

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

APUNTES MATERIA: MÁQUINAS ELÉCTRICAS

ELABORADO POR:

ING. BEATRIZ AURORA GARCÍA CRISTIANO

AGOSTO 2023

Contribución Académica

La contribución de la asignatura de Máquinas Eléctricas que impacta en los objetivos educativos y perfil de egreso de la carrera de Ingeniería Electrónica son los siguientes:

1. Diseña, analiza y construye equipos y/o sistemas electrónicos para la solución de problemas en el entorno profesional, aplicando normas técnicas y estándares nacionales e internacionales.
2. Planea, organiza, dirige y controla actividades de instalación, actualización, operación y mantenimiento de equipos y/o sistemas electrónicos para la optimización de procesos.
3. Colabora en proyectos de investigación para propiciar el desarrollo tecnológico en su entorno.
4. Compromete su formación integral permanente para su actualización profesional.
5. Dirige y participa en equipos de trabajo interdisciplinario y multidisciplinario para el desarrollo de proyectos afines a su perfil en contextos nacionales e internacionales.
6. Capacita recursos humanos para su actualización en las diversas áreas de aplicación de su entorno en el ámbito de la ingeniería electrónica.
7. Obtiene y simula modelos para predecir el comportamiento de sistemas electrónicos empleando plataformas computacionales.
8. Selecciona y opera equipo de medición y prueba para diagnóstico y análisis de parámetros eléctricos.
9. Utiliza lenguajes de descripción de hardware y programación de microcontroladores en el diseño de sistemas digitales para su aplicación en la resolución de problemas.
10. Resuelve problemas en el sector productivo para la optimización de procesos, mediante la automatización, instrumentación y control.
11. Desarrolla aplicaciones en lenguajes de programación de alto nivel para la solución de problemas relacionados con las diferentes disciplinas en el área.
12. Diseña e implementa interfaces gráficas de usuario para facilitar la interacción entre el ser humano, los equipos y sistemas electrónicos.

Esta asignatura aporta al perfil del egresado la capacidad para entender el funcionamiento de las máquinas eléctricas y las habilidades para seleccionarlas, ponerlas en operación y controlarlas. Para integrarla, se ha revisado los tipos de máquinas eléctricas que existen y sobre todo aquellas que más uso y aplicación tienen.

Esta asignatura tiene como antecedentes las competencias de electromagnetismo, circuitos eléctricos I, circuitos eléctricos II y como procedentes las competencias de electrónica de potencia aplicada y en las asignaturas de los módulos de especialidad.

De manera específica el objetivo de la asignatura de Máquinas Eléctricas es analizar el funcionamiento de las diferentes máquinas eléctricas y realiza una adecuada selección para su aplicación, según el tipo de carga.

Introducción

La finalidad de este trabajo es servir de apoyo de estudios de los temas de la materia Máquinas Eléctricas que se encuentra en el quinto semestre de la carrera de Ingeniería Electrónica. En esta materia se describen de manera general las máquinas eléctricas.

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. Esto permite establecer las bases para los siguientes temas de la asignatura.

También se describen los aspectos constructivos de los transformadores monofásicos y trifásicos, clasificación así como los tipos de conexiones.

En el segundo tema se tratan los fundamentos teóricos de la máquina de corriente directa, las conexiones y la operación de estas máquinas como generadores y motores.

En el tercer tema se describe las máquinas sincrónicas 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 en paralelo.

En el cuarto tema se estudia la operación del motor de inducción trifásicos sus aspectos constructivos, circuito equivalente. También se estudian el par de arranque y control de velocidad en forma teórica y práctica.

En el quinto tema se ven máquinas de inducción monofásicos y máquinas especiales.

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

Índice

Índice de Tablas.....	2
Índice de figuras	3
Tema 1 Fundamentos de electromagnetismo y transformador eléctrico.....	9
1.1 Leyes fundamentales de electromagnetismo.....	9
1.2 Variables magnéticas.....	12
1.3 Circuito Magnético.....	23
1.4 Principio operacional del transformador.....	47
1.5 Partes constitutivas del transformador	50
1.6 Análisis del transformador ideal	64
1.8 Análisis de la regulación de tensión con diferentes tipos de cargas	80
1.9 Eficiencia de los transformadores a diferentes factores de potencia	81
1.10 Autotransformadores monofásicos	83
1.11 Conexiones de transformadores monofásicos en arreglos trifásicos.....	89
1.12 Conexiones de autotransformadores monofásicos en arreglos trifásicos	92
Ejercicios del Tema 1.....	96
Tema 2 Máquinas de corriente directa.....	100
2.1 Componentes de las máquinas de CD	100
2.2 Principio operacional de las máquinas de C.D., como generador y como motor	105
2.3 Tipos de generadores (excitación separada, derivación, serie y compuesto) y sus curvas características	115
2.4 Tipos de motores (derivación, excitación separada, serie y compuesto) y sus curvas características	126
2.5 Ecuaciones de par electromagnético para los motores de CD.....	132
2.6 Condiciones de arranque para los diferentes tipos de motores de CD	135
2.7 Control de los motores de CD.....	137
2.8 Aplicaciones de los motores de CD	146
Ejercicios del Tema 2.....	148
Tema 3 Máquinas síncronas	154
3.1 Componentes de las máquinas síncronas	155
3.2 Principio operacional de las máquinas síncronas como generador y como motor	163
3.3 Fuerza electromotriz inducida y frecuencia.....	164
3.4 Circuito equivalente y diagramas fasoriales	170
3.5 Regulación de tensión con diferentes tipos de carga.....	175

3.6 Operación en paralelo de los generadores sincrónicos	175
3.7 Métodos de arranque de los motores sincrónicos	183
3.8 Análisis fasorial del motor sincrónico bajo diferentes condiciones de carga y de excitación	186
3.9 Potencia, par electromagnético y rendimiento	189
Ejercicios del Tema 3.....	193
Tema 4 Motores de inducción.....	201
4.1 Principio y análisis del motor jaula de ardilla	204
4.2 Principio y análisis del Motor con rotor devanado	207
4.3 Arranque y control de velocidad de los motores de inducción	209
4.4 Aplicaciones de los motores de inducción trifásicos	212
Ejercicios del Tema 4	214
Tema 5 Motores Especiales.....	218
5.1 Elementos básicos de los motores monofásicos.....	218
5.2 Principio de operación del motor monofásico de inducción	220
5.3 Arranque de los motores monofásicos de inducción	221
5.4 Devanados de fase partida.....	224
5.5 Arranque por capacitor	227
5.6 Operación continua por capacitor	228
5.7 Motor universal	229
5.8 Motor de polos sombreados.....	230
5.9 Motor de pasos.....	231
5.10 Servomotores	235
5.11 Motores lineales	238
5.12 Aplicación de los motores especiales	243
Bibliografía	245
Anexos	246
<i>PRESENTACIONES</i>	246
<i>FORMULARIOS</i>	247

Índice de Tablas

Tabla 1 . Valores de la curva de histéresis para algunos materiales	23
Tabla 2. Comparación de las reglas de la mano derecha e izquierda.....	41
Tabla 3 Pérdidas en acero al silicio a 60 y 50 Hz	52

Índice de figuras

Figura 1. El magnetismo es utilizado en la medicina para hacer resonancias magnéticas	10
Figura 2. Material ferromagnético, hierro	11
Figura 3. Material paramagnético, aluminio	12
Figura 4. Material diamagnético, cobre	12
Figura 5. Los campos magnéticos son dipolares, poseen un polo Norte y un polo Sur	13
Figura 6. Un electroimán se genera por desplazamiento de las cargas de una corriente eléctrica ..	14
Figura 7. Las líneas del campo magnético nos indican su dirección	15
Figura 8. La carga eléctrica positiva genera un campo eléctrico hacia afuera y la negativa, hacia dentro	15
Figura 9. Flujo magnético por una espira	16
Figura 10. Comportamiento de Inducción magnética	17
Figura 11. Intensidad de campo magnético en un conductor	17
Figura 12. Curva de magnetización de un material ferromagnético	18
Figura 13. Curva B-H de diferentes materiales ferromagnéticos	19
Figura 14. Ciclo de histéresis del material ferromagnético	21
Figura 15. Ciclo de histéresis de un material con un gran valor de magnetismo remanente	22
Figura 16. Ciclo de histéresis de un material con un menor valor de magnetismo remanente	22
Figura 17. Solenoide con núcleo magnético	23
Figura 18. Representación analógica de la reluctancia	24
Figura 19. Representación de la dispersión magnética	26
Figura 20. Representación de la dispersión magnética de un transformador	27
Figura 21. Inducción magnética en un conductor rectilíneo	28
Figura 22. Inducción magnética en una espira	28
Figura 23. Campo magnético de un solenoide	29
Figura 24. Campo magnético en una espira representando las líneas de flujo que se producen	30
Figura 25. Campo magnético sobre un solenoide cerrado	30
Figura 26. Ejemplo como se aplica la Ley de Faraday	31
Figura 27. Ley de Lenz	32
Figura 28. Fem inducida en un conductor rectilíneo	34
Figura 29. Vista superior de la fem inducida en un conductor	35
Figura 30. Vista superior de la fem inducida con las variables involucradas	35
Figura 31. Regla de la mano derecha	36
Figura 32. Comportamiento del conductor con la regla de la mano derecha	36
Figura 33. Comportamiento de las corrientes parásitas en un material magnético	37
Figura 34. Comparación entre las resistencias eléctricas en un núcleo macizo y un núcleo de chapas aisladas	37
Figura 35. Representación de la fuerza de Lorentz	39
Figura 36. Vista superior de fuerza de Lorentz	39
Figura 37. Vista superior de la fuerza de Lorentz con las variables involucradas	39
Figura 38. Regla de la mano izquierda	40
Figura 39. Interpretación de la Regla de la mano izquierda	41
Figura 40. Interpretación de la regla de la mano izquierda en un campo magnético	41
Figura 41. Representación del comportamiento del campo magnético en dos conductores	43
Figura 42. Partes de una bobina	45

Figura 43. Inductancia	46
Figura 44. Conductor ideal	47
Figura 45. Resistencia	47
Figura 46. Representación de un transformador	49
Figura 47. Diagrama básico del transformador ideal	49
Figura 48. Láminas o chapas de acero al silicio para la construcción de los núcleos.....	51
Figura 49. Bobinas (devanados) del transformador	52
Figura 50. Transformador trifásico	55
Figura 51. Esquema eléctrico, transformador monofásico	57
Figura 52. Transformador monofásico	57
Figura 53. Esquema eléctrico, transformador trifásico	58
Figura 54. Transformador Trifásico.....	58
Figura 55. Descripción de los núcleos: a) acorazado b) no acorazada (columna)	60
Figura 56. Distribución de los devanados del primario y secundario	60
Figura 57. Tipos de núcleo y de devanados de un transformador	60
Figura 58. Transformador ideal (sin pérdidas).....	65
Figura 59. Diagrama vectorial en un transformador ideal en vacío	68
Figura 60. Transformador ideal en carga.....	69
Figura 61. Representación vectorial de un transformador ideal con carga.....	72
Figura 62. Esquema del transformador con los flujos.....	72
Figura 63. Forma de las columnas del núcleo de transformador a) cuadrada, b) cruciforme y c) escalonada.....	74
Figura 64. Transformador real con bobinas por pérdidas del flujo de dispersión.....	75
Figura 65. Circuito equivalente de un transformador real	75
Figura 66. Diagrama fasorial del transformador real	76
Figura 67. Circuito equivalente del transformador	76
Figura 68. Transformador real en vacío vectores	77
Figura 69. Transformador real en carga vectores.....	78
Figura 70. Transformador real en carga vectores.....	78
Figura 71. Circuito real que muestra los voltajes reales y corrientes reales	79
Figura 72. a) Impedancia Z_2 desplazada al lado del primario, observe los cambios correspondientes de E_2 e I_2 ; b) Impedancia Z_3 desplazada al lado del primario, observe los cambios correspondientes de E_3 e I_3 ; c) Impedancia Z_4 desplazada al lado del primario, observe los cambios correspondientes de E_4 e I_4 , ahora las corrientes en T son cero; d) Ahora todas las impedancias se encuentran del lado del primario y ya no se requiere el transformador	79
Figura 73. Pérdidas en un transformador.....	82
Figura 74. Formas posibles de conectar un transformador de dos devanados como autotransformador.....	85
Figura 75. Transformador de dos devanados conectado como autotransformador.....	87
Figura 76. Circuitos equivalentes de un autotransformador.....	88
Figura 77. Conexión Delta - Delta.....	90
Figura 78. Conexión Delta - Estrella	90
Figura 79. Conexión Estrella - Estrella	91
Figura 80. Conexión Estrella - Delta.....	92
Figura 81. Autotransformador.....	93

Figura 82. Máquina de corriente directa.....	101
Figura 83. Estator y rotor de una máquina de corriente continua durante el proceso de fabricación	102
Figura 84. Componentes de una máquina de corriente directa	103
Figura 85. Máquina de corriente directa.....	104
Figura 86. Colector de una máquina de cd.....	104
Figura 87. Comportamiento de una espira en el campo magnético, graficando la fem inducida...	106
Figura 88. Comportamiento de una espira con conmutador	106
Figura 89. Comportamiento de una espira en el campo magnético conectada a un conmutador, graficando la fem inducida	107
Figura 90. Voltajes de bobina rectificadas y voltaje resultante entre las escobillas en una máquina de cd	108
Figura 91. Máquina de cd funcionando como generador	109
Figura 92. Máquina de cd funcionando como motor.....	110
Figura 93. Reacción de inducido en una máquina de cd.....	110
Figura 94. Distribuciones del campo magnético en una máquina de cd	111
Figura 95. Comportamiento de la máquina de cd trabajando en vacío	111
Figura 96. Reacción del inducido cuando coincide con el eje de las escobillas	112
Figura 97. Devanado de los interpolos de un generador de cc.....	113
Figura 98. Devanado compensador de un generador de cc.....	113
Figura 99. (a) Flujo por polo sin carga. (b) Fuerza magnetomotriz (fmm) y el flujo debido a la reacción de la armadura. (c) Flujo resultante.	114
Figura 100. Conmutador con escobillas de una máquina de cd.....	115
Figura 101. Circuito del generador de cd o dinamo	115
Figura 102. Balance de potencias en el generador de cd.....	117
Figura 103. Balance de potencias en el motor de cd	117
Figura 104. Tipos de excitación de las máquinas de cd.....	119
Figura 105. Dinamo con excitación independiente	119
Figura 106. Curva de vacío de un generador de cd para distintas velocidades.....	120
Figura 107. Característica externa de un generador de cd con excitación independiente	121
Figura 108. Generador con excitación en derivación o shunt	121
Figura 109. Determinación de la tensión de funcionamiento de un dinamo derivación.....	122
Figura 110. Característica externa de un generador shunt	123
Figura 111. Generador con excitación en serie	124
Figura 112. Característica externa del generador con excitación en serie	124
Figura 113. Generador con excitación compuesta larga	125
Figura 114. Generador con excitación compuesta corta.....	125
Figura 115. Características externas de un generador compound.....	126
Figura 116. Balance de potencias en el motor de cd	127
Figura 117. Motor con excitación independiente	128
Figura 118. Motor con excitación en derivación o shunt	129
Figura 119. Características par-velocidad de un motor derivación o shunt	129
Figura 120. Motor de cd en serie	130
Figura 121. Característica par-velocidad de un motor de cd en serie.....	130
Figura 122. Motor de cd con excitación compuesta	131

Figura 123. Característica par-velocidad de un motor de cd con excitación compuesta	132
Figura 124. Fuerza contraelectromotriz (f_{cem}) en un motor de cd	133
Figura 125. Arrancador de reóstato manual de un motor en derivación.....	136
Figura 126. Comportamiento de la regulación de velocidad de una máquina cd en derivación o shunt.....	139
Figura 127. a) Conexiones originales de un motor compuesto; b) Inversión de las conexiones de la armadura para invertir la dirección de rotación; c) Inversión de las conexiones del campo para invertir la dirección de rotación	141
Figura 128. Bloqueo de un motor a) shunt y b) serie.....	142
Figura 129. Frenado dinámico de un motor (a)shunt y (b) en serie.....	144
Figura 130. Constitución general de una máquina síncrona de rotor cilíndrico	155
Figura 131. Vistas de los rotores de una máquina síncrona.....	156
Figura 132. Rotores de polos lisos.....	157
Figura 133. Máquina síncrona de polos salientes	157
Figura 134. Rotor de un hidroalternador	158
Figura 135. a) Máquina de polos salientes b) Máquina de rotor cilíndrico.....	158
Figura 136. Corte de un polo saliente con entrehierro variable y con devanado amortiguador	159
Figura 137. Estator de generador síncrono	160
Figura 138. Hidrogenerador trifásico de la central de Itaipú (824 MVA, 90 rpm, 60 Hz)	162
Figura 139. Motor síncrono de dos polos.....	163
Figura 140. Simulación motor síncrono.....	164
Figura 141. 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. Las velocidades que se muestran tienen un marco de referencia en el que el campo magnético es estacionario. c) la distribución de densidad de flujo en el entrehierro	164
Figura 142. Producción de voltajes trifásicos con tres bobinas separadas por 120°	166
Figura 143. Máquina de ca simplificada con una distribución de flujo del estator senoidal y una sola bobina de alambre montada en el rotor.	167
Figura 144. Los componentes de densidad de flujo magnético dentro de la máquina	168
Figura 145. Máquina síncrona simplificada que muestra los campos magnéticos de su rotor y de su estator.....	169
Figura 146. Circuito equivalente por fase de un generador síncrono sin reacción a la armadura, con el campo revolvente producido por el rotor	171
Figura 147. 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	171
Figura 148. 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	172
Figura 149. Circuito equivalente por fase mostrando la fem inducida en el devanado de la armadura debida a la reacción de esta	172
Figura 150. Diagrama fasorial mostrando el efecto de la reacción de la armadura cuando el factor de potencia está en atraso	173
Figura 151. Diagrama fasorial mostrando el efecto de la reacción de la armadura cuando el factor de potencia de la carga está en adelanto.....	173
Figura 152. Circuito equivalente por fase de un generador síncrono con reacción de la armadura	174

Figura 153. diagramas fasoriales correspondientes para el factor de potencia de cargas a) en atraso, b) igual a la unidad y c) en adelante.....	175
Figura 154. Generadores en paralelo	176
Figura 155. Diferencia de voltajes de línea	177
Figura 156. Oscilación de voltaje resultante	178
Figura 157. Secuencia de fases.....	179
Figura 158. Indicador de secuencia de fases por medio de lámparas.....	179
Figura 159. Desfase de ángulos de la misma línea	180
Figura 160. Sincronoscopio	180
Figura 161. Transformador sincronizador especial.....	181
Figura 162. Operación Generador – Generador.....	182
Figura 163. Gráfica frecuencia-potencia a) Generador 1 – Generador 2 en paralelo b) Efecto de aumentar la frecuencia en el generador 2	182
Figura 164. Esquema Arranque motor Síncrono	185
Figura 165. Devanado amortiguador trifásico en el rotor de un motor síncrono	186
Figura 166. Esquema Curvas en V	187
Figura 167. Curvas Características en V.....	188
Figura 168. Diagrama de flujo de potencia de un generador de ca trifásico	190
Figura 169. Diagrama de flujo de potencia de un motor de ca trifásico	191
Figura 170. Operación del motor síncrono.....	191
Figura 171. Motor de inducción parcialmente ensamblado, donde puede distinguirse sus partes principales	201
Figura 172. Motor de inducción con 6 ranuras en el estator a) sección del motor, b) esquema de conexión en estrella	202
Figura 173. a) Esquema de conexión de un motor trifásico de inducción, b) Diagrama fasorial de tensiones y corrientes de entrada estatóricas.	203
Figura 174. Estator de motor de inducción	203
Figura 175. Rotor de motor de inducción	205
Figura 176. Rotor devanado. A)corte transversal, para un rotor devanado con un par de polos b) rotor devanado con múltiples polos	208
Figura 177. Diagrama de conexión de un rotor bobinado dentro del estator de un motor trifásico de inducción	208
Figura 178. Circuito equivalente de un motor monofásico de inducción	208
Figura 179. Arranque estrella triángulo de un motor trifásico mediante arrancador manual.....	209
Figura 180. Curva “ par – velocidad” típica de un motor trifásico de inducción.....	211
Figura 181. Puntos característicos de la curva “ par – velocidad” de un motor trifásico de inducción	211
Figura 182. Detalle de los puntos operación: par nominal y par en vacío	212
Figura 183. a) Partes del motor de inducción, b) Esquema de conexión básico del motor monofásico	218
Figura 184. Estator laminado desnudo de un motor monofásico de 36 ranuras.....	219
Figura 185. a) Vista plana del devanado principal de un motor de 36 ranuras y 4 polos, que muestra el número de vueltas por bobina, b) fmm producidas por el devanado principal, c) Posición del devanado auxiliar con respecto al devanado principal.....	219
Figura 186. Tipos de motores monofásicos según el rotor	220

Figura 187. Motor de inducción monofásico	221
Figura 188. Esquema de un motor monofásico con bobinado auxiliar.....	221
Figura 189. Esquema de motor monofásico con bobinado auxiliar y condensador	222
Figura 190. Esquema de conexiones para la puesta en marcha de un motor monofásico de corriente alterna de forma manual	222
Figura 191. Esquema de conexiones para invertir el sentido de giro de un motor monofásico con bobinado	223
Figura 192. Esquema de conexiones para invertir el sentido de giro de un motor monofásico con bobinado auxiliar de funcionamiento permanente	223
Figura 193. Modelo de motores de fase partida.....	224
Figura 194. Circuito eléctrico de un motor de fase partida	225
Figura 195. Diagrama fasorial de corrientes y tensiones en el motor de fase partida.....	226
Figura 196. Diagrama del motor monofásico de condensador	227
Figura 197. Motor de fase partida con capacitor permanente	228
Figura 198. Esquema de conexiones del motor universal.....	229
Figura 199. Motor monofásico universal para un taladro eléctrico	229
Figura 200. Motor de polos sombreados	231
Figura 201. Motor paso a paso de reluctancia variable	232
Figura 202. Motor paso a paso de imán permanente	232
Figura 203. Bobina simple	233
Figura 204. Paso completo	234
Figura 205. Medio paso.....	234
Figura 206. Diagrama básico del funcionamiento de un servomotor	236
Figura 207. Partes de un servomotor	237
Figura 208. Diagrama comparativo de un motor convencional con uno lineal	238
Figura 209. Prototipo de un motor lineal con bobinados separados visibles	240
Figura 210. Dirección del movimiento es opuesta a la dirección del flujo en movimiento	241
Figura 211. Dirección del movimiento es la misma a la dirección del flujo en movimiento	241
Figura 212. Diagrama de un LIM de dos caras	242
Figura 213. Diagrama con los límites del primario más larga que del secundario	242
Figura 214. Diagrama con los límites del primario más corta que del secundario	242

Tema 1 Fundamentos de electromagnetismo y transformador eléctrico.

1.1 Leyes fundamentales de electromagnetismo.

Cuando hablamos de magnetismo o de energía magnética, nos referimos a uno de los dos componentes de la radiación electromagnética (junto a la electricidad) que se manifiesta a través de fuerzas de atracción o repulsión entre ciertos tipos de materiales y un campo de energía magnética (campo magnético).

Si bien todas las sustancias son afectadas por el magnetismo, no todas lo hacen de la misma manera. Algunos materiales, como ciertos metales ferromagnéticos (en especial el hierro, níquel, cobalto y sus aleaciones) son particularmente propensos a ello y por ende pueden constituir imanes. Algunos de ellos pueden ser de origen natural y otros de origen artificial, por ejemplo, como consecuencia de la acción de la electricidad sobre ciertos materiales (electroimanes).

La mayoría de los imanes son dipolos magnéticos: están dotados de un polo positivo y un polo negativo. Cada uno de estos polos ejerce una fuerza sobre otros imanes, o metales ferromagnéticos que encuentren en su área de acción, según una ley que establece que los polos semejantes se repelen, mientras que los opuestos se atraen.

Estos dipolos pueden darse a una escala macroscópica (por ejemplo, en el planeta Tierra existe un polo Norte y un polo Sur, cada uno ejerciendo una influencia magnética que permite el funcionamiento de las brújulas) o microscópica (por ejemplo, en la orientación de ciertas moléculas orgánicas debido a la carga eléctrica de sus átomos). Y estas fuerzas de magnetismo juegan un rol importante entre las fuerzas elementales de la naturaleza.

Existen, así, materiales diamagnéticos (débilmente magnéticos), paramagnéticos (medianamente magnéticos) o ferromagnéticos (altamente magnéticos).

El magnetismo y la corriente eléctrica están estrechamente vinculados y juntos componen el electromagnetismo, una de las fuerzas elementales del universo. La manipulación de los campos magnéticos, por ejemplo, a través de

la aceleración de imanes, puede generar una corriente eléctrica aprovechable, como ocurre de hecho en algunos tipos de generadores.

Y al mismo tiempo, al hacer circular una corriente eléctrica por ciertos tipos de metales, se los puede convertir en electroimanes y hacer que atraigan a ciertos metales o materiales ferromagnéticos.

Esta relación se fundamenta en la naturaleza atómica de los materiales, en los que los electrones (-) de la órbita más lejana del núcleo del átomo (+) pueden ser arrancados o transferidos de una molécula a otra, generando así un flujo eléctrico (corriente) y polarizando el conjunto, es decir, inclinando la carga eléctrica hacia un lado (polo negativo) y dejando a otro con menos carga (polo positivo).

El magnetismo ha sido empleado por la humanidad desde hace mucho. La invención de la brújula y su uso para orientarse (marcando la dirección fija del Norte del planeta) data de hace cientos de años y fue clave en el desarrollo de la navegación y en la exploración del mundo.

Por otro lado, grandes imanes se emplean en la industria de la generación eléctrica, en la medicina (por ejemplo, los exámenes por resonancia magnética), en la ingeniería (el desarrollo de motores, la conducción y almacenamiento de cargas eléctricas, etc.) y, sobre todo, en la electrónica.

Figura 1. El magnetismo es utilizado en la medicina para hacer resonancias magnéticas



La computación, por ejemplo, depende en gran medida del aprovechamiento del magnetismo para el registro de información, combinándolo con la corriente eléctrica y el conocimiento de los semiconductores.

Materiales magnéticos.

Los materiales se pueden clasificar según sus propiedades magnéticas, esto es, según su permeabilidad magnética relativa. Los materiales aparecen como:

Ferromagnéticos. Aquellos cuyo valor de permeabilidad magnética relativa es muy superior a 1. ($\mu_r \gg 1$)

Estos materiales atraen el campo magnético hacia su interior. Son los materiales que se sienten atraídos por los imanes.

El ejemplo por excelencia de materiales ferromagnéticos es el hierro.

Figura 2. Material ferromagnético, hierro



Paramagnéticos o materiales no magnéticos. Aquellos cuya permeabilidad relativa es superior y muy próxima a 1, ($\mu_r > 1$ y $\mu_r \approx 1$) se comporta como el vacío.

No presentan ferromagnetismo, y su reacción frente a los campos magnéticos es muy poco apreciable. Dentro de esta categoría están la mayoría de los materiales que hay en la naturaleza.

Un ejemplo de material paramagnético es el aluminio. Para cada material ferromagnético hay una temperatura a la cual su magnetización se hace igual a cero y por encima de la cual se comporta como un material paramagnético. Se denomina Temperatura de Curie.

Figura 3. Material paramagnético, aluminio



Diamagnéticos. Aquellos cuya permeabilidad relativa es inferior y muy próxima a 1. ($\mu_r < 1$ y $\mu_r \approx 1$)

Estos materiales repelen el campo magnético, haciendo que éste pase por el exterior del material. En general, esta acción diamagnética es muy débil, y no es comparable al efecto que produce el campo magnético sobre los materiales ferromagnéticos.

Un ejemplo de material diamagnético es el cobre. Sólo los materiales ferromagnéticos tienen aplicaciones magnéticas importantes, porque, como veremos más adelante, con poca intensidad magnética, se puede conseguir un gran campo magnético en su interior.

Figura 4. Material diamagnético, cobre



1.2 Variables magnéticas

Campo magnético.

Un campo magnético es la representación matemática del modo en que las fuerzas magnéticas se distribuyen en el espacio que circunda a una fuente magnética. Esta fuente puede ser un imán, una carga en movimiento o una corriente eléctrica (muchas cargas en movimiento). Siempre que exista

alguno de estos elementos, habrá un campo magnético a su alrededor, es decir, un campo de fuerzas magnéticas. Fuera de este campo no hay efectos magnéticos.

Una característica fundamental de los campos magnéticos es que son dipolares: poseen un polo Norte y un polo Sur, a los que también se les dice polo positivo y polo negativo. A diferencia de los campos eléctricos que pueden generarse por cargas eléctricas (como un electrón), no existen “cargas magnéticas” que generen campos magnéticos. Los campos magnéticos siempre tienen asociados dos polos. Como consecuencia, las líneas del campo magnético son siempre cerradas, como en el caso del imán: salen del polo norte y llegan al polo sur.

Para que exista un campo magnético debe existir una fuente de energía magnética (como un imán), una carga en movimiento o una corriente eléctrica. Estos elementos son los únicos capaces de crear un campo magnético y los únicos que pueden ser afectados por él.

Una carga eléctrica (como un electrón moviéndose en el espacio) genera a su alrededor un campo magnético que ejercerá una fuerza sobre otra carga en movimiento. Lo mismo sucede con las corrientes eléctricas. El caso de los imanes es particular porque no hay cargas en movimiento involucradas, sino que estos materiales generan un campo magnético debido a ciertos fenómenos microscópicos de cierta complejidad.

Según lo describen la Ley de Ampère y las ecuaciones de Maxwell, campos magnéticos y campos eléctricos suelen existir juntos en la naturaleza. Ciertos cambios en el tiempo de un campo magnético producen campos eléctricos. Un buen ejemplo de la coexistencia de estos dos campos son las radiaciones electromagnéticas, como la luz.

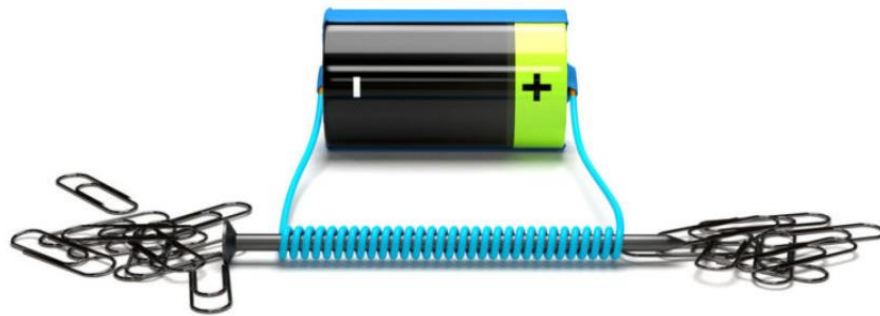
Los campos magnéticos se pueden clasificar de acuerdo a su fuente de creación:

Figura 5. Los campos magnéticos son dipolares, poseen un polo Norte y un polo Sur



- Campos magnéticos provenientes de un imán. Los imanes son materiales que tienen la particularidad de poseer un campo magnético permanente, creado por lo que en física se conoce como el spin de los electrones (puede entenderse pensándolo como un giro sobre sí mismos). Por otro lado, hay metales que pueden “convertirse” en imanes cuando son magnetizados por medio de un campo magnético externo.

Figura 6. Un electroimán se genera por desplazamiento de las cargas de una corriente eléctrica



- Campos magnéticos provenientes de corriente. Toda carga en movimiento produce un campo magnético. Por eso, una corriente eléctrica también produce un campo magnético. Por ejemplo: los electroimanes (como el de la figura superior) son dispositivos en los que por medio de una batería se hace circular corriente por un cable enrollado en un metal. Esta corriente genera un campo magnético a su alrededor que magnetiza el metal y generando otro campo magnético. Así, los electroimanes se utilizan para generar campos magnéticos variables ya que, cambiando la corriente, cambia el campo magnético.

La dirección de un campo magnético **se puede describir empleando líneas o** vectores, encargados de señalar la dirección hacia donde apuntan las fuerzas magnéticas. En la figura de arriba se pueden ver claramente las líneas del campo magnético generado por el imán, que indican la dirección de la fuerza con la que el imán interactúa con las partículas metálicas.

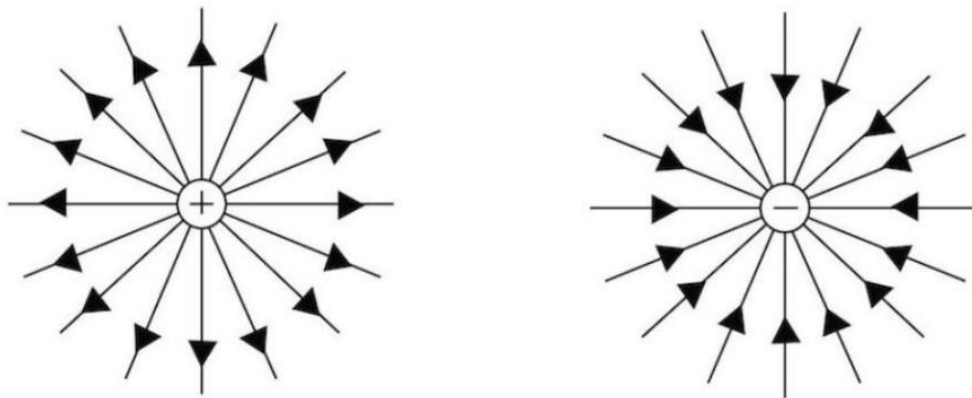
El hecho de que el campo magnético posea dirección implica que es un vector. Cualquier fuerza es una cantidad vectorial, es decir, representa una magnitud que posee una dirección y un sentido, como por ejemplo la velocidad. Como el campo magnético es proporcional a la fuerza magnética, entonces también es una cantidad vectorial. De hecho, resulta interesante notar que la fuerza

magnética que siente una partícula en movimiento inmersa en un campo magnético es siempre perpendicular a la dirección de dicho campo y de su propia velocidad.

Figura 7. Las líneas del campo magnético nos indican su dirección



Figura 8. La carga eléctrica positiva genera un campo eléctrico hacia afuera y la negativa, hacia dentro



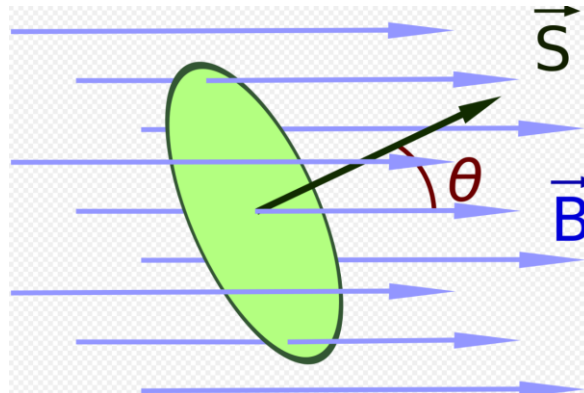
Flujo magnético.

Se define flujo magnético, como la cantidad de líneas de campo magnético que atraviesan una determinada superficie S en el espacio. en una superficie elemental, que forma parte de la superficie total S , y se extiende dicho producto a toda la superficie.

El ángulo al cual la línea de campo se interseca con el área también es importante. Una línea de campo que penetra de forma rasante contribuye con una pequeña componente de campo al flujo magnético. Cuando se calcula el flujo magnético, solamente se incluye la componente del vector de campo

magnético que es normal al área de prueba.

Figura 9. Flujo magnético por una espira



Si escogemos una superficie simple y plana de área A como el área de prueba de la Figura 6, y hay un ángulo (θ) entre su normal y un vector de campo vectorial (con magnitud B), entonces el flujo magnético (Φ) es:

$$\Phi = BA \cos \theta$$

Si la superficie (A) es perpendicular al campo, entonces el ángulo es cero y el flujo magnético simplemente es BA .

La unidad del SI del flujo magnético es el weber y su símbolo es Wb . Ya que el flujo magnético es tan solo una manera de expresar el campo magnético en un área dada, lo podemos medir con un magnetómetro del mismo modo que el campo magnético.

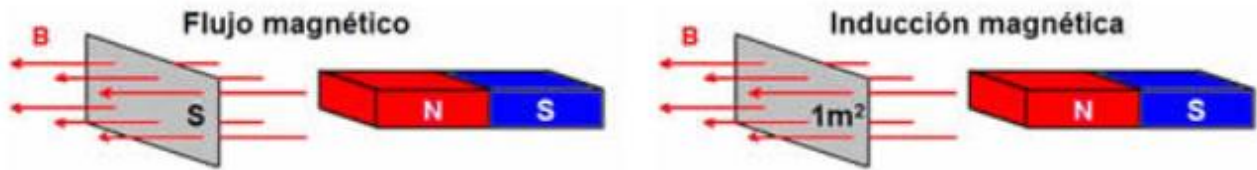
Inducción magnética.

La inducción magnética, es el flujo magnético por unidad de área de una sección normal a la dirección del flujo. Es la manera de cuantificar los campos magnéticos.

Representa la cantidad de líneas de campo magnético por unidad de superficie, recibiendo por ello también el nombre de densidad de flujo magnético. La inducción magnética mide el efecto que produce un campo magnético en un punto, sobre un determinado material. Su símbolo es la letra B y su unidad en el

Sistema Internacional de Unidades es el Tesla (T). ($T = \text{Wb/m}^2$) pese a que a menudo se emplea el Gauss, G. ($1\text{T} = 10000\text{ G}$).
Los aparatos de medida de la inducción magnética se denominan teslámetros.

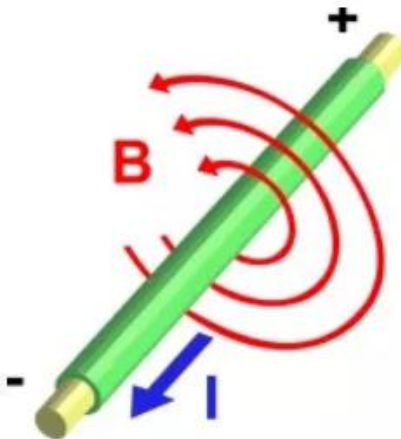
Figura 10. Comportamiento de Inducción magnética



Intensidad de campo magnético.

Se denomina intensidad de campo magnético o excitación magnética. Se representa con la letra H y es la relación entre la inducción magnética y la permeabilidad del medio donde se ha producido el campo magnético.

Figura 11. Intensidad de campo magnético en un conductor



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

Siendo:

H, la intensidad de campo magnético, en A/m

μ , la permeabilidad magnética, en T·m/A

B, la inducción magnética en el material, en Teslas (T)

De esa fórmula se puede obtener otra definición de la permeabilidad, ya que es el cociente entre la inducción magnética que aparece en el interior del material y la intensidad de campo magnético existente:

$$\mu = \frac{B}{H} \left[T \cdot \frac{m}{A} \right]$$

Curvas de magnetización.

Representan gráficamente la relación B-H de los materiales, es decir, la densidad de flujo magnético B obtenido para determinados valores de excitación magnética H, se obtienen diversas curvas que representan el comportamiento magnético de los mismos.

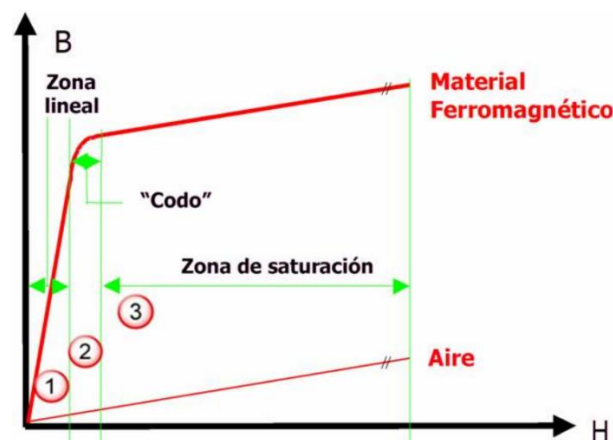
A estas curvas B-H se les denomina curvas de magnetización o de imanación. Para la mayoría de los materiales ferromagnéticos, la curva es muy similar, y en ella se observan tres zonas diferenciadas, como se muestra en la figura siguiente:

Zona 1: Aplicando poca excitación, se obtiene mucha inducción (curva con gran pendiente y bastante lineal)

Zona 2: La inducción obtenida ya no es tan elevada, y la curva tiene menos pendiente. Se denomina codo de saturación

Zona 3: La inducción obtenida es mínima, por mucho que se eleve la excitación.

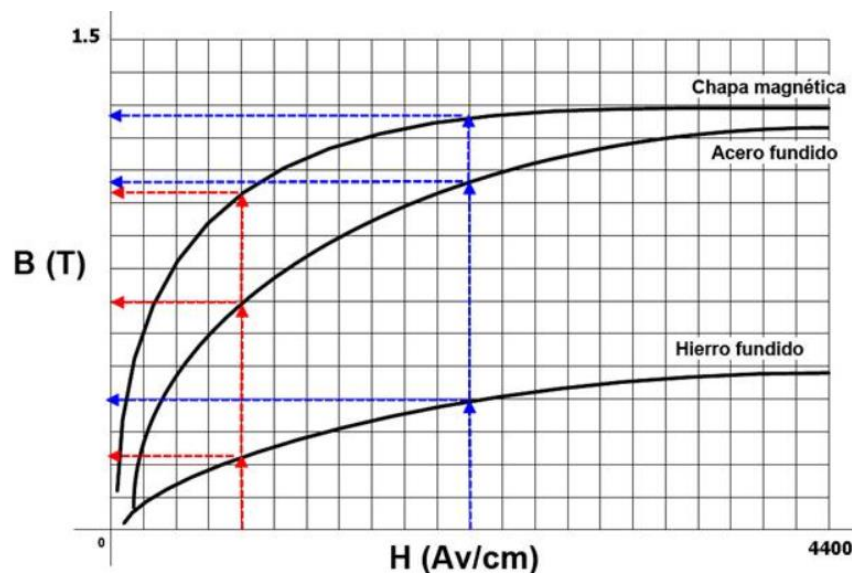
Figura 12. Curva de magnetización de un material ferromagnético



La pendiente es muy pequeña. Se denomina saturación. Los materiales magnéticos, una vez que alcanza la saturación, tiene un comportamiento idéntico al del aire, no permitiendo que la densidad de flujo siga aumentando a pesar de que la intensidad del campo si lo haga.

Los fabricantes de los materiales magnéticos proporcionan las curvas B-H, a partir de los cuales, entrando en las abscisas con el valor de excitación deseado, subiendo hasta la curva y trazando una horizontal hasta la abscisa, se obtiene la inducción resultante. En la figura siguiente se puede observar cómo evoluciona la densidad de flujo magnético, B, medida en T, dentro de varios materiales, frente a la excitación producida por una corriente eléctrica. Esta excitación se mide mediante la intensidad del campo magnético producido por las corrientes de excitación en A·v/m.

Figura 13. Curva B-H de diferentes materiales ferromagnéticos



Permeabilidad magnética.

Se denomina permeabilidad magnética (o permeabilidad magnética absoluta) al grado de magnetización de un material en respuesta a un campo magnético.

A semejanza de la permitividad eléctrica, donde se referenciaba dicha magnitud respecto al vacío, con el grado de magnetización de los materiales se hace igual, para lo cual hay que definir una nueva magnitud: la permeabilidad del vacío, conocida también como constante magnética. Es un valor constante e independiente del campo magnético. Se representa mediante el símbolo μ_0 y se define como:

$$\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \left[\text{T} \cdot \frac{\text{m}}{\text{A}} \right]$$

La permitividad eléctrica en el vacío, ϵ_0 , y la constante magnética del vacío, μ_0 , que se acaba de ver, están relacionadas por la fórmula:

$$\mu_0 \cdot \epsilon_0 = \frac{1}{c^2}$$

Siendo c la velocidad de la luz en el espacio vacío.

Así, se define la permeabilidad magnética relativa (μ_r) como el cociente entre la permeabilidad magnética absoluta (μ) y la permeabilidad magnética de vacío (μ_0):

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

También se puede expresar la relación como:

$$\mu = \mu_0 \cdot \mu_r \quad [\text{N} \cdot \text{A}^2]$$

Esa magnitud nos permitirá comparar magnéticamente entre sí los materiales, es decir, su grado de respuesta ante un campo magnético. Así, por ejemplo, si decimos que un material tiene una $\mu_r = 3 \cdot 10^3$, significa que tiene 3000 veces más permeabilidad que el vacío.

El aparato de medida que mide la permeabilidad de los materiales se denomina permeámetro.

Histéresis magnética.

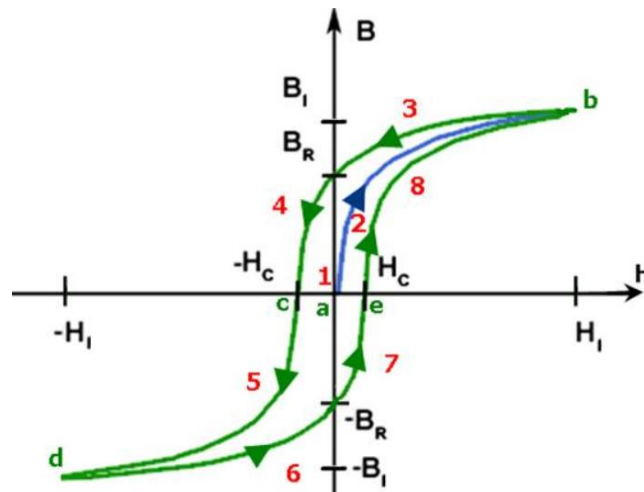
La histéresis magnética es un fenómeno que ocurre al magnetizar un material ferromagnético, donde éste mantiene sus propiedades magnéticas tras cesar el campo magnético que la ha inducido.

La histéresis magnética es de aplicación, por ejemplo, para almacenar la información de los discos duros de los ordenadores, o para arrancar algunas máquinas eléctricas.

Este fenómeno se puede ver gráficamente de una manera muy intuitiva al representar la curva de imantación de un material, siempre que la muestra se encuentre inicialmente desimantada y la excitación aumente de forma continua desde cero:

1. Se parte del material inicialmente desimantado (punto a)
2. Se aumenta progresivamente la excitación hasta un valor H_S , con lo que la densidad de flujo aumentará hasta un valor B_1 , siguiendo una curva determinada (ab). Se corresponde con la curva de imanación del material.
3. Se disminuye H , con lo que B disminuirá también, pero según otra curva (bc), de modo que cuando H se haya anulado, B retiene todavía un valor B_r , denominado inducción remanente, o magnetismo remanente, o remanencia, es decir, la parte de la inducción magnética que queda en el material cuando el campo que realizó dicha inducción es nulo.
4. Para anular B , es necesario llevar la excitación hasta un valor inverso $-H_c$, denominado intensidad coercitiva, coercitividad, fuerza coercitiva o campo coercitivo, es decir, el campo de sentido contrario necesario para anular el magnetismo remanente. Este tramo, en el segundo cuadrante, recibe el nombre de curva de desimanación.
5. En el tercer cuadrante del gráfico, el comportamiento del material es el mismo: si se lleva el valor de H hasta $-H_1$, y el valor de B recorre la curva cd hasta el valor $-B_1$.
6. Al volver, al anularse H , queda un valor remanente, $-B_r$.
7. Al anularse B , queda un valor H_c .
8. Se puede cerrar la curva describiendo el material el camino deb.

Figura 14. Ciclo de histéresis del material ferromagnético

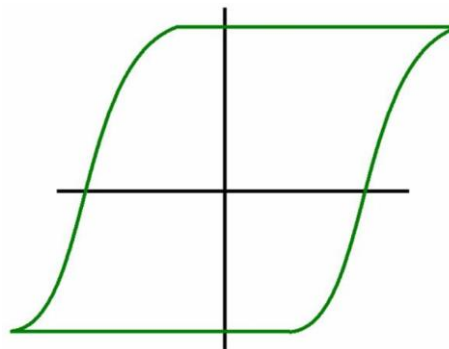


La curva cerrada bcdeb se conoce como ciclo de histéresis o curva de histéresis del material, y depende lógicamente de los valores extremos H_1 y B_1 que alcancen.

En algunos materiales es interesante conseguir que el magnetismo remanente sea lo mayor posible para la construcción de imanes permanentes, que presenten una elevada densidad de flujo B en ausencia total de excitación.

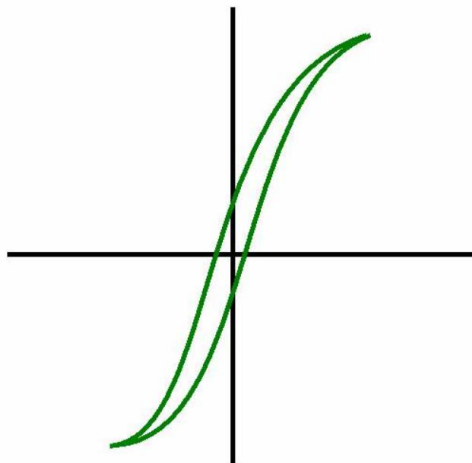
Para ello interesa que presenten un ciclo de histéresis lo más cuadrado posible.

Figura 15. Ciclo de histéresis de un material con un gran valor de magnetismo remanente



Otras veces por el contrario, como ocurre en la mayoría de las máquinas eléctricas (transformadores, motores, generadores), interesa un núcleo cuyo ciclo de histéresis se lo más estrecho posible (el camino "a la ida" coincida con el camino "a la vuelta") y lo más alargado posible (difícilmente saturable).

Figura 16. Ciclo de histéresis de un material con un menor valor de magnetismo remanente



A modo de ejemplo se dan valores de la curva de histéresis para algunos materiales:

Tabla 1 . Valores de la curva de histéresis para algunos materiales

Nombre	Composición (%)	μ_r máxima	H_C (A·v/m)	B_r (T)	Resistividad ($\Omega \cdot m \cdot 10^{-8}$)
Hierro	99,9 Fe	5.000	80	2,15	10
Hierro al Silicio	4 Si-96 Fe	7.000	48	1,97	59
Hierro al Silicio	3,3 Si-96,7 Fe	10.000	16	2,00	50
Permalloy	45 Ni-54 Fe	25.000	24	1,60	50
Mumetal	75 Ni-2 Cr-5 Mn-18 Fe	110.000	2,4	0,72	60

La histéresis magnética da lugar a una serie de pérdidas de energía que se manifiesta en forma de calor en los núcleos magnéticos. Se denominan pérdidas por histéresis, y con el fin de reducir al máximo estas pérdidas, los núcleos se construyen de materiales magnéticos de características especiales.

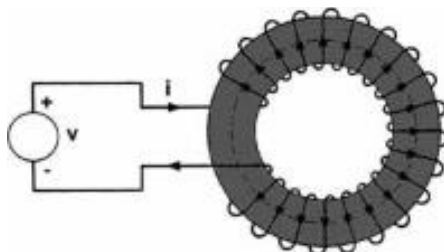
1.3 Circuito Magnético

Circuito magnético.

Se denomina circuito magnético a un volumen del espacio en el que está presente un campo magnético y las líneas de inducción que hay en el citado volumen están cerradas sobre sí mismas.

Un ejemplo es el de un solenoide con núcleo magnético conectado a un circuito exterior, como se ve en la [Figura 17](#), denominado anillo de Rowland, donde las espiras del solenoide están lo suficientemente próximas entre sí que prácticamente todas las líneas de inducción se encuentran confinadas en el interior del mismo:

Figura 17. Solenoide con núcleo magnético



Fuerza magnetomotriz.

La fuerza magnetomotriz (fmm) representa en el circuito magnético la misma función que la fem en el circuito eléctrico.

La fmm es la causa capaz de establecer el flujo en un circuito magnético, formado, normalmente, por sustancias ferromagnéticas. Su expresión es:

$$F = N \cdot I \text{ [A} \cdot \text{v]}$$

Siendo:

F, la fuerza magnetomotriz, en A·v (o en Gilbert, Gb, en el S.C.G).

N, el número de vueltas del conductor en el núcleo magnético, en vueltas, v.

I, la corriente que circula por dicho conductor, en A.

También se puede deducir a partir de la expresión:

$$F = H \cdot L$$

Siendo:

H, la excitación magnética, en A·v/m

L, la longitud del conductor, en m

N, el número de vueltas del conductor en el núcleo magnético, en vueltas, v.

I, la corriente que circula por dicho conductor, en A.

Reluctancia.

La reluctancia magnética de un material es la resistencia que éste posee a verse influenciado por un campo magnético.

Figura 18. Representación analógica de la reluctancia



Dicho de otra forma, la reluctancia nos indica si el material deja establecer líneas de fuerza en mayor o menor grado.

Los materiales no ferromagnéticos, como el aire, poseen una reluctancia muy elevada, mientras que los ferromagnéticos, como el hierro, muy baja

La reluctancia es un concepto similar al de resistencia en un circuito eléctrico y nos representa la oposición del circuito magnético a que en él se establezca un flujo magnético, (al igual que la resistencia representa la oposición del circuito eléctrico a que en él se establezca una corriente eléctrica)

La reluctancia **R** de un **circuito magnético** uniforme se puede calcular como:

$$R = \frac{l}{\mu \cdot S} \left[\frac{Av}{Wb} \right]$$

Siendo:

R, la reluctancia, medida en $A \cdot v / Wb$. Esta unidad es equivalente al inverso del Henrio (H^{-1}) multiplicado por el número de espiras.

l, la longitud del circuito, en m.

μ , la permeabilidad magnética del material, en H/m.

S, el Área de la sección del circuito (sección del núcleo magnético), en m^2 .

De donde se deduce que cuanto más corto sea el circuito, más sección tenga y cuanto mayor sea la permeabilidad del material que se utilice, más fácil será establecer un valor de flujo determinado.

En la expresión anterior se vuelve a ver la analogía con la fórmula de la resistencia eléctrica, ya que comparando las expresiones $R = \frac{1}{\rho \cdot S}$ y $R = \frac{1}{\mu \cdot S}$, se ve fácilmente que resistencia y reluctancia depende, entre otros factores, de la sustancia de la que estén fabricados los conductores eléctricos o los núcleos magnéticos, es decir, de sus respectivas resistividades y permeabilidades.

Ley de Hopkinson.

Esta ley dice que la fuerza magnetomotriz en un circuito magnético es igual al producto entre el flujo magnético y la reluctancia de dicho circuito.

Matemáticamente tiene por expresión:

$$F = \Phi \cdot R \quad [A \cdot v]$$

Siendo:

F, la fuerza magnetomotriz, en $A \cdot v$

Φ , el flujo magnético, en Wb

R, la reluctancia magnética, en $A \cdot v/Wb$

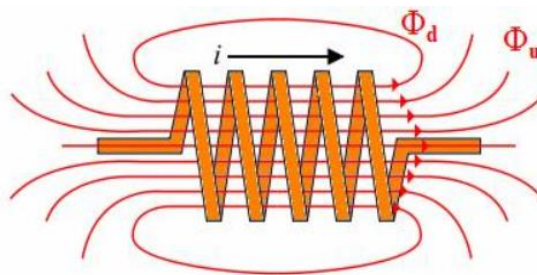
También se le conoce como ley de Ohm de los circuitos magnéticos, por su parecido con la correspondiente a los circuitos eléctricos (Comparar $F = \Phi \cdot R$ con $V = I \cdot R$): "si en un circuito eléctrico aplicamos una f.e.m. circulará una intensidad proporcional a esta f.e.m. e inversamente proporcional a la resistencia del circuito, en un circuito magnético, si aplicamos una fuerza magnetomotriz, ocasionará un flujo magnético proporcional a dicha f.m.m. e inversamente proporcional a la Reluctancia ("resistencia magnética").

Dispersión magnética.

No siempre todo el flujo producido en el circuito magnético puede ser aprovechado y se cuantifica como dispersión magnética.

Mientras que la corriente eléctrica circula en su totalidad por el conductor, ya que éste está rodeado por un aislante, el flujo de un circuito magnético se establece no sólo en el núcleo, sino también en el espacio que rodea al circuito.

Figura 19. Representación de la dispersión magnética



No existen materiales que puedan considerarse «aislantes» respecto a los campos magnéticos, por lo que una parte del flujo total producido en el circuito magnético Φ_t se pierde, al no poder disponer de un aislante para él. Este flujo se pierde por el aire, y se denomina Φ_d , flujo de dispersión, ya la diferencia entre ambos, que es lo que realmente queda en el núcleo magnético se denomina flujo útil ($\Phi_u = \Phi_t - \Phi_d$).

No obstante, como la permeabilidad del núcleo es muy superior a la de los materiales no ferromagnéticos que lo rodean, la mayor parte del flujo generado por la bobina pasa por el núcleo. Así aparece un nuevo concepto, que mide dicha relación. Se denomina coeficiente de dispersión o de Hopkinson o simplemente dispersión magnética y responde a la siguiente ecuación:

$$v = \Phi_t / \Phi_d$$

Siendo

v , la dispersión magnética, adimensional

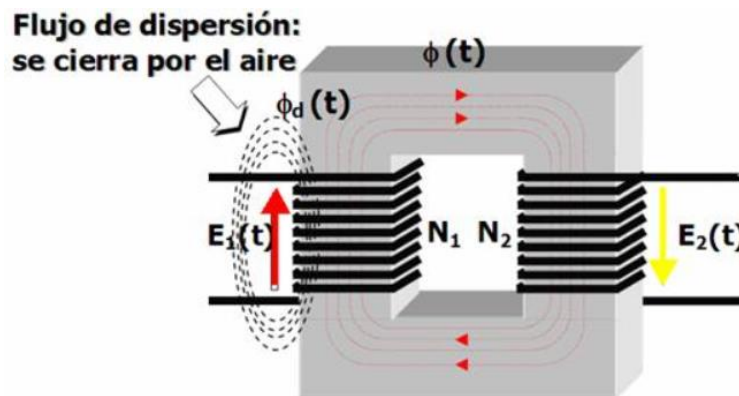
Φ_t , el flujo total, en Wb

Φ_d , el flujo de dispersión, en Wb

La proporción de flujo disperso depende de las dimensiones y forma de los elementos que componen el circuito magnético (El flujo de dispersión varía entre un 10 y un 30 % del flujo realmente utilizado, es por eso que la dispersión magnética varía entre 1,1 y 1,3). Por esta razón, para calcular correctamente un circuito magnético, debe tenerse en cuenta este coeficiente, que, como veremos, tiene gran importancia en el análisis de máquinas eléctricas.

En la siguiente figura se muestra el flujo de dispersión en el circuito magnético de un transformador eléctrico

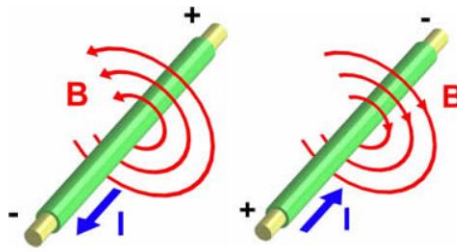
Figura 20. Representación de la dispersión magnética de un transformador



Campo magnético debido a una corriente rectilínea.

Las líneas de fuerza magnéticas son circunferencias concéntricas perpendiculares al conductor. Para un punto P situado a una distancia r de un conductor rectilíneo por el que circula una corriente I , la inducción magnética es:

Figura 21. Inducción magnética en un conductor rectilíneo



$$B = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \frac{l}{r}$$

Siendo:

B, la inducción magnética, en Tesla

μ_0 , la permeabilidad magnética del vacío

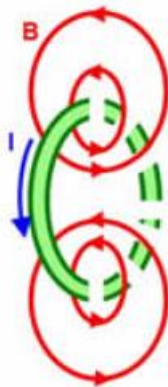
l, la longitud del conductor, en m

r, radio de la espira, en m

Campo magnético en el centro de una espira (conductor circular).

En este caso el campo aumenta, ya que se concentran las líneas de fuerza en el centro de la espira, y siguen siendo concéntricas y perpendiculares a la corriente.

Figura 22. Inducción magnética en una espira



La inducción magnética en el centro de una espira de radio r será:

$$B = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \frac{l}{r}$$

Siendo:

- B, la inducción magnética, en Tesla
- μ_0 , la permeabilidad magnética del vacío
- l, la longitud del conductor, en m
- r, radio de la espira, en m

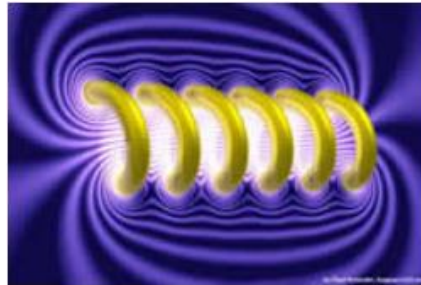
Campo magnético debido a un conductor en espiral (varias espiras).

En este caso el campo aumenta todavía más.

A un conductor doblado formando varias espiras se le denomina bobina.

Al caso particular de una bobina donde su longitud es mayor que su radio se le denomina solenoide.

Figura 23. Campo magnético de un solenoide



La inducción magnética en el interior de un solenoide se calcula por la expresión:

$$B = \mu_0 \cdot \frac{N \cdot l}{l}$$

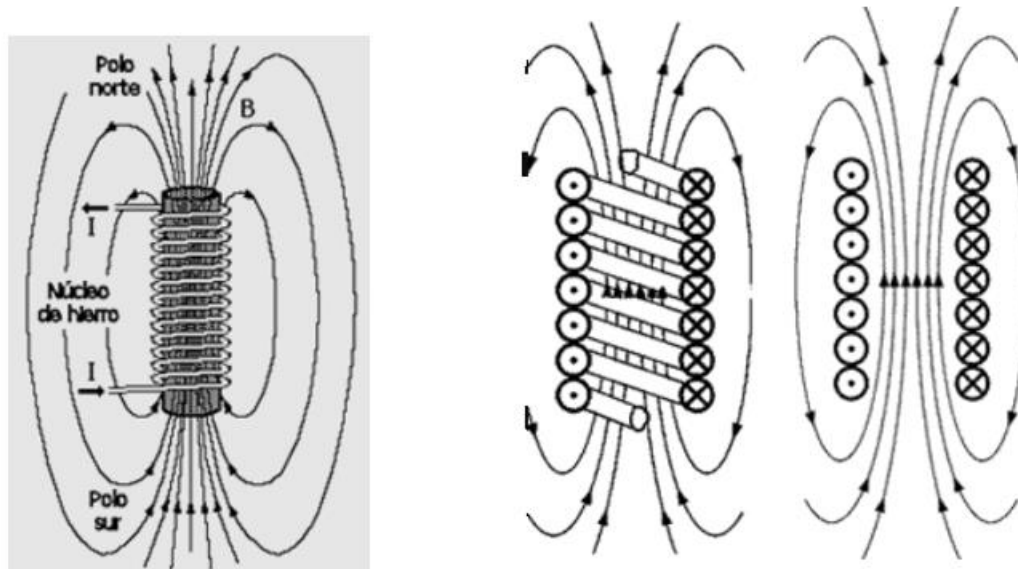
Siendo:

- B, la inducción magnética, en Tesla
- μ_0 , la permeabilidad magnética del vacío
- N, número de vueltas
- l, la longitud del conductor, en m

Es frecuente en magnetismo, y al representar bobinas, hacerlo como se ve en la figura, es decir, las espiras van perpendiculares al papel, y para representarlo en 2D, se pinta un aspa para indicar una flecha entrante, y un

punto para significar una flecha saliente (como se vería de frente una flecha, por detrás y por delante respectivamente).

Figura 24. Campo magnético en una espira representando las líneas de flujo que se producen



Si, al igual que cerrábamos un conductor rectilíneo sobre sí mismo formando una espira, cerrando un solenoide sobre sí mismo se obtiene un **toro**, siendo evidente que las líneas de fuerza concentradas en su interior, por lo que el campo magnético queda completamente confinado en el interior del toro.

Figura 25. Campo magnético sobre un solenoide cerrado



Inducción electromagnética. Ley de Faraday.

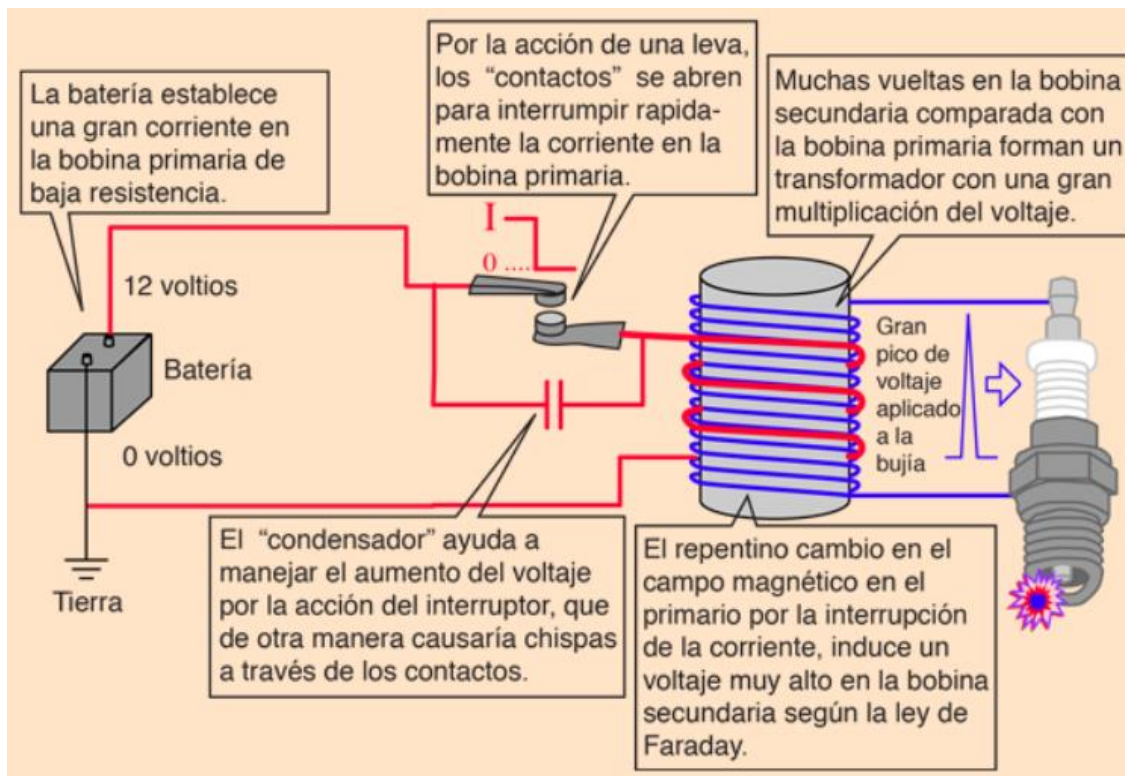
La inducción electromagnética es el fenómeno que origina la producción de una fuerza electromotriz (f.e.m.) en un cuerpo estático expuesto a un campo magnético variable, o bien en un medio móvil respecto a un campo magnético estático.

Si ese cuerpo es un conductor eléctrico, conectado en un circuito cerrado, se produce una corriente inducida.

Es decir, la corriente inducida puede ser debida:

- por el movimiento de un conductor en un campo magnético fijo (no por el conductor en sí)
- por la variación de flujo magnético que atraviesa un circuito eléctrico fijo, por ejemplo, moviendo un imán, (no por el flujo en sí).

Figura 26. Ejemplo como se aplica la Ley de Faraday



<https://concepto.de/ley-de-faraday/#ixzz8BJsEwyxf>

Ley de Lenz.

La Ley de Faraday permite el cálculo del valor numérico de la f.e.m. inducida, pero no indica el sentido de las intensidades que produce. Fue Heinrich Lenz quien comprobó que la corriente debida a la f.e.m. inducida se opone al cambio de flujo magnético, de forma tal que la corriente tiende a mantener el flujo.

Así, la Ley de Lenz dice que "las fuerzas electromotrices o las corrientes inducidas serán de un sentido tal que se opongan a la variación del flujo magnético que las produjeron".

Por tanto, la ley de Faraday, con la apreciación de Lenz, se puede expresar matemáticamente como:

$$E = \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} [V]$$

Siendo:

E, la fuerza electromotriz inducida, en V.

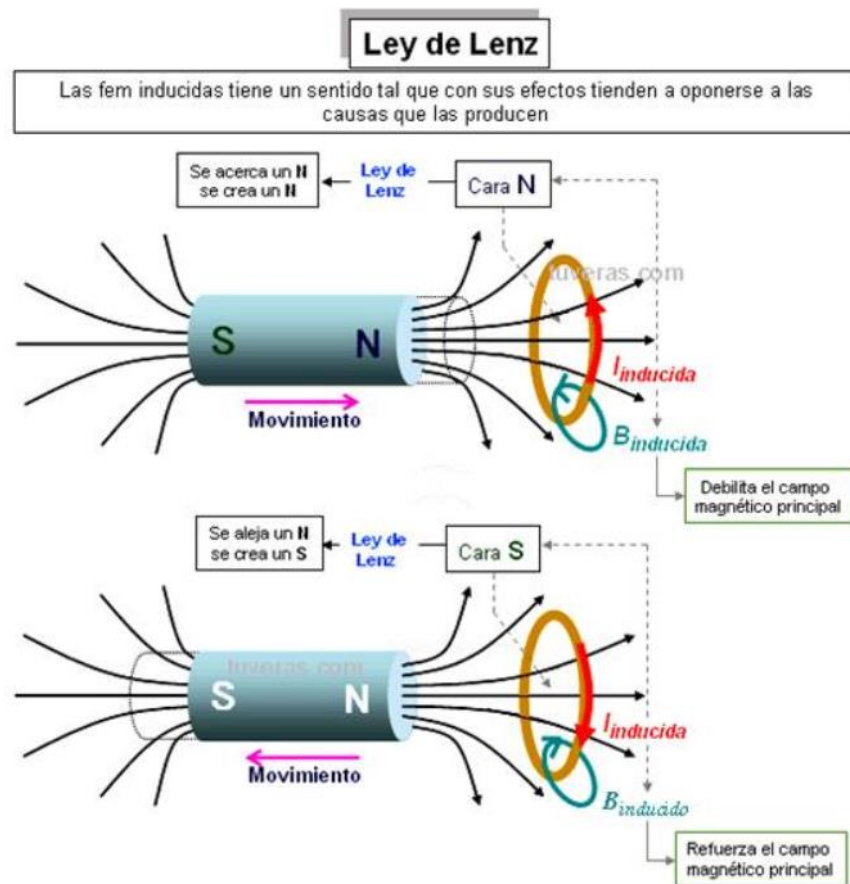
$\Delta\Phi$, la variación del flujo magnético, en Wb.

Δt , el tiempo transcurrido, en s.

y el signo – es debido a la Ley de Lenz, y representa la dirección de la fuerza electromotriz.

Todo ello se explica con la siguiente figura:

Figura 27. Ley de Lenz



VIDEO

https://ikastaroak.ulhi.net/edu/es/IEA/E/E04/es IEA E04 Contenidos/E04_C ONT_R97_recurso67_animacion.gif

Cuando vimos el flujo de un campo magnético uniforme a través de un circuito plano establecimos que venía dado por:

$$\Phi = B \cdot S \cdot \cos \alpha$$

Siendo:

B, la intensidad de campo magnético, en T

S, la superficie abarcada por el conductor, en m²

α , el ángulo que forman el conductor y la dirección del campo, en grados o radianes.

Si el conductor está en movimiento giratorio, el valor del flujo variará según varíe el ángulo

$$\omega = \frac{\alpha}{t(\alpha = \omega \cdot t)}$$

(velocidad angular = espacio angular / tiempo (espacio angular = velocidad angular · tiempo):

$$\Phi = B \cdot S \cdot \cos(\omega \cdot t)$$

En este caso la Ley de Faraday afirma que la FEM inducida en cada instante tiene por valor:

$$E = - \frac{\Delta(B \cdot S \cdot \cos(\omega \cdot t))}{\Delta t}$$

Nuevamente el signo (-) indica que la f.e.m. inducida se opone a la variación del flujo que la produce.

De esa expresión general de la inducción electromagnética se saca una conclusión fundamental, que será el principio básico de funcionamiento de transformadores, generadores, motores eléctricos:

Se puede inducir una fem en un circuito si:

- La magnitud de B varía en el tiempo
- El área S del circuito varía en el tiempo
- El ángulo entre B y S varía en el tiempo
- Ocurre cualquier combinación de las anteriores

F.e.m. inducida sobre conductores.

La ley de Faraday permite deducir la fuerza electromotriz (tensión eléctrica) que un campo magnético puede inducir sobre un conductor en movimiento.

La fem inducida en un conductor rectilíneo de longitud L que se mueve a una velocidad V , cuya dirección forma un ángulo α con la dirección del campo magnético de inducción uniforme B , en cuyo interior se mueve cortando sus líneas de fuerza, también se puede expresar de esta otra forma:

$$E = - B \cdot L \cdot v \cdot \sin \alpha$$

Si las tres magnitudes son perpendiculares, ($\alpha = 90$ ($\sin \alpha = 1$)) entonces el valor de la fem es:

$$E = - B \cdot L \cdot v$$

Siendo:

E , la f.e.m. inducida, en V.

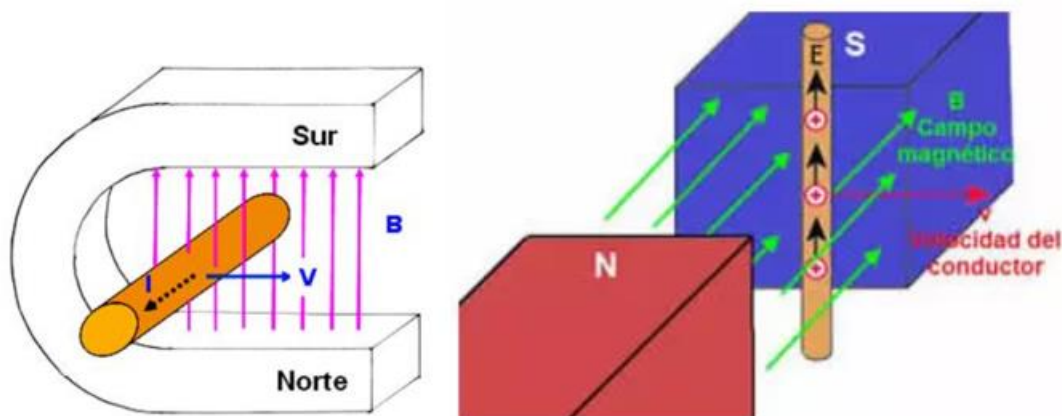
B , el campo magnético, en T

L , la longitud del conductor, en m

v , la velocidad del conductor, en m/s.

Es decir, se genera una fem E mientras un conductor se mueva, cortando las líneas de fuerza del campo magnético.

Figura 28. Fem inducida en un conductor rectilíneo



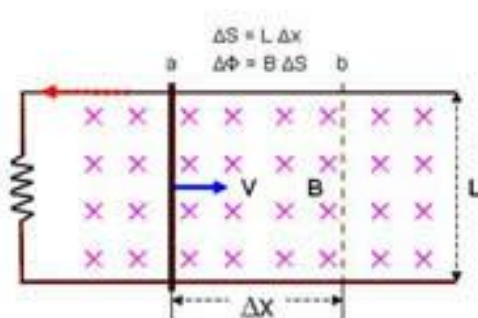
Visto el montaje anterior desde arriba queda:

Figura 29. Vista superior de la fem inducida en un conductor



La fem inducida también se puede poner en la forma mostrada en la siguiente figura:

Figura 30. Vista superior de la fem inducida con las variables involucradas



Fem producida por el conductor:

$$E = -B \cdot L \cdot v ; \text{ como } V = \frac{\Delta x}{\Delta t}, \text{ podemos decir que } E = -B \cdot L \cdot \frac{\Delta x}{\Delta t} = -\frac{\Delta \Phi}{\Delta t}.$$

Por tanto, $E = -\frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$

VIDEO

<https://youtu.be/ESw3JZ7pZHo>

Regla de la mano derecha.

Se puede utilizar una regla sencilla para determinar el sentido de la corriente inducida en un conductor que se desplaza perpendicularmente a la dirección de un campo magnético.

Se denomina regla de la mano derecha o regla de Fleming. Para ello se utilizan los dedos pulgar, índice y corazón de la mano derecha como se ve en la figura:

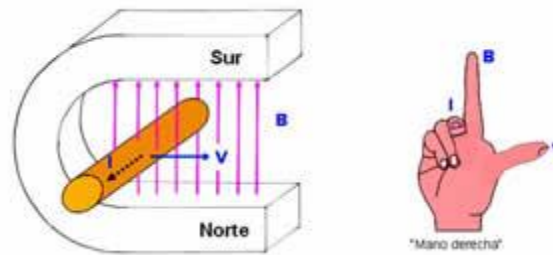
El pulgar se coloca en el sentido de desplazamiento del conductor (MOvimiento), el índice relocala perpendicular al pulgar indicando el sentido del flujo magnético (CAmpo) y el corazón se coloca perpendicular a ambos, e indicará el sentido de la corriente inducida (COrriente)

Figura 31. Regla de la mano derecha



Es frecuente utilizar la regla nemotécnica "MO-CA-CO" (movimiento-campo-corriente) como se ve en la figura anterior

Figura 32. Comportamiento del conductor con la regla de la mano derecha

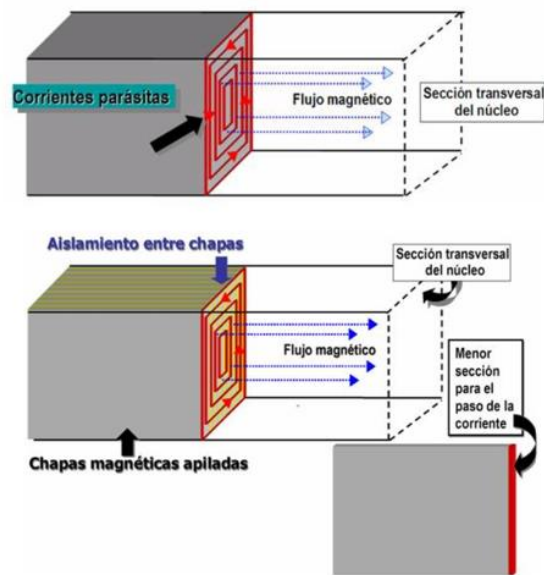


Corrientes parásitas o de Foucault.

Los campos magnéticos producen corrientes inducidas que producen calentamientos en los materiales magnéticos. En la mayoría de los casos es un efecto indeseable, pero bien utilizado, puede ser de gran provecho.

Como ya sabemos por la ley de Lenz, las corrientes inducidas tienden a oponerse a la causa que las creó. Si se coloca en el interior de un campo magnético variable un conductor macizo, se generan en él unas corrientes en forma de torbellino que tienden a oponerse a la variación del flujo en el interior de dicho conductor.

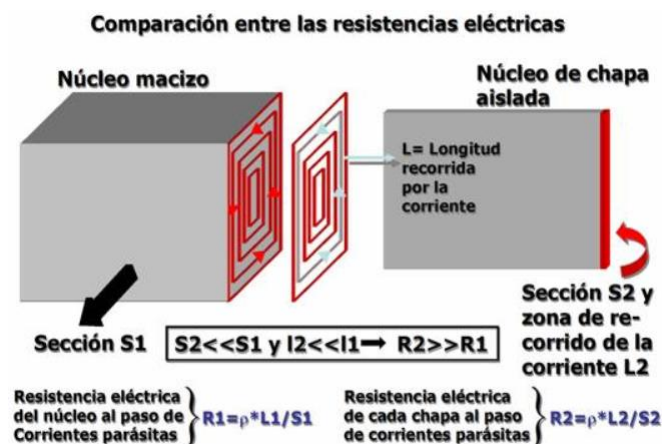
Figura 33. Comportamiento de las corrientes parásitas en un material magnético



Estas corrientes en torbellino, cerradas sobre sí mismas se denominan corrientes parásitas o corrientes de Foucault y provocan calentamientos indeseados en el material por efecto Joule y por tanto pérdidas, denominadas pérdidas de Foucault

Así, como se verá en las unidades dedicadas a las máquinas eléctricas los núcleos magnéticos que estén sometidos a flujos variables se construirán con chapas delgadas aisladas y apiladas entre sí, en lugar de núcleos macizos. De esta forma las corrientes parásitas ven su camino interrumpido entre chapa y chapa, por lo que se cierran por espacios muy reducidos, donde la fem inducida también es reducida y por lo tanto también lo serán los valores de dichas corrientes y sus pérdidas.

Figura 34. Comparación entre las resistencias eléctricas en un núcleo macizo y un núcleo de chapas aisladas



Fuerza electromagnética sobre corrientes: Fuerzas de Lorentz y de Laplace.

Un conductor por el que circula una corriente eléctrica, situado dentro de un campo magnético, queda sometido a la acción de una fuerza electromagnética, que tiende a desplazarlo en una determinada dirección.

Si por un conductor situado dentro de un campo magnético circula una corriente eléctrica, aquél quedará sometido a la acción de una fuerza electromagnética, denominada Fuerza de Lorentz que tiende a desplazarlo en una determinada dirección.

El valor de esa fuerza aumenta con la intensidad de la corriente, con el valor de la inducción del campo magnético y con la longitud del conductor.

Estrictamente la ley de Lorentz dice que "cuando una carga se desplaza dentro de un campo magnético, recibe una fuerza (F) que es directamente proporcional al valor de la carga (q), a su velocidad (v), al campo magnético (B) y al seno del ángulo formado por el vector velocidad y el vector campo magnético (α)".

Generalizando la fuerza de Lorentz (para cargas) para el caso de una corriente eléctrica se obtiene la denominada ley de Laplace: (aunque a veces no se distingue entre ambas):

"La fuerza que actúa sobre un conductor rectilíneo es directamente proporcional a la intensidad de la corriente que circula por el mismo (I), al vector longitud (apuntando en el sentido de la I) (L) y a la inducción electromagnética (B)."

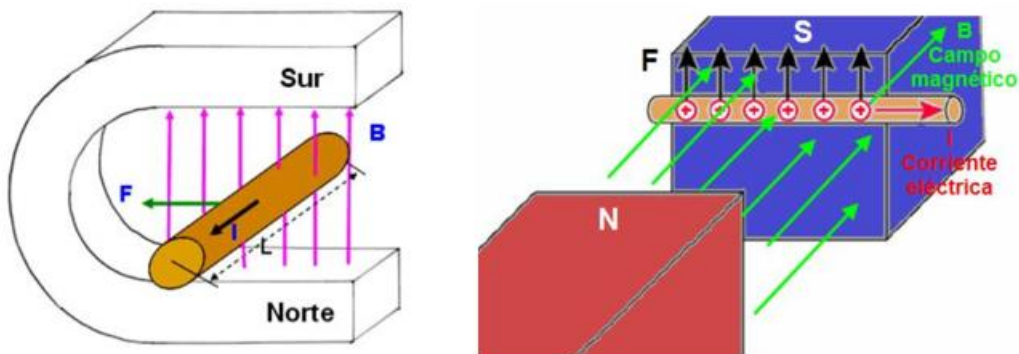
Así, la fuerza sobre un conductor rectilíneo de longitud L por el que circula una corriente I , cuya dirección forma un ángulo α con la dirección del campo magnético de inducción uniforme B , en cuyo interior se encuentra, tiene por valor:

$$F = I \cdot L \cdot B \sin \alpha$$

Si las tres magnitudes son perpendiculares ($\alpha = 90^\circ$ ---- $\sin 90^\circ = 1$), entonces el valor de la fuerza electromagnética es:

$$F = I \cdot L \cdot B$$

Figura 35. Representación de la fuerza de Lorentz

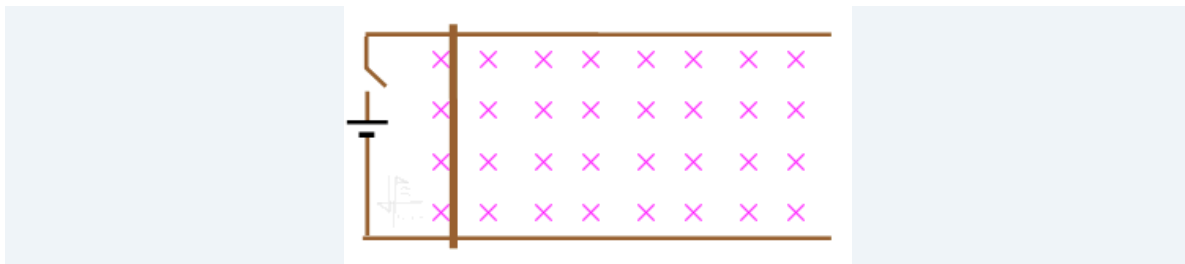


Es decir, el conductor se mueve a causa de una fuerza F cuando por él circula una intensidad de valor I :

$$F = B \cdot I \cdot L$$

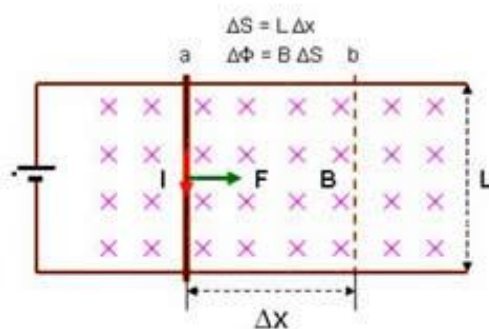
Visto el montaje anterior desde arriba queda:

Figura 36. Vista superior de fuerza de Lorentz



Se puede calcular el trabajo que desarrolla esta fuerza, como se ve en la siguiente figura.

Figura 37. Vista superior de la fuerza de Lorentz con las variables involucradas



Fuerza sobre el conductor:

$$F = B \cdot I \cdot L$$

Trabajo al desplazarse de **a** a **b**:

$$W = F \cdot \Delta x = I \cdot L \cdot B \cdot \Delta x = I \cdot B \cdot \Delta S = I \cdot \Delta \Phi$$

Por tanto,

$$W = I \cdot \Delta \Phi$$

Regla de la mano izquierda.

Regla para obtener la dirección de desplazamiento del conductor, de manera semejante a la regla que permitía conocer la dirección de la corriente para el caso de la fuerza electromotriz inducida (regla de la mano derecha).

Se conoce con el nombre de la "Regla de la mano izquierda".

Para ello se utilizan los dedos pulgar, índice y corazón de la mano izquierda como se ve en la figura:

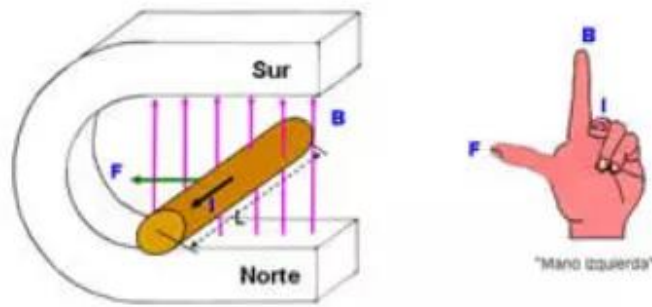
El índice se coloca en el sentido del flujo magnético (**C**ampo), el corazón se coloca perpendicular al índice indicando sentido de la corriente (**C**orriente) y el pulgar se coloca perpendicular a ambos, e indicará la dirección del desplazamiento del conductor (**F**uerza)

Figura 38. Regla de la mano izquierda



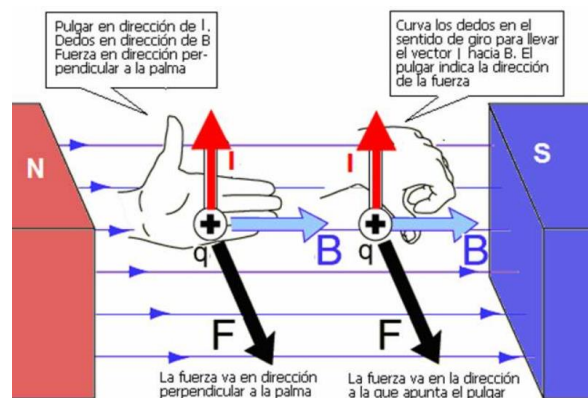
Es frecuente utilizar la regla nemotécnica "FU-CA-CO" (fuerza-campo-corriente) como se ve en la figura anterior.

Figura 39. Interpretación de la Regla de la mano izquierda



También se puede averiguar con métodos muy similares, como se muestra en la figura:

Figura 40. Interpretación de la regla de la mano izquierda en un campo magnético



Es importante comparar las dos reglas de las manos (derecha e izquierda), y observar que en un caso la incógnita es el dedo corazón y en otra es el dedo pulgar.

En la siguiente tabla se establece una comparación entre ambas reglas:

Tabla 2. Comparación de las reglas de la mano derecha e izquierda

Regla	Datos				Incógnita	
	Dedo	Magnitud	Dedo	Magnitud	Dedo	Magnitud
Mano derecha	Pulgar	v Movimiento (MO)	Índice	B Campo (CA)	Corazón	I Corriente (CO)
Mano izquierda	Corazón	I Corriente (CO)	Índice	B Campo (CA)	Pulgar	F Fuerza (FU)

Fuerza magnética entre dos corrientes paralelas.

Una corriente en un conductor crea su propio campo magnético, y un conductor que lleva corriente dentro de un campo magnético siente una fuerza, es fácil entender que dos conductores próximos entre sí, que lleven corriente, ejercerán fuerzas magnéticas uno sobre el otro.

En los puntos que rodean un conductor que transporta una corriente existe un campo magnético de valor:

$$B = \frac{\mu_0}{2\pi} * \frac{I}{d}$$

También hemos visto que sobre un conductor que transporta una corriente en el interior de un campo magnético actúa una fuerza cuya magnitud es:

$$F = I \cdot L \cdot B \operatorname{sen} \alpha$$

Por tanto, si tenemos dos conductores rectilíneos paralelos de gran longitud, a una distancia **d** uno del otro, que transportan unas corrientes **I1** e **I2** (caso de la mayoría de los tendidos eléctricos en BT y en MT), el primer conductor crea un campo magnético sobre el segundo

$$B = \frac{\mu_0}{2\pi} * \frac{I_1}{d}$$

(el sentido se saca por la regla del sacacorchos)

y la fuerza magnética debida a este campo en una longitud **l** del segundo conductor será:

$$F_2 = l * I_2 * B_1 = l * I_2 * \frac{\mu_0 * I_1}{2d\pi}$$

(el sentido se saca por la regla de la mano izquierda)

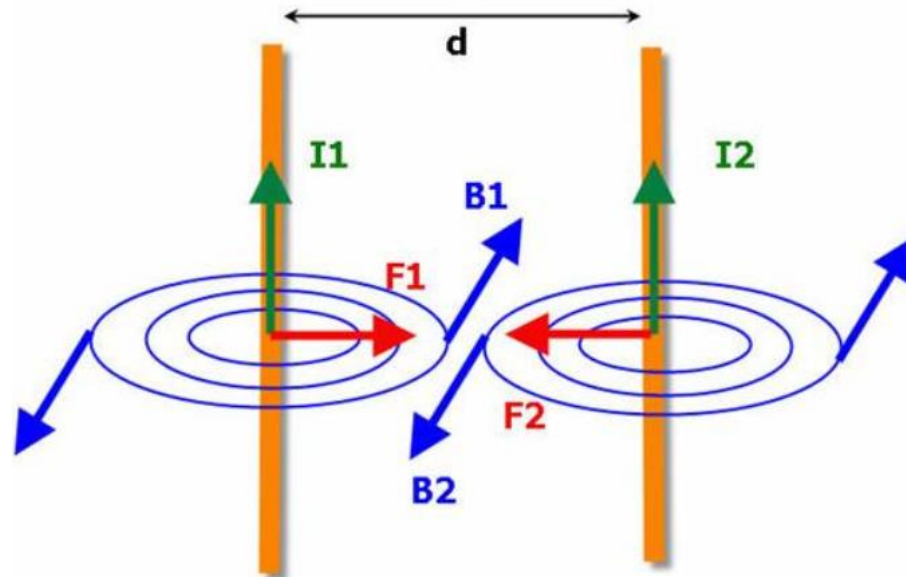
Análogamente:

$$B_2 = \frac{\mu_0}{2\pi} * \frac{I_2}{d} \quad \text{y} \quad F_1 = l * I_1 * B_2 = l * I_1 * \frac{\mu_0 * I_2}{2d\pi}$$

Este hecho da lugar a grandes inconvenientes en las líneas de transporte de la

energía, ya que provoca grandes sacudidas en los cables o barras. En los cables, en muchos casos se puede amortiguar por la elasticidad de los mismos, pero en el caso de las barras, o incluso cables, si además están unidos mediante aisladores rígidos puede provocar la rotura de los mismos.

Figura 41. Representación del comportamiento del campo magnético en dos conductores



Autoinducción. Inductancia.

Se denomina autoinductancia a la inducción magnética producida por una corriente de intensidad variable en su propio circuito y autoinductancia es la magnitud que la mide.

Por la ley de Faraday, según varíe la intensidad, variará el flujo magnético propio del circuito, generado por esa misma intensidad. A su vez, esa variación del flujo dará lugar a una fuerza electromotriz inducida en el circuito, denominada fuerza electromotriz de inducción.

Para medir este nuevo fenómeno aparece una nueva magnitud:

Se denomina inductancia, o coeficiente de autoinducción L , a la relación entre la cantidad de flujo magnético, Φ , generado por una corriente y el valor de dicha corriente, I , que circula por ella.

Matemáticamente se expresa como:

$$L = \frac{\Phi}{I} \quad [H]$$

Siendo:

L, la inductancia, en H (Henrios) (1 H = 1 Wb/A)

Φ , el flujo magnético generado por la intensidad, en Wb

I la intensidad de corriente, en A

Es importante reseñar que el flujo que aparece en la definición es el flujo producido por la corriente I exclusivamente. No deben incluirse flujos producidos por otras corrientes ni por imanes situados cerca ni por ondas electromagnéticas. (De ahí el nombre de Autoinducción o inducción propia)

Los valores de inductancia prácticos van de unos décimos de nH para un conductor de 1 milímetro de largo hasta varios kH para bobinas hechas de miles de vueltas alrededor de núcleos ferromagnéticos.

El valor de la inductancia viene determinado exclusivamente por las características geométricas de la bobina y por la permeabilidad magnética del espacio donde se encuentra. Para un solenoide, el caso más típico de bobina, la inductancia, viene determinada por:

$$L = \frac{(\mu \cdot N^2 \cdot A)}{l} \quad [H]$$

donde:

L la inductancia, en H

μ , es la permeabilidad absoluta del núcleo, en $N \cdot A^2$

N es el número de espiras, en vueltas

A es el área de la sección transversal del bobinado, en m^2

l, la longitud de las líneas de flujo, en m.

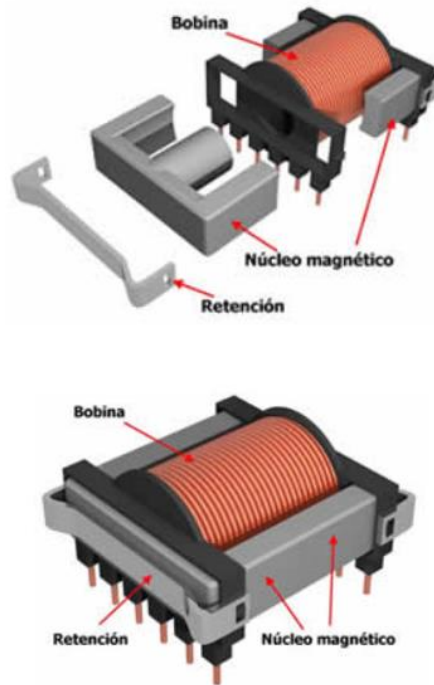
Bobinas o inductores.

Un inductor o bobina es un componente pasivo de un circuito eléctrico que, debido al fenómeno de la autoinducción, almacena energía en forma de campo magnético cuando aumenta la intensidad de corriente, devolviéndola cuando ésta disminuye.

Está constituido usualmente por un bobinado de material conductor,

típicamente alambre o hilo de cobre esmaltado. Existen bobinas con núcleo de aire o con núcleo de un material ferromagnético, para incrementar su inductancia, como la que se ve en la figura.

Figura 42. Partes de una bobina



Matemáticamente se puede demostrar que la energía, ε , almacenada por una bobina con inductancia L , que es recorrida por una corriente de intensidad I , viene dada por:

$$\varepsilon = \frac{L \cdot I^2}{2} \quad [J]$$

Siendo :

- ε , la energía almacenada por la bobina, en J
- L , la inductancia de la bobina, en Henrios (H)
- I , la corriente que circula por la bobina, en A

Fuerza contraelectromotriz autoinducida (f.c.e.m.).

Una variación de la intensidad de corriente en una bobina dará como resultado una variación del campo magnético y, por lo mismo, un cambio en el flujo que está atravesando el circuito.

De acuerdo con la Ley de Faraday, un cambio del flujo origina una fuerza electromotriz autoinducida y de acuerdo con la Ley de Lenz, esta fuerza electromotriz, se opondrá a la causa que lo origina, esto es, la variación de la corriente eléctrica.

Ese es el motivo por el que recibe el nombre de fuerza contraelectromotriz (f.c.e.m.).

Su valor viene dado por la siguiente expresión:

$$E = - \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} = - L \frac{\Delta I}{\Delta t}$$

Siendo:

E, la f.c.e.m., en V

L, la inductancia, en H

ΔI , la variación de la corriente, en A

Δt , el intervalo de tiempo, en s

el signo menos indica que se opone a la causa que lo origina.

En un circuito eléctrico, una bobina se puede considerar de dos maneras:

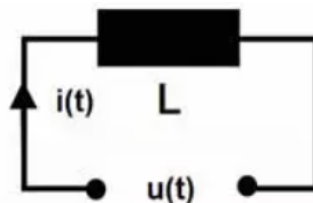
Ideal, es decir, sin considerar su efecto resistivo

Real, teniendo en cuenta ese efecto

Un Circuito con inductancia (ideal) se representa como se ve en la figura, donde la bobina (ideal) puede definirse a partir de la siguiente ecuación:

$$u(t) = L \cdot \frac{di}{dt}$$

Figura 43. Inductancia



Siendo

L , la inductancia
 $u(t)$, la función diferencia de potencial aplicada a sus bornes
 $i(t)$, la función intensidad resultante que circula.

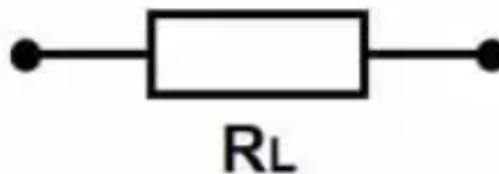
Una bobina ideal en CC se comporta como un cortocircuito (conductor ideal)

Figura 44. Conductor ideal



Una bobina real se comporta como una resistencia cuyo valor R_L será el de su devanado.

Figura 45. Resistencia



1.4 Principio operacional del transformador

Los transformadores son dispositivos basados en el fenómeno de la inducción electromagnética.

Recordando que la inducción electromagnética es generar corriente eléctrica (inducida) por medio de un campo magnético y/o viceversa.

Con los siguientes descubrimientos podemos resumir la inducción electromagnética para más adelante entender perfectamente todo el funcionamiento del transformador:

- **Oersted** descubrió que por un cable (o bobina de espiras) por el que circula una corriente eléctrica se crea a su alrededor un campo magnético.
 Si la corriente por el cable es alterna (variable), el campo magnético será variable igual que la corriente por el conductor que lo crea.
 Este campo magnético se expresa mediante **el llamado flujo magnético**, que nos da una idea de la cantidad o **cómo es** de grande y fuerte **el campo magnético**.

Algo similar al agua y el caudal de agua (litros de agua que atraviesa una superficie por cada segundo).

Φ = símbolo del flujo magnético. Unidad el Weber.

- **Faraday** descubrió lo contrario, que un campo magnético variable y que varíe cortando a un conductor, hace que se genere una diferencia de potencial (tensión) en los extremos del conductor.

A esta tensión generada de esta forma se le llama **fuerza electromotriz (fem) inducida**.

Normalmente en lugar de un conductor se utiliza una bobina con espiras (N) para crear una mayor fem inducida, como es el caso en los transformadores.

Si conectamos una carga en los extremos del conductor donde tenemos la fem de esta forma, aparecerá una corriente eléctrica que circulará por la carga debido a la tensión que se produjo en los extremos del conductor. Esta corriente es una **corriente inducida**.

- **Ley de Lenz** que dice que **siempre que se induce una corriente o una fem, su dirección será contraria a la causa que las produce**.

Mientras que la ley de Faraday nos dice la magnitud de la fem inducida (luego veremos la fórmula), la ley de Lenz nos dice en qué dirección fluye la corriente inducida y el sentido de la fem inducida, y establece que la dirección siempre es tal que se opone al cambio de flujo (flujo variable) que la produce.

Es decir **la corriente inducida creará un flujo contrario al que la produce**.

Ahora viendo de forma resumida, podemos explicar el funcionamiento del transformador de la siguiente forma:

Al conectar el primario a una tensión V_1 , se produce una corriente por la bobina del primario que **genera un flujo magnético variable** alrededor de las espiras (Oersted).

El flujo es variable (alterno y senoidal) porque la corriente que lo genera es corriente alterna, es decir alterna y senoidal también (variable).

Este flujo magnético viaja por las chapas del núcleo hasta las bobinas del secundario, que al cortarlas y ser variable produce en sus extremos una fuerza electromotriz E_2 (Faraday).

El flujo que se produce en el primario por es proporcional a la tensión aplicada a la bobina y a su número de espiras.

La tensión que se induce en el secundario ($E_2 = V_2$) es proporcional al flujo común y al número de espiras del secundario.

Para una V_1 constante el flujo será siempre el mismo, por lo que a mayor espiras en el secundario, mayor tensión tendremos de salida, y a menor espiras menor tensión de salida V_2 .

El transformador no puede utilizarse con corriente continua.

Figura 46. Representación de un transformador

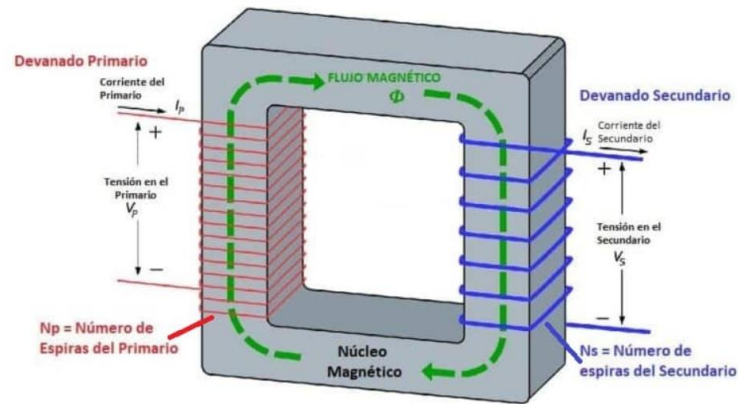
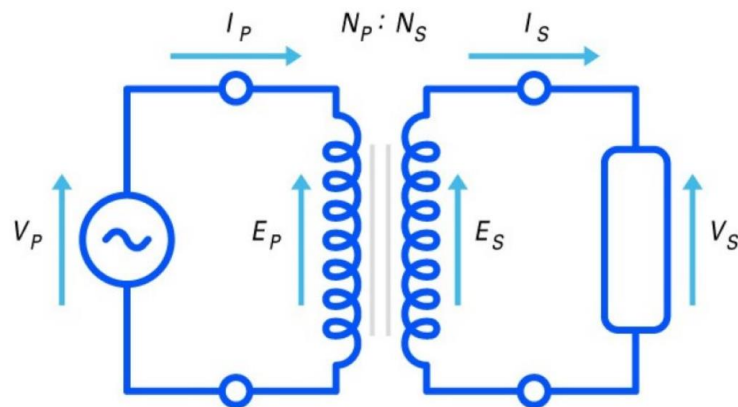


Figura 47. Diagrama básico del transformador ideal



La **relación de transformación** del transformador la definimos con la siguiente ecuación :

$$\frac{N_P}{N_S} = \frac{V_P}{V_S} = \frac{I_S}{I_P} = r_t$$

Donde (N_P) es el número de vueltas del devanado del primario, (N_S) el número de vueltas del secundario, (V_P) la tensión aplicada en el primario, (V_S) la obtenida en el secundario, (I_S) la intensidad que llega al primario, (I_P) la generada por el secundario y (r_t) la relación de transformación.

Si queremos ampliar la tensión en el secundario tenemos que poner más vueltas en el secundario (N_S) y se llaman transformadores elevadores, pasa lo contrario si queremos reducir la tensión del secundario se llaman transformadores reductores.

Esta tensión de entrada (V_P) únicamente recorre un determinado número de espiras (N_P), mientras que la tensión de salida (V_S) tiene que recorrer la totalidad de las espiras (N_S).

1.5 Partes constitutivas del transformador

Los componentes de un transformador básicamente son cuatro :

- a) Circuito magnético (núcleo)
- b) Circuito eléctrico (devanados)
- c) Sistema de aislamiento
- d) Tanque, herrajes y accesorios
- a) El circuito magnético

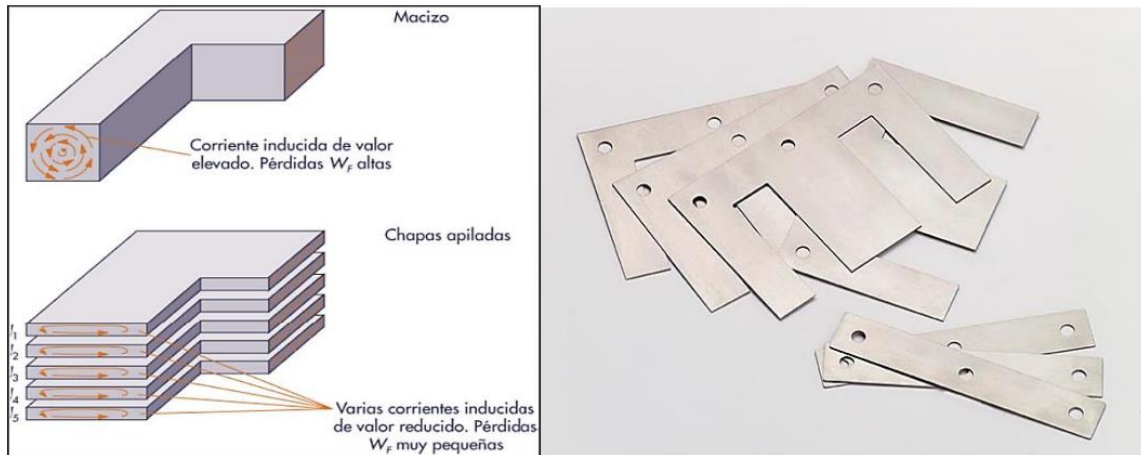
El circuito magnético es la parte componente del transformador que servirá para conducir el flujo magnético generado, el cual concatenará magnéticamente los circuitos eléctricos del transformador. El circuito magnético se conoce comúnmente como núcleo. Este núcleo se encuentra formado por láminas de acero al silicio de grano orientado de bajas pérdidas y una alta permeabilidad magnética.

A fin de que la magnitud de las pérdidas magnéticas (por histéresis) sea mínima, se utiliza hierro dulce con un elevado tanto por ciento de silicio.

Para mantener al mínimo la pérdida en el núcleo, éste se construye con laminaciones delgadas de material ferromagnético sumamente permeable, como la lámina de acero al silicio. Se usa acero al silicio

por sus propiedades de no envejecimiento y de pérdidas magnéticas bajas. El espesor de la laminación va de 0.014 a 0.024 pulgadas (0,3 a 0,7 [mm] por lámina). En ambas caras de la laminación se aplica un recubrimiento delgado de barniz aislante para proporcionar una resistencia alta entre las laminaciones, de modo de reducir las pérdidas por corrientes de Foucault.

Figura 48. Láminas o chapas de acero al silicio para la construcción de los núcleos



Todas las láminas están aisladas en ambas caras por medio de un aislante, se aplica una capa especial aislante en el proceso final de planchado y recocido.

Las corrientes de Foucault, por su parte, se neutralizan parcialmente ya sea dividiendo el núcleo en delgadas láminas llamadas chapas o laminaciones, aisladas una de otra. Estas chapas se dispondrán juntas hasta conseguir el espesor del núcleo deseado.

No suelen construirse núcleos macizos, ya que en ellos por histéresis o Foucault se producirían unas pérdidas del todo inaceptables. Las corrientes parásitas y las pérdidas por histéresis crecen rápidamente con el aumento de la frecuencia de la corriente. Esta es la razón por la que los núcleos formados con chapas sólo se pueden utilizar para frecuencias que no sobrepasen los 16000 Hz.

Básicamente, se tienen cuatro tipos de lámina de grano orientado, cuyas características de espesor y pérdidas(a la frecuencia de 60 Hz y 50 Hz) se encuentran mencionadas en la siguiente tabla 3.

Tabla 3 Pérdidas en acero al silicio a 60 y 50 Hz

			60 Hz				50 Hz			
GRADO DE ORIENTACIÓN	ESPESOR		WATTS POR lb		WATTS POR kg		WATTS POR lb		WATTS POR kg	
	PULG	MM	15	17	15	17	15	17	15	17
			kGauss	kGauss	kGauss	kGauss	kGauss	kGauss	kGauss	kGauss
M-2	0.007	0.18	0.42	--	0.93	--	0.32	--	0.7	--
M-3	0.009	0.23	0.46	--	1.01	--	0.35	--	0.77	--
M-4	0.011	0.28	0.51	0.74	1.12	1.63	0.39	0.56	0.85	1.24
M-6	0.014	0.35	0.66	0.94	1.46	2.07	0.5	0.71	1.11	1.57

Las pérdidas en la lámina a 50 Hz comparadas con las pérdidas a 60 Hz tienen la siguiente equivalencia :

$$\text{Pérdidas a 50 Hz} = 0.76 \times \text{pérdidas a 60 Hz}$$

El tipo de lámina más usual en la fabricación de núcleos para transformadores es la M-4, cuyas características de watts por libra o watts por kilogramo contra la densidad de flujo a 50 y 60 Hz, están dadas en la misma tabla 3.

b) El circuito eléctrico (devanados)

Las bobinas son la parte que componen los circuitos del transformador (bobinas primarias y secundarias). Las bobinas se fabrican en diferentes tipos y formas dependiendo de los requerimientos del diseño y los materiales conductores que se utilicen ; básicamente son : el cobre y el aluminio.

Figura 49. Bobinas (devanados) del transformador



**Bobinas de Hilo de Cobre con
aislante de barniz**

La función de los devanados primarios es crear un flujo magnético para inducir en los devanados secundarios una fuerza electromotriz, y transferir potencia eléctrica de primario al secundario mediante el principio de inducción electromagnética ; este proceso se desarrolla con una pérdida de energía muy pequeña.

Aún cuando el cobre tiene una baja resistencia específica su mayor costo comparado con el aluminio dio lugar al incremento del uso del aluminio (usado por primera vez en 1952), especialmente en transformadores de distribución y pequeña potencia, ya sean sumergidos en líquido aislante o del tipo seco.

Las ventajas de las bobinas de cobres son:

- Resistencia mecánica
- Conductividad eléctrica buena (bobina más pequeña)

Las ventajas de la bobina de aluminio son:

- Estabilidad en el costo por suministro
- Eficiente disipación de calor para devanados en banda, usando hoja de aluminio (foil de aluminio)
- Considerable reducción en peso

Los devanados de aluminio en la baja tensión son contruidos preferentemente en banda ; en cambio los devanados de cobre puede ser contruidos con alambre redondo o con solera, forrados con papel o esmaltados ; y, también se da la combinación de ambos aislamientos dependiendo de las características propias de cada transformador.

c) Sistema de aislamiento

Los transformadores poseen una serie de materiales aislantes sólidos, los cuales juntos forman el sistema de aislamiento. Este sistema incluye materiales como :

- Cartón prensado de alta densidad (pressboard o presspan)
- Papel kraft normal o tratado (insuldur)
- Papel manila y papel corrugado (papel crepé)
- Maderas para armados (maple, ayacahuite, canchán, machiche y otras)
- Collares de cartón prensado y aislamientos finales

- Partes de cartón prensado laminados
- Esmaltes y barnices
- Recubrimientos orgánicos e inorgánicos para la laminación del núcleo
- Porcelanas (boquillas)
- Recubrimientos de polvo epóxico
- Fibra vulcanizada
- Algodón (hilos, cintas)
- Plásticos y cementos, telas y cintas adhesivas, cintas de fibra de vidrio, etc.
- Fluido líquido dieléctrico (excepto equipos aislados en aire o gas) que puede ser aceite mineral, aceite de siliconas o r-temp

El sistema de aislamiento aísla los devanados del transformador entre ellos y a tierra, así como las partes cercanas al núcleo y a las partes de acero que forma la estructura. Por tanto, el aislamiento es mucho más que « solamente un medio mecánico para conservar los alambres apartados ».

Los materiales mencionados anteriormente forman el sistema de aislamiento sólido que debe de cumplir con cuatro importantes funciones :

1. Calidad para soportar las tensiones relativamente altas, sucedidas en servicio normal (esfuerzos dieléctricos). Esto incluye ondas de impulso y transitorios.
2. Calidad para soportar esfuerzos mecánicos y térmicos (calor) los cuales, generalmente acompañan a un cortocircuito.
3. Calidad para prevenir excesivas acumulaciones de calor (transmisión de calor)
4. Calidad para mantener las características deseadas para un período de vida de servicio aceptable dando un adecuado mantenimiento.

El último material en el sistema aislante es el fluido líquido que baña las bobinas y el núcleo. Este fluido sirve para tres propósitos primordiales :

1. Provee una rigidez dieléctrica
2. Proporciona un enfriamiento eficiente
3. Protege al demás sistema aislante

Los líquidos aislantes que se pueden utilizar para transformadores son :

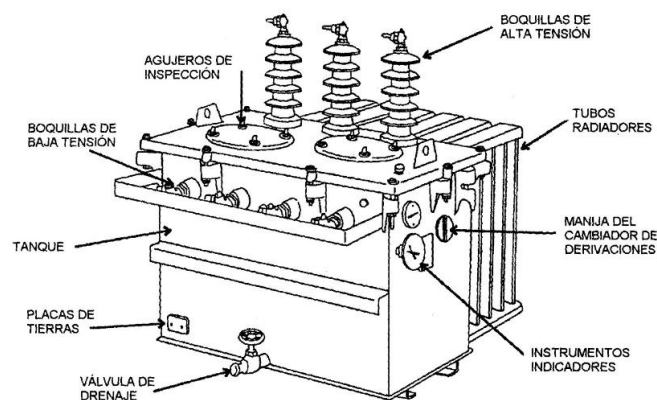
- Aceites minerales a base de petróleo
- Aceites vegetales
- Ésteres orgánicos
- Líquidos de polihidrocarburos
- Líquidos fluorados
- Líquidos de silicona

El aceite mineral era el más usado en el llenado del 95% de los transformadores. Desarrollos más recientes son los aceites dieléctricos vegetales hechos de semillas comestibles, uno de estos es el Envirotemp FR3 de Cooper Power Systems, que no es tóxico, es biodegradable y posee la más alta resistencia a la inflamación de los fluidos resistentes al fuego. Es evidente que cualquier debilitamiento en el aislamiento puede conducir a una falla en el transformador. El aislamiento está deteriorado cuando ha perdido una parte significativa de su propiedad dieléctrica original, característica mecánica o resistencia al impulso. La continuación en el proceso de deterioro terminará en lo inevitable : una falla mecánica o eléctrica.

d) Tanque, herrajes y accesorios

Los transformadores deben ser construidos con un tanque hermético, con objeto de preservar el aceite – ya que éste tiene la función de dieléctrico y también de refrigerante – del conjunto núcleo-bobinas. El transformador debe permanecer perfectamente sellado desde una temperatura de -5°C a un máximo de 105°C en la parte superior del líquido aislante. La figura 42 muestra un transformador trifásico.

Figura 50. Transformador trifásico



Entre los accesorios más importantes del transformador de distribución, están :

- a) boquillas de porcelana de A.T. y B.T.
- b) cambiador de derivaciones (o taps)
- c) terminales de cobre para A.T. y B.T.
- d) válvula de muestreo de aceite

Para los transformadores de potencia habrá que incluir los siguientes :

- a) termómetros con contactos y sin contacto de alarma
- b) niveles de aceite con contacto y sin contacto de alarma
- c) relevador Buchholz
- d) ventiladores, etc.

A todo lo anterior habrá que agregar el bastidor y los herrajes solicitados por la Norma Oficial Mexicana (NMX-J-116 vigente).

Los transformadores pueden ser clasificados de distintas maneras, según se tome como base la operación, la construcción o la utilización ; así tenemos que:

- a) Por la operación.

Se refiere a la energía o potencia que manejan dentro del sistema eléctrico :

- Transformadores de distribución. Los que tienen capacidad desde 5 hasta 500 kVA (monofásicos y/o trifásicos)
- Transformadores de potencia. Los que tienen capacidades mayores de 500 kVA

- b) Por el número de fases.

La capacidad nominal de un transformador son los kilovoltamperes (kVA) que el devanado secundario debe suministrar en un tiempo especificado (continuo o limitado) a su tensión y frecuencia nominales y de acuerdo a la NMX-J-409.

De acuerdo a las características del sistema al que se conectará :

Monofásico. Transformadores de potencia o de distribución que son conectados a una línea o fase y a un neutro o tierra. Tienen una sola

bobina de alta tensión y una de baja tensión. Se denota con el símbolo 1 .

Figura 51. Esquema eléctrico, transformador monofásico

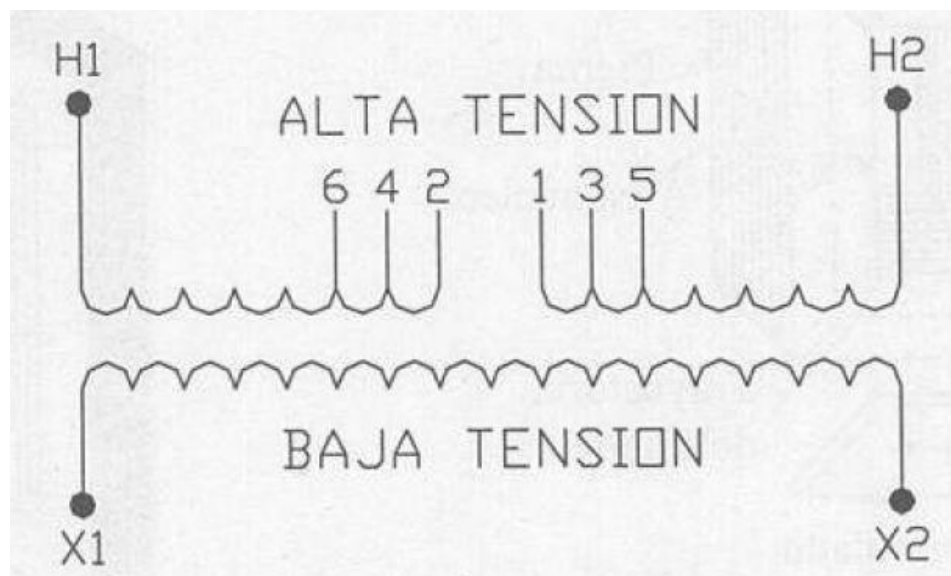


Figura 52. Transformador monofásico



Trifásico. Transformadores de potencia o de distribución que son conectados a 3 líneas o fases y pueden estar o no conectados a un neutro común o tierra. Tiene 3 bobinas de alta tensión y 3 de baja tensión. Se denota con el símbolo 3.

Figura 53. Esquema eléctrico, transformador trifásico

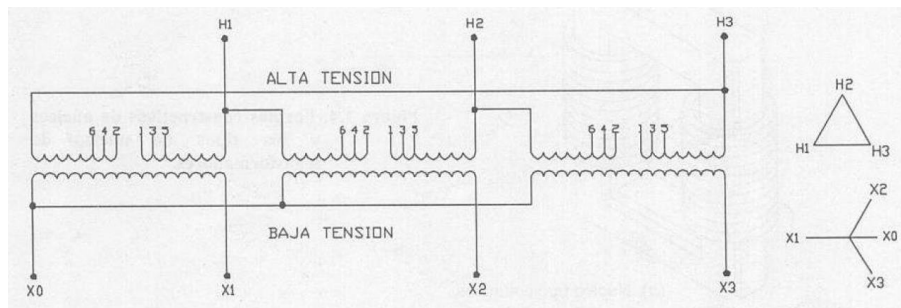
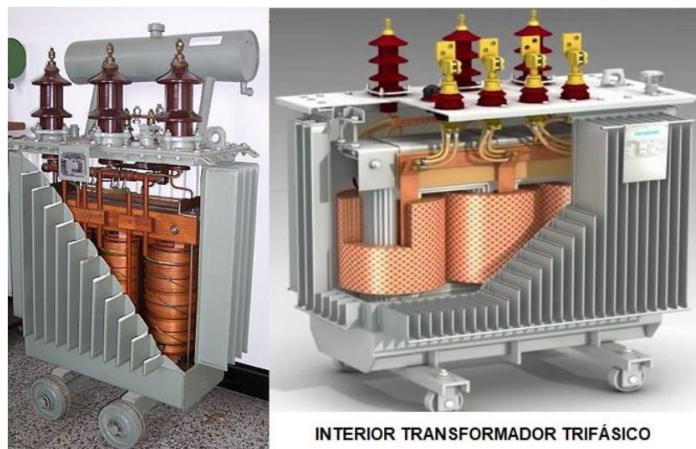


Figura 54. Transformador Trifásico



A continuación se indican las capacidades nominales preferentes en kVA :

1. Transformadores Monofásicos.

25 kVA	37.5 kVA	50 kVA	75 kVA	100 kVA	167 kVA
--------	----------	--------	--------	---------	---------

2. Transformadores Trifásicos.

30 kVA	45 kVA	75 kVA	112.5 kVA	150 kVA	225 kVA	300 kVA
500 kVA	750 kVA	1000 kVA	1500 kVA	2000 kVA	2500 kVA	

c) Por su utilización

De acuerdo a la posición que ocupa dentro del sistema :

- Transformador para generador. Son transformadores de potencia que van conectados a la salida del generador. Proporcionan la energía a la línea de transmisión, generalmente elevando la tensión.

- Transformadores de subestación. Los transformadores de potencia que se conectan al final de la línea de transmisión para reducir la tensión a nivel de subtransmisión.
- Transformadores de distribución. Reducen la tensión de distribución a bajas tensiones aplicables en zonas de consumo : industrial, residencial, comercial y agrícola.
- Transformadores especiales. Son transformadores de potencia diseñados para aplicaciones no incluidas en las anteriores y que pueden ser : reguladores de tensión, transformadores para rectificador, transformadores para horno de arco eléctrico, transformadores de defase, autotransformadores para mina, transformadores para prueba, transformadores para fuentes de corriente directa, etc.
- Transformadores de instrumentos. Son transformadores de potencial y transformadores de corriente que son usados en la medición, en la protección y en el control.

VIDEO. Construcción de un Transformador trifásico
<https://youtu.be/H2hYUu8lPY0>

VIDEO. Como trabaja un transformador trifásico
https://youtu.be/t6UMx2_63OE
https://youtu.be/vh_aCAHThTQ

d) Por la construcción o forma del núcleo

De acuerdo con la posición que existe entre la colocación de las bobinas y el núcleo, se conocen dos tipos :

- Núcleo acorazado. También llamado tipo « shell », es en el cual el núcleo se encuentra cubriendo los devanados de baja y alta tensión.
- Núcleo no acorazado. También conocido como tipo columna y es en el cual las bobinas abarcan una parte considerable del circuito magnético.

Figura 55. Descripción de los núcleos: a) acorazado b) no acorazado (columna)

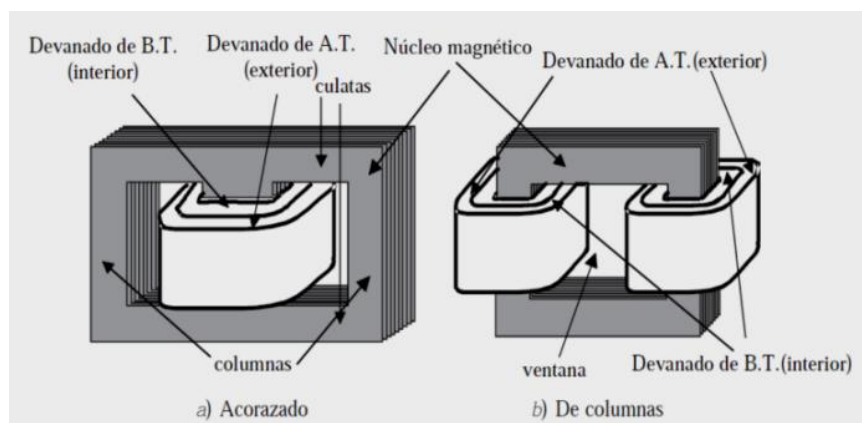


Figura 56. Distribución de los devanados del primario y secundario

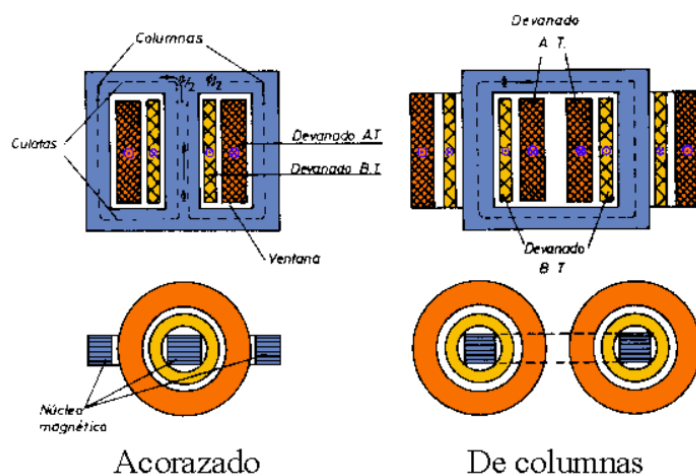
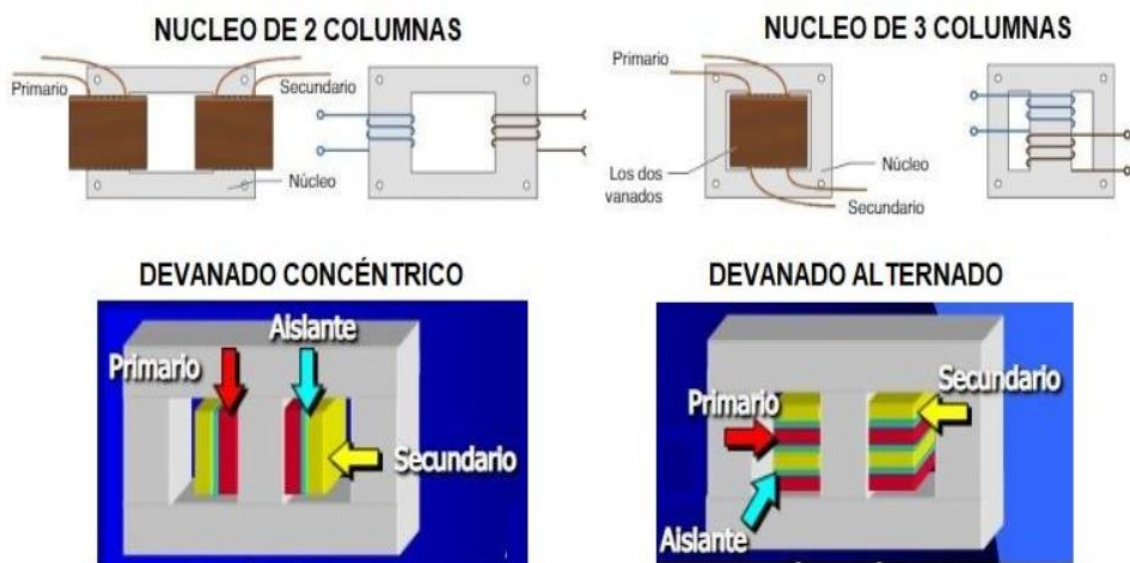


Figura 57. Tipos de núcleo y de devanados de un transformador



VIDEO.

<https://youtu.be/XrIXioEn3yQ>

e) En función de las condiciones de servicio

- Para uso interior
- Para uso a la intemperie

f) En función de los lugares de instalación

- Tipo poste
- Tipo subestación
- Tipo pedestal
- Tipo bóveda o sumergible

g) De acuerdo al tipo de enfriamiento

Para conocer los diferentes tipos de transformadores por su sistema de enfriamiento es necesario primero conocer, los 3 principales métodos de enfriamiento que pueden usarse en estos dispositivos, los cuales son:

- **Por convección:** Mediante el cual se produce un flujo que transporta el calor entre zonas con diferentes temperaturas.
- **Por conducción:** El cual se basa en el flujo de calor de un cuerpo con mayor temperatura a uno con menor, a través del contacto directo.
- **Por radiación:** Mediante absorción o emisión de ondas electromagnéticas.

Es así que, utilizando cualquiera de estos 3 métodos, más algunas características y elementos especiales, podremos ver ya en concreto, los distintos tipos de transformadores.

Existen los sumergidos en aceite y los secos :

- Tipo AA
- Tipo AFA
- Tipo AA/FA
- Tipo OA
- Tipo OA/FA
- Tipo OA/FOA/FOA
- Tipo FOA

- Tipo OW
- Tipo FOW

Descripción literal de los tipos de enfriamiento :

TIPO AA. Los transformadores AA o de tipo seco con enfriamiento propio, son aquellos que no contienen elementos o cualquier otra sustancia (como aceites o líquidos) que ayuden al enfriamiento de su sistema; pues su propia fabricación es la que garantiza el enfriamiento al contar con medios aislantes (aire) que rodean al núcleo y las bobinas.

Por lo tanto, es importante que el área donde se instale el transformador este bien ventilada, además de que las rejillas de ventilación del radiador se mantengan libres de obstáculos que puedan impedir el paso del aire.

TIPO AFA. El segundo de los tipos de transformadores por su sistema de enfriamiento es el llamado AFA, o de tipo seco con enfriamiento por aire forzado, el cual como su nombre lo indica utiliza ventiladores o sopladores para aumentar la potencia de los transformadores AA.

Para este, será necesario considerar que se requerirán de revisiones periódicas a los motores de los ventiladores, además de contar con un termostato que asegure la activación de los motores en los rangos de temperatura prefijados.

TIPO AA/FA. El transformador de tipo seco con enfriamiento natural y con enfriamiento por aire forzado, es muy parecido al anterior, ya que en sí se trata de un transformador AA con la diferencia de contar con ventiladores adicionales para disipar el calor, requiriendo prácticamente, de las mismas consideraciones de cuidado del tipo anterior.

TIPO OA/ONAN. los tipos de transformadores por su sistema de enfriamiento es el llamado OA o sumergido en aceite con enfriamiento natural, el cual utiliza como aislante a algún aceite, el cual circula por convección natural, manteniendo al núcleo y a los arrollamientos sumergidos en el mismo, además de contar con un enfriamiento adicional a través de los radiadores, al aumentar el área de superficie.

Por otro lado, para estos se recomienda utilizar líquidos con baja viscosidad para facilitar la circulación, así como probar la rigidez dieléctrica del aceite antes de ponerlo en servicio.

TIPO OA/FA. El transformador tipo OA/FA, es una variante de la combinación del tipo AFA y OA/ONAN, pues como su nombre lo indica (sumergido en líquido aislante con enfriamiento propio y con enfriamiento por aire forzado), es un transformador OA al cual se le adicionan ventiladores para aumentar su capacidad de disipar el calor.

TIPO OA/FOA/FOA. Este tipo de transformadores por su sistema de enfriamiento se le puede comprender como una combinación triple, pues se trata de un transformador de enfriamiento propio o con aceite y con aire forzado o aceite forzado, tratando de mejorar el sistema del transformador OA a través del uso al 100% de ventiladores y bombas de aceite, así como de los radiadores.

TIPO OFAF. También llamado transformador con enfriamiento forzado de aceite chorro de aire refrigerado es otra variante del tipo OA, pero con un sistema que se divide en 2 partes: la primera mediante la circulación de aceite a través de una bomba, y la segunda a través de elementos que se adicionan a los radiadores para proporcionar chorros de aire.

TIPO FOA. El transformador tipo FOA significa sumergido en líquido aislante con enfriamiento por aceite forzado y de aire forzado, el cual como su denominación lo indica, se trata de uno de los más poderosos, pudiendo absorber picos de energía y capacidad, ya que además de que el núcleo y los componentes se encuentran sumergidos, también utilizan ventiladores y bombas de aceite; todo al mismo tiempo.

TIPO FOW. Las siglas que se utilizan para el transformador sumergido en líquido aislante con enfriamiento de aceite forzado y con enfriadores de agua forzada, el cual es prácticamente igual al anterior, solamente con la variante de que el enfriamiento por agua no utiliza ventiladores adicionales.

VIDEO. Animación de la operación del transformador trifásico
<https://youtu.be/hk9vvnSDIDc>

VIDEO. Operación Relé Buchholz
<https://youtu.be/sY-YOUQpgdQ>

1.6 Análisis del transformador ideal

Un transformador ideal es aquel en el cual no hay pérdidas de potencia ni pérdidas de flujo magnético, y además la permeabilidad magnética del núcleo es mucho mayor que μ_0 . Es obvio que tal transformador no existe en realidad, pero a través del estudio de un transformador ideal se puede analizar con mayor simplicidad el funcionamiento de los transformadores reales (que en la práctica se le aproximan mucho).

En suma, en un transformador ideal se cumplen las siguientes condiciones:

- a) Permeabilidad del núcleo $\mu \rightarrow \infty$ (reluctancia despreciable).
- b) No hay flujos de fuga, es decir, el flujo es enlazado en su totalidad por ambos enrollados
- c) No hay pérdidas Joule en los enrollados (la resistencia eléctrica de los enrollados es nula).
- d) No hay pérdidas de potencia en el núcleo.

Cumpléndose:

$$V_1 = N_1 \frac{d\Phi}{dt} \quad ; \quad V_2 = N_2 \frac{d\Phi}{dt}$$

Siendo la ley de Faraday :

$$e_1 = -N \frac{d\Phi}{dt}$$

Partiendo de un flujo senoidal de la forma:

$$\Phi = \Phi_m \text{ sen } \omega t$$

Y sustituyéndolo en las expresiones anteriores, obtendremos:

$$V_1 = e_1 = N_1 \omega \Phi_m \cos \omega t$$

$$V_2 = e_2 = N_2 \omega \Phi_m \cos \omega t$$

1.6.1. Transformador ideal en vacío.

Cuando no se consideran pérdidas la potencia del primario es igual a la potencia en el secundario ($S_1 = S_2$).

Recuerda la potencia es $V \times I$, entonces si $S_1 = S_2$

$$V_1 \times I_1 = V_2 \times I_2$$

En vacío significa que no conectamos carga en la salida del secundario, es decir la intensidad por el secundario sería 0; $I_2 = 0$ A.

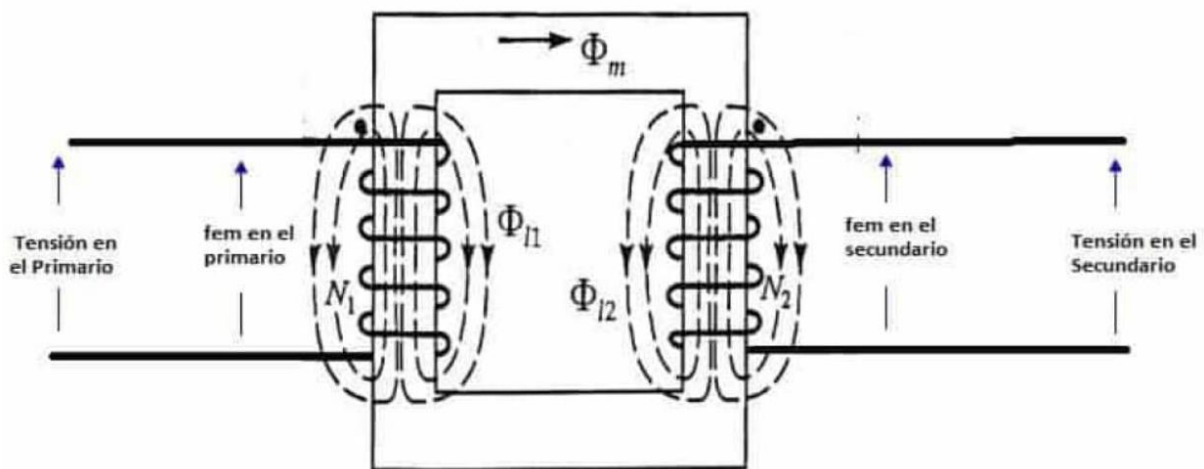
Además la intensidad en el primario será muy pequeña, solo la necesaria para alimentar los bobinados y se llama I_0 = Intensidad en vacío.

Veamos el funcionamiento del trafo en este caso.

La bobina primaria recibe una tensión alterna V_1 y al ser un circuito eléctrico cerrado formado por las espiras de la bobina comenzará a circular una corriente eléctrica I_1 por las espiras del devanado primario.

En vacío ya sabemos que esta corriente se llama I_0 y será variable porque es corriente alterna.

Figura 58. Transformador ideal (sin pérdidas)



*fem = fuerza electromotriz
en un transformador ideal fem = tensión*

Al circular esta corriente por las espiras del primario, según Oersted, se generará alrededor de ellas un campo magnético variable, que lo expresamos como su flujo magnético variable Φ_1 .

Ahora según Faraday **se induce una fem en el primario** (fem_1 o E_1) por el flujo alterno generado que corta las bobinas del primario y será de sentido contrario a la causa que lo produce según la ley de Lenz, es decir **contraria a V_1** .

A partir de ahora la fem la llamaremos siempre con la letra E.

Según Lenz la E_1 y la V_1 tendrán sentidos contrarios.

El valor de esta fem inducida según Faraday será:

$$E_1 = 4,44 \times f \times N_1 \times \Phi_1$$

f = frecuencia de la corriente

N = Número de espiras de la bobina del primario

Φ = Flujo del campo magnético

Cómo no hay pérdidas tendrá el mismo valor que V_1 , aunque de sentido contrario.

Este flujo del primario recorrerá el circuito magnético (núcleo) atravesándolo hasta llegar al bobinado del secundario.

Es decir **el flujo creado en el primario será común en ambos devanados o bobinados**.

$$\Phi_{\text{común o mutuo}} = \Phi_1 = \Phi_2 = \Phi_m$$

Este flujo al ser variable, por que lo produce una corriente alterna (ca), también cortará los conductores del bobinado secundario produciendo una fem inducida (E_2) en los extremos de la bobina del secundario.

La fem en el secundario al sacarla fuera del trafo para utilizarla la llamamos tensión en el secundario V_2 , y en el caso de que el trafo sea ideal, es decir **sin pérdidas**; $E_2 = V_2$.

Al estar en vacío no tendremos corriente por el secundario ya que no hay

ninguna carga conectada.

El valor de esta fem inducida en el secundaria según Faraday será:

$$E_2 = 4,44 \times f \times N_2 \times \Phi_m$$

f = frecuencia

N = Número de espiras de la bobina del secundaria

Φ_m = Flujo mutuo del campo magnético

A veces a este flujo, cuando el trafo este en vacío, se le llama Φ_0 flujo en vacío.

Resumiendo las dos fem producidas serán:

$$E_1 = 4,44 \times f \times N_1 \times \Phi_m$$

$$E_2 = 4,44 \times f \times N_2 \times \Phi_m$$

Si dividimos una entre otra las dos expresiones anteriores:

$$E_1/E_2 = N_1/N_2$$

N_1/N_2 se conoce como **relación de transformación del transformador**, que nos determina la cantidad de veces que es más grande la fem en el primario que en el secundario.

Si m es mayor de 1 será elevador de la tensión y si es menor que 1 reductor.

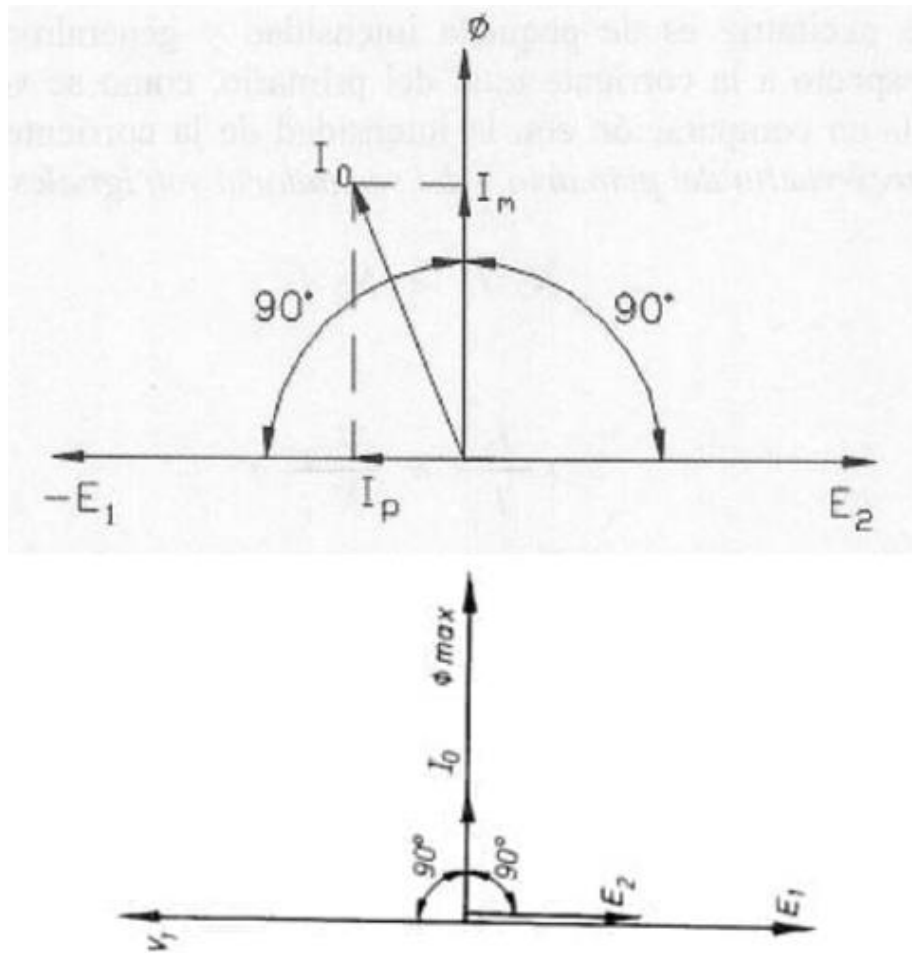
Recuerda que en un trafo la tensión de salida depende del número de espiras del secundario para una V_1 fija.

En este caso ideal en el que las tensiones son iguales a las E , tenemos también que:

$$V_1/V_2 = E_1/E_2 = N_1/N_2$$

El diagrama vectorial en vacío sería:

Figura 59. Diagrama vectorial en un transformador ideal en vacío



E_1 es contraria a lo que lo produce (Lenz), es decir, a V_1 .

E_2 tiene el mismo sentido que E_1 ya que también tiene que ser contraria al flujo que la produce y es el mismo flujo que el que produce E_1 .

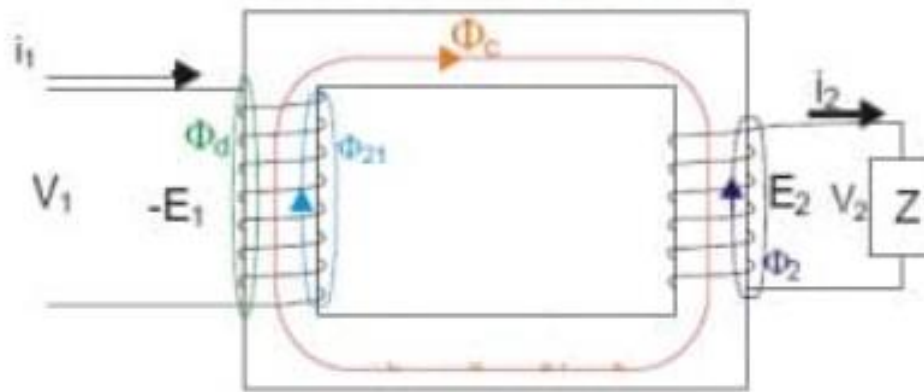
$E_2 = V_2$ porque no hay pérdidas.

La I_0 estará retrasada 90° respecto a la tensión V_1 porque es una bobina por la que circula.

1.6.2. Transformador ideal en vacío.

Si ahora al transformador le conectamos al secundario una carga Z con un ángulo de desfase ϕ , la E_2 hará que por la bobina del secundario aparezca una corriente I_2 , desfasada el ángulo ϕ respecto a E_2 .

Figura 60. Transformador ideal en carga



Cuando en el transformador conectamos al secundario una carga, entonces el flujo creado por el primario Φ_1 no será el único, ya que circulará una corriente por la carga y por las bobinas del secundario (I_2).

Esta corriente I_2 creará a su vez un flujo en las bobinas del secundario Φ_2 , de sentido contrario al que lo creo, es decir en sentido contrario al Φ_1 .

I_1 tendrá sentido contrario a I_2 , ya que cada I tiene el sentido del flujo que las crea.

El flujo total ahora será $\Phi_t = \Phi_1 - \Phi_2$; que resulta que es **del mismo valor que el Φ_o** , es decir que el creado cuando el transformador trabaja en vacío. Demostremos que efectivamente es igual al flujo en vacío.

La fórmula de la $V_1 = E_1 = 4,44 \times f \times N_1 \times \Phi_m$

Resulta que si despejamos Φ_m tenemos que:

$$\Phi_m = E_1 / (4,44 \times f \times N_1)$$

La frecuencia es la misma que en vacío, el número de espiras también, luego el valor del Φ_m solo depende de la tensión en el primario, que será la misma en vacío que en carga, por lo tanto el flujo común es el mismo en los dos casos.

Pero esto también quiere decir que aunque V_1 sea la misma, en el primario tiene que haber una corriente mayor que en vacío (I_o) porque lógicamente si que es cierto que el flujo creado en el secundario restará valor al flujo que había cuando el trafo estaba en vacío.

Es decir el Φ_1 no será igual al Φ_0 , ni la I_0 será igual a la I_1 , pero el flujo común o mutuo si será el mismo en vacío y en cualquier régimen de carga.

Demostremos ahora que la I_0 no es igual a la I_1 y cual será su valor.

En un transformador los amper-vueltas son una constante en cualquier régimen de carga:

$$\sum N \times I = \text{constante}$$

En vacío tenemos que:

$$N_1 \times I_0 = \text{constante}$$

En carga tendremos que:

$$N_1 \times I_1 + N_2 \times I_2 = \text{constante}$$

Si igualamos las 2 expresiones tenemos:

$$N_1 \times I_1 + N_2 \times I_2 = N_1 \times I_0$$

Despejemos I_1 :

$$N_1 \times I_1 + = N_1 \times I_0 - N_2 \times I_2$$

$$I_1 = (N_1 \times I_0 - N_2 \times I_2) / N_1 = (N_1 \times I_0)/N_1 - (N_2 \times I_2) / N_1 = I_0 - 1/m \times I_2$$

Conclusión que la I_1 en carga será:

$$I_1 = I_0 - I_2'$$

Recuerda esta fórmula que la usaremos más adelante.

Siendo I_2' (I_2 prima)= I_2/m ; que luego veremos que se corresponde que la corriente del secundario reducida al primario, pero ahora no se considera.

Lo que hemos demostrado es que **la I_1 ya no es igual a la I_0 , aunque el flujo siga siendo el mismo en ambos devanados.**

Con el trafo en carga, la potencia aparente del primario y del secundario es la misma, ya que no se consideran las pérdidas, entonces:

$$V_1 \times I_1 = V_2 \times I_2$$

despejando las I para un lado y las V para el otro, tenemos la relación de

transformación:

$$V_1/V_2 = I_2/I_1 = m$$

Luego la relación de transformación también la podemos expresar en función de las intensidades en el primario y en el secundario.

Recordando las intensidades se dividen al revés, arriba la 2 y abajo la 1. También $E_1/E_2 = N_1/N_2$, ya que seguimos teniendo el mismo flujo, el de vacío, luego esto también se cumple en carga. Además por ser ideal sin pérdidas $E_2 = V_2$.

Para conocer la corriente en el secundario (I_s) cuando tengo la corriente I_p (corriente en el primario), N_p (espiras en el primario) y N_s (espiras en el secundario) se utiliza siguiente fórmula:

$$I_s/I_p = N_p / N_s$$

Si despejamos de la fórmula la I_s , tenemos que:

$$I_s = (N_p \times I_p) / N_s$$

Nota: cambiamos la forma de nombrar las corrientes I_1 por I_s y la I_2 por I_p pero es lo mismo, simplemente para que veas que hay otras formas de nombrarlas.

Las potencias aparentes, activas y reactivas absorbidas por el primario son iguales que las suministradas por el secundario:

Igualdad de las Potencias Aparentes $S_1 = S_2$, o lo que es lo mismo:

$$V_1 \times I_1 = V_2 \times I_2$$

Igualdad de las Potencias Activas $P_1 = P_2$, o lo que es lo mismo:

$$V_1 \times I_1 \times \cos \varphi_1 = V_2 \times I_2 \times \cos \varphi_2$$

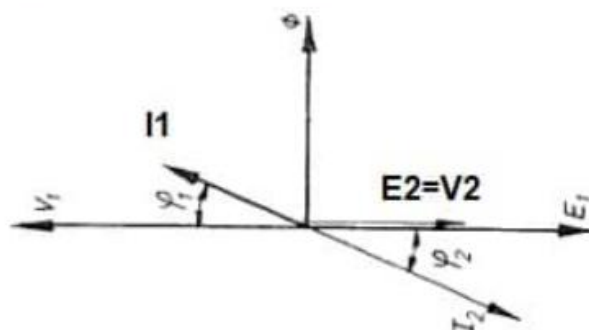
Igualdad de las Potencias Reactivas $Q_1 = Q_2$, o lo que es lo mismo:

$$V_1 \times I_1 \times \sin \varphi_1 = V_2 \times I_2 \times \sin \varphi_2$$

El diagrama vectorial en este caso será:

I_1 de sentido contrario a I_2
 $E_2 = V_2$ y del mismo sentido.

Figura 61. Representación vectorial de un transformador ideal con carga



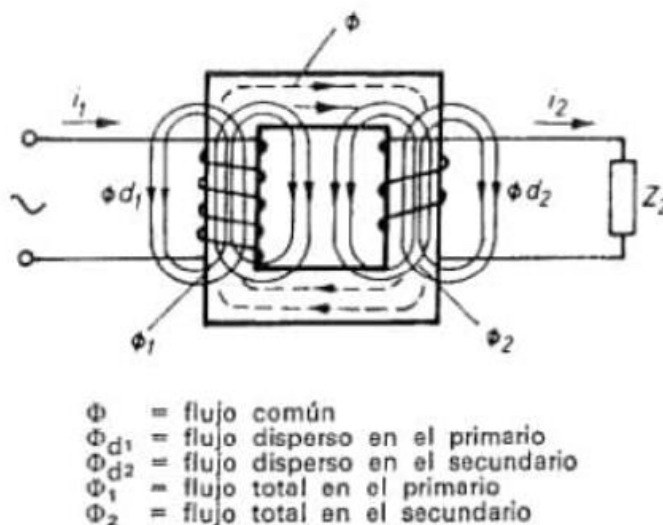
1.7 Análisis del transformador real y su circuito equivalente

El transformador real no es un transformador ideal ya que tiene pérdidas, al considerarse una máquina estática el nivel de pérdidas es muy bajo, aun así es importante contabilizarlas e intentar minimizarlas.

Tenemos 3 tipos de pérdidas:

- **Pérdidas por el Flujo Disperso:** El flujo no es común a lo largo del circuito magnético, debido a la **existencia de flujos disperso tanto en el primario y en el secundario**, debidos a las corrientes primarias y secundarias, respectivamente.

Figura 62. Esquema del transformador con los flujos



- **Pérdidas en el Cobre (P_{Cu}):** Pérdidas por efecto Joule en las bobinas, es decir por calentamiento de los cables de los devanados.

Los devanados o **bobinas tienen una resistencia** que ocasiona pérdidas, llamadas pérdidas en el Cobre (P_{Cu}).

Las perdidas en el cobre dependen del régimen de carga en que funcione el transformador y su valor será:

$$P_{Cu} = I_1 \times R_1 + I_2 \times R_2$$

Donde R_1 y R_2 es la resistencia del bobinado primario y secundario. A mayor I (carga) mayores serán estas pérdidas.

Dicho esto clasificamos las pérdidas en 2 grupos:

- **Pérdidas en el Hierro (P_{fe})** = Pérdidas en el circuito magnético o pérdidas en el hierro del núcleo.

El núcleo del transformador está formado por un apilado de chapas magnéticas, que motivarán unas **pérdidas en el hierro**.

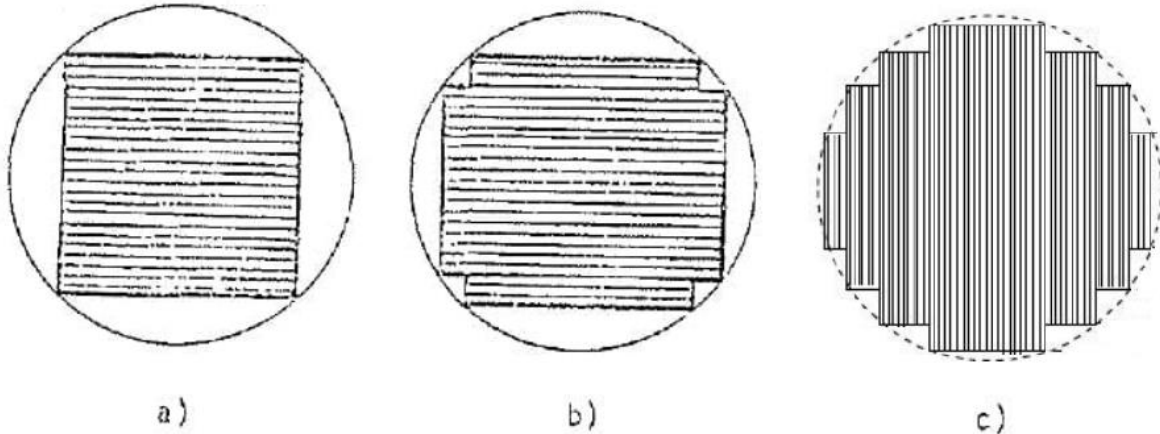
De este tipo tenemos **2 diferentes, por Foucault y por Histéresis**.

- **Pérdidas por Corrientes de Foucault:** El campo magnético variable que se crea y que recorrerá las chapas, al cortar las propias chapas crea unas corrientes por las chapas llamadas corrientes de Foucault o parásitas y que **produce un calentamiento en las chapas** y por lo tanto pérdidas por efecto joule (para saber más sobre estas corrientes visita el enlace anterior).

Para minimizar las perdidas por corrientes de Foucault el bloque magnético del trafo se hace en forma de chapas delgadas, en lugar de ser un bloque entero.

Los transformadores pequeños se hacen de sección cuadrada (*Figura 63 a*) pero, a medida que aumenta la potencia conviene hacer el núcleo del tipo de sección "cruciforme", lo más parecido a una circunferencia para minimizar estas pérdidas (*Figura 63 b*)).

Figura 63. Forma de las columnas del núcleo de transformador a) cuadrada, b) cruciforme y c) escalonada



- **Pérdidas por Histéresis:** La corriente en los devanados del transformador es alterna, por lo que se invierte continuamente su polaridad, modificando con la misma constancia el sentido de dicho campo.

Es en este punto en el que las moléculas del material que conforman el núcleo tienen que invertir de la misma forma su sentido de la orientación, esto requiere energía de la que es tomada de la fuente que abastece la alimentación y esto representa una pérdida de potencia, llamada histéresis.

Las pérdidas en el hierro son las mismas para cualquier régimen de carga en el transformador, ya que se considera que el flujo magnético no varía, y coinciden con la potencia medida en el ensayo en vacío del transformador.

Para el estudio del transformador real debemos tener en cuenta todas las pérdidas estudiadas anteriormente.

Para simplificar los cálculos, normalmente **se utiliza un circuito equivalente del transformador.**

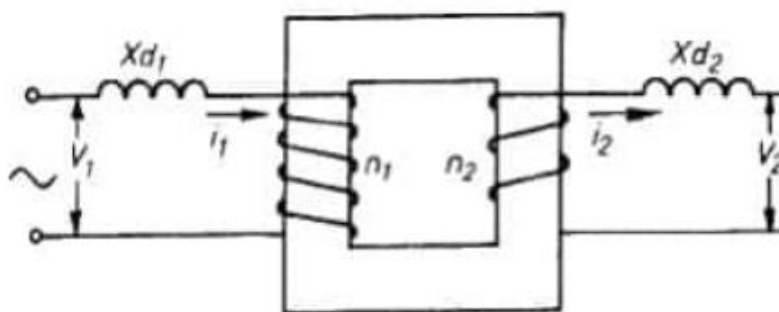
Este circuito equivalente debe reproducir con bastante aproximación los mismos efectos que el real y que permita a su vez determinar las relaciones fundamentales como las tensiones, las intensidades, etc.

Circuito equivalente del transformador

Para hacer el circuito equivalente de un transformador real, primero representamos las pérdidas motivadas por el flujo disperso mediante unas bobinas puras.

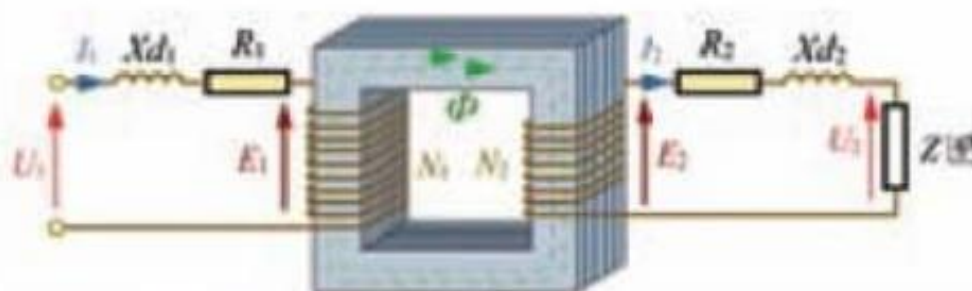
La presencia de estas bobinas ficticias (en serie con el primario y con el secundario), darán lugar a las que llamaremos **reactancias de dispersión X_{d1} y X_{d2}** , siempre que circule corriente por los devanados del transformador.

Figura 64. Transformador real con bobinas por pérdidas del flujo de dispersión



Para representar las pérdidas en el cobre, lo hacemos mediante unas resistencias en serie con las bobinas (ver esquema de más abajo).

Figura 65. Circuito equivalente de un transformador real



R_1 = Resistencia del primario

R_2 = Resistencia del secundario

X_{d1} = Reactancia de dispersión del primario

X_{d2} = Reactancia de dispersión del secundario

Las R_1 , R_2 y las X_{d1} y X_{d2} las sacamos fuera de la bobina para seguir suponiendo que las bobinas sigan siendo ideales.

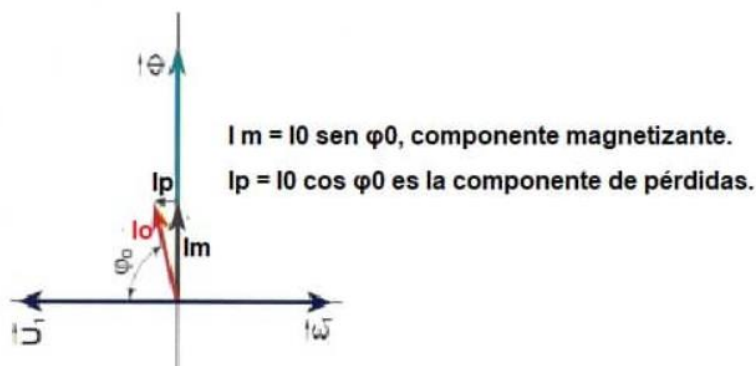
Este circuito equivalente ya es bastante aproximado a la realidad, pero nos faltan las pérdidas en el hierro del núcleo, que aunque sean muy pequeñas

deberíamos tenerlas en cuenta.

Si el trafo está en vacío la intensidad no estará desfasada 90° , como sería si fuera ideal, es decir una bobina pura en el devanado.

Ese desfase llamado φ_0 provoca que la I_0 (la intensidad en vacío) tenga 2 componentes:

Figura 66. Diagrama fasorial del transformador real

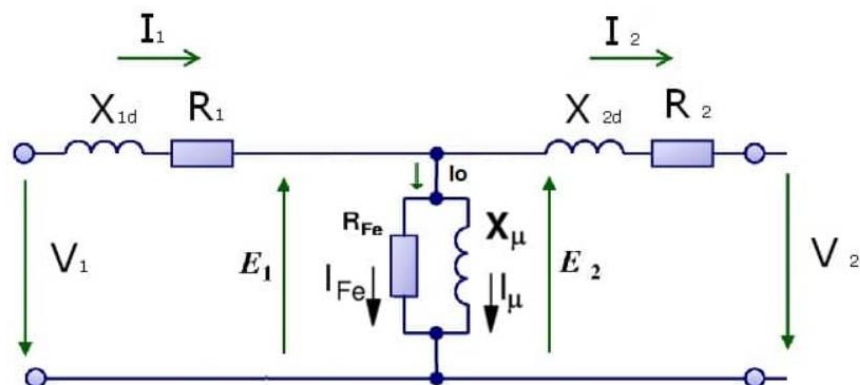


De estas 2 componentes solo la I_m es la magnetizante, la útil, la otra I_p , son las que provocan las pérdidas en el hierro que son las que no faltaban. Luego las pérdidas en el hierro la dan el desfase de la intensidad en el primario en vacío.

Para representar el núcleo en nuestro transformador equivalente lo hacemos mediante una rama en paralelo con estas 2 intensidades.

Podemos **representar un transformador real** mediante el siguiente esquema o circuito equivalente:

Figura 67. Circuito equivalente del transformador

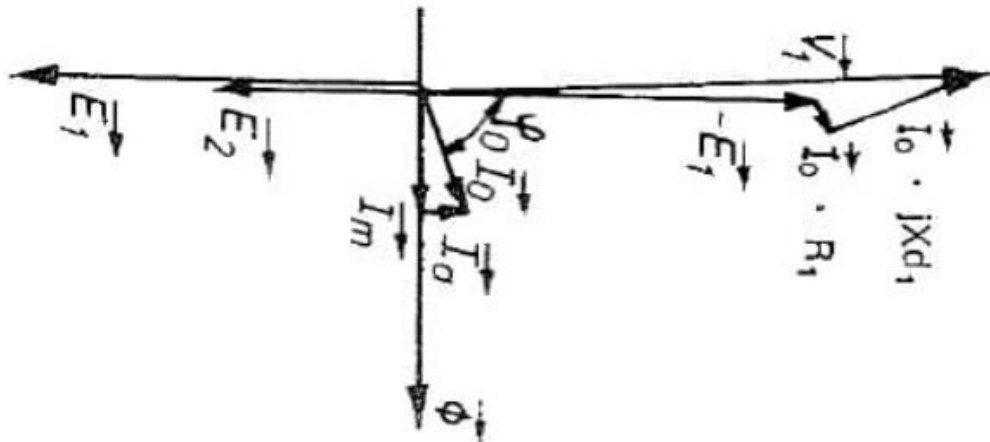


Mediante R_{fe} representamos las pérdidas en el hierro por efecto Joule y por una reactancia X_μ por la que se deriva la corriente de magnetización del trafo.

Para los cálculos tenemos tanto las R como las X_d en serie con las bobinas, tanto del primario como del secundario.

El **transformador real en vacío** tendría el siguiente diagrama vectorial:

Figura 68. Transformador real en vacío vectores



La suma vectorial de menos E_1 más la caída de tensión por R ($R_1 \times I_0$) más la caída de tensión por dispersión ($X_d \times I_0$), sería igual a la V_1 .

$$\vec{V}_1 - \vec{I}_0 \cdot R_1 - \vec{I}_0 \cdot X_{1d} = \vec{E}_1$$

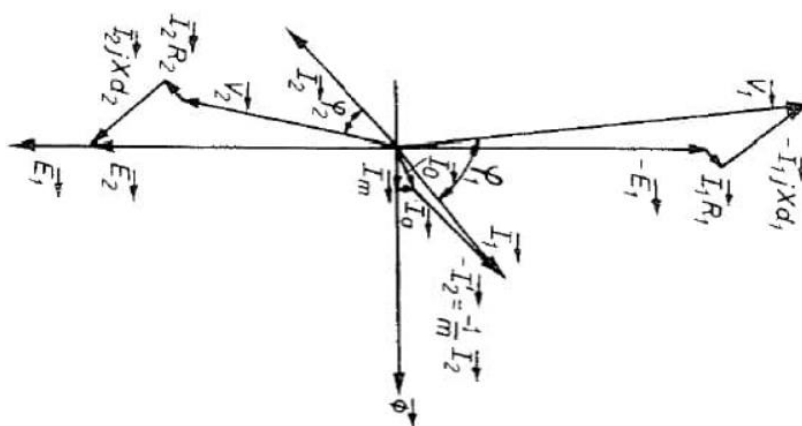
$$V_1 - I_0 \cdot R_1 \cdot \cos \varphi_1 - I_0 \cdot X_{1d} \cdot \sin \varphi_1 = E_1$$

La fórmula de abajo sería la escalar y aquí ya tenemos en cuenta las pérdidas.

Para el **Transformador real en carga** habrá que tener en cuenta las impedancias y resistencias en el secundario, con la dirección de la corriente en el secundario (I_2).

El diagrama vectorial del transformador real en carga quedaría:

Figura 69. Transformador real en carga vectores



$$V_1 = E_1 + I_1 R_1 \cos \phi_1 + I_1 X_{d1} \sin \phi_1$$

$$V_2 = E_2 - I_2 R_2 \cos \phi_2 - I_2 X_{d2} \sin \phi_2$$

Fíjate que la I_1 tiene dos componentes como estudiamos anteriormente, I_0 menos I_2' , que vale I_2/m , donde m es la relación de transformación.

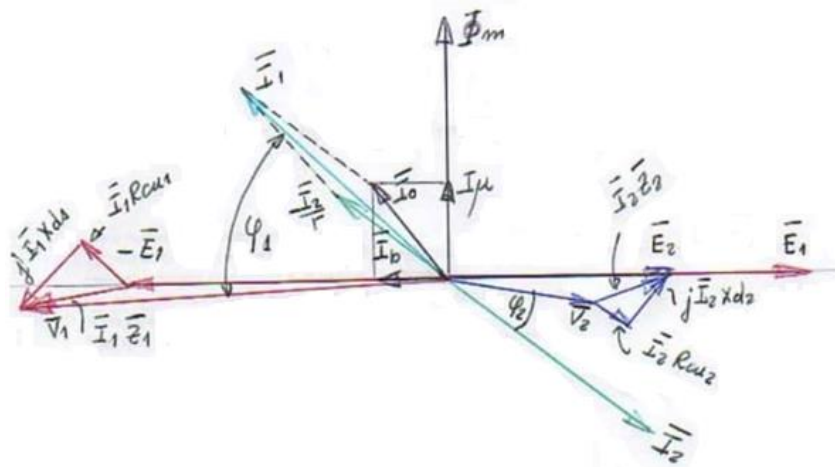
Recordando que:

$$I_1 = I_0 - I_2'$$

- I_2' tiene sentido contrario a I_2 .

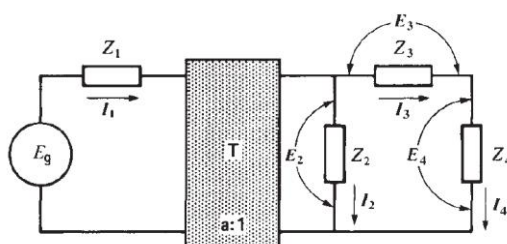
En este diagrama donde se ve los vectores:

Figura 70. Transformador real en carga vectores



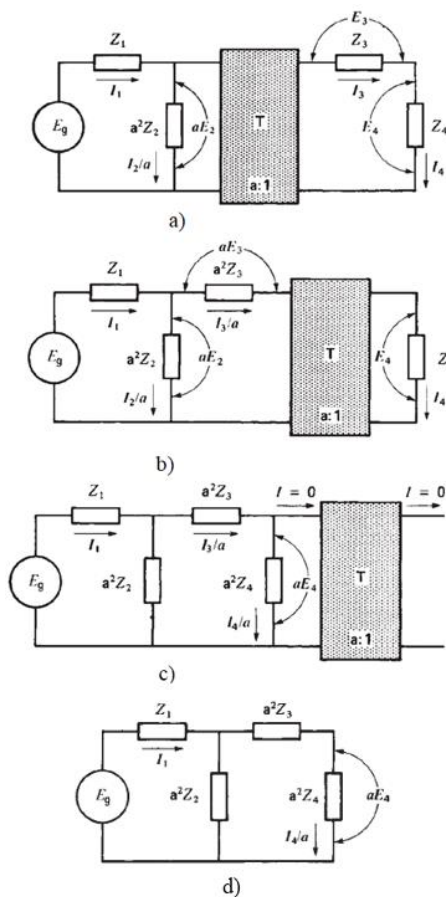
Considerando el circuito siguiente *Figura 71*, se compone de una fuente E_g , un transformador T y cuatro impedancias Z_1 a Z_4 . El transformador tiene una relación de vueltas a .

Figura 71. Circuito real que muestra los voltajes reales y corrientes reales



Podemos reflejar progresivamente las impedancias del secundario al primario, como se muestra las figuras siguientes:

Figura 72. a) Impedancia Z_2 desplazada al lado del primario, observe los cambios correspondientes de E_2 e I_2 ; b) Impedancia Z_3 desplazada al lado del primario, observe los cambios correspondientes de E_3 e I_3 ; c) Impedancia Z_4 desplazada al lado del primario, observe los cambios correspondientes de E_4 e I_4 , ahora las corrientes en T son cero; d) Ahora todas las impedancias se encuentran del lado del primario y ya no se requiere el transformador



1.8 Análisis de la regulación de tensión con diferentes tipos de cargas

Puesto que el transformador real tiene impedancias en serie en su interior, su tensión de salida varía con la carga, aun si la tensión de alimentación se mantiene constante.

Para comparar cómodamente los transformadores, en cuanto a esto, se acostumbra definir una cantidad llamada regulación de voltaje (RV). Si se elimina la carga, el voltaje secundario en las terminales se altera debido al cambio en las caídas de voltaje a través de las resistencias en el devanado y las reactancias de dispersión. Una cantidad interesante es el cambio neto en el voltaje del devanado secundario al pasar de la condición sin carga hasta la de plena carga para el mismo voltaje del devanado primario.

Cuando el cambio se expresa en forma porcentual de su voltaje especificado o de plena carga se llama regulación del voltaje (RV) del transformador. Como porcentaje se expresa de la forma siguiente:

$$RV\% = \frac{V_{2(vacio)} - V_{2(PC)}}{V_{2(PC)}} \times 100\%$$

$V_{2(vacio)}$ y V_{2PC} son los valores efectivos (valor absoluto) de los voltajes sin carga y a plena carga en las terminales secundarias del transformador.

Si el circuito equivalente está visto desde el primario se tiene que en vacío $V_2 = V_1/\alpha$ la regulación de voltaje también puede expresarse como:

$$RV\% = \frac{\frac{V_1}{\alpha} - V_{2(PC)}}{V_{2(PC)}} \times 100\%$$

Generalmente se considera conveniente tener una regulación de voltaje tan pequeña como sea posible. Para un transformador ideal, la regulación del voltaje es igual a cero. Cuanta más pequeña sea tal regulación, mejor opera el transformador.

La regulación del voltaje depende del factor de potencia de la carga. Por consiguiente, se debe especificar el factor de potencia.

Si la carga es capacitiva, el voltaje sin carga puede exceder el voltaje a plena carga, en cuyo caso la regulación del voltaje es negativa.

1.9 Eficiencia de los transformadores a diferentes factores de potencia

La eficiencia es la razón que hay entre la potencia de salida y la de entrada. En un transformador práctico, la eficiencia siempre es inferior a 100% debido a los dos tipos de pérdidas: la magnética y la del cobre.

La pérdida magnética, a la que comúnmente se alude como pérdida en el núcleo, consiste en una pérdida por corriente parásita y una pérdida por histéresis. Para una densidad de flujo dada y la frecuencia de operación, la pérdida por corriente parásita puede reducirse al mínimo por medio de laminaciones muy delgadas. La pérdida por histéresis depende de las características magnéticas del tipo de acero que se utilice para elaborar el núcleo magnético. Como el flujo Φ_m , en el núcleo de un transformador es prácticamente constante para todas las condiciones de carga, la pérdida (magnética) en el núcleo P_m es esencialmente constante. Por ello la pérdida en el núcleo se llama pérdida fija.

La pérdida en el cobre (conocida también como pérdida I^2R o pérdida de potencia eléctrica) comprende la potencia disipada por los devanados primario y secundario. La pérdida en el cobre P_{Cu} varía con el cuadrado de la corriente en cada devanado. Por tanto, conforme se incrementa la carga también lo hace la pérdida en el cobre. Ése es el porqué la pérdida en el cobre también se conoce como pérdida variable.

La potencia de salida se obtiene restando la pérdida en el núcleo y la pérdida del cobre de la potencia de entrada. Esto implica que también es posible obtener la potencia de entrada sumando la pérdida en el núcleo y la pérdida en el cobre a la potencia de salida. El flujo de potencia de la entrada a la salida puede destacarse mediante un diagrama de una sola línea, denominado diagrama de flujo de potencia. En la figura siguiente se muestra un diagrama de flujo de potencia de un transformador.

Sin carga, la eficiencia de un transformador es igual a cero, y se incrementa con el aumento de la carga y alcanza un valor máximo. Cualquier incremento adicional en la carga hará que disminuya la eficiencia del transformador. Por tanto, hay una carga definida que supone la eficiencia máxima del transformador.

Considerando un circuito equivalente aproximado de un transformador como se observa desde el lado primario. La corriente de carga equivalente y el voltaje de la carga es el lado primario son $I_p \angle \theta$ y a V_2 . La potencia de salida

es:

$$P_O = a V_2 I_P \cos\theta$$

y la pérdida en el cobre es:

$$P_{Cu} = I_P^2 R_{e1}$$

Si la pérdida en el núcleo es P_m , entonces la potencia de entrada es

$$P_{in} = aV_2 I_P \cos\theta + P_m + I_P^2 R_{e1}$$

Así, la eficiencia del transformador es

$$\eta = \frac{aV_2 I_P \cos\theta}{aV_2 I_P \cos\theta + P_m + I_P^2 R_{e1}}$$

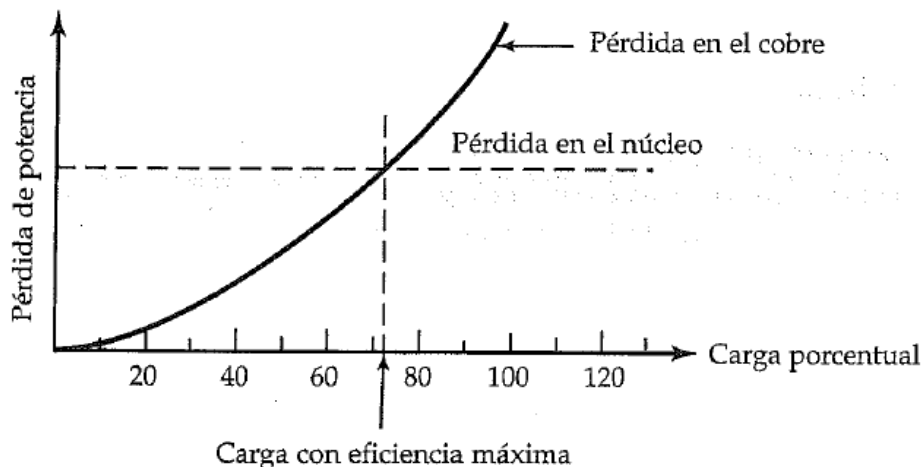
Si se deriva con respecto a la corriente de la carga I_P y se iguala a cero la derivada se obtiene

$$I_{P\eta}^2 R_{e1} = P_m$$

Donde $I_{P\eta}$ es la corriente de carga en el lado primario con la eficiencia máxima.

Con esto se establece que la eficiencia de un transformador es máxima cuando la pérdida en el cobre es igual a la pérdida (magnética) en el núcleo. En otras palabras, un transformador opera a su eficiencia máxima cuando la curva de pérdida en el cobre interseca la curva de pérdida en el núcleo. (Figura 73)

Figura 73. Pérdidas en un transformador



Despejando $I_{P\eta}$ quedaría

$$I_{P\eta} = \sqrt{\frac{P_m}{R_{e1}}}$$

Si I_{fp1} es la corriente a plena carga en el lado primario, entonces la ecuación anterior también puede escribirse como

$$I_{P\eta} = I_{fp1} \sqrt{\frac{P_m}{I_{fp1}^2 R_{e1}}}$$

O

$$I_{P\eta} = I_{fp1} \sqrt{\frac{P_m}{P_{Cuf1}}}$$

Donde $P_{Cuf1} = I_{fp1}^2 R_{e1}$ es la pérdida en el cobre a plena carga

Al multiplicar ambos miembros de la ecuación anterior por el voltaje de la carga especificada en el lado primario (a V_2) se obtiene la especificación del transformador con máxima eficiencia en términos de su especificación nominal, como

$$VA|_{\text{máx. ef.}} = VA|_{\text{especificada}} \sqrt{\frac{\text{Pérdida magnética}}{\text{Pérdida en el cobre a plena carga}}}$$

1.10 Autotransformadores monofásicos

Hasta el momento se ha considerado el transformador con dos devanados aislados eléctricamente el primario del secundario y los dos devanados están acoplados magnéticamente por medio de un núcleo común, en consecuencia, el principio de inducción magnética es responsable de la transferencia de energía del primario al secundario.

Cuando dos devanados de un transformador están conectados eléctricamente se tiene un autotransformador. Un autotransformador puede tener un solo

devanado continuo común al primario y al secundario. En forma alternativa, es posible conectar dos o más bobinas devanadas en el mismo núcleo magnético para formar un autotransformador. El principio de operación es el mismo en cualquier caso.

La conexión eléctrica directa entre los devanados asegura que una parte de la energía se transfiere del primario al secundario por conducción. El acoplamiento magnético entre los devanados garantiza que parte de la energía también se transfiere por inducción.

Los autotransformadores pueden utilizarse para casi todas las aplicaciones en las que se emplea un transformador de dos devanados. La única desventaja es la pérdida de aislamiento eléctrico entre el lado de alto voltaje y el lado de bajo voltaje del autotransformador. Enseguida se enumeran algunas de las ventajas de un autotransformador en comparación con el transformador de dos devanados.

1. Es más barato en cuanto a costo inicial que un transformador convencional de dos devanados con especificaciones semejantes.
2. Entrega más potencia que un transformador de dos devanados con dimensiones físicas semejantes.
3. Para especificaciones de potencia similares, un autotransformador es más eficiente que un transformador de dos devanados.
4. Un autotransformador requiere una corriente de excitación más baja que un transformador de dos devanados para establecer el mismo flujo en el núcleo.

Empezando a analizar un autotransformador conectando un transformador ideal de dos devanados como autotransformador. Hay cuatro formas posibles de conectar un transformador de dos devanados como autotransformador. *(Figura 74)*

Considerando el circuito mostrado en la *(Figura 74 a)* . El transformador de dos devanados está conectado como un autotransformador reductor. Observe que el devanado secundario del transformador de dos devanados es ahora el devanado en común del autotransformador. En condiciones ideales se tiene:

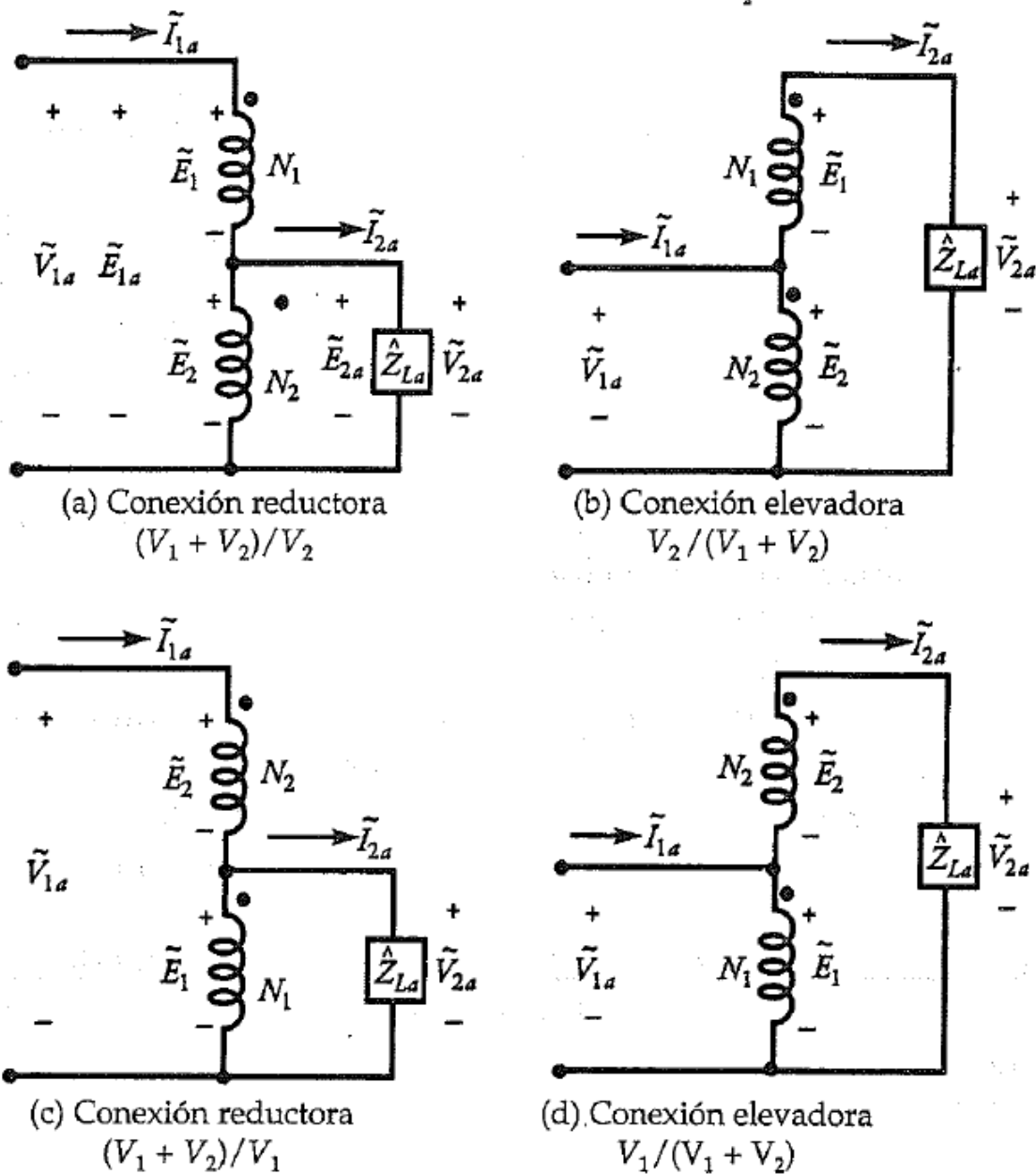
$$\widetilde{V}_{1a} = \widetilde{E}_{1a} = \widetilde{E}_1 + \widetilde{E}_2$$

$$\widetilde{V}_{2a} = \widetilde{E}_{2a} = \widetilde{E}_2$$

$$\frac{\widetilde{V}_{1a}}{\widetilde{V}_{2a}} = \frac{\widetilde{E}_{1a}}{\widetilde{E}_{2a}} = \frac{\widetilde{E}_1 + \widetilde{E}_2}{\widetilde{E}_2} = \frac{N_1 + N_2}{N_2} = 1 + a = a_T$$

Donde $a = \frac{N_1}{N_2}$ es la relación a de un transformador de dos devanados y $a_T = 1 + a$ es la relación a del autotransformador en estudio. La relación a para las demás conexiones podría calcularse de la misma forma. Advierta que a_T no es la misma para todas las conexiones.

Figura 74. Formas posibles de conectar un transformador de dos devanados como autotransformador



En un autotransformador ideal, la fuerza magnetomotriz (fmm) primaria debe ser igual y opuesta a la fmm secundaria. Es decir,

$$(N_1 + N_2)I_{1d} = N_2I_{2d}$$

De esta ecuación se obtiene

$$\frac{I_{2a}}{I_{1a}} = \frac{N_1 + N_2}{N_2} = 1 + a = a_T$$

Luego, la potencia aparente suministrada por un transformador ideal a la carga S_{oa} , es

$$\begin{aligned} S_{oa} &= V_{2d} I_{2a} \\ &= \left[\frac{V_{1a}}{a_T} \right] [a_T I_{1a}] \\ &= V_{1a} I_{1a} \\ &= S_{ina} \end{aligned}$$

Donde S_{ina} es la potencia de entrada aparente al autotransformador. La ecuación anterior sencillamente indica que en condiciones ideales la potencia de entrada es igual a la potencia de salida.

A continuación vamos a expresar la potencia de salida aparente en términos de los parámetros de un transformador de dos devanados. Para la configuración en estudio,

$$V_{2a} = V_2$$

$$I_{2a} = a_T I_{1a} = (a + 1) I_{1a}$$

Sin embargo, para la carga especificada, $I_{1a} = I_1$. Luego,

$$\begin{aligned} S_{oa} &= V_2 I_1 (a + 1) \\ &= V_2 I_2 \frac{a + 1}{a} = S_o \left[1 + \frac{1}{a} \right] \end{aligned}$$

Donde $S_o = V_2 I_2$ es la potencia de salida aparente de un transformador de dos devanados. Esta potencia está asociada con el devanado común del autotransformador. Por tanto, ésta es la potencia transferida por inducción a la carga en un autotransformador. El resto de la potencia, $\frac{S_o}{a}$ en este caso, se conduce directamente de la fuente a la carga y se denomina potencia de conducción. Por ende, un transformador de dos devanados entrega más potencia cuando se conecta como autotransformador.

Autotransformador no ideal.

El circuito equivalente de un autotransformador no ideal puede obtenerse incluyendo la resistencia de los devanados, las reactancias de dispersión, la resistencia de pérdida en el núcleo y la reactancia de magnetización, como se ilustra en la Figura .

Figura 75. Transformador de dos devanados conectado como autotransformador

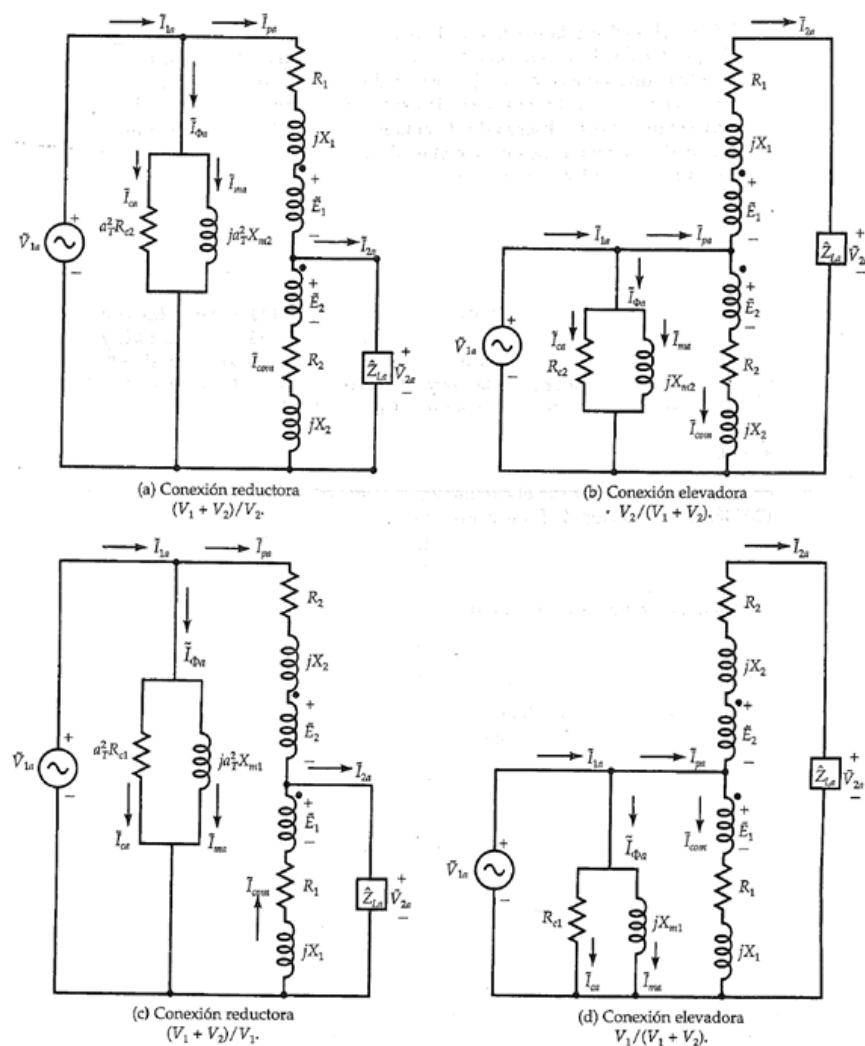
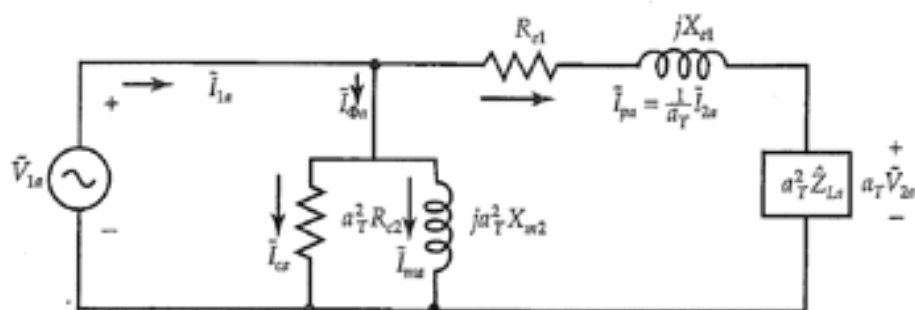
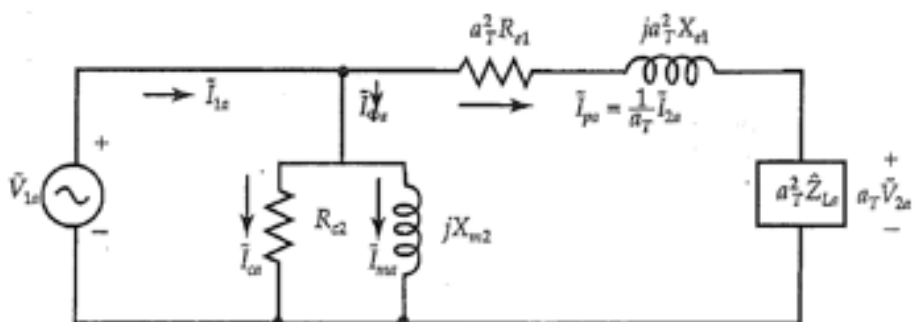
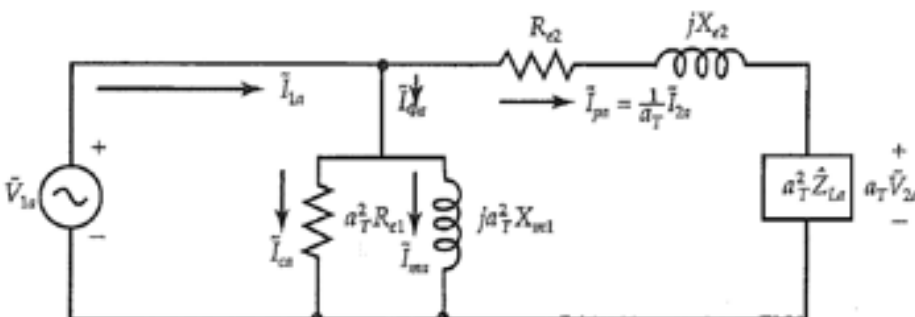
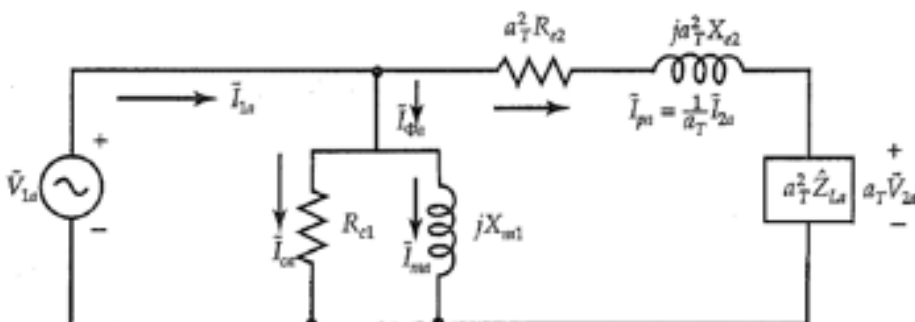


Figura 76. Circuitos equivalentes de un autotransformador

(a) Circuito equivalente de un autotransformador reductor $(V_1 + V_2)/V_2$ observado desde el lado primario.(b) Circuito equivalente de un autotransformador elvador $V_2/(V_1 + V_2)$ observado desde el lado primario.(c) Circuito equivalente de un autotransformador reductor $(V_1 + V_2)/V_1$ observado desde el lado primario.(d) Circuito equivalente de un autotransformador elevador $V_1/(V_1 + V_2)$ observado desde el lado primario.

1.11 Conexiones de transformadores monofásicos en arreglos trifásicos

La mayor parte de la potencia que se genera y transmite a largas distancias es del tipo trifásico, pueden utilizarse tres transformadores monofásicos exactamente iguales para formar un transformador trifásico.

Sin embargo, por razones económicas, un transformador trifásico se diseña para tener sus seis devanados en un núcleo magnético común. Un transformador trifásico con núcleo magnético común también puede ser del tipo núcleo o acorazado.

Puesto que el flujo de tercera armónica que crea cada devanado está en fase, es preferible un transformador de tipo acorazado porque proporciona una trayectoria externa para dicho flujo. En otras palabras, la forma de las ondas del voltaje resulta menos distorsionadas para un transformador tipo acorazado que para un tipo núcleo con especificaciones semejantes.

Los tres devanados en cada lado de un transformador trifásico pueden estar conectados en estrella (Y) o en delta (Δ). Por tanto, hay cuatro formas posibles de conectar un transformador trifásico: Δ/Δ , Y/Y, Y/ Δ , Δ/Y y.

Conexión Delta-Delta (Δ/Δ)

Esta conexión, representada en la *Figura 77* se distingue porque los arrollamientos están conectados directamente a dos hilos de la línea en ambos lados, lo cual determina de manera precisa la tensión aplicada y desarrollada en cada arrollamiento.

Además, los tres enrollamientos de cada lado forman un circuito cerrado por el cual puede fluir una corriente ficticia que tenga igual sentido en las tres fases al mismo tiempo, como lo es la tercera armónica.

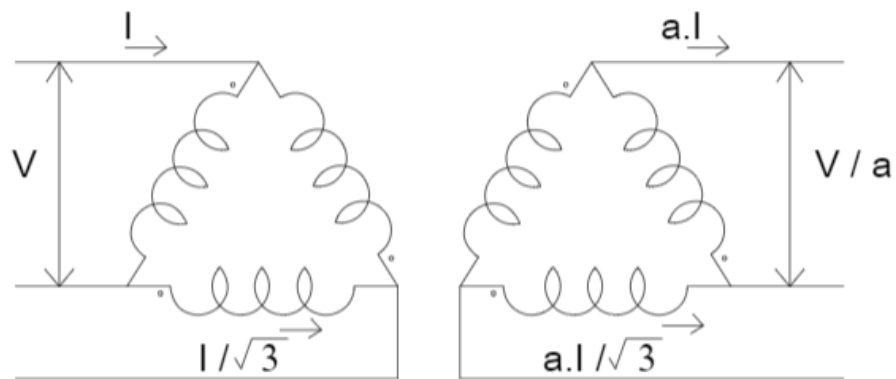
Ventajas:

- Poder usar conductores de menor diámetro al operar a tensión más alta.
- Anular las terceras armónicas.

Desventajas:

- Al no permitir conductor neutro, no permite la distribución con dos tensiones alternativas.

Figura 77. Conexión Delta - Delta



Conexión Delta – Estrella (Δ / Y)

La conexión Delta- Estrella, de las más empleadas, se utiliza en los sistemas de potencia para elevar voltajes de generación o transmisión, en los sistemas de distribución para alimentación de fuerza y alumbrado.

Esta conexión se emplea en aquellos sistemas de transmisión en que es necesario elevar voltajes de generación. En sistemas de distribución es conveniente su uso debido a que se pueden tener dos voltajes diferentes (entre fase y neutro). *Figura 78*

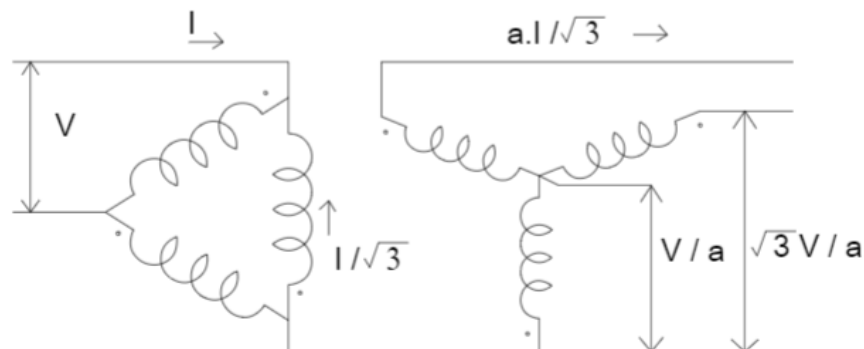
Ventajas:

- No le afectan las armónicas.
- Acepta bastante bien las cargas desequilibradas por el neutro secundario.

Desventajas:

- Debido a la conexión estrella en su lado secundario presenta una falta de simetría respecto a las corrientes y tensiones.

Figura 78. Conexión Delta - Estrella



Conexión Estrella – Estrella (Y / Y)

Esta conexión es la más usada en sistemas de alta tensión, debido a que la tensión en cada bobina es solo 1.73 veces menor que la tensión de línea. Y debido a que implica corrientes más elevadas, obliga al uso de conductores de mayor diámetro, lo que hace al transformador mas apto para tolerar eventuales corto circuito.

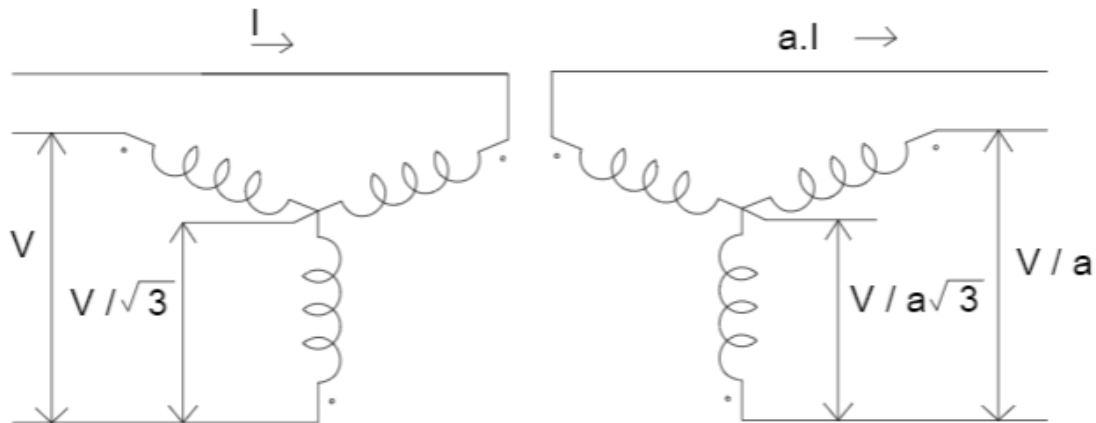
Ventajas:

- Al permitir el conductor neutro, logra que todo el sistema tenga respecto a tierra una tensión prefijada.

Desventajas:

- La afectan mucho las armónicas.
- En caso de faltar uno de los transformadores el resto es incapaz de alimentar carga trifásica.

Figura 79. Conexión Estrella - Estrella



Conexión Estrella – Delta (Y / Δ)

Se utiliza esta conexión en los sistemas de transmisión de las subestaciones receptoras cuya función es reducir voltajes. En sistemas de distribución es poco usual; se emplea en algunas ocasiones para distribución rural a 20 kV.

Una razón de ello es que se tiene un neutro para aterrizar el lado de alto voltaje lo cual es conveniente y tiene grandes ventajas. [Figura 80](#)

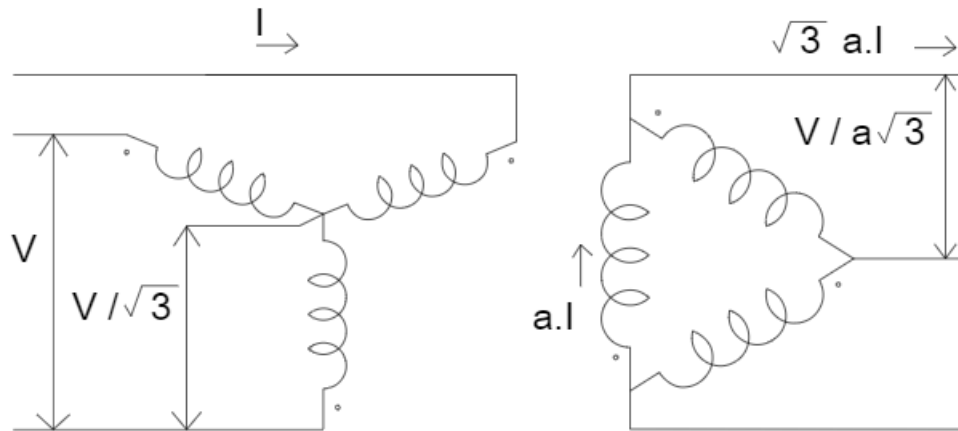
Ventajas:

- La delta anula el efecto de las armónicas.

Desventajas:

- Debido a la conexión estrella en su lado primario presenta una falta de simetría respecto a las corrientes y tensiones.

Figura 80. Conexión Estrella - Delta



1.12 Conexiones de autotransformadores monofásicos en arreglos trifásicos

En el Autotransformador dos devanados no sólo están acoplados magnéticamente sino también eléctricamente. La entrada al transformador es constante pero la salida puede ser variada variando las tomas.

El autotransformador es a la vez el más simple y el más fascinante de las conexiones que implican dos devanados. Se utiliza ampliamente en sistemas de transmisión de potencia a granel debido a su capacidad de multiplicar la capacidad efectiva de kVA de un transformador.

Una de las limitaciones de la conexión del autotransformador es que no todos los tipos de conexiones trifásicas son posibles. Por ejemplo, las conexiones Δ/Y y Y/Δ no son posibles utilizando el autotransformador.

La conexión Y/Y debe compartir un neutro común entre las terminales de alto y bajo voltaje, por lo que los neutros de los circuitos conectados a estos devanados no se pueden aislar.

Teóricamente es posible la conexión del autotransformador Δ / Δ , sin embargo, esto creará un cambio de fase peculiar. El cambio de fase es función de la relación entre los voltajes primario y secundario y se puede calcular a partir del diagrama vectorial.

Este cambio de fase no se puede cambiar ni eliminar y por esta razón, los autotransformadores son muy raramente conectados como transformadores Δ / Δ .

Figura 81. Autotransformador



Ventajas del autotransformador

1. Hay ahorros considerables en tamaño y peso
2. Hay menores pérdidas para una capacidad determinada de kVA
3. El uso de una conexión de autotransformador brinda la oportunidad de lograr series de impedancias más bajas y una mejor regulación. Su eficiencia es mayor en comparación de un transformador convencional
4. Su tamaño es relativamente muy pequeño
5. La regulación de voltaje del autotransformador es mucho mejor
6. Menos costo

7. Bajos requisitos de corriente de excitación
8. Se utiliza menos cobre en su diseño y construcción
9. El transformador convencional, el valor de aumento o reducción de voltaje es fijo mientras que en autotransformador, podemos variar el voltaje de salida según los requisitos de salida y podemos aumentar o disminuir suavemente el valor según lo que se requiera

Desventajas del autotransformador

1. La conexión del autotransformador no está disponible con determinadas conexiones trifásicas.
2. Pueden resultar corrientes de cortocircuito más altas (y posiblemente más dañinas) debido a una impedancia en serie más baja.
3. Los cortocircuitos pueden generar voltajes significativamente más altos que los voltajes de operación que en los devanados de un autotransformador.
4. Para el mismo aumento de voltaje en las terminales de línea, el voltaje en el inducido son mayores para un autotransformador que para un transformador convencional.
5. El autotransformador consta de un solo devanado alrededor de un núcleo de hierro, lo que crea un cambio de voltaje desde un extremo al otro. En otras palabras, la autoinductancia del devanado alrededor del núcleo cambia el potencial de voltaje, pero no hay aislamiento de los extremos de alto y bajo voltaje del devanado. Por tanto, cualquier ruido y otra anomalía de voltaje que llegue de un lado se transmite al otro. Por esa razón, los autotransformadores generalmente solo se usan cuando ya existen algún tipo de filtrado o acondicionamiento, como en aplicaciones electrónicas, o el dispositivo no se vea afectado por anomalías, como un motor de CA durante el arranque.

Aplicaciones

- Utilizado tanto en motores síncronos como en motores de inducción
- En laboratorios de prueba de aparatos eléctricos ya que el voltaje puede ser suave y variado continuamente.
- Aplicación como amplificadores en alimentadores de CA para aumentar los niveles de voltaje

Uso en subestaciones de Alto Voltaje por las siguientes razones:

- Si utilizamos un transformador normal, el tamaño del transformador será muy alto, lo que genera mucho peso, más cobre y un alto costo.
- El devanado terciario utilizado en el autotransformador equilibra las

cargas desequilibradas monofásicas conectadas al secundario y no pasa estas corrientes desequilibradas al lado primario. De esta forma se eliminan los armónicos y el desequilibrio de tensión.

- El devanado terciario en el autotransformador equilibra las vueltas del amplificador de modo que el autotransformador logra una separación magnética como dos transformadores de devanado.

VIDEO: Armado de transformador

<https://youtu.be/Za6hZSjSjBg>

<https://youtu.be/Q69QOwVbzjY>

VIDEO: Reparación transformador

https://youtu.be/7G5ce5dN_C4

Ejercicios del Tema 1

EJERCICIO 1.

En la fabricación de un transformador monofásico se han utilizado 1.750 espiras en el primario y 2.500 en el secundario. El flujo máximo que aparece en el núcleo magnético es de 3 mWb. Calcular las tensiones en el primario y en el secundario para una frecuencia de 50 Hz, así como la relación de transformación.

Solución:

3 milliweber son = 0,003 Webers (unidad del flujo)

$$E_1 = 4,44 \times 50 \times 1.750 \times 0.003 = 1.165V$$

$$E_2 = 4,44 \times 50 \times 2.500 \times 0,003 = 1.665V$$

Lo cual nos indica que es un transformador elevador de tensión, siendo su relación de transformación:

$$m = N_1 / N_2 = 1750 / 2.500 = 0,7$$

Si lo hacemos con las fuerzas electromotrices tendrá que darnos el mismo resultado:

$$m = E_1 / E_2 = 1.165 / 1665 = 0,7$$

EJERCICIO 2.

Un transformador reductor de 230/110 V proporciona energía a una motobomba de 6 kW, 110 V, $\cos \phi$ 0,8.

Suponiendo la corriente de vacío y las pérdidas despreciables, determinar la intensidad por el primario y por el secundario, así como la relación de transformación del transformador.

¿Cuál es la potencia aparente que suministra el transformador?

Solución:

Calculamos primero la corriente por el secundario:

$P_2 = V_2 \times I_2 \times \cos \varphi$; despejando I_2 tenemos:

$$I_2 = P_2 / (V_2 \times \cos \varphi) = 6.000 / (110 \times 0,8) = 68,18^a$$

La relación de transformación es:

$V_1/V_2 = I_2/I_1$; despejando I_1 tenemos:

$$I_1 = (I_2 \times V_2) / V_1 = (68,18 \times 110) / 230 = 32,6^a$$

La relación de transformación es: $V_1/V_2 = 230/110 = 2,09$

La potencia aparente que suministra el transformador es:

$$S = V_2 \times I_2 = 110 \times 68,18 = 7.499,8\text{VA}$$

que será igual que la del primario por ser ideal:

$$S = V_1 \times I_1 = 230 \times 32,6 = 7.499 \text{ VA}$$

EJERCICIO 3.

Se requiere un autotransformador para aumentar un voltaje de 220 V a 250 V. El número total de bobinas que encienden el devanado principal del transformador es 2000. Determine la posición del punto de toma primario, las corrientes primarias y secundarias cuando la salida tiene una potencia de 10 kVA y la economía de cobre ahorrada.

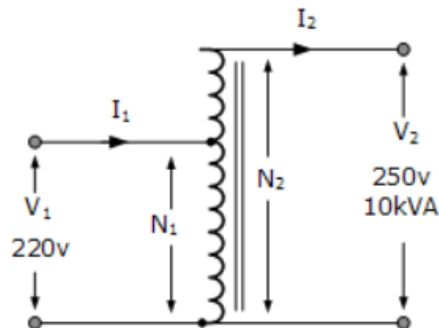


Figura 1.1 Autotransformador

Solución:

$$\frac{N_P}{N_S} = \frac{V_P}{V_S}$$

$$N_1 = (N_2 \times V_1) / V_2 = \frac{2000 \times 220}{250} = 1760 \text{ vuelta}$$

$$I_2 = \frac{VA}{V_2} = \frac{1000}{250} = 40 \text{ A}$$

$$P_1 = P_2 = V_1 I_1 = V_2 I_2$$

Despejando I_1

$$I_1 = \frac{V_2 I_2}{V_1} = \frac{(250)(40)}{220} = 45.4 \text{ A}$$

EJERCICIO 4.

Un transformador trifásico se ensambla conectando tres transformadores monofásicos de 720 VA y 360/120 V. Las constantes para cada transformador son $R_H = 18.9 \, \Omega$, $X_H = 21.6 \, \Omega$, $R_L = 2.1 \, \Omega$, $X_L = 2.4 \, \Omega$, $R_{cH} = 8.64 \, k\Omega$ y $X_{mH} = 6.84 \, k\Omega$. Para la conexión Y/Y, determine el voltaje nominal y las especificaciones de potencia del transformador trifásico. Trace la disposición de los devanados y el circuito equivalente por fase para esta configuración.

Solución:

La especificación de potencia de un transformador trifásico para cada conexión es:

$$S_{3\phi} = 3 \times 720 = 2160 \text{ VA} = 2.16 \text{ kVA}$$

Para una conexión Y/Y, los valores nominales de los voltajes de línea en los lados primario y secundario son:

$$V_{1L} = \sqrt{3} \times 360 = 623.54 \text{ V}$$

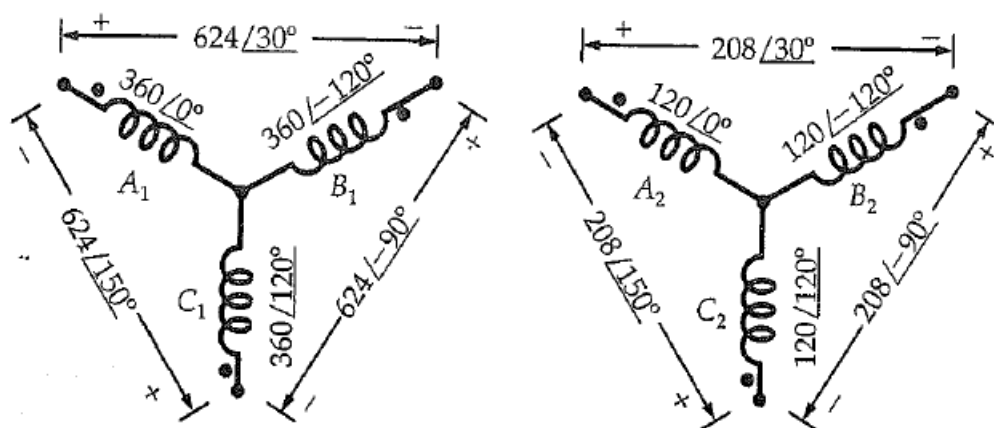
$$V_{2L} = \sqrt{3} \times 120 = 207.85 \text{ V}$$

Las especificaciones nominales de un transformador trifásico son:

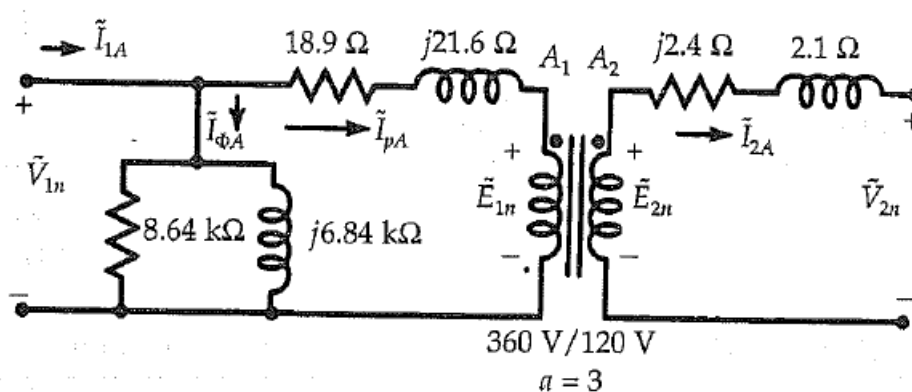
2.16 kVA

624/208 V

Conexión Y/Y



(a) Disposición de los devanados, así como voltajes de fase y de línea



(b) Circuito equivalente por fase

Figura 1.2. a) Disposición de los devanados y b) Circuito equivalente por fase de un transformador trifásico conectado en Y/Y

Tema 2 Máquinas de corriente directa

Las máquinas de CD se han caracterizado, debido a la facilidad con la que se pueden controlar, por su gran variedad de aplicaciones y su versatilidad en campos donde se requiere de un amplio rango de velocidades. Mediante diversas combinaciones de sus devanados se puede hacer que exhiban una amplia variedad de curvas características volt-ampere y velocidad-par, tanto para funcionamiento dinámico como para estado estable. Este tema se complementará con prácticas de laboratorio donde se implementara con los diferentes tipos de excitación.

2.1 Componentes de las máquinas de CD

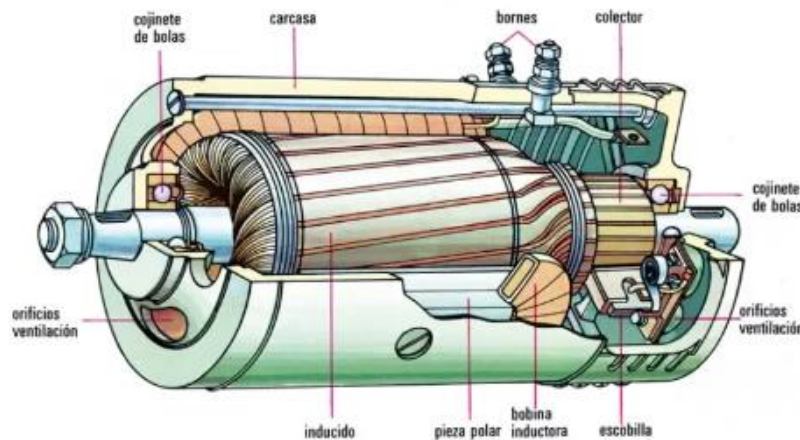
Un generador es una máquina eléctrica rotativa que transforma energía mecánica en energía eléctrica, lo consigue gracias a la interacción de sus componentes principales: el rotor (parte giratoria) y el estátor (parte estática). Cuando un generador eléctrico está en funcionamiento, una de las dos partes 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 82*

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 82. 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.

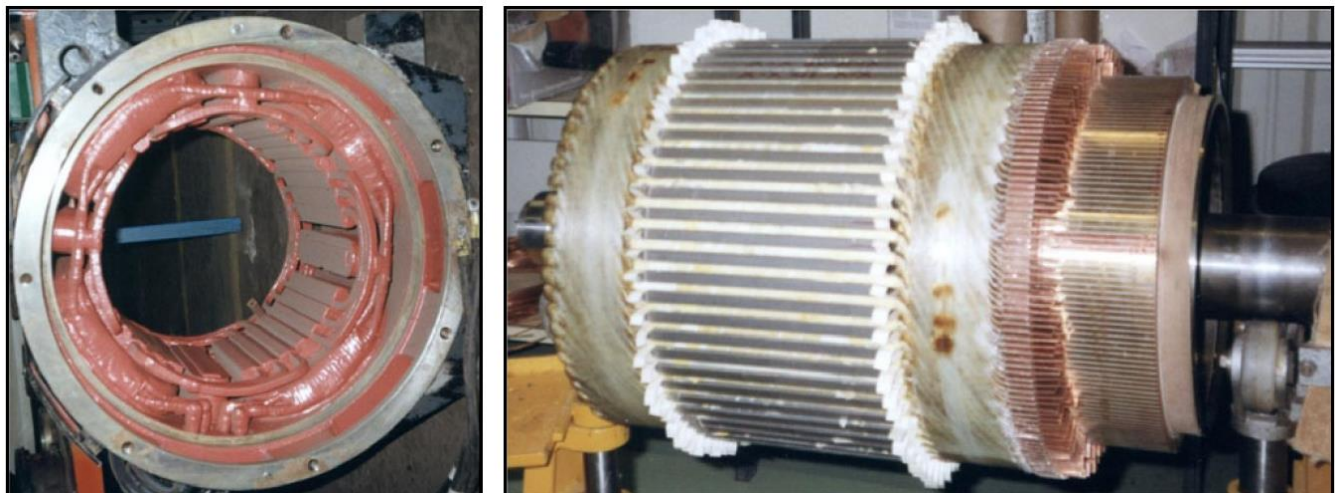
El devanado del campo serie, se conecta en serie con el devanado de la armadura y tiene comparativamente pocas vueltas de conductor grueso. Una máquina de cd puede tener ambos devanados del campo arrollados en el mismo polo.

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 83. 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 84](#)

Figura 84. Componentes de una máquina de corriente directa

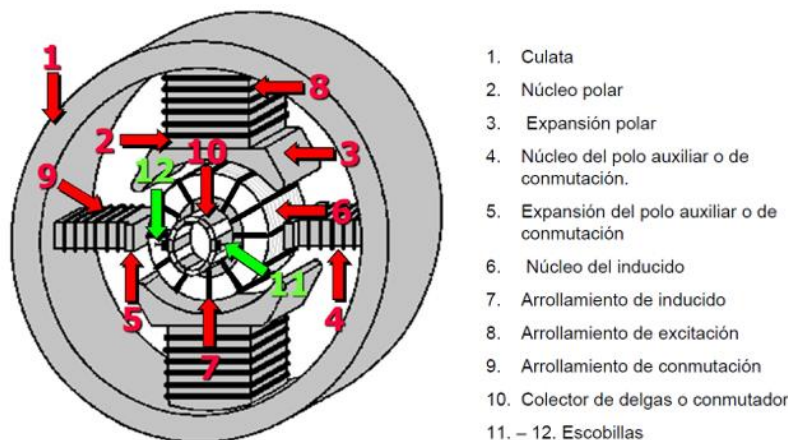
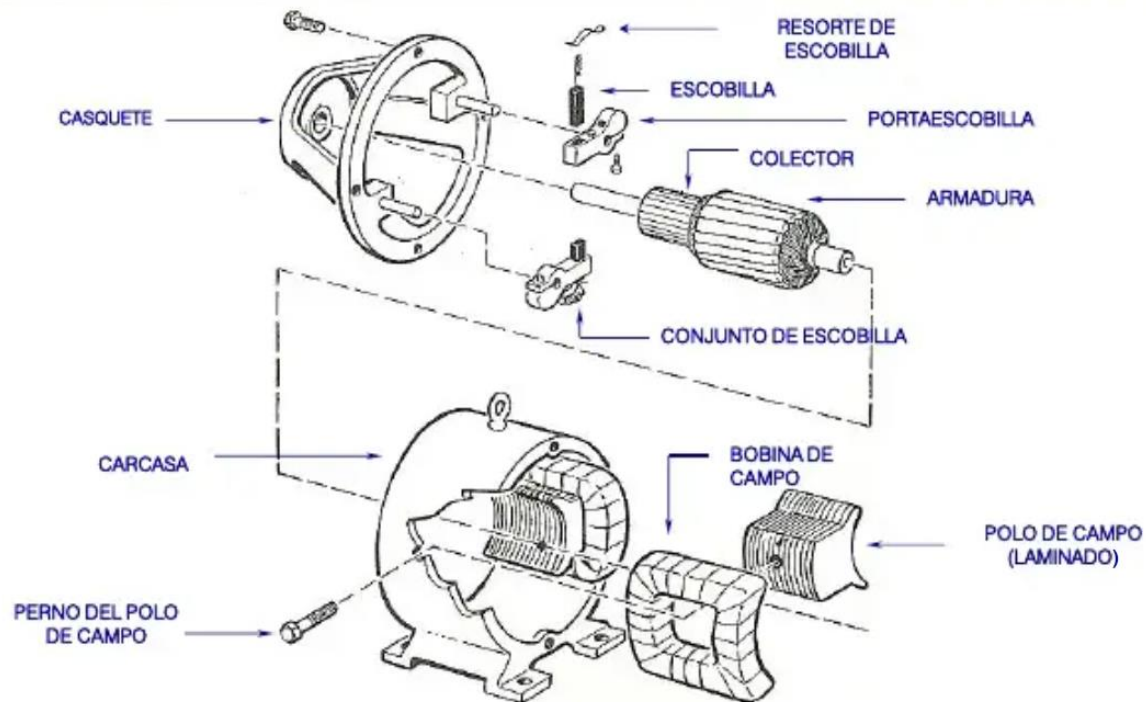


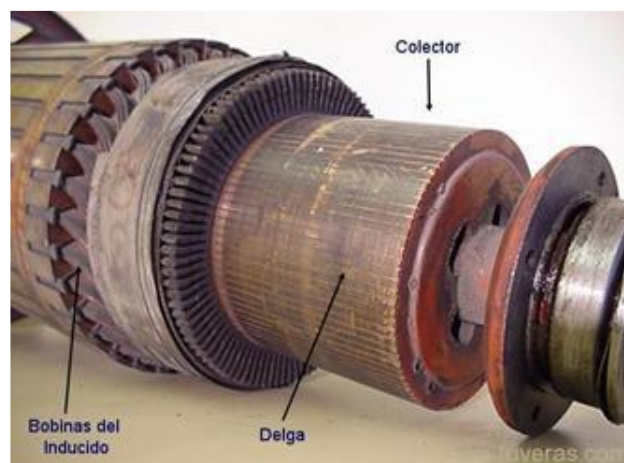
Figura 85. Máquina de corriente directa



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.

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 86. 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.

2.2 Principio operacional de las máquinas de C.D., como generador y como motor

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.

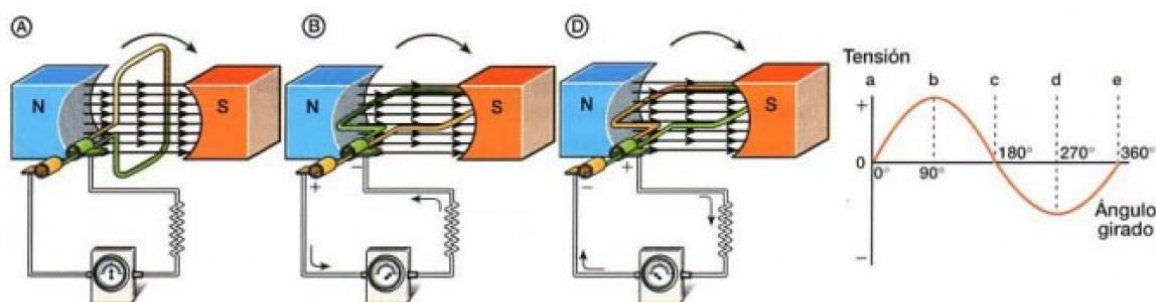
Cuando dentro de un campo magnético tenemos una espira por donde circula una corriente eléctrica aparecen un par de fuerzas que provocan que la espira gire alrededor de su eje. De esta misma manera, si dentro de un campo magnético introducimos una espira y la hacemos girar provocaremos la corriente inducida. 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.

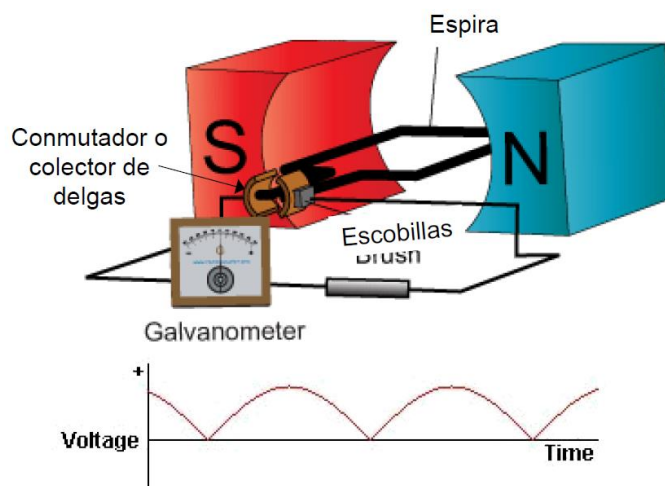
Figura 87. Comportamiento de una espira en el campo magnético, graficando la fem inducida



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.

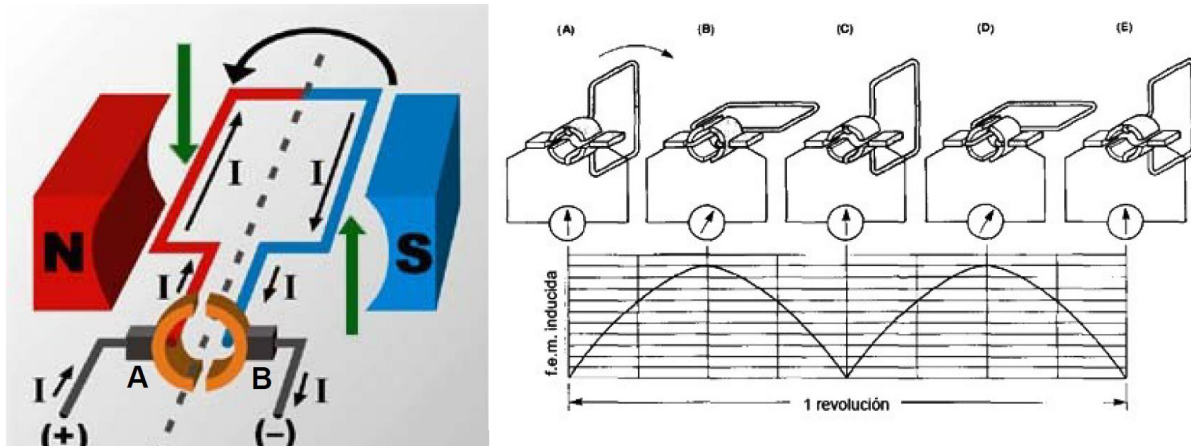
Figura 88. Comportamiento de una espira con conmutador



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 89. 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.

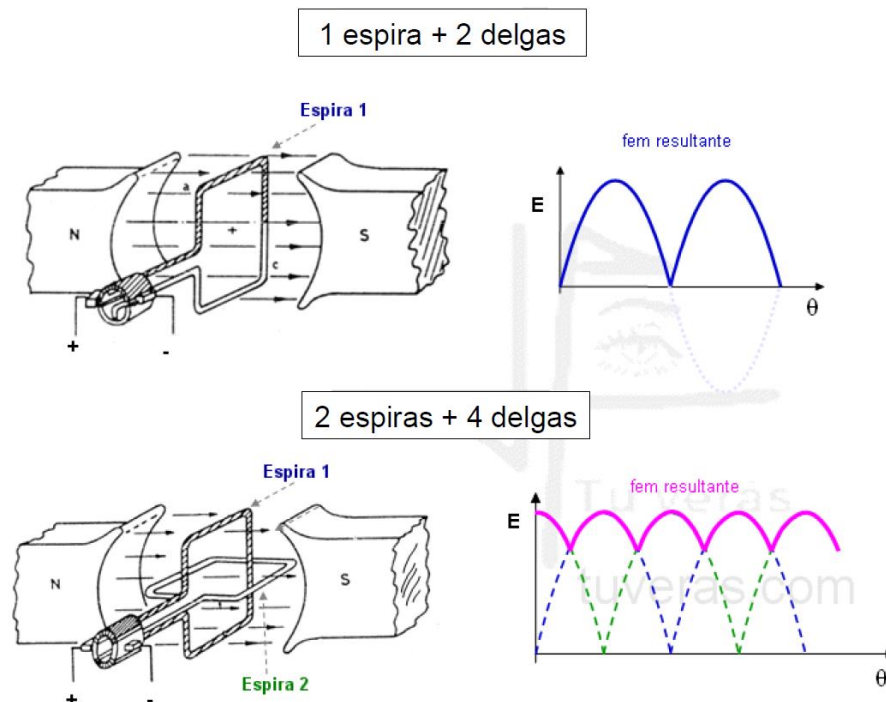
Esta conmutación en las dinamos se realiza a través del colector de delgas. Los anillos del colector están cortados debido a que por fuera de la espira la corriente siempre tiene que ir en el mismo sentido. A la hora de realizar esta conmutación existen diferentes problemas. Cuando el generador funciona 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 rectificadores de todas las bobinas en serie entre las escobillas y es ilustrado en la [Figura 90](#).

Figura 90. Voltajes de bobina rectificadas y voltaje resultante entre las escobillas en una máquina de cd



El valor medio de la fem producida en el inducido de la maquina 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:

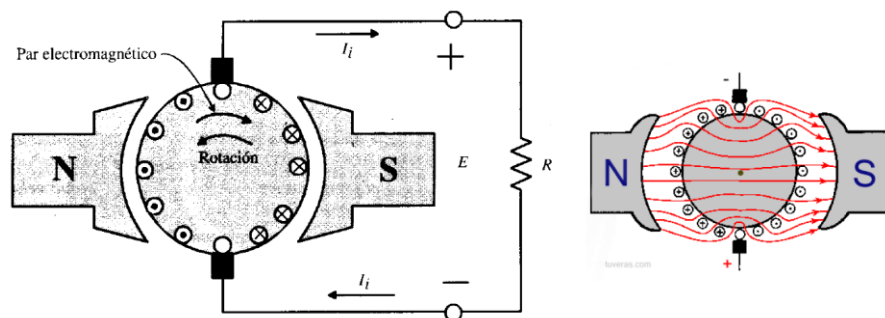
$$E = \frac{n}{60} Z \phi \frac{P}{c} = K_E n \phi$$

en la cual $K_E = \frac{Z}{60} \frac{p}{c}$ 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 91](#) 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 91. Máquina de cd funcionando como generador

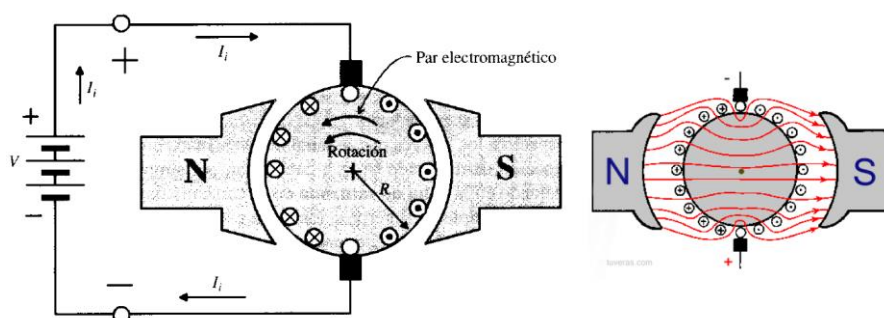


Cuando la máquina de cd funciona como motor, se debe aplicar una tensión de cd de alimentación al inducido, que provoca una corriente de circulación por los conductores de este devanado, cuyos sentidos se muestran en el esquema de la [Figura 92](#). La interacción de estas corrientes con el flujo inductor 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.

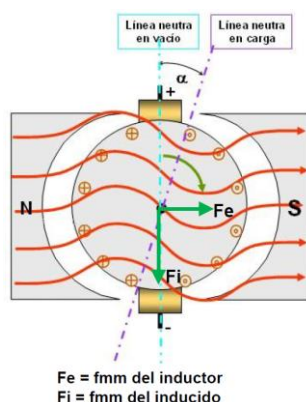
Figura 92. Máquina de cd funcionando como motor



Reacción de armadura.

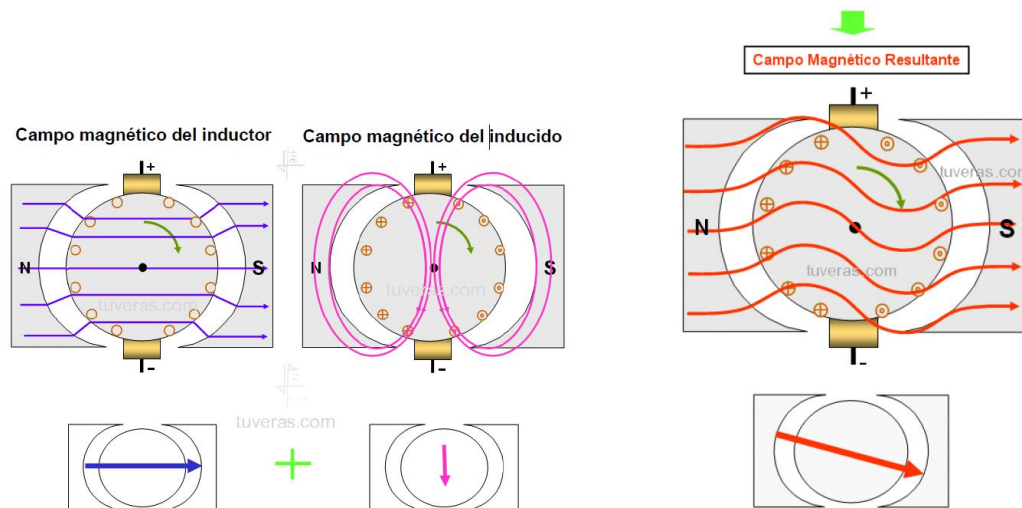
Cuando se cierra el circuito del inducido sobre una resistencia de carga aparece una corriente de circulación por los conductores del rotor que dan lugar a una fmm que combinada con la del estator producen el flujo resultante en el entrehierro de la máquina. Se conoce con el nombre de reacción del inducido 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 93) trabajando en la zona no saturada de su característica magnética.

Figura 93. Reacción de inducido en una máquina de cd



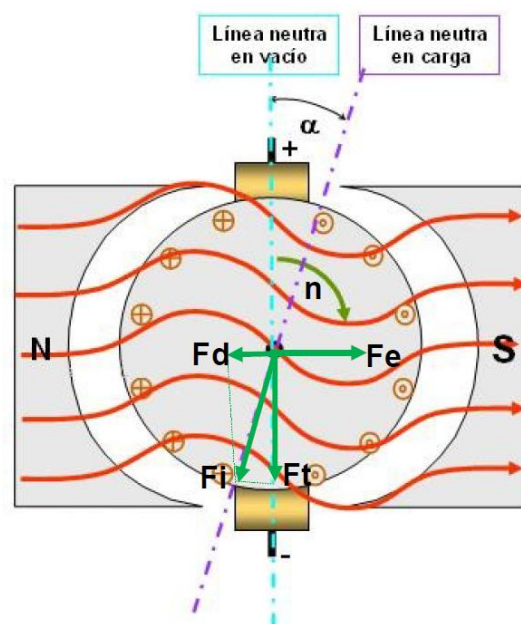
El flujo resultante, se obtendrá sumando las distribuciones del campo magnético que produce cada fmm actuando independientemente *Figura 94*.

Figura 94. 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 95*.

Figura 95. Comportamiento de la máquina de cd trabajando en vacío

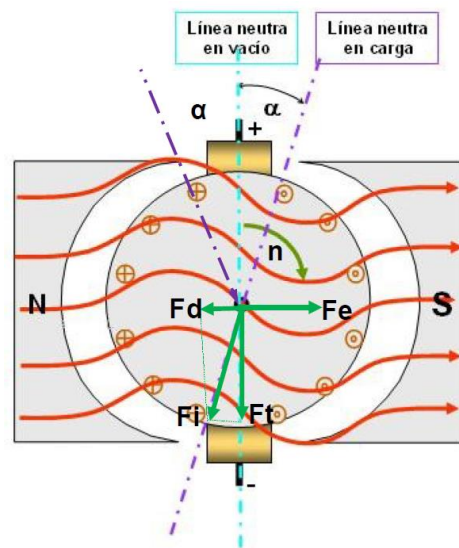


La máquina presentará una fmm de reacción del inducido F_i que coincide con el eje de las escobillas.

Esta F_i puede descomponerse en dos partes *Figura 96*:

- 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 96. Reacción del inducido cuando coincide con el eje de las escobillas



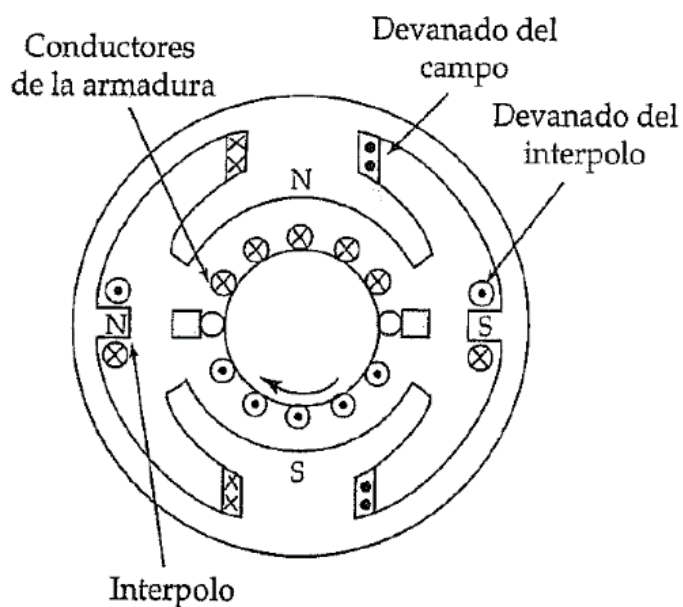
Cuando circula corriente por el inducido y la máquina funciona como generador la línea neutra magnética se adelanta un ángulo α respecto al sentido de giro.

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 neutra real. Se debe adelantar las escobillas cuando la máquina trabaja como generador y retrasar cuando trabaja como motor.

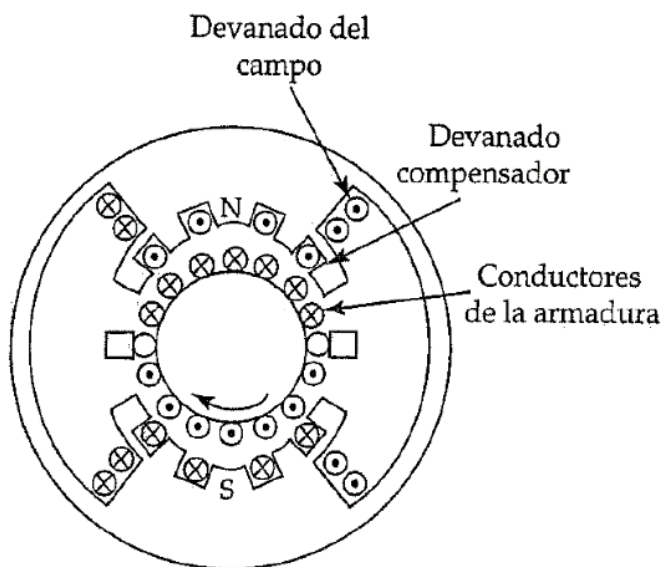
Para eliminar el desplazamiento de la línea neutra geométrica con las variaciones de carga y asegurar una mejor conmutación, se emplean los llamados polos auxiliares (interpolos o polos de conmutación) que se colocan en la línea neutra teórica, provistos de un devanado en serie con el inducido. *Figura 2.14*

Figura 97. Devanado de los interpolos de un generador de cc



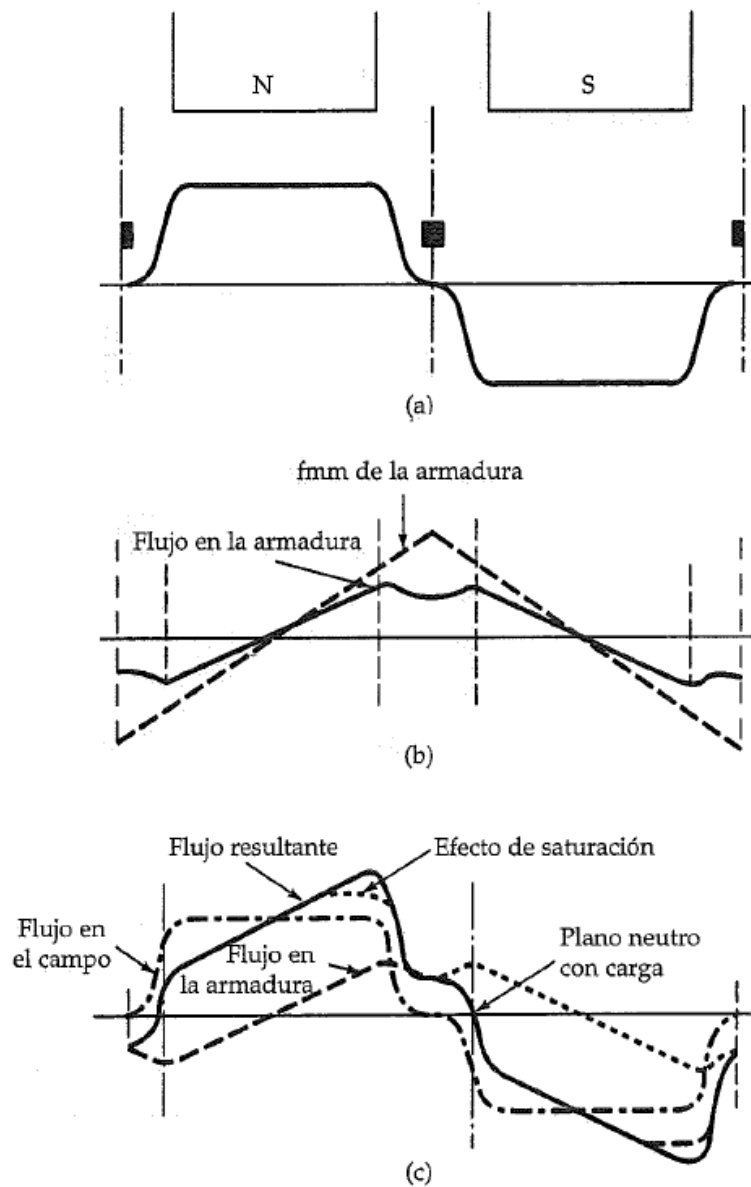
El devanado de conmutación produce un campo magnético opuesto al de la reacción transversal del inducido (armadura). [Figura 98](#)

Figura 98. 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 2.16](#)

Figura 99. (a) Flujo por polo sin carga. (b) Fuerza magnetomotriz (fmm) y el flujo debido a la reacción de la armadura. (c) Flujo resultante.



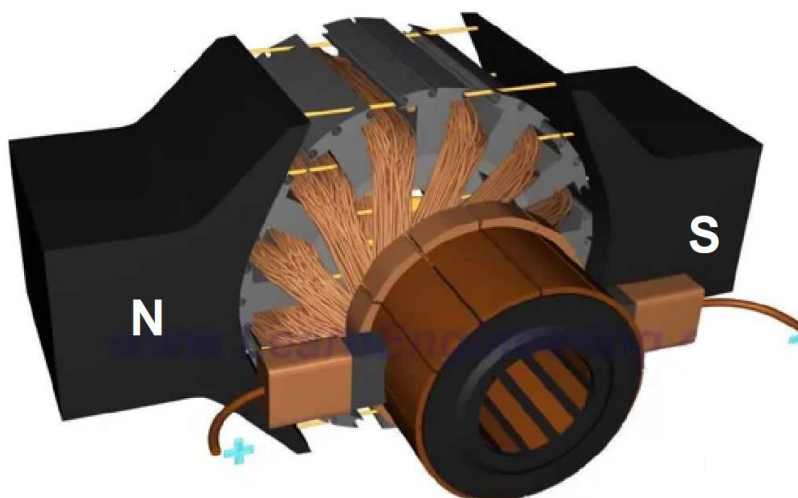
CONMUTACIÓN

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 100

Figura 100. Conmutador con escobillas de una máquina de cd

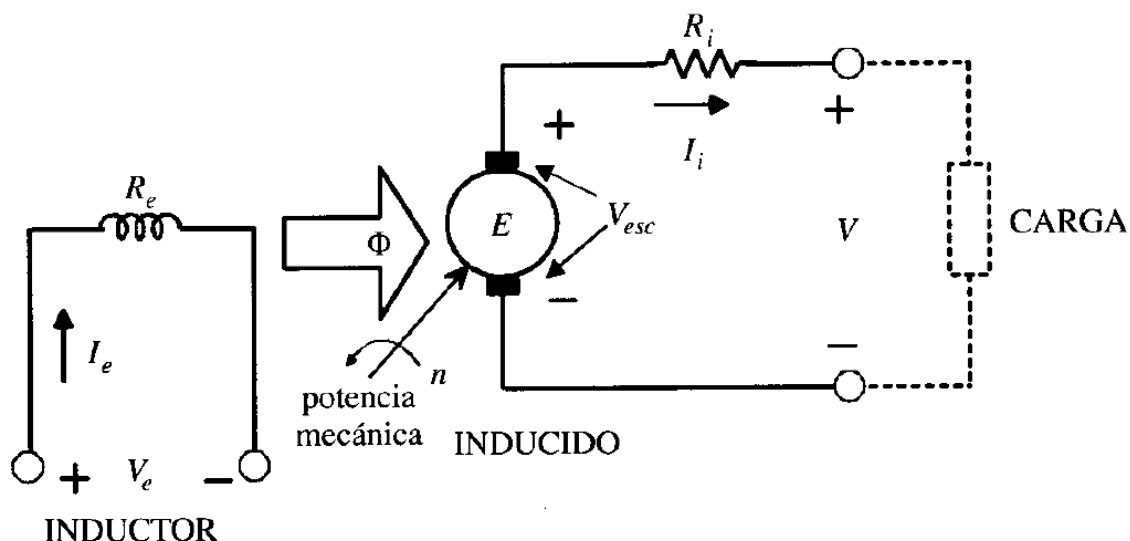


Las causas mecánicas pueden ser defectuoso ajuste de las escobillas con el colector, resalte de algunas delgas, insuficiente equilibrado del rotor.

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).

2.3 Tipos de generadores (excitación separada, derivación, serie y compuesto) y sus curvas características

Figura 101. 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 101](#) 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 102](#) y [103](#) se muestra un esquema simplificado de este balance de potencias.

Figura 102. Balance de potencias en el generador de cd

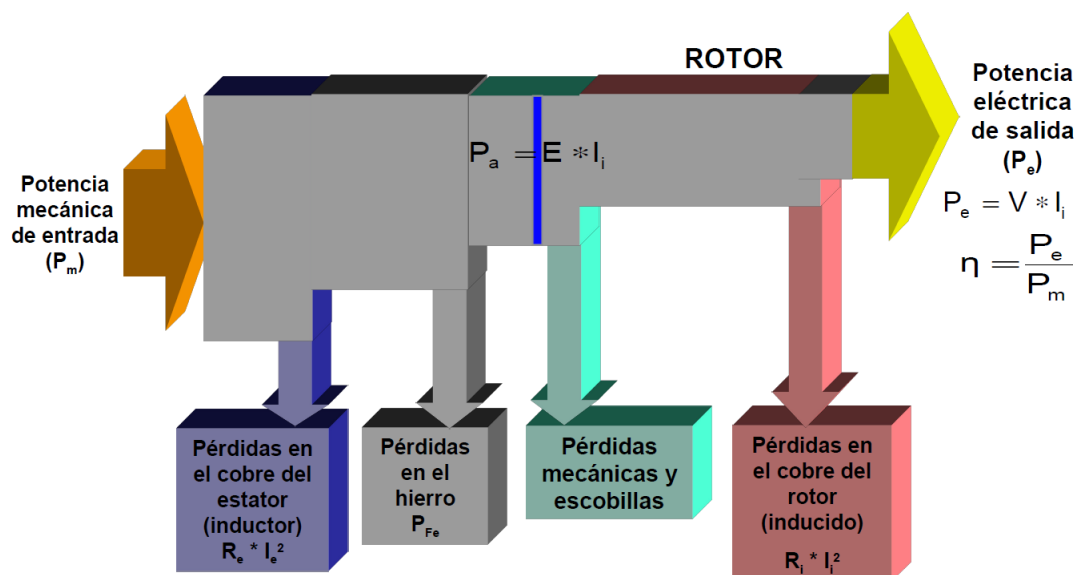
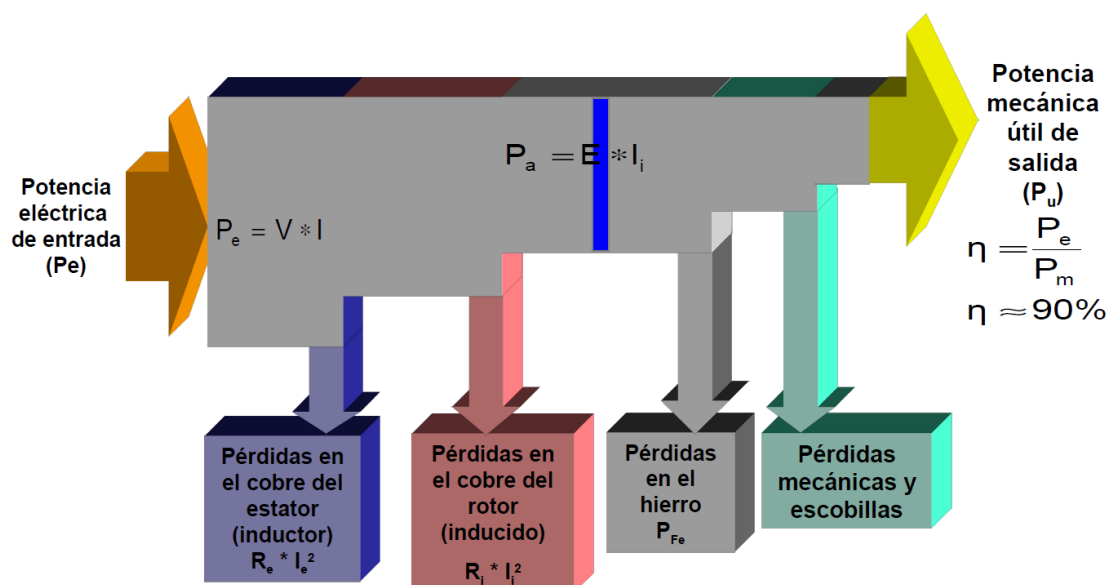


Figura 103. Balance de potencias en el motor de cd



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:

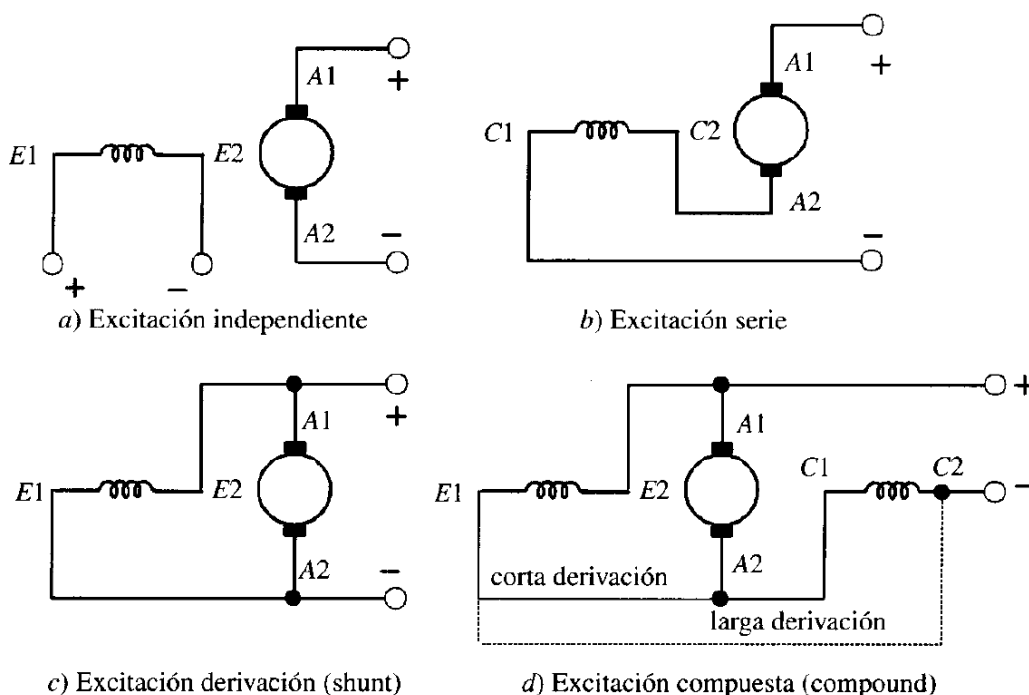
- a) **Máquinas con excitación independiente**, en las que el devanado inductor es alimentado mediante una fuente de alimentación externa a la máquina, que puede ser, una batería de acumuladores.
- b) **Máquinas autoexcitadas**, en las que la máquina se excita a sí misma tomando la corriente inductora 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 104](#) se muestran los circuitos de estas máquinas.

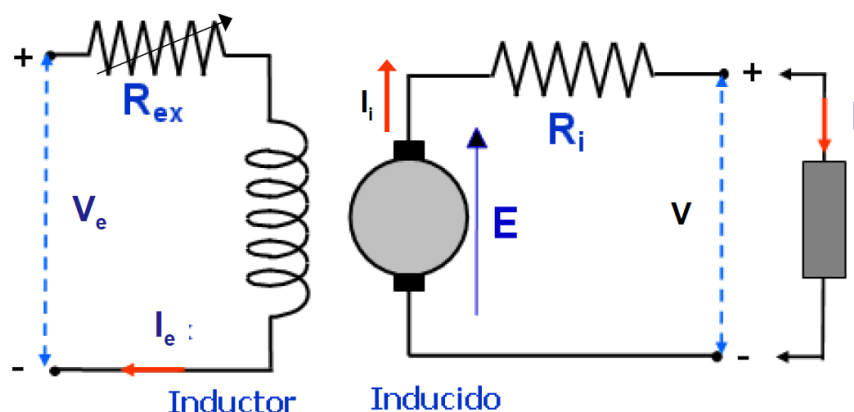
Figura 104. Tipos de excitación de las máquinas de cd



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 105](#)

Figura 105. 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.

$$E = K_E n \Phi$$

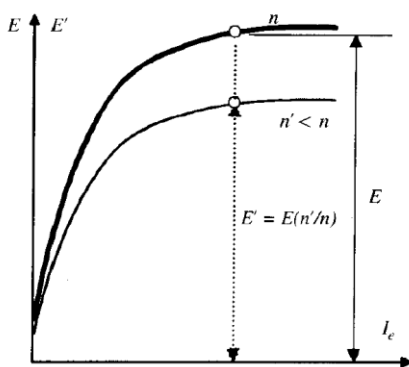
Si se considera que la velocidad de giro es diferente, por ejemplo, n' la fem producida para el mismo valor del flujo ([Figura 106](#)) será:

$$E' = K_E n' \Phi$$

Al dividir entre sí quedaría:

$$\frac{E}{E'} = \frac{n}{n'}$$

Figura 106. 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

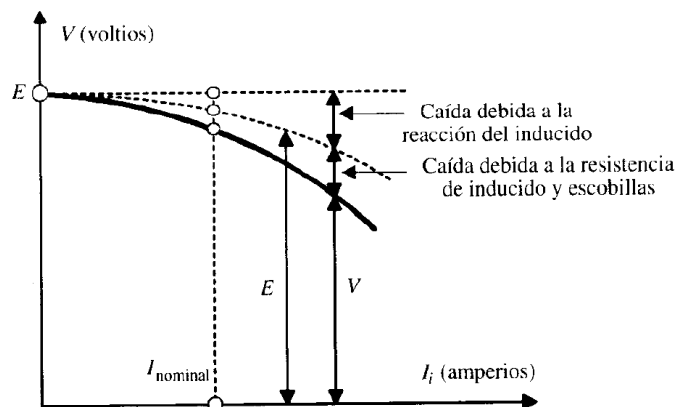
corriente del inducido vendrá expresada por la siguiente fórmula:

$$V = E - R_i I_i - V_{esc}$$

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 107](#)

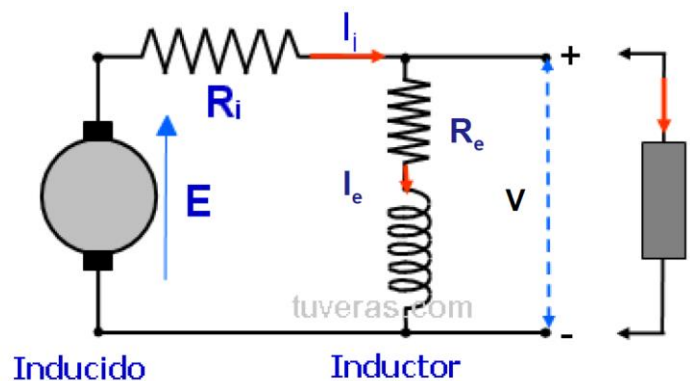
Figura 107. Característica externa de un generador de cd con excitación independiente



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 108](#)

Figura 108. Generador con excitación en derivación o shunt



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:

$$E = R_e I_e$$

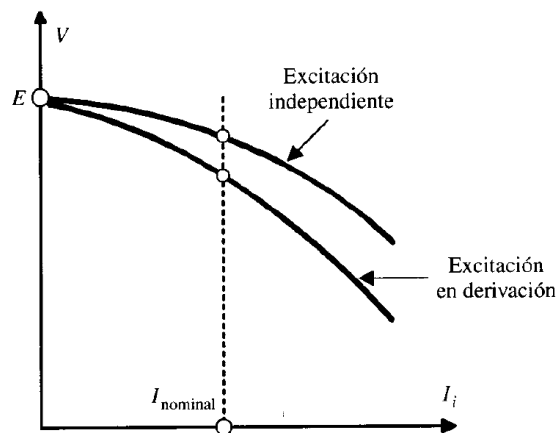
En un generador en derivación, la característica externa representa una variación de la tensión terminal superior a la del generador con excitación independiente, se añade el efecto de la caída de tensión producida por las escobillas, resistencia del inducido y su reacción, disminuyendo la corriente de excitación. *Figura 110*

$$V = E - R_i I_i - V_{esc}$$

$$V = R_e I_e = R_p I_p$$

$$I_i = I + I_e$$

Figura 110. Característica externa de un generador shunt



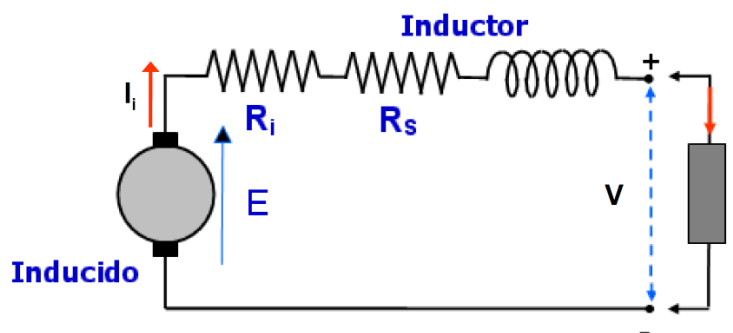
El generador derivación es el tipo que se emplea más frecuentemente en la práctica, ya que no necesita una excitación separada y en los límites de carga normales no presenta caídas de tensión elevadas.

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 111](#), 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 111. Generador con excitación en serie

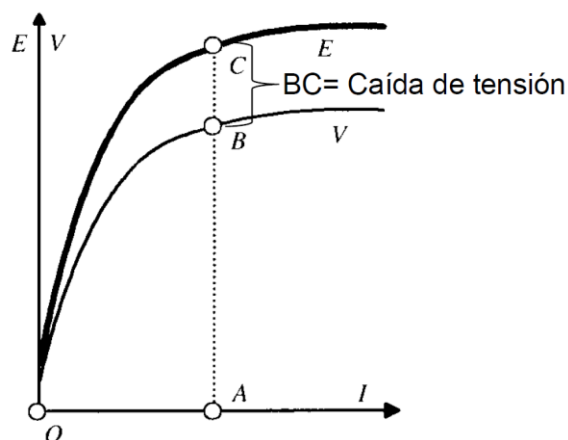


$$V = E - (R_i + R_s)I_i - V_{esc}$$

$$I_i = I$$

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 112](#)

Figura 112. Característica externa del generador con excitación en serie



$$V = E - R_i I_i - V_{esc}$$

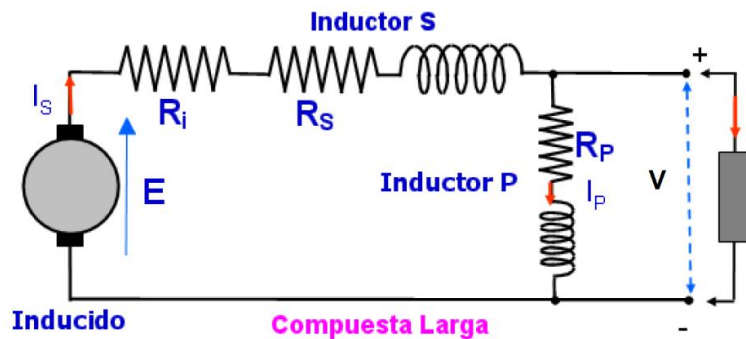
$$R_e = R_p + R_{ex}$$

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 113 y 114*

Figura 113. Generador con excitación compuesta larga

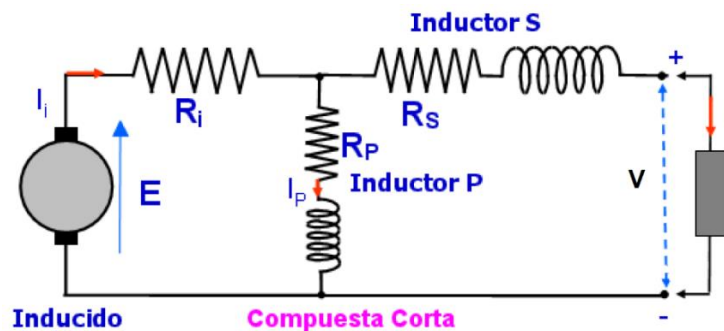


$$V = E - (R_i + R_s)I_s - V_{esc}$$

$$V = R_e I_e = R_p I_p$$

$$I_s = I_p + I$$

Figura 114. Generador con excitación compuesta corta



$$V = E - R_i I_i - R_s I - V_{esc}$$

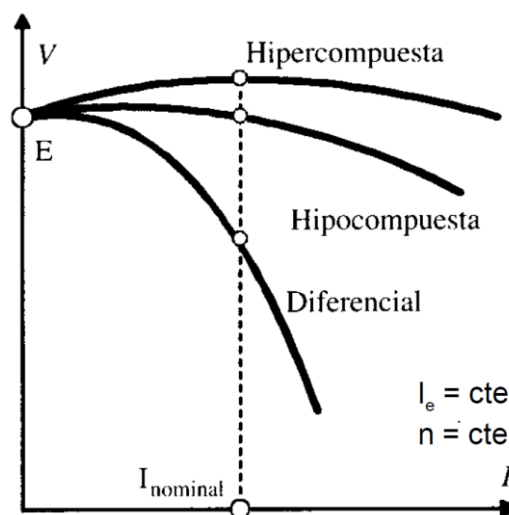
$$V = R_p I_p - R_s I$$

$$I_i = I_p + I$$

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 115*

Figura 115. Características externas de un generador compound



2.4 Tipos de motores (derivación, excitación separada, serie y compuesto) y sus curvas características

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:

$$P_i = V I_i \quad : \text{Potencia eléctrica absorbida por el motor}$$

$$P_{cui} = R_i I_i^2 \quad : \text{Pérdidas en el cobre del inducido}$$

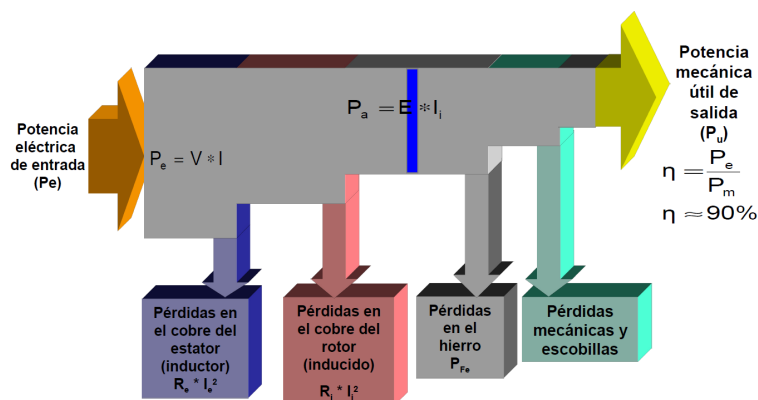
$$P_{esc} = V_{esc} I_i \quad : \text{Pérdidas en los contactos de las escobillas}$$

$$P_a = E I_i \quad : \text{Potencia electromagnética desarrollada por la máquina}$$

De acuerdo con esta nomenclatura, el balance de potencia en el inducido se convierte en:

$$P_i = P_a + P_{cui} + P_{esc}$$

Figura 116. 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 esta 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 117. Motor con excitación independiente

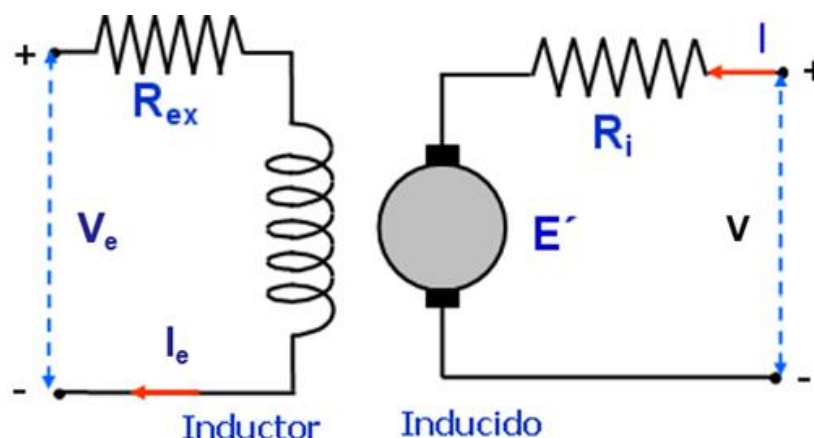
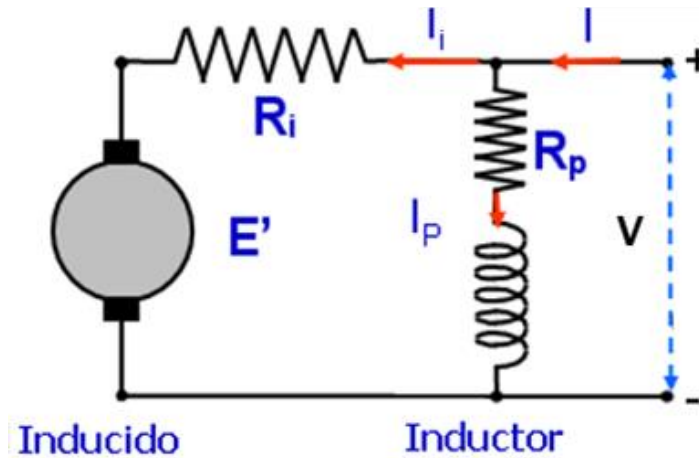
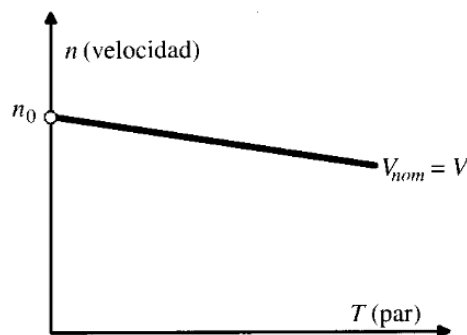


Figura 118. Motor con excitación en derivación o shunt



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 119. 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:

$$V = E' + (R_i + R_s)I_i$$

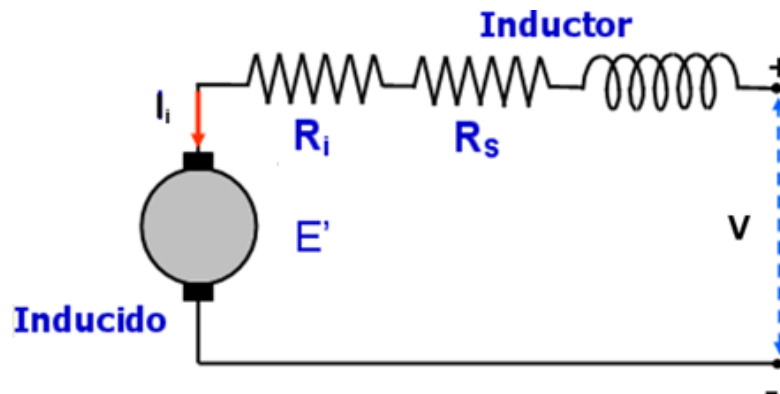
$$I_i = I_s = I_L$$

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 120. 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:

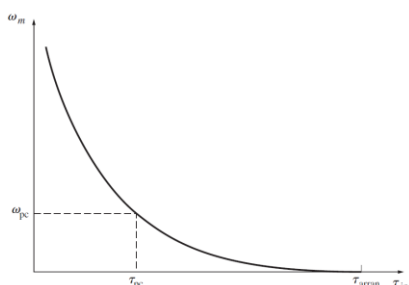
$$\Phi = c I_i$$

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 121. Característica par-velocidad de un motor de cd en serie



La ecuación del par inducido como:

$$T = \frac{K_T}{c} \Phi^2$$

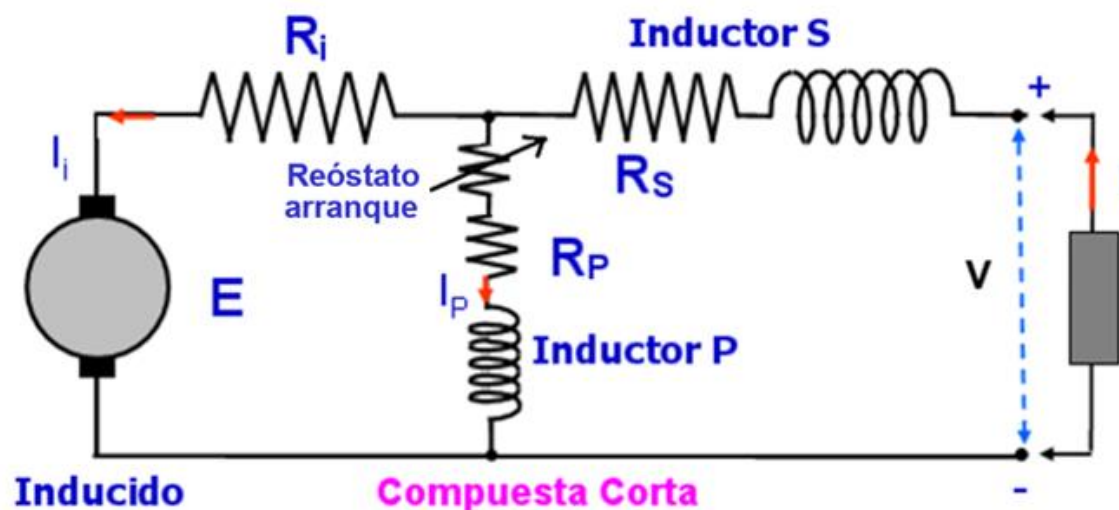
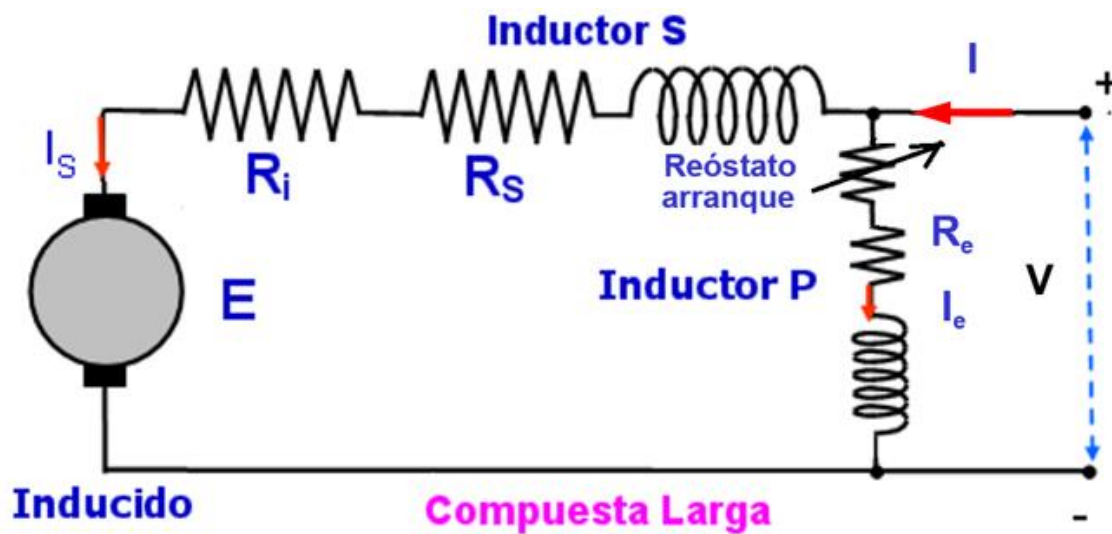
La relación par – velocidad resultante es:

$$\omega_m = \frac{V}{\sqrt{Kc}} \frac{1}{\sqrt{T}} - \frac{R_i + R_s}{Kc}$$

Motor de CD Compuesto

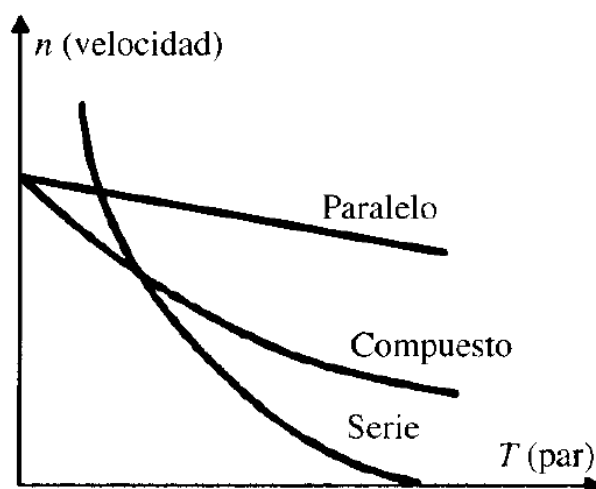
Incluye tanto un campo en derivación como un campo en serie.

Figura 122. 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 123. 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:

$$I_s = I_L - I_F$$

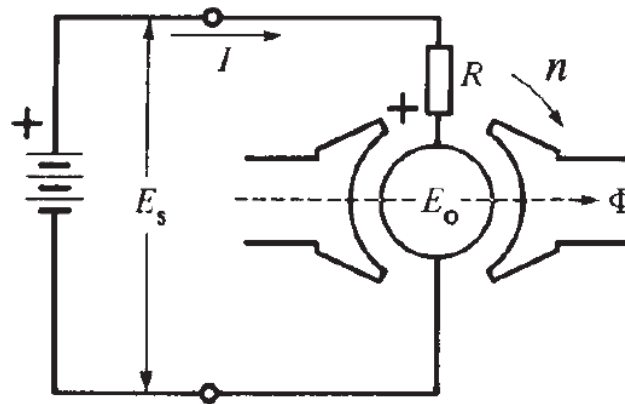
$$I_e = \frac{V}{R_e}$$

2.5 Ecuaciones de par electromagnético para los motores de CD

El voltaje neto que actúa en el circuito de la armadura en la [Figura 2.40](#) es $(E_s - E_o)$ volts.

La corriente resultante I en la armadura está limitada sólo por la resistencia R de ésta, por lo que:

Figura 124. Fuerza contraelectromotriz (fcem) en un motor de cd



$$I = \frac{E_s - E_o}{R}$$

Cuando el motor está en reposo, el voltaje inducido $E_o = 0$, por lo que la corriente de arranque es

$$I = \frac{E_s}{R}$$

La corriente de arranque puede ser 20 o 30 veces mayor que la corriente a plena carga nominal del motor. En la práctica, esto haría que los fusibles se quemaran o que los cortacircuitos o sistemas de protección se activaran. Sin embargo, si están ausentes, las grandes fuerzas que actúan en los conductores de la armadura producen un poderoso par o momento de torsión de arranque y, en consecuencia, una rápida aceleración de la armadura.

Conforme se incrementa la velocidad, la fcem E_o también se incrementa, lo que provoca que el valor de $(E_s - E_o)$ disminuya. De la ecuación anterior deducimos que la corriente I en la armadura disminuye progresivamente a medida que se incrementa la velocidad.

Aun cuando la corriente en la armadura disminuye, el motor continúa acelerándose hasta que alcanza una velocidad máxima definida. Sin carga, esta velocidad produce una fcem E_o un poco menor que el voltaje de la fuente E_s . De hecho, si E_o fuera igual a E_s , el voltaje neto $(E_s - E_o)$ sería cero, por lo que la corriente I también sería cero. Las fuerzas impulsoras dejarían de actuar en los conductores de la armadura y la resistencia mecánica impuesta por el ventilador y los cojinetes haría que el motor se desacelerara de inmediato. A medida que disminuye la velocidad, el voltaje neto $(E_s - E_o)$ aumenta y también la corriente I . La velocidad dejará de disminuir en cuanto el

par o momento de torsión desarrollado por la corriente en la armadura sea igual al par o momento de torsión de la carga. De este modo, cuando un motor funciona sin carga, la fcem debe ser un poco menor que E_s , como para permitir que fluya una pequeña corriente, suficiente para producir el par o momento de torsión requerido.

La potencia y el par o momento de torsión de un motor de cd son dos de sus propiedades más importantes. A continuación derivaremos dos ecuaciones simples que nos permitirán calcularlas.

1. De acuerdo con la ecuación siguiente, la fcem inducida en una armadura de devanado imbricado o de lazo es

$$E_o = \frac{Zn\Phi}{60}$$

En la Figura 2.40 se ve que la potencia eléctrica P_a suministrada a la armadura es igual al voltaje de suministro E_s multiplicado por la corriente I en la armadura:

$$P_a = E_s I$$

Sin embargo, E es igual a la suma de E_o más la caída IR en la armadura :

$$E_s = E_o + IR$$

Deducimos que

$$\begin{aligned} P_a &= E_s I \\ &= (E_o + IR) I \\ &= E_o I + I^2 R \end{aligned}$$

El término $I^2 R$ representa el calor disipado en la armadura, pero el muy importante término $E_o I$ es la potencia eléctrica que es convertida en potencia mecánica.

Por lo tanto, la potencia mecánica del motor es exactamente igual al producto de la fcem multiplicada por la corriente en la armadura.

$$P = E_o I$$

Donde

P = potencia mecánica desarrollada por el motor (W)

E_o = voltaje inducido en la armadura (fcem) (V)

I = corriente total suministrada a la armadura (A)

2. Volviendo la atención al par o momento de torsión T , sabemos que la potencia mecánica P está dada por la expresión:

$$P = \frac{nT}{9.55}$$

Donde n es la velocidad de rotación.

Combinando las ecuaciones se obtiene:

$$\frac{nT}{9.55} = E_o I = \frac{Zn\Phi I}{60}$$

Y por lo tanto

$$T = \frac{Z\Phi I}{6.28}$$

Así, el par o momento de torsión desarrollado por un motor con devanado imbricado está dado por la expresión:

$$T = \frac{Z\Phi I}{6.28}$$

Donde:

T = par o momento de torsión (Nm)

Z = número de conductores en la armadura

Φ = flujo efectivo por polo (Wb)

I = corriente en la armadura (A)

6.28 = constante, para ajustar las unidades (valor exacto = 2π)

Esta ecuación muestra que podemos aumentar el par o momento de torsión de un motor aumentando la corriente en la armadura o aumentando el flujo creado por los polos.

2.6 Condiciones de arranque para los diferentes tipos de motores de CD

Si aplicamos un voltaje completo a un motor en derivación estacionario, la corriente de arranque en la armadura será muy alto y corremos el riesgo de :

- Quemar la armadura
- Dañar el conmutador y las escobillas a causa de la intensa producción de

chispas.

- c. Sobrecargar el alimentador
- d. Romper el eje a causa de un choque mecánico
- e. Dañar el equipo impulsado por causa del repentino golpe mecánico

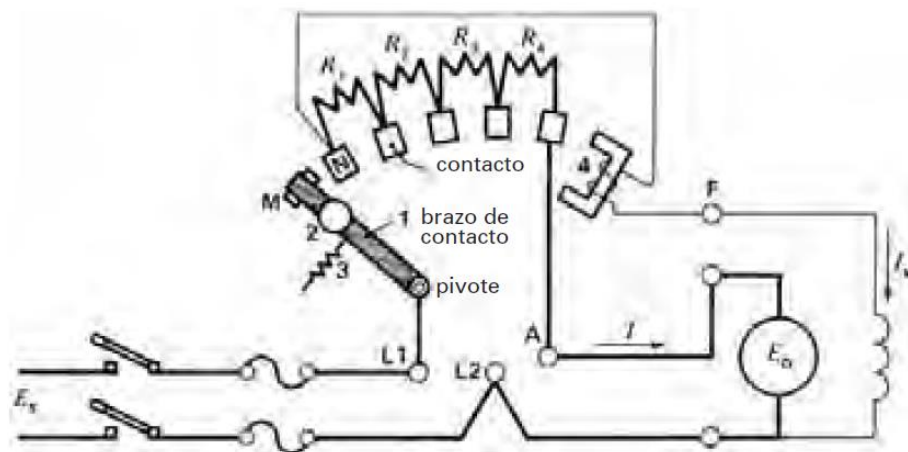
Por tanto, todos los motores de cd deben tener una forma de limitar la corriente de arranque a valores razonables, por lo general entre 1.5 y dos veces la corriente a plena carga. Una solución es conectar un reóstato en serie a la armadura. La resistencia se reduce gradualmente a medida que el motor se acelera, y desaparece por completo cuando la máquina alcanza su velocidad tope.

Hoy en día, con frecuencia se utilizan métodos electrónicos para alimentar la corriente de arranque y para controlar la velocidad.

Arrancador de reóstato manual.

La [Figura 125](#) muestra el diagrama esquemático de un arrancador de reóstato manual de un motor en derivación. También podemos ver contactos de cobre descubiertos conectados a los resistores limitadores de corriente R_1 , R_2 , R_3 y R_4 . El brazo conductor 1 pasa a través de los contactos cuando es jalado hacia la derecha por medio de una manija aislada 2. En la posición mostrada en la figura, el brazo toca el contacto de cobre M sin corriente y el circuito del motor está abierto. Conforme se mueve la manija a la derecha, el brazo conductor toca primero el contacto fijo N.

Figura 125. Arrancador de reóstato manual de un motor en derivación



El voltaje de suministro E_s hace que fluya inmediatamente toda la corriente de campo I , pero la corriente I_x en la armadura es limitada por los cuatro resistores de la caja de arranque.

El motor comienza a girar y, a medida que se incrementa la fcm E_o , la corriente en

la armadura disminuye gradualmente. Cuando la velocidad del motor ya no aumenta, el brazo es jalado al siguiente contacto, con lo que se elimina el resistor R_1 del circuito de la armadura. La corriente salta de inmediato a un valor más alto y el motor se acelera con rapidez a la siguiente velocidad más alta. Cuando la velocidad se nivela de nuevo, nos movemos al siguiente contacto, y así sucesivamente, hasta que finalmente el brazo toca el último contacto. El brazo es magnéticamente mantenido en esta posición mediante un pequeño electroimán 4, el cual está en serie con el campo en derivación.

2.7 Control de los motores de CD

2.7.1 Arranque

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.

2.7.2 Velocidad

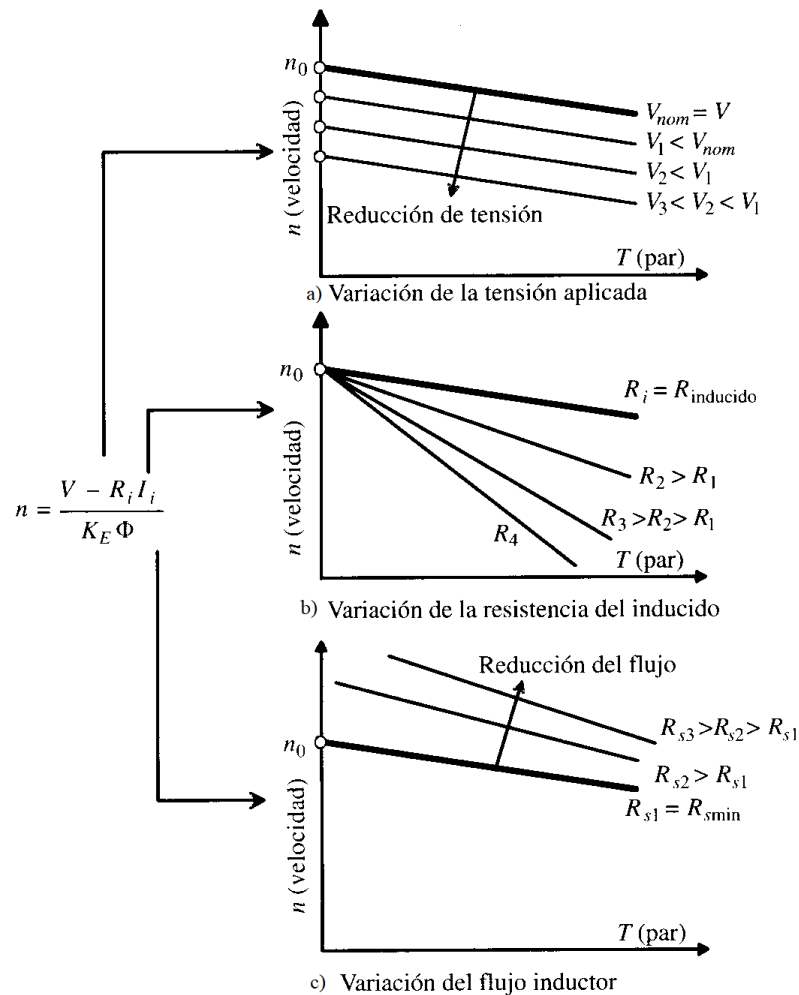
Control de velocidad en los motores de cd en serie.

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:

- a) Ajustando la tensión del inducido
- b) Variando la resistencia del circuito del inducido
- c) Cambiando la resistencia del circuito de excitación

Figura 126. Comportamiento de la regulación de velocidad de una máquina cd 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_{cem} 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.

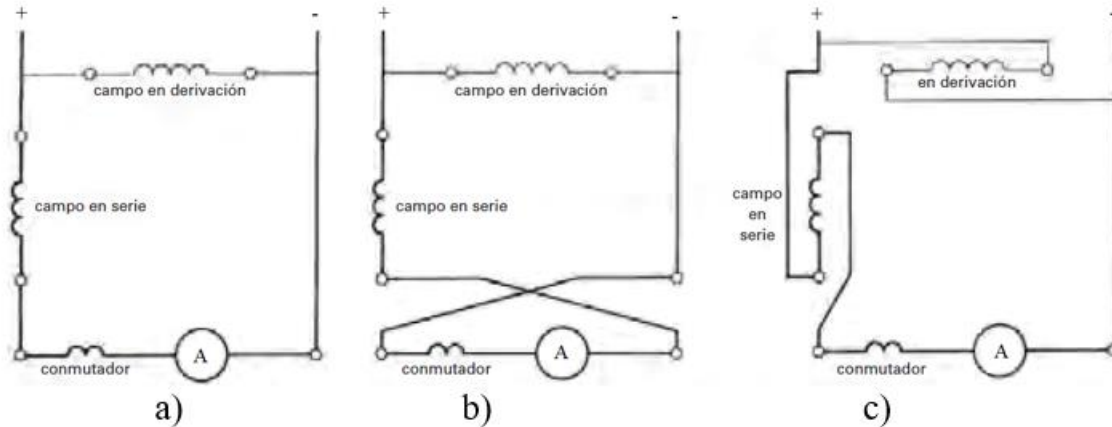
2.7.3 Inversión de giro

Para invertir la dirección de rotación de un motor de cd, debemos invertir:

1. Las conexiones de la armadura o
2. Tanto las conexiones del campo en serie como las del campo en derivación.

Se considera que los interpolos forman parte de la armadura. El cambio de las conexiones se muestra en la [Figura 127](#).

Figura 127. a) Conexiones originales de un motor compuesto; b) Inversión de las conexiones de la armadura para invertir la dirección de rotación; c) Inversión de las conexiones del campo para invertir la dirección de rotación



2.7.4 Frenado

Cuando un motor de cd grande está acoplado a una pesada carga inercial, el sistema podría tardar una hora o más en detenerse. Por muchas razones, semejante tiempo de desaceleración es inaceptable y, en esas circunstancias, debemos aplicar un par o momento de torsión de frenado para garantizar un rápido frenado. Una forma de frenar el motor es mediante fricción mecánica simple, del mismo modo que detenemos un carro. Otra forma consiste en hacer circular una corriente inversa en la armadura, para frenar el motor eléctricamente.

El motor puede detenerse por medio de un freno de fricción. Las desventajas del freno de fricción son que la operación es:

- a) Difícil de controlar,
- b) Dependiente de la superficie de frenado y,
- c) No es suave

Por tanto, es deseable usar otros medios para frenar o invertir la dirección de rotación de un motor de cc. Los tres métodos comúnmente usados son:

- 1) el bloqueo,
- 2) el frenador dinámico y
- 3) el frenado regenerativo.

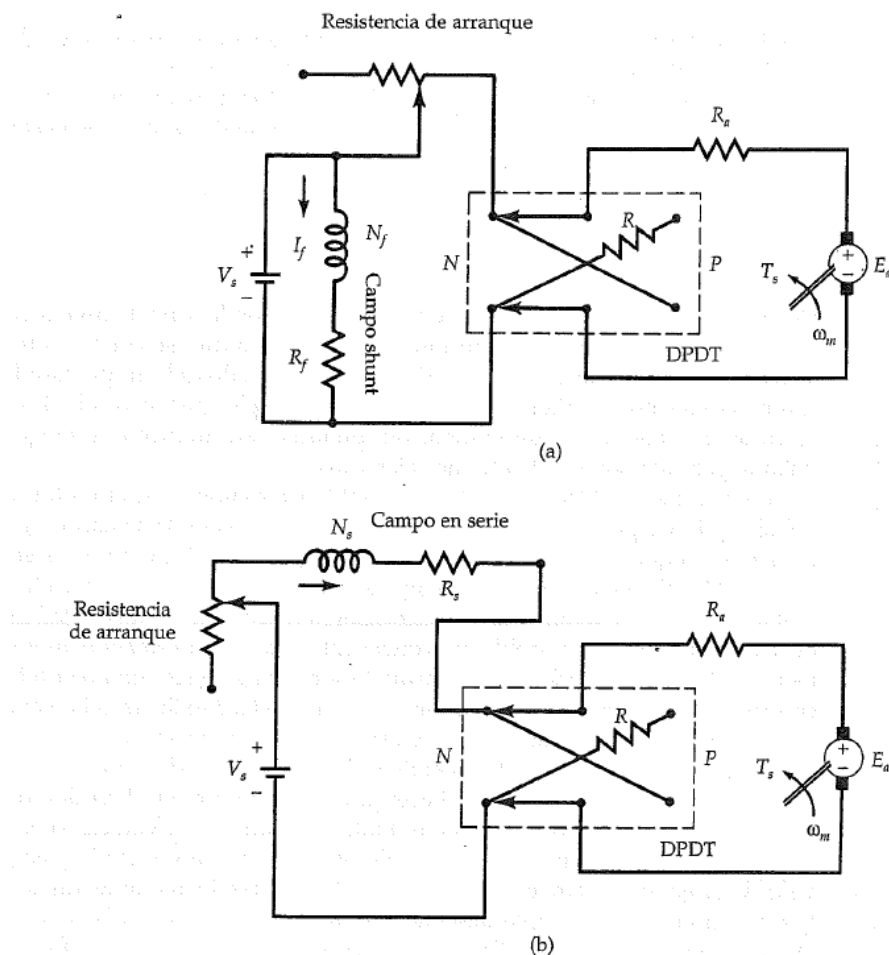
1) Bloqueo

Detener o invertir la dirección de un motor de cc con la sencilla inversión de las conexiones de suministro en las terminales de la armadura se conoce como bloqueo o frenado por contracorriente. Las conexiones del devanado

del campo para los motores shunt permanecen sin alteración. Este método se emplea para controlar los motores de cc en ascensores, trenes de laminación, prensas para imprimir y máquinas-herramienta, por citar algunos ejemplos.

Justo antes del bloqueo, la fuerza contraelectromotriz en el motor se opone al voltaje aplicado por la fuente. Puesto que la resistencia de la armadura generalmente es muy pequeña, la fuerza contraelectromotriz es casi igual y opuesta al voltaje aplicado. En el instante en que se bloquea el motor, la fuerza contraelectromotriz y el voltaje aplicado están en la misma dirección. Por tanto, el voltaje total en el circuito de la armadura es casi el doble del voltaje aplicado. Para proteger el motor de un aumento súbito en la corriente de la armadura debe agregarse una resistencia externa en serie con el circuito de la armadura. En la siguiente [Figura 128](#) se ilustra las conexiones del circuito para motores shunt y serie, en sus formas más sencillas.

Figura 128. Bloqueo de un motor a) shunt y b) serie



A medida que la corriente en el devanado de la armadura invierte su dirección, produce una fuerza que tiende a hacer girar la armadura en dirección opuesta a su rotación inicial. Esto ocasiona que el motor disminuya su velocidad, se detenga y luego adquiera velocidad en la dirección opuesta. Por tanto, el bloqueo permite invertir la dirección de giro de un motor. Esta técnica también puede utilizarse para detener el motor con simple desconexión de la energía que recibe el motor cuando alcanza el estado de reposo. Para mayor seguridad, puede aplicarse frenado mecánico cuando el motor se acerca al estado de reposo.

En cualquier momento durante la acción del bloqueo la corriente es:

$$\begin{aligned} I_a &= \frac{V_s + E_a}{R + R_a} = \frac{V_s}{R + R_a} + \frac{E_a}{R + R_a} \\ &= \frac{V_s}{R + R_a} + \frac{K_a \Phi_p \omega_m}{R + R_a} \end{aligned}$$

Por tanto, el par de frenado es:

$$\begin{aligned} T_b &= K_a \Phi_p I_a \\ &= K_1 \Phi_p + K_2 \Phi_p^2 \omega_m \end{aligned}$$

Donde

$$K_1 = \frac{K_a V_s}{R + R_a} \quad \text{y} \quad K_2 = \frac{K_a^2}{R + R_a}$$

Para el motor serie, el flujo también depende de la corriente de la armadura, la cual depende a su vez de la velocidad del motor. Puesto que el flujo en un motor shunt es constante, la ecuación anterior se convierte en la siguiente:

$$T_b = K_3 + K_4 \omega_m$$

Donde

$$K_3 = K_1 \Phi_p \quad \text{y} \quad K_4 = K_2 \Phi_p^2$$

De esta ecuación resulta evidente que aun cuando un motor shunt se acerque a una velocidad de cero, existirá cierto par de frenado, $T_b = K_3$. Si

no se desconecta el suministro el voltaje en el momento en que el motor alcanza velocidad cero, acelerará en la dirección inversa.

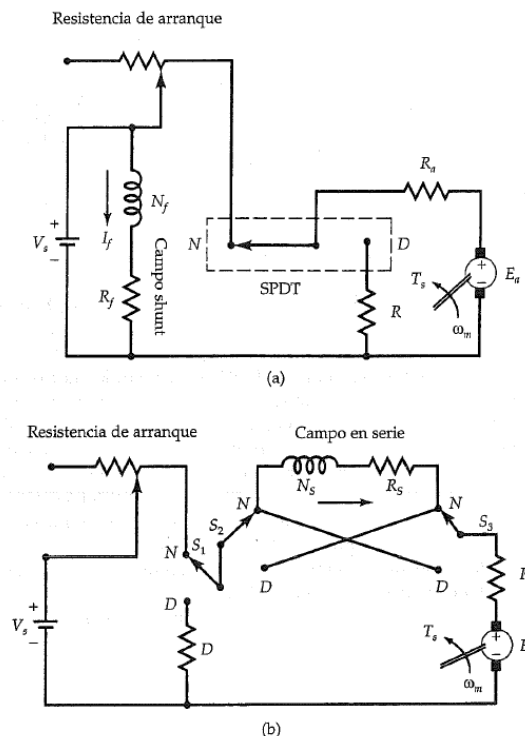
2) Frenado dinámico

Si el devanado de la armadura de un motor de cc se desconecta repentinamente de la fuente, continuará girando con libertad hasta detenerse. El tiempo que toma al motor quedar en reposo depende de la energía cinética almacenada en el sistema rotatorio.

Por el contrario, el frenado dinámico emplea la fuerza contraelectromotriz en el motor con el objeto de detenerlo con rapidez. Si después de haberse desconectado de la fuente, el devanado de la armadura es conectado a través de una resistencia variable R , la fuerza contraelectromotriz producirá una corriente en la dirección opuesta. Una corriente en dirección opuesta en el devanado de la armadura ocasiona un par que se opone a la rotación y obliga al motor a detenerse.

El efecto de frenado dinámico se controla variando R . Al aplicar el freno dinámico, se selecciona R para limitar la entrada de corriente en la armadura a 150%, aproximadamente, de su valor especificado. Al tiempo que la velocidad del motor se abate, también lo hace la fem inducida y la corriente a través de R . Así, la acción de frenado dinámico es máxima al principio y disminuye hasta cero cuando el motor se detiene.

Figura 129. Frenado dinámico de un motor (a) shunt y (b) en serie



En cualquier momento del proceso de frenado dinámico la corriente de la armadura es:

$$I_a = \frac{E_a}{R + R_a} = \frac{K_a \Phi_p \omega_m}{R + R_a}$$

Y el par de frenado es

$$T_b = K_a \Phi_p I_a = \frac{K_a^2 \Phi_p^2 \omega_m}{R + R_a} = K_2 \Phi_p^2 \omega_m$$

Puesto que el flujo en un motor serie es proporcional a la corriente de la armadura, $\Phi_p = k_f I_a$, el par de frenado para un motor de ese tipo se convierte en:

$$T_{tb} = K_2 k_f^2 I_a^2 \omega_m$$

Por otro lado, el par de frenado para un motor shunt es:

$$T_b = K_4 \omega_m$$

Con base en las ecuaciones anteriores resulta evidente que el par de frenado disminuye a medida que la velocidad del motor se aproxima a cero.

3) Frenado regenerativo

El frenado regenerativo se utiliza en aplicaciones donde es probable que la velocidad del motor se incremente a partir de su valor especificado, como en trenes eléctricos, ascensores, grúas y cabrias. En condiciones normales de operación de un motor de cc, por ejemplo un motor de imanes permanentes (o tipo PM) de un tren eléctrico, la fuerza contraelectromotriz es ligeramente menor que el voltaje aplicado. Observe que dicha fuerza en un motor tipo PM es directamente proporcional a su velocidad. Suponga ahora que el tren avanza cuesta abajo. Al incrementarse la velocidad del motor, también aumenta la fuerza contraelectromotriz en él; si llegara a ser mayor que el voltaje aplicado, la corriente en el devanado de la armadura invertiría su dirección y el motor se volvería un generador.

Enviaría fuerza de regreso a la fuente o a otros equipos que operaran desde la misma fuente. La inversión de la corriente en la armadura produce un par en dirección opuesta a la velocidad del motor. En consecuencia, la velocidad del motor disminuye hasta que la fuerza contraelectromotriz del

motor es menor que el voltaje aplicado. La acción regenerativa no sólo controla la velocidad del motor, sino también desarrolla energía que puede usarse en cualquier parte.

2.8 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.

Motor eléctrico sin escobillas. 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. Otros tipos de motores son: motor paso a paso, servomotor, motor sin núcleo.

Ejercicios del Tema 2

EJERCICIO 1

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

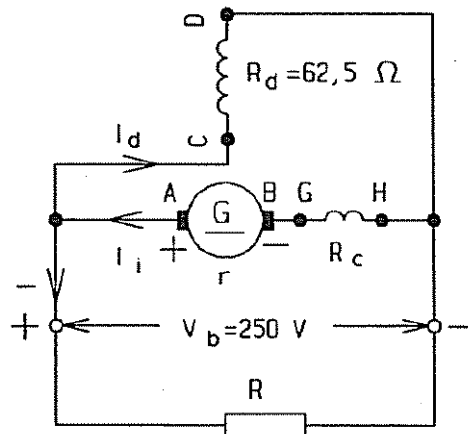


Figura 2.1 Dinamo en derivación

Solución

- La intensidad de corriente de carga.

$$I = \frac{P_{in}}{V_e} = \frac{5000}{250} = 200 \text{ A}$$

- 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 perdidas 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:

$$\begin{aligned} P_{cu} &= (r + R_c) I_i^2 + R_d I_d^2 + 2 V_{esc} I_i \\ &= 0.025 \cdot 204^2 + 62.5 \cdot 4^2 + 2 \cdot 1.5 \cdot 204 \\ P_{cu} &= 2652.4 \text{ W} \end{aligned}$$

EJERCICIO 2

La fem inducida en la región lineal de un generador serie se denota con $E = 0.4 I_s$. El generador tiene $R_s = 0.03 \, \Omega$ y $R_i = 0.03 \, \Omega$. Se usa como un reforzador en la barra conductora a 240 V en una estación y un alimentador con resistencia igual a $0.25 \, \Omega$. Calcule el voltaje entre el extremo alejado del alimentador y la barra conductora con una corriente de 300 A.

Solución

$I_i = I_s = 300 \text{ A}$. La fem inducida es

$$E = 0.4 * 300 = 120 \text{ V}$$

La caída de voltaje a través de R_i , R_s y el alimentador es

$$V = 300 \times (0.02 + 0.03 + 0.25) = 90 \text{ V}$$

Por tanto, el voltaje entre el extremo alejado del alimentador y la barra conductora es

$$V = 240 + 120 - 90 = 270 \text{ V}$$

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 3

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 $50\text{m}\Omega$, una resistencia en el campo serie de $10\text{m}\Omega$, una resistencia para desvío de campo de $40\text{m}\Omega$ y una pérdida por rotación de 2kW. El generador está conectado a la carga por medio de un alimentador, R_{fe} , de $30\text{m}\Omega$ 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

$$P_o = 240 * 100 = 24\,000 \text{ W}$$

Puesto que $I_e = 3 \text{ A}$, $I_i = 100 + 3 = 103 \text{ A}$

$$I_s = \frac{0.04}{0.04 + 0.01} * 100 = 80 \text{ A}$$

$$I_d = 100 - 80 = 20 \text{ A}$$

$$E = V + IR_{fe} + I_s R_s + I_i R_i$$

$$= 240 + 100 \cdot 0.03 + 80 \cdot 0.01 + 103 \cdot 0.05 = 248.95 \text{ V}$$

$$V = E - R_i I_i$$

$$= 248.95 - 103 \cdot 0.05 = 243.8 \text{ V}$$

Por tanto, $R = \frac{243.8}{3} = 81.267 \Omega$

Pérdidas en el cobre:

Armadura: $I^2 R = 103^2 \cdot 0.05 = 530.45 \text{ W}$

Campo en serie: $I_s^2 R_s = 80^2 \cdot 0.01 = 64 \text{ W}$

Campo shunt: $I_e^2 R_e = 3^2 \cdot 81.267 = 731.4 \text{ W}$

Resistencia del desviador: $I_d^2 R_d = 20^2 \cdot 0.04 = 16 \text{ W}$

Resistencia del alimentador: $I^2 R_{fe} = 100^2 \cdot 0.03 = 300 \text{ W}$

Pérdida total en el cobre: $P_{cu} = 530.45 + 64 + 731.4 + 16 + 300$
 $= 1641.85 \text{ W}$

Luego, la potencia desarrollada es

$$P_d = P_o + P_{cu} = 24000 + 1641.85 = 25641.85 \text{ W}$$

Sin embargo, la potencia desarrollada también puede calcularse como

$$P_d = EI_i = 248.95 \cdot 103 = 25641.85 \text{ W}$$

La potencia de entrada es

$$P_{in} = P_d + P_r = 25641.85 + 2000 = 27641.85 \text{ W}$$

Por tanto, la eficiencia es

$$\eta = \frac{P_o}{P_{in}} = \frac{24000}{27641.85} = 0.8682 \quad \text{y} \quad 86.82\%$$

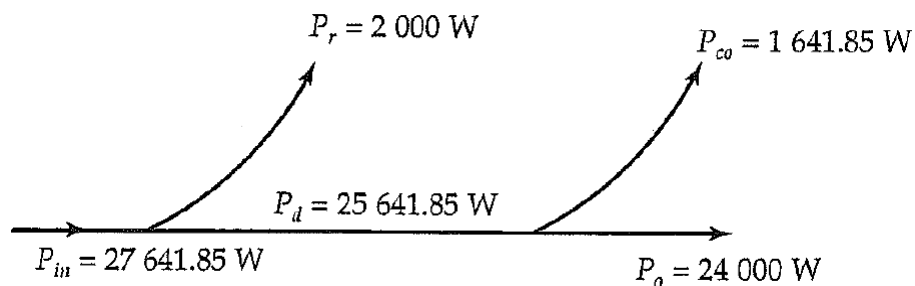


Figura 2.2 Diagrama de potencias del generador compound acumulativo

EJERCICIO 4

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.

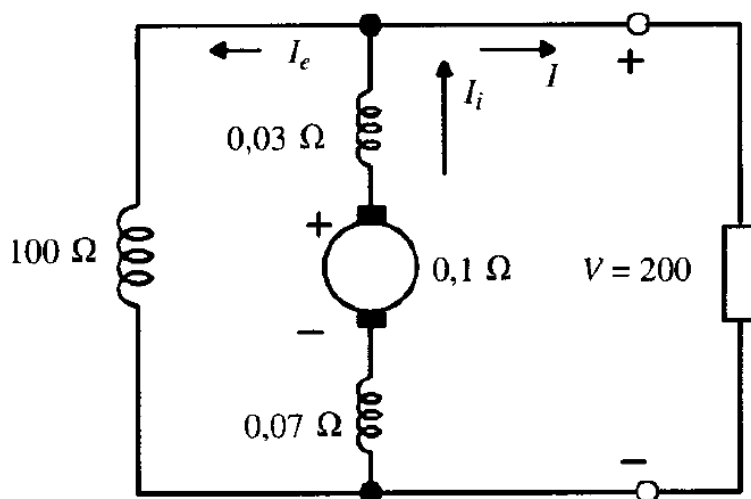


Figura 2.3 Diagrama de un generador cc compuesto de larga duración

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 3 Máquinas síncronas

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 síncrona 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 síncronas 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 síncronas 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.

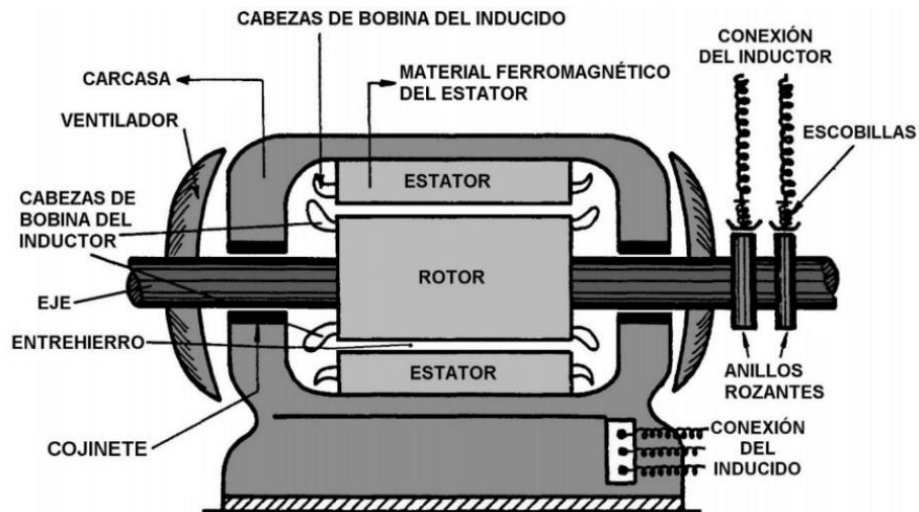
La máquina síncrona es completamente reversible y se incrementa día a día el número de aplicaciones donde puede ser utilizada con grandes ventajas, especialmente cuando se controla mediante fuentes electrónicas de frecuencia y tensión variable.

Es por ello, que iniciaremos viendo los aspectos constructivos de las máquinas síncronas, 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.

3.1 Componentes de las máquinas síncronas

Figura 130. 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 síncronas 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

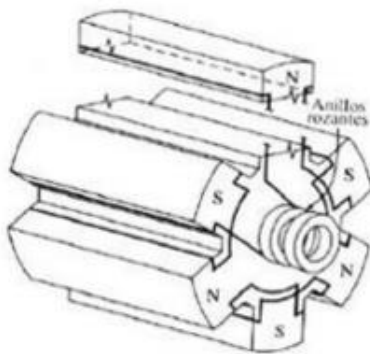
- Heteropolares: El devanado del inducido es concatenado por flujos alternos (polaridades norte y sur)
- Homopolares: Las bobinas del inducido son concatenadas por un flujo cuya magnitud fluctúa entre un máximo y un mínimo, pero con un mismo sentido de polaridad

Rotor

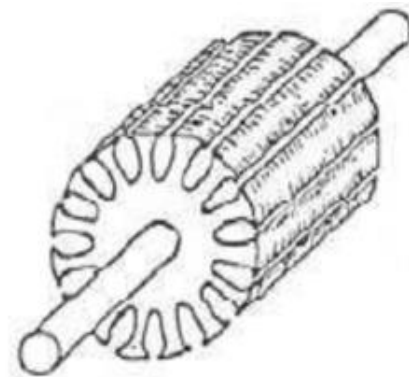
Dentro del orificio del estator se encuentra el rotor que está magnetizado por un devanado que transporta corriente continua.

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

Figura 131. Vistas de los rotores de una máquina síncrona



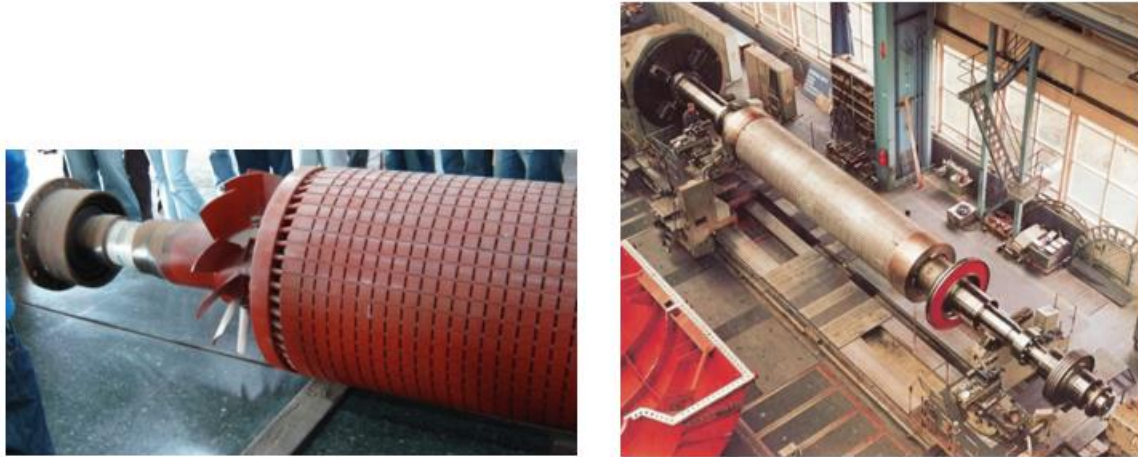
Rotor de polos salientes



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.

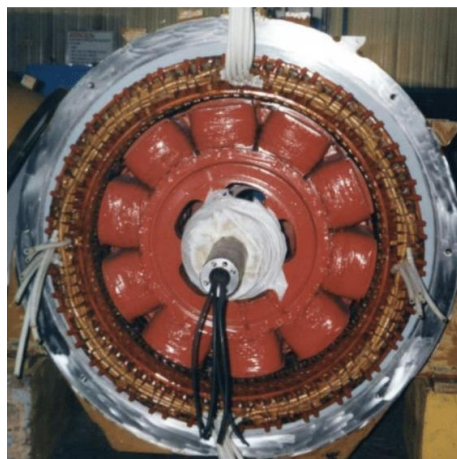
Figura 132. Rotores de polos lisos



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.

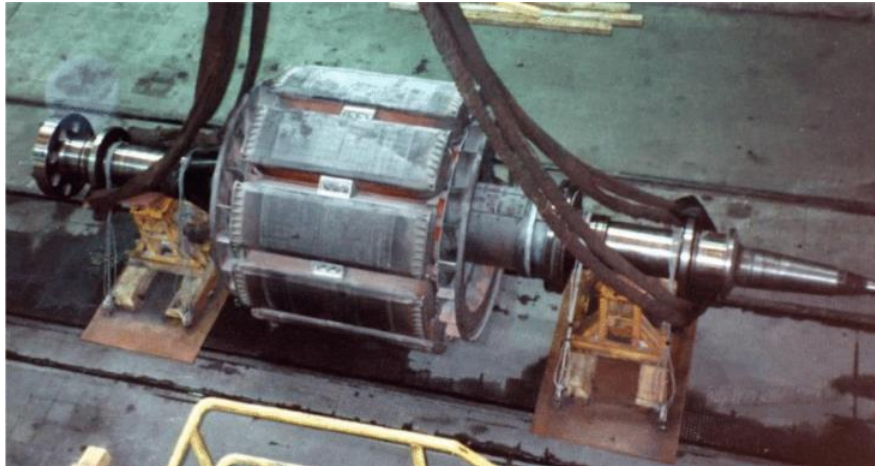
El tipo de polo saliente tiene polos que están físicamente separados, cada uno con un devanado de excitación concentrado. Este tipo de construcción es en muchos sentidos complementario al del rotor cilíndrico y se emplea en máquinas que tienen 4 polos o más.

Figura 133. Máquina síncrona de polos salientes



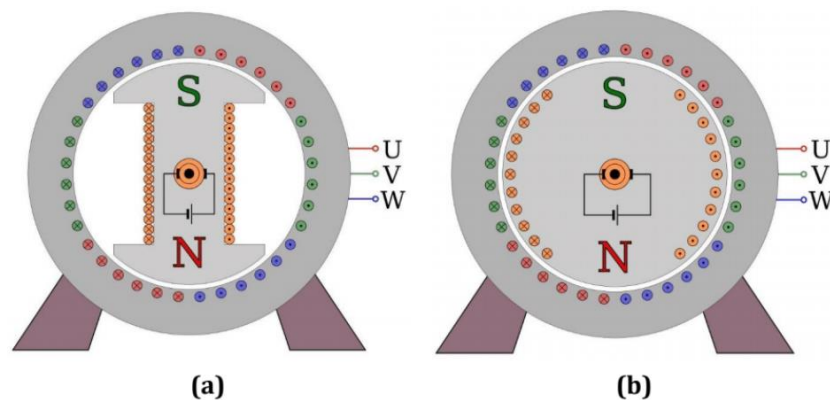
Las máquinas de polos salientes son adecuadas para generadores de gran número de polos, de baja velocidad, que se utilizan en las centrales hidráulicas. Este rotor no requiere una resistencia mecánica muy grande, lo que permite que pueda ser laminado, de poca longitud, de gran diámetro, con devanado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

Figura 134. 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.

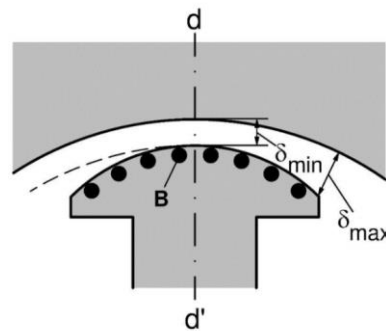
Figura 135. a) Máquina de polos salientes b) Máquina de rotor cilíndrico



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 135 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 136. 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 135 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.

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 137. 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 137*. 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 138. Hidrogenerador trifásico de la central de Itaipú (824 MVA, 90 rpm, 60 Hz)



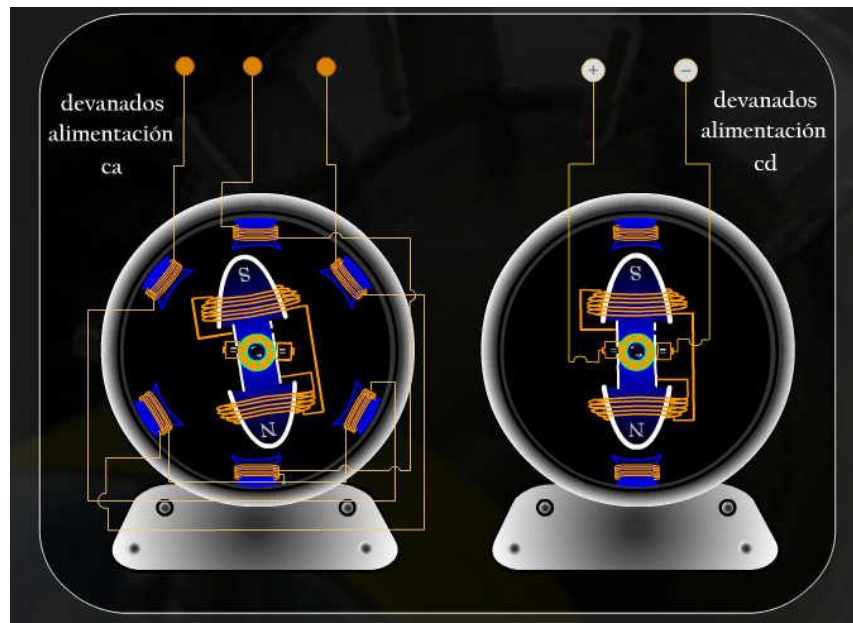
VIDEO: Principio de funcionamiento

<https://youtu.be/UZfvpM9cCHA?si=qc9r6cGafX-J7TSo>

3.2 Principio operacional de las máquinas síncronas como generador y como motor

En la [Figura 139](#) 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 139. Motor síncrono de dos polos

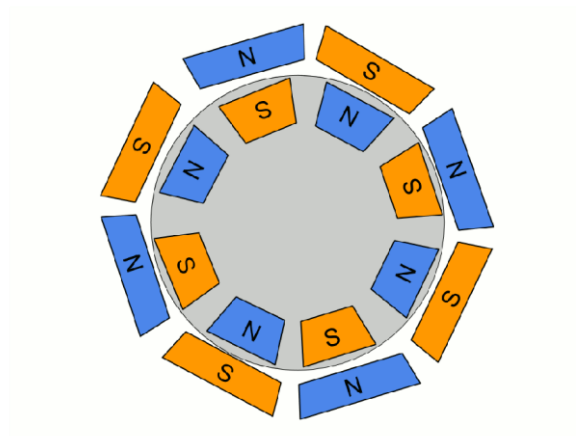


Donde el campo rotórico tenderá a alinearse con el campo estatórico. Puesto que el campo magnético del estator es rotante, el campo magnético del rotor (y el rotor en sí mismo) tratará constantemente de emparejarse con él. Cuanto mayor sea el ángulo entre los dos campos magnéticos (hasta cierto máximo), 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 140](#)

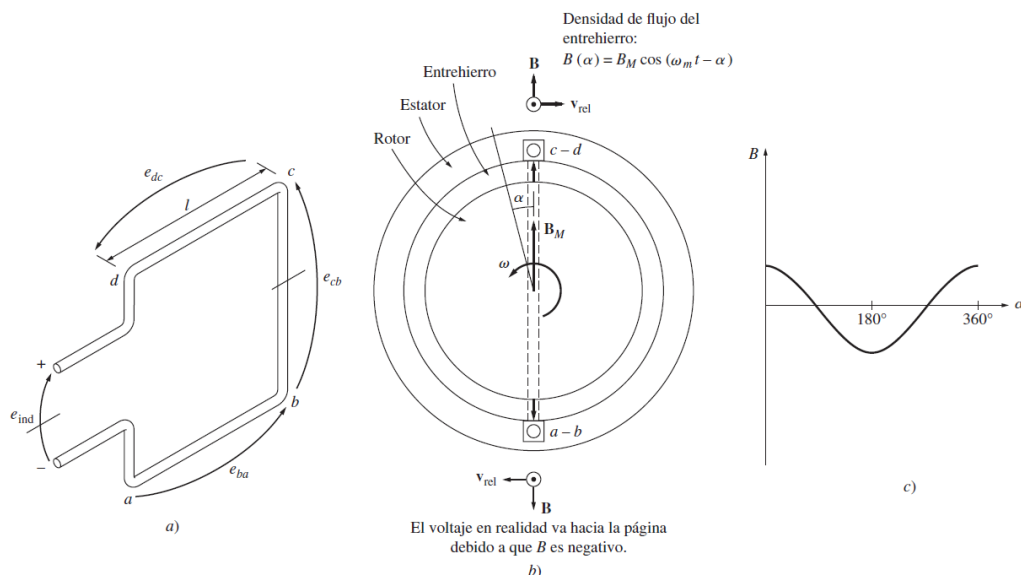
Figura 140. Simulación motor síncrono



3.3 Fuerza electromotriz inducida y frecuencia

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 141*

Figura 141. 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. Las velocidades que se muestran tienen un marco de referencia en el que el campo magnético es estacionario. 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.

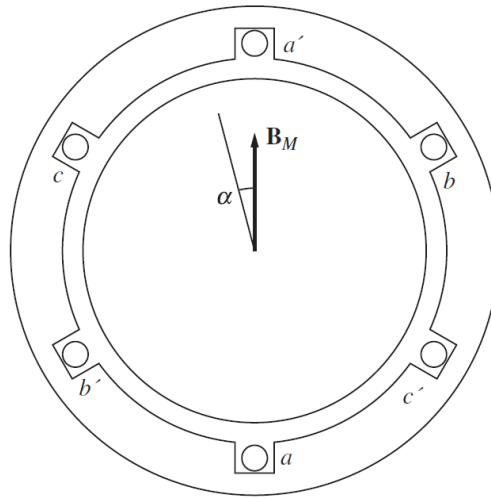
El voltaje total inducido en la bobina es la suma de los voltajes inducidos en cada uno de sus cuatro lados.

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 142](#), entonces los voltajes inducidos en cada una de ellas serán iguales en magnitud, pero la diferencia de fase será de 120° .

Figura 142. Producción de voltajes trifásicos con tres bobinas separadas por 120°



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

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

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 $\omega = 2\pi f$, 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:

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

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

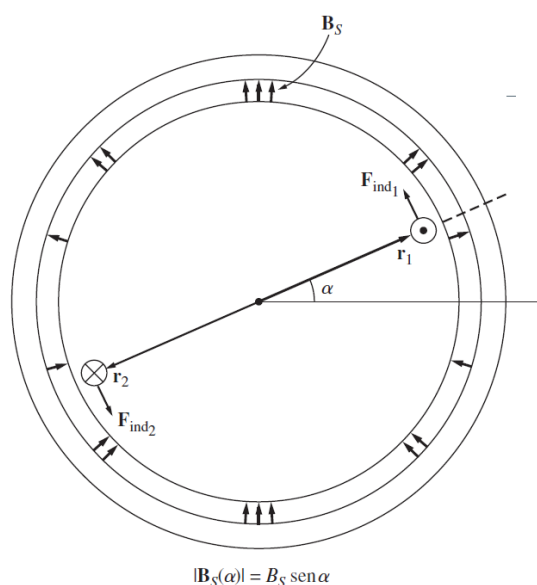
El voltaje rms en los terminales de la máquina depende de si el estator tiene una conexión en Y o en Δ . Si la máquina tiene una conexión en Y, entonces el voltaje del

terminal será $\sqrt{3}$ veces E_A ; si la tiene en Δ , entonces el voltaje del terminal será igual a E_A .

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 143](#) 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 143. 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

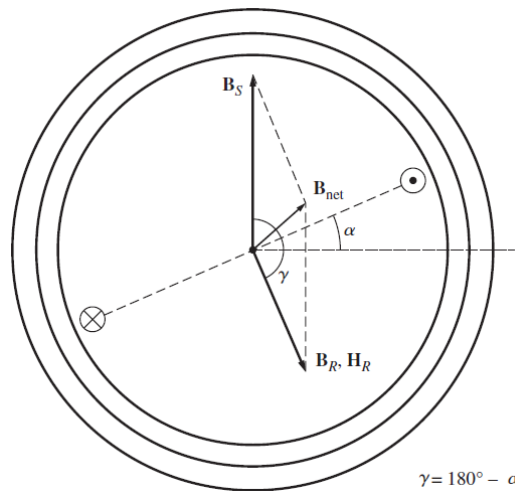
$$B_S(\alpha) = B_S \sin \alpha$$

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:

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

Figura 144. Los componentes de densidad de flujo magnético dentro de la máquina



Examinando la [Figura 144](#) 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.

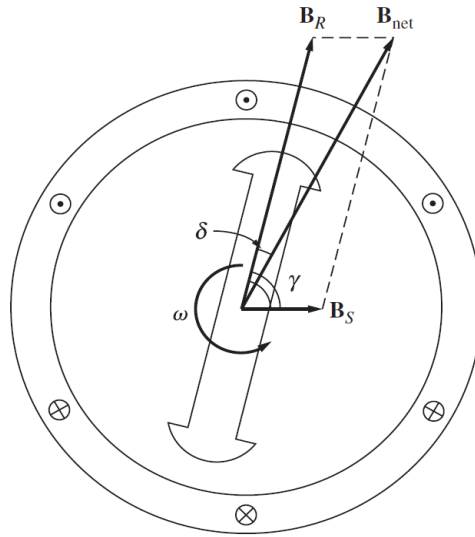
Si se sustituye K por $k = K/\mu$, considerando que la permeabilidad magnética μ varía de acuerdo con la cantidad de saturación magnética en la máquina. El par inducido queda:

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

donde δ es el ángulo entre B_R y B_{net} . *Figura 145*

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 145. 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 $k_p = \sin(\rho/2)$ 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

$$e_c = N_c k_p \omega \theta_p \sin \omega t$$

El valor máximo de la fem inducida es

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

y su valor medio cuadrático (rms) es

$$E_c = \frac{1}{\sqrt{2}} E_m$$

$$= 4.44 f N_c k_p \theta_p$$

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

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

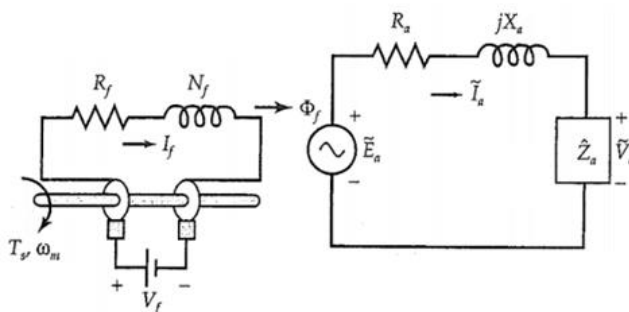
3.4 Circuito equivalente y diagramas fasoriales

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 146*.

Figura 146. Circuito equivalente por fase de un generador síncrono sin reacción a la armadura, con el campo revolvente producido por el rotor



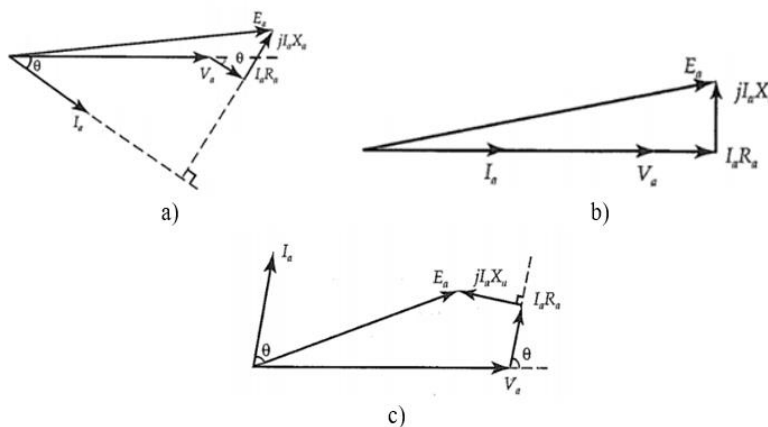
Caída de voltaje en la resistencia de la armadura

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.

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.

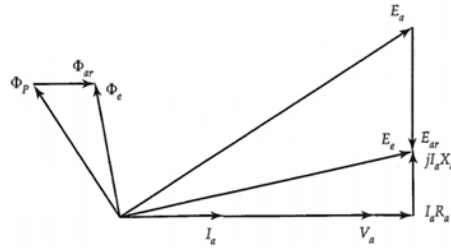
Figura 147. Diagramas fasoriales de un generador síncrono sin reacción de la armadura para un factor de potencia a) en atraso, b) unitario y c) en adelanto



Reacción de la armadura

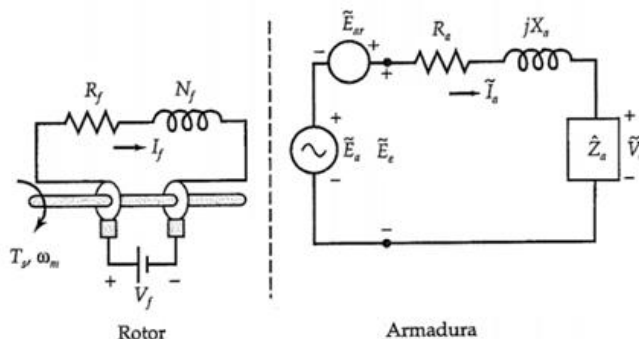
El flujo producido por el devanado de la armadura reacciona con el flujo establecido por los polos sobre el rotor, ocasionando que el flujo total cambie. Esta interacción entre los dos flujos se conoce como reacción de la armadura. En la [Figura 148](#) se muestra el comportamiento del generador alimenta una carga con un factor de potencia igual a la unidad, describiéndose a continuación:

Figura 148. 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 149](#):

Figura 149. Circuito equivalente por fase mostrando la fem inducida en el devanado de la armadura debida a la reacción de esta

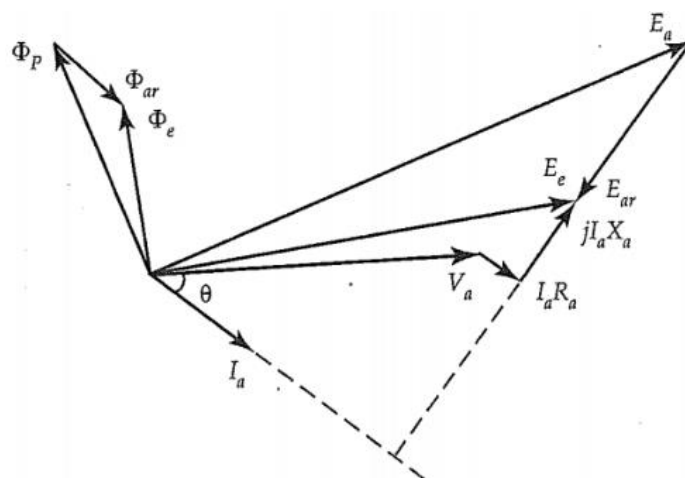


- El voltaje en las terminales por fase $\tilde{V}_a$ se obtiene restando las caídas de voltaje $\tilde{I}_a R_a$ y $j\tilde{I}_a X_a$ de $\tilde{E}_e$, quedando como sigue:

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

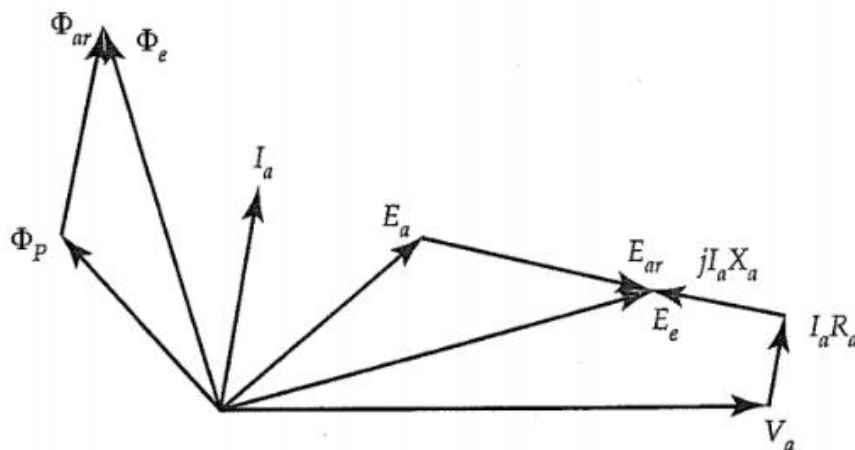
Los diagramas fasoriales para los factores de potencia en atraso y en adelante se muestran en la [Figura 150](#):

Figura 150. 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 151. 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 152](#), 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 152. Circuito equivalente por fase de un generador síncrono con reacción de la armadura

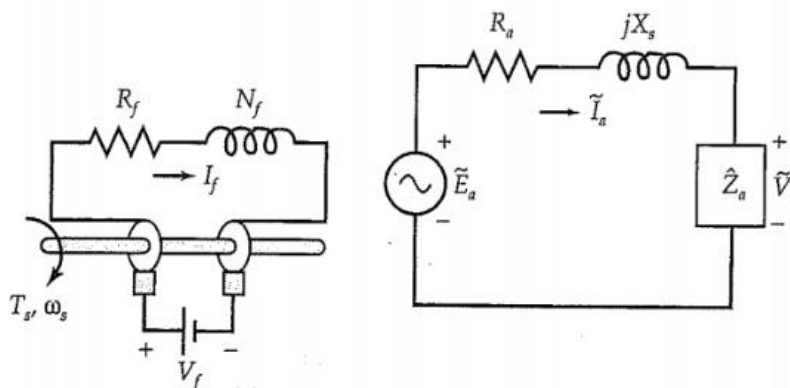
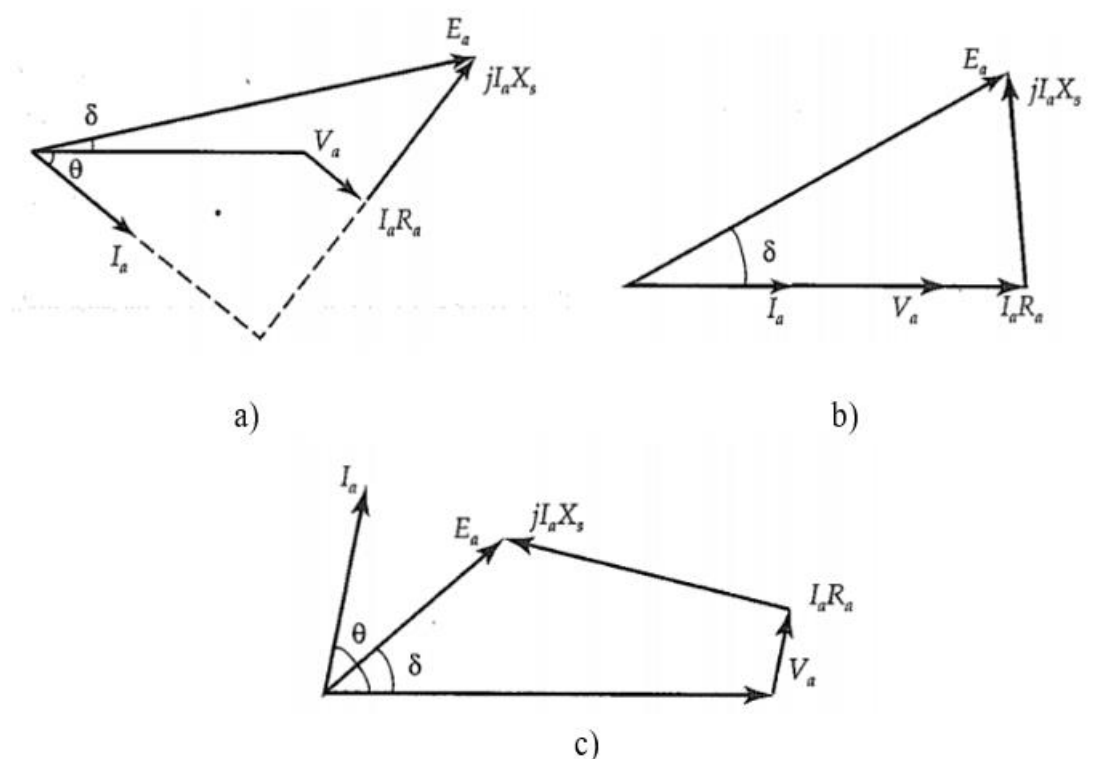


Figura 153. diagramas fasoriales correspondientes para el factor de potencia de cargas a) en atraso, b) igual a la unidad y c) en adelante



3.5 Regulación de tensión con diferentes tipos de carga

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:

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

3.6 Operación en paralelo de los generadores sincrónicos

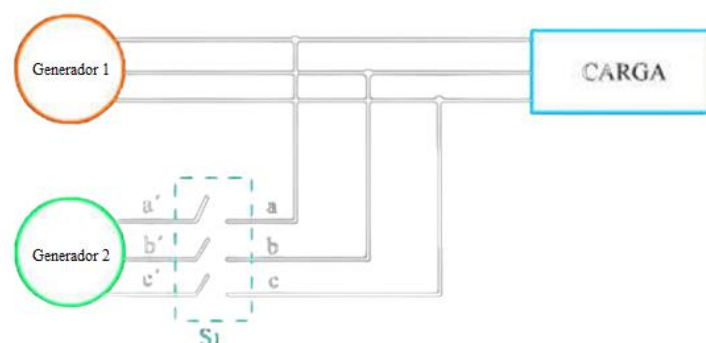
En la actualidad es muy raro encontrar que un generador síncrono suministre energía eléctrica exclusivamente a su propia carga. Esta situación solo se encuentra en algunas aplicaciones que se salen de lo normal, tales como los generadores de emergencia. En todas las demás aplicaciones de generadores 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 154](#) 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 154. 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 cuándo 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.

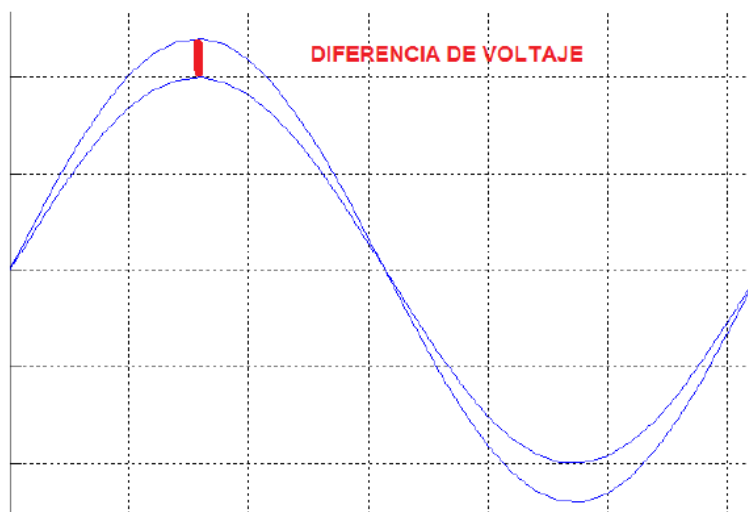
En otras palabras, el voltaje en la fase a debe ser exactamente igual al voltaje en la fase a' y así en forma sucesiva para las fases b -b' y c-c'. Para lograr lo anterior, se deben cumplir las siguientes condiciones de puesta en paralelo:

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 155](#), porque podría producir un flujo de corriente alto que puede dañar los generadores.

Figura 155. 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.

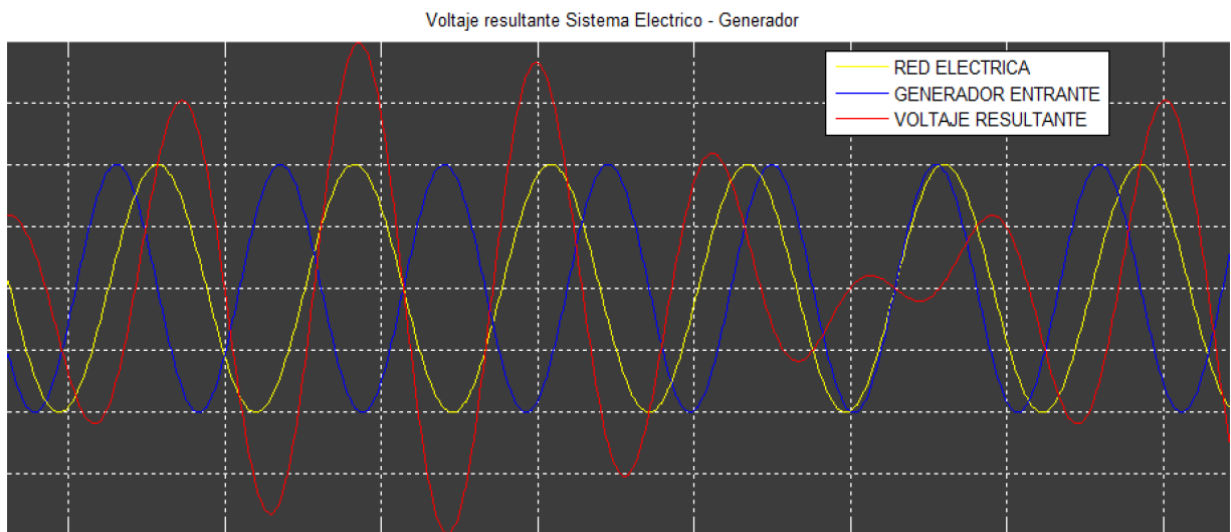
2. *La frecuencia de los dos generadores debe ser igual.* El generador eléctrico debe tener la misma frecuencia del sistema al que va ser conectado, con el fin de que no existan transitorios de potencia, los cuales pueden ocasionar el deterioro y la disminución de la vida útil de las máquinas.

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 156](#) 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.

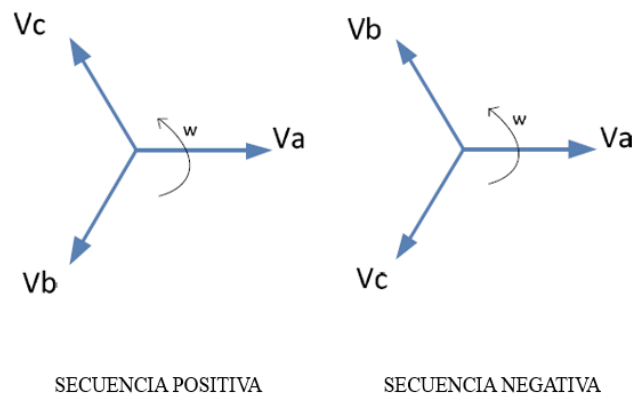
El voltaje resultante oscila entre un valor máximo (suma de las dos señales), y un valor nulo, mientras la frecuencia de la envolvente del voltaje resultante es la diferencia de frecuencias de las señales de los generadores.

Figura 156. 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 157](#) se muestra las secuencias existentes que pueden tener los sistemas trifásicos.

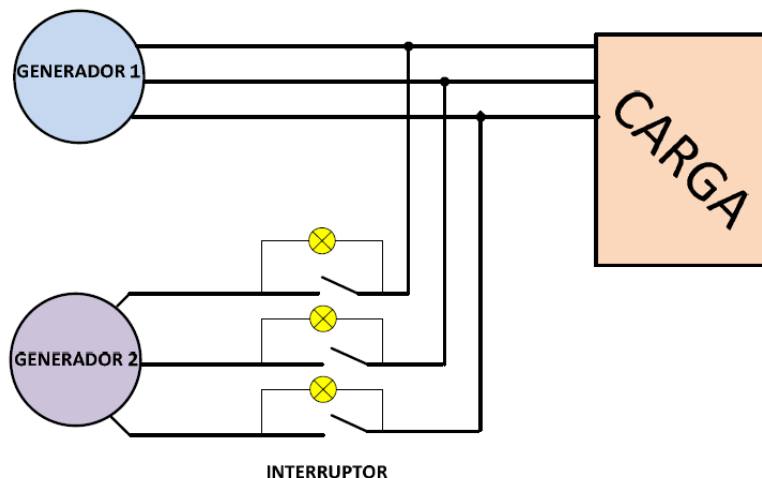
Figura 157. Secuencia de fases



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.

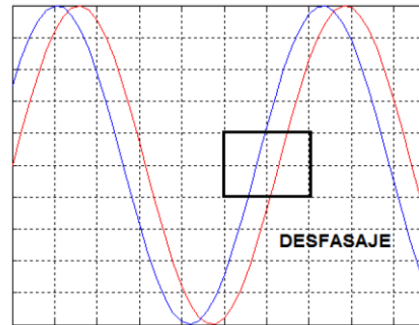
La comprobación de la secuencia de fases se la puede realizar por medio del método de las 3 lámparas, como se muestra en la [Figura 158](#), en este método se conectan 3 lámparas a través de los terminales abiertos del interruptor que conecta el generador entrante al sistema, como la fase cambia entre 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 158. 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 159](#) se muestra dos señales de voltaje homónimas desfasadas.

Figura 159. 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 160](#).

Figura 160. Sincronoscopio

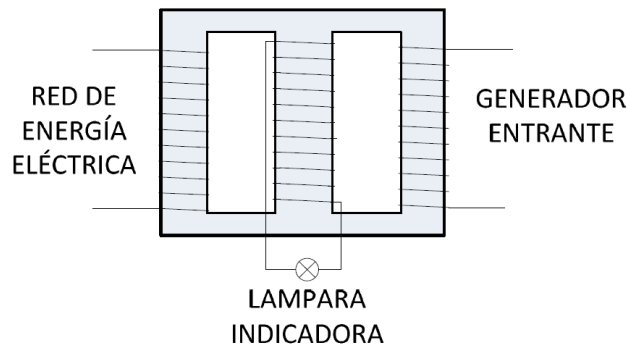


La aguja giratoria muestra la diferencia entre las dos fases homónimas, si la aguja está alineada verticalmente indica que los sistemas estén en fase y puede entrar en paralelo. Si el generador entrante es más rápido que el sistema en funcionamiento, entonces el ángulo de fase aumenta y las agujas del 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 161](#).

Figura 161. Transformador sincronizador especial

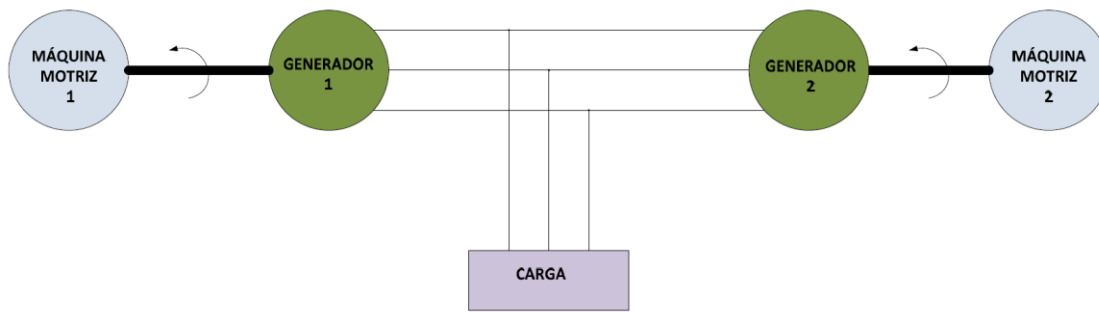


Cuando los voltajes del generador entrante están en fase con los voltajes del de la red eléctrica, harán que los flujos magnéticos de los devanados laterales se neutralicen en la rama central, por tanto la lámpara conectada a dicha rama permanecerá apagada, si existiera alguna diferencia de fase entre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

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 162](#) se muestra la conexión y operación de dos generadores en paralelo.

Figura 162. Operación Generador – Generador

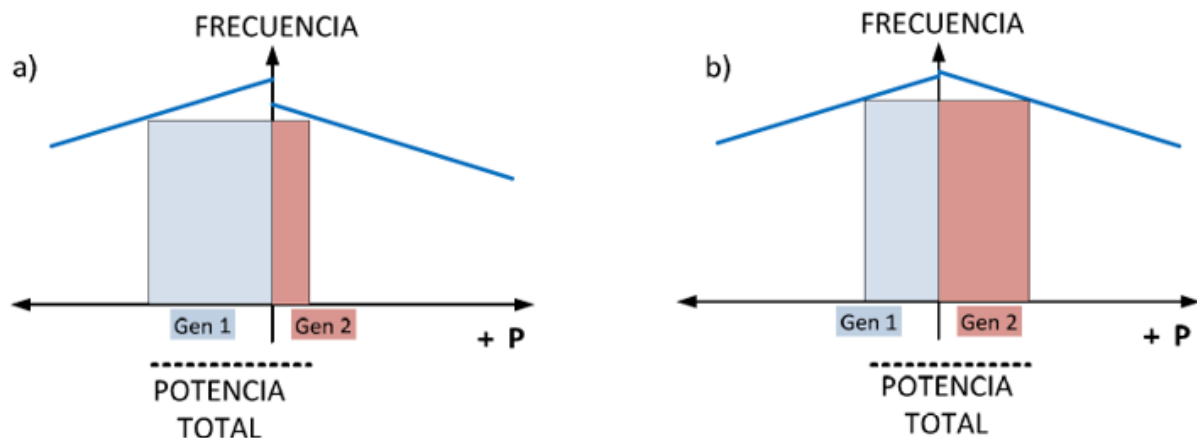


$$P_{TOTAL} = P_{G1} + P_{G2} \quad (3.1)$$

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

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 163](#) se muestra el efecto del aumento de velocidad en la máquina motriz del generador 2.

Figura 163. 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.

3.7 Métodos de arranque de los motores sincrónicos

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

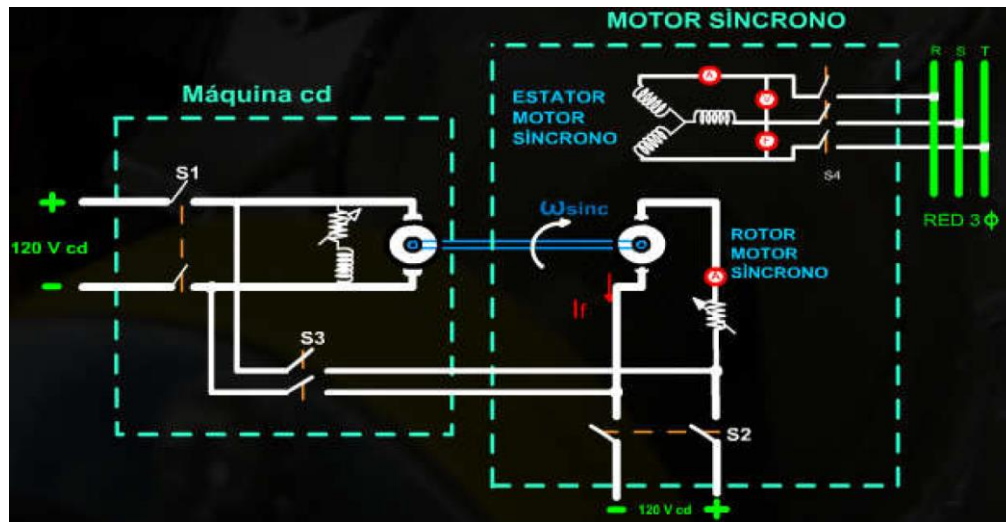
Consiste en fijarle un motor externo de arranque y llevar la máquina hasta su velocidad plena con ese motor. Entonces, la máquina síncrona se puede conectar en paralelo con su sistema de potencia como un generador, y el motor de arranque puede desacoplarse del eje de la máquina. Desconectado el motor 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 164](#).

Figura 164. 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.

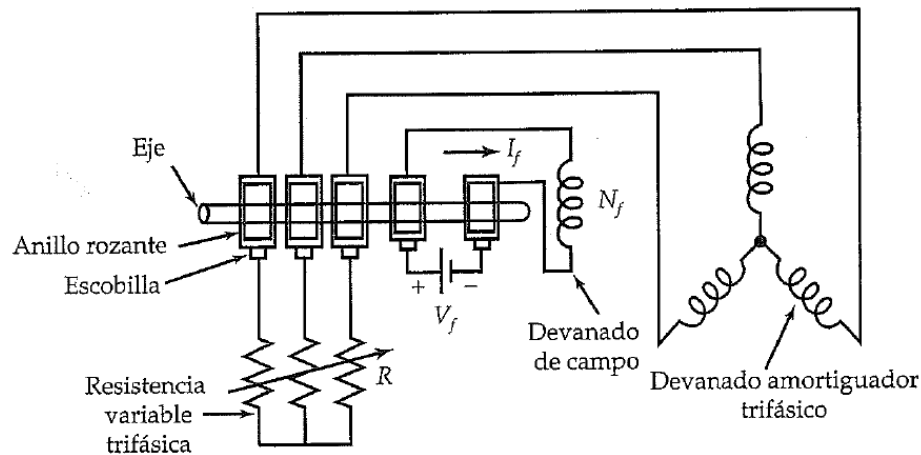
Si se adicionan devanados de amortiguación a una máquina síncrona para el arranque, se obtiene una ventaja gratuita: aumento en la estabilidad de la máquina. El campo magnético del estator rota a velocidad constante, que cambia solo cuando varía la frecuencia del sistema. Si el rotor gira a velocidad 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 cortocircuitelos.
- 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 165. Devanado amortiguador trifásico en el rotor de un motor síncrono



3.8 Análisis fasorial del motor síncrono bajo diferentes condiciones de carga y de excitación

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.

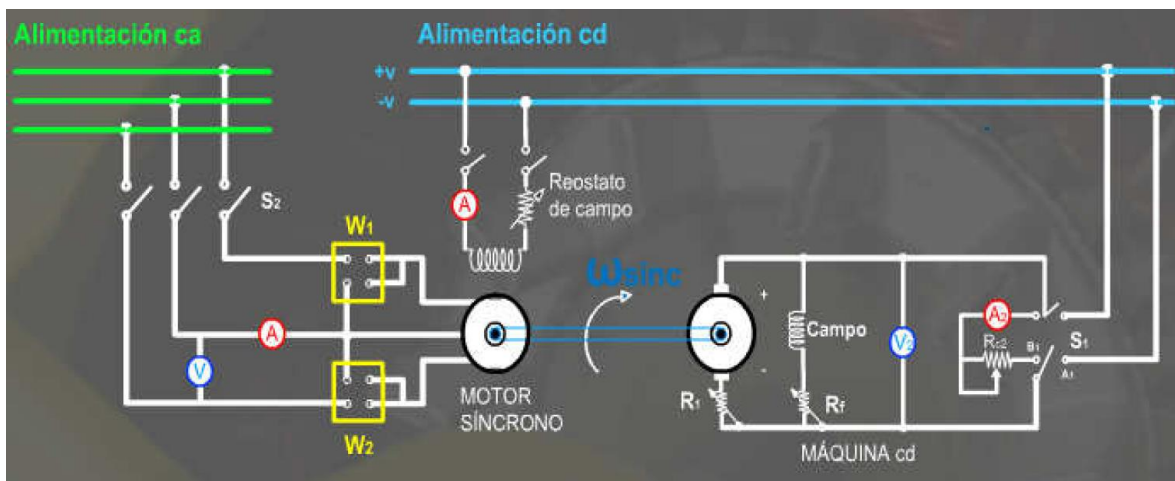
La potencia que demanda un motor síncrono está dada por:

$$P = \sqrt{3} V_L I_a \cos \theta$$

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 166*.

Figura 166. 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} .

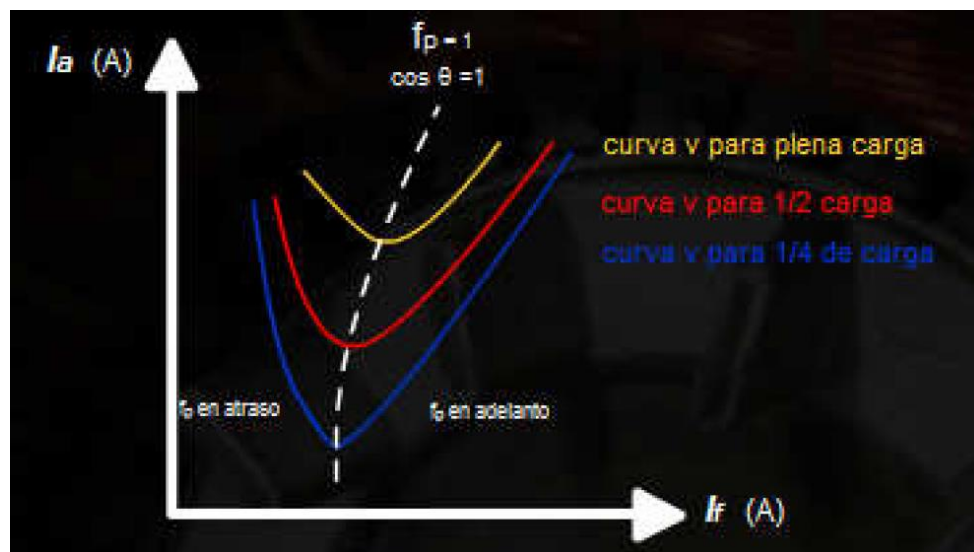
Cuando el motor se encuentra operando en vacío se toman lecturas del amperímetro, voltímetro y vatímetros (W_1 y W_2) en el lado de corriente alterna para diferentes valores de corriente de excitación. La excitación se varía con la ayuda de un reóstato que se instala en el circuito de campo del motor 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 167](#).

Figura 167. 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.

3.9 Potencia, par electromagnético y rendimiento

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

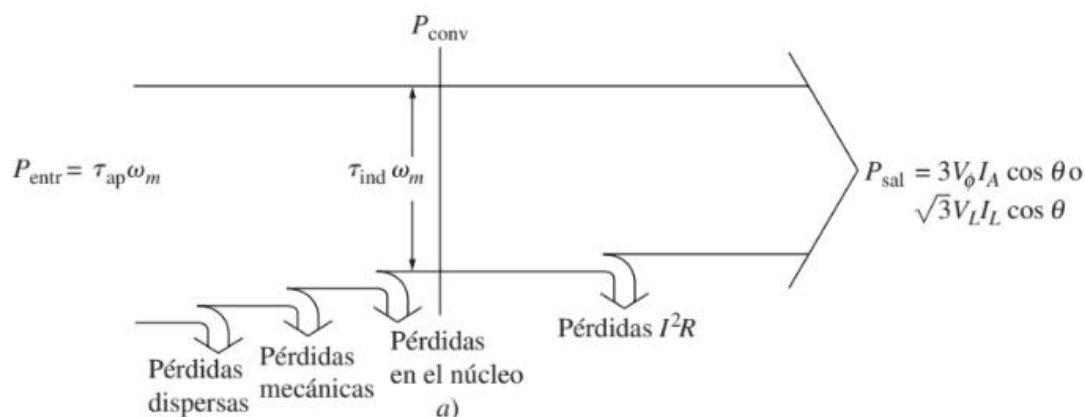
$$P_{in} = 3 V_a I_a \cos \theta + 3 I_a^2 R_a + P_r + P_{st} + V_f I_f$$

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:

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

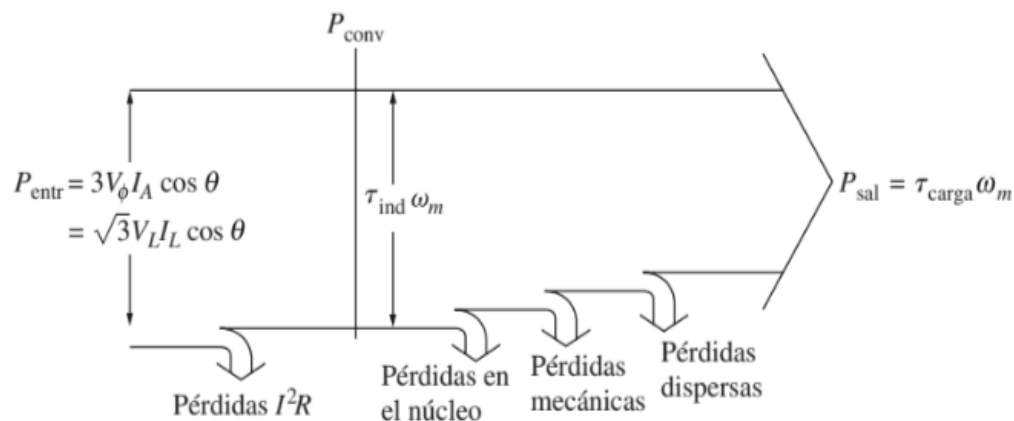
Ya que la pérdida en el cobre en la armadura depende de la corriente de la carga, se considera una pérdida variable. La [Figura 168](#) muestra el diagrama de flujo de un generador de ca trifásico:

Figura 168. 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 169](#):

Figura 169. Diagrama de flujo de potencia de un motor de ca trifásico



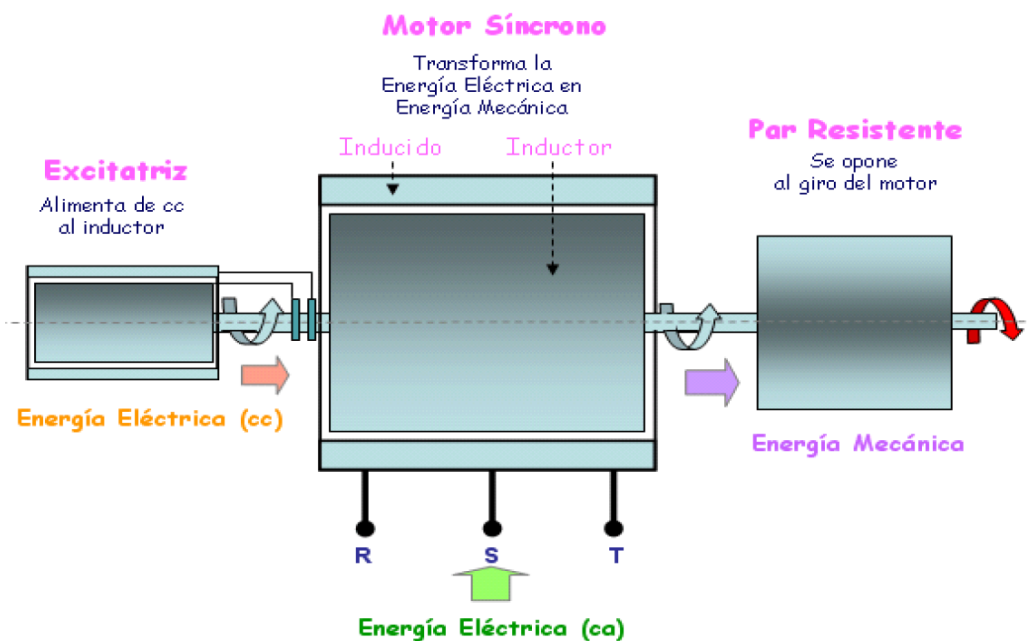
La eficiencia (η) de una máquina de CA se define a través de la siguiente ecuación:

$$\eta = \frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{in}}} \times 100$$

La diferencia entre potencia de entrada (P_{in}) y potencia de salida (P_{out}) de la máquina corresponde a las pérdidas que ocurren en el interior.

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 170](#)

Figura 170. 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:

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

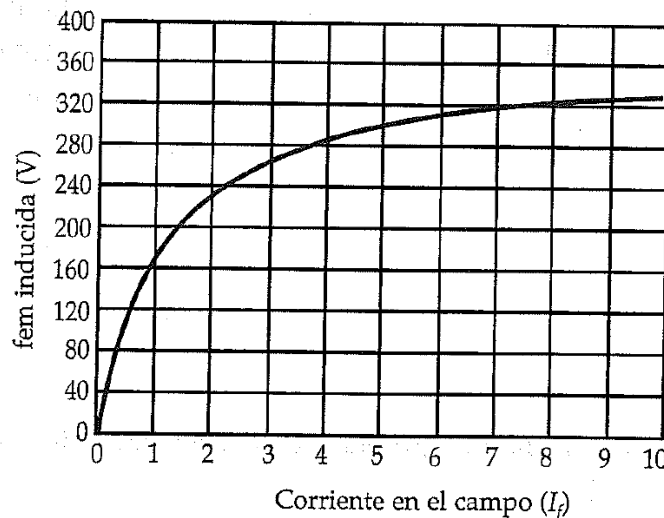
Donde ω_{sin} : velocidad síncrona
f: frecuencia eléctrica
P: número de polos

Ejercicios del Tema 3

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 plena carga, la fem inducida es

$$E = V - R_i I_i = 240 + 1000 * 0.01 = 250 \text{ V}$$

b) La potencia desarrollada es

$$P_d = E I_a = 250 * 1000 = 250\,000 \text{ W}, \quad 250 \text{ kW}$$

$$\omega = \frac{2\pi * 600}{60} = 20\pi \text{ rad/s}$$

c) El par desarrollado a plena carga es

$$T_d = \frac{P_d}{\omega_m} = \frac{250000}{20\pi} = 3978.87 \text{ Nm}$$

d) La potencia mecánica suministrada a plena carga debe ser

$$P_{inm} = P_d + P_m = 250 + 10 = 260 \text{ kW}$$

Por tanto, el par aplicado es

$$T_s = \frac{260000}{20\pi} = 4138.03 \text{ Nm}$$

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 $500 * 2.5 = 1250 \text{ A t/polo}$. La fmm de desmagnetización debida a la reacción de la armadura es $0.25 * 1000 = 250 \text{ A t /polo}$. Así, la fmm que debe suministrar el devanado del campo es $1250 + 250 = 1500 \text{ A t /polo}$. La corriente real del campo a plena carga es

$$I_e = \frac{1500}{500} = 3 \text{ A}$$

La pérdida de potencia en el devanado del campo es $V_e I_e = 120 * 3 = 360 \text{ W}$. La potencia total admitida es

$$P_{in} = P_{inm} + V_e I_e = 260 + 0.36 = 260.36 \text{ kW}$$

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

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 en la barra conductora a 240 V en una estación y un alimentador con resistencia igual a $0.25 \, \Omega$. 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 3

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

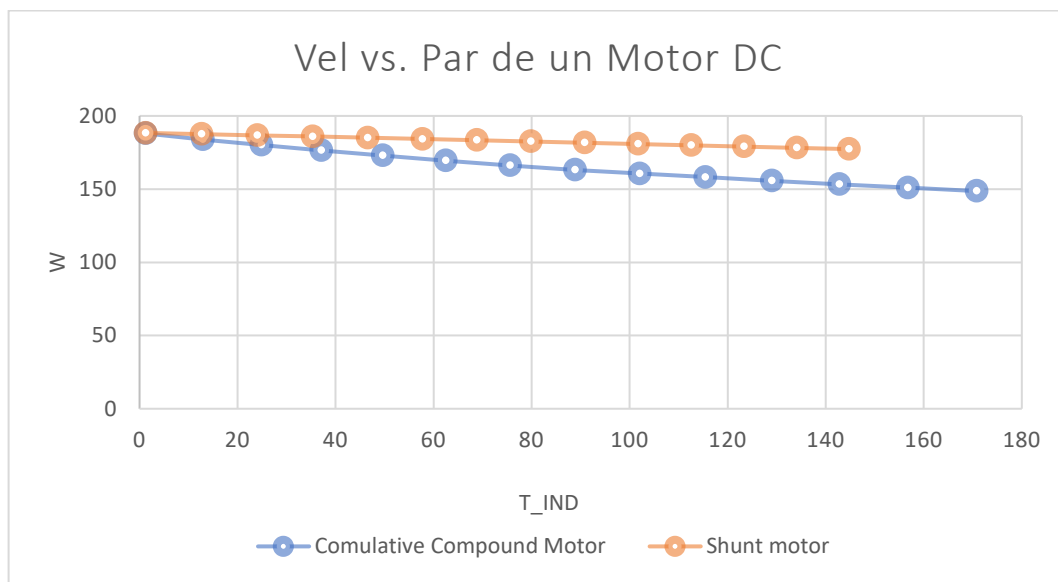
EXCITACIÓN INDEPENDIENTE

la	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	0.8993266	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	0.972727						

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



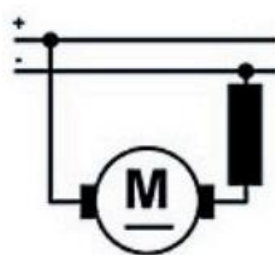
EJERCICIO 4

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 $0,60 \, \Omega$ y las bobinas inducidas de $0,40 \, \Omega$. 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 5

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:

a) Esquema de conexiones.

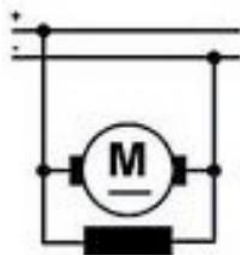
b) Intensidad de excitación e intensidad del inducido.

c) Intensidad absorbida de la línea.

- d) Calcular las pérdidas en el cobre de cada devanado.
 e) Rendimiento.
 f) Par motor.

Solución

a)



b)

$$I_{\text{excitación}} = \frac{V}{R_{\text{ex}}} = \frac{100}{125} = 0,8 \text{ A}$$

$$I_{\text{inducido}} = \frac{V - \varepsilon}{R_i} = \frac{100 - 90}{0,2} = 50 \text{ A}$$

c)

$$I_{\text{total}} = I_{\text{excitación}} + I_{\text{inducido}} = 0,8 + 50 = 50,8 \text{ A}$$

d)

$$P_{\text{cu excitación}} = I_{\text{excitación}}^2 \cdot R_{\text{ex}} = 0,8^2 \cdot 125 = 80 \text{ W}$$

$$P_{\text{cu inducido}} = I_{\text{inducido}}^2 \cdot R_i = 50^2 \cdot 0,2 = 500 \text{ W}$$

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)

$$M = \frac{P_{\text{util}}}{\omega}$$

$$\omega = \frac{n \cdot 2 \cdot \pi}{60} = \frac{4200 \cdot 2 \cdot \pi}{60} = 439,82 \text{ rad/s}$$

$$M = \frac{P_{\text{util}}}{\omega} = \frac{4400}{439,82} = 10 \text{ N} \cdot \text{m}$$

Tema 4 Motores de inducción

El motor es uno de los elementos más importante en cualquier equipo o máquinas, son los encargados de transformar la energía para el funcionamiento adecuado del dispositivo. Los motores comprenden una tipología, uno de ellos es el **motor de inducción**.

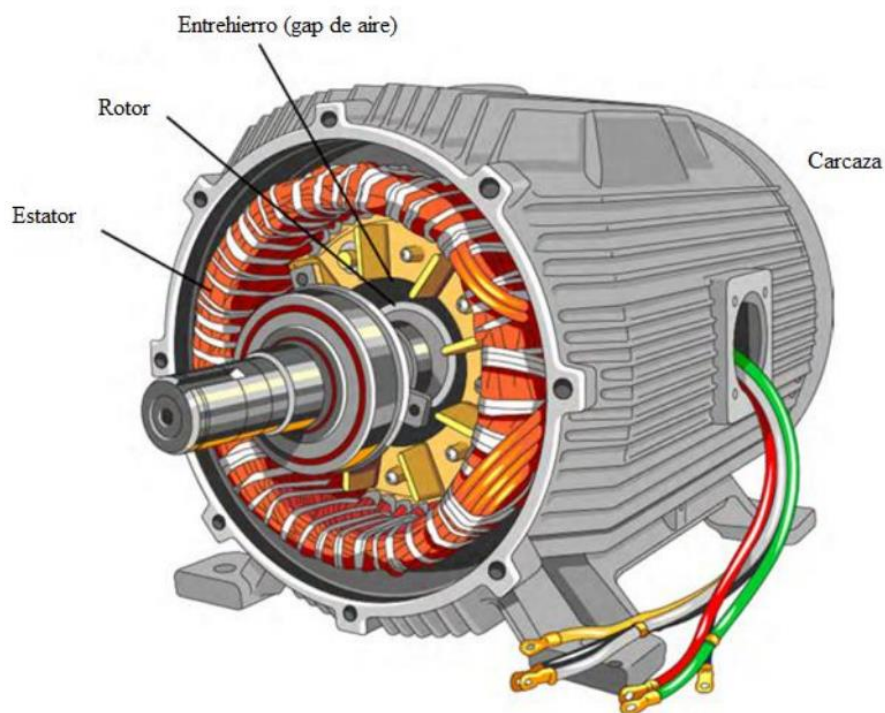
Es muy utilizado en equipos industriales. Este dispositivo por lo general funciona con corriente alterna. El primer prototipo de motor eléctrico capaz de funcionar con corriente alterna fue desarrollado y construido por el ingeniero Nikola Tesla y presentado en el American Institute of Electrical Engineers en 1888.

Este tipo de instrumento también es conocido como asíncrono y hoy día lo podemos encontrar en los carros eléctricos

Construcción de motores de inducción

La máquina asíncrona o de inducción consta de una parte fija llamada estátor y una parte móvil llamada rotor, separadas ambas por un pequeño espacio de aire denominado entrehierro.

Figura 171. Motor de inducción parcialmente ensamblado, donde puede distinguirse sus partes principales

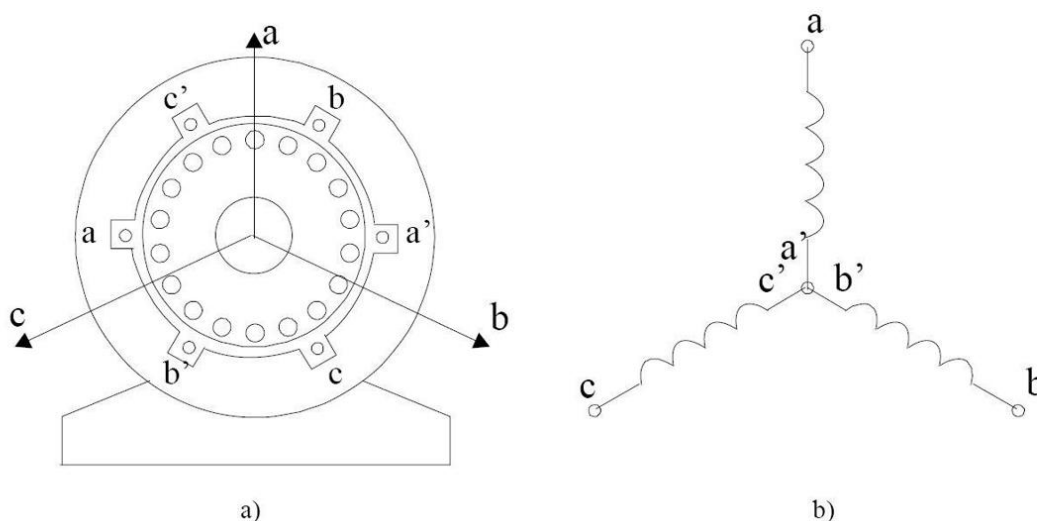


La máquina de inducción es básicamente una máquina polifásica de corriente alterna conectada a una red eléctrica por el estator, por el rotor o bien por ambos. La alimentación es trifásica y a través de los arrollamientos inductores (generalmente el estator), produciendo un campo giratorio en el entrehierro de la máquina.

Este campo inducirá tensiones en los arrollamientos del inducido (rotor generalmente), que está galvánicamente aislado de la red de alimentación. Si los arrollamientos del rotor o inducido están cortocircuitados se generarán corrientes alternas en su seno.

Estator. Consiste en una bobina trifásica con un núcleo y una carcasa metálica. Los devanados están colocados de tal manera que son eléctrica y mecánicamente 120° .

Figura 172. Motor de inducción con 6 ranuras en el estator a) sección del motor, b) esquema de conexión en estrella



El bobinado está montado en el núcleo de hierro laminado para proporcionar un camino de baja resistencia para el flujo generado por las corrientes de CA.

Puesto que cada devanado produce sólo un polo norte y un polo sur magnéticos, se dice que se trata de un devanado de dos polos.

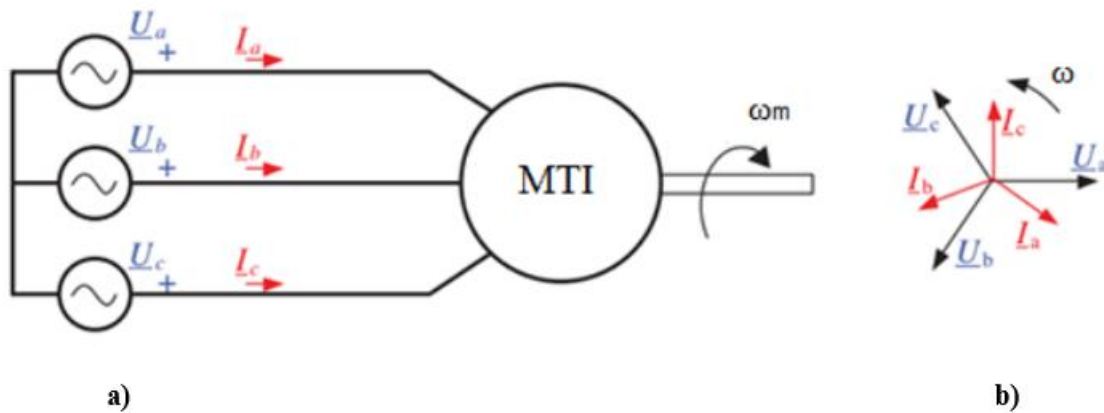
Si se aplica una terna de corrientes trifásicas al estator, se observará qué ocurre en diferentes instantes de tiempo. Se supone que las corrientes de los tres devanados están dadas por las ecuaciones:

$$i_{aa'}(t) = i_p \sin \omega t$$

$$i_{bb'}(t) = i_p \sin(\omega t - 120^\circ)$$

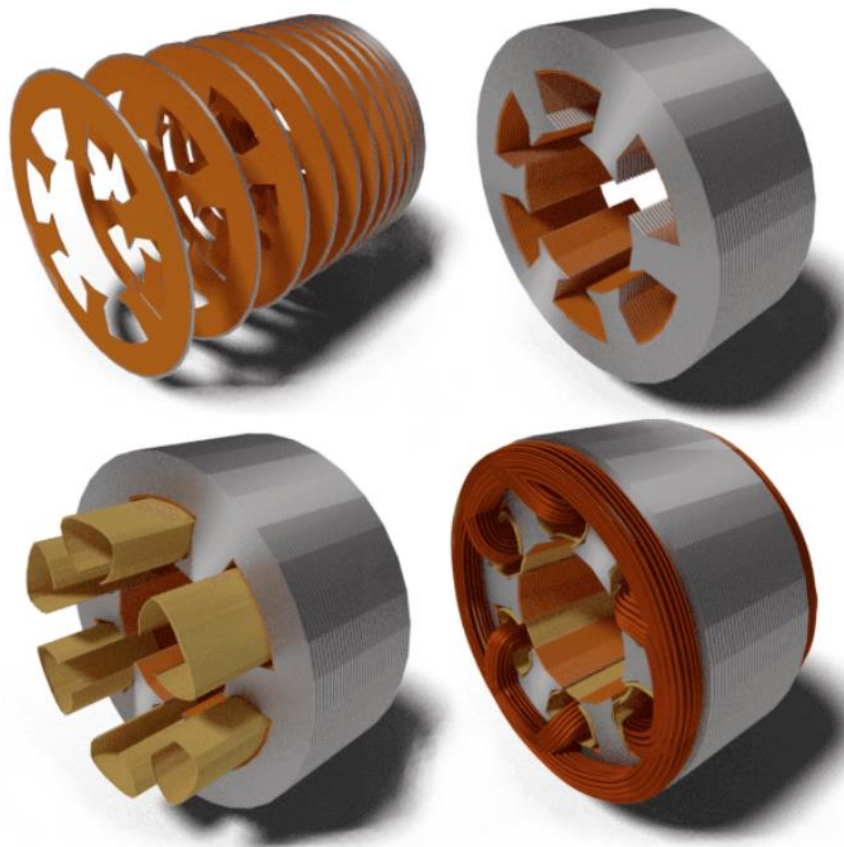
$$i_{cc'}(t) = i_p \sin(\omega t + 120^\circ)$$

Figura 173. a) Esquema de conexión de un motor trifásico de inducción, b) Diagrama fasorial de tensiones y corrientes de entrada estáticas.



La frecuencia angular ω_m es la velocidad mecánica del eje del motor, mientras que la frecuencia angular de las tensiones y corrientes de entrada es ω . Como el número de pares de polos es unitario, la frecuencia de las tensiones y las del campo estático B_s que rota en el interior del estator coinciden entre sí: $\omega = \omega_s$, ($\omega_s = \omega / P$, donde P : pares de polos del estator).

Figura 174. Estator de motor de inducción



La interacción entre el campo del inductor y las corrientes del inducido produce un par desde velocidad nula del rotor hacia adelante. La velocidad del rotor en la que las intensidades de los devanados del secundario son nulas es conocida como velocidad síncrona. Los arrollamientos del rotor pueden ser polifásicos (rotor bobinado) o estar contruidos mediante barras cortocircuitadas por anillos (rotor de jaula de ardilla).

Todos los arrollamientos tanto estatóricos como rotoricos están ubicados en ranuras uniformes practicadas en chapas delgadas de acero al silicio.

La máquina de inducción tiene un entrehierro bastante uniforme de 0,2 a 3 mm, correspondiendo los valores más altos a potencias mayores, del orden de MW.

Los devanados del rotor pueden estar cortocircuitados, conectados a una impedancia externa o conectados a una fuente de potencia con frecuencia y tensión variables. En el último caso la máquina funciona casi como una máquina síncrona ya que está doblemente alimentada y ambas frecuencias, estatórica y deslizamiento- rotorica vienen impuestas, la última dependiente de la velocidad.

4.1 Principio y análisis del motor jaula de ardilla

Cuando se le da un suministro trifásico al bobinado del estator, se establece una rotación campo magnético en el espacio. Este el campo magnético rotativo tiene una velocidad que se conoce como la velocidad sincrónica.

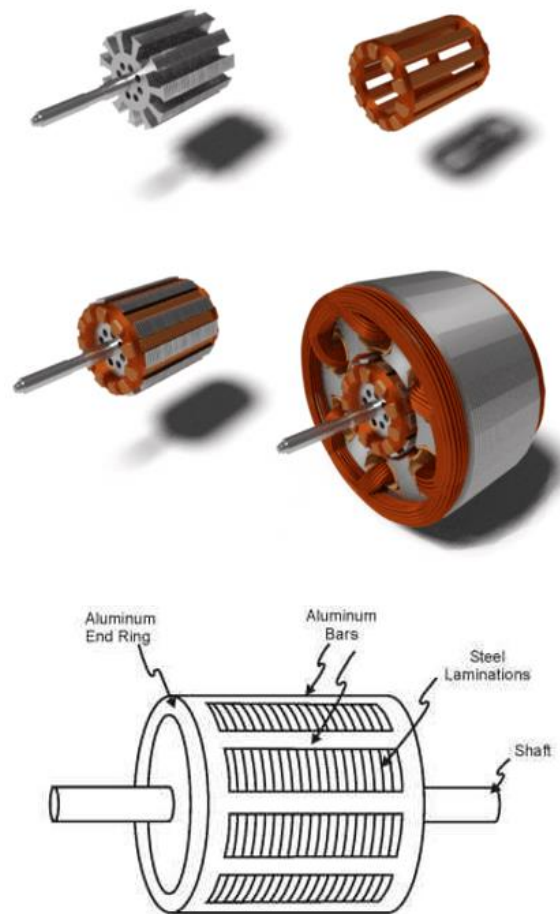
Este campo magnético giratorio induce al voltaje en las barras del rotor y por lo tanto el cortocircuito corriente empiezan a fluir en las barras del rotor.

Estas corrientes del rotor generan su campo auto-magnético que interactuará con el campo del estator. Ahora el campo del rotor tratará de oponerse a su causa, y por lo tanto el rotor comienza a seguir la rotación campo magnético.

En el momento en que el rotor atrapa el campo magnético rotativo, la corriente del rotor cae a cero, ya que no hay más movimiento relativo entre el campo magnético rotativo y el rotor. Por lo tanto, en ese momento el rotor experimenta una fuerza tangencial nula, por lo que el rotor desacelera por el momento.

Rotor. Es la parte del motor que estará en una rotación para dar salida mecánica para una cantidad dada de energía eléctrica. La potencia nominal del motor se menciona en la placa de identificación en caballos de fuerza. Consiste en un eje, barras de cobre/aluminio en cortocircuito y un núcleo.

Figura 175. Rotor de motor de inducción



Después de la desaceleración del rotor, el movimiento relativo entre el rotor y el campo magnético rotativo restablece, por lo tanto, la corriente del rotor es inducida de nuevo. Así pues, de nuevo, la fuerza tangencial para la rotación del rotor se restablece, y por lo tanto de nuevo el rotor comienza a seguir el campo magnético rotativo, y de esta manera, el rotor mantiene una velocidad constante que es justo menor que la velocidad del campo magnético rotativo o la velocidad sincrónica.

El deslizamiento es una medida de la diferencia entre la velocidad del campo magnético giratorio y la velocidad del rotor. La frecuencia de la corriente del rotor = frecuencia de suministro del deslizamiento

Clasificación del motor de inducción jaula de ardilla

La NEMA (Asociación Nacional de Fabricantes Eléctricos) en Estados Unidos y la IEC en Europa han clasificado el diseño de los motores de inducción de jaula de

ardilla en función de sus características de velocidad y par en algunas clases. Estas clases son: Clase A, Clase B, Clase C, Clase D, Clase E y Clase F.

Diseño de clase A

1. Un par de arranque normal.
2. Una corriente de arranque normal.
3. Un deslizamiento bajo.
4. En esta clase, el par de arranque es siempre del 200 al 300 por ciento del par de carga completa y se produce en un deslizamiento bajo (es menos del 20 por ciento).
5. Para esta clase, el par de arranque es igual al par nominal para los motores más grandes y es alrededor del 200 por ciento o más del par nominal para los motores más pequeños.

Diseño de clase B

1. Par de arranque normal,
2. Baja la corriente de arranque,
3. Un deslizamiento bajo.
4. Motor de inducción de esta clase produce aproximadamente el mismo par de arranque que el motor de inducción de clase A.
5. El par de extracción siempre es mayor o igual al 200 por ciento del par de carga nominal. Pero es menor que el del diseño de clase A porque ha aumentado la reactancia del rotor.
6. Una vez más el deslizamiento del rotor sigue siendo relativamente bajo (menos del 5%) a plena carga.
7. Las aplicaciones del diseño de la clase B son similares a las del diseño A. Pero se prefiere el diseño B por sus menores requerimientos de corriente de arranque.

Diseño Clase C

1. Alto par de arranque.
2. Corrientes de arranque bajas.
3. Bajo deslizamiento a plena carga (menos del 5 %).
4. Hasta el 250 por ciento del par de carga completa, el par de arranque está en esta clase de diseño.
5. El par de extracción es inferior al de los motores de inducción de clase A.
6. En este diseño los motores están contruidos con rotores de doble jaula. Son más caros que motores de las clases A y B.
7. Los diseños de clase C se utilizan para cargas de alto par de arranque (bombas, compresores y transportadores cargados).

Diseño de la clase D

1. En este diseño de clase los motores tienen un par de arranque muy alto (275 por ciento o más del par nominal).
2. Una corriente de arranque baja.
3. Un deslizamiento alto a plena carga.
4. De nuevo en esta clase de diseño la alta resistencia del rotor desplaza el par máximo a una velocidad muy baja.
5. Incluso es posible a velocidad cero (100 por ciento de deslizamiento) que se produzca el mayor par en esta clase de diseño.
6. El deslizamiento a plena carga (es típicamente del 7 al 11 por ciento, pero puede llegar hasta el 17 por ciento o más) en esta clase de diseño es bastante alto debido a la alta resistencia del rotor siempre.

Diseño de la Clase E

1. Par de arranque muy bajo.
2. Corriente de inicio normal.
3. Deslizamiento bajo.
4. Compensador o resistencia se utilizan para controlar la corriente de arranque.

Diseño Clase F

1. Par de arranque bajo, 1,25 veces el par a plena carga cuando está lleno voltaje se aplica.
2. Corriente de arranque baja.
3. Deslizamiento normal.

4.2 Principio y análisis del Motor con rotor devanado

Un rotor devanado está constituido por un grupo completo de devanados trifásicos que se construyen para ser las imágenes especulares de los devanados del estator. Las fases de los devanados del rotor están conectadas usualmente en estrella (Y), y los extremos de los tres conductores del rotor están unidos a anillos rozantes dispuestos sobre el eje del motor. Los devanados del rotor están cortocircuitados a través de escobillas montadas en los anillos rozantes. En los motores de inducción del rotor devanado, sus corrientes rotóricas son accesibles en las escobillas del estator, donde pueden ser medidas, y donde se puede insertar resistencia extra al circuito del rotor.

Figura 176. Rotor devanado. A) corte transversal, para un rotor devanado con un par de polos b) rotor devanado con múltiples polos

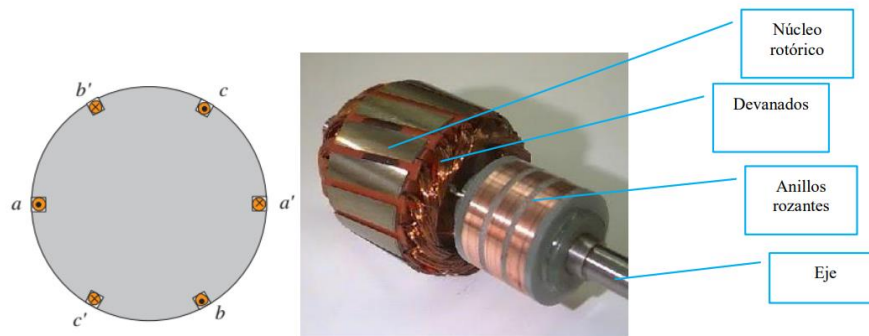
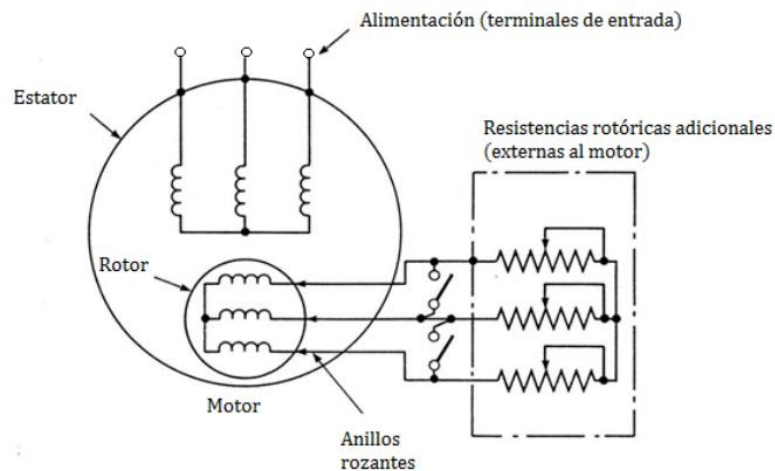
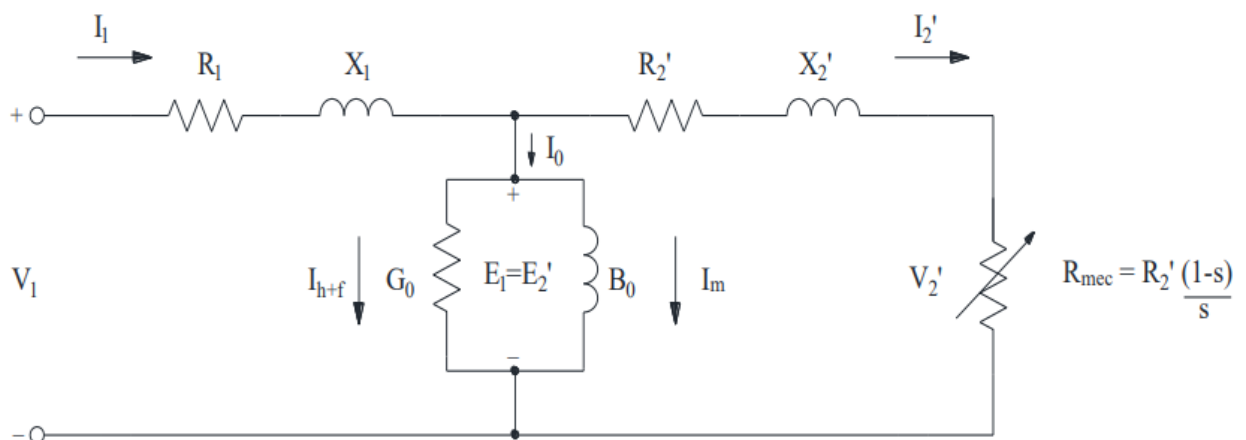


Figura 177. Diagrama de conexión de un rotor bobinado dentro del estator de un motor trifásico de inducción



El circuito equivalente de un motor de inducción es similar al del transformador.

Figura 178. Circuito equivalente de un motor monofásico de inducción



Debe notarse la inclusión de una resistencia en el circuito secundario. Esta resistencia recibe el nombre de “resistencia de carga” y como puede observarse, su valor depende del deslizamiento s . Este componente modela la potencia mecánica de salida (potencia entregada al eje del motor).

$$R_{mec} = R_2' \left(\frac{1-s}{s} \right) : \text{resistencia de carga mecánica}$$

Además, debe tenerse en cuenta que el circuito es un equivalente monofásico de la máquina, ya que ésta es originalmente trifásica. De esta forma, el circuito equivalente modela una de las fases del motor, bajo la presunción de que todas sus fases son idénticas entre sí, y la alimentación es simétrica y balanceada.

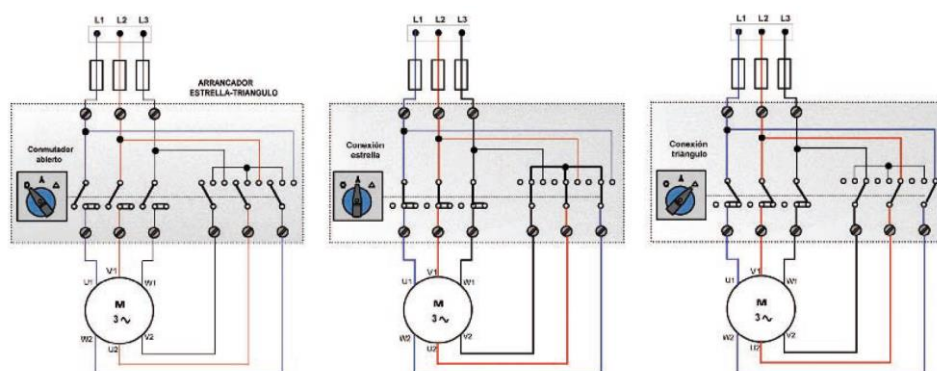
4.3 Arranque y control de velocidad de los motores de inducción

El procedimiento más empleado para el arranque de motores trifásicos de rotor jaula de ardilla consiste en conectar el motor en estrella durante el periodo de arranque y, una vez lanzado, conectarlo en triángulo para que quede conectado a la tensión nominal.

Para ello, se hace necesario intercalar entre el motor y la línea un conmutador manual especial que realiza las conexiones de los extremos del bobinado del motor, sin realizar los puentes sobre la placa de bornes.

Este conmutador posee tres posiciones: la inicial de desconexión, la siguiente que conecta los bobinados del motor en estrella y la tercera que conecta los bobinados en triángulo. La parada se hace de forma inversa, como se muestra en la [Figura 179](#).

Figura 179. Arranque estrella triángulo de un motor trifásico mediante arrancador manual



La potencia de salida mecánica podrá ser calculada como la potencia activa absorbida por la resistencia R_{mec} , de acuerdo a:

$$P_{mec} = 3 |I'_2|^2 R_{mec}$$

Nota: No debe confundirse conceptualmente a la resistencia ficticia R_{mec} con las resistencias R_1 y R_2 , las cuales modelan pérdidas en los arrollamientos por Efecto Joule.

Una potencia puede escribirse como el producto entre la velocidad angular y el par actuante:

$$P = M \omega$$

El par desarrollado entonces puede obtenerse como:

$$M = \frac{3(I'_2)^2 R'_2}{s \omega_s}$$

Por otro lado, observando el circuito equivalente de la [Figura 179](#), es posible obtener la corriente estatórica que rotórica que se inducirá en el rotor del motor de inducción trifásico:

$$I'_2 = \frac{V_f}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R'_2}{s}\right)^2 + (X_1 + X'_2)^2}}$$

Donde

V_f Tensión de fase aplicada al estator

R_1, X_1 Resistencia y reactancia estatórica por fase

R_2, X'_2 Resistencia y reactancia rotórica por fase (valores referidos al estator)

Combinando la ecuación que describe a la corriente con la ecuación de corriente con la ecuación de par, se obtiene:

$$M = \frac{3V_f^2 R'_2}{\omega_s s \left(\left(R_1 + \frac{R'_2}{s} \right)^2 + (X_1 + X'_2)^2 \right)}$$

Graficando el par desarrollado en función de la velocidad mecánica en el eje, se obtiene una curva que tiene el aspecto que se muestra a continuación:

Figura 180. Curva “par – velocidad” típica de un motor trifásico de inducción

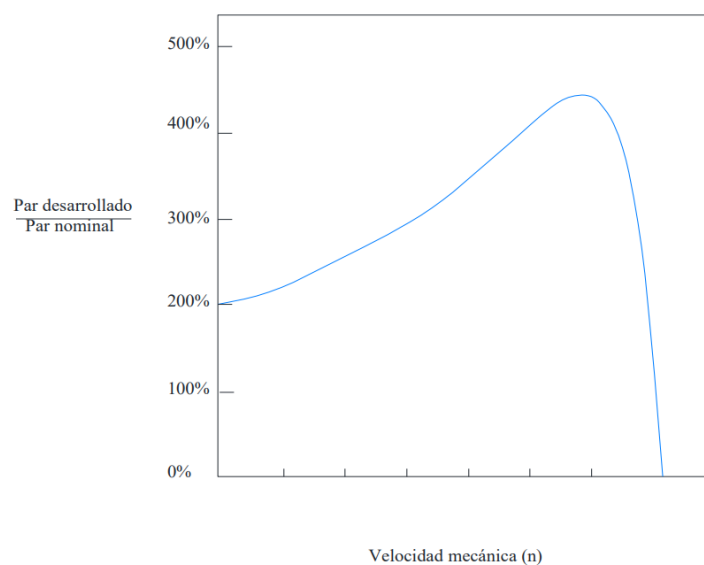


Figura 181. Puntos característicos de la curva “par – velocidad” de un motor trifásico de inducción

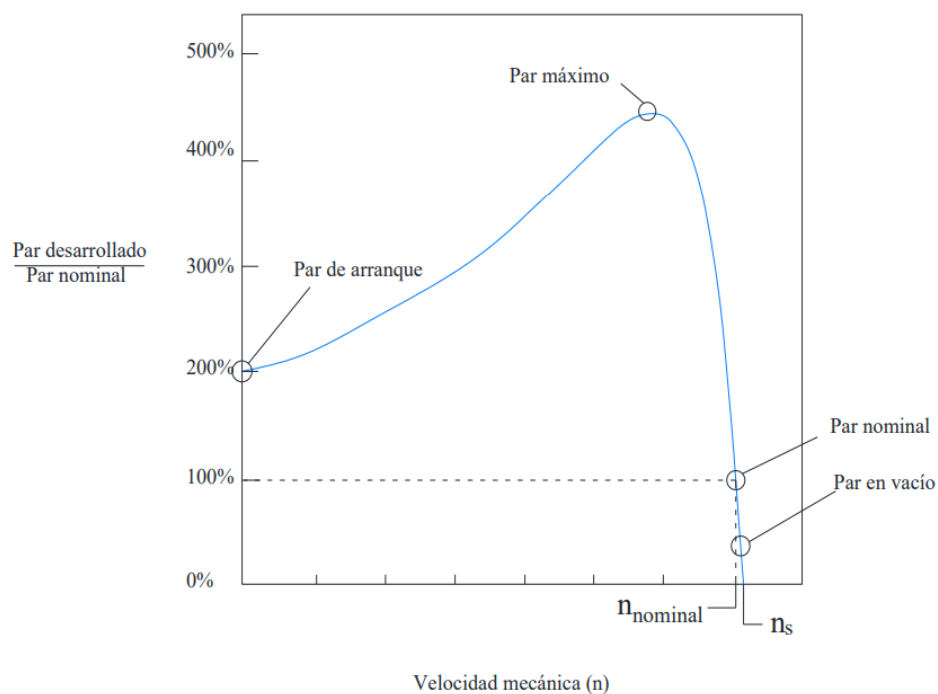
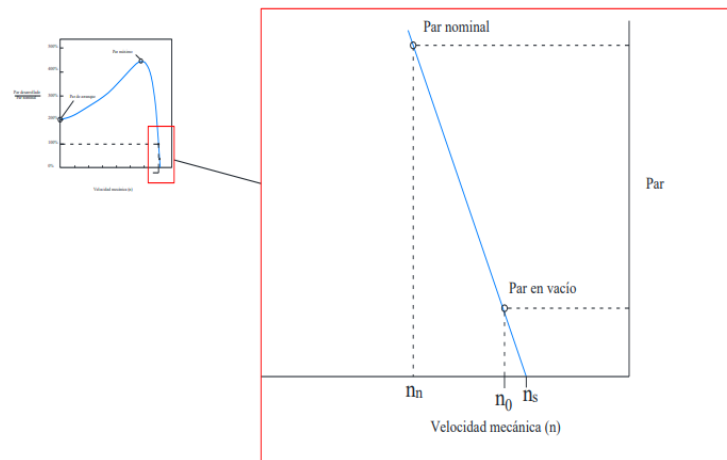


Figura 182. Detalle de los puntos operación: par nominal y par en vacío



n_n : velocidad nominal (eje con la carga mecánica nominal conectada – funcionamiento a plena carga)

n_o : velocidad en vacío (eje sin carga mecánica conectada)

n_s : velocidad sincrónica

- El par inducido en un MTI es cero a la velocidad sincrónica.
- La curva par-velocidad es aproximadamente lineal entre vacío y plena carga. En este rango, la resistencia del rotor es mucho mayor que su reactancia, por lo tanto la corriente rotórica, el campo magnético del rotor y el par inducido crecen linealmente cuando crece el deslizamiento.
- Existe un par máximo posible que no puede ser excedido. Este par es llamado par máximo y equivale típicamente a 2 a 3 veces el par nominal a plena carga del motor, es decir, de la potencia nominal del motor.
- Notar que el par desarrollado es proporcional al cuadrado de la tensión aplicada a los devanados estáticos.

4.4 Aplicaciones de los motores de inducción trifásicos

Características genéricas de un motor de inducción

- El motor puede operar al vacío creando un flujo giratorio
- El motor puede operar con carga teniendo una corriente de excitación y potencia reactiva iguales. No obstante, la potencia activa que demanda el motor de la fuente de alimentación aumenta con respecto a la potencia mecánica que le demanda la carga.
- Su funcionamiento está basado en el principio de inducción mutua de Faraday.

- En el caso de los motores de inducción trifásicos la velocidad de giro viene definida por la frecuencia de red.

Ventajas del motor de inducción

- La constitución de los motores de inducción es muy sencilla
- Es un dispositivo robusto y fuerte. Estas condiciones le permiten soportar caídas
- Los tipos trifásicos suelen ser de tamaños pequeños
- Los tipos jaula ardilla son de bajo costo
- Su funcionamiento se mantiene activo en cualquier condición ambiental
- El motor de inducción que no posee cepillos no genera chispas en el motor
- Estos dispositivos contienen un alto par de arranque, excelente control de velocidad y una razonable capacidad de sobrecarga.
- Son máquinas con una calidad en carga que oscila entre el 85 y el 97 por ciento respectivamente.

Los motores de inducción de jaula de ardilla se utilizan comúnmente en muchas aplicaciones industriales. Son particularmente adecuados para aplicaciones en las que el motor debe mantener una velocidad constante, ser auto-arrancable o se desea un bajo mantenimiento.

Estos motores se usan comúnmente en empresas:

- Industria automotriz
- Industria de alimentos
- Industria fabricantes de ventiladores
- Industrias petroleras
- Industria de productos eléctricos y electrónicos
- Industrias manufactureras

De manera particular estos son algunos usos:

- Bombas centrífugas
- Accionamientos industriales (por ejemplo, para hacer funcionar las cintas transportadoras)
- Grandes sopladores y ventiladores
- Herramientas mecánicas
- Tornos y otros equipos de torneado

Ejercicios del Tema 4

EJERCICIO 1

De un motor trifásico se conocen los siguientes datos: 220/380 V, factor de potencia 0.85, rendimiento 90% y potencia útil 50 CV. Determine:

- Intensidad de corriente que pasa por la línea de alimentación cuando el motor se conecta en triángulo
- Intensidad de corriente que pasa por la línea cuando el motor se conecta en estrella
- Intensidad de corriente que pasa por las bobinas del estator en ambos casos

Solución

- La potencia absorbida por el motor

$$P_{absorbida} = \frac{P_{\text{útil}}}{\eta} = \frac{50 * 736}{0.9} = 40888.88 \text{ W}$$

En triángulo la intensidad de fase en función de la de línea

$$I_F = \frac{I_L}{\sqrt{3}}$$

Siendo la tensión en triángulo $U_T = 220 \text{ V}$

La intensidad que pasa por la línea de alimentación I_{LT} cuando el motor se conecta en triángulo

$$I_{LT} = \frac{P_{ab}}{\sqrt{3}U_T \cos \varphi} = \frac{40888.88}{\sqrt{3} * 220 * 0.85} = 126.24 \text{ A}$$

- La intensidad que pasa por la línea de alimentación I_{LE} cuando el motor se conecta en estrella

$$I_{LE} = \frac{P_{ab}}{\sqrt{3}U_E \cos \varphi} = \frac{40888.88}{\sqrt{3} * 380 * 0.85} = 73.09 \text{ A}$$

Siendo U_E la tensión en triángulo.

- c) En la conexión en triángulo la intensidad por cada bobina del estator, que es la de fase, conociendo la de línea

$$I_F = \frac{I_L}{\sqrt{3}} = \frac{126.24}{\sqrt{3}} = 72.88 \text{ A}$$

En la conexión en estrella la intensidad por cada bobina del estator, que es la de fase e igual a la de línea

$$I_F = I_L = 73.09 \text{ A}$$

EJERCICIO 2

Un motor de inducción trifásico de 220 V, 50Hz y cuatro polos mueve una carga cuyo par resistente es de 6.5 Nm. Sabiendo que el motor absorbe de la red 1200 W y que su rendimiento es de 0.82. Determinar la velocidad de su eje y el deslizamiento.

Solución

La potencia útil en función de la potencia absorbida y del rendimiento es

$$P_u = P_{ab} \eta = 1200 * 0.82 = 984 \text{ W}$$

La potencia útil en función del par motor y de la velocidad angular es

$$P_u = M * \omega$$

Por tanto

$$\omega = \frac{P_u}{M} = \frac{984 \text{ W}}{6.5 \text{ Nm}} = 151.38 \text{ rad/s}$$

La velocidad de giro del campo magnético n o velocidad síncrona, siendo P los pares de polos

$$n = \frac{60 * f}{P} = \frac{60 * 50}{2} = 1500 \text{ rpm}$$

La velocidad del eje o velocidad del rotor n_1

$$n_1 = \omega = 151.38 \text{ rad/s} = 151.38 \frac{60}{2\pi} \text{ rpm} = 1445.5 \text{ rpm}$$

El deslizamiento absoluto d_a

$$d_a = n - n_1 = 1500 - 1445.5 = 54.5 \text{ rpm}$$

El deslizamiento relativo S

$$S (\%) = \frac{n - n_1}{n} * 100 = \frac{1500 - 1445.5}{1500} * 100 = 3.6\%$$

EJERCICIO 3

La cabina de un ascensor tiene una masa de 500kg y es movida por un motor eléctrico de inducción a través de cables, poleas y un sistema de engranajes. Se sabe que durante la subida en vacío la potencia absorbida por el motor es de 4500 W y que tarda 30 seg en recorrer 6 plantas de 3 m cada una. Determinar:

- Energía consumida durante la subida de dos plantas
- Rendimiento energético global durante la subida
- Sabiendo que el motor es de cuatro polos y que la red de alimentación es de 220 V y 50 Hz, determinar el par de salida del motor si éste tiene un rendimiento del 80% y un deslizamiento del 3%

Solución

- Considerando la velocidad de subida constante, la variación de energía cinética es nula.

La energía potencial es

$$E_p = m \times g \times h = 500 (9.8) (36) = 176400 \text{ J}$$

Esta es energía necesaria y no consumida

- La potencia útil

$$P_u = \frac{W}{t} = \frac{E_p}{t} = \frac{176400}{60} = 2940 \text{ W}$$

El rendimiento

$$\eta (\%) = \frac{P_u}{P_{ab}} * 100 = \frac{2940}{4500*2} * 100 = 32.6\%$$

Al subir el doble de plantas, la potencia absorbida sería $4500*2 = 9000\text{W}$

c) Siendo P el número de pares de polos y

$$S = \frac{n - n_1}{n}$$

$$0.03 = \frac{n - n_1}{n} \Rightarrow n_1 = 0.97 n$$

$$n = \frac{60 \cdot f}{P} = \frac{60 \cdot 50}{2} = 1500 \text{ rpm}$$

$$n_1 = 0.97 \cdot 1500 = 1455 \text{ rpm}$$

$$P_u = P_{ab} \cdot \eta = 4500 \cdot 0.80 = 3600 \text{ W}$$

$$P_u = M \cdot \omega$$

$$M = \frac{P_u}{\omega} = \frac{3600}{1456.3 \cdot \frac{2\pi}{60}} = 23.6 \text{ Nm}$$

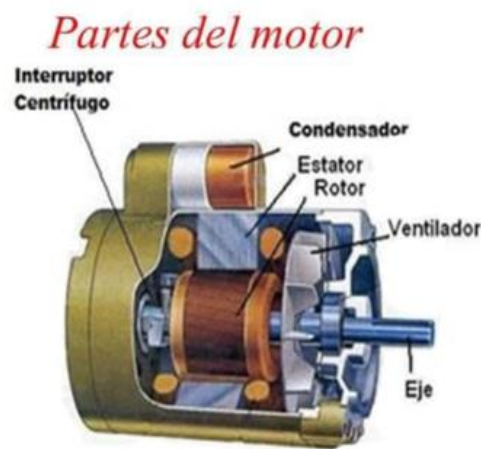
Tema 5 Motores Especiales

En el ámbito doméstico tienen gran aplicación los motores eléctricos, por lo que es necesario que estos puedan funcionar en redes monofásicas. Los motores monofásicos son muy parecidos a los trifásicos, con el inconveniente de que su rendimiento y factor de potencia son inferiores. Al igual potencia, el monofásico es más voluminoso que el trifásico y, siempre que las condiciones lo permitan, se utilizarán trifásicos, los motores más utilizados se mencionan en este tema.

5.1 Elementos básicos de los motores monofásicos

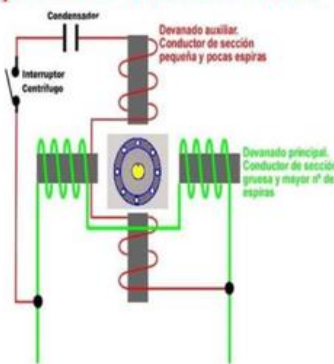
Los motores de inducción monofásicos son muy similares a los de inducción trifásicos. Se componen de un rotor de jaula de ardilla (idéntico al de un motor trifásico) y un estator (*Figura 183*).

Figura 183. a) Partes del motor de inducción, b) Esquema de conexión básico del motor monofásico



a)

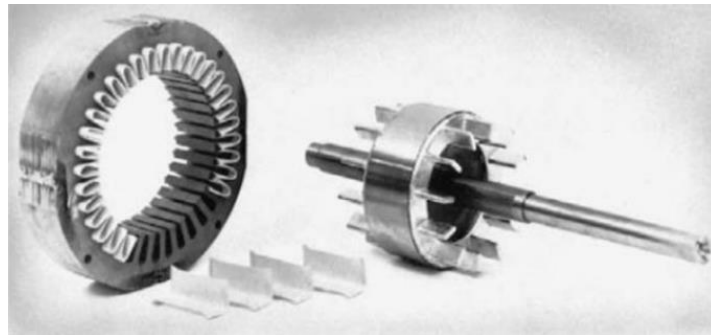
Esquema de conexión básico



b)

El estator es de hierro laminado, en las ranuras se insertan primero aislantes de papel llamados forros de ranura, tiene un devanado principal que se coloca en las ranuras, el cual crea un juego de polos N, S. También tiene un devanado auxiliar más pequeño que sólo opera durante el breve periodo en que arranca el motor. El devanado auxiliar tiene el mismo número de polos que el devanado principal y quedan montados sobre los del devanado principal.

Figura 184. Estator laminado desnudo de un motor monofásico de 36 ranuras



La ranura vacía en el centro de cada polo y las ranuras parcialmente llenas a ambos lados de ella se utilizan para alojar el devanado auxiliar. Este tiene solo dos bobinas concéntricas por polo.

Figura 185. a) Vista plana del devanado principal de un motor de 36 ranuras y 4 polos, que muestra el número de vueltas por bobina, b) fmm producidas por el devanado principal, c) Posición del devanado auxiliar con respecto al devanado principal

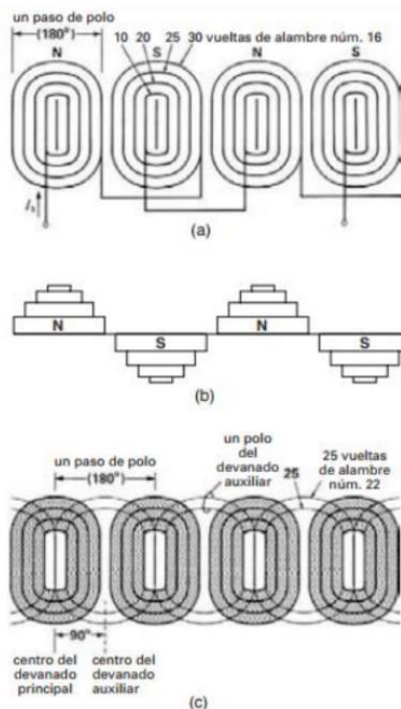
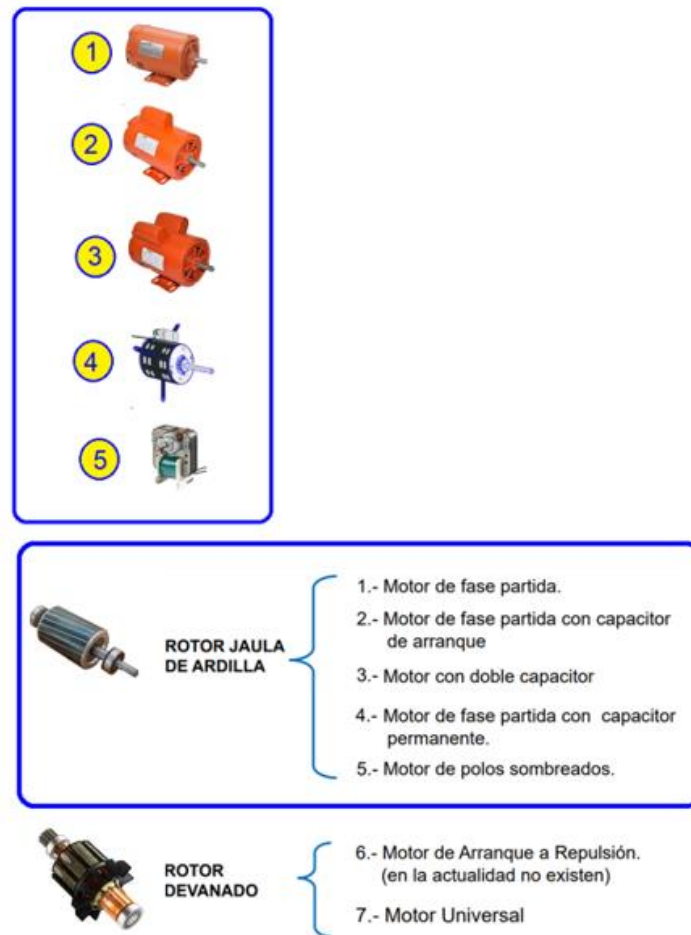


Figura 186. Tipos de motores monofásicos según el rotor



5.2 Principio de operación del motor monofásico de inducción

Esta formado por un circuito magnético y dos eléctricos. El circuito magnético está formado por el estator, donde se coloca el bobinado inductor y el rotor que incorpora el bobinado inducido, que en la mayoría de los casos suele ser de jaula de ardilla.

De su nombre se desprende que utiliza un solo bobinado inductor, recorrido por una corriente alterna que crea un flujo también alterno, pero de dirección constante que, por sí solo, no es capaz de hacer girar al rotor.

Si el rotor se encuentra ya girando, en los conductores del bobinado rotorico se generan fuerzas electromotrices que hacen que por el bobinado rotorico circulen corrientes, que a su vez generan un flujo de reacción desfasado 90° eléctricos respecto del principal.

La interacción entre estos dos flujos hace que el motor se comporte como un motor bifásico y el rotor continúe girando.

Figura 187. Motor de inducción monofásico



5.3 Arranque de los motores monofásicos de inducción

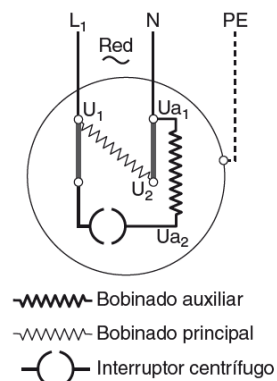
El motor monofásico es incapaz de arrancar por sí solo pero, si se pone en marcha, se mantiene funcionando de forma normal hasta su desconexión.

Por ello, hay que dotar a dicho motor de un dispositivo adecuado para iniciar el arranque. El más utilizado es incorporar al estator un bobinado auxiliar que funciona durante el periodo de arranque y que se desconecta una vez que el motor está en funcionamiento.

En estas condiciones, el motor en el arranque es un motor bifásico, con sus bobinados desfasados 90° eléctricos, que hace que el motor se ponga en marcha. Una vez alcanzado el régimen de vueltas, se desconecta el bobinado auxiliar de forma que queda funcionando como motor monofásico.

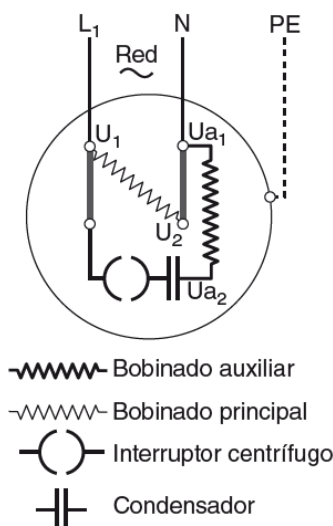
Para realizar la desconexión del bobinado auxiliar, se utilizan los interruptores centrífugos acoplados en el eje del motor. Los bobinados se conectan en paralelo a la placa de bornes.

Figura 188. Esquema de un motor monofásico con bobinado auxiliar



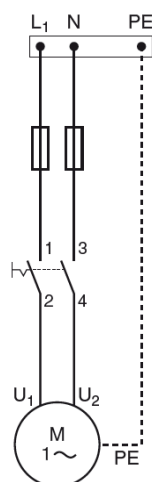
El motor monofásico tiene un rendimiento, par de arranque y factor de potencia algo bajos. Para compensar dichos valores, se recurre a conectar en serie con el bobinado auxiliar un condensador electrolítico, con lo que se consiguen valores de rendimiento y par de arranque mucho mejores. [Figuras 187 y 189](#)

Figura 189. Esquema de motor monofásico con bobinado auxiliar y condensador



La puesta en marcha se realiza mediante un interruptor bipolar manual adecuado a la intensidad del motor.

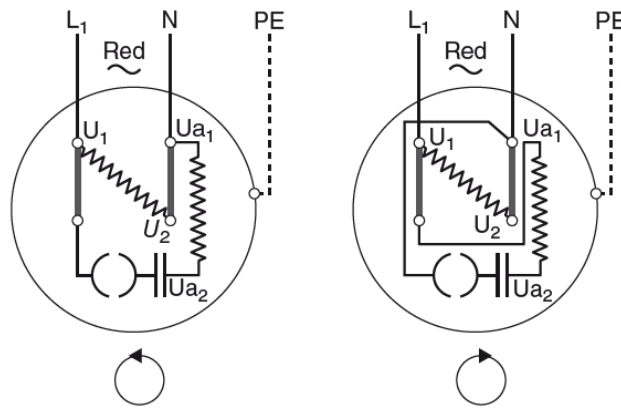
Figura 190. Esquema de conexiones para la puesta en marcha de un motor monofásico de corriente alterna de forma manual



Para invertir el sentido de giro, es necesario invertir las conexiones de uno de los bobinados del motor en la placa de bornes del motor. No confundir con invertir las conexiones de la alimentación ya que, en ese caso, el motor sigue

girando en el mismo sentido.

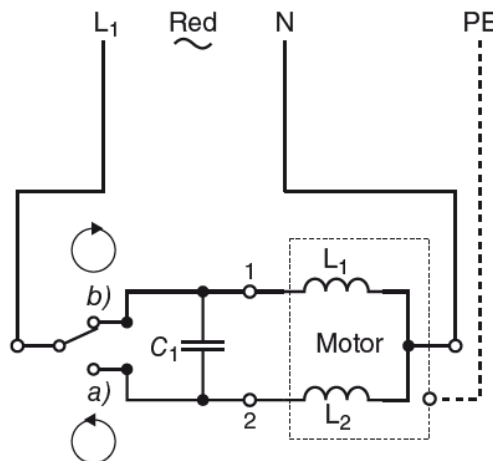
Figura 191. Esquema de conexiones para invertir el sentido de giro de un motor monofásico con bobinado



En los motores actuales, las bobinas de arranque se conectan con la red a través de un condensador en serie que, a la frecuencia de la red y la velocidad nominal del motor, produce un desfase tal entre las corrientes de los devanados de arranque y servicio que se hace innecesario desconectarlas, por lo que estos motores ya no necesitan incorporar el interruptor centrífugo simplificando su constitución y funcionamiento.

Existe una forma más sencilla de invertir el giro, como se muestra en la [Figura 192](#).

Figura 192. Esquema de conexiones para invertir el sentido de giro de un motor monofásico con bobinado auxiliar de funcionamiento permanente



Los motores monofásicos de bobinado auxiliar de arranque actuales no incorporan interruptor centrífugo, por lo que el bobinado auxiliar queda conectado permanentemente durante el funcionamiento.

5.4 Devanados de fase partida

Figura 193. Modelo de motores de fase partida

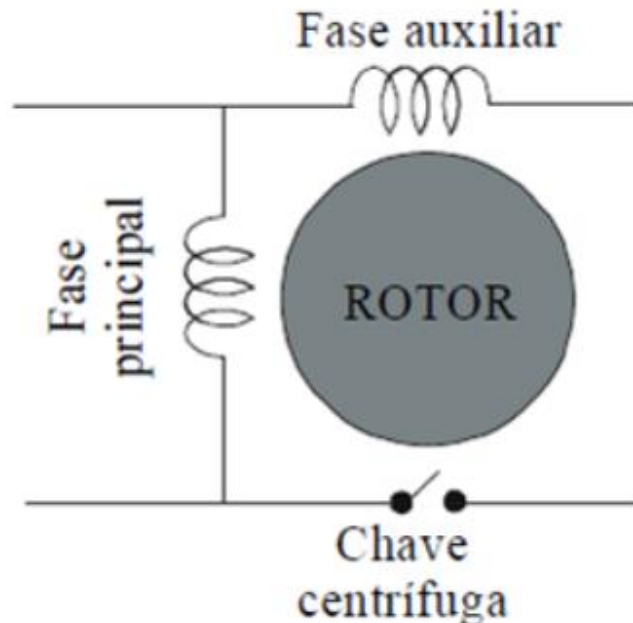


Los motores monofásicos de fase partida tienen solo una fase de alimentación, no poseen campo giratorio como en los polifásicos, pero si tienen un campo magnético pulsante, esto impide que proporcione un torque en el arranque ya que el campo magnético inducido en el rotor está alineado con el campo del estator. Para solucionar el problema del arranque se utiliza un bobinado auxiliar que son dimensionados adecuadamente y posicionados de tal forma que se crea una fase ficticia, permitiendo de esta manera la formación de un campo giratorio necesario en la partida.

El arrollamiento auxiliar crea un desequilibrio de fase produciendo el torque y aceleración necesarios para la rotación inicial. Cuando el motor llega a tener una velocidad determinada la fase auxiliar se desconecta de la red a través de una llave que normalmente actúa por una fuerza centrífuga (llave centrífuga), también puede darse el caso que es reemplazado por un relé de corriente o una llave externa. Como el bobinado auxiliar es dimensionado solo para el arranque, si no se desconecta se quemará. Se fabrica hasta 1 CV. El ángulo de desfase entre las corrientes de los bobinados de trabajo y arranque es reducido, es por esta razón que estos motores tienen un torque de arranque

igual al nominal o ligeramente superior al nominal limitando su aplicación a cargas mucho más exigentes.

Figura 194. Circuito eléctrico de un motor de fase partida

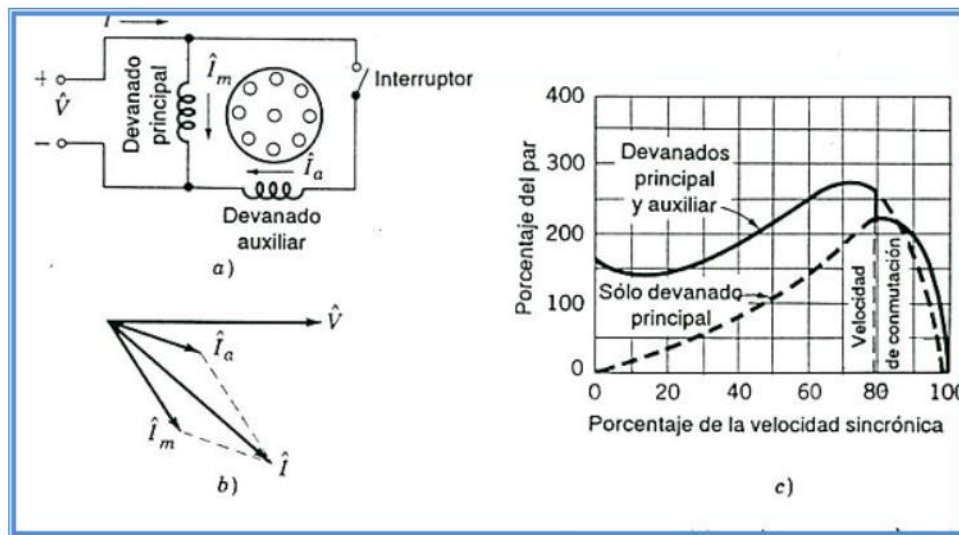


El devanado de arranque (DA) tiene menos número de espiras de alambre fino, por lo que su resistencia es elevada y su reactancia resulta reducida. El devanado de marcha (DM), por lo contrario, tiene muchas espiras de alambre mucho más grueso, siendo su resistencia mucho más baja y su reactancia más elevada, es decir, que ante un voltaje referencial, las corrientes que circulan por cada uno de los dos devanados no estarán en fase por las marcadas diferencias en los aspectos constructivos. Por el devanado de marcha siempre tiende a circular una corriente de mayor magnitud que aquella que circula por el devanado de arranque.

Sin embargo, dado el desfase existente entre ambas corrientes y dado el desfase espacial de los dos devanados, al conectar el motor, realmente se generará un campo magnético bifásico que permitirá el desarrollo de un torque de arranque resultante no nulo, que a su vez permitirá que el motor parta del reposo.

El sentido de aceleración siempre será el mismo sentido en que gire el campo magnético giratorio producido por ambas corrientes, de tal forma que, este tipo de motor es considerado como no reversible pero sí inversible.

Figura 195. Diagrama fasorial de corrientes y tensiones en el motor de fase partida



Con el fin de poder desconectar el devanado de arranque, después de cumplida su función, se ha ideado un interruptor de acción mecánica (IC), cuyo estado cambia por la acción de la fuerza centrífuga. Al arrancar el motor este IC debe abrirse más o menos cuando el deslizamiento (s) haya alcanzado el valor del 25 %.

Naturalmente que el IC permanece cerrado durante el reposo y se abre después de haber alcanzado un 75 % ($s= 0.25$) de la velocidad nominal por dos razones, a saber: el torque desarrollado por el campo giratorio en el DM es mayor que el torque desarrollado por ambos devanados a un valor de s del 15 % y por lo tanto, los dos devanados nunca deben permanecer conectados al alcanzar el motor el 85 % de la velocidad nominal, al quedar conectado sólo el DM, la corriente total que durante el arranque es igual a la suma fasorial de las dos corrientes, se ve reducida a la corriente circulando únicamente por el DM, por lo que, las pérdidas por efecto Joule se verán reducidas. Este IC puede ser sustituido por interruptor de estado sólido (triac) o por un relevador de contactos magnéticos.

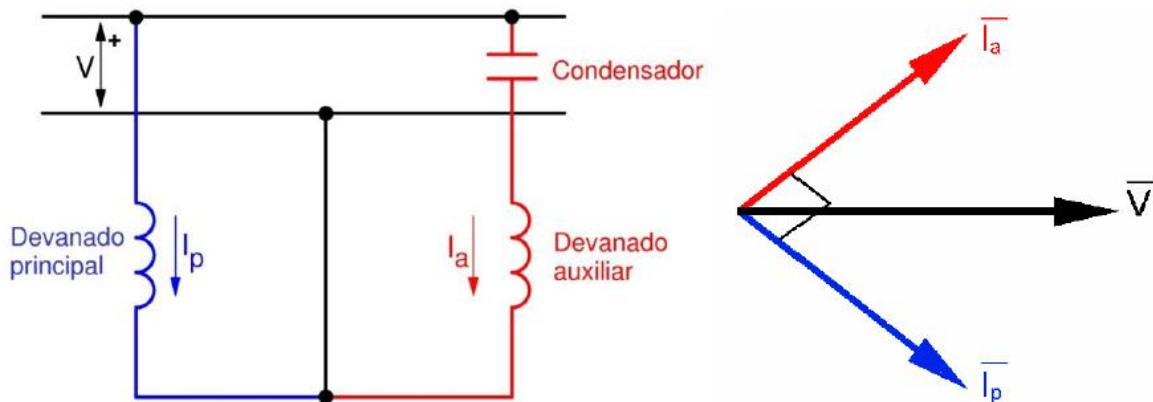
Si al arrancar el motor, el IC no se abre, el excesivo calor generado por la alta resistencia del DA hará que la temperatura del estator aumente, pudiendo llegar a quemarse sus devanados. Tal y como ya se afirmó, una vez que el motor acelera y alcanza el 75 % de su velocidad nominal, el IC se abre, de tal forma que la corriente tomada de la red disminuye drásticamente, pudiendo comprobarse el funcionamiento normal del IC hasta con una pinza o gancho amperimétrico.

5.5 Arranque por capacitor

Los motores monofásicos con arranque por condensador poseen en su estator dos devanados desfasados 90° eléctricos en el espacio; uno de ellos se denomina principal y cubre los $2/3$ de las ranuras del estator y el otro se denomina auxiliar y cubre el resto del estator.

En serie con el devanado auxiliar se conecta un condensador de tal manera que las intensidades que circulan por ambos devanados queden aproximadamente desfasadas 90° en el tiempo y sus módulos sean iguales.

Figura 196. Diagrama del motor monofásico de condensador



Al circular unas corrientes de iguales valores eficaces y desfasadas entre sí 90° en el tiempo por unos devanados desfasados 90° eléctricos en el espacio la máquina se comporta como un motor bifásico y se genera un campo magnético giratorio que hace girar al motor.

Una vez arrancado el motor, se desconecta el devanado auxiliar y el motor sigue funcionando como monofásico simple.

También existen motores monofásicos de condensador en los que, tanto el condensador como el devanado auxiliar, permanecen conectados permanentemente.

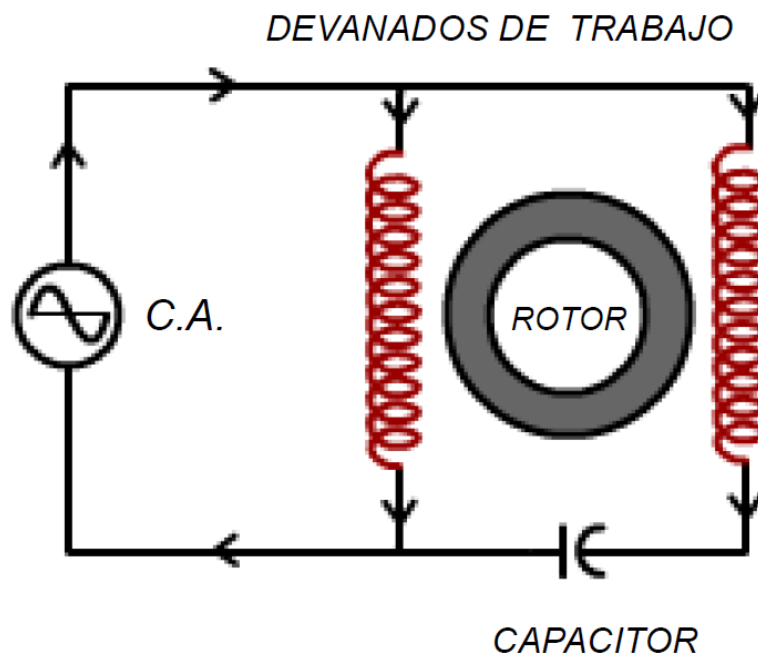
En este caso hay que dimensionar el condensador y el devanado auxiliar para que puedan funcionar conectados a la red no sólo durante el arranque, sino de forma permanente. En estos motores los devanados principal y auxiliar son idénticos y, en consecuencia, cada uno de ellos cubre la mitad de las ranuras del estator.

Para mejorar el arranque de estos motores se suele colocar un condensador adicional en paralelo con el condensador de funcionamiento normal. Este condensador de arranque se desconecta una vez que la máquina ha alcanzado cierta velocidad, para lo cual se puede utilizar un interruptor centrífugo.

5.6 Operación continua por capacitor

Los dos devanados de características iguales: conectados en paralelo con la fuente de CA; en uno de ellos se tiene conectado en serie un capacitor.

Figura 197. Motor de fase partida con capacitor permanente



Los motores de este tipo arrancan y trabajan en virtud de la descomposición de la fase que producen los dos devanados idénticos desplazados en tiempo y espacio.

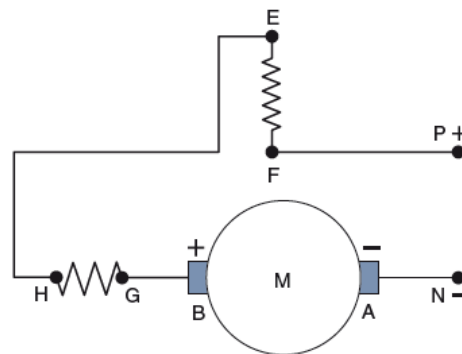
El capacitor se diseña para servicio continuo y su valor se basa más en su característica de marcha óptima que en la de arranque. En consecuencia la corriente al instante de su arranque es muy baja y por lo tanto tienen un bajo par de arranque.

Este tipo de motor se presta al control de velocidad variando el voltaje de suministro. El sentido de giro puede variarse invirtiéndola conexión en cualquiera de los devanados.

5.7 Motor universal

Es un motor monofásico que puede funcionar tanto en corriente continua como alterna. Su constitución es esencialmente la del motor serie de corriente continua, y sus características de funcionamiento son análogas. En la [Figura 198](#), podemos ver representado de forma esquemática este motor.

Figura 198. Esquema de conexiones del motor universal



El motor serie de corriente continua se caracteriza por tener un fuerte par de arranque y su velocidad está en función inversa a la carga, llegando a embalsarse cuando funciona en vacío. Funcionando en corriente alterna, este inconveniente se ve reducido porque su aplicación suele ser en motores de pequeña potencia y las pérdidas por rozamientos, cojinetes, etc., son elevadas con respecto a la total, por lo que no presentan el peligro de embalsarse, pero sí alcanzan velocidades de hasta 20000 rpm, que los hace bastante idóneos para pequeños electrodomésticos y máquinas herramientas portátiles. El motor universal es, el más utilizado en la industria del electrodoméstico. Tienen la ventaja de poder regular la velocidad sin grandes inconvenientes. En la [Figura 199](#), podemos ver el detalle del motor universal para un taladro eléctrico.

Figura 199. Motor monofásico universal para un taladro eléctrico



Para que un motor de este tipo pueda funcionar con corriente alterna, es necesario que el empilado de su inductor (el núcleo de los electroimanes) sea de chapa magnética para evitar las pérdidas en el hierro.

El bobinado inductor de los motores universales suele ser bipolar, con dos bobinas inductoras. El motor universal funciona en corriente continua exactamente igual que un motor serie. Si el motor se alimenta con corriente alterna, arranca por sí solo, ya que la corriente que recorre el bobinado inductor presenta cien alternancias por segundo, lo mismo que le ocurre a la corriente que recorre el bobinado inducido, por lo que el momento de rotación y el sentido de giro permanecen constantes.

5.8 Motor de polos sombreados

Este motor es en general pequeño, de potencia fraccionaria no mayor a $\frac{1}{4}$ de H.P. La gran ventaja es ser muy simple solo un devanado monofásico un rotor jaula de ardilla y un diseño especial de polos que tiene en los extremos, una ranura en donde se aloja una espira de cobre macizo en corto circuito (bobina de sombra) separada del embobinado principal.

El estator tiene polos salientes, cada polo esta provisto de su propia bobina de excitación, en este tipo de motores el flujo magnético se desarrolla de una forma distinta que en los motores con dos devanados (Auxiliar y principal). Un polo es un polo magnético que esta físicamente dividido o seccionado y que tiene pequeños segmentos rodeando con una bobina “sombreada” en corto circuito. La corriente alterna de la alimentación monofásica que circula a través del devanado de campo, produce un flujo alterno, parte del flujo a través de cada polo se eslabona con la bobina sombreada; esta bobina produce el flujo en la posición sombreada para pasar por detrás de la porción de polo “no sombreada” esto da un efecto, un movimiento de flujo a través de la cara del polo, y bajo la influencia de este flujo en movimiento, se desarrolla al par de arranque. Tan pronto como el rotor inicia su rotación bajo la influencia del par de arranque, se crea un par adicional creado por la acción del motor de inducción monofásico. Por lo tanto, el motor se acelera a una velocidad ligeramente debajo de la velocidad síncrona y opera como un motor de inducción monofásico. El par de arranque de un motor de polos sombreados es muy pequeño y por lo tanto se usa solo para accionar pequeños ventiladores, relojes, eléctricos, secadores de pelo y otras aplicaciones similares, por lo general sus capacidades se encuentran debajo de 40 watts (0.05HP).

Figura 200. Motor de polos sombreados



5.9 Motor de pasos

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:

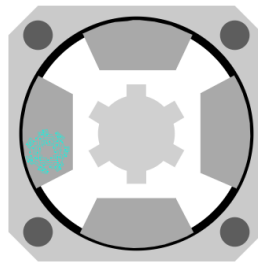
- Motor paso a paso de reluctancia variable.
- Motor paso a paso de imán permanente.
- Motor paso a paso híbrido.

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 201. Motor paso a paso de reluctancia variable

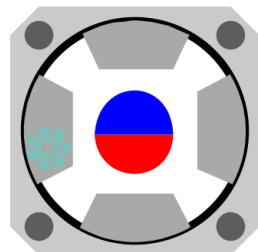


Motor paso a paso de imán permanente

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 202. 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.

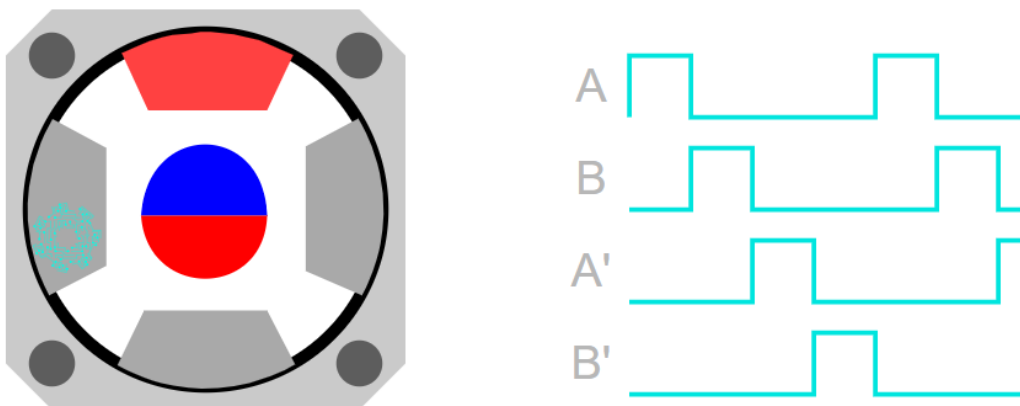
Existen diferentes formas de configurar nuestros motores a pasos para obtener una característica deseada, normalmente se busca que tenga una mejor resolución. Para explicar cada configuración vamos a considerar un motor con 4 bobinas (motor bipolar).

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 203. Bobina simple

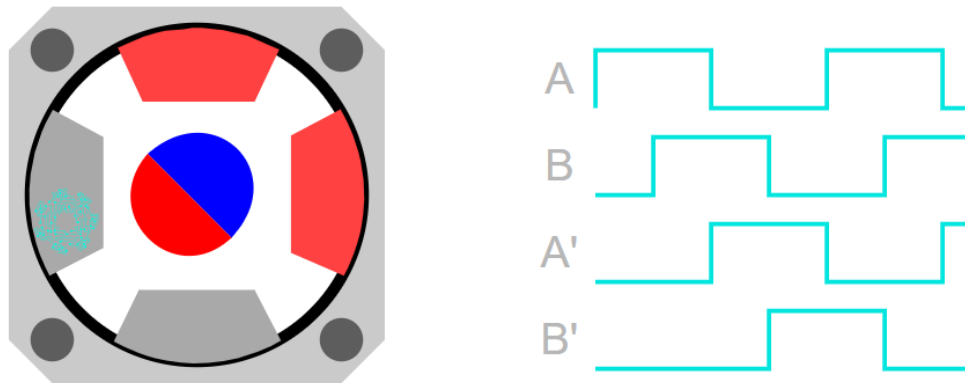


Paso completo

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 204. Paso completo

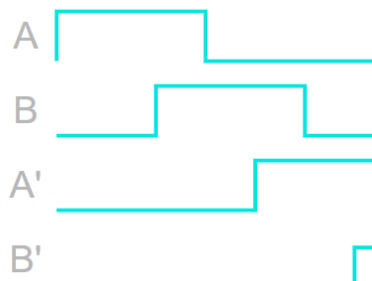


Medio paso

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 205. 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

5.10 Servomotores

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.

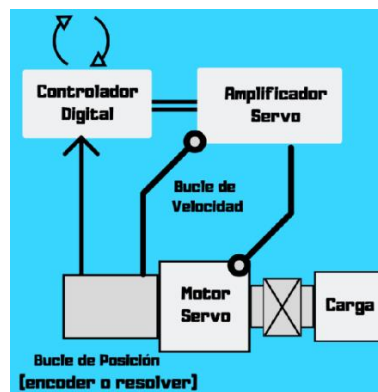
El servomotor espera ver un pulso cada 20 milisegundos (ms) y la longitud del pulso determinará hasta dónde gira el motor. Por ejemplo, un pulso de 1.5ms hará que el motor gire a la posición de 90° .

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.

Figura 206. Diagrama básico del funcionamiento de un servomotor



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.

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.

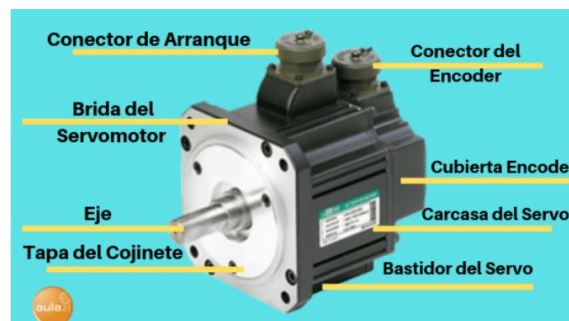
Un servo accionamiento amplifica la señal de un controlador maestro proporcionando la suficiente corriente (potencia) al motor para generar velocidad y producir par. En un motor rotativo, la corriente es proporcional al par, por lo que el servomotor controla directamente el par producido por el motor.

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 207. Partes de un servomotor



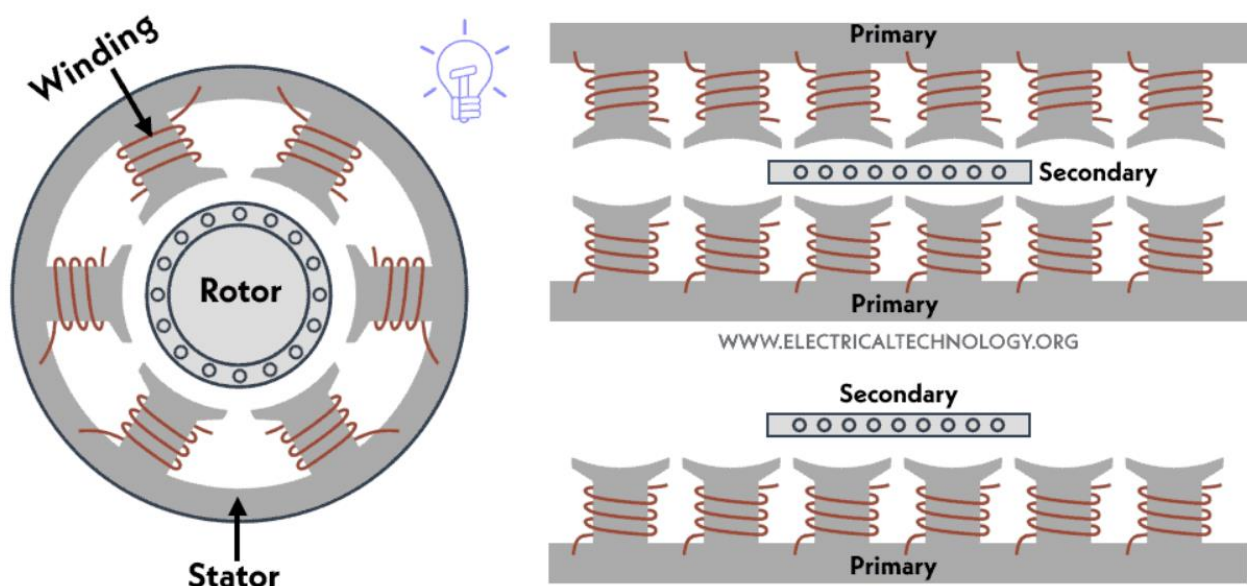
Los servomotores se utilizan en aplicaciones que requieren variaciones rápidas de velocidad y, que podrían provocar un calentamiento excesivo del motor como en la robótica industrial, en la fabricación con sistemas de automatización y en aplicaciones de mecanizado de control numérico (CNC) por ordenador, 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.

5.11 Motores lineales

Figura 208. Diagrama comparativo de un motor convencional con uno lineal



Los motores de inducción se utilizan para convertir la energía eléctrica en energía de rotación. Otra forma de motor de inducción es el motor de inducción lineal. Se utiliza para convertir la energía eléctrica en movimiento lineal.

Un motor lineal es un motor eléctrico que posee su estator y su rotor "distribuidos" de forma tal que en vez de producir un torque (rotación) produce una fuerza lineal en el sentido de su longitud. El modo más común de funcionamiento es como un actuador tipo Lorentz, en el cual la fuerza aplicada es linealmente proporcional a la corriente eléctrica y al campo magnético.

Un motor de inducción lineal se conoce como LIM. Funciona según el principio de inducción electromagnética. Este tipo de motor es el más popular para aplicaciones de remolque.

Al igual que los motores de inducción normales, los motores de inducción lineal también tienen dos devanados. devanados primario y secundario. En la mayoría de los casos, el devanado primario está hecho de cobre y el devanado secundario está hecho de aluminio. Los motores de inducción trifásicos producen un movimiento lineal progresivo, mientras que los motores de inducción monofásicos producen un movimiento oscilante.

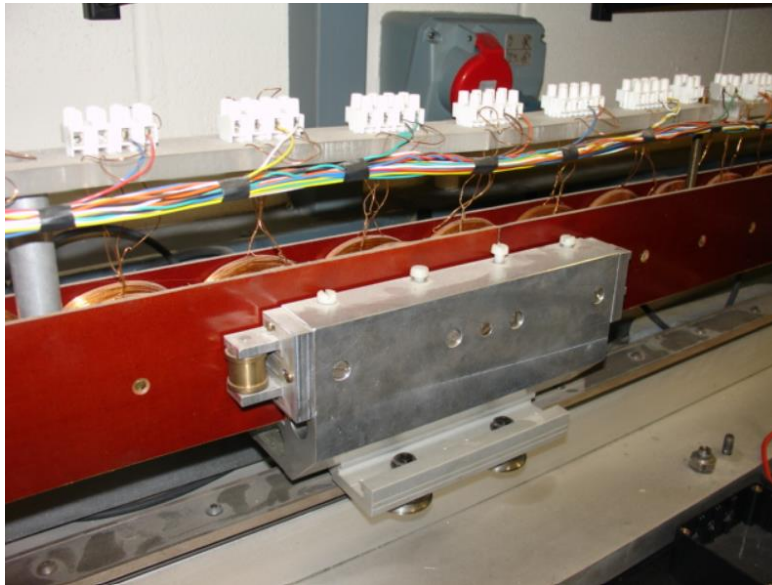
El principio de funcionamiento de un motor de inducción lineal es el mismo que el de un motor de inducción convencional. El principio es que "cuando ocurre un movimiento relativo entre un campo y un conductor en cortocircuito, se induce una corriente en el conductor". Un conductor que transporta corriente produce una FEM (fuerza electromotriz), y esta fuerza hace que el conductor intente moverse de forma que elimine la corriente inducida (de acuerdo con la ley de Lenz).

En un motor de inducción normal, el campo magnético inducido es de naturaleza rotatoria. Por lo tanto, el movimiento del conductor también es giratorio. Pero para los motores de inducción lineales, el movimiento del campo es lineal. Por lo tanto el movimiento del conductor es lineal.

Cuando se conecta una fuente de alimentación trifásica al devanado primario, se crea un flujo magnético en movimiento. Este flujo magnético viaja a lo largo de la parte primaria e induce EMF en la parte secundaria. Este EMF hace que la corriente circule en el secundario. Esta corriente inducida interactúa con el flujo magnético en movimiento y crea una fuerza.

Si una parte (primaria o secundaria) está fija y la segunda parte (secundaria o primaria) puede moverse, se genera una fuerza en el elemento móvil.

Figura 209. Prototipo de un motor lineal con bobinados separados visibles



Clasificación de motores de inducción lineal

Según la estructura, los motores de inducción lineal se dividen en dos tipos:

- LIM de un solo lado
- LIM de doble cara

LIM de un solo lado

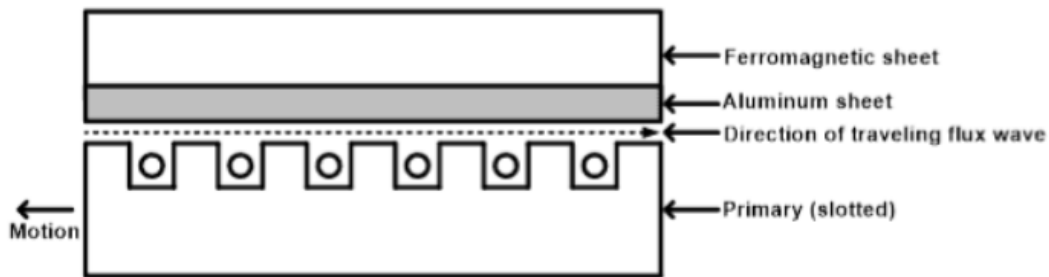
Un motor de inducción lineal de un solo lado tiene dos devanados (primario o secundario), uno de los cuales es estacionario y el otro giratorio. Por lo tanto, los LIM de un solo lado se pueden clasificar en dos tipos:

Movimiento primario y secundario fijo

Como sugiere su nombre, el devanado primario es móvil y el devanado secundario es fijo. Este tipo de motor tiene ranuras en el núcleo del devanado primario y su parte móvil. Los devanados trifásicos se colocan en las ranuras del devanado primario.

El siguiente diagrama detalla la construcción de un LIM de un solo lado con tipo primario móvil y secundario fijo.

Figura 210. Dirección del movimiento es opuesta a la dirección del flujo en movimiento

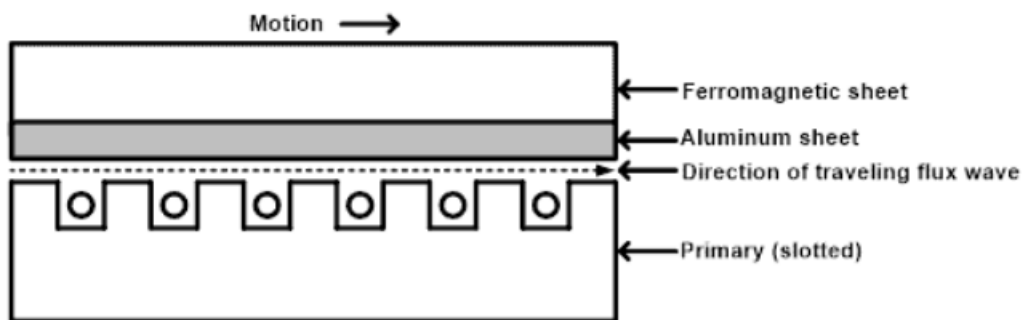


Movimiento secundario y fijación primaria.

Este tipo de motor de un solo lado tiene un devanado primario fijo y un devanado secundario móvil. Se puede utilizar una ranura con el devanado primario, en la que se coloca el devanado trifásico.

El siguiente diagrama detalla la construcción de un LIM de un solo lado de tipo secundario móvil y primario fijo.

Figura 211. Dirección del movimiento es la misma a la dirección del flujo en movimiento

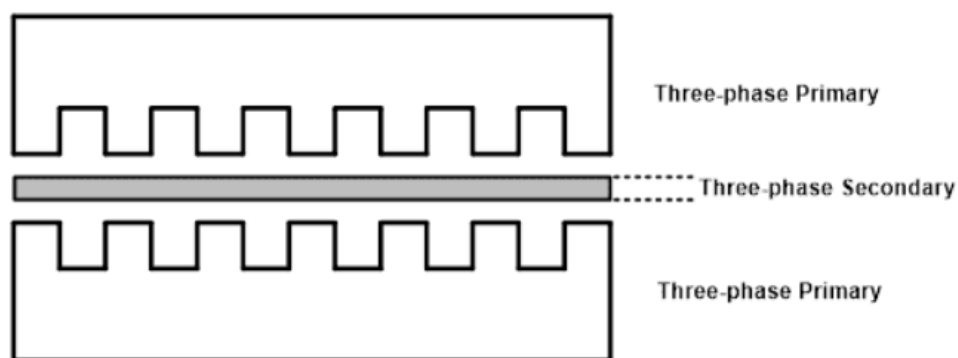


En este tipo de motor, la dirección del movimiento es la misma que la dirección del flujo magnético en movimiento.

LIM de doble cara

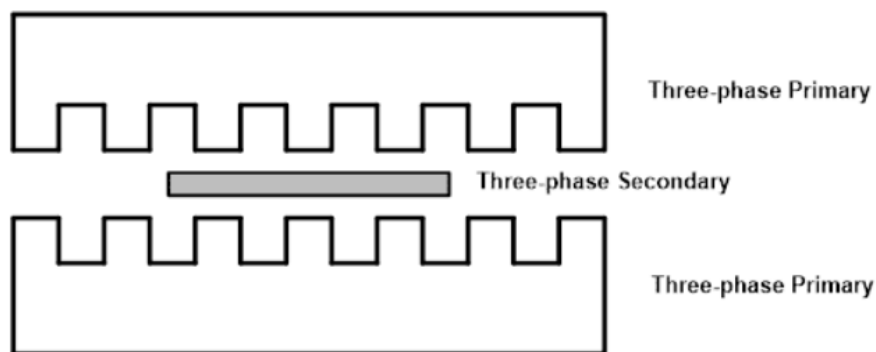
Los LIM de doble cara se utilizan para remolcar. La construcción secundaria móvil primaria y fija es especialmente popular. El siguiente diagrama muestra la estructura de un LIM de dos caras. En la [Figura 212](#) muestra la estructura de un LIM de dos caras.

Figura 212. Diagrama de un LIM de dos caras



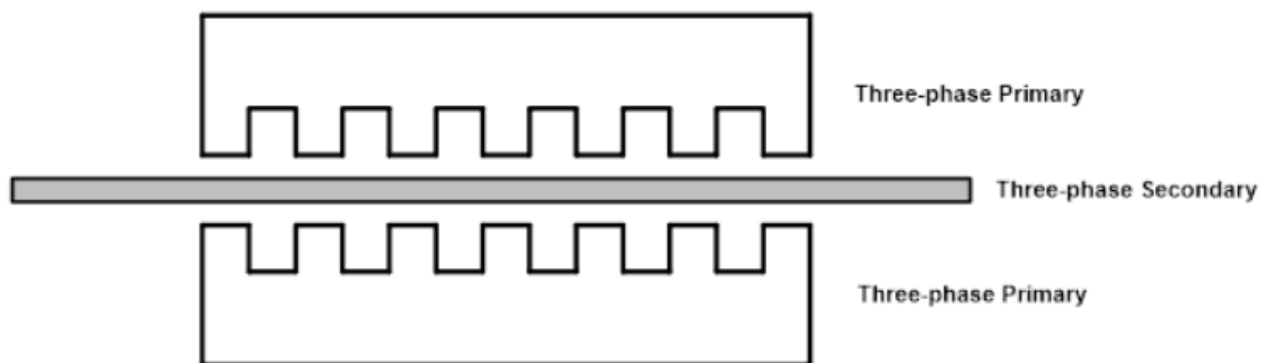
Si los movimientos requeridos son similares, la distancia entre los dos límites será más corta que la primaria y más larga que la secundaria.

Figura 213. Diagrama con los límites del primario más larga que del secundario



Si la distancia es mayor que la primaria, será más corta que la secundaria.

Figura 214. Diagrama con los límites del primario más corta que del secundario



Los motores de inducción lineal de doble cara ofrecen mejores propiedades magnéticas y más potencia disponible con este motor. El acoplamiento magnético adecuado mejora el factor de potencia (en comparación con el LIM de un solo lado). Pero este motor cuesta más.

Ventajas.

- Bajo costo inicial
- Bajo mantenimiento
- Sin sobrecalentamiento
- Sin límite de velocidad máxima
- Tiene una mejor relación potencia-peso que los motores de inducción tradicionales.
- La tracción no depende de la velocidad

Desventajas.

- Bajo factor de potencia
- Ineficaz
- Un motor de inducción lineal tiene un espacio de aire más grande que un motor de inducción convencional. Por lo tanto, se genera una gran corriente de magnetización.
- El costo de los rieles fijos a lo largo de la línea central de la vía es muy alto.
- Los problemas surgen en las intersecciones, por lo que se necesitan otros medios en las intersecciones.

Aplicación del motor de inducción lineal

- Este tipo de motor es ampliamente utilizado como motor de tracción.
- Cinta transportadora metálica
- Operación de puerta corredera
- Para transporte (vehículos de media y alta velocidad)
- En el patio de maniobras
- Bomba electromagnética

5.12 Aplicación de los motores especiales

Un motor especial se define, en pocas palabras, como un motor no estándar. Muchas aplicaciones que requieren de motores no pueden valerse de los equipos que se

comercializan normalmente, ya sea porque requieren otras potencias, otros consumos, otros materiales u otros diseños. En esos casos, la opción es mandar a construir un motor con las características deseadas o realizar las modificaciones correspondientes a los equipos con los que ya se cuenta.

La necesidad del motor de inducción monofásico se explica de la siguiente forma: existen muchas instalaciones, tanto industriales como residenciales a las que la compañía eléctrica sólo suministra un servicio de C.A. monofásico generalmente.

Además, en todo lugar casi siempre hay necesidad de motores pequeños que trabajen con suministro monofásico para impulsar diversos artefactos electrodomésticos tales como máquinas de coser, taladros, aspiradoras, acondicionadores de aire etc.

La mayoría de los motores monofásicos son “motores pequeños” de “potencia fraccionaria” (menos de 1 hp). Sin embargo, algunos se fabrican en tamaños normales de caballaje integral: 1.5, 2, 3, 5, 7.5 y 10 hp tanto para 115 V como para 230 V en servicio monofásico y aun para servicio de 440 V entre los límites de 7.5 a 10 hp.

Los tamaños especiales de caballaje integral van desde varios cientos hasta algunos miles de hp en servicio de locomotoras, con motores de serie monofásicos de C.A. Los motores monofásicos de inducción experimentan una grave desventaja. Puesto que sólo hay una fase en el devanado del estator, el campo magnético en un motor monofásico de inducción no rota.

En su lugar, primero pulsa con gran intensidad, luego con menos intensidad, pero permanece siempre en la misma dirección. Puesto que no hay campo magnético rotacional en el estator, un motor monofásico de inducción no tiene par de arranque.

Es por ello que se emplean diversos métodos para iniciar el giro del rotor, y por lo tanto existe una clasificación de los motores monofásicos basada en los métodos particulares de arranque.

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, Hizioglu. (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 electromagnetismo y transformador eléctrico

https://docs.google.com/presentation/d/1ezEewQ__K0-o0W9hjHhrVPApcQ8X4ZJ7/edit?usp=drive_link&ouid=100078747402128563599&rtpof=true&sd=true

https://docs.google.com/presentation/d/1G5ojFV2Ce5iYYD37_We6l270CJYzEbsw/edit?usp=drive_link&ouid=100078747402128563599&rtpof=true&sd=true

https://docs.google.com/presentation/d/1LS2ZRsj6X2A4S9SHCisS3MstxejoZKDF/edit?usp=drive_link&ouid=100078747402128563599&rtpof=true&sd=true

TEMA 2. Máquinas de corriente directa

https://docs.google.com/presentation/d/1xCjV_UMvzdJVfKm995RzF15kYl0Q0fva/edit?usp=drive_link&ouid=100078747402128563599&rtpof=true&sd=true

https://docs.google.com/presentation/d/1Nzdxz8AUsr3Zx1G087puarCDPbi2SukK/edit?usp=drive_link&ouid=100078747402128563599&rtpof=true&sd=true

FORMULARIOS

TEMA 1. Fundamentos de electromagnetismo y transformador eléctrico

<https://forms.gle/1oLDAmQLWkk9TxCy8>

TEMA 2. Máquinas de corriente directa

<https://forms.gle/wY7teYd5bEc8DwQn6>

TEMA 3. Máquinas síncronas

<https://forms.gle/VH3oSen76w7BSwrY8>

TEMA 4. Motores de inducción

<https://forms.gle/tUtu36Hyj9AR5QCf8>

TEMA 5. Motores especiales

<https://forms.gle/xwKcqXDPdnrbP5FSA>



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO



**Tecnológico Nacional de México
Instituto Tecnológico de Mérida
Subdirección Académica**

Instrumentación Didáctica para la Formación y Desarrollo de Competencias Profesionales Periodo xxxxxx-xxxxxx 202x

Nombre de la asignatura: Máquinas Eléctricas

Plan de estudios: Ingeniería Electrónica

Clave de asignatura: AEF - 1040

Horas teoría – horas prácticas – créditos: 3 - 2 -5

1. Caracterización de la asignatura

Esta asignatura aporta al perfil del egresado la capacidad para entender el funcionamiento de las máquinas eléctricas y las habilidades para seleccionarlas, ponerlas en operación y controlarlas. Para integrarla, se ha revisado el tipo de máquinas eléctricas que existen y sobre todo aquellas que más uso y aplicación tienen.

Esta asignatura tiene como antecedentes las competencias de electromagnetismo, circuitos eléctricos I y II, y análisis de circuitos eléctricos y como procedentes las competencias de electrónica de potencia aplicada y en las asignaturas de los módulos de especialidad.

2. Intención didáctica





TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO



Es importante destacar las partes constitutivas que integran cada tipo de máquina y mostrar las diferencias que tienen con respecto a las demás, de igual manera se conceptualizan los principios de funcionamiento para integrar los conocimientos y realizar las pruebas a los diversos tipos de máquinas con la finalidad de determinar sus parámetros de operación.

Una vez abordados los estudios conceptuales y de aplicación, el alumno deberá interactuar con los diferentes tipos de máquinas de manera continua dentro del laboratorio, realizar las conexiones necesarias y simular las variables de las máquinas para verificar su comportamiento.

El contenido está dividido en 5 temas. En el primero, se retoman los conceptos fundamentales del electromagnetismo para fundamentar el principio de funcionamiento del transformador. Posteriormente se ven las características del transformador ideal y real, la regulación de tensión con diversos tipos de cargas, su rendimiento y las diversas conexiones de los transformadores y autotransformadores.

En la segunda unidad se considera la máquina de corriente directa, sus partes constitutivas y su principio de funcionamiento como generador y motor; además, se analizan las diferentes conexiones con sus respectivas características, también se estudian los diversos tipos de arranque, control de velocidad y frenado de los motores, así como sus campos de aplicación.

El tercer tema comprende el análisis de la máquina síncrona, analizando sus partes constitutivas y principio de funcionamiento como generador y motor. Para el caso del generador se obtiene la fuerza electromotriz inducida, se interpretan los circuitos equivalentes y diagramas fasoriales y se calcula la regulación de tensión con diferentes cargas, además de la conexión en paralelo de varios generadores.

Para el caso del motor se estudian los métodos de arranque, y se determina la potencia, el par electromagnético y su rendimiento, además de analizarlo bajo diferentes condiciones de carga y corriente de excitación.

El tema cuarto se enfoca en el análisis de los principios de funcionamiento de los motores de inducción y su aplicación en la industria. También se estudia el arranque y control de velocidad de los mismos.

En el quinto tema se hace énfasis en las partes constitutivas del motor de inducción monofásico y su principio de funcionamiento; se analizan el arranque y el control de su velocidad. De la misma forma, se estudian los diferentes tipos de motores como son: el de fase partida, de arranque por capacitor, de operación continua por capacitor, universal, de polos sombreados, de pasos, lineales y servomotores. También se determina el tipo de aplicación.

Las actividades de aprendizaje deben ser las necesarias para hacer significativo el aprendizaje; algunas



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO



Se busca partir de experiencias cotidianas, que el estudiante reconozca los fenómenos físicos en su entorno.

En las actividades de aprendizaje sugeridas, se propone la formalización de conceptos a partir de experiencias concretas; se pretende además que el alumno tenga el primer contacto en forma concreta y sea a través de la observación, la reflexión, la discusión y la práctica, que se dé la formalización; la interacción con las máquinas debe ser después de este proceso, con la finalidad de que tenga los elementos teóricos y prácticos para operar y controlar las máquinas eléctricas.

En el transcurso de las actividades programadas, es muy importante que el estudiante aprenda a valorar las actividades que lleva a cabo y entienda que está construyendo su quehacer profesional; de igual manera, que aprecie la importancia del conocimiento y los hábitos de trabajo; desarrolle la curiosidad, la puntualidad, el entusiasmo y el interés, la tenacidad, la flexibilidad y la autonomía.

3. Competencia de la asignatura

Analiza el funcionamiento de las diferentes máquinas eléctricas y realiza una adecuada selección para su aplicación, según el tipo de carga.

4. Análisis por competencias específicas

Competencia No. 1: Descripción: Conoce el principio de operación del transformador y comprende su funcionamiento para determinar su aplicación.





TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO



Temas y subtemas para desarrollar la competencia específica	Actividades de aprendizaje	Actividades de enseñanza	Desarrollo de competencias genéricas	Horas teórico-práctica
Fundamentos de electromagnetismo y transformador eléctrico. 1.2 Variables magnéticas. 1.3 El circuito magnético. 1.4 Principio operacional del transformador 1.5 Partes constitutivas del transformador 1.6 Análisis del transformador ideal. 1.7 Análisis del transformador real y su circuito equivalente. 1.8 Análisis de la regulación de tensión con diferentes tipos de cargas. 1.9 Eficiencia de los transformadores a diferentes factores de potencia. 1.10 Autotransformadores monofásicos.	• Utilizar las leyes del electromagnetismo en el funcionamiento de las máquinas eléctricas. • Describir las partes de un transformador, y determinar sus marcas de polaridad y su relación de transformación. • Obtener la resistencia óhmica de los devanados y su resistencia de aislamiento • Determina sus parámetros, así como su circuito equivalente a partir de las pruebas de cortocircuito y circuito abierto del transformador. • Determinarla regulación de tensión de los transformadores cuando operan bajo diferentes tipos de cargas, así como su eficiencia.	Exponer la aplicación de las leyes de electromagnetismo en las máquinas eléctricas Investigar las partes del transformador, marcas de polaridad, relación de transformación, resistencia óhmica de devanados y resistencia de aislamiento. Determinar el circuito equivalente, parámetros, pruebas de cortocircuito y circuito abierto, regulación de tensión cuando operan bajo diferentes tipos de carga y eficiencia de un transformador. Investigar principio de operación de transformadores	• 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	20 hrs



TECNOLOGICO
NACIONAL DE MÉXICO



1.11 Conexiones de transformadores monofásicos en arreglos trifásicos.	• Describir los principios de operación de los transformadores monofásicos, y trifásicos.	monofásicos y trifásicos, diferencia entre transformador y autotransformador, conexiones de los banco de transformadores monofásicos en arreglos trifásicos, conexiones de bancos de autotransformadores monofásicos en arreglos trifásicos.	analizar información procedente de fuentes diversas.	
1.12 Conexiones de autotransformadores monofásicos en arreglos trifásicos.	• Investigar la diferencia entre un transformador y un autotransformador. • Utilizar las conexiones de los bancos de transformadores monofásicos en arreglos trifásicos. • Utilizar las conexiones de bancos de autotransformadores monofásicos en arreglos trifásicos.			

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	2.9





TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO



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.	
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

Niveles de desempeño:





TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO



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				



TECNOLOGICO
NACIONAL DE MÉXICO



	Total	20	4.9	2.9	2.4	1	5.9	2.9	
--	-------	----	-----	-----	-----	---	-----	-----	--

Competencia No.2: Descripción: Conoce el principio de funcionamiento de la máquina de C.C. como generador y como motor para su adecuada selección y aplicación. Realiza el arranque y control de velocidad de los motores de C.C.

Temas y subtemas para desarrollar la competencia específica	Actividades de aprendizaje	Actividades de enseñanza	Desarrollo de competencias genéricas	Horas teórico-práctica
Máquinas de corriente directa 2.1 Componentes de las máquinas de CD 2.2 Principio operacional de las máquinas de C.D., como generador y como motor. 2.3 Tipos de generadores (excitación separada, derivación, serie y compuesto) y sus curvas características. 2.4 Tipos de motores (derivación, excitación separada, serie y compuesto) y sus curvas características. 2.5 Ecuaciones de par electromagnético para los motores de CD	- Identificar las partes que conforman una máquina de C.C. y describir el principio de funcionamiento. - Determinar las curvas características en los diferentes tipos de conexión de los generadores de C.C. - Analizar los parámetros utilizados en una máquina de C.C. para su operación como generador y como motor. - Determinar las curvas características en los diferentes tipos de	Realizar investigación de: Funcionamiento de las máquinas de CD Principio de funcionamiento de maq. De CD Clasificación de los generadores y motores de CD Funcionamiento, circuito equivalente de cada tipo de motor	- 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.	



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO



2.6 Condiciones de arranque para los diferentes tipos de motores de CD 2.7 Control de los motores de CD 2.7.1 Arranque. 2.7.2 Velocidad. 2.7.3 Inversión de giro. 2.7.4 Frenado. 2.8 Aplicaciones de los motores de CD.	conexión de los generadores de C.C.		• Capacidad de trabajo 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.	5.25
B. Hace aportaciones a las actividades académicas desarrolladas.	2
C. Propone y/o explica soluciones o procedimientos no vistos en clase (creatividad).	2.25
D. Introduce recursos y experiencias que promueven un pensamiento crítico; (por ejemplo el uso de las tecnologías de la información estableciendo previamente un criterio).	1
E. Incorpora conocimientos y actividades interdisciplinarias en su aprendizaje.	6.25





TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO



F. Realiza su trabajo de manera autónoma y autorregulada.	3.25
---	------

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	
Participación en clase	1	0	0.25	0.25	0.25			



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO



	Total 20	5.25	2	2.25	1	6.25	3.25	
--	----------	------	---	------	---	------	------	--

Competencia No.3: Descripción: Aplica el principio de funcionamiento de la máquina síncrona como motor y como generador y su comportamiento en el sistema eléctrico para controlar su operación.





TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO



Temas y subtemas para desarrollar la competencia específica	Actividades de aprendizaje	Actividades de enseñanza	Desarrollo de competencias genéricas	Horas teórico-práctica
Máquinas síncronas 3.1 Componentes de las máquinas síncronas. 3.2 Principio operacional de las máquinas síncronas como generador y como motor. 3.3 Fuerza electromotriz inducida y frecuencia. 3.4 Circuito equivalente y diagramas fasoriales. 3.6 Regulación de tensión con diferentes tipos de carga. 3.7 Operación en paralelo de los generadores síncronos. 3.8 Métodos de arranque de los motores síncronos. 3.9 Análisis fasorial del motor síncrono bajo diferentes condiciones de carga y de excitación. 3.10 Potencia, par electromagnético y rendimiento.	• Investigar y analizar el principio de funcionamiento de una máquina síncrona como motor o como generador. • Elaborar el circuito equivalente de la máquina síncrona. • Trazar los diagramas fasoriales resultantes de un alternador alimentando con cargas resistivas, inductivas y capacitivas. • Calcular la fuerza electromotriz inducida y su frecuencia variando la corriente de excitación del devanado de campo y la velocidad en forma matemática y comprobar experimentalmente. • Conectar en paralelo los generadores síncronos	• Realizar investigación de los temas correspondientes • Resolución de problemas de los temas correspondientes • Implementación de circuitos eléctricos	• 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	



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO



	o interconectarlos con un bus infinito tomando en cuenta las condiciones requeridas. • Investigar las diferentes formas de arrancar el motor sincrónico. • Calcular los valores de par electromagnético, así como su potencia y rendimiento del motor síncrono.		diversas.	
--	---	--	-----------	--

Indicadores de alcance	Valor del indicador
A. Se adapta a situaciones y contextos complejos.	5.25
B. Hace aportaciones a las actividades académicas desarrolladas.	2
C. Propone y/o explica soluciones o procedimientos no vistos en clase (creatividad).	2.25
D. Introduce recursos y experiencias que promueven un pensamiento crítico; (por ejemplo el uso de las tecnologías de la información estableciendo previamente un criterio).	1





TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO



E. Incorpora conocimientos y actividades interdisciplinarias en su aprendizaje.	6.25
F. Realiza su trabajo de manera autónoma y autorregulada.	3.25

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			



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO



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	5	1.5	0.25	0.25	0	1.5	1.5	Rúbrica para reporte de investigación
Reporte de prácticas de laboratorio	3	0.75	0.75	0	0.75	0.75	0	Rúbrica para reporte de prácticas de laboratorio
Examen de conocimiento	8	3	0	1	0	3	1	Método de resolución de problemas
	Total 20	5.25	2	2.25	1	6.25	3.25	

Competencia No. 4: Descripción: Aplica las leyes del electromagnetismo para comprender el funcionamiento del motor de inducción.





TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO



Temas y subtemas para desarrollar la competencia específica	Actividades de aprendizaje	Actividades de enseñanza	Desarrollo de competencias genéricas	Horas teórico-práctica
Motores de inducción 4.1 Principio y análisis del motor jaula de ardilla. 4.2 Principio y análisis del Motor con rotor devanado 4.3 Arranque y control de velocidad de los motores de inducción 4.4 Aplicaciones de los motores de inducción trifásicos	• Explicar el principio de operación, construcción y funcionamiento de los motores de inducción. • Investigar las partes constitutivas del motor devanado. • Realizar pruebas para la obtención de parámetros de los motores de inducción. • Identificar ventajas y desventajas del motor de inducción jaula de ardilla. • Investigar las diferentes aplicaciones del motor de inducción	• Realizar investigación de los temas correspondientes • Resolución de problemas de los temas correspondientes • Implementación de circuitos eléctricos	• 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	15 hrs.





TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO



			de fuentes diversas.	
--	--	--	----------------------	--

Indicadores de alcance	Valor del indicador
A. Se adapta a situaciones y contextos complejos.	5.25
B. Hace aportaciones a las actividades académicas desarrolladas.	2
C. Propone y/o explica soluciones o procedimientos no vistos en clase (creatividad).	2.25
D. Introduce recursos y experiencias que promueven un pensamiento crítico; (por ejemplo el uso de las tecnologías de la información estableciendo previamente un criterio).	1
E. Incorpora conocimientos y actividades interdisciplinarias en su aprendizaje.	6.25
F. Realiza su trabajo de manera autónoma y autorregulada.	3.25

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	
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



Temas y subtemas para desarrollar la competencia específica	Actividades de aprendizaje	Actividades de enseñanza	Desarrollo de competencias genéricas	Horas teórico-práctica
Motores Especiales 5.1 Elementos básicos de los motores monofásicos 5.2 Principio de operación del motor monofásico de inducción 5.3 Arranque de los motores monofásicos de inducción 5.4 Devanados de fase partida 5.5 Arranque por capacitor 5.6 Operación continua por capacitor	• Investigar las partes que lo componen y las funciones del motor monofásico de inducción. • Comprender el principio de funcionamiento del motor monofásico de inducción. • Investigar los métodos de control de velocidad de los motores monofásicos de inducción. • Elaborar un cuadro sinóptico donde aparezcan todos los tipos de motores monofásicos, sus características y aplicaciones • Elaborar un cuadro sinóptico donde	• Realizar investigación de los temas correspondientes • Resolución de problemas de los temas correspondientes • Implementación de circuitos eléctricos	• 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,	



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO



	aparezcan todos los motores especiales, su funcionamiento, características y aplicaciones de cada uno de ellos.		diversas.	
--	---	--	-----------	--

Indicadores de alcance	Valor del indicador
A. Se adapta a situaciones y contextos complejos.	5.25
B. Hace aportaciones a las actividades académicas desarrolladas.	2
C. Propone y/o explica soluciones o procedimientos no vistos en clase (creatividad).	2.25
D. Introduce recursos y experiencias que promueven un pensamiento crítico; (por ejemplo el uso de las tecnologías de la información estableciendo previamente un criterio).	1
E. Incorpora conocimientos y actividades interdisciplinarias en su aprendizaje.	6.25
F. Realiza su trabajo de manera autónoma y autorregulada.	3.25

Niveles de desempeño:





TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO



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			



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO



	Total	20	5.25	2	2.25	1	6.25	3.25	
--	-------	----	------	---	------	---	------	------	--

Nota: este apartado número cuatro de la instrumentación didáctica para la formación y desarrollo de competencias profesionales se repite, de acuerdo al número de competencias específicas de los temas de asignatura.

5. Fuentes de información y apoyos didácticos

Fuentes de información:

Apoyos didácticos:

1. Gonen T. (2011). Electrical Machines with MATLAB. (2a. Ed.). CRC Press . 2. NasarS. (1997) Electric Nachines 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 MachineryUsing Mat Lab/Simulink. Prentice Hall. 5. Kosow, I. L. 2009. Máquinas eléctricas y transformadores.(1^a Ed.). Reverte</



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO



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 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:



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO



Semana	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
TP	ED/EF	EF	EF	EF	EF/ES	EF	EF	EF/ES	EF	EF	EF/ES	EF	EF	EF/ES	EF	EF/ES	
TR																	
SD																	

TP= tiempo planeado

TR= tiempo real



CARTA DE RECONOCIMIENTO DEL AUTOR DE LOS DERECHOS A FAVOR DEL TECNM

Ciudad de México, 27/septiembre/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 ELÉCTRICAS".

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 afect

NOMBRE DEL TRABAJO

MÁQUINAS ELÉCTRICAS.pdf

AUTOR

Beatriz Aurora Garcia Cristiano

RECuento DE PALABRAS

49417 Words

RECuento DE CARACTERES

247126 Characters

RECuento DE PÁGINAS

253 Pages

TAMAÑO DEL ARCHIVO

8.8MB

FECHA DE ENTREGA

Sep 28, 2023 9:45 AM CST

FECHA DEL INFORME

Sep 28, 2023 9:49 AM CST

● 28% de similitud general

El total combinado de