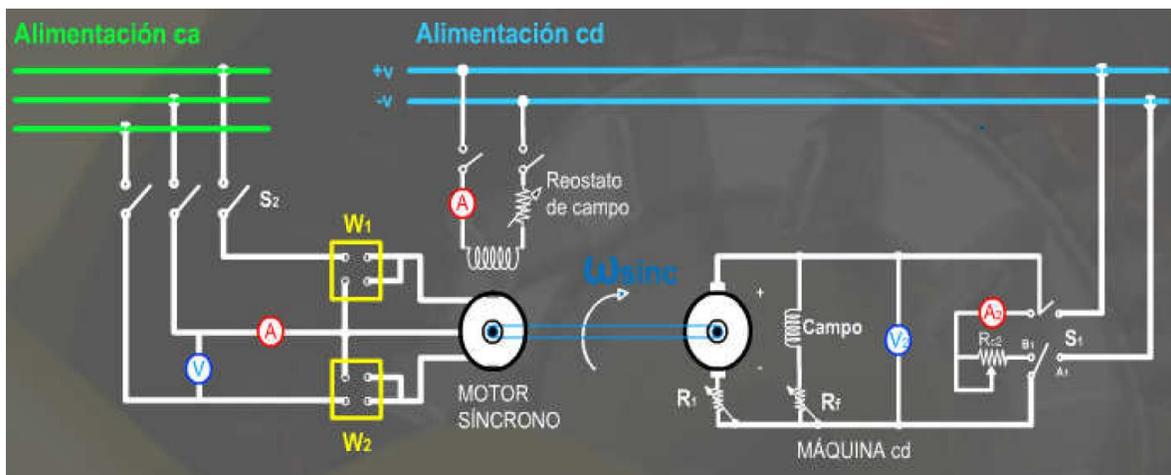
La potencia que demanda un motor síncrono está dada por:

$$P = \sqrt{3} V_L I_a \cos \theta$$

Dado que la potencia es constante y el voltaje de suministro también lo es, una reducción en el factor de potencia origina un incremento en la corriente de armadura o viceversa. Las curvas V para un motor síncrono dan la relación entre la corriente de armadura y la corriente de campo para diferentes potencias de entrada.

La determinación de las curvas V se hacen en forma experimental y para los propósitos didácticos se puede usar un circuito elemental de conexiones como el mostrado en la *Figura 88*.

Figura 88. Esquema Curvas en V



El motor síncrono se arranca con la ayuda de la máquina cd conectado como motor, con S_1 en la posición A_1 en derivación hasta llevarlo a su velocidad nominal; las resistencias R_1 y R_f se emplean respectivamente para el propósito de arrancar y controlar la corriente de campo de la máquina de corriente directa. Durante el arranque la resistencia del control de campo R_f se hace cero.

Cuando el motor síncrono está próximo a la velocidad de sincronismo su devanado de campo se energiza y el voltaje de la máquina alcanza el valor de la barra de alimentación en corriente alterna. De esta forma queda sincronizado y se interrumpe la alimentación de corriente directa abriendo el interruptor S_1 ; en

estas condiciones el motor se encuentra operando en vacío y puede accionar la máquina de corriente directa operando esta como generador. La máquina de corriente directa se hace trabajar como generador en derivación (shunt) haciendo la resistencia R_1 en el circuito de armadura cero, y quedando en la posibilidad de entregar carga al reóstato R_{C2} .

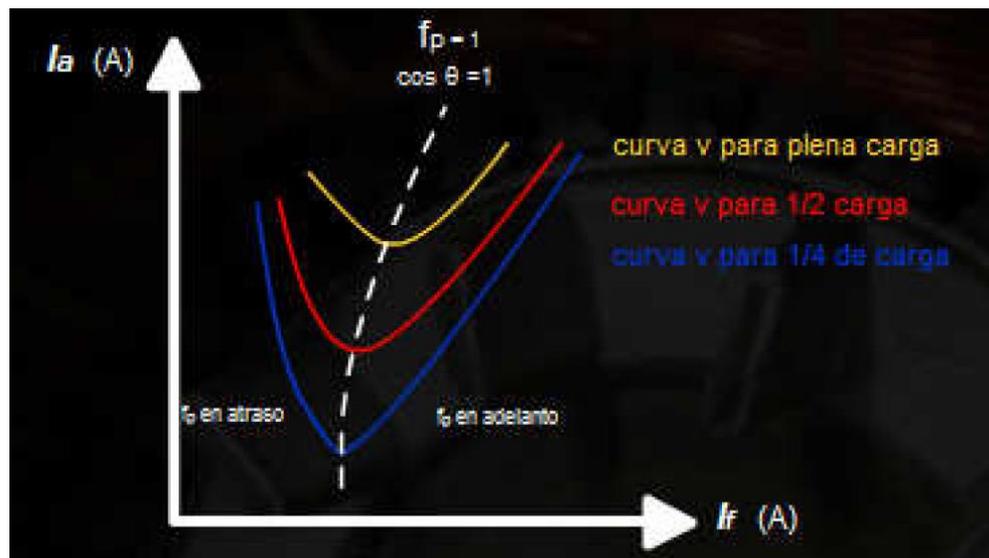
Cuando el motor se encuentra operando en vacío se toman lecturas del amperímetro, voltímetro y vatímetros (W_1 y W_2) en el lado de corriente alterna para diferentes valores de corriente de excitación. La excitación se varía con la ayuda de un reóstato que se instala en el circuito de campo del motor síncrono.

A continuación, se carga el generador de corriente directa pasando S_1 a la posición B_1 de manera que el motor síncrono se cargue aproximadamente a $\frac{1}{4}$ de plena carga.

Manteniendo la carga constante, se toman lecturas nuevamente en el amperímetro, voltímetro y vatímetros en el lado de corriente alterna para diferentes valores de excitación. Este proceso se debe repetir para el 50% de carga y para plena carga en el motor síncrono.

Las curvas V para $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{2}$ y plena carga se muestran en la *Figura 89*.

Figura 89. Curvas Características en V



En las curvas V con diferentes valores de potencia de entrada, se puede observar que a bajos valores de corriente de campo, la corriente de armadura es grande

con respecto al voltaje. En la medida que la corriente de campo se aumenta, el factor de potencia en atraso mejora y la corriente de armadura se reduce hasta alcanzar su valor mínimo. Cuando la corriente de armadura alcanza su valor mínimo, el factor de potencia es unitario y la corriente de campo correspondiente se conoce como corriente de campo normal o excitación del motor para esa carga E_g particular.

El factor de potencia para cualquier valor de corriente de armadura I_{a1} se puede calcular con el auxilio de las curvas V:

$$\cos \theta = \frac{I_{min}}{I_{a1}}$$

I_{min} es la mínima corriente que demanda el motor a una carga dada.

4.4 Modelado del motor sincrónico.

El modelado formal de la máquina síncrona está basado en un principio abstraído de la observación y un modelo es la representación de la teoría que puede ser utilizado para fines de predicción y control. Para que sea útil, un modelo debe ser realístico y al mismo tiempo debe ser simple de comprender y simple de manejar.

El modelo generalizado de la máquina síncrona consta en una representación que cuenta con dos polos, el eje del polo norte es llamado eje directo o eje d, el eje en cuadratura o eje q, está ubicado en una dirección de 90° adelante del eje d.

Cuando la máquina opera sin carga y únicamente excitación de campo, la fmm estará a lo largo del eje d, y el voltaje interno del estator será: $\frac{d\lambda_{of}}{dt}$, y estará largo del q.

El modelo matemático se basa en el concepto de una máquina síncrona generalizada o “ideal” de dos polos. El campo magnético producido por los devanados será asumido como senoidal y distribuido uniformemente en el entrehierro; esta idea implica que va a ignorar los armónicos espaciales producidos por las ranuras del rotor y del estator y que están internamente relacionados con el factor de devanado y el factor de inclinación, que tienen efectos secundarios en el comportamiento de la máquina.

Se asumirá también que las ranuras del estator no producen un efecto apreciable sobre las inductancias de los devanados del rotor. La saturación no se introduce explícitamente, pero puede ser modelada ajustando las reactancias de los ejes aplicando factores de

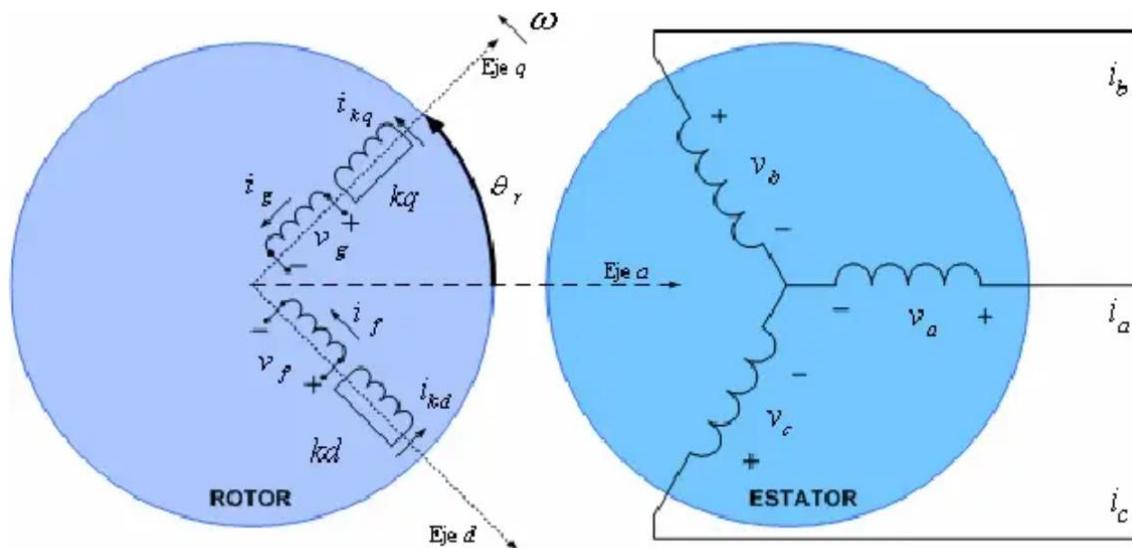
saturación o introduciendo una componente de compensación en la excitación de campo principal.

Se pueden determinar modelos muy exhaustivos de la máquina a través de la consideración de los circuitos magnéticos, pero en general, el acercamiento al estudio se realiza desde la teoría de los circuitos acoplados magnéticamente. Para simular de una manera apropiada la máquina, no solo se necesita elaborar un modelo “representativo”, sino también debemos tener los parámetros apropiados para el modelo adoptado.

Los modelos más sofisticados generalmente requieren de un mayor número de datos que el que se posee, más esfuerzo para desarrollar el software para simularlo y más tiempo de cómputo de los ordenadores. Aun cuando el rotor puede tener un solo devanado físico, se incluyen devanados adicionales para representar los devanados amortiguadores de los generadores de polos salientes y para modelar el efecto de las corrientes de Eddy que fluyen en el hierro del rotor. La experiencia de numerosos científicos en el campo de la simulación demuestra que los generadores síncronos pueden ser adecuadamente representados por el modelo de la máquina generalizada o idealizada con uno o dos devanados de compensación además del devanado de campo. Los devanados de compensación en el modelo de la máquina ideal pueden ser usados para representar devanados amortiguadores físicos, o el efecto de amortiguación de las corrientes de Eddy en la porción de hierro sólido de los polos del rotor.

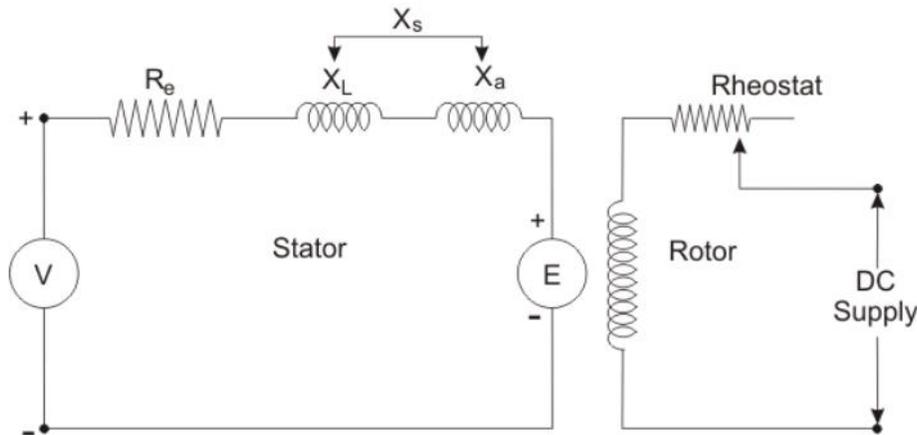
En la siguiente imagen se muestra el modelo idealizado utilizado para la modelación y simulación de la máquina síncrona.

Figura 90. Diagrama de una máquina síncrona



En la actualidad la simulación de sistemas de potencia juega un papel clave en la planeación, diseño y análisis de diferentes factores en todo el mundo, existen numerosos paquetes de ordenador que modelan sistemas no solo eléctricos, sino una gama incalculable de opciones provistas por los fabricantes para las diferentes ramas de la ciencia, en ellos se implementan modelos que han sido comprobados por las autoridades más importantes de cada área, como IEEE, IEE, EPRI, etc.; en el área de la Ingeniería Eléctrica.

Figura 91. Circuito equivalente del modelo de motor síncrono



V = Voltaje de terminal
 R_e = Resistencia efectiva
 X_L = Reactancia de fuga
 X_a = Reactancia ficticia
 X_s = Reactancia sincrónica
 E = Contrapartida fem

En caso de motor síncrono la estructura del campo giratorio debe ser energizada por corriente directa. En el devanado del estator se deben considerar dos efectos: el efecto del corte de los conductores del estator a velocidad sincrónica y el efecto del campo giratorio del estator.

A voltaje inducido en el bobinado del estator debido al campo magnético rotativo. Este voltaje se llama contra-fem (E) opone el voltaje aplicado (V) al estator. La magnitud del EMF inducido depende de la fuerza de la corriente de excitación. En la sección del estator hay dos reactancias contadas, una es la reactancia de fuga y la otra es la reactancia ficticia.

El efecto de la reacción de armadura puede ser sustituido por la reactancia ficticia

(X_a) que cuando se combina con la reactancia de fuga de la armadura da una reactancia sincrónica (X_S) combinado con la resistencia efectiva de la armadura (R_e) da la impedancia sincrónica (Z_S).

4.5 Selección y aplicación de motores sincrónicos.

4.5.1 Aplicación de los motores síncronos

Los motores síncronos para aplicaciones industriales y en sistemas de potencia se pueden encontrar:

1. En las centrales eléctricas y en las subestaciones conectado en paralelo con el barraje del sistema de potencia.
2. En las industrias que tienen un elevado número de motores de inducción, es posible usarlas como una de las alternativas para mejorar el factor de potencia.
3. Al final de algunas líneas de transmisión para controlar el voltaje mediante el procedimiento de variar su excitación.
4. Como elemento de accionamiento de grandes cargas como por ejemplo molinos de cemento, molinos textiles, molinos de hule y en la industria minera entre otros.

Este tipo de motores se usan principalmente para operar en forma continua con equipo que requiere velocidad constante, tal como bombas centrífugas, ventiladores centrífugos, compresores de aire y amoniaco, grupos motor—generador, etc.

Ventajas de los motores síncronos

- El factor de potencia se puede variar como sea requerido.
- Puede dar velocidad constante de condiciones de vacío a condiciones de plena carga.
- La potencia varía linealmente con el voltaje.

Desventajas de los motores síncronos

- No puede ser usado para aplicaciones en donde se requiere velocidad variable ya que no tiene posibilidad de variar su velocidad, a no ser que tengan un variador de frecuencia.

- Requiere de una excitación cd que se debe proveer en algunos casos de una fuente externa.
- No puede arrancar bajo carga ya que su par de arranque es cero.
- Puede salir de sincronismo y parar cuando se sobrecarga.
- Requiere de anillos colectores y de escobillas.

4.5.2 Diversos tipos de motores síncronos trifásicos

Además del motor síncrono convencional, se tiene otros tipos de motores síncronos, siendo los principales los siguientes:

Trifásicos

- Motor síncrono sin escobillas
- Motor síncrono de inducido rotatorio
- Motor síncrono de inducción
- Motor autosíncrono

Monofásicos

- Motor de reluctancia
- Motor de histéresis
- Motor de subsíncrono

Motor síncrono sin escobillas

Los motores síncronos sin escobillas son aquellos que no emplean escobillas en la excitación del campo, que se encuentran en el rotor; sino que se excitan en forma distinta a la conocida.

La excitación del motor síncrono sin escobillas consiste en lo siguiente:

En primer lugar, se tiene una fuente de alimentación de corriente alterna, que se conecta al devanado primario de un transformador, para que en el devanado secundario del mismo transformador suministre la tensión adecuada a los rectificadores, que tienen la función de transformar la corriente alterna en corriente continua, suministrando esta última al devanado de campo de un pequeño alternador de inducido giratorio. Como el devanado del campo está fijo este se conecta en serie con un reóstato para controlar la excitación del pequeño alternador.

Figura 92. Motor síncrono sin escobillas



Motor síncrono de inducido rotatorio

Este es un tipo especial de motor síncrono, cuyo inducido o estator está montado en forma tal, que puede girar alrededor del eje, pero normalmente se mantiene fijo mediante un freno que abraza su periferia exterior.

Para llevar a cabo el arranque, se afloja este freno y se alimenta el motor con un transformador provisto de derivaciones. Como el rotor está conectado a la carga mecánica, el inducido puede girar libremente, comienza a girar alrededor del campo; se lleva a velocidad plena y se excita el campo de modo que el motor gira como síncrono y es capaz de desarrollar su par normal de desenganche. Para transferir lentamente la velocidad de rotación del estator al rotor, se aplica gradualmente el freno del estator y el inducido va deteniéndose a medida que el rotor se acelera hasta llevar a la velocidad de sincronismo.

El motor puede arrancar y soportar cargas que no den lugar a un par mayor que el de desenganche, cuyo valor es generalmente el doble del de plena carga.

Este tipo de motor tiene gran aplicación en fábricas de cementos. Son desde luego más costosos que los comunes, aparte de la presencia del freno complica un poco la maniobra de arranque.

Motor síncrono de inducción

El motor síncrono de inducción se caracteriza en que su estator es similar al de un motor bifásico de inducción, utilizando el devanado del estator como secundario, de tal forma que no se conecta a la línea de alimentación.

El rotor tiene un devanado trifásico, el cual es energizado por medio de anillos

rozantes, dicho devanado se emplea como primario, tomando alimentación de la red. En la parte inferior de las ranuras del rotor por debajo del devanado principal se coloca un devanado de corriente continua, con su correspondiente conmutador.

Cuando el motor funciona en condiciones normales, uno de los devanados del estator queda conectado en serie con el devanado de corriente continua y el otro queda en corto circuito.

Cuando se arranca el motor es necesario intercalarle resistencias en los devanados del estator y posteriormente se eliminan en la medida que se acelera el motor.

Cuando se inicia el arranque del motor, este se efectúa como cualquier motor, con anillos, desarrollando un par de arranque, sin demandar una gran cantidad de corriente.

En la medida que la velocidad del motor crece, se van eliminando las resistencias y el motor se sincroniza automáticamente, desarrollando un fuerte par, por la gran cantidad del flujo producido por el devanado de campo en serie (de corriente continua).

Teniendo la velocidad de sincronismo, el campo giratorio del rotor permanece estacionario en el espacio, teniendo un valor constante como si fuera una máquina de corriente continua; los conductores que se encuentran en el rotor cortan a dicho flujo y generan una tensión continua entre las escobillas, circulando así una corriente continua de las escobillas del conmutador al devanado.

Si se tiene una velocidad inferior a la de sincronismo, la tensión entre las escobillas del conmutador es alterna, con frecuencia igual a la de deslizamiento; sosteniendo el valor anterior ya que el campo giratorio como suele ser en el motor de inducción es prácticamente constante.

Funcionando el motor con velocidad síncrona entre un rango de carga dado por marcha en vacío y un 50% de sobrecarga, punto en el cual se sale de sincronismo y sigue funcionando como motor de inducción. Si la carga disminuye del 150% el motor vuelve a tener la velocidad síncrona.

Para regular el factor de potencia de este motor, es necesario girar las escobillas.

Un motor estándar puede mantener el factor de potencia adelantado, a plena carga y un factor de potencia unitario en el punto de transferencia o de inversión, es decir que puede cumplir una función muy importante mejorando el factor de potencia de una instalación. Teniendo el grave inconveniente de ser más costoso que el motor de inducción común. Cuando se requiere invertir el sentido de giro del motor síncrono de inducción, debe intercambiarse dos terminales y girar las escobillas del conmutador.

Motor autosíncrono

Cuando un motor síncrono varía su carga, el mismo iguala su par al nuevo valor de la carga mediante un ligero desplazamiento del sistema polar inducido con respecto al inductor. Pero en general, no se alcanza el nuevo estado de equilibrio de manera “aperiódica”, sino a través de oscilaciones, de carácter pendular, “alrededor del mismo”. Si dichas oscilaciones se efectuaran con cierto período, llamado “crítico”, dependiente de la inercia de las partes en movimiento, y del comportamiento de la fuerza motriz, podría producirse una exaltación de las mismas y también de la desincronización de la máquina.

Para alejar esa eventualidad, en general son suficientes las mismas corrientes parásitas que, por el efecto del momentáneo asincronismo del sistema, se generan en las expansiones polares; este fenómeno se explica fácilmente pensando que en tales condiciones se origina un “par de un motor de inducción”, el cual, siendo siempre contrario al movimiento relativo del sistema polar del rotor con respecto al estator, amortigua rápidamente la misma oscilación, transformándose en calor la energía correspondiente a la misma.

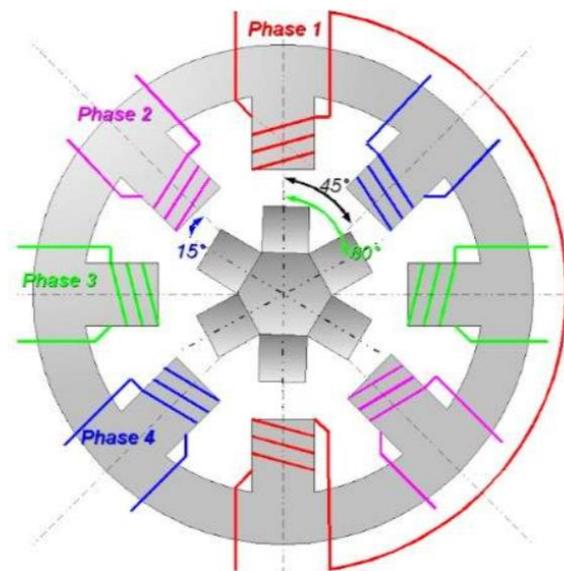
Para intensificar dicha acción, es útil la presencia, en los lados extremos de los polos del inductor, de los devanados “amortiguadores” (constituidos por pequeñas barras paralelas al eje de la máquina y unidas sobre los frentes con dos anillos). Dicho devanado amortiguadores constituyen un medio apto para facilitar el arranque de los motores de inducción o asincronismo polifásico, puesto que los mismos se comportan sustancialmente como el inducido en corto circuito de un motor de inducción, del cual el inducido del síncrono funciona como inductor.

Sobre este principio están basados algunos motores, llamados autosíncronos, los cuales, en la fase de puesta marcha, se comportan como asíncrono de jaula de ardilla, mientras que alcanzando el sincronismo, los devanados amortiguadores ya no están recorridos por corriente por haber desaparecido su movimiento relativo con respecto al campo giratorio generado por las corrientes del estator.

Motor de reluctancia

Los motores síncronos de inducción monofásicos y con polos salientes, suelen llamárseles por lo general motores de reluctancia. Si el rotor de cualquier motor de inducción monofásico de distribución uniforme es alterado con laminaciones delgadas para producir rotores de polos salientes. La reluctancia que se opone a la trayectoria del flujo magnético en el entrehierro, será mayor cuando no hay conductores empotrados en ranuras; estos motores logran velocidades tales como las obtenidas en los motores de inducción que se lleva a sincronismos a través de pulsaciones del campo magnético monofásico por el par de reluctancia desarrollado en los polos salientes, en la cual en dicha zonas se tienen reluctancias de menor valor en el entrehierro.

Figura 93. Devanados del motor de reluctancia



Este motor, en el momento de arranque desarrolla un par del orden de 300 a 400% del par nominal, esto depende de la posición del rotor con la no-simetría de él, con respecto al arrollamiento del inductor, como en el caso de los motores bifásicos.

Una vez arrancado el motor, el campo magnético del estator como el del rotor, logra como resultado una velocidad cercana a la de sincronismo; un interruptor centrífugo abre la bobina de arranque, y el motor continua desarrollando un par producido por la bobina de trabajo, únicamente, cuando se aproxima a la velocidad síncrona el par de reluctancia (desarrollado como motor síncrono) es suficiente para llevar el rotor a la velocidad de sincronismo con pulsaciones del

campo monofásico. El motor opera con velocidad constante, monofásico; teniendo así un motor síncrono sin excitación sin excitación con un par arriba del 200% del nominal, si por alguna circunstancia el motor llevara una carga mayor de lo que corresponde al valor del par de arranque, este desde luego no se pararía, sino que sigue su marcha, pero ahora opera como motor de inducción monofásico, hasta un valor de 500% del par a plena carga.

Figura 94. Motores de reluctancia



VIDEO

<https://youtu.be/lpKbCs8uwDo>

Motor de histéresis

El motor monofásico síncrono de inducción de rotor cilíndrico es comúnmente llamado motor de histéresis. La diferencia de este motor y el anterior, es la forma del rotor y la naturaleza del par producido.

Mientras que el rotor de reluctancia es llevado a la velocidad de sincronismo y funciona debido a un par de reluctancia; el motor de histéresis se lleva a sincronismo y funciona debido a un par de histéresis. El rotor del motor usualmente está hecho de un acero de alta retentividad, más que de un acero comercial de baja resistividad. Un acero de alta retentividad produce mayores pérdidas por histéresis, y su cantidad apreciable de energía es consumida debido al campo giratorio cuando la corriente del rotor se invierte. Al mismo tiempo el campo magnético del rotor actúa debido a las corrientes parásitas para que el rotor gire; un alto par de arranque es producido como resultado de la alta resistencia del rotor (proporcional a las pérdidas por histéresis).

Como el rotor alcanza velocidad síncrona, la frecuencia de la corriente decrece, cuando se invierte en las barras cruzadas y el rotor queda permanentemente magnetizado en una sola dirección como resultado de la alta retentividad del acero. La magnitud del par producido como resultado de esta magnetización no es mayor que el par de reluctancia; pero el par de histéresis es extremadamente fijo, razón por la cual el motor se emplea para tocadiscos, tocacintas, etc.

Motor subsíncrono

Este motor funciona de la misma forma que el motor de histéresis, los polos del estator inducen por histéresis a mantenerse en puntos fijos con el rotor, como el rotor gira en sincronismo con el campo magnético del estator; ello hace el par de histéresis en ambos campos magnéticos; como el par varía inversamente a la velocidad, cuando disminuye la velocidad, el motor subsíncrono desarrollará un mayor par; por consiguiente con este motor se puede tener un par de mayor magnitud cuando se tiene una velocidad lenta y constante.

Una distinción final entre el par de reluctancia y el par de histéresis, es que, todos los motores que tienen par de reluctancia, requieren de un motor de inducción para llevar a la velocidad cercana a la de sincronismo y luego se aplica el par de reluctancia para que el motor opere con una velocidad síncrona constante.

Los motores de histéresis y los motores subsíncronos, también de arranque propio y llegan a una velocidad síncrona completa. Cuando se tiene mayor resistencia en el rotor debido a las pérdidas por histéresis, se tendrá por consiguiente en los motores de histéresis un mayor par de arranque y menor desplazamiento del campo magnético del rotor con respecto al del estator, que en los motores que tienen par de reluctancia.

La diferencia del motor subsíncrono y del motor de histéresis se puede distinguir en que el primero opera con una velocidad más baja con respecto al segundo, también se puede observar otra diferencia en lo que corresponde a su construcción.

Condensadores síncronos

Una de las ventajas adicionales del uso de los motores síncronos en instalaciones eléctricas de potencia, es el hecho de que pueden operar con factor de potencia en atraso, unitario o en adelanto; siendo de especial interés el último caso.

Esta característica de operación hace que cuando opere con otras cargas inductivas, como por ejemplo motores de inducción, que operan a factor de potencia atrasado, la potencia reactiva suministrada por el motor síncrono a factor de potencia adelantado compensa a la potencia reactiva a factor de potencia atrasado proporcionada por otros motores, mejorando de esta manera el factor de potencia global de la instalación.

La corrección del factor de potencia se logra haciendo operar el motor síncrono en vacío y en forma sobreexcitada de manera que la corriente se adelante del voltaje 90° .

De esta manera se dice que el motor “flota” sobre la línea de alimentación al no tener carga mecánica y entonces opera como si se tratará de un capacitor estático y de aquí viene el nombre de condensador síncrono o también capacitor síncrono.

El condensador síncrono usado específicamente para tal fin tiene diferencias con respecto al motor síncrono (usado como tal), requiere de más cobre en el devanado de campo para poder conducir el incremento en la corriente de campo. Por otra parte, las chumaceras y el eje pueden ser menos robustos al no requerir de par para la carga.

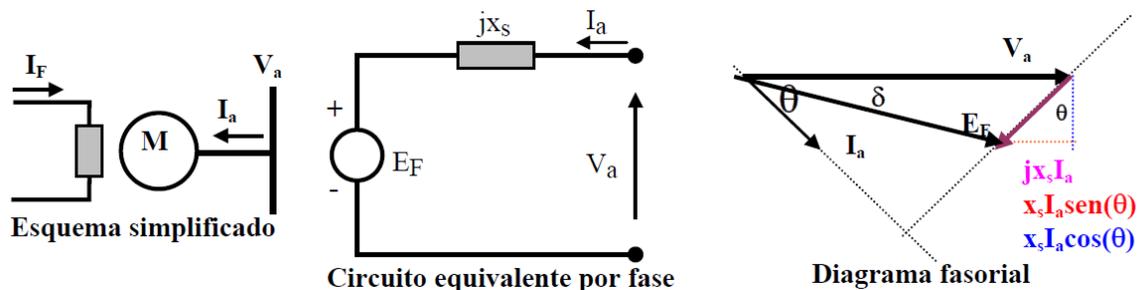
Ejercicios del Tema 4

EJERCICIO 1

Un motor sincrónico trifásico de polos cilíndricos, conectado en estrella a 1732 volt entre línea, $R_a=0$, $X_s=10 \Omega$. Las pérdidas de potencia por fricción mecánica y del aire más las del núcleo suman 9 kW. La potencia de salida es de 390 HP. La tensión de excitación máxima (E_{Fmax}) es de 2500 volt por fase. Determinar:

- La corriente de armadura I_a , el factor de potencia a E_{Fmax} .
- E_{Fmin} .

Solución



a) La corriente de armadura I_a y el factor de potencia a E_{Fmax}

$$V_a = E_F + jx_s I_a \quad I_a = \frac{|V_a|/0^\circ - |E_F|/-\delta}{jx_s}$$

$$P_a = \frac{V_a E_{Fmax}}{x_s} \text{sen} \delta = P_{salida} + P_{pérdidas} = \frac{390 \cdot 746 + 9000}{3} = 99980$$

$$\delta = \text{sen}^{-1} \left[\frac{P_a x_s}{V_a E_{Fmax}} \right] = \text{sen}^{-1} \left[\frac{99980 \cdot 10}{\frac{1732}{\sqrt{3}} \cdot 2500} \right] = 23.57^\circ$$

$$I_a = \frac{\frac{1732}{\sqrt{3}} - 2500/-23.57}{j10} = 163.32/52.26^\circ$$

$$FP = \cos(52.26^\circ) = 0.61 \text{ en adelante}$$

b) E_{Fmin} . : Para determinar E_{Fmin} debemos calcularlo a P_a con $\delta=90^\circ$ ($\text{sen}\delta=1$).

$$E_{Fmin} = \frac{P_a x_s}{V_a} = \frac{99980 \cdot 10}{\frac{1732}{\sqrt{3}}} = 999.83 \text{ volt / fase - neutro}$$

EJERCICIO 2

Un motor sincrónico trifásico en conexión estrella, de 380 V entre fases, 1500 rpm, 50 Hz, 100 kW con FP=1 y tensión nominal. R_a = despreciable, $x_s=0.5 \Omega$. El motor desarrolla 100 kW en el eje, FP a 0.8 inductivo y tensión nominal. Se ajusta la corriente de campo para un factor de potencia de 0.8 capacitivo. Determinar:

- La corriente de campo aumenta o disminuye.
- Cual será la nueva corriente de armadura.
- Qué magnitud tiene la tensión inducida antes del ajuste.
- Qué magnitud tendrá la tensión inducida después del ajuste.
- Cuál es el torque desarrollado por el motor.

Solución

a) La corriente de campo aumenta o disminuye La respuesta se obtiene de las curvas V del motor sincrónico. Estas curvas, representan la variación que experimenta la corriente de armadura en función de la tensión de campo (ó corriente de campo) cuando se mantiene constante la potencia activa en la entrada del motor.

Empleando las siguientes ecuaciones, se puede determinar la curva V para una potencia P_a constante.

$$S_a = V_a I_a^* = P_a + jQ_a$$

$$V_a = E_F + jx_s I_a \quad I_a = \frac{V_a - E_F}{jx_s}, \quad V_a = |V_a| \angle 0^\circ, \quad E_F = |E_F| \angle -\delta$$

$$S_a = V_a \left[\frac{V_a - E_F}{jx_s} \right]^* = \frac{|V_a|^2}{-jx_s} + \frac{V_a E_F^*}{jx_s} = j \frac{|V_a|^2}{x_s} - j \frac{|V_a| |E_F| \angle \delta}{x_s}$$

$$S_a = j \frac{|V_a|^2}{x_s} - j \frac{|V_a| |E_F|}{x_s} [\cos \delta + j \text{sen } \delta] = \frac{|V_a| |E_F|}{x_s} \text{sen } \delta + j \frac{|V_a|}{x_s} [|V_a| - |E_F| \cos \delta]$$

$$P_a = \frac{V_a E_F}{x_s} \text{sen } \delta \quad (1) \quad Q_a = \frac{|V_a|}{x_s} [|V_a| - |E_F| \cos \delta] \quad (2)$$

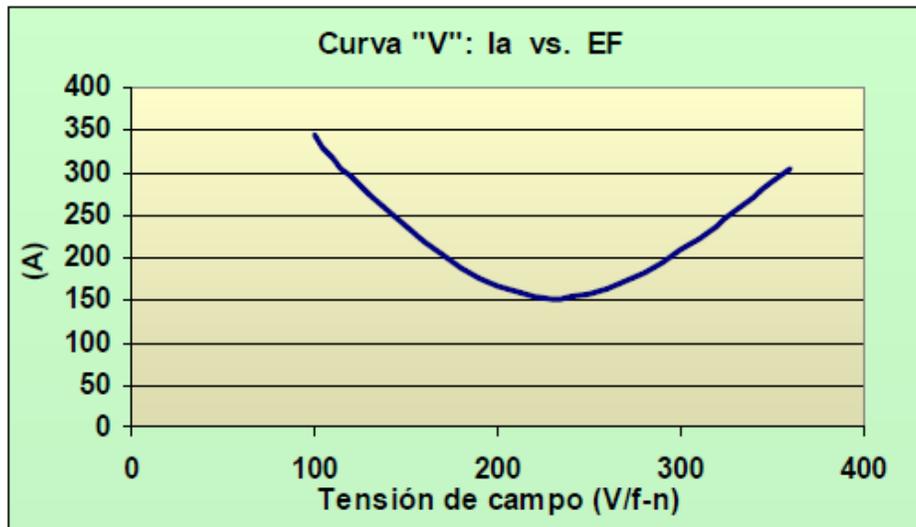
$$I_a = \frac{|S_a|}{|V_a|} = \frac{\sqrt{P_a^2 + Q_a^2}}{V_a} \quad (3)$$

Procedimiento:

- Dado EF se calcula δ a partir de ec.(1)
- Se calcula Q_a de ec.(2)
- Se calcula I_a de ec. (3)
- Repetir lo anterior para otros valores de EF

Considerando los datos del problema se obtiene la siguiente tabla de resultados y su correspondiente gráfica:

EF[V]	Ia[A]	Pa[W]	δ [°]	Qa[Var]	Sa[VA]	FP	Tipo FP
100	344	33333	-49.44	67732	75490	0.4416	atraso
110	318	33333	-43.68	61359	69829	0.4774	atraso
120	295	33333	-39.28	55507	64747	0.5148	atraso
130	274	33333	-35.76	49977	60074	0.5549	atraso
140	254	33333	-32.86	44667	55734	0.5981	atraso
150	236	33333	-30.43	39514	51696	0.6448	atraso
160	219	33333	-28.35	34479	47957	0.6951	atraso
170	203	33333	-26.54	29535	44536	0.7485	atraso
180	189	33333	-24.96	24664	41466	0.8039	atraso
190	177	33333	-23.57	19851	38797	0.8592	atraso
200	167	33333	-22.32	15086	36588	0.9110	atraso
210	159	33333	-21.21	10362	34907	0.9549	atraso
220	154	33333	-20.20	5671	33812	0.9858	atraso
230	152	33333	-19.29	1010	33349	0.9995	atraso
240	153	33333	-18.45	-3627	33530	0.9941	adelanto
250	157	33333	-17.69	-8243	34337	0.9708	adelanto
260	163	33333	-16.99	-12839	35721	0.9332	adelanto
270	171	33333	-16.34	-17420	37611	0.8863	adelanto
280	182	33333	-15.74	-21985	39931	0.8348	adelanto
290	194	33333	-15.19	-26538	42607	0.7823	adelanto
300	208	33333	-14.67	-31079	45574	0.7314	adelanto
310	222	33333	-14.19	-35610	48777	0.6834	adelanto
320	238	33333	-13.73	-40131	52169	0.6389	adelanto
330	254	33333	-13.31	-44644	55715	0.5983	adelanto
340	271	33333	-12.91	-49149	59386	0.5613	adelanto
350	288	33333	-12.54	-53647	63160	0.5278	adelanto
360	305	33333	-12.18	-58139	67017	0.4974	adelanto



Para una tensión igual a 230 (V) el motor funciona con factor de potencia igual a uno.

Con tensión de campo menor que 230 (V), el motor funciona con un factor de potencia en atraso y si la tensión de campo es mayor que 230 (V), el motor funciona con factor de potencia en adelanto. En resumen, para ajustar el FP desde un valor en atraso a un valor en adelanto se debe aumentar la tensión de campo a través del aumento de la corriente de campo.

b) Cual será la nueva corriente de armadura.

La corriente de armadura con FP=0.80 inductivo (atraso), es:

$$P_{a3\phi} = \sqrt{3}VI \cos \theta \quad \text{ó} \quad P_{a3\phi} = 3V_a I_a \cos \theta$$

$$|I_a| = \frac{100000}{\sqrt{3} \cdot 380 \cdot 0.80} = 189.92 \text{ (A)} \quad I_a = 189.92 / -36.87^\circ$$

La corriente de armadura con FP=0.80 capacitivo (adelanto) tiene el mismo valor que con factor de potencia 0.80 inductivo, sólo cambia en sentido de la componente reactiva de la corriente de armadura, esto es:

$$I_a = 189.92 / +36.87^\circ$$

c) Qué magnitud tiene la tensión inducida antes del ajuste.

$$V_a = E_F + jx_s I_a$$

$$E_F = V_a - jx_s I_a = \frac{380}{\sqrt{3}} / 0^\circ - j0.5 \cdot 182.92 / -36.87^\circ$$

$$E_F = 179.31 / -25.07 \text{ (V / f - n)}$$

d) Qué magnitud tendrá la tensión inducida después del ajuste.

$$E_F = V_a - jx_s I_a = \frac{380}{\sqrt{3}} / 0^\circ - j0.5 \cdot 182.92 / +36.87^\circ$$

$$E_F = 286.621 / -15.37 \text{ (V / f - n)}$$

e) Cuál es el torque desarrollado por el motor.

$$T = \frac{P_{Salida}}{\omega_s} \text{ (Newton - m)}$$

$$\omega_s = \frac{2\pi N_s}{60} = \frac{2\pi 1500}{60}$$

$$T = \frac{100000}{\frac{2\pi 1500}{60}} = 636.62 \text{ (N - m)}$$

EJERCICIO 3

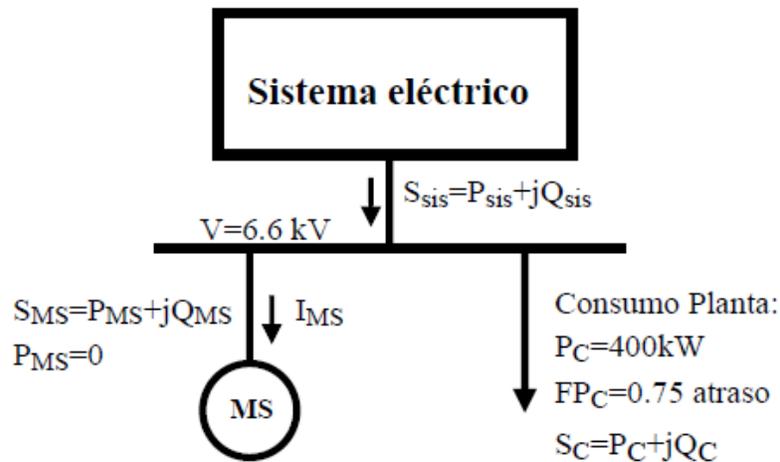
Un motor sincrónico de 6.6 kV, 45 A se emplea como compensador sincrónico para corregir el factor de potencia de una planta que consume 400 kW a $\text{fp}=0.75$ en atraso.

Calcular la potencia reactiva, la corriente de armadura y la fem inducida (EF) por el campo del motor, en valor absoluto y en %, si se desea que el factor de potencia del conjunto planta y compensador sincrónico sea de:

- a) 0.95 en atraso
- b) 1.0
- c) 0.95 en adelanto

Suponga que la reactancia sincrónica del motor es de 0.85 Ω , despreciar las pérdidas y considerar que el motor está en vacío.

Solución



Como la reactancia sincrónica del MS está en por unidad (0/1), se supone que los valores bases corresponden a los valores nominales del MS, esto es:

Corriente base $I_B = 45 \text{ A}$, tensión base $V_B = 6.6 \text{ kV}$ y potencia base

$$S_B = \sqrt{3} V_B I_B = \sqrt{3} \cdot 6.6 \cdot 45 = 514.42 \text{ kVA}$$

De acuerdo con los sentidos de flujos de potencia se debe cumplir en la barra del sistema la ley de Kirchoff de potencia, esto es:

$$S_{sis} = S_C + S_{MS}$$

$$P_{sis} = P_C$$

$$Q_{sis} = Q_C + Q_{MS}$$

Donde:

$$Q_C = \frac{P_C}{FP_C} \text{sen}[\cos^{-1}(FP_C)] = \frac{400}{0.75} \text{sen}[\cos^{-1}(0.75)] = 352.77 \text{ kVAr}$$

La incógnita del problema es determinar la potencia reactiva que toma (absorbe) el motor QMS para los factores de potencia solicitados, esto es:

$$Q_{MS} = Q_{sis} - Q_C \quad , \quad Q_{sis} = \frac{P_{sis}}{FP_{sis}} \operatorname{sen}[\cos^{-1}(FP_{sis})]$$

Como $P_{sis} = P_C$, se tiene

$$Q_{sis} = \frac{P_C}{FP_{sis}} \operatorname{sen}[\cos^{-1}(FP_{sis})] \quad , \quad Q_{sis} = \frac{400}{FP_{sis}} \operatorname{sen}[\cos^{-1}(FP_{sis})] \quad (kVAR)$$

$$S_{MS} = \sqrt{3}V_{MS}I_{MS}^* = 0 + jQ_{MS}$$

$$I_{MS} = \left[\frac{S_{MS}}{\sqrt{3}V_{MS}} \right]^* = -j \frac{Q_{MS}}{\sqrt{3}|V_{MS}|} \quad (A)$$

$$I_{MS} \text{ en valor absoluto} = \frac{Q_{MS}}{\sqrt{3}|V_{MS}|} \quad (A)$$

$$I_{MS} \text{ en } 0/1 = \frac{I_{MS}}{I_B}$$

$$E_F = V_{MS} - jx_s I_{MS}$$

a) $fp = 0.95$ en atraso

$$Q_{sis} = \frac{400}{0.95} \operatorname{sen}[\cos^{-1}(0.95)] = 131.47 \quad (kVAR)$$

$$Q_{MS} = Q_{sis} - Q_C = 131.47 - 352.77 = -221.30 \quad (kVAR)$$

$$Q_{MS} = \frac{Q_{MS}}{S_B} = \frac{-221.30}{514.42} = -0.4302 \quad (0/1)$$

$$I_{MS} = -j \frac{-221.30 \quad (kVAR)}{\sqrt{3} \cdot 6.6 \quad (kV)} = j19.36 \quad (A)$$

$$I_{MS} \text{ en } 0/1 = \frac{j19.36}{45} = j0.4302 \quad (0/1)$$

$$V_{MS} = \frac{V_{MS}}{V_B} = \frac{6.6/0^\circ}{6.6} = 1/0^\circ \quad (0/1)$$

$$E_F = 1 - j0.85 \cdot j0.4302 = 1 + 0.85 \cdot 0.4302 = 1.3657/0^\circ \quad (0/1)$$

$$E_F = E_F \cdot V_B = 1.3657/0^\circ \cdot 6.6 = \sqrt{3} \cdot 5.2040 \quad (kV)$$

b) $fp = 1.0$

$$Q_{sis} = \frac{400}{1} \text{sen}[\cos^{-1}(1)] = 0 \text{ (kVAr)}$$

$$Q_{MS} = Q_{sis} - Q_C = -352.77 \text{ (kVAR)}$$

$$Q_{MS} = \frac{Q_{MS}}{S_B} = \frac{-352.77}{514.42} = -0.6858 \text{ (0/1)}$$

$$I_{MS} = -j \frac{-352.77 \text{ (kVAr)}}{\sqrt{3} \cdot 6.6 \text{ (kV)}} = j30.86 \text{ (A)}$$

$$I_{MS} \text{ en } 0/1 = \frac{j19.36}{45} = j0.6858 \text{ (0/1)}$$

$$E_F = 1 - j0.85 \cdot j0.6858 = 1 + 0.85 \cdot 0.6858 = 1.5829/\underline{0^\circ} \text{ (0/1)}$$

$$E_F = E_F \cdot V_B = 1.5829/\underline{0^\circ} \cdot 6.6 = \sqrt{3} \cdot 6.0320 \text{ (kV)}$$

c) $\text{fp} = 0.95$ en adelanto

$$Q_{sis} = -\frac{400}{0.95} \text{sen}[\cos^{-1}(0.95)] = -131.47 \text{ (kVAr)}$$

$$Q_{MS} = Q_{sis} - Q_C = -131.47 - 352.77 = -484.24 \text{ (kVAR)}$$

$$Q_{MS} = \frac{Q_{MS}}{S_B} = \frac{-484.24}{514.42} = -0.9413 \text{ (0/1)}$$

$$I_{MS} = -j \frac{-483.24 \text{ (kVAr)}}{\sqrt{3} \cdot 6.6 \text{ (kV)}} = j42.36 \text{ (A)}$$

$$I_{MS} \text{ en } 0/1 = \frac{j19.36}{45} = j0.9413 \text{ (0/1)}$$

$$E_F = 1 - j0.85 \cdot j0.9413 = 1 + 0.85 \cdot 0.9413 = 1.80/\underline{0^\circ} \text{ (0/1)}$$

$$E_F = E_F \cdot V_B = 1.80/\underline{0^\circ} \cdot 6.6 = \sqrt{3} \cdot 6.8590 \text{ (kV)}$$

Tema 5 Máquinas de corriente directa, operación como generador

Las máquinas de corriente directa (continua) se dividen en generadores, también llamado dinamo y motores.

La cantidad de energía que produce un generador de corriente directa es más baja que la de un generador de corriente alterna. Es por eso que, en general, los generadores de corriente alterna son más populares, porque permiten generar mucha más energía con la misma cantidad de combustible.

Aún así los generadores de corriente directa tienen la ventaja de producir energía conocida como limpia. El ritmo de producción de energía de un generador de corriente directa es estable, lo que hace que dicha energía sea adecuada para interactuar con aparatos que contengan elementos de microtecnología, como teléfonos móviles o determinados aparatos informáticos. Los generadores que producen energía alterna directamente pueden llegar a estropear dichos elementos a causa de la fluctuación de la producción de energía.

Pese a todo esto, hay que destacar que los generadores de energía puramente continua (directa) generan una cantidad tan reducida de energía que sus usos se limitan a tareas que requieren un voltaje muy reducido como para cargar teléfonos móviles, conectar portátiles, etc.

Es por lo que generadores eléctricos de gran calibre que producen energía limpia lo hacen mediante un proceso de generación de corriente continua que, posteriormente, se transforma en corriente alterna. De esta manera se puede producir energía limpia que el hecho de ser transformada en corriente alterna evita que se desperdicie, optimizando el voltaje producido.

Una de las características de los dinamos (generadores de corriente directa) es que son máquinas reversibles: se pueden utilizar tanto como generador o como motor.

En este tema se abordará los aspectos constructivos, el principio de funcionamiento de la máquina de corriente directa tanto generador y como motor; la clasificación de los generadores y las variables que intervienen en su operación, como son voltajes, corrientes, potencia, eficiencia, el par desarrollado, regulación de voltaje, etc.

5.1 Aspectos constructivos de las máquinas de corriente directa.

Un generador es una máquina eléctrica rotativa que transforma energía mecánica en energía eléctrica en corriente directa. Lo consigue gracias a la interacción de sus componentes principales: el rotor (parte giratoria) y el estátor (parte estática).

Cuando un generador eléctrico está en funcionamiento, una de las dos partes genera un flujo magnético (actúa como inductor) para que el otro lo transforme en electricidad (actúa como inducido).

Los generadores eléctricos se diferencian según el tipo de corriente que producen, dando lugar a dos grandes grupos: los alternadores y las dinamos. Los alternadores generan electricidad en corriente alterna y las dinamos generan electricidad en corriente continua.

La corriente continua presenta grandes ventajas, entre las cuales está su capacidad para ser almacenada de una forma relativamente sencilla. Esto, junto a una serie de características peculiares de los motores de corriente continua, y de aplicaciones de procesos electrolíticos, tracción eléctrica, entre otros, hacen que existan diversas instalaciones que trabajan basándose en la corriente continua.

En las máquinas de corriente continua hay generadores que convierten energía mecánica en energía eléctrica de corriente continua, y motores que convierten energía eléctrica de corriente continua en energía mecánica.

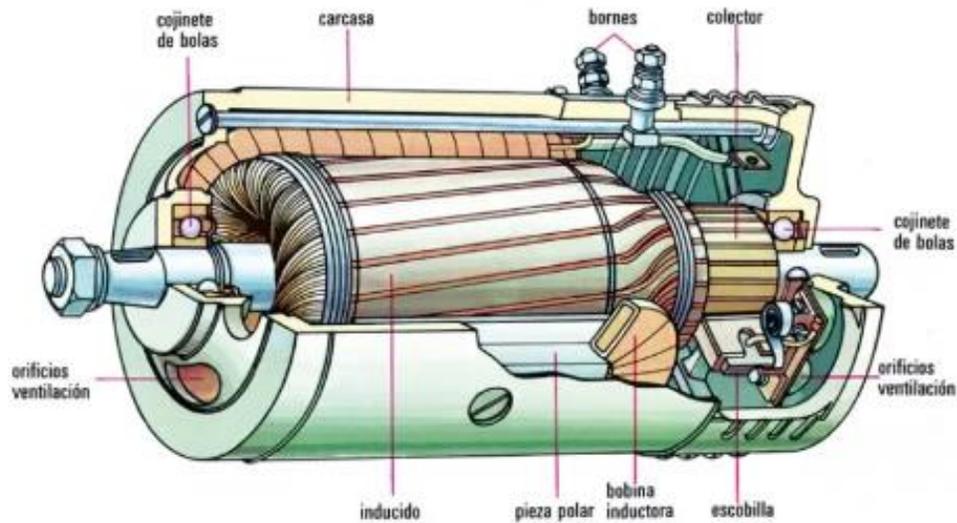
No existe diferencia real entre un generador y un motor, a excepción del sentido de flujo de potencia. La mayoría las máquinas de corriente continua son semejantes a las máquinas de corriente alterna ya que en su interior tienen corrientes y voltajes de corriente alterna.

Las máquinas de corriente continua tienen corriente continua sólo en su circuito exterior debido a la existencia de un mecanismo que convierte los voltajes internos de corriente alterna en voltajes corriente continua en los terminales.

Este mecanismo se llama colector, y por ello las máquinas de corriente continua se conocen también como máquinas con colector. *Figura 95*

Los generadores se clasifican de acuerdo con la forma en que se provee el flujo de campo, y éstos son de excitación independiente, derivación, serie, excitación compuesta acumulativa y compuesta diferencial, y además difieren de sus características terminales (voltaje, corriente) y por lo tanto en el tipo de utilización.

Figura 95. Máquina de corriente directa



La máquina de corriente continua consta básicamente de las partes siguientes:

INDUCTOR

Es la parte de la máquina destinada a producir un campo magnético, necesario para que se produzcan corrientes inducidas, que se desarrollan en el inducido.

El inductor consta de las partes siguientes:

Pieza polar

Es la parte del circuito magnético situada entre la culata y el entrehierro, incluyendo el núcleo y la expansión polar.

- Núcleo: Es la parte del circuito magnético rodeada por el devanado inductor.
- Devanado inductor: es el conjunto de espiras destinado a producir el flujo magnético, al ser recorrido por la corriente eléctrica.
- Expansión polar: es la parte de la pieza polar próxima al inducido y que bordea al entrehierro.

Polo auxiliar o de conmutación

Es un polo magnético suplementario, provisto o no, de devanados y destinado a mejorar la conmutación. Suelen emplearse en las máquinas de mediana y gran potencia.

Culata

Es una pieza de sustancia ferromagnética, no rodeada por devanados, y destinada a unir los polos de la máquina.

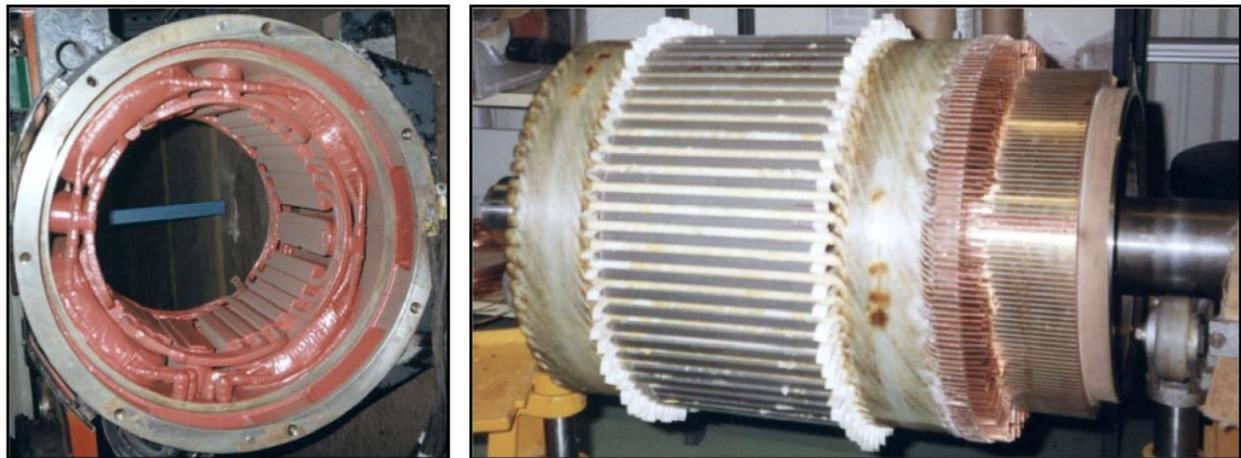
El devanado inductor o de campo son las bobinas que están devanadas en los polos, de forma que éstos alternan su polaridad. Existen dos tipos: un devanado del campo shunt y un devanado del campo serie.

El devanado de campo shunt tiene muchas vueltas de alambre delgado y recibe ese nombre porque se conecta en paralelo con el devanado de la armadura.

El devanado del campo serie, se conecta en serie con el devanado de la armadura y tiene comparativamente pocas vueltas de conductor grueso. Una máquina de cd puede tener ambos devanados del campo arrollados en el mismo polo.

Una máquina con un devanado del campo shunt se llama máquina shunt. Una máquina serie se devana sólo con devanado del campo serie. Una máquina compound, o compuesta, tiene ambos devanados. Cuando en una máquina compound los dos devanados del campo producen flujos en la misma dirección, la máquina es de tipo acumulativo. La máquina es de tipo diferencial cuando al campo que establece el devanado del campo shunt se opone el campo que establece el devanado del campo en serie.

Figura 96. Estator y rotor de una máquina de corriente continua durante el proceso de fabricación



INDUCIDO

Es la parte giratoria de la máquina, también llamado rotor. El inducido consta de las siguientes partes:

- Devanado inducido: es el devanado conectado al circuito exterior de la máquina y en el que tiene lugar la conversión principal de la energía

- Colector: es el conjunto de láminas conductoras (delgas), aisladas unas de otras, pero conectadas a las secciones de corriente continua del devanado y sobre las cuales frotan las escobillas.
- Núcleo del inducido: Es una pieza cilíndrica montada sobre el cuerpo (o estrella) fijado al eje, formada por núcleo de chapas magnéticas. Las chapas disponen de unas ranuras para alojar el devanado inducido.

ESCOBILLAS

Son piezas conductoras destinadas a asegurar, por contacto deslizante, la conexión eléctrica de un órgano móvil con un órgano fijo.

ENTREHIERRO

Es el espacio comprendido entre las expansiones polares y el inducido; suele ser normalmente de 1 a 3 mm, lo imprescindible para evitar el rozamiento entre la parte fija y la móvil.

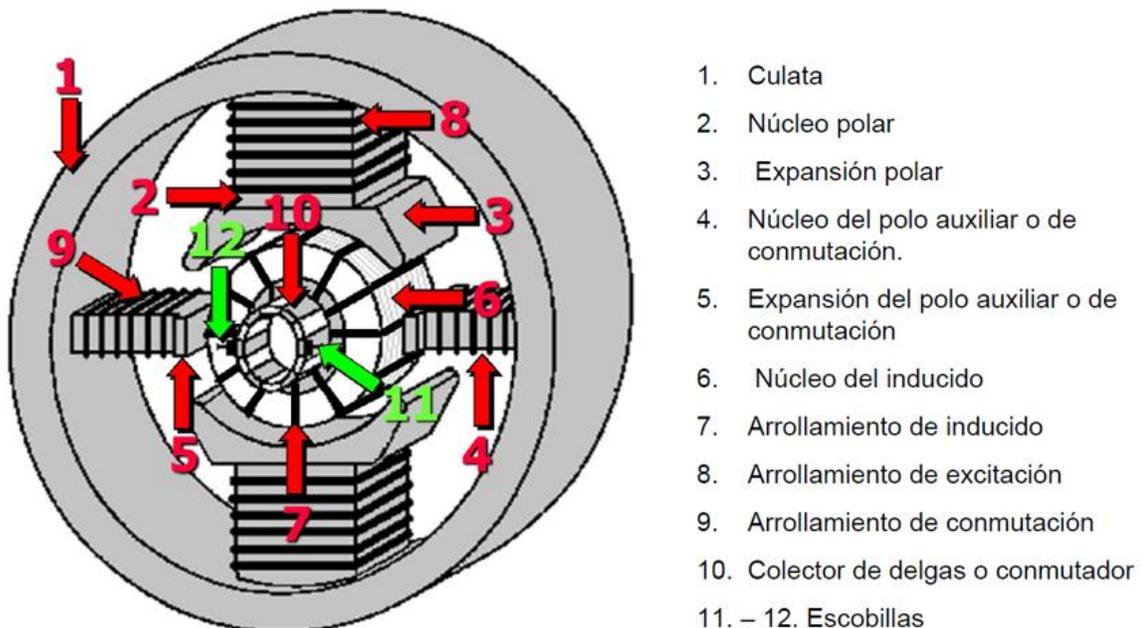
COJINETES

Son las piezas que sirven de apoyo y fijación del eje del inducido.

Diagrama de una máquina de corriente continua.

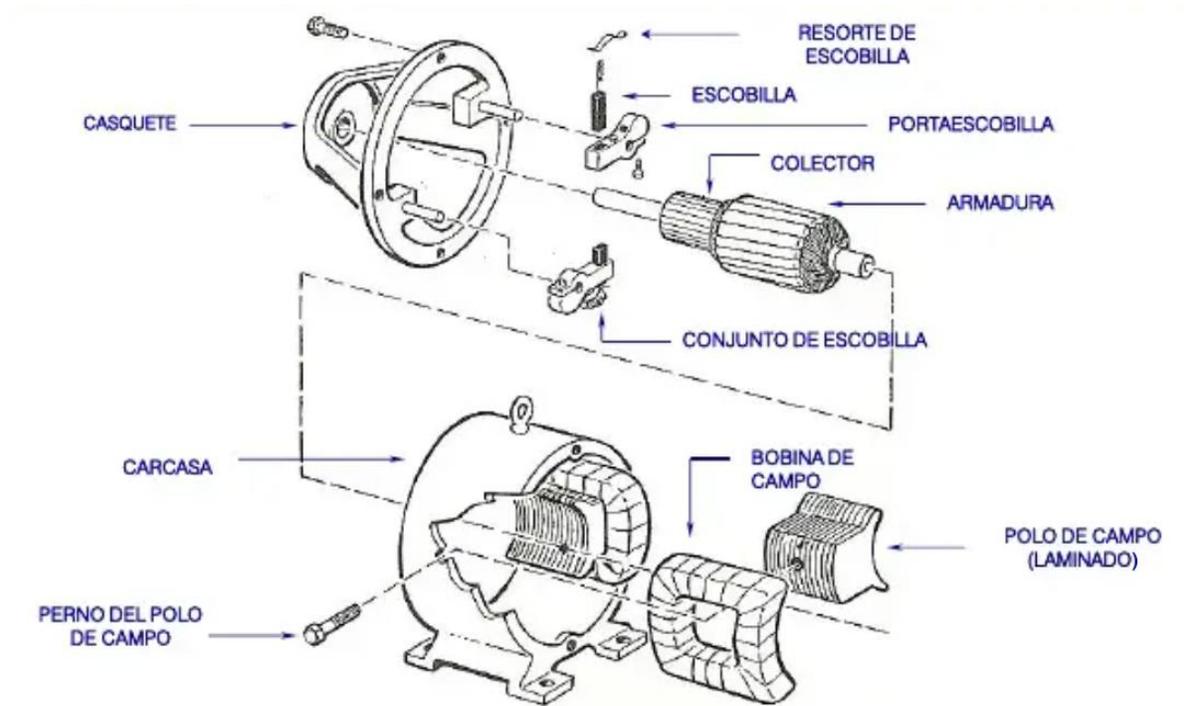
Los componentes de la máquina de corriente continua se pueden apreciar claramente en la *Figura 97*

Figura 97. Componentes de la máquina de corriente directa



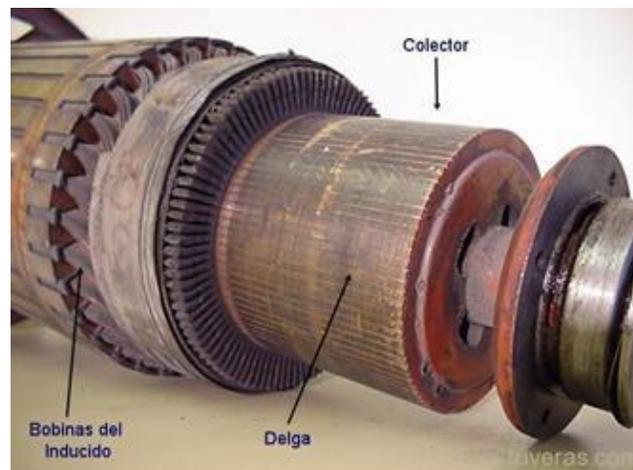
La parte de 1 a la 5 forman el inductor. En conjunto las partes 2 y 3 se designan por polo inductor. La parte 6 constituye el inducido, al que va arrollado un conductor de cobre formando el arrollamiento del inducido.

Figura 98. Máquina de corriente directa



Alrededor de los núcleos polares, va arrollando, en forma de hélice, el arrollamiento de excitación (8). Análogamente cada núcleo de los polos de conmutación lleva un arrollamiento de conmutación (9). La parte 10 representa el conmutador o colector, que está constituido por varias láminas aisladas entre sí, formando un cuerpo cilíndrico.

Figura 99. Colector de una máquina de cd



El arrollamiento del inducido está unido por conductores con las láminas del colector; inducido y colector giran conjuntamente. Sobre la superficie del colector rozan unos contactos a presión mediante unos muelles. Dichas piezas de contacto se llaman escobillas. El espacio libre entre las piezas polares y el inducido se llama entrehierro.

Los generadores de corriente continua son las mismas máquinas de corriente continua cuando funcionan como generadores. Son máquinas que producen energía eléctrica por transformación de la energía mecánica.

A su vez los generadores se clasifican en dinamos y alternadores, según que produzcan corriente continua o alterna, respectivamente.

Posteriormente, cabe destacar otro tipo de generadores (no son máquinas) que transforman la energía química en la eléctrica como son pilas y acumuladores.

5.2 Principio de funcionamiento. (acción generadora, acción motora).

La Ley de Faraday está basada en los experimentos que Michael Faraday, físico británico, que realizó en 1830. Establece que el voltaje inducido en un circuito es directamente proporcional al cambio del flujo magnético en un conductor o espira. Esto significa que, si tenemos un campo magnético generando un flujo magnético, necesitamos una espira por donde circule una corriente para conseguir que se genere la fuerza electromotriz (f.e.m.).

Faraday también ideó el primer generador electromagnético: el disco de Faraday, con este demostró que se podía generar electricidad usando magnetismo. Además, abrió la puerta a los conmutadores, dinamos de corriente continua y a los alternadores de corriente.

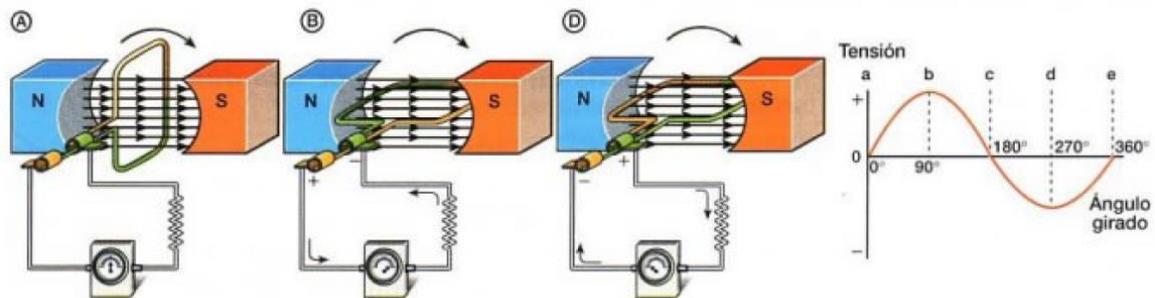
Cuando dentro de un campo magnético tenemos una espira por donde circula una corriente eléctrica aparecen un par de fuerzas que provocan que la espira gire alrededor de su eje. De esta misma manera, si dentro de un campo magnético introducimos una espira y la hacemos girar provocaremos la corriente inducida. Esta corriente inducida es la responsable de la fuerza electromotriz y será variable en función de la posición de la espira y el campo magnético. La cantidad de corriente inducida o f.e.m. dependerá de la cantidad de flujo magnético (también llamado líneas) que la espira pueda cortar, cuanto mayor sea el número, mayor variación de flujo generar y, por lo tanto, mayor fuerza electromotriz.

La cantidad de corriente inducida o fuerza electromotriz dependerá de la cantidad de flujo magnético (también llamado líneas) que la espira pueda cortar. Cuanto mayor sea el número, mayor variación de flujo genera y por lo tanto mayor fuerza electromotriz.

Se observa los dos casos más extremos, cuando la espira está situada a 0° o 180° y no corta líneas, y cuando está a 90° y 270° y las corta todas.

Al hacer girar la espira dentro del imán conseguiremos una tensión que variará en función del tiempo. Esta tensión tendrá una forma alterna, puesto que de 180° a 360° los polos estarán invertidos y el valor de la tensión será negativo.

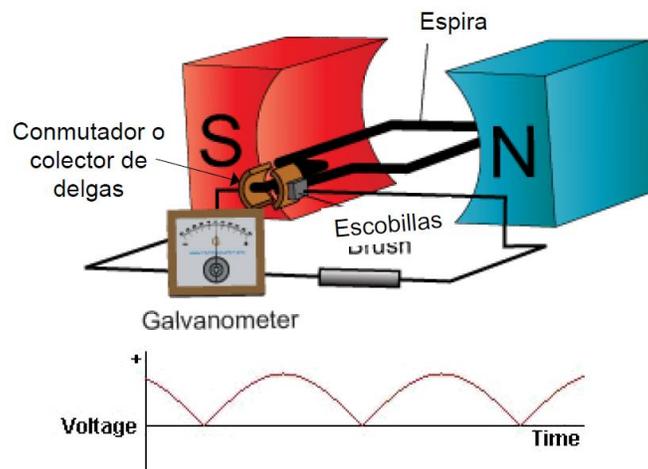
Figura 100. Comportamiento de una espira en el campo magnético, graficando la fem inducida



El principio de funcionamiento del alternador y de la dinamo se basa en que el alternador mantiene la corriente alterna mientras la dinamo convierte la corriente alterna en corriente continua.

Para que la corriente en la espira tenga un sentido de circulación, es necesario tener un anillo dividido en dos partes (dos segmentos circulares de cobre llamados delgas aisladas entre sí y montado el conjunto sobre el mismo eje), de esta manera se producirá la conmutación.

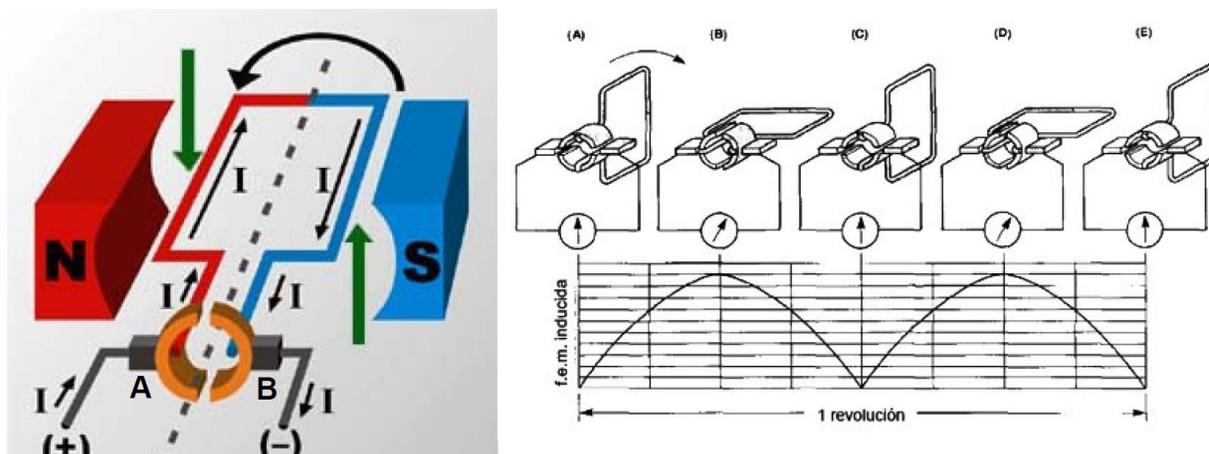
Figura 101. Comportamiento de una espira con conmutador



La escobilla A hace siempre contacto solo con la delga a la que va conectado el conductor al lado del polo N; al contrario, la escobilla B hace contacto siempre con el conductor que pasa junto al polo S.

Esto significa que la polaridad de las escobillas permanece invariable.

Figura 102. Comportamiento de una espira en el campo magnético conectada a un conmutador, graficando la fem inducida

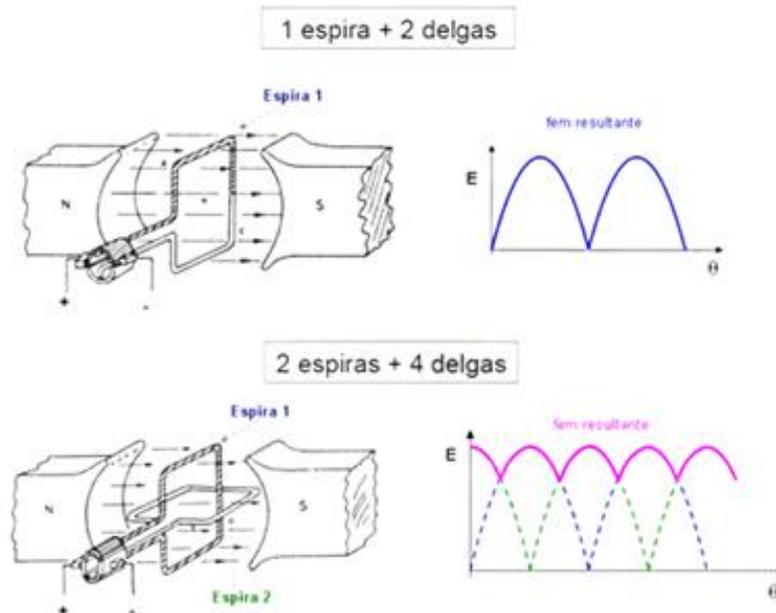


La conmutación es la operación de transformación de una señal alterna a una señal continua, también se conoce como rectificación de señal. Las dinamos hacen esta conmutación porque tienen que suministrar corriente continua. Esta conmutación en las dinamos se realiza a través del colector de delgas. Los anillos del colector están cortados debido a que por fuera de la espira la corriente siempre tiene que ir en el mismo sentido. A la hora de realizar esta conmutación existen diferentes problemas. Cuando el generador funciona con una carga conectada en sus bornes, nos encontramos con una caída de tensión interna y una reacción en el inducido.

El inducido creará un flujo magnético que se opone al generado por el imán. A este efecto se le da el nombre de fuerza contraelectromotriz, que desplazará el plano neutro. Para solucionar este problema se pueden realizar diversas mejoras como: desplazar las escobillas, usar bobinas de compensación o polos de conmutación o auxiliares.

El voltaje generado, como se observa en las escobillas, es la suma de los voltajes rectificadas de todas las bobinas en serie entre las escobillas y es ilustrado en la [Figura 103](#).

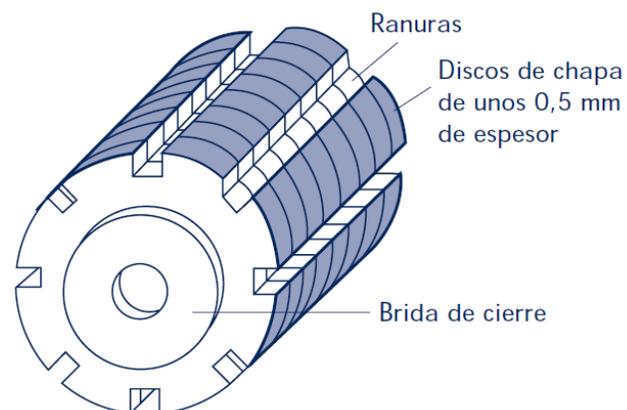
Figura 103. Voltajes de bobina rectificadas y voltaje resultante entre las escobillas en una máquina de cd



5.3 Devanados de armadura.

La parte rotatoria de una máquina de cc, se llama armadura. La longitud efectiva de la armadura es por lo general la misma que la del polo, la periferia externa de la armadura tiene varias ranuras en las que las bobinas se montan o se devanan. En general, estas ranuras están aisladas con papel pescado para proteger los devanados. En máquinas pequeñas, las bobinas se devanan directamente en las ranuras de la armadura y en máquinas grandes las bobinas se preforman y después se insertan en las ranuras. Cada bobina puede tener muchas vueltas de conductor de cobre esmaltado (aislado), comúnmente llamado alambre magneto.

Figura 104. Estructura del inducido



TIPOS DE DEVANADOS

Arrollamiento abierto

Es aquel en el cual, las bobinas son derivaciones abiertas cuando los segmentos del conmutador no se hayan bajo las escobillas.

Arrollamiento cerrado

Un arrollamiento cerrado es aquel en el cual, al recorrer una bobina hay que recorrerlas todas para terminar en la primera.

Elemento de arrollamiento

Un elemento está formado por espiras que están comprendidas entre los segmentos eléctricamente consecutivos.

1. Arrollamiento imbricado

Este diagrama muestra un arrollamiento imbricado en el cual se ha mostrado los "PASOS" principales en un devanado.

Figura 105. Identificación de los pasos en el devanado imbricado

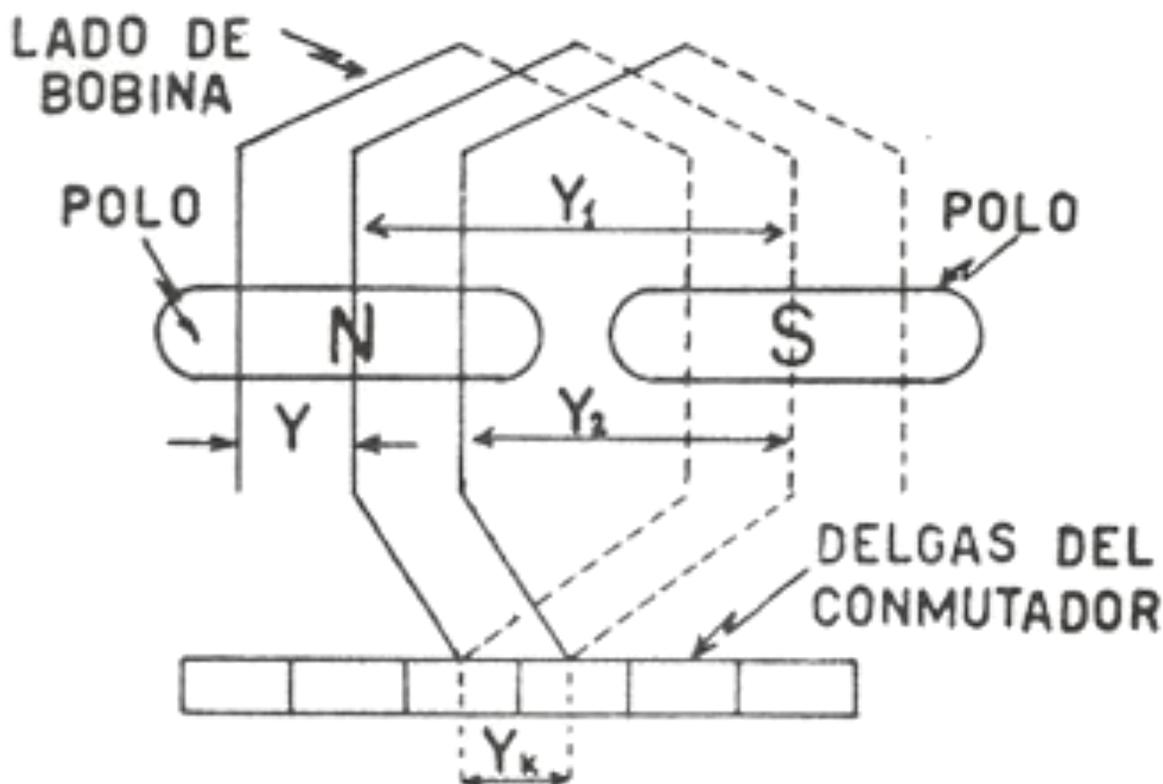


Figura 106. Forma esquemática de un devanado imbricado incompleto

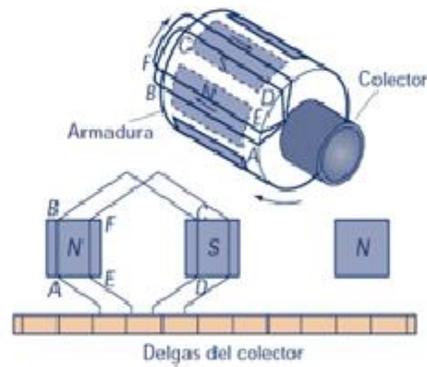
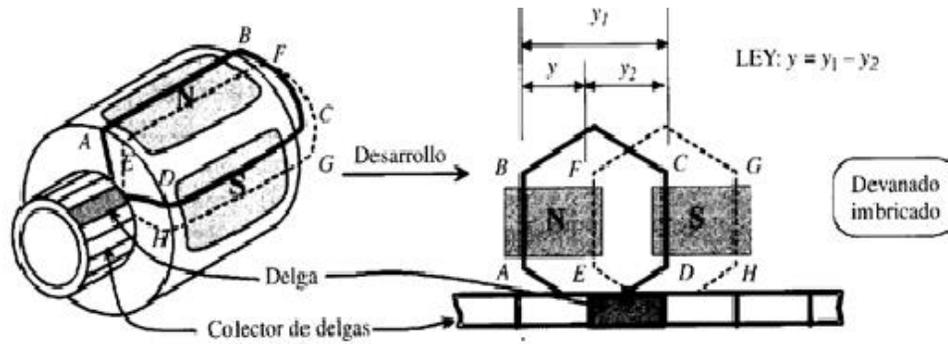
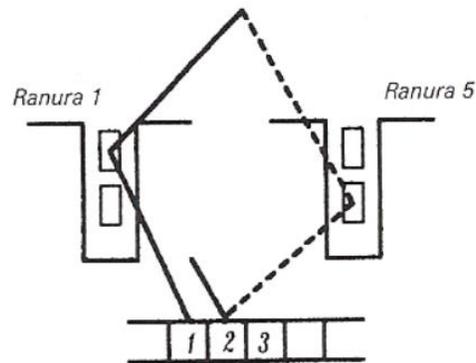


Figura 107. Esquema simplificado correspondiente al dínamo tetrapolar de 16 ranuras



Si llamamos:

- K Número de delgas o segmentos
- S Número de bobinas
- s Número de lados de bobina
- U_n Número de lados de bobina/ranura
- z Número de ranuras
- p Número de pares de polos

El número de delgas o segmentos debe ser igual al número de bobinas y como cada bobina tiene dos lados será también igual a la mitad de lados de bobina, es decir:

$$K = S = \frac{s}{2}$$

Los pasos se designan como sigue:

Y = Paso total del arrollamiento, en lados de bobina

Y_n = Ancho de la bobina en número de ranuras depende del número de pares de polos y es igual al paso polar

Y_m = Paso medio

$Y1$ = Paso parcial en lados de bobinas (paso posterior), que hay de un lado de bobina a otro lado de esa misma bobina

$Y2$ = Paso parcial en lugares (paso frontal), que hay de un lado de bobina a otro lado de la bobina siguiente

Las fórmulas que dan estos pasos son:

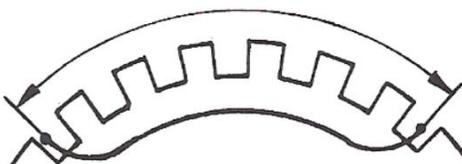
$$Y_n = \frac{z}{2p} \quad \text{paso polar, en ranuras}$$

Esta fórmula se interpreta, el ancho de la bobina en número de ranuras debe ser igual o menor al cociente del número de ranuras entre el número de pares de polos por dos, siendo igual también al paso polar.

El paso parcial $Y1$ es igual al producto de Y_n por el número de lados de bobina por ranura sumando o restando a este producto la unidad, o sea:

$$Y1 = Y_n * U_n \pm 1, \text{ en lados de bobina o lugares}$$

Figura 108. Paso de ranura en un inducido



El paso total del arrollamiento está dado por fórmula:

$$Y = Y1 - Y2$$

El paso parcial Y2, será:

$$Y2 = Y1 - Y$$

Los pasos parciales deben diferir uno de otro en 2, por lo que queda:

$$Y2 = Y1 \pm 2$$

El paso en el conmutador se designa por Y_k , siendo igual al paso total del arrollamiento entre 2, o sea:

$$Y_k = \frac{Y}{2}$$

Y_m nos indica el paso medio del devanado, siendo su valor:

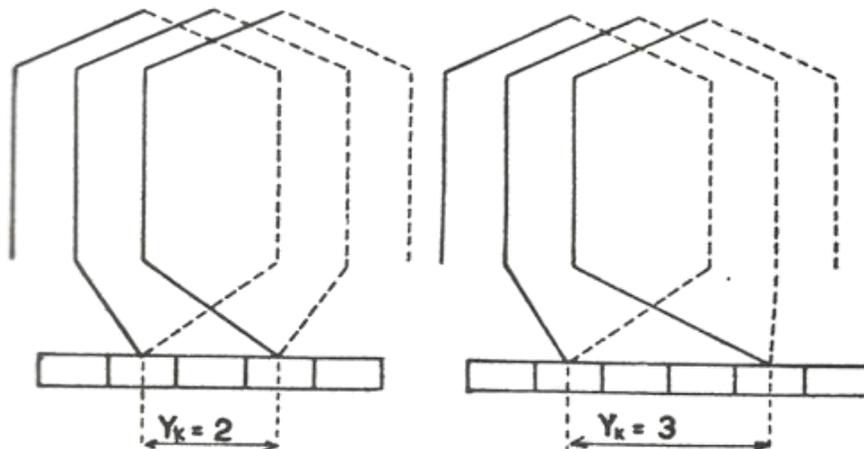
$$Y_m = \frac{Y1 + Y2}{2}$$

Se recomienda que el cociente del paso medio entre el paso polar en lugares esté dentro de los límites de 0.90 a la unidad. Esta es la razón por la cual es la fórmula para calcular $Y1$ se debe sumar o restar la unidad optando por el valor que se acerque más al límite antes dado.

El devanado imbricado puede ser sencillo, doble, triple o múltiple: a esta característica se le llama grado de multiplicidad se les dan los nombres: SIMPLEX, DUPLEX, TRIPLEX, etc.

Un devanado imbricado es simple o simplex, cuando su paso Y_k o sea el paso en el conmutador es igual a uno; este devanado se muestra en la siguiente figura:

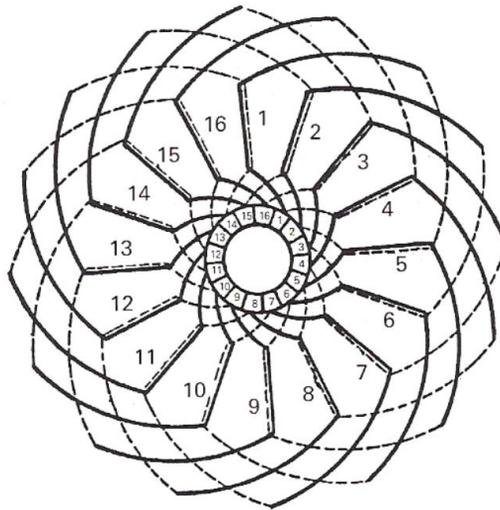
Figura 109. Devanado desplegado de un devanado imbricado doble y un devanado imbricado triplex



Cuando el paso Y_k es igual con 2, se tiene el devanado duplex, cuando $Y_k=3$ el grado de multiplicidad es de 3 y el devanado es triplex y así sucesivamente, estos dos últimos casos se muestran en la figura anterior.

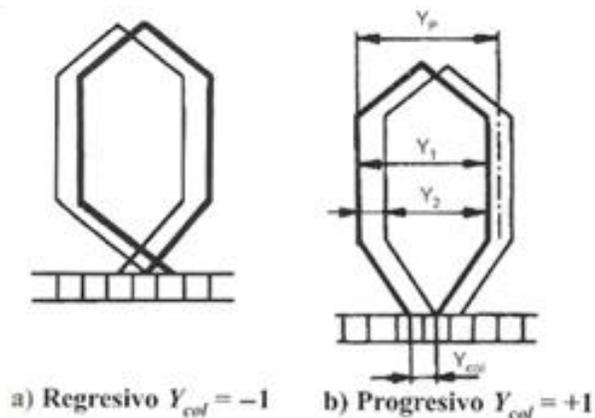
Hay tres formas de representar un devanado, desplegado, circular y tubular. En el ejemplo ilustrado al final se presentará la representación tubular y el desplegado del devanado.

Figura 110. Representación circular del esquema de bobinado de un dínamo tetrapolar de 16 ranuras



Si al devanar una máquina se avanza como lo muestran la figura 6 anteriores, se dice que el devanado es progresivo, o sea de izquierda a derecha; pero si el avance en las ranuras es en sentido contrario, es decir, de derecha a izquierda, el devanado es regresivo o retrogresivo.

Figura 111. Disposición al devanar puede ser a) regresivo ó b) progresivo



Para mayor comodidad se acostumbra a identificar las ranuras marcándolas con números; si en cada una de ellas se aloja un lado o costado de bobina, las ranuras irán numeradas progresivamente partiendo de uno pero si hay, por ejemplo, 4 conductores por ranura, se alojarán 2 arriba y 2 abajo, numerando los primeros con números nones y los segundos o sea los de abajo con números pares, como lo indica las siguientes figuras:

Figura 112. Ranuras mostrando un lado de bobina en cada una de ellas y la numeración correspondiente

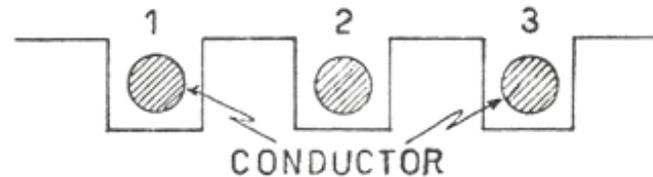


Figura 113. Ranuras mostrando los lados de bobina en cada una de ellas y la numeración correspondiente

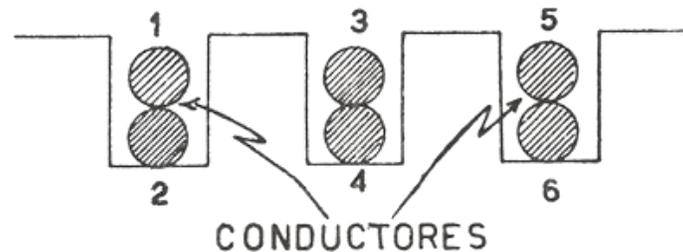
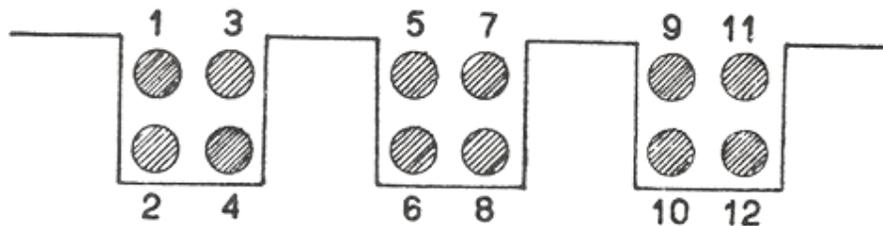


Figura 114. Ranuras mostrando cuatro lados de bobina en cada una de ellas y la numeración correspondiente



Las tres condiciones fundamentales que debe llenar un devanado imbricado son:

1. El paso debe elegirse de manera que los lados opuestos de una misma bobina se encuentren frente a polos de signo contrario.
2. En el devanado debe aparecer cada elemento solamente una vez.
3. El devanado debe cerrarse sobre sí mismo.

2. Arrollamiento ondulado

Este tipo de arrollamiento es conocido también como arrollamiento serie, porque como su nombre lo indica sus bobinas están conectados en serie.

En máquinas bipolares, es decir, de dos polos, no es posible colocar este tipo de devanado, solamente en máquinas de cuatro polos, o más.

En el devanado imbricado sus bobinas están en paralelo y el paso Y_1 es diferente del Y_2 ; en el devanado ondulado los dos pasos pueden ser iguales.

Para este devanado se procede de la siguiente manera para el cálculo de sus pasos:

Paso conmutador, Y_k :

Este paso es igual al número de lados de bobina por ranura, entre dos, multiplicado por el número de ranuras, sumando o restando a este producto la unidad y dividiendo todo por el número de pares de polos.

$$Y_k = \frac{\frac{U_n}{2} * 2 \pm 1}{P}$$

Paso total, Y :

El paso total del devanado es igual a dos veces el paso de conmutador.

$$Y = Y_1 + Y_2$$

Paso polar, Y_n :

El paso polar debe ser igual o mayor que el cociente de número de ranuras entre el número de polos.

$$Y_n = \frac{z}{2p}$$

Paso parcial Y_1 :

$$Y_1 = Y_n * U_n + 1$$

Figura 115. Identificación de los pasos en el devanado ondulado

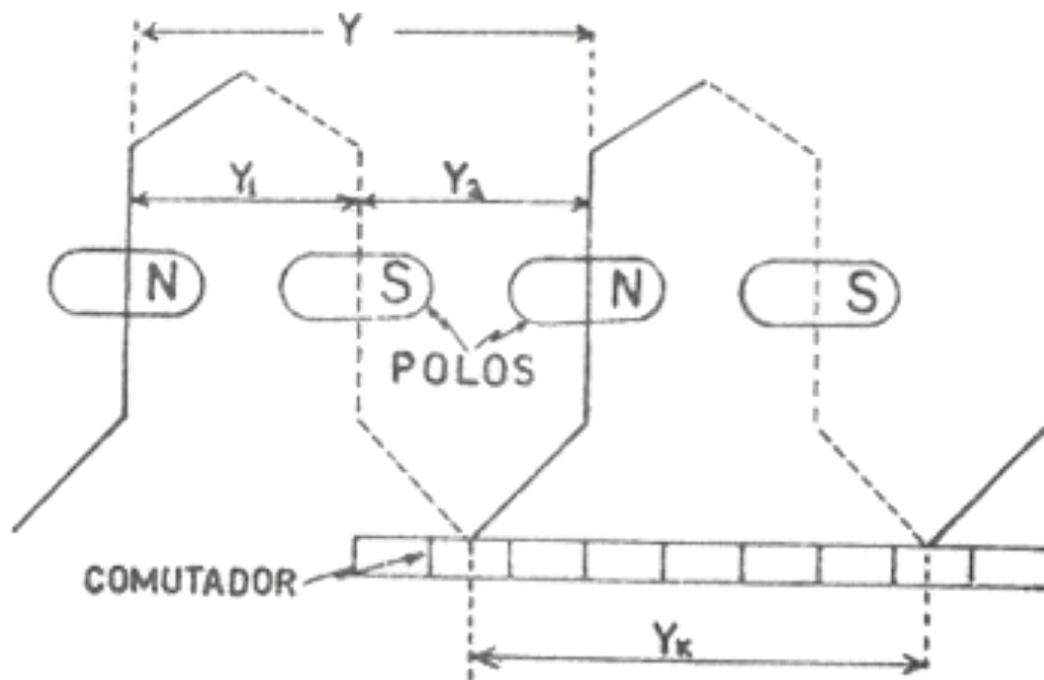
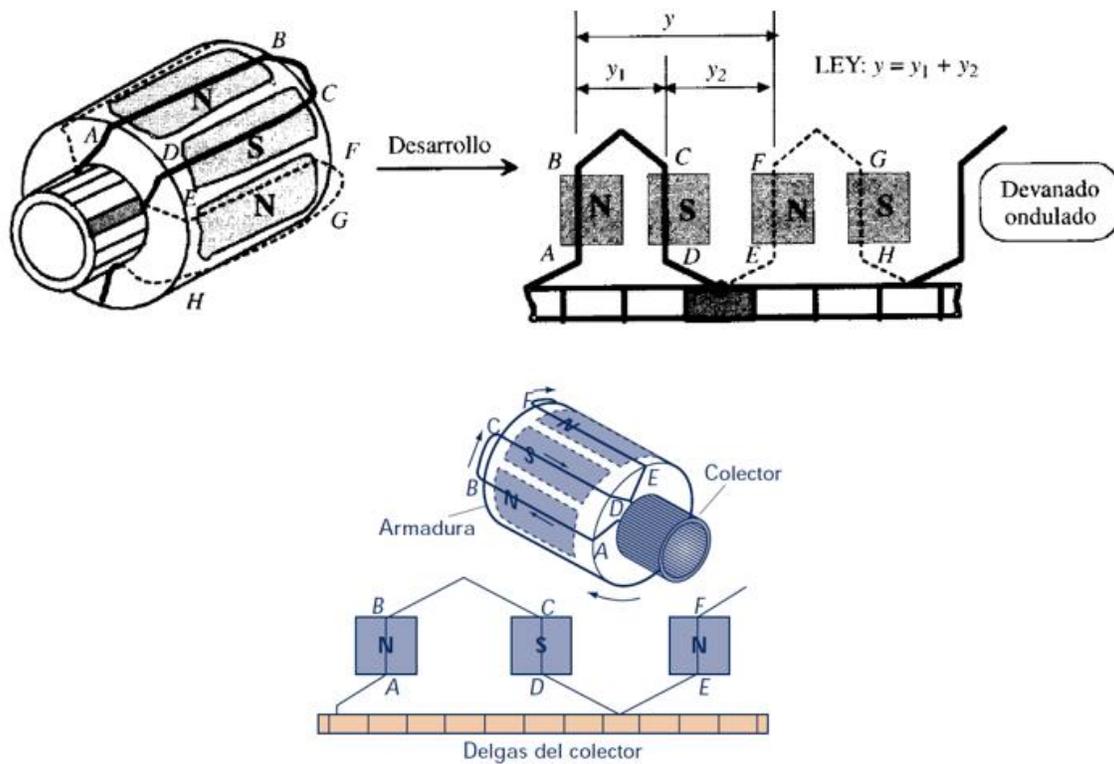
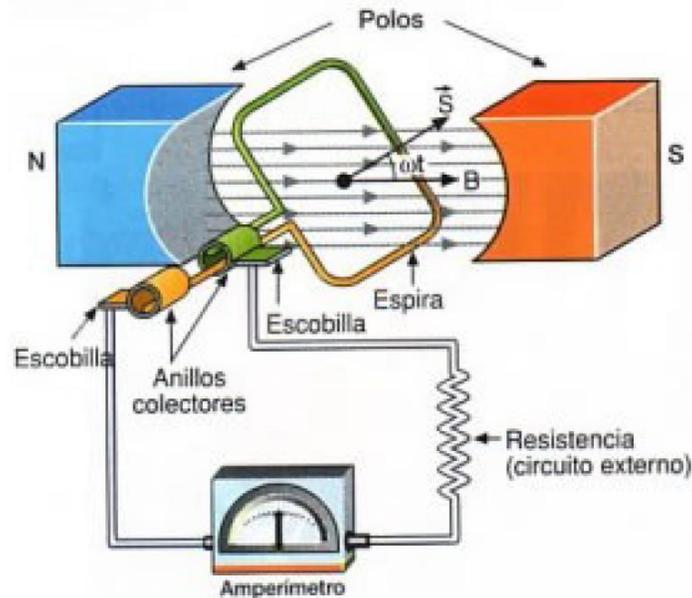


Figura 116. Forma esquemática de un devanado ondulado incompleto



Debe tenerse en cuenta que en cada bobina del arrollamiento se obtiene una fem alterna. En un semiciclo, el flujo concatenado varía entre $+\phi$ y $-\phi$ (flujo de los polos).

Figura 117. Comportamiento de la espira en el campo magnético para obtener la fem



El valor medio de la fem producida en el inducido de la máquina de CC es:

$$E_{med} = -\frac{2}{T} \int_{-\phi}^{+\phi} d\phi = \frac{4\phi}{T}$$

p = número de pares de polos

n = velocidad de rotación en rpm

Φ = flujo concatenado

T = periodo de la corriente

La frecuencia de la tensión generada va ligada al número de polos $2p$ y a la velocidad de rotación n en rpm por la relación:

$$f = \frac{np}{60}$$

Siendo que la fem media en una espira del inducido será:

$$E_{med} = 4\phi \frac{pn}{T}$$

Las escobillas recogen las fems inducidas en las distintas bobinas durante un semiperiodo, la fem resultante en el inducido será igual a la suma de las fems medias de las distintas bobinas que componen cada rama en paralelo del devanado. Si este consta de Z conductores que forman $Z/2$ bobinas y está dividido por las escobillas en $2c$ circuitos derivados, se tendrán en cada rama $Z/4c$ bobinas conectadas en serie, que producirán una fem resultante de magnitud:

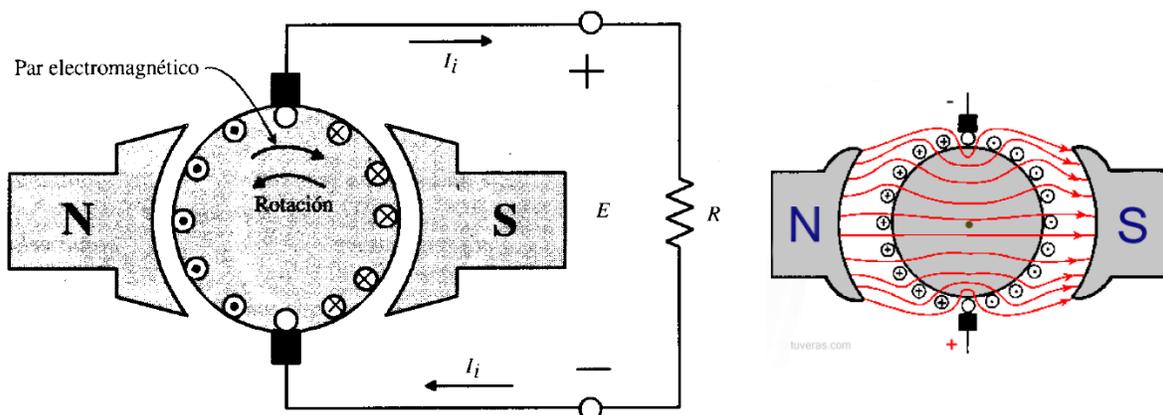
$$E = \frac{n}{60} Z \phi \frac{P}{c} = K_E n \phi$$

en la cual $K_E = \frac{Z p}{60 c}$ es una constante determinada para cada máquina. Con esta expresión se deduce que la fem puede regularse variando la velocidad del rotor o cambiando el flujo inductor mediante el ajuste de la corriente de excitación de los polos.

Para entender mejor la producción de par en las máquinas de cd, se puede ver en la [Figura 118](#) donde la máquina es movida por medio de un motor primario en sentido contrario a las agujas del reloj, y se producen entonces unas fems en los conductores cuyos sentidos se muestran en la misma figura.

Al conectar una resistencia de carga entre las escobillas aparecen unas corrientes de circulación en los conductores del inducido, que al reaccionar con el campo magnético inductor provocan un par electromagnético que se opone a la rotación y que, por tanto, tiene carácter resistente respecto a la acción del motor primario. Para mantener la velocidad de la dinamo, el par del motor primario ha de ser suficiente para equilibrar este par resistente, junto con el par de pérdidas, debido a los efectos de rozamientos, ventilación, etc.

Figura 118. Máquina de cd funcionando como generador



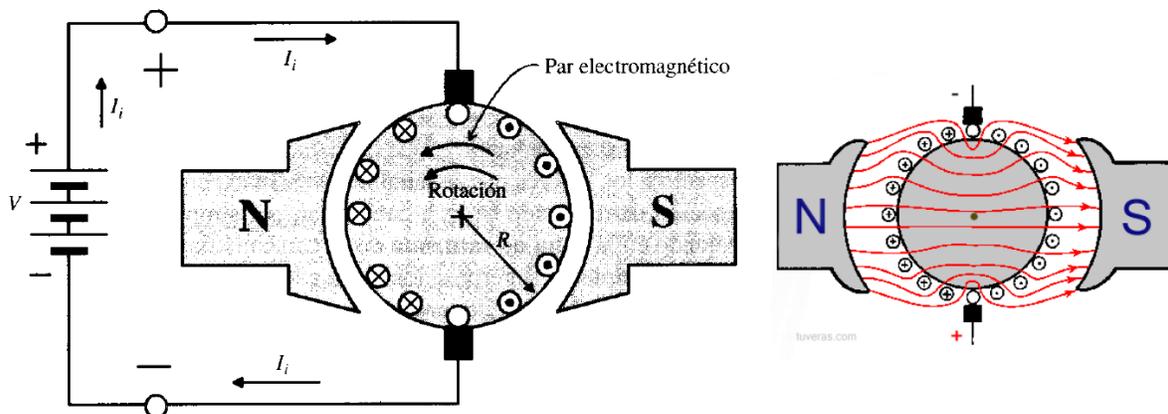
Cuando la máquina de cd funciona como motor, se debe aplicar una tensión de cd de alimentación al inducido, que provoca una corriente de circulación por los conductores de este devanado, cuyos sentidos se muestran en el esquema de la [Figura 119](#).

La interacción de estas corrientes con el flujo inductor origina un par de rotación en sentido contrario a las agujas del reloj que obliga a girar a la máquina.

Esto conduce a la aparición de una fem en el inducido cuyo sentido es idéntico al estudiado para el caso de la dinamo.

La fem engendrada se opone a la corriente que circula por los conductores y por ello recibe el nombre de fuerza contraelectromotriz. El movimiento del motor se mantendrá en tanto que el par electromagnético de rotación producido sea superior al par resistente ejercido por la carga mecánica conectada al árbol de la máquina.

Figura 119. Máquina de cd funcionando como motor



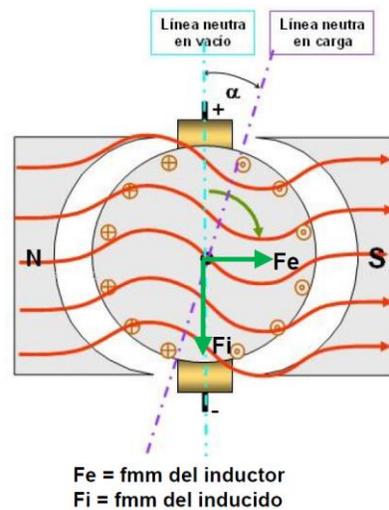
5.4 Reacción de armadura.

Cuando se cierra el circuito del inducido sobre una resistencia de carga aparece una corriente de circulación por los conductores del rotor que dan lugar a una fmm que combinada con la del estator producen el flujo resultante en el entrehierro de la máquina.

Se conoce con el nombre de reacción del inducido al efecto que ejerce la fmm de este devanado sobre la fmm del inductor, y que hace variar la forma y magnitud del flujo en el entrehierro respecto a los valores que la máquina presentaba en vacío.

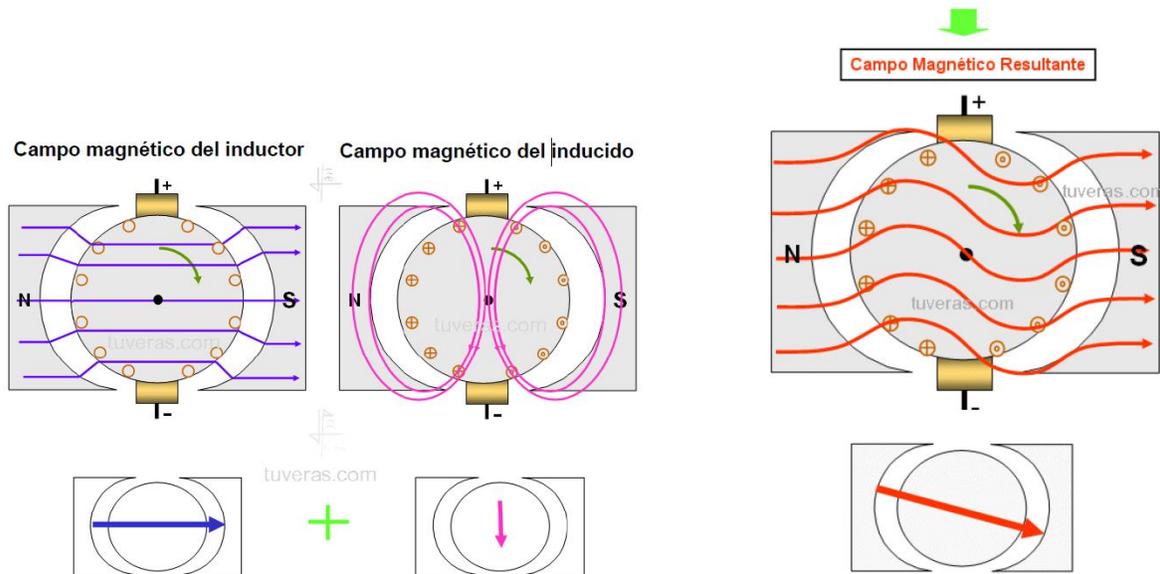
La máquina en vacío solamente actúa F_e . Considerando una máquina bipolar ([Figura 120](#)) trabajando en la zona no saturada de su característica magnética.

Figura 120. Reacción de inducido en una máquina de cd



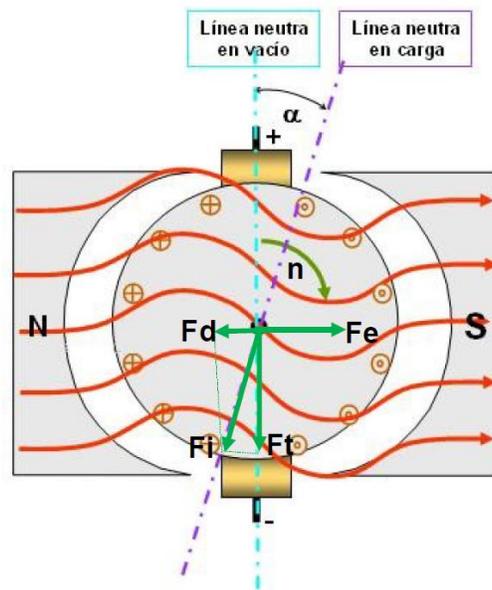
El flujo resultante, se obtendrá sumando las distribuciones del campo magnético que produce cada fmm actuando independientemente *Figura 121*.

Figura 121. Distribuciones del campo magnético en una máquina de cd



Cuando la máquina trabaja en vacío, solamente actúa la excitación de los polos, de esta forma se obtiene una distribución de campo magnético en el entrehierro que es constante y máximo debajo de cada polo y que decrece rápidamente en el espacio interpolar hasta hacerse cero en la línea neutra. Se puede observar el desplazamiento de la línea neutra debido a la reacción del inducido. En vacío, la línea neutra magnética coincide con la línea neutra geométrica *Figura 122*.

Figura 122. Comportamiento de la máquina de cd trabajando en vacío

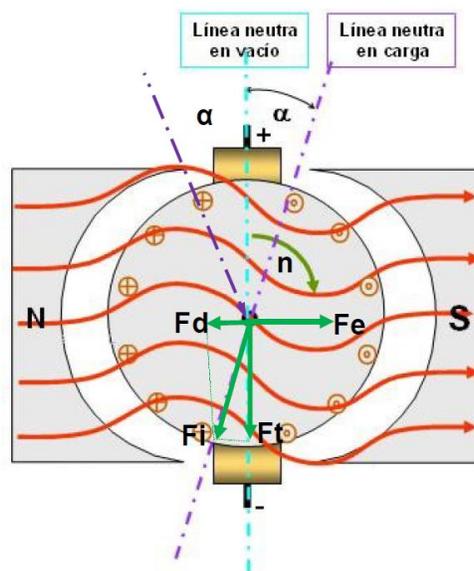


La máquina presentará una fmm de reacción del inducido F_i que coincide con el eje de las escobillas.

Esta F_i puede descomponerse en dos partes *Figura 123*:

- una longitudinal o de eje directo F_d que tiene carácter de desmagnetizante oponiéndose a la fmm de excitación F_e , puede considerarse esta producida por los conductores comprendida en el ángulo 2α
- otra componente transversal F_t producida por los demás conductores agrupados abarcando 180° eléctricos -2α

Figura 123. Reacción del inducido cuando coincide con el eje de las escobillas



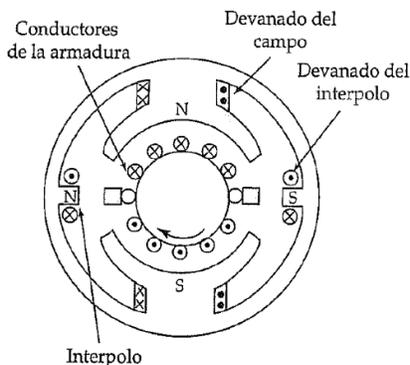
Cuando circula corriente por el inducido y la máquina funciona como generador la línea nuestra magnética se adelanta un ángulo α respecto al sentido de giro.

En caso de funcionamiento como motor, la línea neutra magnética se retrasa respecto a la geométrica. El desplazamiento de la línea neutra magnética lleva consigo un fuerte chisporroteo en el colector, ya que pondrá en cortocircuito una sección del devanado.

Para evitar este fenómeno se debe desplazar las escobillas hasta encontrar la línea nuestra real. Se debe adelantar las escobillas cuando la máquina trabaja como generador y retrasar cuando trabaja como motor.

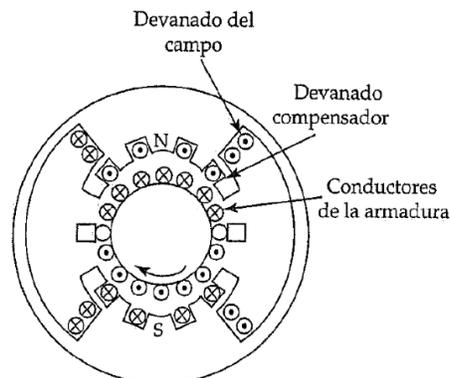
Para eliminar el desplazamiento de la línea neutra geométrica con las variaciones de carga y asegurar una mejor conmutación, se emplean los llamados polos auxiliares (interpolos o polos de conmutación) que se colocan en la línea neutra teórica, provistos de un devanado en serie con el inducido. *Figura 124*

Figura 124. Devanado de los interpolos de un generador de cc



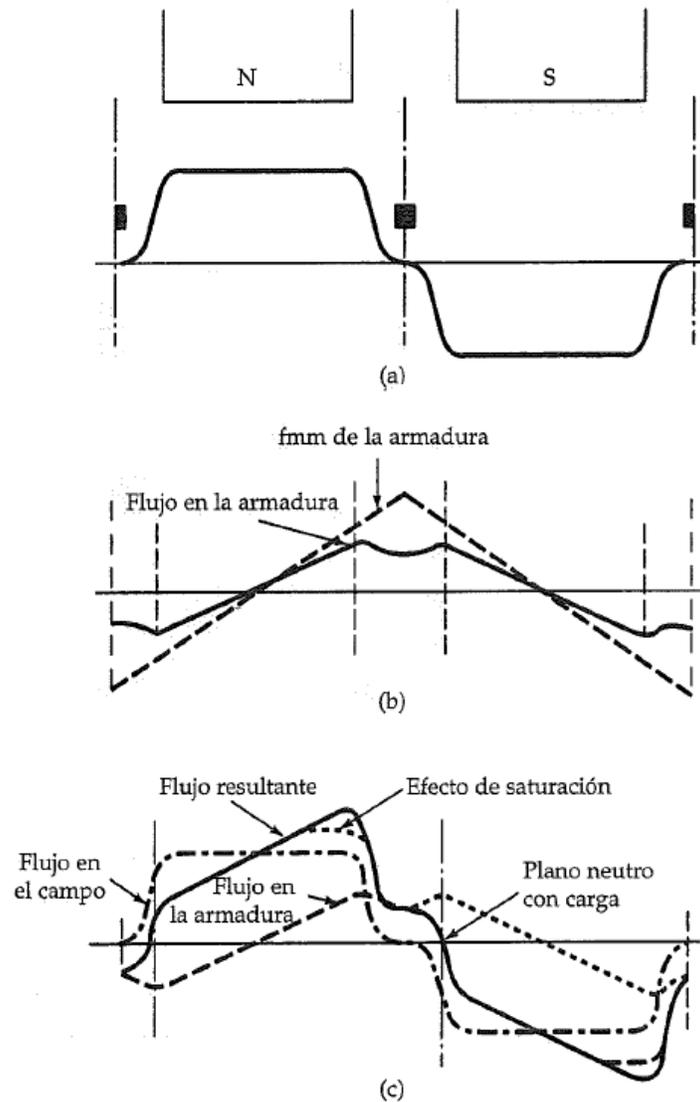
El devanado de conmutación produce un campo magnético opuesto al de la reacción transversal del inducido (armadura). *Figura 125*

Figura 125. Devanado compensador de un generador de cc



Teniendo un panorama mejor de lo que ocurre en el generador si se observa su diagrama desarrollado. *Figura 126*

Figura 126. (a) Flujo por polo sin carga. (b) Fuerza magnetomotriz (fmm) y el flujo debido a la reacción de la armadura. (c) Flujo resultante.

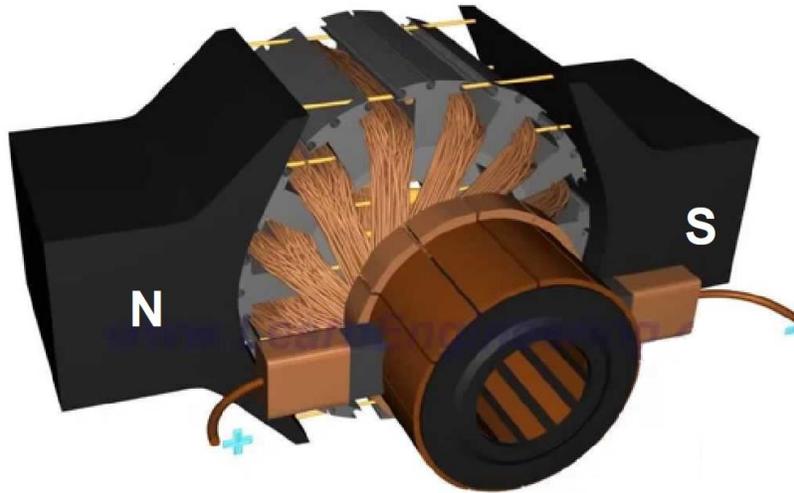


CONMUTACIÓN

Una buena conmutación debe realizarse sin la formación de chispas en el colector, mientras que una mala conmutación produce un deterioro notable en la superficie del colector que perturba el buen funcionamiento de la máquina.

El chisporroteo entre escobillas y el colector obedece a causas mecánicas y eléctricas.
Figura 127

Figura 127. Conmutador con escobillas de una máquina de cd

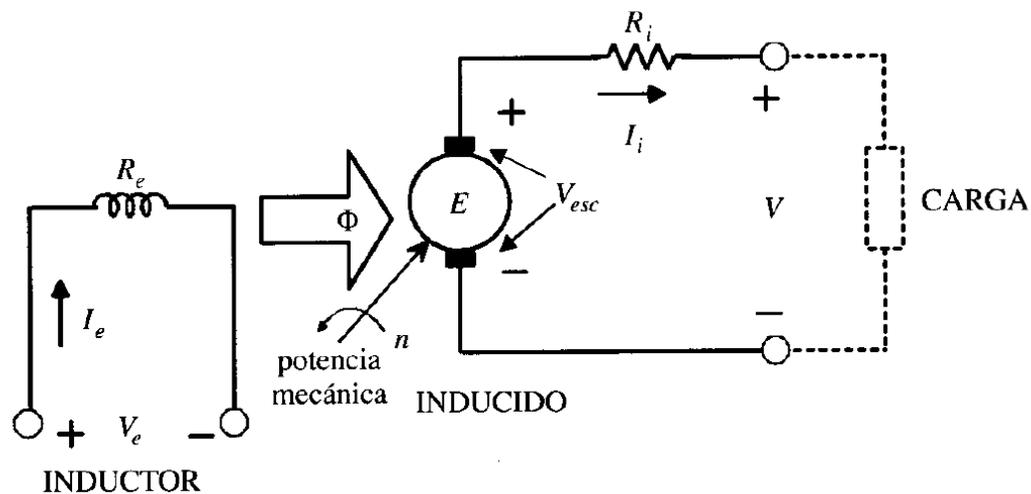


Las causas mecánicas pueden ser defectuoso ajuste de las escobillas con el colector, resalte de algunas delgas, insuficiente equilibrado del rotor.

Las causas eléctricas están la elevación de tensión entre delgas adyacentes que en especial puede ser provocada por los fenómenos de autoinducción del arrollamiento del inducido (conexión y desconexión de este arrollamiento).

5.5 Flujo de potencia en máquinas de corriente directa.

Figura 128. Circuito del generador de cd o dinamo



Para determinar el proceso de transformación de energía mecánica en eléctrica en un generador de cc se va a considerar el esquema de la *Figura 128* en el que se tienen las siguientes ecuaciones de circuito:

$$\begin{aligned} \text{Inductor:} \quad & V_e = R_e I_e \\ \text{Inducido:} \quad & E = V + R_i I_i + V_{esc} \end{aligned}$$

Al multiplicar por I_i la segunda ecuación anterior resulta:

$$EI_i = VI_i + R_i I_i^2 + V_{esc} I_i$$

que expresa el balance de potencias en el inducido de una dinamo. Los términos anteriores representan:

$$P_2 = VI_i \quad : \text{Potencia eléctrica de salida suministrada por el generador}$$

$$P_{Cui} = R_i I_i^2 \quad : \text{Pérdidas en el cobre del inducido}$$

$$P_{esc} = V_{esc} I_i \quad : \text{Pérdidas en los contactos de las escobillas}$$

$$P_a = EI_i \quad : \text{Potencia electromagnética desarrollada por la máquina}$$

De acuerdo con esta nomenclatura, el balance de potencia en el inducido se convierte en:

$$P_a = P_2 + P_{Cui} + P_{esc}$$

Para calcular la potencia mecánica de entrada habrá que sumar a la potencia electromagnética anterior, P_a , las restantes pérdidas, que abarcan:

- a) Las pérdidas en el cobre del arrollamiento de excitación, definidas por:

$$P_{esc} = V_e I_e = R_e I_e^2$$

- b) Las pérdidas mecánicas P_m debidas al rozamiento y ventilación
 c) Las pérdidas en el hierro P_{Fe} , que sólo existen en el apilamiento del rotor, debido a la magnetización cíclica que aparece por su movimiento a pesar de ser el flujo inductor constante

En consecuencia, y de acuerdo con lo anterior, la potencia mecánica de entrada P_1 al árbol de un generador de cd será:

$$P_1 = P_{esc} + P_m + P_{Fe} + P_a$$

En las *Figuras 129* y *130* se muestra un esquema simplificado de este balance de potencias.

Figura 129. Balance de potencias en el generador de cd

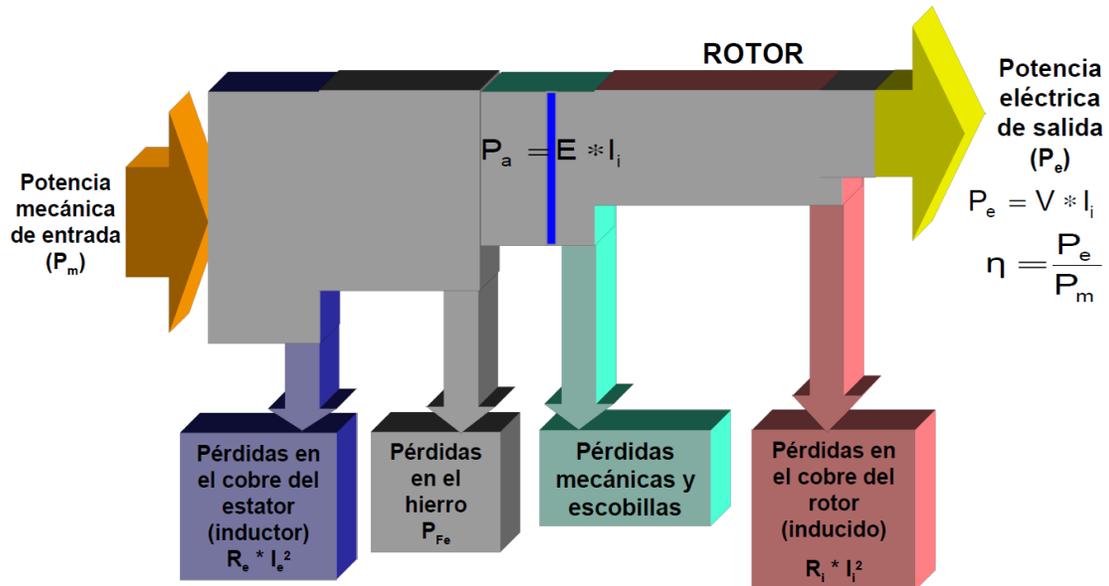
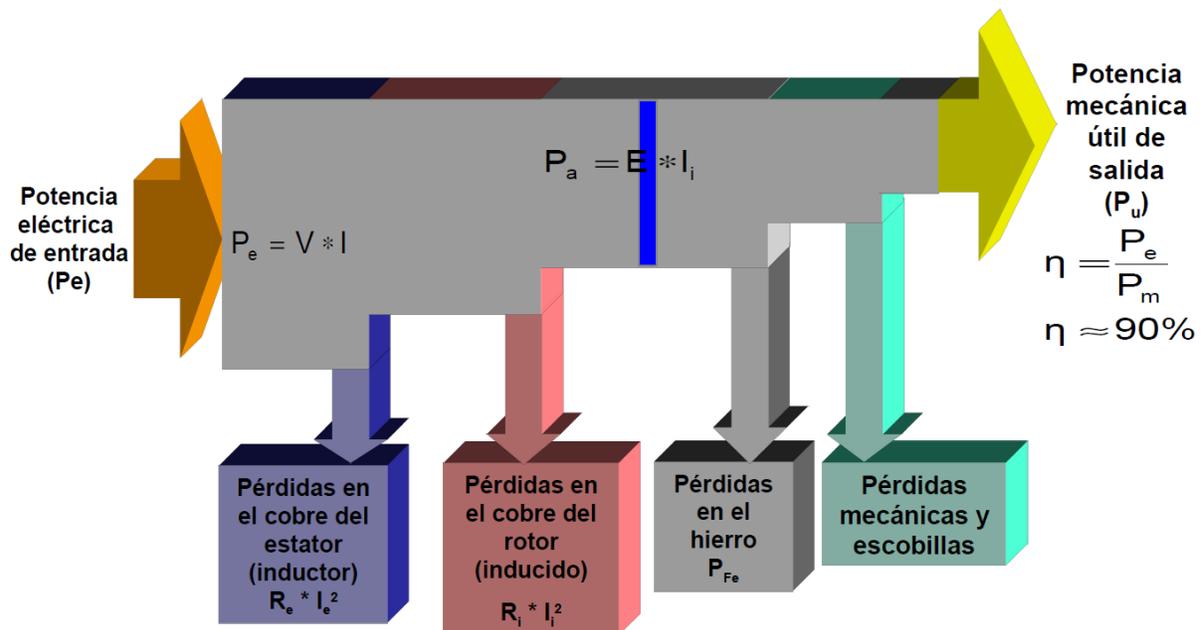


Figura 130. Balance de potencias en el motor de cd



Los generadores de cd se comparan entre sí por su voltaje, potencia nominal, eficiencia y regulación de voltaje. La regulación de voltaje (VR, por sus siglas en inglés) se define por medio de la ecuación:

$$VR = \frac{V_{sc} - V_{pc}}{V_{pc}} \times 100 \%$$

Donde V_{sc} es el voltaje en las terminales del generador en vacío

V_{pc} es el voltaje en las terminales del generador a plena carga

Es una medida aproximada de la forma de la característica voltaje-corriente del generador: una regulación de voltaje positiva significa una característica descendente y una regulación de voltaje negativa, una característica ascendente.

Desde el punto de vista de comportamiento y condiciones de trabajo, la forma en que se conectan entre sí los devanados inductor e inducido, distinguiéndose:

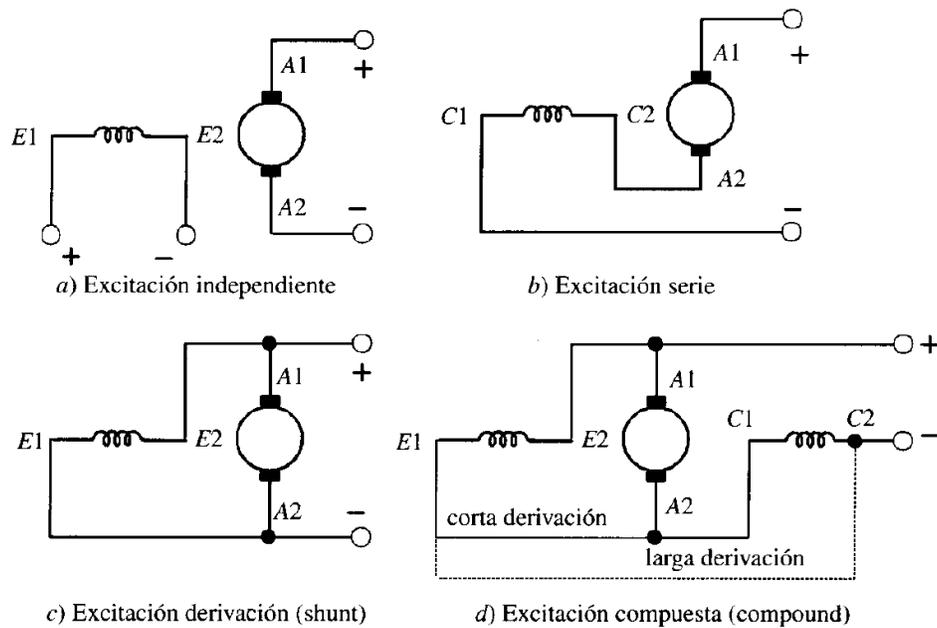
- a) **Máquinas con excitación independiente**, en las que el devanado inductor es alimentado mediante una fuente de alimentación externa a la máquina, que puede ser, una batería de acumuladores.
- b) **Máquinas autoexcitadas**, en las que la máquina se excita a sí misma tomando la corriente inductora del propio inducido (funcionando como generador) o de la misma red que alimenta el inducido (trabaja como motor).

Las máquinas de cd con autoexcitación se clasifican a su vez en:

1. **Máquinas serie**, en las que el inductor está en serie con el inducido; el devanado de excitación está preparado con pocas espiras de hilo grueso, ya que circulará por él la corriente total de la máquina.
2. **Máquinas shunt o derivación**, en las que el devanado inductor se conecta directamente a los terminales de la máquina, quedando en paralelo (derivación) con el inducido; en este caso el devanado de excitación está formado por arrollamientos de hilo delgado con gran número de espiras.
3. **Máquinas compound o compuestas**, en las que la excitación total está repartida entre dos devanados, uno colocado en serie (de pocas espiras de hilo grueso) y otro colocado en paralelo con el inducido (de muchas espiras de hilo delgado). Según el devanado en derivación esté conectado directamente a las escobillas del inducido o después del devanado en serie, se obtienen las máquinas compuestas con corta o larga derivación respectivamente.

En la *Figura 131* se muestran los circuitos de estas máquinas.

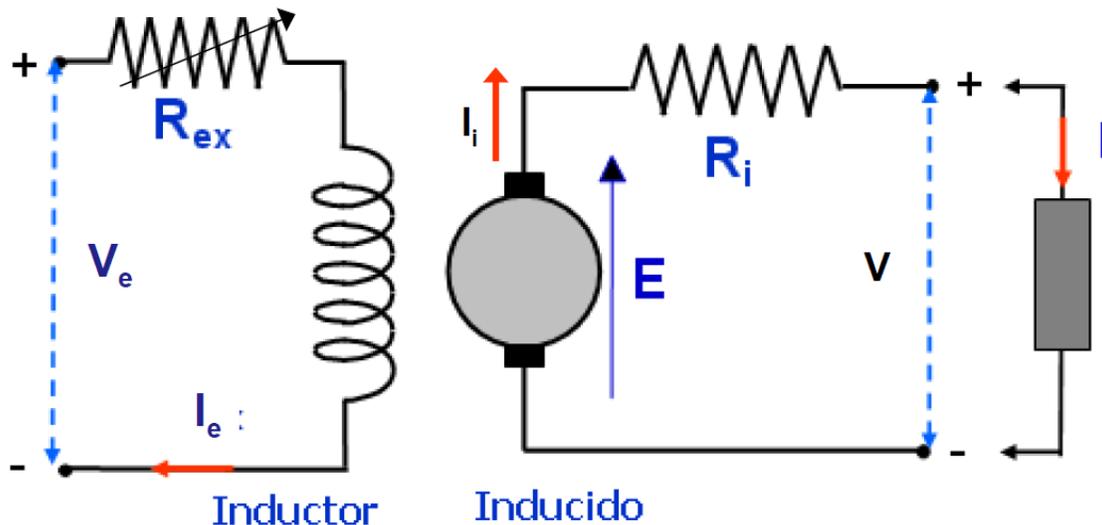
Figura 131. Tipos de excitación de las máquinas de cd



Generador de cc con excitación independiente

En este tipo de generador, la corriente inductora se obtiene de una fuente de cd externa a la máquina, se emplea únicamente en casos muy especiales. Tiene un reóstato en serie con el inductor para regular la corriente de excitación. *Figura 132*

Figura 132. Dinamo con excitación independiente



En el circuito equivalente:

E : fem inducida en el devanado de la armadura (inducido)

R_i : resistencia efectiva del devanado de la armadura, puede incluir la resistencia de cada escobilla

I_i : corriente en la armadura

V : voltaje de salida en las terminales

I : corriente de carga

I_e : corriente en el devanado del campo (inductor)

R_{ex} : resistencia externa agregada en serie con el devanado del campo para controlar la corriente en el campo

V_e : voltaje de una fuente externa

La fem generada es directamente proporcional al flujo magnético que producen los polos y la velocidad de rotación de la máquina.

$$E = K_E n \Phi$$

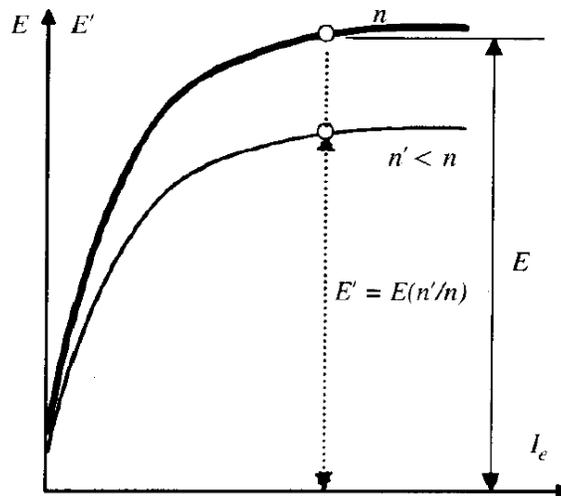
Si se considera que la velocidad de giro es diferente, por ejemplo, n' la fem producida para el mismo valor del flujo (*Figura 133*) será:

$$E' = K_E n' \Phi$$

Al dividir entre sí quedaría:

$$\frac{E}{E'} = \frac{n}{n'}$$

Figura 133. Curva de vacío de un generador de cd para distintas velocidades



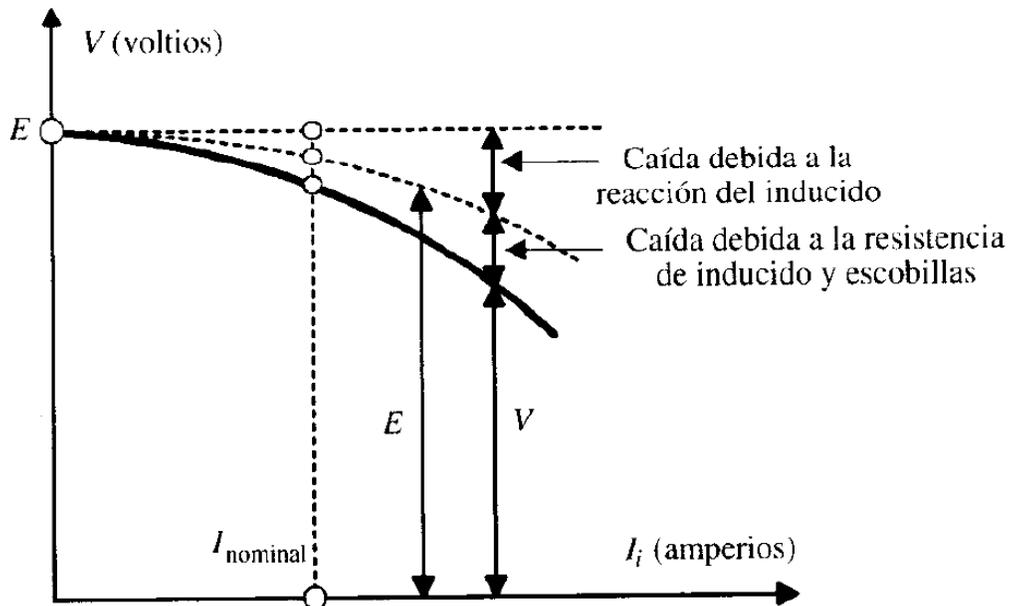
Para determinar la característica externa de un generador con excitación independiente habrá que conectar la carga y variando la misma, la fem generada E será constante y la variación de la tensión en bornes con la corriente del inducido vendrá expresada por la siguiente fórmula:

$$V = E - R_i I_i - V_{esc}$$

Donde V_{esc} es el voltaje en escobillas.

Si se tiene en cuenta la reacción del inducido, al desplazar las escobillas para obtener una buena conmutación, aparece una fmm desmagnetizante que actúa sobre el valor de la fem engendrada y cuya magnitud puede ser no lineal con la corriente si la máquina trabaja en la zona de saturación. *Figura 134*

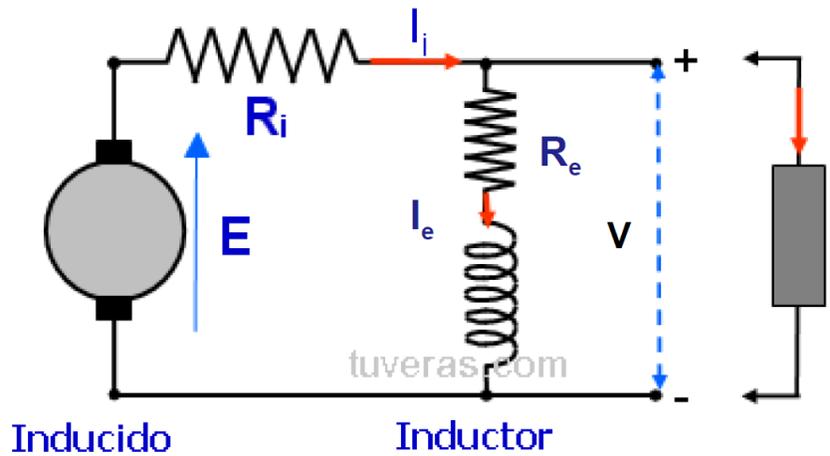
Figura 134. Característica externa de un generador de cd con excitación independiente



Generador de cc con excitación en derivación o shunt

En este caso el devanado inductor está conectado en paralelo con el inducido, y se regula la excitación por medio de un reóstato conectado en serie con el inductor. *Figura 135*

Figura 135. Generador con excitación en derivación o shunt

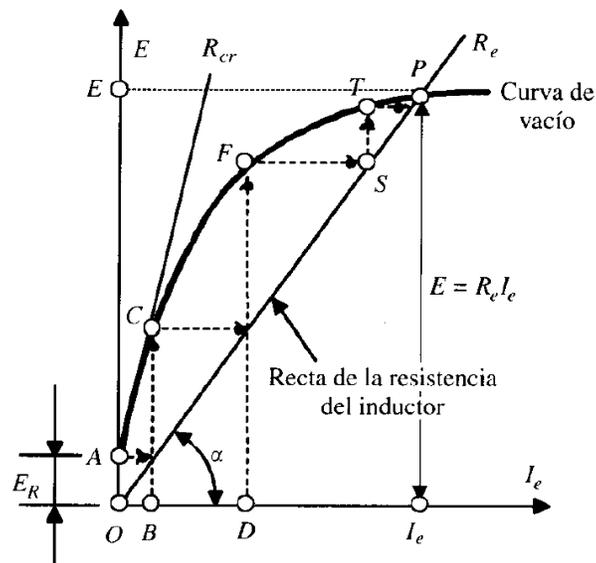


Para determinar la fem que produce la dinamo en vacío habrá que utilizar la característica en vacío de la máquina junto con la característica del inductor (Figura 136), que representa la relación $E = R_e I_e$ (donde R_e es la resistencia total del circuito de excitación $R_e = R_p + R_{ex}$). Donde R_p representa la resistencia del devanado inductor.

Esta característica del inductor es una recta de pendiente R_e :

$$\tan \alpha = R_e = \frac{E}{I_e}$$

Figura 136. Determinación de la tensión de funcionamiento de un dinamo derivación



La fem final engendrada corresponde al punto P, solución común a la curva de vacío y a la recta del inductor.

Para cada valor de la resistencia del circuito de excitación se obtendrá una recta de pendiente distinta cuya intersección con la curva de vacío determinará la fem resultante.

Si la resistencia R_e se va desplazando por la curva de vacío hasta llegar al origen, para una cierta resistencia $R_e = R_{cr}$, denominada resistencia crítica.

La recta del inductor será tangente a la parte inicial de la curva de vacío y en estas condiciones la dinamo no se excita.

Por ello la resistencia máxima del reóstato debe proyectarse para que al sumarse con la resistencia del devanado inductor no se supere la magnitud R_{cr} .

En vacío, toda la corriente de inducido pasa a través del devanado inductor, por lo que $I_i = I_e$, en estas condiciones la corriente común es de pequeño valor, por lo que se pueden considerar despreciables tanto la caída de tensión en la resistencia del inducido como la propia reacción del inducido.

Cuando la fem alcance el punto P dado por la intersección de la recta de campo con la curva de vacío, no hay ningún aumento de la corriente I_e , la fem deja aumentar y el punto P determina los valores finales tanto de la tensión en vacío (fem) como de la corriente de excitación, cumpliéndose la condición:

$$E = R_e I_e$$

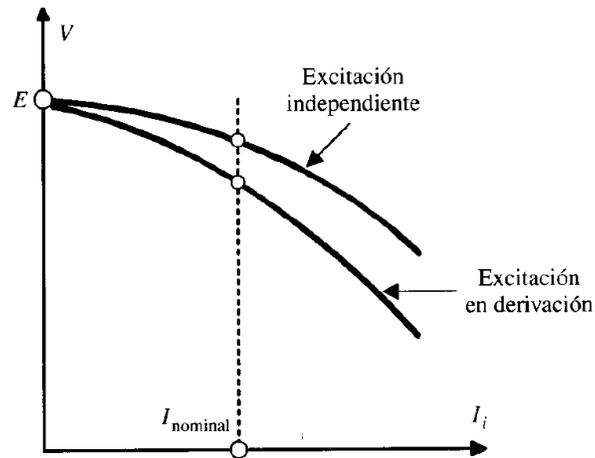
En un generador en derivación, la característica externa representa una variación de la tensión terminal superior a la del generador con excitación independiente, se añade el efecto de la caída de tensión producida por las escobillas, resistencia del inducido y su reacción, disminuyendo la corriente de excitación. *Figura 137*

$$V = E - R_i I_i - V_{esc}$$

$$V = R_e I_e = R_p I_p$$

$$I_i = I + I_e$$

Figura 137. Característica externa de un generador shunt



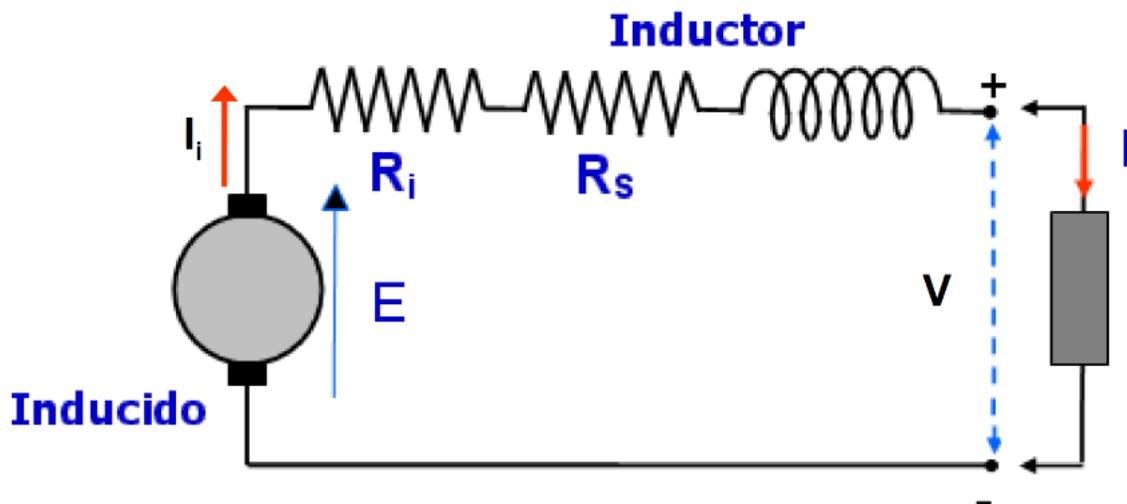
El generador derivación es el tipo que se emplea más frecuentemente en la práctica, ya que no necesita una excitación separada y en los límites de carga normales no presenta caídas de tensión elevadas.

Variando la resistencia del reóstato de excitación se puede ajustar la tensión terminal para compensar la caída de tensión producida por la carga.

Generador de cc con excitación en serie

En este tipo de generador el inductor y el inducido van en serie, *Figura 138*, cuando la máquina está en vacío, al ser $I_e = I = I_i = 0$, se obtiene una fem muy pequeña que se debe al magnetismo remanente.

Figura 138. Generador con excitación en serie

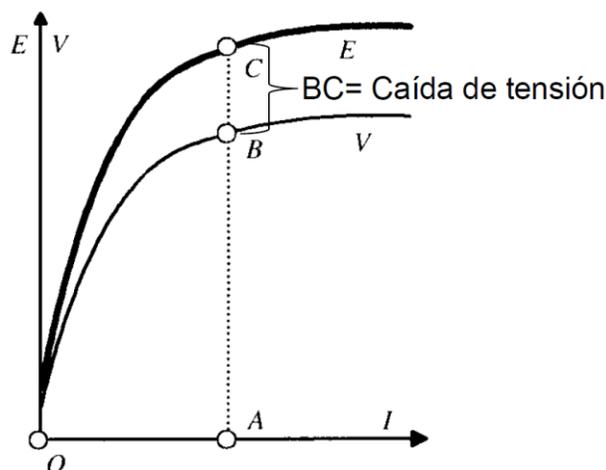


$$V = E - (R_i + R_s)I_i - V_{esc}$$

$$I_i = I$$

Al conectar la carga, si ésta tiene una gran resistencia, la máquina puede no excitarse; la reducción de esta resistencia, R_L , va acompañada con un incremento relativamente elevado de la tensión terminal. *Figura 139*

Figura 139. Característica externa del generador con excitación en serie



$$V = E - R_i I_i - V_{esc}$$

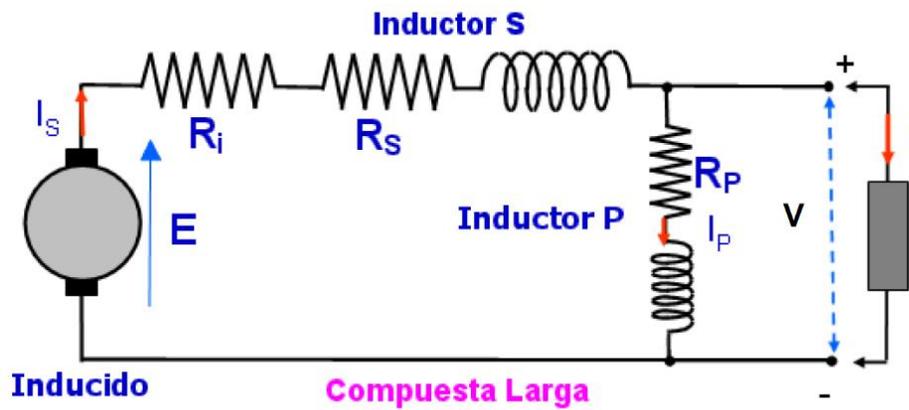
$$R_e = R_p + R_{ex}$$

La curva de vacío de la máquina construida con el inductor conectado como excitación independiente. Para una corriente OA , se genera una fem AC y la correspondiente tensión es AB . La diferencia entre ambas magnitudes es BC y representa la caída de tensión en la resistencia de inducido, reacción en el mismo y contacto de escobillas. De la característica externa se deduce que la tensión del generador varía bruscamente con la carga, en la práctica este tipo de dinamo no se emplea.

Generador de cc con excitación compuesta (compound)

En este esquema de este tipo de generador, puede hacerse con corta o larga derivación, generalmente las fmms de los devanados serie y derivación suelen ser del mismo signo (aditivos), pero puede realizarse una conexión sustractiva o diferencial. *Figura 140 y 141*

Figura 140. Generador con excitación compuesta corta

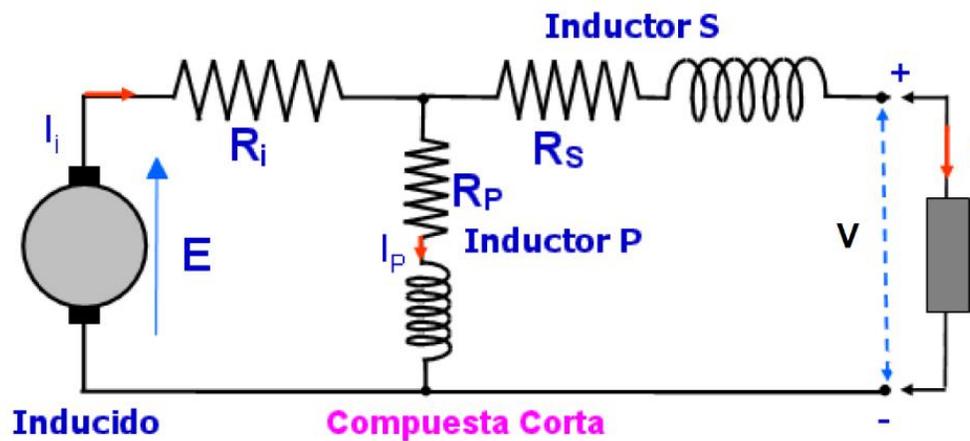


$$V = E - (R_i + R_s)I_s - V_{esc}$$

$$V = R_e I_e = R_p I_p$$

$$I_s = I_p + I$$

Figura 141. Generador con excitación compuesta larga



$$V = E - R_i I_i - R_s I - V_{esc}$$

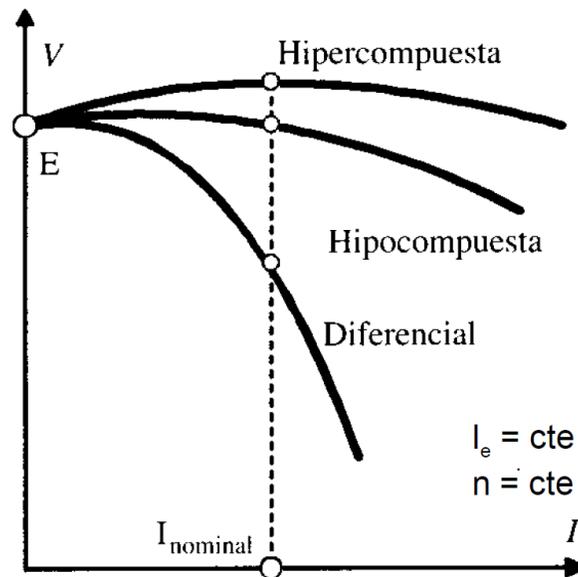
$$V = R_p I_p - R_s I$$

$$I_i = I_p + I$$

Si se incrementa el número de espiras en serie, la tensión terminal puede aumentar con la carga, lo que da lugar a la característica Hipercompuesta. Caso contrario la tensión puede reducirse dando lugar a la característica Hipocompuesta.

La conexión diferencial donde se restan las fmm del campo derivación y serie, presenta una caída de tensión elevada con el aumento de la carga siendo útil su aplicación para soldadura en corriente continua. *Figura 142*

Figura 142. Características externas de un generador compound

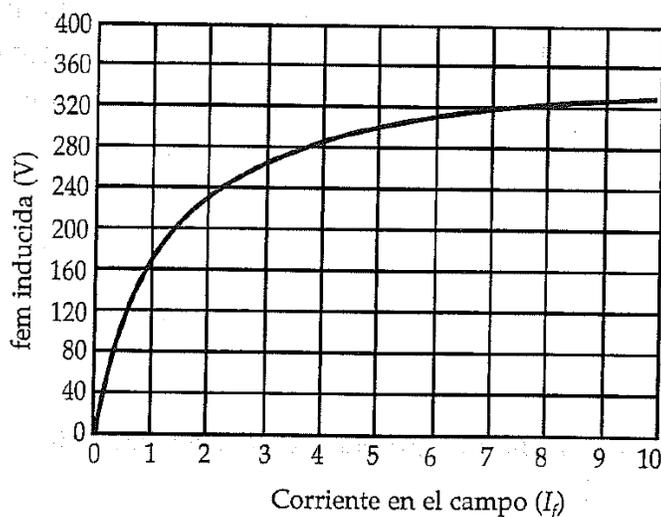


Ejercicios del Tema 5

EJERCICIO 1

Un generador hexapolar con excitación independiente de 240 kW, 240 V y 600 rpm alimenta la carga especificada al voltaje especificado. El generador tiene $R_i = 0.01 \Omega$, $R_p = 30 \Omega$, $V_e = 120 V$, $N_i = 500$ vueltas por polo y $P_m = 10 kW$. La fmm de desmagnetización debida a la reacción de la armadura es 25% de la corriente de la armadura. Su curva de magnetización se muestra en la figura. Determine:

- la fem inducida a plena carga,
- la potencia desarrollada,
- el par desarrollado,
- el par aplicado,
- la eficiencia,
- la resistencia externa en el devanado del campo y
- la regulación del voltaje.



Solución

Como $P_o = 240 kW$ y $V_f = 240 V$, la corriente a plena carga es

$$I_L = I_i = \frac{240000}{240} = 1000 A$$

- a) A plena carga, la fem inducida es

$$E = V - R_i I_i = 240 + 1000 * 0.01 = 250 V$$

b) La potencia desarrollada es

$$P_d = E I_a = 250 * 1000 = 250\,000\,W, \quad 250\,kW$$

$$\omega = \frac{2\pi * 600}{60} = 20\pi \text{ rad/s}$$

c) El par desarrollado a plena carga es

$$T_d = \frac{P_d}{\omega_m} = \frac{250000}{20\pi} = 3978.87\,Nm$$

d) La potencia mecánica suministrada a plena carga debe ser

$$P_{inm} = P_d + P_m = 250 + 10 = 260\,kW$$

Por tanto, el par aplicado es

$$T_s = \frac{260000}{20\pi} = 4138.03\,Nm$$

e) En la curva de magnetización se observa que la corriente efectiva del campo a plena carga es de 2.5 A. Ésta es la corriente del campo que debe circular en el devanado del campo cuando no hay efecto de desmagnetización por la reacción de la armadura. La fmm correspondiente es $500 * 2.5 = 1250$ A t/polo. La fmm de desmagnetización debida a la reacción de la armadura es $0.25 * 1000 = 250$ A t/polo. Así, la fmm que debe suministrar el devanado del campo es $1250 + 250 = 1500$ A t/polo. La corriente real del campo a plena carga es

$$I_e = \frac{1500}{500} = 3\,A$$

La pérdida de potencia en el devanado del campo es $V_e I_e = 120 * 3 = 360\,W$. La potencia total admitida es

$$P_{in} = P_{inm} + V_e I_e = 260 + 0.36 = 260.36\,kW$$

La eficiencia del generador es

$$\eta = \frac{240}{260.36} = 0.922 \text{ o } 92.2\%$$

f) La resistencia total en el circuito del devanado del campo es

$$R_e = \frac{120}{3} = 40 \Omega$$

$$R_{ex} = 40 - 30 = 10 \Omega$$

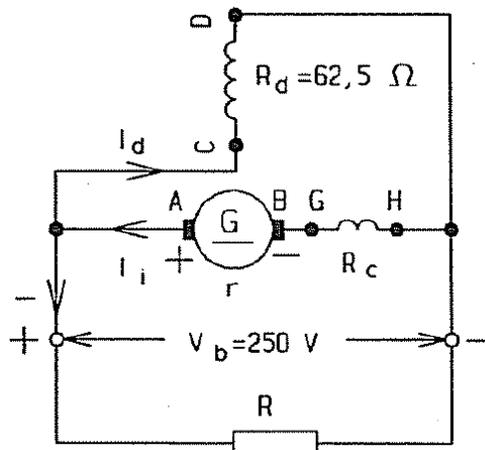
g) Sin carga, la reacción de la armadura es igual a cero. Por ello, la fmm del campo es de 1500 A t/polo. De la curva de magnetización se obtiene que la fem inducida sin carga es de aproximadamente 266V. Por tanto, la regulación del voltaje es

$$RV\% = \frac{266 - 240}{240} * 100 = 10.83\%$$

EJERCICIO 2

Una dinamo derivación de 50 kW, 250 V, 1150 rpm tiene una resistencia en el circuito de excitación de 62.5Ω , una resistencia de inducido y devanado de conmutación de 0.025Ω . La caída de tensión por contacto de escobilla con colector de 1.5 V. Calcular, cuando la máquina funciona a plena carga:

- Intensidad de corriente de carga
- Intensidad de corriente de excitación
- Intensidad de corriente en el inducido
- Valor de la fem generada en el inducido
- Potencia eléctrica total
- Potencia perdida por efecto Joule en los devanados y contacto de escobillas colector



Solución

a) La intensidad de corriente de carga.

$$I = \frac{P_{in}}{V_e} = \frac{5000}{250} = 200 \text{ A}$$

b) La intensidad en el devanado derivación.

$$I_d = \frac{V_e}{R_d} = \frac{250}{62.5} = 4 \text{ A}$$

c) La intensidad de corriente en el inducido es la suma de la intensidad de carga y la del devanado derivación.

$$I_i = I_d + I = 200 + 4 = 204 \text{ A}$$

d) La fem generada

$$E = V + (R_i + R_{conm}) I_i + V_{esc} = 250 + 0.025 \cdot 204 + 2 \cdot 1.5 = 258.1 \text{ V}$$

e) La potencia eléctrica total

$$P_t = E I_i = 258.1 \cdot 204 = 52652.4 \text{ W}$$

f) Las pérdidas por efecto Joule

$$P_{Cu} = P_t - P_{in} = 52652.4 - 50000 = 2652.4 \text{ W}$$

La potencia perdida por efecto Joule también se puede calcular:

$$\begin{aligned} P_{Cu} &= (r + R_c) I_i^2 + R_d I_d^2 + 2V_{esc} I_i \\ &= 0.025 \cdot 204^2 + 62.5 \cdot 4^2 + 2 \cdot 1.5 \cdot 204 \end{aligned}$$

$$P_{Cu} = 2652.4 \text{ W}$$

EJERCICIO 3

La fem inducida en la región lineal de un generador serie se denota con $E=0.4I_s$. El generador tiene $R_s = 0.03 \Omega$ y $R_i = 0.03 \Omega$. Se usa como un reforzador entre la barra conductora a 240 V en una estación y un alimentador con resistencia igual a 0.25Ω , Calcule el voltaje entre el extremo alejado del alimentador y la barra conductora con una corriente de 300 A.

Solución

$I_i = I_s = 300 A$. La fem inducida es

$$E = 0.4 * 300 = 120 V$$

La caída de voltaje a través de R_i , R_s y el alimentador es

$$V = 300 \times (0.02 + 0.03 + 0.25) = 90 V$$

Por tanto, el voltaje entre el extremo alejado del alimentador y la barra conductora es

$$V = 240 + 120 - 90 = 270 V$$

El incremento neto de 30 V puede exceder el límite deseado. Puede ser necesario instalar una resistencia para desvío de la corriente del campo a fin de regular el voltaje terminal en el extremo alejado del alimentador.

EJERCICIO 4

Un generador compound cumulativo de 240 V, en derivación corta, está especificado a 100 A. La corriente en el campo shunt es de 3 A. Tiene una resistencia en la armadura de $50m\Omega$, una resistencia en el campo serie de $10m\Omega$, una resistencia para desvío de campo de $40m\Omega$ y una pérdida por rotación de 2kW.

El generador está conectado a la carga por medio de un alimentador, R_{fe} , de $30m\Omega$ de resistencia. Determine la eficiencia del generador cuando opera a plena carga al voltaje especificado. Trazar el diagrama de flujo de potencia para mostrar la distribución de potencia.

Solución

$$P_o = 240 * 100 = 24\ 000\ W$$

Puesto que $I_e = 3\ A$, $I_i = 100 + 3 = 103\ A$

$$I_s = \frac{0.04}{0.04 + 0.01} * 100 = 80\ A$$

$$I_d = 100 - 80 = 20\ A$$

$$E = V + IR_{fe} + I_s R_s + I_i R_i$$

$$= 240 + 100 * 0.03 + 80 * 0.01 + 103 * 0.05 = 248.95\ V$$

$$V = E - R_i I_i$$

$$= 248.95 - 103 * 0.05 = 243.8\ V$$

Por tanto, $R = \frac{243.8}{3} = 81.267\ \Omega$

Pérdidas en el cobre:

Armadura: $I^2 R = 103^2 * 0.05 = 530.45\ W$

Campo en serie: $I_s^2 R_s = 80^2 * 0.01 = 64\ W$

Campo shunt: $I_e^2 R_e = 3^2 * 81.267 = 731.4\ W$

Resistencia del desviador: $I_d^2 R_d = 20^2 * 0.04 = 16\ W$

Resistencia del alimentador: $I^2 R_{fe} = 100^2 * 0.03 = 300\ W$

Pérdida total en el cobre: $P_{cu} = 530.45 + 64 + 731.4 + 16 + 300$
 $= 1641.85\ W$

Luego, la potencia desarrollada es

$$P_d = P_o + P_{cu} = 24000 + 1641.85 = 25641.85\ W$$

Sin embargo, la potencia desarrollada también puede calcularse como

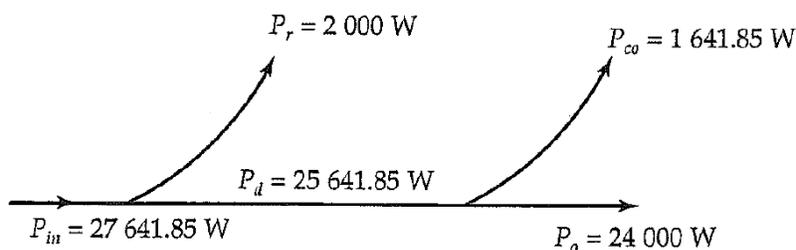
$$P_d = EI_i = 248.95 * 103 = 25641.85 \text{ W}$$

La potencia de entrada es

$$P_{in} = P_d + P_r = 25641.85 + 2000 = 27641.85 \text{ W}$$

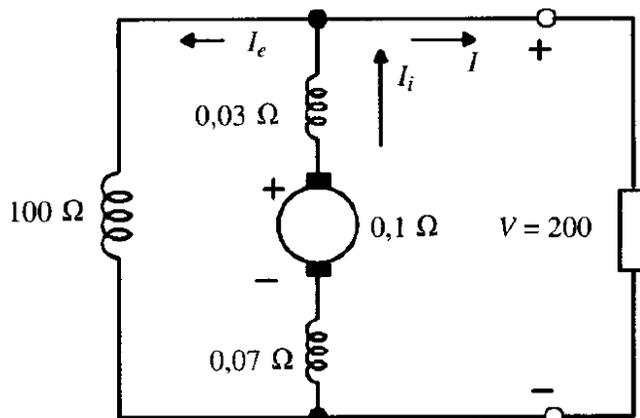
Por tanto, la eficiencia es

$$\eta = \frac{P_o}{P_{in}} = \frac{24000}{27641.85} = 0.8682 \text{ y } 86.82\%$$



EJERCICIO 5

Un generador de cc, compuesto de larga derivación 200V, 10 kW, 4 polos tiene una resistencia del inducido, polos auxiliares, campo en serie y campo derivación de 0.1, 0.03; 0.07 y 100Ω, respectivamente. Calcular el valor de la fem generada cuando la máquina trabaja a plena carga. Si la velocidad asignada es igual a 1500 rpm y el inducido tiene un devanado imbricado con 720 conductores, determinar el flujo por polo en estas condiciones, Prescindir de la caída de tensión en escobillas.



Solución

A plena carga, la corriente I vale:

$$I = \frac{P}{V} = \frac{10000}{200} = 50 \text{ A}$$

Para una tensión terminal constante igual a 200V, la corriente de excitación en el campo derivación es:

$$I_e = \frac{200}{100} = 2 \text{ A}$$

En consecuencia, la corriente de inducido vale:

$$I_i = I + I_e = 50 + 2 = 52 \text{ A}$$

La fem generada por la máquina tendrá una magnitud:

$$E = V + R_i I_i$$

donde en hay que incluir la resistencia del campo inducido, campo en serie y polos auxiliares, resultando:

$$E = 200 + (0.07 + 0.1 + 0.03) 52 = 210.4 \text{ V}$$

Para calcular el valor del flujo por polo correspondiente hay que tener en cuenta que para un devanado imbricado el número de circuitos derivados coincide con el número de polos. La fem resulta:

$$E = 210.4 = \frac{n}{60} Z \phi \frac{p}{c} = \frac{1500}{60} 720 \phi \frac{2}{2}$$

de donde resulta un flujo de 11.68 mWb.

Tema 6 Análisis y control de los motores de corriente directa

El motor de corriente directa es la principal aplicación industrial del dinamo, ya que tiene facilidad a la hora de regular la velocidad de giro en el rotor.

En este tema se abordará la clasificación de los motores de corriente directa, así como las variables involucradas en su operación, pérdidas, arranque, control de la velocidad de los diferentes motores según esta clasificación.

6.1 Característica velocidad contra par de los diferentes motores de corriente directa.

Un motor de cc transforma una energía eléctrica de entrada en una energía mecánica de salida, de acuerdo con el principio de reciprocidad electromagnética formulado por Faraday y Lenz.

La máquina crea un par resistente que se opone al de rotación, disminuye la fem reduciendo la velocidad o la excitación del inductor, cuando E se hace menor que la tensión V_i , la corriente I_i del inducido cambiará de sentido, produciendo la máquina una fuerza contraelectromotriz, ya que E se opone a la corriente I_i .

El circuito del inducido queda:

$$E = V + R_i I_i + V_{esc}$$

La corriente del inducido es:

$$I_i = \frac{V_i - E}{R_i}$$

$$V_i = V + V_{esc}$$

Para determinar el proceso de transformación de energía mecánica en eléctrica en el motor de cd se obtiene la ecuación del balance de potencias.

$$V I_i = E I_i + R_i I_i^2 + V_{esc} I_i$$

cuyos términos significan:

$$P_i = V I_i \quad : \text{Potencia eléctrica absorbida por el motor}$$

$$P_{Cui} = R_i I_i^2 \quad : \text{Pérdidas en el cobre del inducido}$$

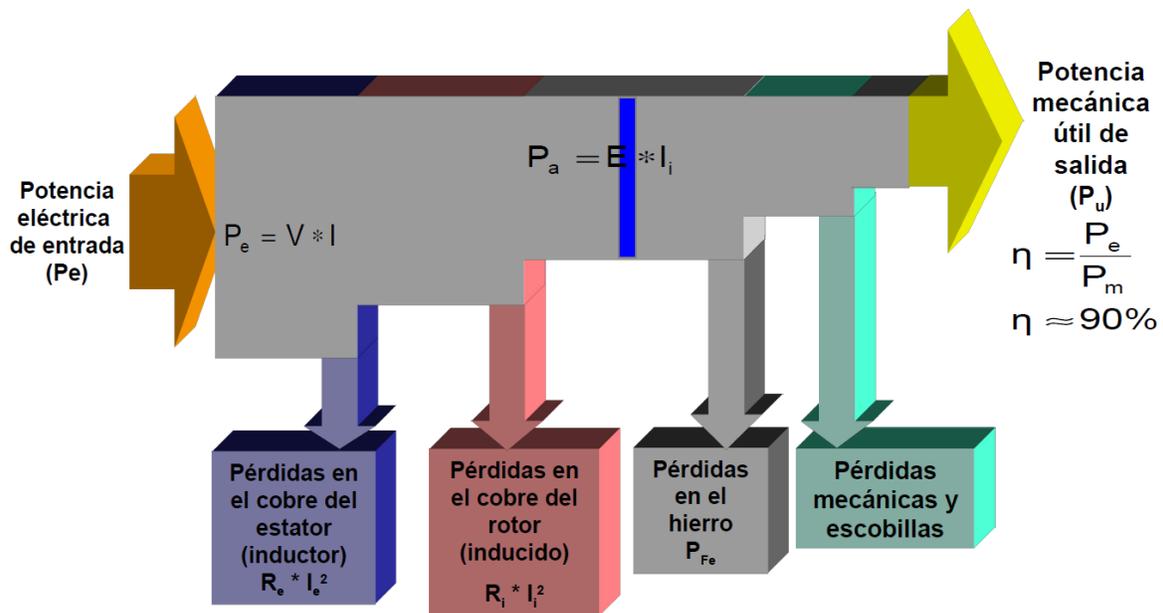
$$P_{esc} = V_{esc} I_i \quad : \text{Pérdidas en los contactos de las escobillas}$$

$$P_a = E I_i \quad : \text{Potencia electromagnética desarrollada por la máquina}$$

De acuerdo con esta nomenclatura, el balance de potencia en el inducido se convierte en:

$$P_i = P_a + P_{Cui} + P_{esc}$$

Figura 143. Balance de potencias en el motor de cd



Los diferentes tipos de motores de cd se clasifican de acuerdo con el tipo de excitación, de forma análoga a la que se hacía con los generadores, se tiene motores con excitación:

- Independiente
- Serie
- Derivación
- Compuesta

En cada caso el par electromagnético está dado por la expresión:

$$T = K_T \Phi I_i$$

Los motores de cd tienen una gran ventaja sobre los motores de ca, debido a la regulación de velocidad.

Motores de CD con excitación independiente y derivación.

Los esquemas de conexiones para el arranque y regulación de velocidad de estos motores de cd son similares entre sí. En el caso de excitación independiente, los circuitos del inductor y del inducido se alimentan de fuentes distintas, mientras que en el caso de motor derivación (shunt) las fuentes coinciden.

Durante la puesta en marcha interesa que el flujo en el entrehierro posea su valor máximo, de esta forma el motor podrá desarrollar el par de arranque necesario con la corriente mínima posible en el inducido.

Cuando se pone en marcha el motor el devanado de excitación debe estar conectado a la tensión de la red, además el reóstato conectado en serie con el inductor deberá tener la mínima resistencia para que sea también máxima la corriente de excitación o campo.

Figura 144. Motor con excitación independiente

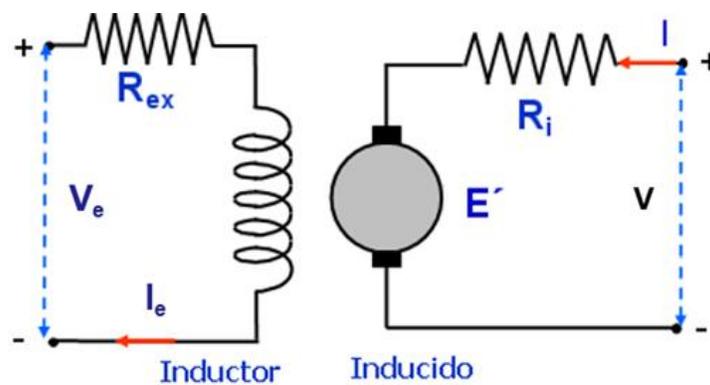
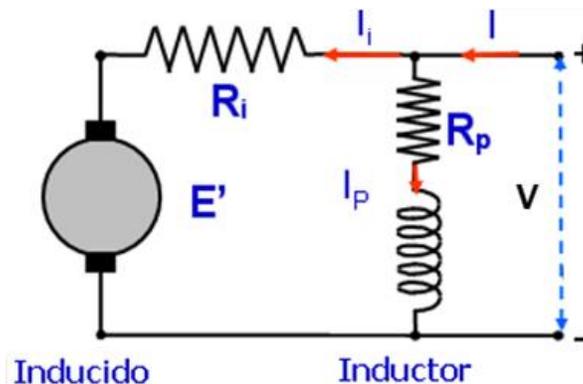
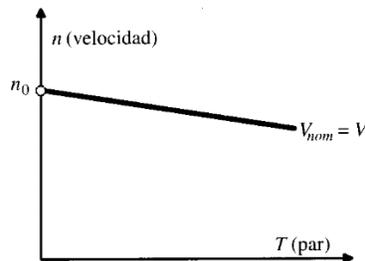


Figura 145. Motor con excitación en derivación o shunt



La curva par-velocidad del motor derivación es una línea recta. La ecuación de esta recta para los valores de tensión aplicada, resistencia del inductor y resistencia adicional del circuito del campo se denomina característica natural de la máquina.

Figura 146. Características par-velocidad de un motor derivación o shunt



Motores de CD en serie

Es aquel cuyos devanados de campo constan de relativamente pocas vueltas conectadas en serie con el circuito del inducido, en este motor la corriente del inducido (I_i), la corriente de campo (I_s) y la corriente de línea (I_L) son iguales. La ley de voltaje de Kirchhoff queda:

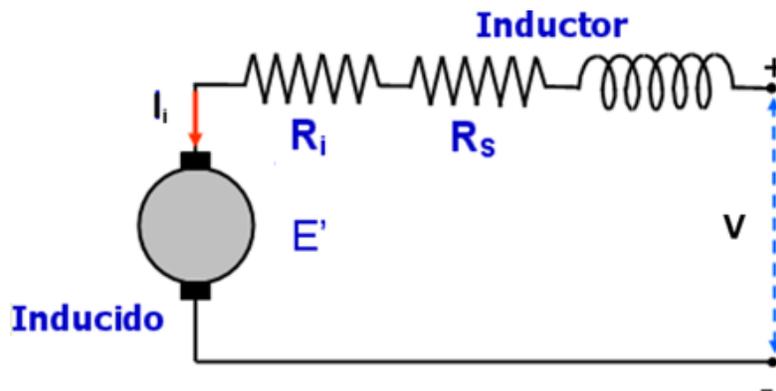
$$V = E' + (R_i + R_s)I_i$$

$$I_i = I_s = I_L$$

El flujo de la máquina depende de la corriente del inducido $I = I_i$ y en consecuencia depende de la carga. El flujo es directamente proporcional a la corriente I_i , hasta antes de llegar al punto de saturación y la característica de carga se puede obtener:

$$T = K_T \Phi I_i = K_T \Phi I_i^2 \quad ; \quad V = E + R_i I_i \quad ; \quad E = I_i n \Phi$$

Figura 147. Motor de cd en serie



Conforme se incrementa la carga en el motor, también se incrementa su flujo causando una disminución de velocidad.

La curva de magnetización lineal implica que el flujo del motor estará dado por:

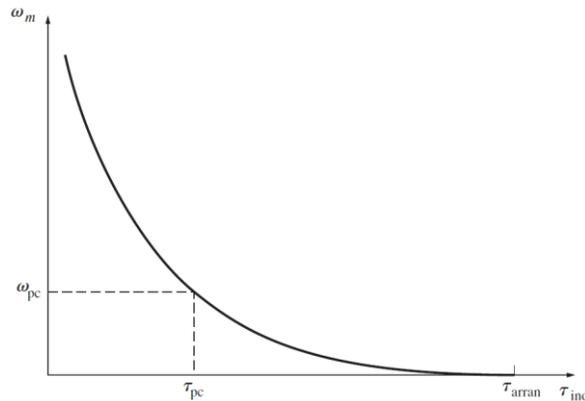
$$\Phi = c I_i$$

Esta se utiliza para deducir la curva característica par-velocidad del motor serie con una caída muy pronunciada.

La corriente del inducido se expresa como:

$$I_i = \sqrt{\frac{T}{K_T \Phi}}$$

Figura 148. Característica par-velocidad de un motor de cd en serie



La ecuación del par inducido como:

$$T = \frac{K_T}{c} \Phi^2$$

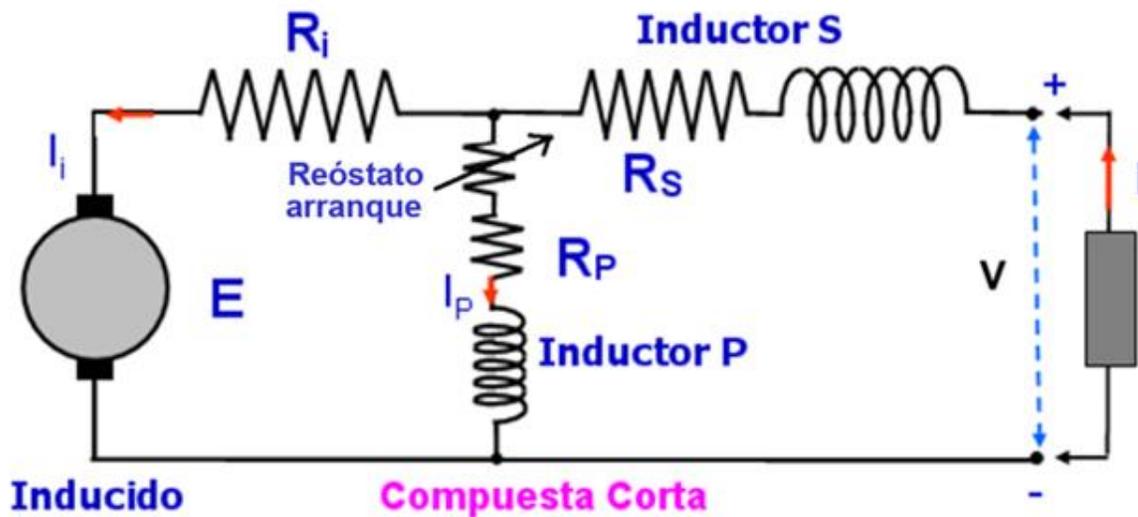
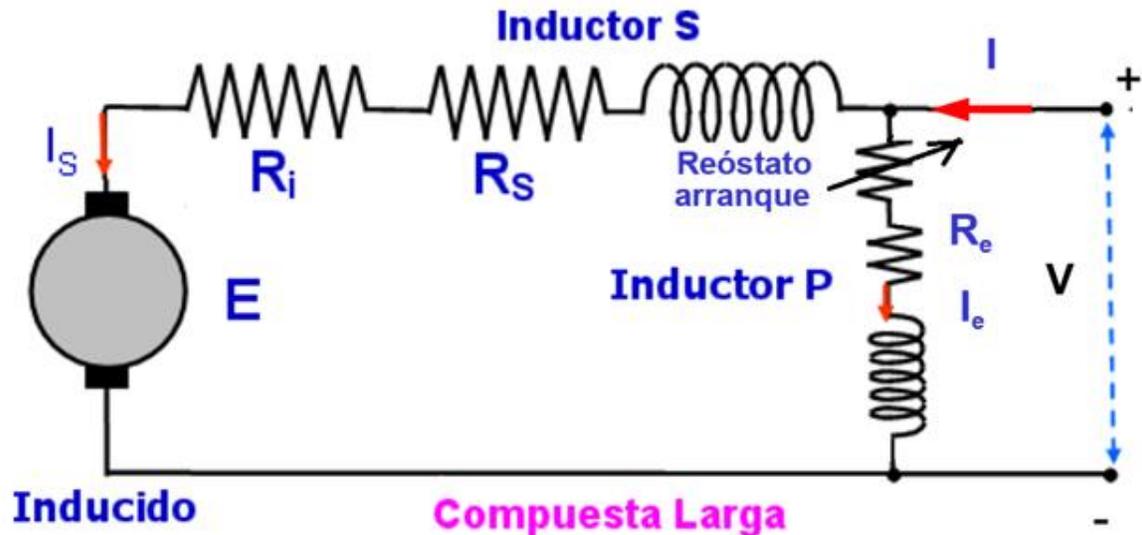
La relación par – velocidad resultante es:

$$\omega_m = \frac{V}{\sqrt{Kc}} \frac{1}{\sqrt{T}} - \frac{R_i + R_s}{Kc}$$

Motor de CD Compuesto

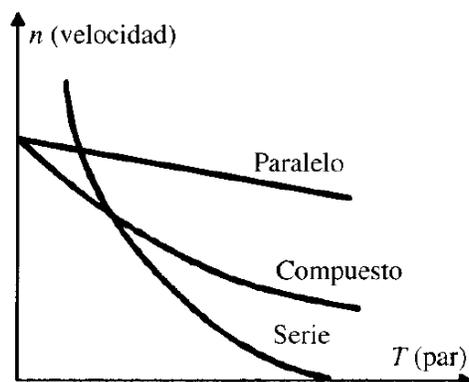
Incluye tanto un campo en derivación como un campo en serie.

Figura 149. Motor de cd con excitación compuesta



El devanado de excitación serie puede conectarse de forma que refuerce el campo derivación (aditivo) o que se oponga al mismo (diferencial). La corriente del devanado derivación es constante, mientras que la intensidad del arrollamiento serie aumenta con las cargas; obteniéndose un flujo por polo que aumenta también con la carga, pero no tan rápidamente como en el motor serie. La característica mecánica de estos motores es intermedia entre las curvas del motor derivación y serie.

Figura 150. Característica par-velocidad de un motor de cd con excitación compuesta



La ley de Kirchhoff de un motor de cd compuesto es:

$$V = E + (R_i + R_s)I_i$$

Las corrientes en el motor compuesto están relacionadas por:

$$I_s = I_L - I_f$$

$$I_e = \frac{V}{R_e}$$

6.2 Aplicaciones de los motores de cd.

Los motores de corriente continua entre las ventajas destacan su gran capacidad de generar un par muy alto a baja velocidad, su exactitud, su facilidad de control o el alto rendimiento a una gran variedad de velocidades.

Además, otra gran ventaja característica de los motores de corriente continua es su facilidad para invertir la marcha en grandes motores, que trabajan con cargas de elevada inercia y son capaces de devolver energía a la línea, de forma que trabajan como un generador. De esta forma, pueden frenar y reducir la velocidad.

Todo ello los hace idóneos para su empleo en máquinas que necesiten trabajar de forma fina a velocidad variable.

En cambio, entre sus ventajas, sobresale la de contar con un coste, tanto de adquisición como de mantenimiento, bastante elevado.

A pesar de ello, debido a sus ventajas, los motores de corriente continua son ampliamente empleados en muy diversos ámbitos, tanto a nivel industrial como en la fabricación de máquinas para consumo doméstico:

- Giradiscos
- Lectores de CD
- Discos duros
- Motores para modelismo y aeromodelismo

Este tipo de mecanismos utilizan motores de imán fijo y sin escobillas. Estos motores proporcionan un eficaz control de la velocidad y un elevado par de arranque.

En el ámbito de los juguetes también se suelen seleccionar motores eléctricos de corriente continua.

A nivel industrial se puede encontrar las siguientes aplicaciones:

- Construcción de trenes de laminación reversibles y capaces de aguantar cargas muy altas, para lo cual se acoplan varios, agrupados por pares o tríos
- Cizallas en trenes de laminación en caliente, para lo cual se emplean motores en derivación
- Trenes de laminación en caliente tipo Konti, que emplean diversos bastidores, mediante los cuales se consigue aumentar la velocidad a base de ir reduciendo su sección.
- Máquinas trefiladoras y en el control de máquinas bobinadoras de las industrias papeleras.
- En el ferrocarril
- En las máquinas elevadoras y extractoras.

6.3 Arranque de los motores de cd.

Para que un motor de cd funcione adecuadamente, debe tener equipo de control y protección especial.

El propósito de este equipo es:

- Proteger al motor contra daños debidos a cortacircuitos en el equipo
- Proteger al motor contra daños por sobrecargas prolongadas
- Proteger al motor contra daños por corrientes de arranque excesivas
- Proporcionar una forma conveniente de controlar la velocidad de operación de motor

Problemas en el arranque de motores de cd

Para que un motor de cd funcione adecuadamente, debe estar protegido contra daños físicos durante el periodo de arranque. En condiciones de arranque el motor no gira, de manera que $E = 0$ V. Puesto que la resistencia interna de un motor de cd normal es muy baja en comparación con su tamaño (3 a 6% en un motor mediano), fluye una corriente muy alta.

Esta corriente es 20 veces mayor a la corriente a plena carga nominal del motor. Es posible que un motor se dañe severamente por este exceso de corriente, incluso si sólo se presenta por un momento.

Una solución para el problema del exceso de corriente durante el arranque es la inserción de un resistor de arranque en serie con el inducido para limitar el flujo de corriente hasta que E se acumule y actúe como limitante.

Este resistor no debe estar permanentemente en el circuito, puesto que provocaría pérdidas excesivas y que la característica par-velocidad del motor caería excesivamente con un aumento de la carga.

Por lo tanto, el resistor se debe insertar en el circuito del inducido para limitar el flujo de corriente en el arranque y luego se debe quitar conforme la velocidad del motor aumenta.

Los resistores de arranque están hechos de una serie de piezas, cada una de las cuales se quita sucesivamente del circuito del motor a medida que éste acelera para limitar la corriente en el motor a un valor seguro y a la vez no reducirla a un valor tan bajo que no se logre una rápida aceleración.

Se requiere realizar dos acciones para construir un arrancador de motor funcional. El primero es escoger el tamaño y número de segmentos del resistor necesarios para limitar la corriente de arranque a los valores deseados.

El segundo es diseñar un circuito de control que cierre los interruptores de paso en el momento adecuado para eliminar del circuito ciertas partes del resistor. Hoy han sido reemplazados casi por completo por circuitos de arranque automáticos.

Los circuitos de arranque de los motores de cd se pueden usar varios esquemas diferentes para lograr esta conmutación. Los dispositivos que se usan son fusibles, interruptores pulsadores, relés, relés de temporización y sobrecargas.

6.4 Control de velocidad.

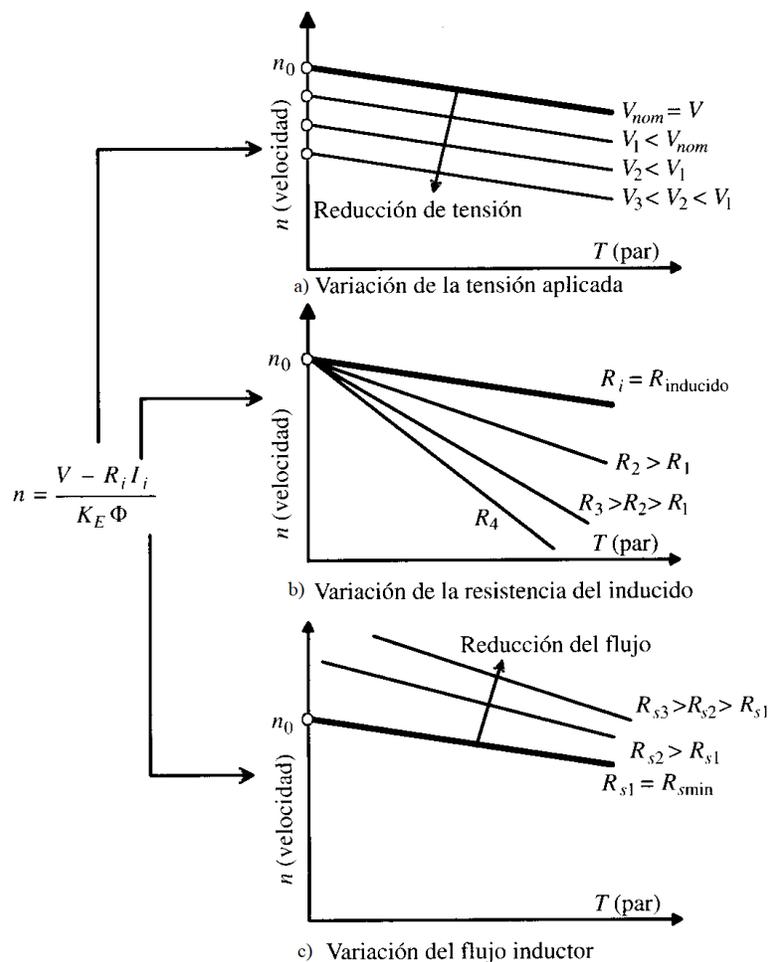
Control de velocidad en los motores de cd en serie.

Sólo hay una manera eficiente de cambiar el voltaje en las terminales del motor, provoca una mayor velocidad con cualquier par. También se puede controlar por medio de la inserción de un resistor en serie en el circuito del motor, pero provoca un gran desperdicio de potencia y sólo se utiliza en periodos intermitentes durante el arranque, esto ha cambiado con la introducción de circuitos de control en estado sólido.

Regulación de velocidad de los motores derivación e independiente se puede conseguir de las siguientes maneras:

- Ajustando la tensión del inducido
- Variando la resistencia del circuito del inducido
- Cambiando la resistencia del circuito de excitación

Figura 151. Comportamiento de la regulación de velocidad de una máquina en derivación o shunt



a) Regulación de velocidad por cambio en la tensión aplicada al inducido

Este sistema de control solamente se puede aplicar al motor con excitación independiente, al tener separados los circuitos de excitación y de inducido. Al reducir la tensión de alimentación V , la corriente I_i disminuye, por lo que el par desarrollado por el motor se reduce, al hacerse inferior al par resistente, se produce una disminución de la velocidad de la máquina. Si aumenta la tensión aplicada, se produce una elevación de la velocidad.

Da por resultado una serie de rectas paralelas a la característica natural de la máquina y que están por debajo de ésta, ya que la tensión aplicada se va disminuyendo por debajo de la tensión asignada para no dañar los aislamientos de la máquina.

b) Regulación de velocidad por cambio en la resistencia en serie con el inducido

Al introducir una resistencia adicional en el circuito de inductor se produce una disminución en el flujo inductor de la máquina, aumentando la velocidad del motor. Este sistema es válido tanto para los motores con excitación derivación como para motores con excitación independiente.

Este procedimiento es antieconómico, ya que las pérdidas por efecto Joule son muy elevadas, por lo que se utiliza en motores de pequeña potencia. La Figura c) todas las rectas que obtienen, denominándose características artificiales o reostáticas) son las correspondientes a la velocidad de vacío de la máquina, ya que depende de la tensión aplicada V y del flujo inductor Φ .

c) Regulación de velocidad por cambio en la resistencia en serie con el inductor

Al introducir una resistencia adicional en el circuito del inductor se produce una disminución en el flujo inductor de la máquina, tanto si el motor es con excitación independiente o derivación, lo que es un aumento en la velocidad del motor.

Se reduce la f_{cm} del motor, lo que provoca un aumento de la corriente del inducido absorbida por la máquina. El par del motor aumenta, ya que la disminución de flujo está compensada con creces por el aumento en la corriente del inducido.

6.5 Modelado del motor de cd.

Los motores DC suelen tener un comportamiento lineal en un rango predefinido de tensiones de entrada. Sin embargo, a bajas velocidades angulares la fricción produce no linealidades, además de que el motor sufre perturbaciones a su entrada y ruido a su salida,

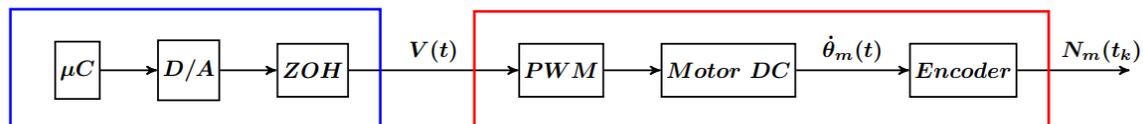
normalmente debidas, las primeras al efecto de la carga y la segunda al ruido en la medida de los sensores.

También sufre el motor variaciones no lineales cuando se utiliza de forma continua, debido a efectos térmicos produciendo variaciones en la resistencia de la bobina. A tensiones elevadas puede haber una desmagnetización del hierro, lo que supone variaciones en las constantes del motor.

Por otro lado, si se realiza un control digital aparecen errores debidos a la longitud de palabra finita, es decir, errores en los conversores A/D (sensor de posición angular, por ejemplo) y errores numéricos en el cálculo de las señales de control. Además, la conversión D/A de la señal de control y de la señal continua de entrada al motor nunca puede ser una reconstrucción exacta de una señal muestreada, ya que requeriría un filtro paso bajo ideal, el cual no es realizable físicamente.

Y por último, la etapa de potencia, es decir, la electrónica que acondiciona la señal de baja potencia de un microcontrolador a la potencia eléctrica del motor suele añadir ruido a su salida. Si se utiliza como etapa de potencia un puente en H para la generación de una señal PWM puede ocurrir que la tensión de referencia no sea suficientemente estable, debido al convertor AC/DC. Como consecuencia, la tensión de entrada al motor no sería la deseada, sino que estaría afectada por un ruido difícil de modelar.

Figura 152. Esquema general para el modelado de un motor DC



Todos estos factores hacen difícil un modelado exacto de un motor DC. En lo que sigue llamaremos modelado del motor a lo que realmente sería un modelado del motor que incluya toda la electrónica que será utilizada en un sistema de control realimentado. En la Figura 3.1 se muestra un esquema de bloques con los elementos fundamentales de actuación de un motor DC.

6.6 Aplicación y selección de máquinas de corriente directa.

Los generadores eléctricos de corriente continua de gran calibre producen energía limpia lo hacen mediante un proceso de generación de corriente continua que, posteriormente se

transforma en corriente alterna, estos generadores se les conoce como generadores inverter. Dichos generadores pueden clasificarse en función de muchos parámetros, pero el más relevante es posible el tipo de combustible que usan y, por otro lado, en función de la potencia del motor, pudiendo ser monofásico o trifásico. Algunos ejemplos se presentan a continuación:

Generador de corriente continua. Es ideal para equipos electrónicos y herramientas eléctricas, no es apto para maquinaria de gran capacidad inductiva, es decir para bombas sumergibles, soldadoras, etc.

Figura 153. Generador de corriente continua de gasolina



- Potencia Máxima: 3,2 kW.
- Voltaje: 220 V – 50 Hz – Monofásico.
- Corriente: 13,2 A.
- Enchufes: 2 Schuko 1x16A + 1x16A.
- Pantalla: Digital.
- Depósito de combustible: 7,4 L.
- Funcionamiento al 50% de carga: 9 h.
- Nivel ruido (7m;50% carga): 59 dBA.
- Salida corriente continua: 12V / 8,3A.
- Batería (Ah): 7 Ah.
- Motor: Gasolina 4 Tiempos OHV
- Modelo Motor: Hyundai HX170.
- Refrigeración Motor: Aire.
- Potencia: 4,4 HP.
- Modo de arranque: Eléctrico.
- Cilindrada: 208 cc.
- Depósito de aceite: 0,64 L.
- Alternador Modelo: A30i.
- Factor de potencia (Cosφ): 1.
- Regulación del voltaje: Electrónica
- Peso Neto: 38 kg.
- Dimensiones: 580x440x460 mm.
- Alarma de bajo nivel de aceite.

Figura 154. Generador de corriente continua monofásico



- Potencia Máxima: 2,0 kW.
- Voltaje: 220 V – 50 Hz – Monofásico.
- Corriente: 9,0 A.
- Enchufes: 2 Schuko 1x16A + 1x16A.
- Pantalla: Digital
- Depósito de combustible: 3,8 L.
- Funcionamiento al 50% de carga: 4,5 h.
- Nivel ruido (7m;50% carga): 58 dBA.
- Salida corriente continua: 12V / 5,0A.
- Batería (Ah): —
- Motor: Gasolina 4 Tiempos OHV
- Modelo Motor: Hyundai HX149F.
- Refrigeración Motor: Aire.
- Potencia: 3,2 HP.
- Modo de arranque: Manual.
- Cilindrada: 100 cc.
- Depósito de aceite: 0,41 L.
- Alternador Modelo: A20i.
- Factor de potencia (Cosφ): 1.
- Regulación del voltaje: Electrónica
- Peso Neto: 20 kg.
- Dimensiones: 575x330x507 mm.

Figura 155. Generador de corriente continua trifásico



- **Potencia Máxima:** 6,5 kW.
- **Voltaje:** 220 V – 50 Hz – Monofásico.
- **Corriente:** 28,0 A.
- **Enchufes:** 2 Schuko 1x16A + 1x16A.
- **Pantalla:** Digital.
- **Depósito de combustible:** 18,5 L.
- **Funcionamiento al 50% de carga:** 8 h.
- **Nivel ruido (7m;50% carga):** 65 dBA.
- **Salida corriente continua:** 12V / 8,3A.
- **Batería (Ah):** 14 Ah.
- **Motor:** Gasolina 4 Tiempos OHV
- **Modelo Motor:** Hyundai HX389.
- **Refrigeración Motor:** Aire.
- **Potencia:** 13 HP.
- **Modo de arranque:** ATS / Eléctrico.
- **Cilindrada:** 389 cc.
- **Depósito de aceite:** 1,1 L.
- **Alternador Modelo:** A52i.
- **Factor de potencia (Cosφ):** 1.
- **Regulación del voltaje:** Electrónica
- **Peso Neto:** 89 kg.
- **Dimensiones:** 750x537x630 mm.
- **Alarma de bajo nivel de aceite.**

Motor eléctrico sin escobillas (Brushless). Este tipo de motor de corriente continua no requiere contactos eléctricos deslizantes (cepillos) en el eje del rotor para funcionar. La conmutación de la corriente que circula en los devanados del estator y, por tanto, la variación de la orientación del campo magnético generado por ellos se produce de forma electrónica, es decir aprovecha del colector de delgas o un par de anillos rozantes para girar el eje rotativo, de hecho, sustituyen las escobillas con un controlador electrónico, llamado ESC (electronic speed controler), para hacer la conmutación.

A pesar de que la tecnología de motores sin escobillas surgió hace medio siglo en la industria, pero ha realizado en los últimos años una gran revolución en la fabricación de herramientas novedosas, particularmente, las inalámbricas.

Las máquinas equipadas con motores Brushless o motor BL normalmente brindan un alto rendimiento de trabajo, ya que, a diferencia de los modelos con escobillas, su motor se ajusta según la tarea que está destinado, proporcionan una mejor relación entre potencia de salida y tamaño, en consecuencia, ofrecen un mayor rendimiento. La única desventaja es podrían tener las herramientas con motores sin escobillas es el costo de estas. Si un motor sin escobillas cuesta 3 veces más caro que los modelos cepillados, pero funciona 5 veces más.

Figura 156. Motor sin escobillas



Motor paso a paso. Un motor a pasos es un motor de CD sin escobillas que puede ser de imán permanente o reluctancia variable que tiene como características de desempeño rotar en ambas direcciones, moverse con incrementos angulares precisos, sostener un torque de retención a velocidad cero y controlarse con circuitos digitales. El motor paso a paso es muy útil porque se puede posicionar con precisión sin ningún sensor de retroalimentación, por lo tanto, se puede representar como un controlador de circuito abierto.

El número y tasa de los pulsos controla la posición y velocidad del eje del motor. Por lo general, los motores de pasos se fabrican con pasos por revolución de 12, 24, 72, 144, 180 y 200, lo que resulta en incrementos de eje de 30° , 15° , 2.5° , 2° y 1.8° por paso. A medida que activamos los bobinados del motor paso a paso en un orden en particular, permitimos que fluya una corriente a través de ellos que magnetiza el estator provocando polos electromagnéticos que causarán la propulsión del motor. Se pueden diseñar circuitos especiales de **micropaso** para permitir una mayor cantidad de pasos por revolución, con frecuencia 10 000 pasos/rev o más.

Los motores de pasos pueden ser bipolares que requieren dos fuentes de poder o una fuente de poder de polaridad conmutable, o unipolares que requieren sólo una fuente de poder. Se impulsa mediante una fuente de corriente directa y requieren circuitos digitales para producir secuencias de energización de bobina para la rotación del motor.

- Bipolares. Presentan un mayor torque, es de menor tamaño, más económico, su control es más complicado, requiere una tarjeta con etapas de control en potencia y de giro, tiene mayor anclaje debido a los embobinados.
- Unipolares. Presenta menor torque, es de mayor tamaño, menos económico, su control es más simple al requerir únicamente un circuito de alimentación, menor anclaje

Los motores pasos a pasos se fabrican de 3 maneras:

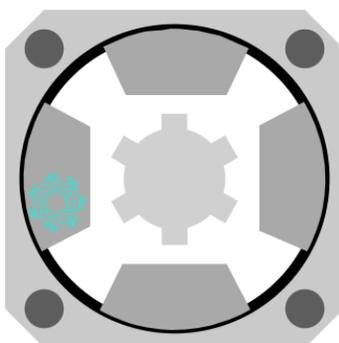
- Motor paso a paso de reluctancia variable.
- Motor paso a paso de imán permanente.
- Motor paso a paso híbrido.

Motor paso a paso de reluctancia variable

Cuentan con un rotor ferromagnético, el movimiento del motor paso a paso y su retención resulta de la atracción de los polos del estator y rotor a posiciones con mínima reluctancia magnética que permite el máximo flujo magnético.

La ventaja de un motor paso a paso de reluctancia variable es que al tener una menor inercia de rotor provocará una respuesta dinámica más rápida.

Figura 157. Motor paso a paso de reluctancia variable



Motor paso a paso de imán permanente

El estator se conforma de polos devanados y los polos del rotor son imanes permanentes. Al excitar diferentes combinaciones de devanados del estator se mueve y retiene el rotor en diferentes posiciones. Crea polos de polaridad opuestos para su avance.

La ventaja que presentan se debe a un pequeño torque de retención residual, llamado momento de detención aun cuando el estator no esté energizado.

Figura 158. Motor paso a paso de imán permanente



Motor paso a paso híbrido

Es una combinación del motor paso a paso de reluctancia variable e imán permanente, tiene un rotor de imán permanente y un estator dentado. El rotor cuenta con dos secciones que son opuestas en polaridad y sus dientes están desplazados.

A continuación, se mencionan los diferentes torques que son importantes a considerar para el diseño de nuestro proyecto, es recomendar verificar las especificaciones de cada motor para hacer la comparativa. Los motores chinos es recomendable hacer pruebas ya que posiblemente no nos den lo que indica.

- Torque de arranque (pull in torque): Es el torque máximo para vencer la inercia del rotor para empezar a girar a máxima velocidad o la velocidad indicada.
- Torque de giro (pull out torque): Es el máximo torque que el motor puede proporcionar sin sufrir pérdida de pasos.
- Torque de retención (detent torque): Es el torque máximo aplicado sin provocar la rotación del eje cuando el motor se encuentra sin energizar.
- Torque de anclaje (holding torque): Es el torque máximo que puede ser aplicado sin provocar la rotación, ocurre al tener el motor parado y alimentado.

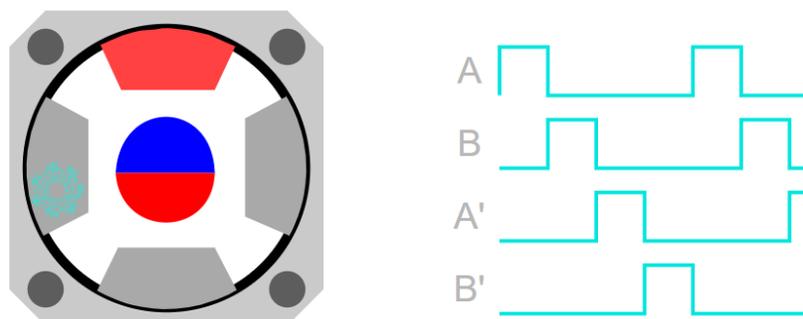
Existen diferentes formas de configurar nuestros motores a pasos para obtener una característica deseada, normalmente se busca que tenga una mejor resolución. Para explicar cada configuración vamos a considerar un motor con 4 bobinas (motor bipolar).

Bobina simple

El método de bobina simple o conocido en inglés como “Wave Drive” consiste en activar una bobina a la vez, como el motor tiene 4 bobinas se concluye que el rotor realizará el ciclo completo en 4 pasos.

- Par menor.
- Consumo bajo.

Figura 159. Bobina simple

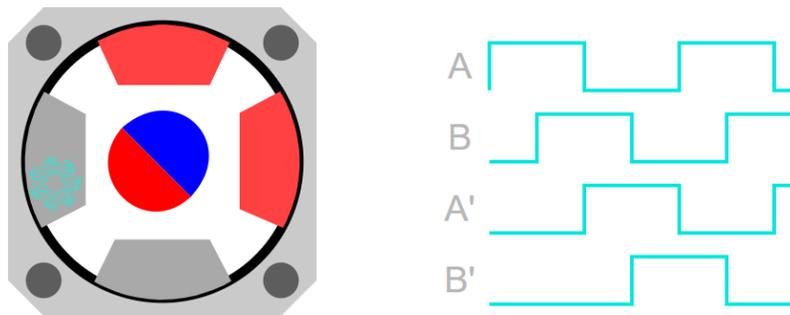


Paso completo

El método de bobina simple o conocido en inglés como “Full Step Drive” consiste en tener activado siempre 2 bobinas en un momento dado, al tener 2 bobinas activas aumentamos el flujo de corriente por lo tanto el par de salida de nuestro motor paso a paso es mucho más alto. Lamentablemente al utilizar esta configuración no se ve afectada la resolución y por lo tanto el rotor nuevamente realizará un ciclo completo en 4 pasos.

- Par máximo.
- Buena velocidad.
- Alto consumo.

Figura 160. Paso completo

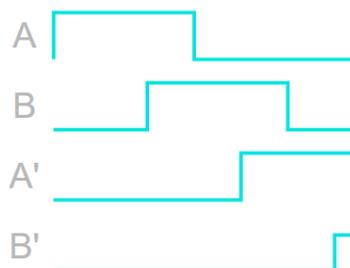


Medio paso

El método de medio paso o conocido en inglés como “Half Step Drive” consiste en tener activado 2 bobinas, posteriormente pasa a una bobina y nuevamente se repite a 2 bobinas activas. Con esta configuración se obtiene el doble de resolución, ahora el rotor realizará un ciclo completo en 8 pasos.

- Movimiento suave y lento.
- Consumo y par intermedio.
- Buena resolución

Figura 161. Medio paso



Micropasos

El método de micropasos o conocido en inglés como “Microstepping” es el más utilizado en la actualidad para el control de los motores paso a paso, consiste en proporcionar una corriente que es variable y controlada formando en la bobina una media onda senoidal. Al tener la configuración de micropasos se obtiene un movimiento suave del rotor, aumentará la precisión del motor paso a paso y disminuye el consumo.

- Movimiento suave
- Menor consumo
- Muy buena resolución

Servomotor. Un servomotor es un actuador rotativo o motor que permite un control preciso en términos de posición angular, aceleración y velocidad, capacidades que un motor normal no tiene. En definitiva, utiliza un motor normal y lo combina con un sensor para la retroalimentación de posición.

Pero, los servomotores no son en realidad una clase específica de motor, sino una combinación de piezas específicas, que incluyen un motor de corriente continua o alterna, y son adecuados para su uso en un sistema de control de bucle cerrado.

Por lo que una definición más exacta de un servomotor sería la de un servomecanismo de bucle cerrado que utiliza la retroalimentación de posición para controlar su velocidad de rotación y posición. La señal de control es la entrada, ya sea analógica o digital, que representa el comando de posición final para el eje.

Por otro lado, el codificador o encoder sirve como sensor, proporcionando retroalimentación de velocidad y posición. En la mayoría de los casos, sólo se informa de la posición. La posición final se informa al controlador y se compara con la entrada de posición inicial, y luego, si hay una discrepancia, se mueve el motor para llegar a la posición correcta.

Hay varios tipos de servos como los que utilizan motores de corriente continua y detección de posiciones a través de un potenciómetro y también utilizan un control de gran potencia, lo que significa que el motor se mueve a la velocidad máxima hasta que se detiene en la posición designada.

En cambio, los servos para uso industrial disponen de sensores de posición y velocidad, así como de algoritmos de control proporcional-integral-derivativo, lo que permite llevar el motor a su posición de forma rápida.

Este tipo de dispositivos están disponibles en una gran variedad de tipos, formas y tamaños. El término servo fue utilizado por primera vez en 1859 por Joseph Facort, que implementó un mecanismo de retroalimentación para ayudar a controlar los timones de un barco con vapor.

Los servomotores se controlan enviando un pulso eléctrico de ancho variable, o modulación de ancho de pulso (PWM), a través del cable de control. Hay un pulso mínimo, un pulso máximo y una frecuencia de repetición.

Por lo general, un servomotor sólo puede girar 90° en cualquier dirección para un movimiento total de 180° .

La posición neutra del motor se define como la posición en la que el servo tiene la misma cantidad de rotación potencial tanto en el sentido de las agujas del reloj como en el sentido contrario.

El PWM enviado al motor determina la posición del eje, y se basa en la duración del pulso enviado a través del cable de control; el rotor girará a la posición deseada.

El servomotor espera ver un pulso cada 20 milisegundos (ms) y la longitud del pulso determinará hasta dónde gira el motor. Por ejemplo, un pulso de 1.5ms hará que el motor gire a la posición de 90° .

Si el tiempo es inferior a 1,5 ms, se mueve en sentido contrario a las agujas del reloj hacia la posición de 0° , y si el tiempo es superior a 1,5 ms, el servo girará en sentido de las agujas del reloj hacia la posición de 180° .

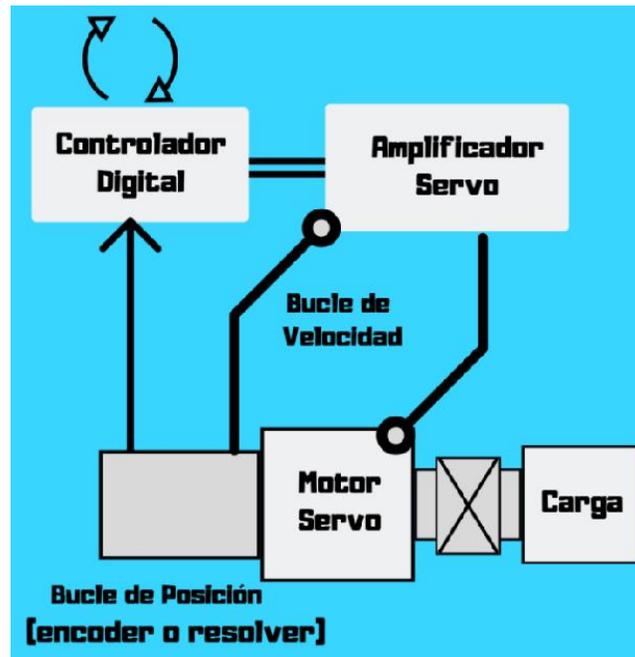
Cuando se les ordena a los servos que se muevan, estos se moverán a la posición y mantendrán esa posición. Si una fuerza externa empuja contra el servo mientras el servo mantiene una posición, el servo se resistirá a salir de esa posición.

La cantidad máxima de fuerza que puede ejercer el servo se denomina par de torsión del servo. Sin embargo, los servos no mantendrán su posición para siempre; el pulso de posición debe repetirse para indicar al servo que se mantenga en posición.

Los servos incluyen tres componentes principales: un motor, un variador (también conocido como amplificador) y un mecanismo de retroalimentación. También se incluye típicamente una fuente de alimentación y un servocontrolador capaz de controlar un solo eje o coordinar el movimiento de varios ejes.

Los servomotores pueden ser de tipo CA o CC, siendo los servomotores CA los más adecuados para aplicaciones de velocidad constante y los servomotores CC para aplicaciones de velocidad variable.

Figura 162. Diagrama básico del funcionamiento de un servomotor



La retroalimentación es proporcionada normalmente por un codificador o encoder -ya sea interno o externo al motor- o por un resolver. En aplicaciones que requieren un posicionamiento muy preciso, se pueden utilizar dos dispositivos de retroalimentación: uno en el motor para verificar el rendimiento del motor y otro en la carga para verificar la posición real de la carga.

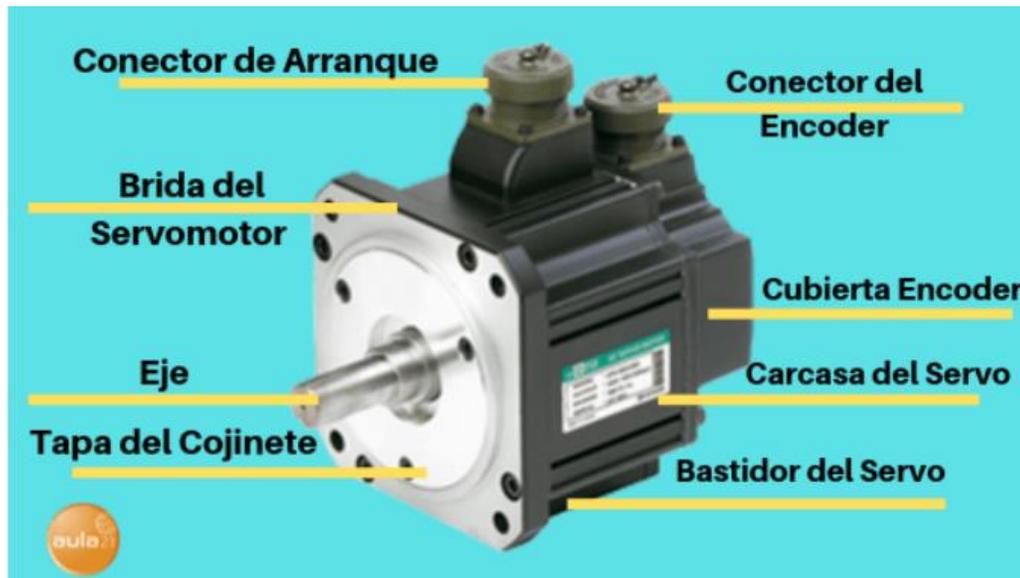
Un servo accionamiento amplifica la señal de un controlador maestro proporcionando la suficiente corriente (potencia) al motor para generar velocidad y producir par. En un motor rotativo, la corriente es proporcional al par, por lo que el servomotor controla directamente el par producido por el motor.

Del mismo modo, en un motor lineal, la corriente es proporcional a la fuerza, por lo que el accionamiento controla la fuerza producida por el motor.

El servo controlador (también conocido como controlador de movimiento) puede ser considerado como el cerebro del sistema del servomotor. Aquí es donde reside el perfil de movimiento, incluyendo la aceleración, velocidad y deceleración deseadas.

El controlador envía señales al convertidor, lo que hace que el motor ejecute el movimiento deseado. También tiene la importante tarea de cerrar el bucle en el sistema leyendo la retroalimentación del encoder y modificando la señal al motor (a través del convertidor) para corregir cualquier error en la posición real frente a la deseada, velocidad o par.

Figura 163. Partes de un servomotor



Los servomotores se utilizan en aplicaciones que requieren variaciones rápidas de velocidad y, que podrían provocar un calentamiento excesivo del motor como en la robótica industrial, en la fabricación con sistemas de automatización y en aplicaciones de mecanizado de control numérico (CNC) por ordenador, entre otras.

A continuación, te enumero algunas de las aplicaciones más comunes de los servos:

- En las industrias se utilizan en máquinas herramienta, embalaje, automatización de fábricas, manipulación de materiales, conversión de impresión, líneas de ensamblaje y muchas otras aplicaciones exigentes: robótica, maquinaria CNC o fabricación automatizada.
- También se utilizan en aviones radio-controlados para controlar la posición y el movimiento de los ascensores.
- Se utilizan en robots debido a su suave encendido y apagado y a su preciso posicionamiento.
- También se utilizan en la industria aeroespacial para mantener el fluido hidráulico en sus sistemas hidráulicos.
- Se utilizan en muchos juguetes controlados por radio.

- Se utilizan en dispositivos electrónicos como DVD y reproductores de discos para ampliar o reproducir las bandejas de discos.
- También se utilizan en automóviles para mantener la velocidad de los vehículos.

Motor sin núcleo. Cuando se necesita un motor eléctrico de baja inercia (arranque y parada muy cortos), se elimina el núcleo de hierro del rotor, lo que aligera su masa y permite fuertes aceleraciones, se suele usar en motores de posicionamiento (por ejemplo en máquinas y automática).

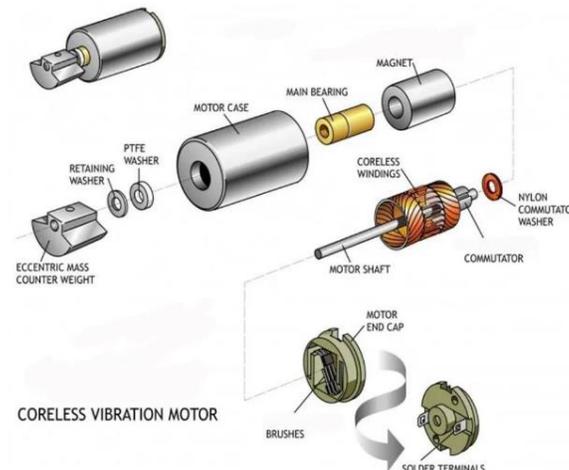
Para optimizar el campo magnético que baña el rotor, para motores que requieren cierta potencia, se puede construir el rotor plano en forma de disco, similar a un circuito impreso en el que las escobillas rozan ortogonalmente sobre un bobinado imbricado que gira entre imanes permanentes colocados a ambos lados del disco.

Figura 164. Motor de corriente directa sin núcleo



La estructura del motor sin núcleo (también llamado de copa hueca) rompe la estructura del rotor del motor tradicional, adoptando el rotor sin núcleo, también conocido como rotor de copa hueca. La nueva estructura del rotor elimina completamente la pérdida de potencia causada por la corriente parásita formada por el núcleo de hierro.

Figura 165. Partes del motor de corriente directa sin núcleo



Las ventajas de este motor son:

1. Alta densidad de potencia

La densidad de potencia es la relación entre la potencia de salida y el peso o el volumen. El motor de bobina de placa de cobre es de tamaño pequeño y tiene un buen rendimiento. En comparación con la bobina tradicional, la bobina de inducción del modo de bobina de placa de cobre es más ligera. No es necesario enrollar y ranurar las láminas de acero al silicio, eliminando las corrientes parásitas y las pérdidas por histéresis que generan; La pérdida de corriente parásita en el modo de bobina de cobre es muy pequeña y fácil de controlar, lo que mejora la eficiencia del motor y asegura un par y una potencia de salida más altos.

2. Eficiente

La eficiencia del motor es que el método de bobina de placa de cobre no tiene la corriente parásita y la pérdida de histéresis causada por el devanado y ranurado de la hoja de acero al silicio. Además, la resistencia es pequeña, lo que reduce la pérdida de cobre.

3. Sin retraso de par

Hoja de acero de silicio sin ranuras en modo bobina de placa de cobre, sin pérdida de histéresis, sin efecto de engranaje para reducir las fluctuaciones de velocidad y par.

4. Sin efecto de ranura

La bobina de cobre está hecha de chapa de acero al silicio sin ranuras, lo que elimina el efecto de ranura causado por la interacción entre la ranura y el imán. La bobina es una estructura sin núcleo de hierro. Todos los componentes de acero giran juntos (como un motor de escobillas) o están estacionarios (como un motor sin escobillas). El efecto valle y la histéresis del par están evidentemente ausentes.

5. No hay fuerza radial entre el rotor y el estator.

Debido a que no hay un núcleo de ferrita estacionario, no hay un campo magnético axial entre el rotor del motor y el estator del motor. Esto es especialmente crítico en aplicaciones importantes. La fuerza axial entre el rotor del motor y el estator del motor hará que el rotor del motor sea inestable. Reducir la fuerza axial mejorará la confiabilidad del rotor del motor.

6. Curva de velocidad suave y bajo nivel de ruido.

No hay núcleo de ferrita con ranuras, lo que reduce el par y los armónicos de la tensión de trabajo. Al mismo tiempo, debido a que no hay campo de CA en el motor, no hay ruido causado por CA. Solo ruido causado por rodamientos y ciclones y vibración causada por formas de onda no sinusoidales.

7. Buen efecto de disipación de calor

La superficie interior y exterior del solenoide de moneda de cobre a menudo tiene fluidez de gas, que es mejor que la tubería de calor del solenoide del rotor del motor ranurado. El cable tradicional cubierto de seda está incrustado en la ranura del núcleo de ferrita, hay muy pocos ciclones en la superficie de la bobina electromagnética, el tubo de calor tiene poca disipación de calor y la temperatura es muy alta. Para la misma potencia, la temperatura del motor del método de solenoide de moneda de cobre es menor.

Las aplicaciones de este tipo de motor son en los dispositivos médicos como prótesis, bombas de insulina, máquinas de rayos X así como también en los equipos de laboratorio se benefician del uso de motores sin núcleo.

Además, existen numerosas aplicaciones en sectores particularmente exigentes como el aeroespacial, la defensa y la vigilancia, así como máquinas para tatuar.

Ejercicios del Tema 6

EJERCICIO 1

Simulación de la máquina de cd con los siguientes datos:

DATOS:

$V_t = 240$	$I_a(\text{rated}) = 110$	Protacional = 3550
$n(\text{rated}) = 1800$	NF = 2700	F(AR) = 200
RA = 0.19	NSE = 12	
$R_s = 0.02$	RF = 75	Wag = 188.495559
$E_a =$	240	

Solución

MAGNETIZATION CURVE

TABLE

If	Ea
0	17
0.2	82
0.4	140
0.6	184
0.8	221
1	243
1.2	261
1.4	272
1.6	282
1.8	288
2	294
2.2	300

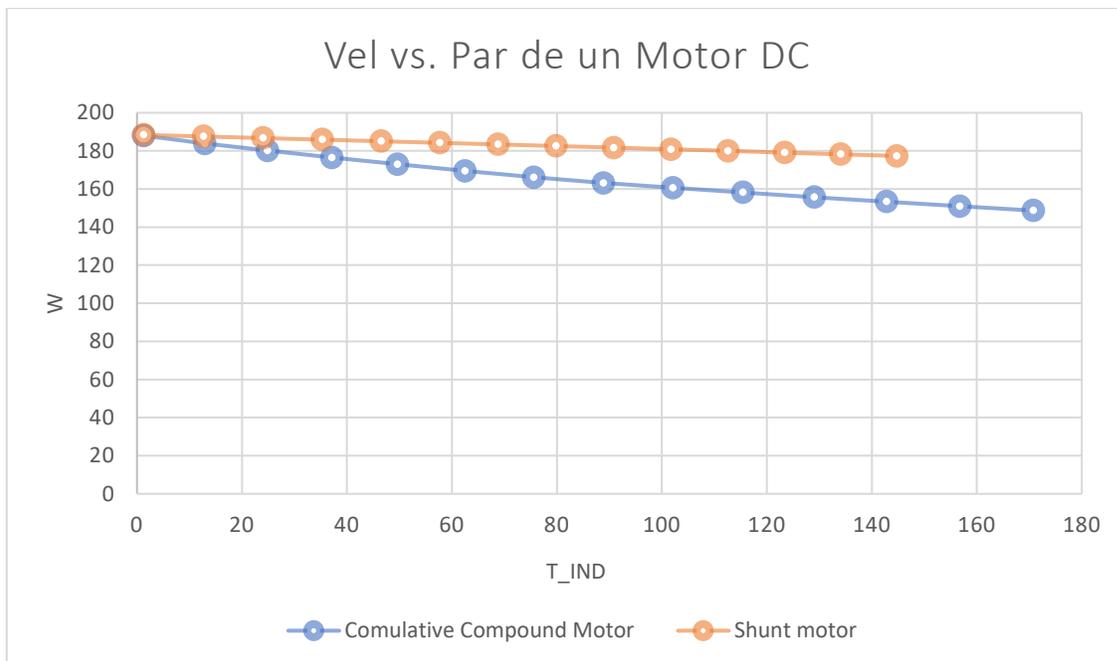
EXCITACIÓN INDEPENDIENTE

Ia	If	If*	Eag	K ϕ	Tind	Eareal	w
1	0.97272727	0.97205387	239.925926	1.27284657	1.27284657	239.81	188.404483
10	0.97272727	0.96599327	239.259259	1.269309793	12.6930979	238.1	187.58226
19	0.97272727	0.95993266	238.592593	1.265773017	24.0496873	236.39	186.755443
28	0.97272727	0.95387205	237.925926	1.26223624	35.3426147	234.68	185.923992
37	0.97272727	0.94781145	237.259259	1.258699464	46.5718802	232.97	185.087868
46	0.97272727	0.94175084	236.592593	1.255162687	57.7374836	231.26	184.247032
55	0.97272727	0.93569024	235.925926	1.25162591	68.8394251	229.55	183.401445
64	0.97272727	0.92962963	235.259259	1.248089134	79.8777046	227.84	182.551065
73	0.97272727	0.92356902	234.592593	1.244552357	90.8523221	226.13	181.695851

82	0.97272727	0.91750842	233.925926	1.241015581	101.763278	224.42	180.835763
91	0.97272727	0.91144781	233.259259	1.237478804	112.610571	222.71	179.970759
100	0.97272727	0.90538721	232.592593	1.233942028	123.394203	221	179.100796
109	0.97272727	0.89932666	231.925926	1.230405251	134.114172	219.29	178.225832
118	0.97272727	0.89326599	231.259259	1.226868475	144.77048	217.58	177.345823

COMPUESTA COMULATIVA

la	If	If*	Eag	K ϕ	Tind	Eareal	w
1	0.97272727	0.97649832	240.414815	1.275440206	1.27544021	239.79	188.005678
10	0.97272727	1.01043771	243.939394	1.294138679	12.9413868	237.9	183.828831
19	0.97272727	1.0443771	246.993939	1.310343546	24.8965274	236.01	180.113071
28	0.97272727	1.0783165	250.048485	1.326548413	37.1433556	234.12	176.488093
37	0.97272727	1.11225589	253.10303	1.342753279	49.6818713	232.23	172.950611
46	0.97272727	1.14619529	256.157576	1.358958146	62.5120747	230.34	169.497494
55	0.97272727	1.18013468	259.212121	1.375163013	75.6339657	228.45	166.125759
64	0.97272727	1.21407407	261.774074	1.388754595	88.8802941	226.56	163.138974
73	0.97272727	1.24801347	263.640741	1.39865757	102.102003	224.67	160.632599
82	0.97272727	1.28195286	265.507407	1.408560544	115.501965	222.78	158.161466
91	0.97272727	1.31589226	267.374074	1.418463518	129.08018	220.89	155.724837
100	0.97272727	1.34983165	269.240741	1.428366492	142.836649	219	153.321995
109	0.97272727	1.38377104	271.107407	1.438269467	156.771372	217.11	150.952242
118	0.97272727	1.41771044	272.885522	1.447702657	170.828914	215.22	148.663124



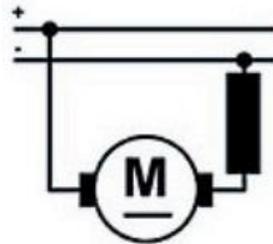
EJERCICIO 2

Un motor de corriente continua serie se alimenta con 120 V y absorbe una intensidad de 30 A, las bobinas inductoras tienen una resistencia de 0,60 Ω y las bobinas inducidas de 0,40 Ω . Se ha comprobado que las pérdidas en el hierro más las mecánicas suman 180 W. Se pide:

- Dibujar el esquema de conexiones.
- Calcular la fuerza electromotriz inducida.
- Calcular las pérdidas en el cobre.
- Obtener el rendimiento del motor.
- Si el motor está girando a 2200 r.p.m. calcular su par motor.

Solución

a)



b)

$$V = I(R_{ex} + R_i) + \varepsilon \quad \varepsilon = V - I(R_{ex} + R_i) = 120 - 30(0,6 + 0,4) = 90\text{V}$$

c)

$$P_{cu} = I^2 R_{ex} + I^2 R_i = 30^2 \cdot 0,6 + 30^2 \cdot 0,4 = 900\text{W}$$

d)

$$\eta = \frac{P_{util}}{P_{abs}}$$

$$P_{abs} = V \cdot I = 120 \cdot 30 = 3600\text{W}$$

$$P_{util} = P_{abs} - P_{cu} - P_{fe} + m = 3600 - 900 - 180 = 2520\text{W}$$

$$\eta = \frac{P_{util}}{P_{abs}} = \frac{2520}{3600} = 0,7 \rightarrow 70\%$$

e)

$$P = M \cdot \omega \quad \omega = \frac{n \cdot 2\pi}{60} = 230,38 \text{ rad/s}$$

$$M = \frac{P_{util}}{\omega} = \frac{2520}{230,38} = 10,93 \text{ N}\cdot\text{m}$$

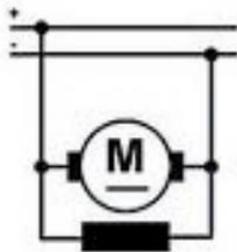
EJERCICIO 3

Disponemos de un motor de corriente continua conectado en derivación a la tensión de alimentación de 100 V, las bobinas inductoras tienen una resistencia de 125 Ω , mientras que las bobinas del inducido tienen una resistencia de 0,2 Ω , el motor se encuentra desarrollando una potencia de 4,4 kW, girando a 4200 r.p.m. y la fuerza contraelectromotriz inducida es de 90V. Se pide:

- Esquema de conexiones.
- Intensidad de excitación e intensidad del inducido.
- Intensidad absorbida de la línea.
- Calcular las pérdidas en el cobre de cada devanado.
- Rendimiento.
- Par motor.

Solución

a)



b)

$$I_{\text{excitación}} = \frac{V}{R_{\text{ex}}} = \frac{100}{125} = 0,8 \text{ A}$$

$$I_{\text{inducido}} = \frac{V - \varepsilon}{R_{\text{i}}} = \frac{100 - 90}{0,2} = 50 \text{ A}$$

c)

$$I_{\text{total}} = I_{\text{excitación}} + I_{\text{inducido}} = 0,8 + 50 = 50,8 \text{ A}$$

d)

$$P_{\text{cu excitación}} = I_{\text{excitación}}^2 \cdot R_{\text{ex}} = 0,8^2 \cdot 125 = 80 \text{ W}$$

$$P_{\text{cu inducido}} = I_{\text{inducido}}^2 \cdot R_{\text{i}} = 50^2 \cdot 0,2 = 500 \text{ W}$$

e)

$$\eta = \frac{P_{\text{util}}}{P_{\text{abs}}}$$

$$P_{\text{util}} = 4,4 \text{ KW} = 4400 \text{ W}$$

$$P_{\text{abs}} = V \cdot I_{\text{total}} = 100 \cdot 50,8 = 5080 \text{ W}$$

$$\eta = \frac{P_{\text{util}}}{P_{\text{abs}}} = \frac{4400}{5080} = 0,8661 \rightarrow 86,61 \%$$

f)

$$M = \frac{P_{\text{util}}}{\omega}$$

$$\omega = \frac{n \cdot 2 \cdot \pi}{60} = \frac{4200 \cdot 2 \cdot \pi}{60} = 439,82 \text{ rad/s}$$

$$M = \frac{P_{\text{util}}}{\omega} = \frac{4400}{439,82} = 10 \text{ N}\cdot\text{m}$$

Bibliografía

1. Chapman, S. J. (2012). Máquinas eléctricas, (Cuarta edición). McGraw-Hill.
2. Fitzgerald, Kingsley, Umans. (2004). Máquinas eléctricas, (Sexta edición). Madrid McGraw-Hill Interamericana.
3. Cherta, M. C. (1995). Curso moderno de máquinas eléctricas rotativas. ETA.
4. Guru, Hiziroglu. (2012). Máquinas eléctricas y transformadores, (Tercera edición). Alfaomega Grupo Editor.
5. Fraile, M. J. (2008). Máquinas eléctricas, (Sexta edición). Madrid: McGraw-Hill Interamericana.
6. Kosow, I. (1998). Máquinas eléctricas y transformadores, (Cuarta edición). Reverté Ediciones.

Anexos

PRESENTACIONES

TEMA 1. Fundamentos de la máquina sincrónica

https://drive.google.com/file/d/1JzfnMM_FdU8KluyexiQJBimWCQR6vs_A/view?usp=drive_link

https://docs.google.com/presentation/d/1bByQzy51eSP1qNFCRFdFY2KXwrF4lsTt/edit?usp=drive_link&ouid=100078747402128563599&rtpof=true&sd=true

https://drive.google.com/file/d/1h9kq0V1A2jK6NBcVAzQ1byPhZYtOMSAr/view?usp=drive_link

TEMA 2. Generador sincrónico

https://drive.google.com/file/d/1u91-z4Ross5GqkAxJpNN8s5sZqPDuCFo/view?usp=drive_link

TEMA 3. Sincronización

https://drive.google.com/file/d/1i9HFT09yr_F5VNFw1cCDQ7t4iv8Tssxb/view?usp=drive_link

https://drive.google.com/file/d/1C-DepJapf6j7BZY6dQXUMETDiK3zOcb/view?usp=drive_link

TEMA 4. Motor sincrónico

https://drive.google.com/file/d/1kDfXSUIkmIn7GWEUJzXNd8Haa4l2JtL7/view?usp=drive_link

TEMA 5. Máquina de corriente directa, operación como generador

https://drive.google.com/file/d/1BM1Dg3m0DDbIYqVUO6Aryq4jVbKKIPGX/view?usp=drive_link

https://drive.google.com/file/d/1yr6Eb-MwrqiPHMOiwEceIUF3HsiYfQGF/view?usp=drive_link

TEMA 6. Análisis y control de los motores de corriente directa

https://drive.google.com/file/d/1ezETe6K3DP5_zAc5W0j3ymGLnNPmbhC8/view?usp=drive_link

FORMULARIOS

TEMA 1. Fundamentos de la máquina sincrónica

<https://forms.gle/4w3o2VxWN3RrKDuy8>

TEMA 2. Generador sincrónico

<https://forms.gle/FBAJ4ZZE36Y43t1v6>

TEMA 3. Sincronización

<https://forms.gle/krmD5seXHNB5mHJc8>

TEMA 4. Motor sincrónico

<https://forms.gle/rs6GbNJS Ae99qhsy6>

TEMA 5. Máquina de corriente directa, operación como generador

<https://forms.gle/EEyNWQqpkXD3V86N8>

TEMA 6. Análisis y control de los motores de corriente directa

<https://forms.gle/x6AUBhKAsbZd9LCbA>



**Tecnológico Nacional de México
Instituto Tecnológico de Mérida
Subdirección Académica**

Instrumentación Didáctica para la Formación y Desarrollo de Competencias Profesionales Periodo XXXX- XXXX 202XX

Nombre de la asignatura: Máquinas Sincrónicas y de CD

Plan de estudios: IELE-2010-209

Clave de asignatura: ELF-1016

Horas teoría – horas prácticas – créditos: 3-2-5

1. Caracterización de la asignatura

Esta asignatura aporta al perfil del Ingeniero Eléctrico la capacidad de explicar el funcionamiento de las máquinas sincrónicas y de corriente directa, así como su contribución, junto con asignaturas posteriores, como Modelado de los Sistemas Eléctricos de Potencia, en donde se requiere analizar, diagnosticar y presentar soluciones a problemas relacionados con máquinas sincrónicas y de corriente directa buscando una mejor eficiencia.

El alumno debe conocer físicamente una máquina sincrónica y una máquina de C.D. en sus funciones de generador y motor, para que al término del curso pueda seleccionarlos, operarlos y mantenerlos.

Es importante que el estudiante participe en grupos de trabajo para modelar las máquinas eléctricas, empleando métodos computacionales en su análisis.





TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO



2. Intención didáctica

En el primer tema

Se establecerán una serie de definiciones y conceptos que se utilizan en el análisis del campo magnético giratorio que se produce en los devanados de la máquinas trifásicas, la fuerza electromotriz inducida en una máquina elemental de corriente alterna, así como los factores que afectan la fuerza electromotriz en una máquina de corriente alterna. Se describen los aspectos constructivos de las máquinas sincrónicas. Esto permite establecer las bases para los siguientes temas de la asignatura.

En el segundo tema

Se considera el circuito equivalente y cómo determinar los parámetros de la máquina sincrónica, las características del ángulo de par y su relación con las potencias en estado estacionario, así como la operación del generador trabajando aislado. Se deberá realizar una interpretación física de los parámetros de la máquina sincrónica y la relación que tiene su magnitud con aspectos de operación, eficiencia y diseño.

En el tercer tema

Se describe la forma en que se conecta el generador con un sistema eléctrico de potencia y los problemas de estabilidad en generadores sincrónicos. Se deben conocer las condiciones necesarias para conectarlos en paralelo y utilizar herramientas computacionales para simular su comportamiento ante diferentes condiciones de operación.

En el cuarto tema

Se estudia la operación del motor sincrónico empleando su modelado en estado estacionario. También se estudian los métodos de arranque de los motores síncronos en forma teórica y práctica.

En el quinto tema

Se tratan los fundamentos teóricos de la máquina de corriente directa, las conexiones y la operación de estas máquinas como generadores. En forma práctica se comprueban los efectos de la velocidad y corriente de excitación sobre la tensión generada, así como las características carga-tensión para los diferentes tipos de generadores.

El sexto tema

Trata la máquina conectada como motor, realizando su modelado para determinar su característica par-velocidad, así como analiza los métodos de arranque y control de velocidad.

El docente debe establecer y explicar una serie de definiciones iniciales y necesarias del tema en cuestión, procurando la realización de ejemplos que orienten las actividades de enseñanza aprendizaje en los alumnos.





TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO



Los alumnos deberán realizar una serie de prácticas y tareas o trabajos que promuevan el desarrollo de habilidades para la experimentación, tales como: identificación, manejo y control de variables y datos relevantes; planteamiento de hipótesis; trabajo en equipo. Asimismo, propicien procesos intelectuales como inducción-deducción y análisis-síntesis con la intención de generar una actividad intelectual compleja.

Al final de cada una de las unidades el alumno deberá someterse a una evaluación que podrá ser un examen escrito y/o la realización práctica de un proyecto en el laboratorio.

3. Competencia de la asignatura

- Aplica los fundamentos de las máquinas sincrónicas y las máquinas de corriente directa para analizar su operación en estado estacionario.
- Analiza las condiciones de arranque y operación de las máquinas sincrónicas y de C.D. para seleccionarlas, de acuerdo a su aplicación.

Simula los modelos matemáticos de estas máquinas para verificar sus condiciones de operación.

4. Análisis por competencias específicas

Competencia No.: Descripción:

Temas y subtemas para desarrollar la competencia específica	Actividades de aprendizaje	Actividades de enseñanza	Desarrollo de competencias genéricas	Horas teórico-práctica
1 Fundamentos de la máquina sincrónica 1.1 Aspectos constructivos de las máquinas sincrónicas. 1.2 Fuerzas magnetomotrices giratorias en máquinas trifásicas. 1.3 Fuerza electromotriz inducida en una máquina elemental de corriente alterna. 1.4 Factores que afectan la fuerza	<ul style="list-style-type: none">• Investigar las partes constitutivas de la máquina sincrónica y definir la función de cada una de ellas.• Simular el campo magnético giratorio empleando un paquete computacional.	<ul style="list-style-type: none">• Mediante el método expositivo realizar: Presentación del curso y detección de expectativas; conocer, identificar y diagnosticar al grupo; y explicar cada una de los conceptos.• Utilizar la resolución de	<ul style="list-style-type: none">• Capacidad de abstracción, análisis y síntesis.• Capacidad de aplicar los conocimientos en la práctica.• Capacidad de comunicación oral y escrita.• Habilidades en el uso de	10 hrs





TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO



<p>electromotriz en una máquina de corriente alterna.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Investigar sobre los factores que intervienen en la FEM inducida de la máquina sincrónica. • Realizar un ensayo práctico para observar la forma de onda de la tensión generada. • Investigar y diferenciar los distintos tipos de pérdidas que se presentan en las máquinas sincrónicas y los factores que afectan a cada una de estas pérdidas. 	<p>problemas para la participación del estudiante en clase.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Utilizar prácticas de laboratorio para comprobar los conceptos. • Aplicar un examen de conocimientos. 	<p>las tecnologías de la información y de la comunicación.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Capacidad para identificar, plantear y resolver problemas. • Habilidades interpersonales. • Capacidad de trabajo en equipo. • Habilidades para buscar, procesar y analizar información procedente de fuentes diversas. 	
---	--	--	--	--

Indicadores de alcance	Valor del indicador
<p>A. Se adapta a situaciones y contextos complejos. Puede trabajar en equipo, reflejar sus conocimientos en la interpretación de la realidad. Inferir comportamientos o consecuencias de los fenómenos o problemas en estudio. Incluir más variables en dichos casos de estudio</p>	<p>4.9</p>
<p>B. Hace aportaciones a las actividades académicas desarrolladas. Pregunta integrando conocimientos de otras asignaturas o de casos anteriores de la misma asignatura. Presenta otros puntos de vista que complementan al presentado en la clase. Presenta fuentes de información adicionales (Internet, documentales), usa más bibliografía, consulta fuentes en un segundo idioma, etc.</p>	<p>2.9</p>





TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO



<p>C. Propone y/o explica soluciones o procedimientos no vistos en clase (creatividad). Ante problemas o casos de estudio propone perspectivas diferentes, para abordarlos y sustentarlos correctamente. Aplica procedimientos aprendidos en otra asignatura o contexto para el problema que se está resolviendo.</p>	2.4
<p>D. Introduce recursos y experiencias que promueven un pensamiento crítico; (por ejemplo el uso de las tecnologías de la información estableciendo previamente un criterio). Ante temas de una asignatura, introduce cuestionamientos de tipo ético, ecológico, histórico, político, económico, etc.; que deben tomarse en cuenta para comprender mejor, o a futuro dicho tema. Se apoya en foros, autores, bibliografía, documentales, etc. para sustentar su punto de vista.</p>	1
<p>E. Incorpora conocimientos y actividades interdisciplinarias en su aprendizaje. En el desarrollo de los temas de la asignatura, incorpora conocimientos y actividades desarrollados en otras asignaturas para lograr la competencia.</p>	5.9
<p>F. Realiza su trabajo de manera autónoma y autorregulada. Es capaz de organizar su tiempo y trabajar sin necesidad de una supervisión estrecha y/o coercitiva. Aprovecha la planeación de la asignatura presentada por el (la) profesor(a) (instrumentación didáctica) para presentar propuestas de mejora de la temática vista durante el curso. Realiza actividades de investigación para participar activamente durante el curso.</p>	2.9

Niveles de desempeño:





Desempeño	Nivel de desempeño	Indicadores de alcance	Valoración numérica
Competencia alcanzada	Excelente	Cumple con los indicadores A, C, E, F con o sin el indicador D ó B	95-100
	Notable	Cumple con los indicadores A, C, E, F y con el indicador D	85-94
	Bueno	Cumple con los indicadores A, C, E con el indicador B ó F	75-84
	Suficiente	Cumple con los indicadores A, C, E, D	70-74
Competencia no alcanzada	Insuficiente	Cumple solo tres o menos indicadores	NA (no alcanzada)

Matriz de evaluación:

Evidencia de aprendizaje	%	Indicador de alcance						Evaluación formativa de la competencia
		A	B	C	D	E	F	
Evaluación diagnóstica	0	0	0	0	0	0	0	Cuestionario
Participación en clase	1	0	0.25	0.25	0.25	0.25	0	Lista de asistencia
Resolución de problemas	3	0	0.75	0.75	0	0.75	0.75	Método de resolución de problemas
Reporte de investigación	3	0.75	0.75	0	0	0.75	0.75	Rúbrica para reporte de investigación
Reporte de prácticas de laboratorio	2	0.4	0.4	0.4	0	0.4	0.4	Rúbrica para reporte de prácticas de laboratorio
Exposición	3	0.75	0.75	0	0.75	0.75	0	Rúbrica para exposición
Examen de conocimiento	8	3	0	1	0	3	1	Método de resolución de problemas





TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO



	Total	20	4.9	2.9	2.4	1	5.9	2.9	
--	-------	----	-----	-----	-----	---	-----	-----	--

Competencia No.: 2 Descripción: Analiza el comportamiento del generador sincrónico en condiciones de operación aislada para determinar su operación y realizar el modelado. Investiga, evalúa y selecciona generadores sincrónicos para cada aplicación particular.

Temas y subtemas para desarrollar la competencia específica	Actividades de aprendizaje	Actividades de enseñanza	Desarrollo de competencias genéricas	Horas teórico-práctica
2.1. Circuito equivalente. 2.2. Determinación de parámetros de la máquina sincrónica. 2.3. Característica del ángulo de potencia en operación en estado estacionario. 2.4. Operación en estado estacionario en condiciones aisladas. 2.5. Teoría de las componentes en cuadratura aplicada a las máquinas sincrónicas de polos salientes. 2.6. La máquina sincrónica como fuente de reactivos. 2.7. Modelado del generador sincrónico. 2.8. Selección y aplicación de generadores Sincrónicos.	<ul style="list-style-type: none"> Investigar cuales son los parámetros de la máquina sincrónica y la relación que tienen la magnitud de éstos con los aspectos como eficiencia, diseño y tamaño. Determinar el valor de la reactancia sincrónica de un generador empleando las pruebas de vacío y de rotor bloqueado. Investigar acerca del funcionamiento de la máquina sincrónica para realizar su modelado. Realizar el modelado del generador sincrónico empleando una 	<ul style="list-style-type: none"> Mediante el método expositivo realizar: Presentación del curso y detección de expectativas; conocer, identificar y diagnosticar al grupo; y explicar cada una de los conceptos. Utilizar la resolución de problemas para la participación del estudiante en clase. Utilizar prácticas de laboratorio para comprobar los conceptos. Aplicar un examen de conocimientos. 	<ul style="list-style-type: none"> Capacidad de abstracción, análisis y síntesis. Capacidad de aplicar los conocimientos en la práctica. Capacidad de comunicación oral y escrita. Habilidades en el uso de las tecnologías de la información y de la comunicación. Capacidad para identificar, plantear y resolver problemas. Habilidades interpersonales. Capacidad de trabajo en equipo. 	12 hrs.





	<p>herramienta computacional.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Analizar el comportamiento del generador síncrono en condiciones aisladas del sistema. • Investiga en diversas fuentes de información, las aplicaciones y características de los generadores sincrónicos. 		<ul style="list-style-type: none"> • Habilidades para buscar, procesar y analizar información procedente de fuentes diversas. 	
--	--	--	--	--

Indicadores de alcance	Valor del indicador
<p>A. Se adapta a situaciones y contextos complejos. Puede trabajar en equipo, reflejar sus conocimientos en la interpretación de la realidad. Inferir comportamientos o consecuencias de los fenómenos o problemas en estudio. Incluir más variables en dichos casos de estudio</p>	4.9
<p>B. Hace aportaciones a las actividades académicas desarrolladas. Pregunta integrando conocimientos de otras asignaturas o de casos anteriores de la misma asignatura. Presenta otros puntos de vista que complementan al presentado en la clase. Presenta fuentes de información adicionales (Internet, documentales), usa más bibliografía, consulta fuentes en un segundo idioma, etc.</p>	2.9





<p>C. Propone y/o explica soluciones o procedimientos no vistos en clase (creatividad). Ante problemas o casos de estudio propone perspectivas diferentes, para abordarlos y sustentarlos correctamente. Aplica procedimientos aprendidos en otra asignatura o contexto para el problema que se está resolviendo.</p>	2.4
<p>D. Introduce recursos y experiencias que promueven un pensamiento crítico; (por ejemplo el uso de las tecnologías de la información estableciendo previamente un criterio). Ante temas de una asignatura, introduce cuestionamientos de tipo ético, ecológico, histórico, político, económico, etc.; que deben tomarse en cuenta para comprender mejor, o a futuro dicho tema. Se apoya en foros, autores, bibliografía, documentales, etc. para sustentar su punto de vista.</p>	1
<p>E. Incorpora conocimientos y actividades interdisciplinarias en su aprendizaje. En el desarrollo de los temas de la asignatura, incorpora conocimientos y actividades desarrollados en otras asignaturas para lograr la competencia.</p>	5.9
<p>F. Realiza su trabajo de manera autónoma y autorregulada. Es capaz de organizar su tiempo y trabajar sin necesidad de una supervisión estrecha y/o coercitiva. Aprovecha la planeación de la asignatura presentada por el (la) profesor(a) (instrumentación didáctica) para presentar propuestas de mejora de la temática vista durante el curso. Realiza actividades de investigación para participar activamente durante el curso.</p>	2.9

Niveles de desempeño:





Desempeño	Nivel de desempeño	Indicadores de alcance	Valoración numérica
Competencia alcanzada	Excelente	Cumple con los indicadores A, C, E, F con o sin el indicador D ó B	95-100
	Notable	Cumple con los indicadores A, C, E, F y con el indicador D	85-94
	Bueno	Cumple con los indicadores A, C, E con el indicador B ó F	75-84
	Suficiente	Cumple con los indicadores A, C, E, D	70-74
Competencia no alcanzada	Insuficiente	Cumple solo tres o menos indicadores	NA (no alcanzada)

Matriz de evaluación:

Evidencia de aprendizaje	%	Indicador de alcance						Evaluación formativa de la competencia
		A	B	C	D	E	F	
Evaluación diagnóstica	0	0	0	0	0	0	0	Cuestionario
Participación en clase	1	0	0.25	0.25	0.25	0.25	0	Lista de asistencia
Resolución de problemas	3	0	0.75	0.75	0	0.75	0.75	Método de resolución de problemas
Reporte de investigación	3	0.75	0.75	0	0	0.75	0.75	Rúbrica para reporte de investigación
Reporte de prácticas de laboratorio	2	0.4	0.4	0.4	0	0.4	0.4	Rúbrica para reporte de prácticas de laboratorio
Exposición	3	0.75	0.75	0	0.75	0.75	0	Rúbrica para exposición





TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO



Examen de conocimiento	8	3	0	1	0	3	1	Método de resolución de problemas
Total	20	4.9	2.9	2.4	1	5.9	2.9	

Competencia No.: 3 Descripción: Determina el comportamiento de los generadores sincrónicos conectados en paralelo para simular su desempeño, bajo diferentes condiciones de operación, en estado estacionario o dinámico.

Temas y subtemas para desarrollar la competencia específica	Actividades de aprendizaje	Actividades de enseñanza	Desarrollo de competencias genéricas	Horas teórico-práctica
3.1. Conexión de máquinas sincrónicas en paralelo. 3.2. Sincronización de una máquina sincrónica a un bus infinito. 3.3. Problemas de estabilidad en generadores sincrónicos.	<ul style="list-style-type: none"> Investigar sobre las condiciones que se deben cumplir para conectar generadores en paralelo. Realizar un ensayo práctico para interconectar una máquina sincrónica a un bus infinito. Utilizar herramientas computacionales para simular el comportamiento de un generador sincrónico ante diferentes condiciones de operación estacionarias y dinámicas, realizando su análisis y síntesis. 	<ul style="list-style-type: none"> Mediante el método expositivo realizar: Presentación del curso y detección de expectativas; conocer, identificar y diagnosticar al grupo; y explicar cada una de los conceptos. Utilizar la resolución de problemas para la participación del estudiante en clase. Utilizar prácticas de laboratorio para comprobar los conceptos. Aplicar un examen 	<ul style="list-style-type: none"> Capacidad de abstracción, análisis y síntesis. Capacidad de aplicar los conocimientos en la práctica. Capacidad de comunicación oral y escrita. Habilidades en el uso de las tecnologías de la información y de la comunicación. Capacidad para identificar, plantear y resolver problemas. Habilidades interpersonales. Capacidad de trabajo 	10 hrs.





TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO



		de conocimientos.	en equipo. • Habilidades para buscar, procesar y analizar información procedente de fuentes diversas.	
--	--	-------------------	--	--

Indicadores de alcance	Valor del indicador
A. Se adapta a situaciones y contextos complejos. Puede trabajar en equipo, reflejar sus conocimientos en la interpretación de la realidad. Inferir comportamientos o consecuencias de los fenómenos o problemas en estudio. Incluir más variables en dichos casos de estudio	4.9
B. Hace aportaciones a las actividades académicas desarrolladas. Pregunta integrando conocimientos de otras asignaturas o de casos anteriores de la misma asignatura. Presenta otros puntos de vista que complementan al presentado en la clase. Presenta fuentes de información adicionales (Internet, documentales), usa más bibliografía, consulta fuentes en un segundo idioma, etc.	2.9
C. Propone y/o explica soluciones o procedimientos no vistos en clase (creatividad). Ante problemas o casos de estudio propone perspectivas diferentes, para abordarlos y sustentarlos correctamente. Aplica procedimientos aprendidos en otra asignatura o contexto para el problema que se está resolviendo.	2.4





TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO



<p>D. Introduce recursos y experiencias que promueven un pensamiento crítico; (por ejemplo el uso de las tecnologías de la información estableciendo previamente un criterio). Ante temas de una asignatura, introduce cuestionamientos de tipo ético, ecológico, histórico, político, económico, etc.; que deben tomarse en cuenta para comprender mejor, o a futuro dicho tema. Se apoya en foros, autores, bibliografía, documentales, etc. para sustentar su punto de vista.</p>	1
<p>E. Incorpora conocimientos y actividades interdisciplinarias en su aprendizaje. En el desarrollo de los temas de la asignatura, incorpora conocimientos y actividades desarrollados en otras asignaturas para lograr la competencia.</p>	5.9
<p>F. Realiza su trabajo de manera autónoma y autorregulada. Es capaz de organizar su tiempo y trabajar sin necesidad de una supervisión estrecha y/o coercitiva. Aprovecha la planeación de la asignatura presentada por el (la) profesor(a) (instrumentación didáctica) para presentar propuestas de mejora de la temática vista durante el curso. Realiza actividades de investigación para participar activamente durante el curso.</p>	2.9

Niveles de desempeño:

Desempeño	Nivel de desempeño	Indicadores de alcance	Valoración numérica
Competencia alcanzada	Excelente	Cumple con los indicadores A, C, E, F con o sin el indicador D ó B	95-100





TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO



	Notable	Cumple con los indicadores A, C, E, F y con el indicador D	85-94
	Bueno	Cumple con los indicadores A, C, E con el indicador B ó F	75-84
	Suficiente	Cumple con los indicadores A, C, E, D	70-74
Competencia no alcanzada	Insuficiente	Cumple solo tres o menos indicadores	NA (no alcanzada)

Matriz de evaluación:

Evidencia de aprendizaje	%	Indicador de alcance						Evaluación formativa de la competencia
		A	B	C	D	E	F	
Evaluación diagnóstica	0	0	0	0	0	0	0	Cuestionario
Participación en clase	1	0	0.25	0.25	0.25	0.25	0	Lista de asistencia
Resolución de problemas	3	0	0.75	0.75	0	0.75	0.75	Método de resolución de problemas
Reporte de investigación	3	0.75	0.75	0	0	0.75	0.75	Rúbrica para reporte de investigación
Reporte de prácticas de laboratorio	2	0.4	0.4	0.4	0	0.4	0.4	Rúbrica para reporte de prácticas de laboratorio
Exposición	3	0.75	0.75	0	0.75	0.75	0	Rúbrica para exposición
Examen de conocimiento	8	3	0	1	0	3	1	Método de resolución de problemas
	Total 20	4.9	2.9	2.4	1	5.9	2.9	





Competencia No.: 4 Descripción: Analiza el principio de operación y los métodos de arranque del motor síncrono para caracterizar su funcionamiento en estado estacionario.

Temas y subtemas para desarrollar la competencia específica	Actividades de aprendizaje	Actividades de enseñanza	Desarrollo de competencias genéricas	Horas teórico-práctica
<p>4.1. Operación en estado estacionario de los motores síncronos.</p> <p>4.2. Arranque del motor síncrono.</p> <p>4.3. Curvas “V” del motor síncrono.</p> <p>4.4. Modelado del motor síncrono.</p> <p>4.5. Selección y aplicación de motores síncronos.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Investigar las condiciones bajo las cuales una máquina síncrona opera como motor. • Analizar las condiciones bajo las cuales un generador síncrono se puede motorizar. • Realizar un ensayo práctico sobre las diferentes formas de arranque de un motor síncrono. • Interpretar los datos de placa de los motores síncronos. • Realizar un ensayo práctico para determinar la curva característica de corriente de carga contra corriente de excitación. • Investiga en diversas fuentes de información 	<ul style="list-style-type: none"> • Mediante el método expositivo realizar: Presentación del curso y detección de expectativas; conocer, identificar y diagnosticar al grupo; y explicar cada una de los conceptos. • Utilizar la resolución de problemas para la participación del estudiante en clase. • Utilizar prácticas de laboratorio para comprobar los conceptos. • Aplicar un examen de conocimientos. 	<ul style="list-style-type: none"> • Capacidad de abstracción, análisis y síntesis. • Capacidad de aplicar los conocimientos en la práctica. • Capacidad de comunicación oral y escrita. • Habilidades en el uso de las tecnologías de la información y de la comunicación. • Capacidad para identificar, plantear y resolver problemas. • Habilidades interpersonales. • Capacidad de trabajo en equipo. • Habilidades para buscar, procesar y analizar información 	<p>12 hrs.</p>





	las aplicaciones y características de los motores sincrónicos		procedente de fuentes diversas.	
--	---	--	---------------------------------	--

Indicadores de alcance	Valor del indicador
A. Se adapta a situaciones y contextos complejos. Puede trabajar en equipo, reflejar sus conocimientos en la interpretación de la realidad. Inferir comportamientos o consecuencias de los fenómenos o problemas en estudio. Incluir más variables en dichos casos de estudio	4.9
B. Hace aportaciones a las actividades académicas desarrolladas. Pregunta integrando conocimientos de otras asignaturas o de casos anteriores de la misma asignatura. Presenta otros puntos de vista que complementan al presentado en la clase. Presenta fuentes de información adicionales (Internet, documentales), usa más bibliografía, consulta fuentes en un segundo idioma, etc.	2.9
C. Propone y/o explica soluciones o procedimientos no vistos en clase (creatividad). Ante problemas o casos de estudio propone perspectivas diferentes, para abordarlos y sustentarlos correctamente. Aplica procedimientos aprendidos en otra asignatura o contexto para el problema que se está resolviendo.	2.4
D. Introduce recursos y experiencias que promueven un pensamiento crítico; (por ejemplo el uso de las tecnologías de la información estableciendo previamente un criterio). Ante temas de una asignatura, introduce cuestionamientos de tipo	1





ético, ecológico, histórico, político, económico, etc.; que deben tomarse en cuenta para comprender mejor, o a futuro dicho tema. Se apoya en foros, autores, bibliografía, documentales, etc. para sustentar su punto de vista.	
E. Incorpora conocimientos y actividades interdisciplinarias en su aprendizaje. En el desarrollo de los temas de la asignatura, incorpora conocimientos y actividades desarrollados en otras asignaturas para lograr la competencia.	5.9
F. Realiza su trabajo de manera autónoma y autorregulada. Es capaz de organizar su tiempo y trabajar sin necesidad de una supervisión estrecha y/o coercitiva. Aprovecha la planeación de la asignatura presentada por el (la) profesor(a) (instrumentación didáctica) para presentar propuestas de mejora de la temática vista durante el curso. Realiza actividades de investigación para participar activamente durante el curso.	2.9

Niveles de desempeño:

Desempeño	Nivel de desempeño	Indicadores de alcance	Valoración numérica
Competencia alcanzada	Excelente	Cumple con los indicadores A, C, E, F con o sin el indicador D ó B	95-100
	Notable	Cumple con los indicadores A, C, E, F y con el indicador D	85-94
	Bueno	Cumple con los indicadores A, C, E con el indicador B ó F	75-84





TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO



	Suficiente	Cumple con los indicadores A, C, E, D	70-74
Competencia no alcanzada	Insuficiente	Cumple solo tres o menos indicadores	NA (no alcanzada)

Matriz de evaluación:

Evidencia de aprendizaje	%	Indicador de alcance						Evaluación formativa de la competencia
		A	B	C	D	E	F	
Evaluación diagnóstica	0	0	0	0	0	0	0	Cuestionario
Participación en clase	1	0	0.25	0.25	0.25	0.25	0	Lista de asistencia
Resolución de problemas	3	0	0.75	0.75	0	0.75	0.75	Método de resolución de problemas
Reporte de investigación	3	0.75	0.75	0	0	0.75	0.75	Rúbrica para reporte de investigación
Reporte de prácticas de laboratorio	2	0.4	0.4	0.4	0	0.4	0.4	Rúbrica para reporte de prácticas de laboratorio
Exposición	3	0.75	0.75	0	0.75	0.75	0	Rúbrica para exposición
Examen de conocimiento	8	3	0	1	0	3	1	Método de resolución de problemas
	Total 20	4.9	2.9	2.4	1	5.9	2.9	

Competencia No.: 5 Descripción: Analiza los fundamentos de la máquina de corriente directa como generador y Determina las características de los diferentes tipos de conexiones de los generadores para una adecuada selección.

Temas y subtemas para desarrollar	Actividades de aprendizaje	Actividades de	Desarrollo de	Horas teórico-
-----------------------------------	----------------------------	----------------	---------------	----------------





la competencia específica		enseñanza	competencias genéricas	práctica
5.1. Aspectos constructivos de las máquinas de corriente directa. 5.2. Principio de funcionamiento. (Acción generadora, Acción motora). 5.3. Devanados de armadura. 5.4. Reacción de armadura. 5.5. Flujo de potencia en máquinas de corriente directa. 5.6. Generadores de corriente directa. 5.7. Características con carga.	<ul style="list-style-type: none">• Investigar las partes constructivas de la máquina de corriente directa, así como sus respectivas funciones.• Investigar y analizar el principio de funcionamiento de la máquina de CD como generador y como motor.• Investigar los diferentes tipos de devanados de armadura.• Investigar y analizar el fenómeno de reacción de armadura.• Investigar los diferentes tipos de conexión de la máquina de corriente directa.• Realizar un ensayo práctico para determinar los parámetros de la máquina de corriente directa.• Usar el modelo de la máquina de corriente	<ul style="list-style-type: none">• Mediante el método expositivo realizar: Presentación del curso y detección de expectativas; conocer, identificar y diagnosticar al grupo; y explicar cada una de los conceptos.• Utilizar la resolución de problemas para la participación del estudiante en clase.• Utilizar prácticas de laboratorio para comprobar los conceptos.• Aplicar un examen de conocimientos.	<ul style="list-style-type: none">• Capacidad de abstracción, análisis y síntesis.• Capacidad de aplicar los conocimientos en la práctica.• Capacidad de comunicación oral y escrita.• Habilidades en el uso de las tecnologías de la información y de la comunicación.• Capacidad para identificar, plantear y resolver problemas.• Habilidades interpersonales.• Capacidad de trabajo en equipo.• Habilidades para buscar, procesar y analizar información procedente de fuentes diversas.	12 hrs.





	<p>directa para definir sus características par-velocidad.</p> <ul style="list-style-type: none">• Realizar un ensayo práctico para comprobar los efectos de la velocidad y la corriente de excitación sobre la tensión inducida.• Realizar un ensayo práctico que verifique las curvas características para diferentes tipos de generadores.• Realizar un análisis para la selección del generador.			
--	--	--	--	--

Indicadores de alcance	Valor del indicador
A. Se adapta a situaciones y contextos complejos. Puede trabajar en equipo, reflejar sus conocimientos en la interpretación de la realidad. Inferir comportamientos o consecuencias de los fenómenos o problemas en estudio. Incluir más variables en dichos casos de estudio	4.9
B. Hace aportaciones a las actividades académicas desarrolladas. Pregunta integrando conocimientos de otras asignaturas o de casos anteriores de la misma asignatura.	2.9





<p>Presenta otros puntos de vista que complementan al presentado en la clase. Presenta fuentes de información adicionales (Internet, documentales), usa más bibliografía, consulta fuentes en un segundo idioma, etc.</p>	
<p>C. Propone y/o explica soluciones o procedimientos no vistos en clase (creatividad). Ante problemas o casos de estudio propone perspectivas diferentes, para abordarlos y sustentarlos correctamente. Aplica procedimientos aprendidos en otra asignatura o contexto para el problema que se está resolviendo.</p>	2.4
<p>D. Introduce recursos y experiencias que promueven un pensamiento crítico; (por ejemplo el uso de las tecnologías de la información estableciendo previamente un criterio). Ante temas de una asignatura, introduce cuestionamientos de tipo ético, ecológico, histórico, político, económico, etc.; que deben tomarse en cuenta para comprender mejor, o a futuro dicho tema. Se apoya en foros, autores, bibliografía, documentales, etc. para sustentar su punto de vista.</p>	1
<p>E. Incorpora conocimientos y actividades interdisciplinarias en su aprendizaje. En el desarrollo de los temas de la asignatura, incorpora conocimientos y actividades desarrollados en otras asignaturas para lograr la competencia.</p>	5.9
<p>F. Realiza su trabajo de manera autónoma y autorregulada. Es capaz de organizar su tiempo y trabajar sin necesidad de una supervisión estrecha y/o coercitiva. Aprovecha la planeación de la asignatura presentada por el (la) profesor(a) (instrumentación didáctica) para presentar propuestas de mejora de la temática</p>	2.9





vista durante el curso. Realiza actividades de investigación para participar activamente durante el curso.

Niveles de desempeño:

Desempeño	Nivel de desempeño	Indicadores de alcance	Valoración numérica
Competencia alcanzada	Excelente	Cumple con los indicadores A, C, E, F con o sin el indicador D ó B	95-100
	Notable	Cumple con los indicadores A, C, E, F y con el indicador D	85-94
	Bueno	Cumple con los indicadores A, C, E con el indicador B ó F	75-84
	Suficiente	Cumple con los indicadores A, C, E, D	70-74
Competencia no alcanzada	Insuficiente	Cumple solo tres o menos indicadores	NA (no alcanzada)

Matriz de evaluación:

Evidencia de aprendizaje	%	Indicador de alcance						Evaluación formativa de la competencia
		A	B	C	D	E	F	
Evaluación diagnóstica	0	0	0	0	0	0	0	Cuestionario
Participación en clase	1	0	0.25	0.25	0.25	0.25	0	Lista de asistencia





TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO



Resolución de problemas	3	0	0.75	0.75	0	0.75	0.75	Método de resolución de problemas
Reporte de investigación	3	0.75	0.75	0	0	0.75	0.75	Rúbrica para reporte de investigación
Reporte de prácticas de laboratorio	2	0.4	0.4	0.4	0	0.4	0.4	Rúbrica para reporte de prácticas de laboratorio
Exposición	3	0.75	0.75	0	0.75	0.75	0	Rúbrica para exposición
Examen de conocimiento	8	3	0	1	0	3	1	Método de resolución de problemas
	Total 20	4.9	2.9	2.4	1	5.9	2.9	

Competencia No.: 6 Descripción: Analiza el principio de operación del motor de corriente directa y sus características de par contra velocidad, Realiza el arranque y control de velocidad de los motores de corriente directa, Investiga, evalúa y selecciona motores de corriente directa para cada aplicación particular.

Temas y subtemas para desarrollar la competencia específica	Actividades de aprendizaje	Actividades de enseñanza	Desarrollo de competencias genéricas	Horas teórico-práctica
6.1. Característica velocidad contra par de los diferentes motores de corriente directa. 6.2. Aplicaciones de los motores de CD. 6.3. Arranque de los motores de CD. 6.4. Control de velocidad. 6.5. Modelado del motor de CD. 6.6. Aplicación y selección de máquinas de corriente directa.	<ul style="list-style-type: none"> Investigar el principio de funcionamiento de los motores de corriente directa, especificando sus ventajas y desventajas. Realizar un ensayo práctico para obtener las características de par contra velocidad de los diferentes tipos de conexiones de los 	<ul style="list-style-type: none"> Mediante el método expositivo realizar: Presentación del curso y detección de expectativas; conocer, identificar y diagnosticar al grupo; y explicar cada una de los conceptos. Utilizar la resolución de problemas para la participación del 	<ul style="list-style-type: none"> Capacidad de abstracción, análisis y síntesis. Capacidad de aplicar los conocimientos en la práctica. Capacidad de comunicación oral y escrita. Habilidades en el uso de las tecnologías de la información y de la 	10 hrs.





TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO



	<p>motores de corriente directa.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Analizar el arranque de los motores de corriente directa y realizar el ensayo práctico correspondiente. • Simular el comportamiento del motor de corriente directa y obtener la característica de par contra velocidad. 	<p>estudiante en clase.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Utilizar prácticas de laboratorio para comprobar los conceptos. • Aplicar un examen de conocimientos. 	<p>comunicación.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Capacidad para identificar, plantear y resolver problemas. • Habilidades interpersonales. • Capacidad de trabajo en equipo. • Habilidades para buscar, procesar y analizar información procedente de fuentes diversas. 	
--	---	--	--	--

Indicadores de alcance	Valor del indicador
<p>A. Se adapta a situaciones y contextos complejos. Puede trabajar en equipo, reflejar sus conocimientos en la interpretación de la realidad. Inferir comportamientos o consecuencias de los fenómenos o problemas en estudio. Incluir más variables en dichos casos de estudio</p>	4.9
<p>B. Hace aportaciones a las actividades académicas desarrolladas. Pregunta integrando conocimientos de otras asignaturas o de casos anteriores de la misma asignatura. Presenta otros puntos de vista que complementan al presentado en la clase. Presenta fuentes de información adicionales (Internet, documentales), usa más bibliografía,</p>	2.9





consulta fuentes en un segundo idioma, etc.	
C. Propone y/o explica soluciones o procedimientos no vistos en clase (creatividad). Ante problemas o casos de estudio propone perspectivas diferentes, para abordarlos y sustentarlos correctamente. Aplica procedimientos aprendidos en otra asignatura o contexto para el problema que se está resolviendo.	2.4
D. Introduce recursos y experiencias que promueven un pensamiento crítico; (por ejemplo el uso de las tecnologías de la información estableciendo previamente un criterio). Ante temas de una asignatura, introduce cuestionamientos de tipo ético, ecológico, histórico, político, económico, etc.; que deben tomarse en cuenta para comprender mejor, o a futuro dicho tema. Se apoya en foros, autores, bibliografía, documentales, etc. para sustentar su punto de vista.	1
E. Incorpora conocimientos y actividades interdisciplinarias en su aprendizaje. En el desarrollo de los temas de la asignatura, incorpora conocimientos y actividades desarrollados en otras asignaturas para lograr la competencia.	5.9
F. Realiza su trabajo de manera autónoma y autorregulada. Es capaz de organizar su tiempo y trabajar sin necesidad de una supervisión estrecha y/o coercitiva. Aprovecha la planeación de la asignatura presentada por el (la) profesor(a) (instrumentación didáctica) para presentar propuestas de mejora de la temática vista durante el curso. Realiza actividades de investigación para participar activamente durante el curso.	2.9





TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO



Niveles de desempeño:

Desempeño	Nivel de desempeño	Indicadores de alcance	Valoración numérica
Competencia alcanzada	Excelente	Cumple con los indicadores A, C, E, F con o sin el indicador D ó B	95-100
	Notable	Cumple con los indicadores A, C, E, F y con el indicador D	85-94
	Bueno	Cumple con los indicadores A, C, E con el indicador B ó F	75-84
	Suficiente	Cumple con los indicadores A, C, E, D	70-74
Competencia no alcanzada	Insuficiente	Cumple solo tres o menos indicadores	NA (no alcanzada)

Matriz de evaluación:

Evidencia de aprendizaje	%	Indicador de alcance						Evaluación formativa de la competencia
		A	B	C	D	E	F	
Evaluación diagnóstica	0	0	0	0	0	0	0	Cuestionario
Participación en clase	1	0	0.25	0.25	0.25	0.25	0	Lista de asistencia
Resolución de problemas	3	0	0.75	0.75	0	0.75	0.75	Método de resolución de problemas
Reporte de investigación	3	0.75	0.75	0	0	0.75	0.75	Rúbrica para reporte de investigación
Reporte de prácticas de laboratorio	2	0.4	0.4	0.4	0	0.4	0.4	Rúbrica para reporte de prácticas de laboratorio





TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO



Exposición	3	0.75	0.75	0	0.75	0.75	0	Rúbrica para exposición
Examen de conocimiento	8	3	0	1	0	3	1	Método de resolución de problemas
Total	20	4.9	2.9	2.4	1	5.9	2.9	

5. Fuentes de información y apoyos didácticos

Fuentes de información:

Apoyos didácticos:

<ol style="list-style-type: none"> 1. Gonen T. (2011). Electrical Machines with MATLAB. (2a. Ed.). CRC Press . 2. NasarS. (1997) Electric Machines and Electromechanics.(2a. Ed.). McGraw Hill 3. Groos Ch. A. (2006). Electric Machines. (1a. Ed.). CRC Press. 4. Chee- Mun O..(1997). Dynamic Simulation of Electric Machinery Using Mat Lab/Simulink. Prentice Hall. 5. Kosow, I. L. 2009. Máquinas eléctricas y transformadores.(1^a Ed.). Reverte 6. Fitzgerald, K., (2003) Máquinas eléctricas, (6a. Ed.). McGraw Hill Interamericana 7. Cathey, J. J., (2002). Máquinas eléctricas, análisis y diseño aplicando Matlab, McGraw Hill. 8. Krause, P., Wasynczuk O. and Scott D. (2013). Analysis of Electric Machinery, (3a Ed.). McGraw Hill 9. Chapman, Stephen J. (2005) Máquinas eléctricas. (4^a Ed.). Mc.Graw Hill. 10. E.E. Staff del M.I.T, (2009) Circuitos magnéticos y 	<p>Pizarrón Proyector Simulador de máquinas eléctricas</p>
--	--





transformadores, Reverte

11. Comisión Federal de Electricidad, Manual de pruebas a transformadores, edición vigente
12. ANSI IEEE Std C57 100-1986 Transformadores en aceite
13. ANSI IEEE Std C57.105-1978 IEEE Guide for application of transformer connections in threephase distribution systems
14. ANSI IEEE Std C57.12.80 1978 IEEE IEEE Standard terminology for powerand distribution transformers
15. Catálogos de fabricantes de transformadores
16. Catálogos de fabricantes de motores de inducción trifásicos y monofásicos
17. Catálogos de fabricantes de generadores y motores síncronos
18. IEEE Std 114-2001 IEEE Standard Test Procedure for Single-Phase Induction Motors
19. IEEE Std 115-1995 IEEE Guide Test Procedure for Synchronous Machines
20. IEEE Std 112-2004 IEEE Standard test procedure for polyphase induction motors and generators

6. Calendarización de evaluación en semanas:

Semana	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
TP	ED/EF	EF	EF	EF/ES	EF	EF	EF/ES	EF	EF/ES	EF	EF/ES	EF	EF	EF/ES	EF	EF/ES	
TR																	





TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO



SD																	
----	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

TP= tiempo planeado

TR= tiempo real

SD= seguimiento departamental

ED= evaluación diagnóstica

EFn= evaluación formativa (competencia específica n)

ES= evaluación sumativa

Fecha de elaboración: XX /XXXX/ 202X

XXXXXXXXXXXXXXXXXX
Profesor

XXXXXXXXXXXXXXXXXX
Jefe Departamento de Ing. Eléctrica y Electrónica





CARTA DE RECONOCIMIENTO DEL AUTOR DE LOS DERECHOS A FAVOR DEL TECNM

Ciudad de México, 15/febrero/2023

TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO.
PRESENTE

Bajo protesta de decir verdad, Ing. Beatriz Aurora García Cristiano, personal docente adscrito al INSTITUTO TECNOLÓGICO DE MÉRIDA del Tecnológico Nacional de México, manifiesto que en cumplimiento de mis actividades relacionadas con el Año Sabático elaboré la obra titulada: "MÁQUINAS SINCRÓNICAS Y DE CD".

Con base en lo anterior, y con fundamento en los artículos 83 de la Ley Federal del Derecho de Autor y 46 de su Reglamento, reconozco que el Tecnológico Nacional de México es titular de los derechos patrimoniales sobre la misma y le corresponden las facultades relativas a la divulgación, integridad de la obra y de colección, conservando el derecho a figurar como autor.

Asimismo, respondo por la autoría y originalidad de la citada obra; y relevo de toda responsabilidad al Tecnológico Nacional de México de cualquier demanda o reclamación que llegara a formular alguna persona física o moral que considere que con esta obra es afectado en alguno de los derechos protegidos por la Ley en cita, asumiendo todas las consecuencias legales y económicas.

ATENTAMENTE

ING. BEATRIZ AURORA GARCÍA CRISTIANO
AUTOR



NOMBRE DEL TRABAJO

MAQUINAS SINCRONICAS Y DE CD.pdf

AUTOR

Beatriz Aurora Garcia Cristiano

RECUENTO DE PALABRAS

47185 Words

RECUENTO DE CARACTERES

232886 Characters

RECUENTO DE PÁGINAS

238 Pages

TAMAÑO DEL ARCHIVO

9.5MB

FECHA DE ENTREGA

Sep 28, 2023 9:46 AM CST

FECHA DEL INFORME

Sep 28, 2023 9:49 AM CST**● 28% de similitud general**

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para cada base de datos

- 18% Base de datos de Internet
- Base de datos de Crossref
- 19% Base de datos de trabajos entregados
- 0% Base de datos de publicaciones
- Base de datos de contenido publicado de Crossref

● Excluir del Reporte de Similitud

- Material bibliográfico
- Material citado
- Fuentes excluidas manualmente
- Material citado
- Coincidencia baja (menos de 15 palabras)

No. B.
A Aurora Garcia Cristiano
Subdirectora Académica
