

Máquinas eléctricas para ingenieros de mantenimiento industrial

César Astudillo Machuca
Natali Astudillo Skliarova



ESPOCH
2025

MÁQUINAS ELÉCTRICAS PARA INGENIEROS DE MANTENIMIENTO INDUSTRIAL

MÁQUINAS ELÉCTRICAS PARA INGENIEROS DE MANTENIMIENTO INDUSTRIAL

César Astudillo Machuca
Natali Astudillo Skliarova



**Dirección de
Publicaciones**



espoCh

**Máquinas eléctricas para ingenieros
de mantenimiento industrial**

© 2025 César Astudillo Machuca y Natali Astudillo Skliarova

© 2025 Escuela Superior Politécnica del Chimborazo

Panamericana Sur, kilómetro 1 ½

Decanato de Publicaciones

Riobamba, Ecuador

Teléfono: 593 (03) 2 998-200

Código Postal: EC0600155

Aval ESPOCH

Este libro se sometió a arbitraje bajo el sistema de doble ciego
(*peer review*)

Corrección y diseño:

Editorial Politécnica ESPOCH

Publicado en Ecuador

Prohibida la reproducción de este libro, por cualquier medio,
sin la previa autorización por escrito de los propietarios del
Copyright

CDU: 621

Máquinas eléctricas para ingenieros
de mantenimiento industrial

Riobamba: Escuela Superior Politécnica del Chimborazo

Decanato de Publicaciones, año 2025

159 pp. vol: 17 x 24 cm

ISBN: 978-9942-51-334-2

1. Ingeniería mecánica

INDICE GENERAL

INTRODUCCIÓN	8
CAPÍTULO I	10
1.1. Conceptos básicos del electromagnetismo	10
1.2. Máquinas de corriente continua y monofásicas	13
1.2.1. Introducción a las máquinas de corriente continua (CC)	13
1.2.2. Principio de funcionamiento de los motores CC	15
1.3 Conexiones de los motores de CC	16
1.3.1. El motor serie	16
1.3.2. El motor en paralelo o derivación (<i>Shunt</i>)	18
1.3.3. Motor compound (compuesto)	19
1.4. Selección de un motor de CC	21
1.5 Montaje de un motor de CC	22
1.6 Averías en los motores de CC	22
1.7 Operación de los motores de CC	24
1.7.1 Motor serie	24
1.7.2 Motor derivación	25
1.7.3 Efectos de las variaciones de voltaje	25
1.8. Mantenimiento	25
1.8.1. Preventivo	25
1.8.2. Correctivo	26
1.9. Generalidades de los dínamos o generadores de CC	26
1.10. Motores monofásicos	30
1.10.1. Motores de fase hendida o partida	31
1.10.2. Averías en los motores de fase partida	36
1.10.3. Motores con condensador	37
1.10.4. Motores de arranque con condensador	38
1.10.5. Motor de operación continua por capacitor	40
1.10.6. Motor con doble condensador	42
1.11. Operación o trabajo de los motores monofásicos	43
1.12. Pruebas en motores monofásicos	43
1.12.1. Detección, localización y reparación de averías de los motores monofásicos en forma general	44
1.12.2. Cálculo del condensador	45
1.13. Motores universales	46

CAPÍTULO II	55
TRANSFORMADORES	55
2.1 Introducción	55
2.2 Magnitudes nominales de los transformadores	58
2.3 Tipos básicos de transformadores	60
2.3.1. Los transformadores de potencia para la transmisión de la energía eléctrica	63
2.3.2. Transformador de distribución	64
2.3.3. Diferentes tipos de transformadores	64
2.4 Partes principales de los transformadores	66
2.5 Pérdidas por las corrientes parásitas de foucault	69
2.6 Pérdidas por histéresis o dominios magnéticos	71
2.7 Transformadores monofásicos	72
2.8 Regulación del voltaje de un transformador	74
2.9 El autotransformador	78
2.10 Transformadores trifasicos	80
2.10.1 Conexión delta – delta	82
2.10.2 Conexión estrella – estrella	84
2.10.3 Conexión delta – estrella	85
2.10.4 Conexión estrella – delta	86
2.11 Generalidades sobre el cálculo de los transformadores	86
2.12 Tranformadores de tensión y de corriente	88
CAPÍTULO III	91
MÁQUINAS TRIFÁSICAS	91
INTRODUCCIÓN	91
3.1 Motores trifásicos generalidades	91
3.2 Motores trifásicos asincrónicos	91
3.2.1 Motor de inducción de rotor devanado	95
3.2.2 Motor de inducción jaula de ardilla	103
3.3 Motores sincrónicos	105
3.4. Los pares que los motores requieren	108
3.5 Arranque de los motores	110
3.6. Trabajo óptimo de un motor	111
3.7. Selección de un motor asincrónico	112

3.8. Reparación del motor asincrónico	113
3.8.1 Generalidades	113
3.8.2 Calentamiento anormal	115
3.8.3 Funcionamiento ruidoso	116
3.9 Operaciones para la reparación de un motor asincrónico con rotor en jaula de ardilla	117
3.9.1 Revisión general	117
3.9.2 Reparación mecánica	118
3.10 Tipos de bobinados	122
3.11 Diferencia entre grados eléctricos y geométricos	122
3.12 Velocidad de sincronismo	123
3.13 Deslizamiento	124
3.14 Acabados y pruebas	125
3.14.1 Tratamientos térmicos	125
3.14.2 Pruebas de rigidez	125
3.14.3 Normas para el mantenimiento de las máquinas eléctricas	126
3.15 Cálculo de motores trifásicos	126
3.16 Pruebas de recepción y diagnóstico para motores de gran potencia ...	127
3.16.1 Introducción	127
3.16.2 Desmontaje de motores de gran potencia	128
3.16.3 Mantenimiento	129
3.17 Generadores (alternadores)	129
3.17.1 Clasificación de los alternadores	132
3.17.2 Generador con carga	133
3.17.3 Generadores de corriente continua	134
3.18 Centrales eléctricas	134
3.18.1 Central hidroeléctrica	135
3.18.2 Central eólica	136
3.18.3 Grupo electrógeno	137
3.19 Causas de las fallas en las máquinas eléctricas	139
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	142
ANEXOS	146
Anexo 1. (Rotor de una máquina eléctrica)	146
Anexo 2. (Estator de una máquina eléctrica de cc)	147
Anexo 3. (Delgas, colector de delgas y bobinas)	148

Anexo 4. (Rotor: jaula de ardilla (1))	148
Anexo 5. (Rotor “jaula de ardilla” (2))	149
Anexo 6. (Rotor “jaula de ardilla” (3))	149
Anexo 7. (Grados de protección mecánica de las cubiertas)	150
Anexo 8. (Estator)	151
Anexo 9 y 10. (Inducido de motor)	151
Anexo 11 (transformador de potencia)	152
Anexo 12 (transformadores herméticos de llenado integral)	153
Anexo 13 (transformador monofásico tipo poste)	153
Anexo 14 (transformador de corriente tipo dona)	154
GLOSARIO DE TÉRMINOS	155
A	155
B	155
C	155
D	156
E	156
F	156
G	156
H	156
I	157
J	157
M	157
N	157
P	158
R	158
S	158
T	158
V	168

INTRODUCCIÓN

Según el principio de conservación de la energía, nada puede ser creado ni destruido, solo transformado. Esta transformación ocurre cuando la energía cambia de una forma a otra. Existen dispositivos que se utilizan para realizar estas transformaciones; entre ellos, los que realizan movimientos mecánicos, también denominadas máquinas energéticas, como las turbinas —que convierten diferentes tipos de energía en energía mecánica—, los generadores —que convierten la energía mecánica en eléctrica—, los transformadores eléctricos —que cambian ciertos parámetros de la energía eléctrica— y los motores —que transforman la energía eléctrica en energía mecánica—.

La energía eléctrica tiene la ventaja de poder transmitirse a grandes distancias y a bajo costo, lo que la hace muy útil para su posterior transformación en otros tipos de energía, como mecánica, lumínica, calórica, química, entre otras.

El objetivo principal es el uso de la electricidad mediante aparatos para satisfacer nuestras necesidades y tener confort en nuestra vida diaria, comunicación —muy importante en nuestra época—, industria, transporte. En general, la electricidad forma parte fundamental dentro de nuestra sociedad; sin ella, retrocederíamos muchos años en el desarrollo de la humanidad.

Por lo tanto, para satisfacer nuestras necesidades y tener la comodidad a que nos hemos acostumbrado, es necesaria la generación de energía eléctrica, para luego trasmitirla, subtrasmitirla y distribuirla, lo que constituye el proceso que existe entre la generación y la llegada de la electricidad hasta nuestros hogares, centros comerciales, industria y utilizadores o beneficiarios en general.

El papel desempeñado por las máquinas eléctricas en este proceso es esencial, dado que comienza con los generadores, sigue con los transformadores y concluye con los motores eléctricos, que son los mayores consumidores de energía en este sistema.

El presente libro va dedicado a los estudiantes de la Escuela de Ingeniería en Mantenimiento Industrial y a las personas que requieran trabajar en el área de mantenimiento, por lo que la materia se expone en una forma sencilla, apartándonos de altas matemáticas como se explica en la ingeniería eléctrica.

Partimos de principios elementales como es el electromagnetismo e indicamos a la vez dónde se utilizan las máquinas y para qué nos sirven, cuál es el principio de funcionamiento y sus partes constitutivas, de tal manera que el estudiante sepa guiarse para la realización del mantenimiento adecuado. También será una ayuda para escoger qué máquina les sirve para efectuar distintos trabajos según sus funciones y costo; es decir, el aspecto técnico-económico.

Sobre la reparación de un motor asincrónico, el texto, en principio, indica las principales averías para luego seguir con las formas de solucionarlas tanto en el aspecto eléctrico como en el mecánico. Luego se dan bases fundamentales de otros tipos de máquinas eléctricas.

Se hará un estudio de los diferentes pasos que se tiene que seguir para la reparación de un motor.

CAPÍTULO I

1.1. CONCEPTOS BÁSICOS DEL ELECTROMAGNETISMO

La transformación de la energía en otros tipos de energía se lo realiza por medio de diferentes tipos de máquinas. En nuestro caso, nos ocuparemos de:

- La transformación de cualquier tipo de energía en energía eléctrica (generadores).
- Transformación de energía eléctrica en mecánica (motores).
- Transformación de energía eléctrica en energía eléctrica cambiando ciertos parámetros como el voltaje y la intensidad especialmente (transformadores).

La intervención de las máquinas eléctricas en nuestra sociedad va desde su generación hasta la respectiva transformación de energía eléctrica en otro tipo de energía para nuestro uso y satisfacción.

Tomemos en cuenta que la mayoría de las máquinas eléctricas son reversibles, es decir, pueden utilizarse como motor o como generador.

El principio general de funcionamiento de las máquinas eléctricas es el campo electromagnético, que consta de circuitos eléctricos y magnéticos interconectados. En forma concreta, podemos definir tres principios claves:

1. En un imán permanente o electroimán, los polos del mismo signo se repelen y, del signo contrario se atraen (pueden producir movimiento).
2. Si, por un conductor, circula una corriente eléctrica, alrededor del mismo, se crea un campo magnético.
3. Si un conductor corta o es cortado por un campo magnético, se induce en él, una *f.e.m* (*fuerza electromotriz*), es decir «creamos la energía eléctrica». Según la ley de Faraday, se puede escribir:

$$e = N \left(\frac{d\Phi}{dt} \right)$$

Donde:

N: es el número de espiras

Φ : es el flujo

t: la derivación para el tiempo t, es la velocidad del corte de este flujo magnético.

Por lo que se puede formular la ecuación de una forma más simple:

$$e = N \times \Phi \times \omega$$

Donde ω es la velocidad angular.

Bajo estos tres principios funcionan los generadores, motores y transformadores.

Podemos agregar además que el magnetismo y la electricidad van asociados intrínsecamente, es decir, cuando exista una corriente eléctrica, se va a generar un campo magnético y, donde exista un campo magnético, puede generarse electricidad.

La explicación es la siguiente:

- Si existe solo una fuerza electromotriz (*f.e.m*) y no existe circulación de corriente, no puede haber un campo magnético.
- Si existe un campo magnético, pero este no corta ni es cortado por las líneas de flujo magnético en un conductor, no se inducirá una fuerza electromotriz en él.
- Cuando se ha inducido una fuerza electromotriz en el conductor, si el circuito no está cerrado, no circulará corriente eléctrica. Al cerrar el circuito, circulará corriente; por lo tanto, se producirá un campo magnético.

La corriente eléctrica y el magnetismo están ligados intrínsecamente; por eso se llama el campo del electromagnetismo.

Por la historia de cómo se fueron utilizando las máquinas eléctricas, comenzamos el estudio con máquinas de corriente continua, seguimos con máquinas monofásicas de corriente alterna, transformadores y máquinas trifásicas.

La importancia de las máquinas eléctricas en la generación, transmisión, distribución y uso final de la energía eléctrica es fundamental. Su estudio resulta esencial, dado que estas máquinas están presentes en los procesos productivos. Ya sea como convertidores de energía eléctrica en energía mecánica, como es el caso de los motores, o como transformadores eléctricos utilizados en equipos como las soldadoras (Wildi, 2007).

Figura 1.1.
Proceso de generación

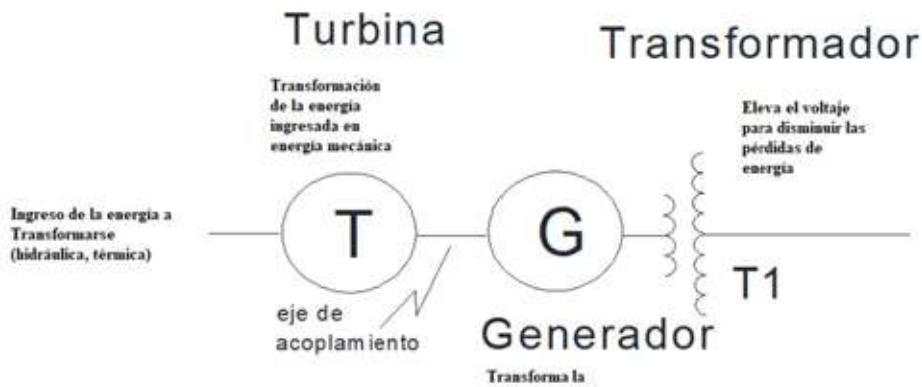
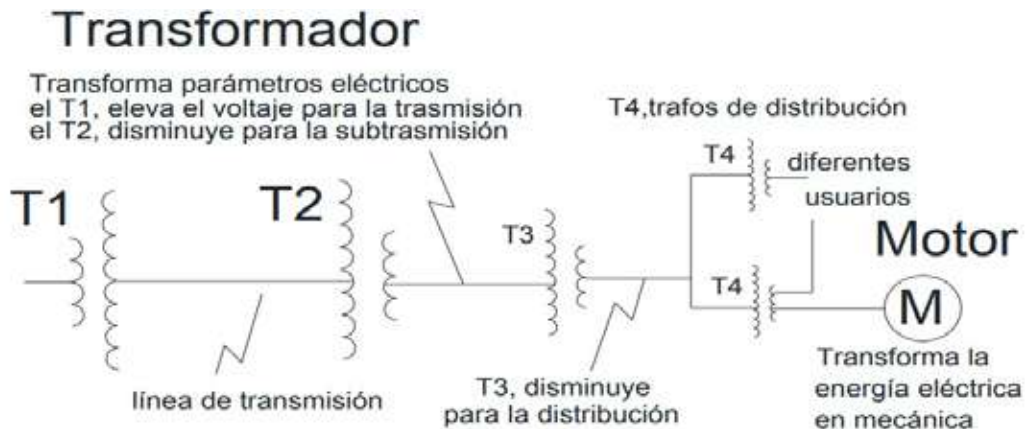


Figura 1.2.
Proceso transformación, transmisión, distribución y utilización de la energía eléctrica y el rol que juegan las máquinas eléctricas



Se inicia el proceso desde la transformación de un tipo de energía, que puede ser natural, tales como la caída de agua (hídrica), del viento (eólica), volcánica (geotérmica), del sol, de la combustión del petróleo o carbón.

La energía antes descrita se transforma en energía mecánica por medio de la turbina (ver la fig. 1.1).

Para la transformación en energía eléctrica, acoplamos el eje de la turbina al eje del generador y, por medio del electromagnetismo, producimos electricidad.

Por cuanto las estaciones de generación de energía eléctrica se encuentran lejos de los centros de consumo, necesitamos transportar con las mínimas pérdidas, las mismas que vienen dadas por la ley de Joule:

$$E_p = I^2 \times R \times t$$

Donde:

E_p : pérdidas de energía

I^2 : intensidad de corriente eléctrica

R : resistencia del conductor

t : tiempo

Por la fórmula anterior, vemos que, para bajar las pérdidas, es necesario disminuir la intensidad de corriente, y esto lo logramos aumentando el voltaje mediante los transformadores.

De igual manera, para el consumo de energía eléctrica, es necesario un voltaje apropiado y esto lo obtenemos mediante la disminución del voltaje en los transformadores (ver fig.1.2).

1.2. MÁQUINAS DE CORRIENTE CONTINUA Y MONOFÁSICAS

1.2.1. Introducción a las máquinas de corriente continua (CC)

Los motores de corriente continua destacan en aplicaciones que demandan un control preciso de la velocidad, así como en aquellas situaciones donde se necesita generar un elevado par motor.

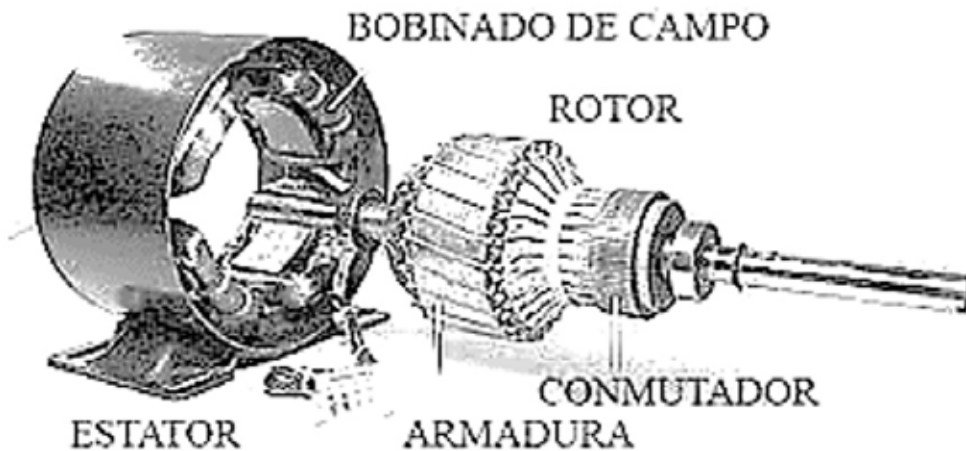
Estos motores se utilizan en el accionamiento de máquinas, herramientas y bombas. Son especialmente útiles en situaciones que demandan una tracción eléctrica significativa, intervienen en la velocidad y tienen un potente par de arranque; por esta razón se utilizan comúnmente en ferrocarriles eléctricos, trolebuses, ascensores, grúas y tranvías.

La corriente continua para accionar, especialmente las máquinas de tracción, se obtiene comúnmente de la rectificación de la corriente alterna.

Para las grúas móviles, el suministro de la corriente continua proviene de los dínamos que tienen acopladas al motor de combustión interna del camión grúa.

Partes constitutivas:

Figura 1.3.
Partes de la máquina de CC



Fuente: Sapiensman, 2017

- **Estator:** es la parte fija (estática) en el espacio destinado para las bobinas que generan un campo de excitación constante. Se divide en dos partes. Una de ellas está compuesta por bobinas de grueso calibre y pocas espiras, las cuales se conectan en serie y aquellas que se conectan en paralelo (bobinas de calibre fino y numerosas espiras). Recibe corriente continua de la red, por lo que se forman polos fijos, es decir, un norte y un sur que no cambian en el tiempo (Pozueta, 2019).
- **Rotor:** es la parte móvil (la que rota), esta estructura incluye un bobinado de polos rotativos. Para suministrar corriente a este bobinado, se requiere un conjunto de escobillas (parte estática) que se conectan a un colector (parte móvil). El colector está compuesto por un conjunto de delgas, las cuales se conectan a las diversas madejas de conductores que forman el circuito electromagnético del rotor, también conocido como armadura.

Este sistema presenta una complejidad notable. El conjunto de escobillas y colector se denomina conmutador. El conmutador es un dispositivo mecánico que transforma la corriente continua en alterna, ya que el rotor funciona con este tipo de corriente (CA).

En forma general el motor se compone de rotor, llamado también armadura; bobinas del estator; carcasa, escudos y puente de los portaescobillas.

La armadura (rotor) es la parte giratoria y está formada por un paquete de chapas de hierro, de calidad especial, dotado de ranuras donde se alojan las bobinas de arrollamiento.

El núcleo va fuertemente prensado sobre el eje del motor, en el que también se monta el colector. Este último, compuesto por delgas aisladas una de otra, sirve para dar paso a la corriente desde las escobillas al arrollamiento. En todos los motores de corriente continua, para conectar eléctricamente una pieza móvil a una fija, la corriente entra por las escobillas (fija) que hacen contacto con las delgas (móvil), las mismas que están conectadas a las bobinas de la armadura. Este conjunto de delgas se denomina colector y el conjunto de escobillas más el colector se denomina conmutador.

El conmutador es un dispositivo mecánico que nos sirve como inversor en el caso de motor —es decir, transforma la corriente continua en alterna— y de rectificador en el caso de generador. Como motor, el rotor funciona con corriente alterna y, como generador, en el rotor se produce corriente alterna y tiene que transformarse a corriente directa (ver fig.1.3 y anexos 1, 2 y 3).

1.2.2. Principio de funcionamiento de los motores CC

Las bobinas del estator crean un campo magnético invariable, ya que están alimentadas por corriente continua (cada polo es un norte o un sur fijos). Para que exista movimiento, es necesaria una interacción magnética y esta se produce cuando circula una corriente eléctrica alterna en el rotor. Si la configuración de las bobinas fuera la misma que en el estator, el motor daría un movimiento hasta que se encuentren polos de distinto signo y el motor se detendría; en este caso se convertiría en un freno electromagnético. Para conseguir un movimiento continuo, es necesario que exista un campo magnético giratorio en el rotor, y esto se consigue alimentándolo con corriente alterna. Por esta razón, se han inventado el colector y las escobillas. El resultado de este conjunto es el conmutador, dispo-

sitivo mecánico que transforma la corriente continua de la red en alterna; o sea, es un inversor mecánico de frecuencia (existen motores que tienen inversores electrónicos).

El par que se produce en estos motores depende de la corriente del rotor (la armadura) y del campo del estator. Cuando sus corrientes son elevadas, el par será mayor, pero su velocidad será baja, haciendo un símil con los automóviles cuando se pone en primera marcha. Para que la velocidad aumente, es necesario disminuir la intensidad del campo, con lo que se consigue disminuir el par y aumentar la velocidad. En similitud con los automóviles, es ir cambiando la marcha; disminuye la potencia del automóvil, pero aumenta su velocidad.

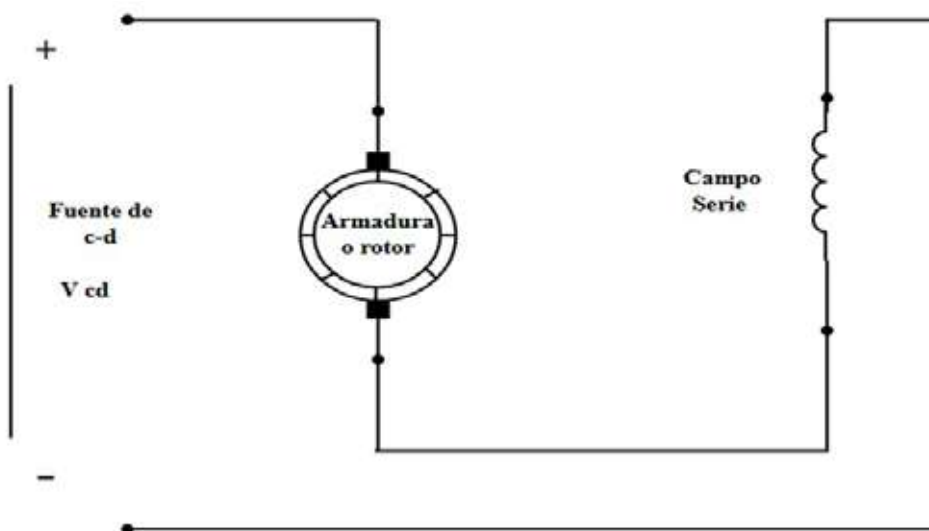
1.3 CONEXIONES DE LOS MOTORES DE CC

Hay tres tipos de motores de corriente continua: serie, derivación o paralelo (en inglés *shunt*) y el compuesto (la unión de los dos anteriores, *compound*). A primera vista, los tres tipos comparten una apariencia similar en el exterior; sin embargo, presentan diferencias sustanciales en su interior, tanto en el diseño de las bobinas de campo como en las conexiones entre estas y el rotor.

1.3.1. El motor serie

Figura 1.4.

Conexión del motor de corriente continua en serie



Fuente: Wildi y De Vito, 1975

Contiene unas bobinas de campo compuestas por pocas espiras de calibre más grueso que la del rotor conectadas en serie con la armadura, como se indica en la figura 1.4. Este motor se destaca por su elevado par de arranque, lo que le confiere una capacidad excepcional para iniciar operaciones de manera eficiente. Además, presenta una amplia gama de velocidades, lo que lo hace versátil y capaz de adaptarse a diversas condiciones de trabajo. La carga será inversamente proporcional a la velocidad (más carga, menor velocidad). Los motores en serie se emplean para grúas y medios de transporte.

Las ventajas de este motor serían las siguientes:

- Amplia gama de velocidades.
- El par de arranque es alto.
- En el arranque, produce corrientes mayores que la nominal, por lo que se tiene una buena aceleración.

Las desventajas:

- La velocidad disminuye proporcionalmente al aumento de la carga.
- En ausencia de carga, el motor puede alcanzar velocidades peligrosamente altas.

Para conocer cuanto influye en el circuito eléctrico el campo en serie, podemos calcular la caída de tensión en este devanado. Por ejemplo, se tiene una corriente de 2 A c-d que fluye por el devanado de campo serie del motor, cuya resistencia medida es de $1,6 \Omega$. ¿Cuál será la caída de tensión? $dU = 2 \times 1,6 = 3,2 \text{ V}$

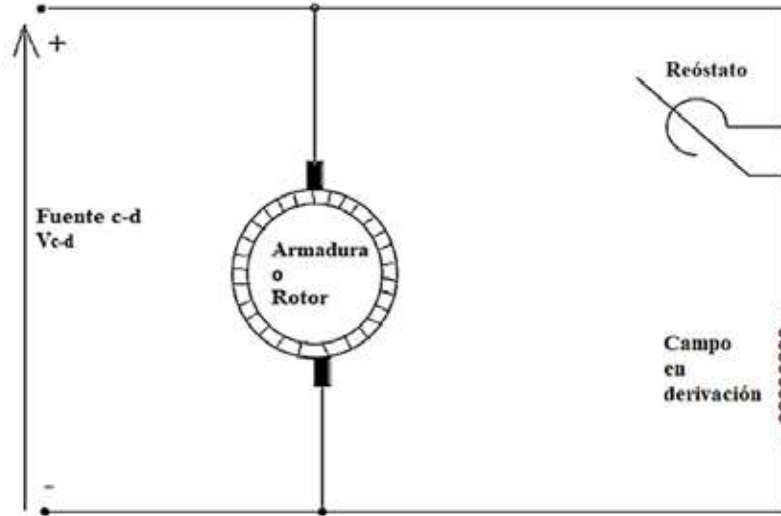
Como conclusión, podemos decir que, mientras más grueso sea el conductor, menor será la caída de tensión y menor será la afectación en el motor.

¿Por qué es peligroso aplicar energía a un motor de c-d en serie, sin ninguna carga?

Porque el motor podría acelerarse y destruirse.

1.3.2. El motor en paralelo o derivación (*shunt*)

Figura 1.5.
Conexión del motor de corriente continua en paralelo



Fuente: Wildi y De Vito, 1975

Tiene bobinas de campo de gran número de espiras de fino calibre, que van conectadas en paralelo con la armadura, como se representa en la figura 1.5. Este motor se caracteriza por mantener una velocidad constante y un par de arranque medio. Se utiliza en diversas aplicaciones que demandan una velocidad constante, como taladradoras y tornos. La regulación de la velocidad se logra a través del reóstato, que controla la intensidad del campo (a mayor intensidad de campo, menor velocidad).

Las ventajas de este motor serían las siguientes:

- Prácticamente velocidad constante.
- La velocidad es casi independiente de la carga.

Las desventajas de este motor serían las siguientes:

- Par de arranque mucho menor que la conexión en serie.
- Si, por alguna razón, se desconecta el bobinado *shunt* y el motor está sin carga, este se embala.

Para encontrar las corrientes que fluyen por el devanado *shunt*, basta con medir con un óhmetro el devanado del campo en derivación del motor. Por ejemplo, nos da 250 Ω . ¿Cuál sería la corriente, si el devanado se excita con 120 V?

$$i = 120/250 = 0,48 \text{ A}$$

Si el reóstato (500 Ω) se conecta en serie con el devanado de campo en derivación y la combinación se conecta a una línea de 120 V c-d, ¿Qué variaciones de corriente del campo en derivación se podrían obtener de su motor?

$$I_{min} = 120 / ((250+500)) = 0,16 \text{ A}$$

$$I_{max} = 120/250 = 0,48 \text{ A}$$

En cualquiera de las conexiones para invertir la rotación se puede:

- Intercambiar las conexiones de la armadura.
- Intercambiar las conexiones del campo.

Para evitar que se *embale* y que posiblemente se destruya el motor, es necesario detectores de pérdida de campo especialmente en motores grandes de c-d.

Las dos formas en que se puede variar la velocidad del motor de c-d son:

- Variar la intensidad del campo *shunt*.
- Variar el voltaje de la armadura.

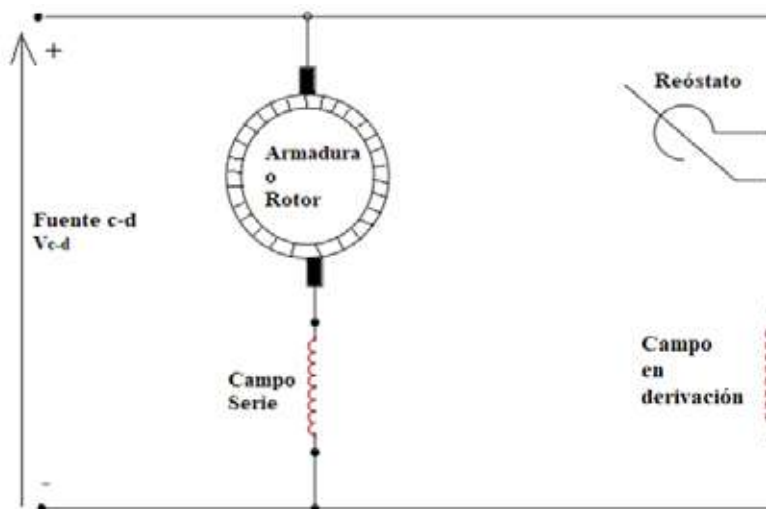
1.3.3. Motor *compound* (compuesto)

El *compound* se conecta según la figura 1.6. La bobina *shunt* está derivada con la línea. La bobina serie se conectan con el rotor.

En el motor acumulativo de *shunt* largo, la corriente fluye a través de las bobinas serie y *shunt* de cada polo en la misma dirección, tal como se indica en la figura 1.6. Este motor se clasifica como acumulativo debido a su conexión particular. Cuando el campo *shunt* se conecta directamente a la red, se le denomina *shunt* largo. En el caso de un motor *compound*, si se invierten las conexiones del campo *shunt* con respecto al campo serie, la corriente circula en dirección opuesta a través de ambos campos, generando polaridades opuestas en los campos serie y *shunt* de un mismo polo, lo que da lugar a un motor diferencial. Por otro lado, si el campo *shunt* de un motor *compound* se conecta a los terminales de la arma-

dura en lugar de la red. Se obtiene un motor de *shunt* corto, que puede ser tanto acumulativo como diferencial.

Figura 1.6. Conexión *compound*



Fuente: Wildi y De Vito, 1975

Entre las ventajas y desventajas de este motor se puede contar lo siguiente:

- Tiene algunas ventajas del motor en serie y el motor en paralelo.
- Mayor costo.

El sentido de rotación de un motor de corriente continua se cambia invirtiendo las conexiones o del rotor (armadura) o del estator (campo). En los motores serie es suficiente con permutar los terminales del portaescobillas para conseguir la inversión esperada. Se puede invertir también las conexiones del bobinado del campo. En los motores *shunt*, se procede de la misma manera.

Un motor compuesto de c-d es más estable que un motor serie de c-d, y sus características de arranque son casi tan buenas como las de este, por cuanto su devanado *shunt* provee un campo de flujo más o menos constante para regulación de velocidad que limita la velocidad sin carga, mientras que su devanado en serie mejora las características de arranque.

Comparando los motores compuestos, en serie y en derivación, de acuerdo con el arranque, podemos decir lo siguiente:

- a) El par de arranque es bajo para el motor c-d con devanado shunt, y es alto para los motores serie y compuesto.
- b) La corriente de arranque es un 53 % mayor para el motor *shunt* que para los motores serie y compuesto.

Comparando los motores compuestos, en serie y en derivación, de acuerdo con otros parámetros, tenemos que:

- a) La eficiencia es aproximadamente igual para cada uno de los tipos de motor.
- b) La regulación de velocidad es relativamente buena para el motor shunt, pobre para un motor compuesto y muy malo para un motor en serie.

Contestando a la pregunta sobre por qué las escobillas del motor están hechas de carbón y no de cobre, se puede decir que hay menos fricción de grafito y cobre. Las escobillas de grafito son baratas y fáciles de reponer. El uso de escobillas de grafito asegura un desgaste mínimo del conmutador que es relativamente costoso y difícil de reemplazar.

Para localizar la posición neutra de las escobillas en un motor de c-d, se aplica corriente alterna en la armadura, ajustando las escobillas para que la corriente alterna inducida sea cero en el devanado *shunt*.

1.4. SELECCIÓN DE UN MOTOR DE CC

En primer lugar, se tiene que conocer cuál es el requerimiento y qué equipos va a accionar: máquinas, herramientas, bombas, mezcladoras, ventiladores, generadores, ferrocarriles eléctricos, trolebuses, ascensores, grúas, tranvías, etc. Entonces se escoge según la conexión el más adecuado; serie, paralelo o *compound*.

Según la fuente de alimentación, si es un dínamo propio o de corriente rectificada, los costos en este sentido son muy importantes.

Dentro de los aspectos técnicos, tenemos la potencia, voltaje, velocidades requeridas.

Las condiciones ambientales de trabajo: temperatura, altitud, humedad polvo. Para esto se recurre a las normas IP, que nos indican la protección contra con-

tactos accidentales en las partes activas y la penetración de cuerpos sólidos raros y contra la entrada de líquidos (ver tabla de normas IP, anexo 7).

1.5 MONTAJE DE UN MOTOR DE CC

El ingeniero de mantenimiento es el encargado de recibir la maquinaria para luego hacer el montaje. Por lo tanto, tiene que inspeccionar el motor y asegurarse de que este no tenga rayaduras, golpes u otros daños de consideración.

Es importante verificar que la documentación entregada se corresponda con el motor en cuestión, y que incluya información sobre su funcionamiento, mantenimiento, almacenamiento, especificaciones técnicas, diagramas y que la placa del motor esté claramente identificada.

Se debe de tomar en cuenta la cimentación, de tal manera que no existan vibraciones y que tenga una correcta alineación con la carga.

Antes de conectar, siempre se debe verificar con un voltímetro que el voltaje de alimentación sea el mismo que indica en la placa del motor.

Comprobar que el cálculo de los conductores de alimentación es correcto. Este tiene que estar de acuerdo con la intensidad nominal del motor y la caída de tensión que se pueda producir si la instalación del motor está muy alejada de la fuente de alimentación.

Se tiene que realizar una conexión a tierra. Esta tiene que ser sólida, con un conductor mínimo 1/0 AWG de cobre desnudo y una varilla *copperweld*.

1.6 AVERÍAS EN LOS MOTORES DE CC

El motor no arranca al conectar a la red, el defecto podría ser:

- a) Elemento de protección interrumpido (fusible o breaker)
- b) Las escobillas atascadas o sucias
- c) Interrupción en el circuito del rotor
- d) Interrupción en el circuito del estator
- e) Arrollamientos en contacto con la carcasa o en cortocircuito

- f) Colector con un cortocircuito
- g) Cojinetes desgastados
- h) Contactos a masa de un portaescobillas
- i) Sobrecarga excesiva
- j) Reóstato defectuoso

El motor funciona demasiado despacio, el defecto podría ser:

- a) Colector con un cortocircuito
- b) Cojinetes desgastados
- c) Interrupción en una de las bobinas
- d) Escobillas desgastadas
- e) Sobrecarga
- f) Voltaje muy diferente al nominal

Si la velocidad del motor supera la nominal, puede deberse a las siguientes causas:

- a) Interrupción del shunt
- b) Motor serie en vacío
- c) Arrollamiento inductor en contacto a masa o con un cortocircuito

La aparición de chispas en el colector puede deberse a:

- a) Colector sucio
- b) Defectuoso contacto de las escobillas
- c) Circuitos abiertos en el estator
- d) Polaridad del circuito auxiliar equivocada
- e) Devanados en contacto con masa o en cortocircuito
- f) Conexión incorrecta del estator

- g) Conexión incorrecta de los terminales de las bobinas a delgas no correspondientes
- h) Escobillas con un mal contacto
- i) Circuitos abiertos en el rotor
- j) Delgas salientes o hundidas
- k) Láminas de mica salientes
- l) Devanados desequilibrados

Si el motor marcha con ruido, puede ser debido a:

- a) Desgaste en los cojinetes
- b) Delgas que sobresalen o están hundidas
- c) Defecto en el colector
- d) Devanados desequilibrados

Si el motor se calienta puede ser debido a:

- a) Sobrecarga
- b) Chispas
- c) Cojinetes muy apretados
- d) Bobinas con cortocircuitos
- e) Presión excesiva de las escobillas

Para realizar un buen trabajo, es necesario saber manejar aparatos de medida, especialmente el multímetro

1.7 OPERACIÓN DE LOS MOTORES DE CC

1.7.1 Motor serie

Cuando arranca en vacío, tiende a embalsarse. Por eso debe arrancar con carga (grúas, ascensores, etc.).

El cambio de sentido de rotación se lo puede hacer cambiando la conexión en el rotor o en el estator.

1.7.2 Motor derivación

El problema aquí consiste en que el bobinado de campo puede desconectarse; por lo tanto, es recomendable agregarle un detector de campo para evitar posibles embalamientos.

Se cambia el sentido de giro del mismo modo que del motor serie.

1.7.3 Efectos de las variaciones de voltaje

Las variaciones de voltaje son perjudiciales para todos los aparatos eléctricos debido a que reducen la vida útil de los mismos y también su rendimiento.

Las variaciones pueden producirse en las subestaciones eléctricas o en el sistema eléctrico nacional o también cuando, en la instalación, no se ha tomado en cuenta la distancia de la instalación del motor, con lo que se produce una caída de tensión mayor que el porcentaje permitido.

Estas variaciones afectan en sus características de operación como velocidad, corriente a plena carga, par de arranque, capacidad inherente de sobrecarga y elevación de la temperatura en los devanados de armadura y en el conmutador.

Los límites máximos de variación son un 5 % por debajo y hasta un 10 % por encima del valor nominal.

1.8. MANTENIMIENTO

1.8.1. Preventivo

En este caso, se trata de verificación visual, después de la cual se procede a la limpieza de las diferentes partes del motor luego de ser desarmado.

Se tiene que verificar los ajustes de pernos, cojinetes (holgura), aceites. Si es necesario, se tiene que cambiar las partes que se encuentren muy deterioradas.

Revisar las escobillas y determinar su cambio.

Lo fundamental es la revisión de las delgas por lo que su limpieza es fundamental, ya que tiene que existir un aislamiento entre las mismas. Por efecto del

carbón que se desprende de las escobillas, se vuelve una sola masa cortocircuitada, situación en la que la quema del motor es inminente.

En cuanto a la revisión de las conexiones, estas tienen que estar sólidamente unidas.

Se puede hacer pruebas de aislamiento si se tienen los aparatos adecuados.

1.8.2. Correctivo

En la parte mecánica

- Cambio de cojinetes desgastados
- Ejes torcidos o desgastados

En la parte eléctrica

- Contactos a masa
- Cortocircuitos
- Circuitos abiertos

Para detectar estas anomalías, es necesario utilizar un buen multímetro.

1.9. GENERALIDADES DE LOS DÍNAMOS O GENERADORES DE CC

La comprensión precisa de la distinción entre un motor y un generador es fundamental. Un motor convierte la energía en movimiento mecánico, mientras que un generador transforma la energía mecánica en energía eléctrica. Un motor es una máquina que, alimentándola con corriente eléctrica, servirá para realizar un trabajo mecánico, tal como, por ejemplo, accionar una grúa, un ascensor, una máquina-herramienta, etc.

Un generador, por el contrario, es una máquina accionada por medios mecánicos (turbina), como, por ejemplo, una máquina de vapor, motor diésel, una turbina accionada por el viento (eólica) o el agua, etc., y que produce energía eléctrica. Es decir, transforma de energía mecánica a energía eléctrica.

Los generadores de corriente continua o dínamos se construyen de potencia comprendida entre una fracción de kW hasta varios miles de kW.

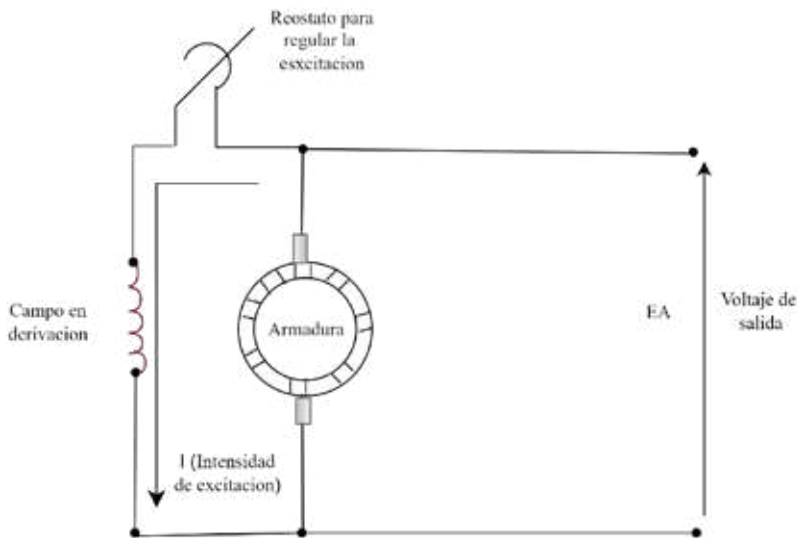
Una máquina de corriente continua puede ser reversible; es decir, si se aplica energía eléctrica, funciona como motor; y, si se aplica energía mecánica, lo hará como generador.

Funcionamiento de un dínamo

Cuando se induce movimiento en un conductor dentro de un campo magnético de manera que intercepta las líneas de fuerza, se engendrará en aquel una fuerza electromotriz (ver electromagnetismo, en la introducción). La magnitud de la corriente eléctrica generada puede cuantificarse conectando los terminales de un voltímetro a los extremos del conductor en cuestión. En caso de que haya varios conductores dispuestos en serie, similares a las espiras de una bobina, la fuerza electromotriz inducida será igual a la suma de las fuerzas electromotrices o tensiones generadas en cada uno de los conductores. Esta configuración en serie amplifica la magnitud total de la fuerza electromotriz y evidencia la importancia de considerar la disposición y conexión de los conductores al explorar los efectos de la inducción electromagnética. La magnitud de la tensión inducida no solo está vinculada a la intensidad del campo magnético, sino también a la velocidad de desplazamiento de los conductores (corte del campo magnético). A medida que la intensidad del campo magnético aumenta, la tensión inducida experimenta un incremento proporcional. De manera similar, a medida que la velocidad de movimiento de los conductores aumenta, también lo hace la magnitud de la tensión inducida. Estas relaciones destacan la influencia significativa que tanto la intensidad del campo como la velocidad de los conductores tienen en la generación de tensión electromotriz, subrayando la importancia de comprender y controlar estos factores en el estudio de la inducción electromagnética (ver el punto tres de la introducción).

Si el conductor, que se encuentra dentro de un campo magnético, se mueve hacia abajo, la corriente inducida en el mismo será en un sentido y viceversa. El sentido de la corriente depende, pues, de la dirección del movimiento del conductor. Asimismo, un cambio de dirección del campo magnético (líneas de fuerza) motiva el cambio de sentido de la corriente inducida.

Figura 1.7.
Conexión del generador de corriente continua con autoexcitación



Fuente: Wildi y De Vito, 1975

De lo expuesto, se deduce que, para generar la fuerza electromotriz (*f.e.m.*), se necesitan dos factores: líneas de fuerza (flujo de un campo magnético) y que un conductor corte las líneas de fuerza; es decir, que exista movimiento:

$$e = N \times \Phi \times \omega$$

El campo magnético necesario para la producción de la corriente eléctrica puede obtenerse por medio de imanes permanentes (como en los magnetos), por excitación de las bobinas de campo con corriente continua suministrada por una batería o por otro generador menor (excitación independiente) o excitando las bobinas de campo con la misma corriente que produce el inducido (autoexcitación, fig. 1.7).

Los dínamos se pueden clasificar por la forma de excitación en lo siguiente:

Dínamo con excitación independiente

Cuando las bobinas de campo son energizadas con corriente suministrada desde una fuente eléctrica externa (baterías, fuente externa, etc.), se tiene el dínamo con excitación independiente. Al girar el inducido dentro del campo magnético, se genera una f.e.m. Si el circuito se cierra mediante la conexión de una carga, entonces circulará una corriente eléctrica.

Dínamo con autoexcitación

En la mayoría de los dínamos, la corriente de campo proviene de la misma corriente generada en su inducido, lo que los clasifica como dínamos con autoexcitación.

Si el dínamo es nuevo, carece de un campo magnético remanente (cuando un material ferromagnético se encuentra dentro de un campo magnético, se imanta de forma natural, pero débil. Es lo que se llama imantación remanente), por lo que se tienen que cebar mediante una batería para que tenga un campo magnético.

En la figura 1.7, se representa el esquema de un dínamo de este tipo. Al no girar el inducido (rotor), el campo es débil, pues solo dispone del magnetismo remanente. Al girar el inducido, los conductores cortan las líneas de fuerza de este débil campo y se genera en ellos una pequeña corriente que excita las bobinas inductoras, aunque ligeramente, y crea un flujo adicional. Entonces, sobre el inducido en movimiento, actuará un flujo magnético más intenso, que hará incrementar la corriente producida. Por consiguiente, circula por las bobinas inductoras (estator), lo que, a su vez, incrementa el flujo o líneas de fuerza del campo inductor. Este proceso continúa hasta que se llega a la saturación magnética de los polos, es decir, al máximo.

Hay tres tipos de dínamos con autoexcitación: serie, *shunt* o derivación y *compound*. La más recomendable es *shunt* (fig. 1.7). Cuando las bobinas de campo y el inducido están conectados en paralelo, la intensidad del campo se mantiene prácticamente constante e independiente de la carga. Para el control del voltaje, se tiene un reóstato, cuya función es aumentar o disminuir la intensidad del campo magnético. Al aumentar la fuerza del campo, la *f.e.m* aumenta y viceversa.

Cabe destacar que la corriente inducida o generada, por su naturaleza es alterna. Por lo tanto, para que se transforme en corriente continua, se tiene el rectificador mecánico que constituyen las escobillas con el colector, denominados en conjunto como conmutador.

Si un generador autoexcitable pierde todo su magnetismo remanente, no puede generar un voltaje de salida, porque no tiene el flujo magnético. Por lo tanto, se tienen que conectar solo los devanados del estator a una fuente separada, que puede ser una batería, por unos pocos segundos, llamándolo «destello de campo» o de sebo.

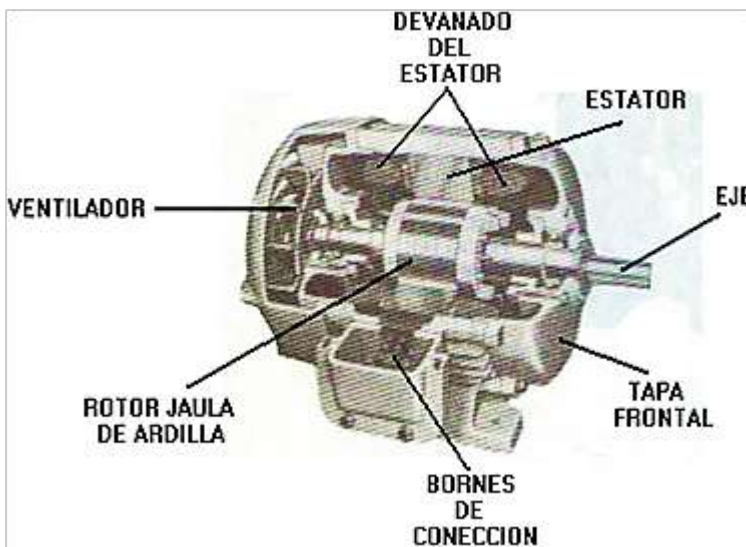
Si el generador, sin ser nuevo, no funciona, es porque la corriente de campo no fluye en el sentido adecuado, el magnetismo remanente se reduce y no se generará voltaje. En este caso, la situación se corrige intercambiando simplemente las terminales del campo en derivación.

1.10. MOTORES MONOFÁSICOS

Los motores monofásicos (fig. 1.8) son uno de los tipos más comunes de motores eléctricos utilizados en una amplia variedad de aplicaciones, desde electrodomésticos hasta equipos industriales. A diferencia de los motores trifásicos, que requieren tres fases de alimentación, los motores monofásicos funcionan con una sola fase de alimentación, lo que los hace más convenientes para su uso en hogares y pequeñas empresas que generalmente solo tienen acceso a una fase.

Los motores monofásicos están diseñados para convertir la energía eléctrica en energía mecánica, lo que los hace ideales para aplicaciones que requieren movimiento, como ventiladores, bombas, herramientas eléctricas, electrodomésticos, entre otros. Aunque los motores monofásicos tienen ciertas limitaciones en términos de potencia y eficiencia en comparación con los motores trifásicos, son una opción económica y práctica para muchas aplicaciones que no requieren una gran cantidad de energía.

Figura 1.8.
Motor monofásico



Fuente: Ricalday, 2018

Nota: la figura es utilizada con fines académicos

Los motores monofásicos tienen dos tipos de bobinados: el bobinado de arranque y el bobinado de trabajo. El bobinado de arranque proporciona un impulso inicial para el motor, mientras que el bobinado de trabajo mantiene el motor funcionando una vez que ha alcanzado su velocidad nominal.

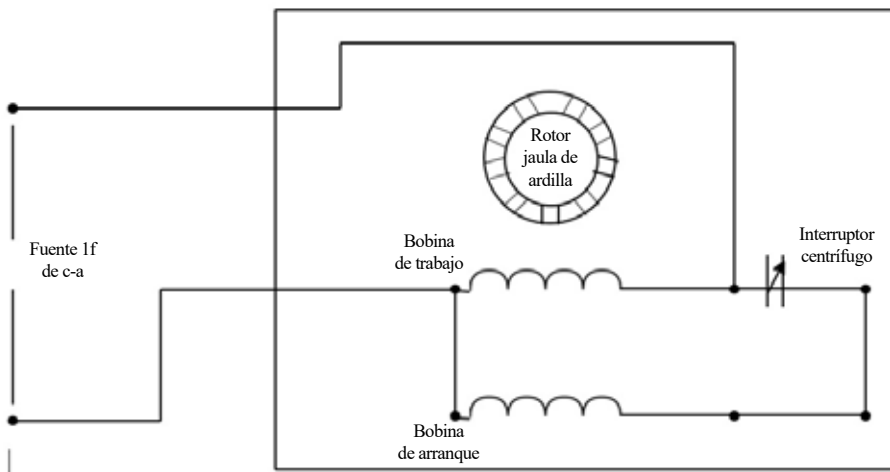
El motor monofásico también tiene un componente llamado condensador, que se utiliza para crear un desfase en la corriente eléctrica que alimenta el motor.

En términos de eficiencia, los motores monofásicos tienen una eficiencia energética menor que los motores trifásicos, y no son tan adecuados para aplicaciones de alta potencia.

Los motores monofásicos están disponibles en una amplia gama de tamaños y potencias, desde fracciones de caballos de fuerza (HP) hasta varias decenas de HP. Sin embargo, en general, los motores monofásicos se utilizan más comúnmente en aplicaciones de baja potencia.

1.10.1. Motores de fase hendida o partida

Figura 1.9.
Conexión del motor de fase hendida (partida)



Fuente: Wildi y De Vito, 1975

El motor de fase hendida (representado en la figura 1.9) es un dispositivo de corriente alterna con una potencia inferior a un caballo, diseñado específicamente para impulsar ciertos equipos como bombas pequeñas. Este motor se alimenta con corriente monofásica y presenta generalmente tres arrollamientos indepen-

dientes, todos esenciales para su funcionamiento óptimo. Uno de estos arrollamientos se ubica en el rotor y se conoce como arrollamiento en cortocircuito o de jaula de ardilla. Los otros dos arrollamientos se encuentran en el estator. Estos componentes, en conjunto, desempeñan un papel crucial en el rendimiento eficiente del motor, al permitir su aplicación efectiva en situaciones específicas, como el accionamiento de bombas de pequeña escala.

Si la velocidad de sincronismo fuera 1800 rpm, el rotor de jaula de ardilla, con una cierta carga, podría girar a 1720 rpm. Cuanto más grande sea la carga en el motor, más grande será la diferencia de velocidad entre el estator y el rotor.

Una de las principales ventajas de todos los motores de *jaula de ardilla* es la ausencia de colector o de anillos colectores y escobillas.

Un motor monofásico se caracteriza por tener dos conjuntos de devanados en el estator: el primero es denominado devanado principal o devanado de trabajo, mientras que el segundo recibe el nombre de devanado auxiliar o de arranque. Ambos devanados se conectan en paralelo, lo que implica que el voltaje de línea se aplica simultáneamente a ambos cuando se energiza el motor. Este diseño permite un arranque eficiente y proporciona las condiciones necesarias para el funcionamiento adecuado del motor monofásico y optimiza su rendimiento y versatilidad en diversas aplicaciones.

Los dos devanados presentan diferencias tanto en su estructura física como en sus características eléctricas. El devanado de trabajo, compuesto por un conductor grueso y un mayor número de espiras en comparación con el devanado de arranque, generalmente se sitúa en la parte inferior de las ranuras del estator, mientras que el devanado de arranque se aloja típicamente en la parte superior.

Durante la fase de arranque, cuando la corriente circula por ambos devanados en el estator —los cuales están conectados en paralelo y desfasados eléctricamente en noventa grados—, se genera un campo magnético giratorio en el interior del motor. Este campo magnético induce una corriente en el devanado del rotor (*jaula de ardilla*), lo que provoca a su vez la formación de otro campo magnético. La combinación de estos campos magnéticos resulta en el movimiento rotativo del rotor, iniciando así el funcionamiento del motor de manera eficiente.

Para entender cómo se crea el campo magnético en el rotor de *jaula de ardilla* partimos de los principios del electromagnetismo:

1. Existe un campo magnético giratorio en el estator.
2. Las barras de la jaula de ardilla cortan estas líneas de flujo magnético.
3. Se induce una *f.e.m.* en estas barras y, por cuanto el circuito está cerrado, circulará una corriente eléctrica.
4. Al circular una corriente eléctrica, se creará un campo magnético alrededor de estas barras. Este campo se opone o se atrae al campo del estator que es el que lo creó.

El bobinado de arranque es necesario para que interactúe con el bobinado de trabajo y se produzca el par de arranque para vencer la inercia y que el rotor comience a girar. Una vez que el motor está en marcha, ya no se precisa el arrollamiento de arranque y por ello se desconecta automáticamente de la red por medio del interruptor centrífugo. Para invertir el sentido de giro, se deben invertir las conexiones del bobinado de arranque o de trabajo.

Interruptor centrífugo

Su función principal consiste en desconectar el arrollamiento de arranque una vez que el rotor ha alcanzado la velocidad previamente establecida.

El funcionamiento de un interruptor centrífugo puede explicarse del modo siguiente: cuando el motor se halla en reposo, están cerrados los dos contactos de la parte fija del interruptor centrífugo debido a la presión que la parte móvil ejerce sobre ellos. Al alcanzar, aproximadamente los tres cuartos de la velocidad de régimen, la parte giratoria deja de presionar sobre los citados contactos, quedando así automáticamente desconectado el arrollamiento de arranque de la red de alimentación.

Entre las ventajas de este motor se puede contar lo siguiente:

- Económico
- Apto para redes monofásicas entre 120-220 V

Entre las desventajas de este motor se puede contar lo siguiente:

- Experimenta un par de arranque más bajo cuando está sometido a carga.

- La corriente de arranque supera en mucho a la nominal, lo cual puede generar picos de carga en el sistema eléctrico y afectar la eficiencia en el arranque.
- La generación de calor en los devanados es más pronunciada.
- Existe la posibilidad de que el devanado auxiliar sea propenso a sobrecalentarse, lo que puede derivar en daños y afectar la durabilidad del motor.
- Nivel de ruido elevado.
- Vibración muy pronunciada.

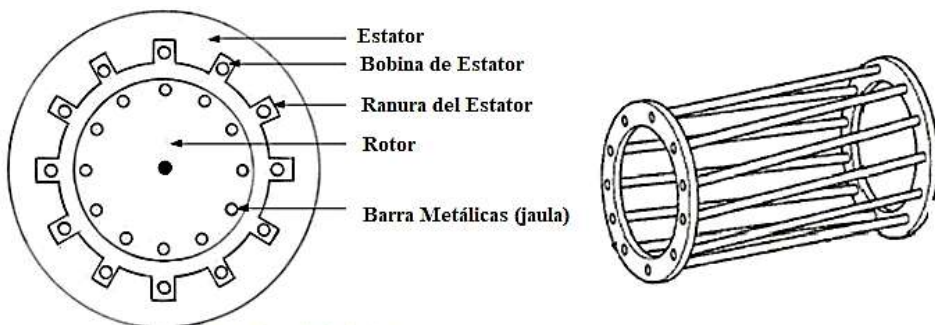
Rotor

El rotor (fig. 1.10) consta de tres elementos esenciales. El primero es un paquete de láminas o chapas de hierro, de calidad especial, que constituye el núcleo (circuito magnético). El segundo elemento es el eje sobre el que va dispuesto el núcleo a presión. El tercer elemento es el devanado en cortocircuito, llamado «jaula de ardilla» (circuito eléctrico), que consiste en unas barras de cobre o aluminio, dispuestas en ranuras practicadas en el núcleo de chapas y puestas en cortocircuito mediante dos aros, uno a cada extremo del núcleo. En ciertos tipos de motores, el rotor lleva un arrollamiento de una pieza de aluminio fundido (ver anexos 4, 5 y 6).

En los motores monofásicos, generalmente no se utilizan rotores bobinados porque son para baja potencia.

Los rotores bobinados se utilizan en los motores trifásicos.

Figura 1.10.
Devanado del rotor de jaula de ardilla



Fuente: Apuntes de máquinas eléctricas, 2024

Nota: la figura es utilizada con fines académicos

El estator de un motor de fase hendida (partida) se compone de un núcleo de chapas con ranuras semicerradas; una armadura de fundición o carcasa donde van montadas las chapas a presión; y dos arrollamientos de conductor de cobre aislado, dispuestos en las ranuras, llamados de régimen y de arranque.

Estos arrollamientos consisten en un devanado de cable de cobre aislado que, por regla general, va dispuesto en el fondo de las ranuras del estator, conocido con el nombre de arrollamiento de régimen, trabajo o principal, y otro, formado también por conductor de cobre aislado que, por lo general, va dispuesto por encima del de régimen, llamado arrollamiento de arranque o auxiliar. Ambos arrollamientos van conectados en paralelo.

Las pérdidas en estos motores se producen en las resistencias de los devanados, la ventilación, la fricción de los rodamientos. La instalación de un ventilador en el eje del motor no disminuye las pérdidas; solo ayuda a disipar el calor generado por las mismas.

Las pérdidas son indeseables porque disipan potencia y el calor causa la ruptura.

La corriente de arranque es mayor en aproximadamente siete veces que la corriente nominal de plena carga. Tanto el devanado principal como el auxiliar deben tener el mismo número de polos. No puede arrancar un motor monofásico de inducción si solo se excita el devanado de operación (principal). Para que se produzca el arranque, es necesario darle un giro en forma manual. Es así como se construían los motores antes del invento del devanado de arranque.

La velocidad no depende tanto por el voltaje, sino por la frecuencia y del número de polos.

Inversión del sentido de giro de un motor de fase hendida

El procedimiento es muy sencillo, pues basta con permutar los terminales del arrollamiento de régimen o los del de arranque, pero nunca se debe cambiar los dos a la vez, ya que equivale a no hacer nada.

Muchos motores de fase partida llevan, en lugar de terminales sueltos, una placa de bornes montada en uno de los escudos.

1.10.2. Averías en los motores de fase partida

El motor no se pone en marcha

Causas probables:

- a) Una interrupción en uno de los bobinados
- b) Contacto a masa
- c) Cortocircuitos entre espiras
- d) Protecciones en los contactos, abiertos
- h) Sobrecarga
- i) Cojinetes dañados
- j) Eje del rotor curvado

El motor gira a baja velocidad

Causas probables:

1. No se ha desconectado el bobinado de arranque
2. Inversiones de polaridad en el arrollamiento de trabajo
3. Otras conexiones estatóricas erróneas
4. Cojinetes desgastados
5. Barras retóricas desprendidas de los anillos

El motor se calienta en exceso

Causas probables:

1. Espiras en corto
2. Bobinado con contactos a masa
3. Cojinetes desgastados

El motor funciona ruidosamente

Causas probables:

1. Cortocircuitos internos
2. Conexiones erróneas
3. Exceso de holgura axial
4. Presencia de contaminantes o cuerpos extraños en el interior del motor

1.10.3. Motores con condensador

Los motores equipados con condensador operan mediante corriente alterna monofásica, se construyen para potencias entre 1/50 y 15 caballos. Su uso se ha generalizado de manera extensa en la operación de refrigeradoras, bombas, compresores, lavadoras, acondicionadores de aire, etc.

Figura 1.11.
Motor con condensador



Fuente: DirectIndustry, 2023

Nota: la imagen es utilizada con fines académicos

Este motor comparte similitudes constructivas con el motor de fase partida; de hecho, su única diferencia radica en la presencia de un elemento adicional conocido como condensador, el cual está conectado en serie con el bobinado auxiliar o de arranque. Por lo general, el condensador se ubica sobre el motor, como se ilustra en la figura 1.11, aunque también puede situarse dentro de la carcasa de este.

Condensador. - Consta de dos láminas, de cobre o de aluminio separadas por una o varias láminas dieléctricas (aislantes).

Los condensadores tienen la propiedad esencial de almacenar energía eléctrica, cuya magnitud varía según su capacidad.

Las normas NEMA definen a este motor como:

Motor monofásico equipado con un bobinado principal diseñado para conectarse directamente a una fuente de alimentación, junto con un bobinado auxiliar conectado en serie a través de un condensador.

Existen tres tipos:

- Motor con condensador de arranque
- Motor con condensador permanente
- Motor con doble condensador

1.10.4. Motores de arranque con condensador

La construcción de estos motores es la misma que la de los motores de fase hendida. Lo único que los diferencia es la presencia del condensador.

Comparando a estos dos motores, el motor equipado con condensador exhibe un mayor par de arranque y requiere una corriente de arranque más reducida.

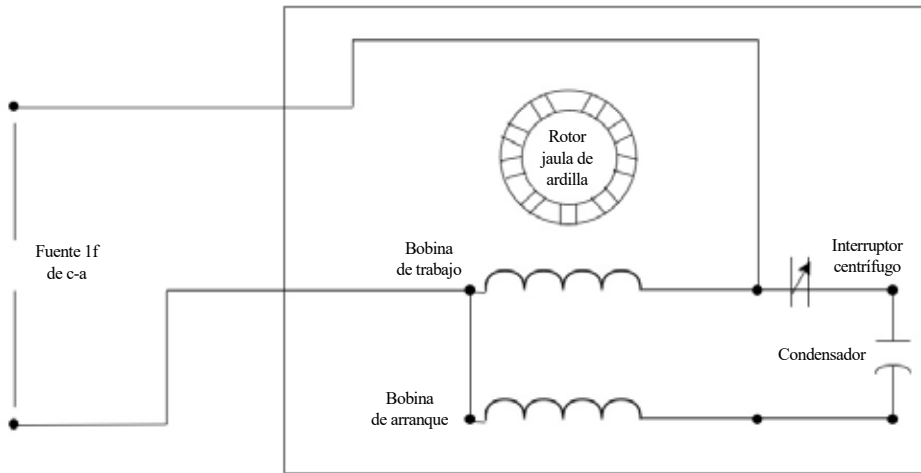
Explicación:

- El par es mayor por cuanto los vectores que proyectan las bobinas de arranque y de trabajo están desfasadas a un ángulo cercano a los 90° , porque el par es la multiplicación vectorial. Su valor depende de los valores absolutos de los dos vectores por el seno del ángulo que los forman siendo el valor más alto del seno cuando su ángulo vale 90° .
- La corriente de arranque es proporcional al f.p. ($\cos(\varphi)$). Un condensador mejora el factor de potencia (corrección del factor de potencia); por lo tanto, la intensidad disminuye en la misma proporción del mejoramiento de este.

Estos motores por lo general utilizan condensadores que prestan únicamente un servicio de corta duración.

El condensador actúa, en esencia, como un almacén de energía eléctrica. Todos los condensadores, cualquiera que sea su clase, poseen mayor o menor capacidad de almacenaje de energía eléctrica. Eléctricamente todos los condensadores son similares, diferenciándose únicamente por su construcción física.

Figura 1.12.
Conexión del motor de arranque por capacitor



Fuente: Wildi y DeVito, 1975

Condensadores electrolíticos

En muchos motores, se emplea el condensador electrolítico. Este tipo de condensador consiste en dos láminas de aluminio separadas por una o más capas de gases impregnadas con una solución química llamada electrolito, que forma una película y constituye el dieléctrico del condensador. El paquete de hojas va arrollado e introducido en un recipiente de aluminio. Los condensadores electrolíticos que se utilizan para el arranque de motores no deben quedar conectados más que pocos segundos cada vez que arranca, ya que solo están previstos para funcionamiento intermitente.

Capacidad

La capacidad de un condensador se mide en microfaradios (abreviado μF). La capacidad depende del tamaño y tipo.

Un faradio F de capacidad es una cantidad muy grande. Por ejemplo, la capacidad que tienen dos nubes o una gran nube con la tierra. Por esa razón se toma como unidad de medida la millonésima parte.

Entre las ventajas de este motor se puede mencionar lo siguiente:

- Se puede obtener un desfase cercano a los 90°
- Un gran par de arranque
- Bajo factor de potencia en el arranque

Entre las desventajas de este motor se puede mencionar lo siguiente:

- Vibraciones un poco altas
- Costo más elevado

Los motores con condensador de arranque suelen ir muchas veces equipados con un *breaker*, que tiene por objeto protegerlos contra sobrecargas, calentamientos excesivos, cortocircuitos, etc. Este aparato, también conocido con el nombre de «guardamotor», consiste esencialmente en un elemento bimetálico conectado en serie a la red y que, por lo general, va montado sobre el mismo motor, se compone de dos láminas metálicas, de distinto coeficiente de dilatación, fuertemente soldadas, que al calentarse se dilatan desigualmente, lo que hace que la pieza en conjunto se doble.

Al circular una corriente excesiva por el motor, el elemento bimetálico se calienta y, al doblarse, lo desconecta de la red. En algunos tipos de guardamotors, los contactos vuelven a cerrarse automáticamente cuando el elemento bimetálico se ha enfriado. En otros, por el contrario, hay que pulsar un botón para remontar el mecanismo y dejarlo listo para la próxima maniobra. Existen también otros tipos de *guardamotors* en los que el elemento bimetálico se caldea indirectamente mediante una resistencia envolvente conectada en serie con la red. Al circular una corriente excesiva por dicha resistencia, esta se pone rápidamente incandescente y calienta el elemento bimetálico que, al doblarse, interrumpe el circuito.

1.10.5. Motor de operación continua por capacitor

En este tipo de motores, el condensador y el arrollamiento de arranque se hallan conectados permanentemente en el circuito.

El condensador suele ser del tipo impregnado con aceite (estos prestan un servicio permanente y se los construye con capacidades comprendidas entre 2 y 50 microfaradios).

No hace falta ningún interruptor centrífugo u otro mecanismo de desconexión cualquiera.

Uno de los problemas fundamentales de los motores monofásicos es el excesivo ruido y las vibraciones, además de que resulta un tanto caro y con un cierto grado de dificultad en la instalación de un interruptor centrífugo. Por lo tanto, se tiene una alternativa; el funcionamiento de dos bobinas en forma continua. Si bien es cierto que la bobina de arranque ya no actúa después de haber cumplido con su función y sigue conectada en forma parásita al motor, nos evita el interruptor centrífugo y disminuye las vibraciones y el excesivo ruido.

El capacitor sirve para variar la fase de la corriente de uno de los devanados, de modo que la corriente en un devanado esté desfasada 90 grados con respecto a la corriente en el otro devanado, gracias a lo cual el motor de operación continua por capacitor funciona realmente como un aparato bifásico con carga nominal.

Cuando el motor funciona en vacío, es siempre más ruidoso que a plena carga, debido a que solo entonces opera como verdadero motor bifásico. Si se escoge el valor adecuado de capacitancia, las corrientes que pasan por cada uno de los dos devanados iguales del estator, a plena carga, serán tales que el factor de potencia del motor se acerque al 100 %. Sin embargo, su par de arranque es bajo y, por lo tanto, el motor de operación continua por capacitor no es el adecuado para condiciones difíciles de arranque.

El motor de funcionamiento capacitivo tiene un mayor factor de potencia, y menor par de arranque. Es más eficiente y funciona de manera más suave a plena carga que los otros.

Se deben usar capacitores en aceite en motores de operación continua por capacitor, por cuanto los electrolíticos tienen alto factor de desperdicio y son poco confiables para trabajo continuo en aplicaciones de alta corriente. Mientras que los en aceite son mucho más confiables y tienen menores pérdidas.

Este tipo de motores se utiliza generalmente cuando su uso es de corta duración, por esta razón, no tiene sentido desconectar la bobina de arranque con un dispositivo conocido como el interruptor centrífugo.

1.10.6. Motor con doble condensador

Este tipo de motores arrancan con una elevada capacidad, ya que están conectados en serie con el bobinado de arranque, lo cual se traduce en un par inicial muy grande indispensable en determinadas aplicaciones. Una vez alcanzada cierta velocidad, el interruptor centrífugo conmuta esta elevada capacidad por otra de capacidad menor.

Reparación de averías en motores con condensador

1.- El motor presenta dificultades al arrancar

Causas probables:

- Condensador dañado.
- El desgaste de los cojinetes puede causar fricción
- Presencia de cortocircuitos en los bobinados
- Conexiones incorrectas

2.- Los fusibles se activan al conectar el motor a la red

Causas probables:

- Cortocircuitos
- No hay continuidad
- Contacto directo a masa
- Sobrecarga

3.- El motor emite un zumbido, pero no arranca

Causas probables:

- Falla en el condensador
- Falta de continuidad
- Sobrecarga

4.- El motor emite humo al girar

Causas probables:

- Cortocircuitos en los arrollamientos
- El interruptor centrífugo no cumple su función de abrir el circuito de arranque
- Cojinetes en mal estado
- Carga excesiva

1.11. OPERACIÓN O TRABAJO DE LOS MOTORES MONOFÁSICOS

Por los efectos de las variaciones de voltaje, tenemos los límites máximos de variación que son un 5 % por debajo y hasta un 10 % por encima del valor nominal.

El par de arranque del motor se incrementa en forma proporcional al cuadrado del aumento de voltaje.

El factor de potencia disminuye un poco debido a la mayor corriente magnetizante.

La eficiencia tiende a ser ligeramente más elevada.

La elevación de temperatura a plena carga tenderá a ser menor.

En lo que respecta a la frecuencia, tenemos que la velocidad del motor es directamente proporcional a esta. Por lo tanto, cualquier variación suya influye en la velocidad del motor y también en la eficiencia, lo que hace indispensable que la frecuencia sea lo más cercana al valor nominal, en nuestro caso, los 60 Hz.

1.12. PRUEBAS EN MOTORES MONOFÁSICOS

Si el motor no arranca y emite un zumbido, puede ser porque está desconectada la bobina auxiliar o de arranque. Si se hace la revisión y la conexión existe, entonces es el capacitor que está en circuito abierto. Para comprobarlo, se puede cortocircuitar el capacitor. Si el motor arranca, se debe quitar el cortocircuito inmediatamente o, para no cortocircuitar el capacitor, se puede arrancar el motor

dando un impulso manual. Si el motor arranca es porque el bobinado de arranque está abierto; en este caso, se procede a cambiar el capacitor.

Si el motor no arranca con fuerza, puede que el capacitor esté cortocircuitado. En este caso, se mide con el óhmetro para ver si marca cero.

1.12.1. Detección, localización y reparación de averías

de los motores monofásicos en forma general

1.-El motor no arranca al accionar el interruptor

- Fusible quemado
- Cojinetes desgastados
- Escobillas atascadas en los portaescobillas
- Escobillas desgastadas
- Bobinados interrumpidos
- Posición incorrecta de los portaescobillas
- Cortocircuitos
- Colector sucio
- Conexiones erradas
- Inducido puesto en cortocircuito por el collar

2. El motor no arranca correctamente

- Cojinetes desgastados
- Suciedad en el collar o en colector
- Falta de presión de las escobillas con el colector
- Montaje incorrecto del mecanismo centrífugo
- Posición errónea de los portaescobillas
- Bordes desgastados en los portaescobillas

- Cortocircuitos

3.- Calentamiento excesivo del motor

- Motor alimentado a un voltaje superior
- Cortocircuitos
- Excesiva sobrecarga
- Cojinetes dañados

4.- El motor no consigue alcanzar su velocidad de régimen

- Insuficiente contacto de las escobillas y el colector
- Cortocircuitos
- Cojinetes viejos

5.- Se observan chispazos en el interior del motor

- Acumulación de suciedad en el colector
- El aislamiento entre delgas es superior

1.12.2. Cálculo del condensador

En ciertas circunstancias, suele quemarse el capacitor y no se tiene las características técnicas del mismo, vamos a explicar una forma práctica para calcular la capacidad del condensador.

La capacidad del condensador depende de:

1. De la tensión
2. De la frecuencia
3. Del par de arranque que se quiere obtener

$$C = \frac{P_c}{2\pi f(a \times U)^2}$$

La capacidad se la puede obtener mediante la fórmula:

Para tener μf se multiplica por 10^6

«a» es el coeficiente que depende de la tensión de alimentación y es igual a:

V	125V	220V
a	1,4	1,8

El producto representa la tensión a los bornes del condensador. Experimentalmente se ha llegado a construir la siguiente tabla de la potencia del condensador por cada HP del motor en función del par de arranque (M) que se quiere obtener.

M de arranque en % de M normal	40 %	70 %	100 %	180 %	200-250 %
Potencia del condensador por cada HP de P del motor en VA	600	1000	1400	1800	2500

1.13. MOTORES UNIVERSALES

Los motores universales (fig. 1.13) son un tipo de motor eléctrico que se utiliza en una amplia variedad de aplicaciones, desde herramientas eléctricas hasta electrodomésticos y equipos de ventilación. La principal característica de los motores universales es que pueden funcionar con corriente alterna (CA) o corriente continua (CC), lo que los hace muy versátiles y útiles en una amplia gama de situaciones.

Estos motores tienen un diseño simple y compacto, y están compuestos por un rotor que gira dentro de un estator. El estator contiene una serie de bobinas de alambre, mientras que el rotor está compuesto por un núcleo de hierro laminado con ranuras para alojar los devanados. Las escobillas y el conmutador permiten que la corriente eléctrica fluya al rotor y se convierta en movimiento mecánico.

Los motores universales son conocidos por su alta velocidad y su capacidad para producir un alto par de arranque, lo que los hace adecuados para aplicaciones en las que se requiere una alta velocidad y un alto par, como en herramientas eléctricas y electrodomésticos. También son relativamente económicos y fáciles de mantener, lo que los convierte en una opción popular para una amplia variedad de aplicaciones.

Los motores universales, comúnmente con una potencia igual o inferior a un caballo de fuerza, encuentran aplicaciones destacadas en diversas áreas. Su versatilidad los convierte en componentes esenciales para el funcionamiento de una variedad de dispositivos y herramientas. Entre sus principales aplicaciones se incluyen el accionamiento de aspiradoras, electrodomésticos como licuadoras y batidoras, herramientas manuales como taladros, amoladoras y sierras, así como máquinas de coser.

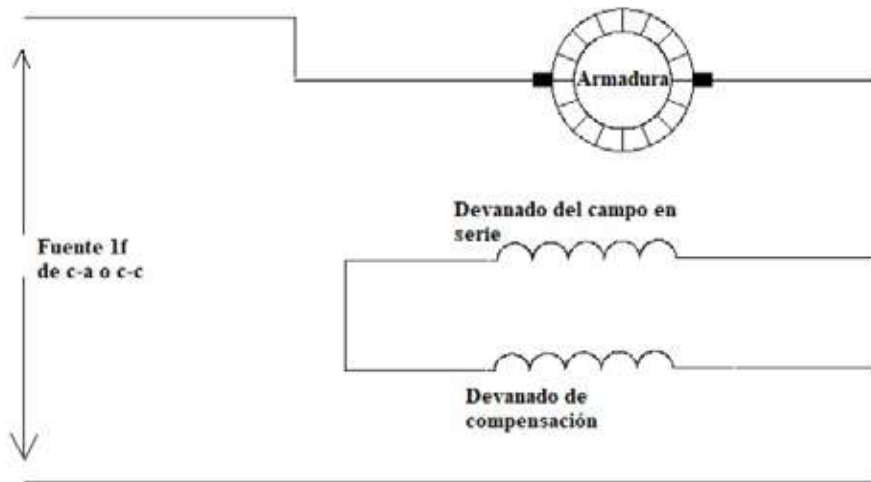


Figura 1.13.

Conexión del motor universal con el devanado de compensación en serie

Fuente: Wildi y De Vito, 1975

Estos motores, debido a su diseño compacto y eficiente, son fundamentales en entornos domésticos e industriales. Su capacidad para proporcionar potencia y rendimiento adecuados en dispositivos cotidianos los hace una elección común en la fabricación de productos que requieren un motor de tamaño moderado. Además, su adaptabilidad y facilidad de integración en una variedad de aplicaciones los convierten en una opción confiable para una amplia gama de equipos, contribuyendo significativamente a la eficiencia y funcionalidad de numerosos dispositivos.

Un motor universal es prácticamente un motor de corriente continua en serie, al mismo que hay que explotarle por su elevado par de arranque y características de velocidad variable, pero muchas veces descontrolada, ya que, en vacío, alcanzan una velocidad descontrolada (fenómeno conocido como «embalamiento»), para mitigar este riesgo inherente, los motores universales se integran directamente con el mecanismo o aparato que accionan (la velocidad del rotor varía en

sentido inverso de la carga).

Partimos del principio de que una máquina de corriente continua se puede conectar a la corriente alterna, pero una máquina de corriente alterna nunca se puede conectar en corriente continua a su valor nominal; por lo tanto, el motor serie de corriente continua sí funciona en corriente alterna, pero con un bajo rendimiento. Para aumentar el rendimiento, se acopla el devanado de compensación.

En general, los motores universales pequeños no requieren devanados compensadores debido a que el número de espiras de su armadura es reducido. Por lo tanto, también lo será su reactancia de armadura. Como resultado, los motores inferiores a 3/8 de caballo de fuerza generalmente se construyen sin compensación. El costo de los motores universales no compensados es relativamente bajo por lo que su aplicación es muy común en aparatos domésticos ligeros, por ejemplo: aspiradoras, taladros de mano, licuadoras, etc. Algunos fabricantes utilizan un motor de corriente continua y directamente le aplican corriente alterna, esto lo realizan en motores pequeños para abaratar costos. En general el motor universal es sin duda el más utilizado en la industria del electrodoméstico.

Para que un motor de este tipo pueda funcionar con alterna, es necesario que el núcleo del estator sea de también laminado para evitar las corrientes de Foucault.

Los motores universales funcionan generalmente en altas velocidades, de 3500 a 20 000 r.p.m. Esto da lugar a un alto rendimiento de la energía de acuerdo con su tamaño y peso haciéndolo deseables para las máquinas herramientas. Un motor universal tiene altas velocidades usando diversas corrientes de una fuente de energía.

En la actualidad, la construcción de motores universales abarca una variedad de diseños, cada uno adaptado para satisfacer necesidades específicas. Uno de los más reconocidos es estructuralmente similar al motor serie bipolar, caracterizado por la presencia de dos polos concéntricos. Además, existe otra categoría que incorpora un arrollamiento de campo distribuido en múltiples ranuras, siguiendo la línea del diseño del motor de fase hendida

Estos motores, en su mayoría, son fabricados con una potencia que oscila entre 1/20 y 1/3 de caballo de fuerza (HP), lo que los hace idóneos para una amplia gama de aplicaciones. No obstante, existen variantes de mayor potencia diseñadas para satisfacer requisitos específicos en ciertos contextos y aplicaciones.

Entre sus partes principales están: el estator y el rotor.

El estator o inductor: consiste en un paquete de chapas (láminas de acero), fuertemente prensado y fijado mediante pernos o remaches.

Genera un campo magnético constante, denominado excitación. En el caso de motores de menor tamaño, esta excitación se logra mediante el uso de imanes permanentes. La evolución tecnológica ha llevado al desarrollo de imanes con una potencia creciente, lo que ha propiciado la llegada al mercado de motores con excitación permanente, caracterizados por su eficiencia y rendimiento mejorado. Este avance refleja la constante búsqueda de soluciones más innovadoras y poderosas en el diseño de motores, marcando así un hito en la disponibilidad y aplicabilidad de motores con características de excitación permanente.

El rotor, también conocido como inducido o armadura, presenta similitudes con el de un motor de corriente continua. Este componente esencial del motor está compuesto por un conjunto de chapas dispuestas en un núcleo compacto con ranuras, las cuales pueden ser tanto normales como oblicuas. Un colector, al que se conectan los terminales del arrollamiento, denominados delgas (ver motores de corriente continua), forma parte integral del rotor. Tanto el núcleo de chapas como el colector se encuentran firmemente unidos al eje, configurando así la armadura del motor.

La armadura o rotor, incorpora un bobinado que desencadena la creación del campo magnético esencial. Este campo magnético, combinado con el campo magnético generado por el estator, da origen al par de fuerzas necesario para poner en movimiento el motor, induciendo su rotación.

Escobillas: generalmente son de grafito que hacen contacto con las delgas, su nombre se debe a que los primeros motores llevaban en su lugar unos paquetes hechos con alambres de cobre dispuestos de manera que, al girar el rotor, «barrían», como pequeñas escobas, la superficie sobre la que tenían que hacer contacto.

Delgas: son barras de cobre que sirven para conectar las bobinas del rotor. Están aisladas por micas.

Conmutador: es el conjunto de escobillas y delgas.

Nos sirve para que exista una conexión eléctrica desde una parte fija a una móvil, además, cuando se utiliza corriente continua, transforma la corriente continua a alterna ya que, en el rotor, tiene que haber corriente alterna para que fun-

cionen los motores universales y de corriente continua.

El principio de funcionamiento: Consiste en lo siguiente:

Cuando, por los devanados en serie del inducido (armadura) y del inductor (del campo), circula la corriente, aparecen flujos magnéticos, la reacción de estos, estimulan el giro del rotor, tanto si la corriente aplicada es continua como alterna. Para reducir las pérdidas en corriente alterna, se coloca un bobinado de compensación. Este puede conectarse en serie de tal manera que se oponga al flujo del campo o pueda independientemente cortocircuitarse. En el primer caso, es una compensación conductiva; en el segundo, es una compensación inductiva (el más común).

La inversión de marcha en un motor universal de polos concentrados se logra mediante la inversión del sentido de la corriente en la armadura o en las bobinas inductoras. Este cambio en la dirección de la corriente permite alterar la polaridad magnética y, por ende, invertir el sentido de giro del motor. El método más empleado consiste en permutar los terminales de los portaescobillas. La mayoría de los motores universales están diseñados para operar en un solo sentido de giro, y comúnmente los portaescobillas son fijos. En estos motores, es posible invertir la dirección de marcha mediante el método previamente mencionado. Sin embargo, este proceso puede generar una considerable producción de chispas, ya que las escobillas quedan fuera de la línea neutra durante la inversión. Para mitigar el problema de las chispas y garantizar un funcionamiento más eficiente, es necesario llevar a cabo un nuevo calibrado de las escobillas. Este ajuste se realiza con el objetivo de posicionar las escobillas en su punto neutro, minimizando así la generación de chispas y optimizando el rendimiento del motor en ambas direcciones de giro.

Al mejorar el calibrado de las escobillas, se logra una distribución más equitativa de la corriente en la armadura, reduciendo las chispas y mejorando la eficiencia general del motor. Este proceso puede requerir ajustes precisos y cuidadosos para asegurar que las escobillas estén correctamente alineadas con la línea neutra, evitando así desgastes desiguales y prolongando la vida útil del motor.

Entre las ventajas de este motor, se puede mencionar lo siguiente:

- La versatilidad de operar tanto con corriente alterna como con corriente continua.

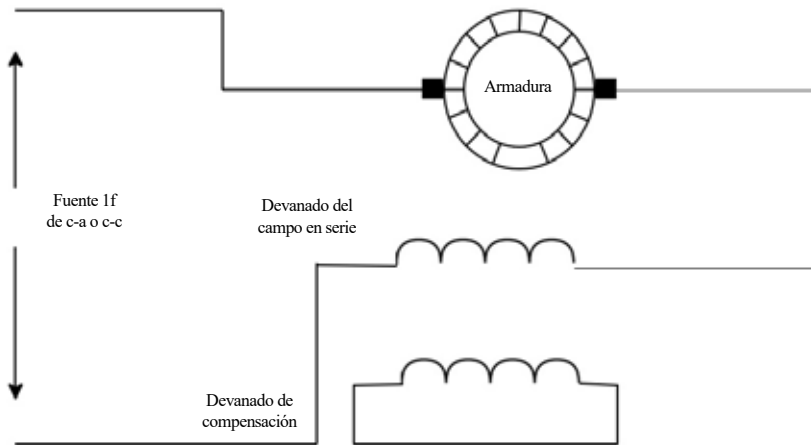
- Elevada velocidad de operación.
- Significativa capacidad de potencia.
- Compactas dimensiones.
- Ampliamente empleado en electrodomésticos y herramientas portátiles, destacándose por su presencia significativa en diversos dispositivos de uso cotidiano y maquinaria portátil.
- Pueden ser diseñados para adaptarse a cualquier velocidad de giro, lo que facilita la obtención de elevadas velocidades, una característica que distingue a estos motores de los de corriente alterna que brinda una versatilidad única en la consecución de altas velocidades.
- Exhiben un par de arranque excepcionalmente alto.
- La velocidad se ajusta automáticamente en respuesta a la carga.
- Para modular la velocidad de rotación, basta con conectar un reóstato en serie con el inducido, lo que simplifica el control y permite una adaptación precisa a las necesidades operativas.
- Su diseño compacto y la capacidad de proporcionar más par por amperio en comparación con otros motores monofásicos los convierten en la elección preferida en aplicaciones que demandan un peso ligero y un rendimiento de alto par.

Entre las desventajas de este motor, se puede mencionar lo siguiente:

- Suelen tener un costo más elevado.
- Un motor universal no compensado experimenta una pérdida significativa de potencia cuando trabaja con corriente alterna. Simultáneamente, aumenta la generación de chispas en las escobillas.
- El par de arranque en corriente alterna tiende a ser menor que en corriente directa.
- Contienen componentes delicados que requieren una revisión periódica, incluyendo la verificación del desgaste de las escobillas y el envejecimiento de los muelles que las presionan contra las delgas del colector.

- El contacto deslizante entre el colector y las escobillas puede generar chispas, interfiriendo potencialmente con receptores de radio y televisión cercanos al motor.
- Debido a su elevada velocidad de rotación, estos motores tienden a ser ruidosos.
- La reparación del inducido puede ser complicada, siendo en muchos casos más ventajoso optar por su sustitución por uno nuevo.
- Exhiben una característica de velocidad descendente pronunciada, similar a la de un motor de serie, lo que los hace menos idóneos para aplicaciones que requieren una velocidad constante.

Figura 1.14.



Conexión del motor universal con el devanado de compensación en cortocircuito
Fuente: Wildi y De Vito, 1975

El motor universal, cuando opera en corriente directa, tiene mayor eficiencia. La potencia entregada es mayor, la velocidad es mayor y la corriente de entrada es menor.

En compensación inductiva, el devanado de compensación está en cortocircuito (fig. 1.14) y las corrientes inducidas en él desde la armadura cancelan el efecto de las corrientes de la misma. La compensación conductiva se logra conectando en serie el devanado de compensación con la armadura del motor, lo que resulta en la cancelación de los efectos magnetizantes. Aunque el motor de

compensación conductiva es eficaz en corriente alterna, el devanado de compensación es ineficaz en corriente directa, lo que provoca una alta corriente y una conmutación deficiente, lo que se evidencia en un excesivo chisporroteo en las escobillas. En corriente directa, no es necesario el devanado de compensación.

El devanado de compensación es necesario para reducir o cancelar los efectos reactivos del devanado de armadura. La reactancia inductiva X_L , aparece solamente en corriente alterna recordando la fórmula $X_L = 2\pi fL$, es decir depende de la frecuencia, siendo la impedancia $Z = R + X_L$. En corriente continua solamente existe la R que es la causante de las pérdidas según $dW = I^2 R t$ (Ley de Joule); son pérdidas en la potencia activa. En corriente alterna tenemos $dQ = I^2 X_L t$, pérdidas en la potencia reactiva (ver Libro de Electricidad). Estas pérdidas adicionales son las causantes de que el motor universal trabaje mejor en corriente continua.

La reactancia inductiva es directamente proporcional a la frecuencia. Por lo tanto, entre menor sea la frecuencia menor es la reactancia que se opone a la circulación de corriente. La eficiencia y la potencia de salida aumentarían y la conmutación mejoraría a 25 Hz.

Averías en los motores universales

1. En presencia de chispas abundantes durante el funcionamiento, las posibles causas incluyen:
 - a) Conexiones incorrectas de los terminales de bobinas a delgas no correspondientes
 - b) Polos inductores en cortocircuitos
 - c) Interrupciones en las bobinas del inducido
 - d) Cortocircuitos en las bobinas del inducido
 - e) Inversión de terminales de bobinas
 - f) Desgaste en los cojinetes
 - g) Proyección de láminas de mica

- h) Inversión del sentido de rotación
2. Si el motor experimenta un calentamiento excesivo, las posibles causas son:
- a) Desgaste en los cojinetes
 - b) Falta de lubricación en los cojinetes
 - c) Cortocircuitos en las bobinas
 - d) Sobrecarga
 - e) Cortocircuitos en los arrollamientos inductores
 - f) Posicionamiento incorrecto de las escobillas
3. En caso de que el motor emita humo, las causas pueden ser:
- a) Cortocircuitos en el inducido
 - b) Cortocircuitos en los arrollamientos inductores
 - c) Desgaste en los cojinetes
 - d) Tensión inadecuada
 - e) Sobrecarga
4. Si el par motor es débil, las posibles causas incluyen:
- a) Cortocircuitos en las bobinas
 - b) Cortocircuitos en los arrollamientos inductores
 - c) Colocación incorrecta de las escobillas
 - d) Desgaste en los cojinetes

CAPÍTULO II

TRANSFORMADORES

2.1 INTRODUCCIÓN

Se tiene que considerar el papel importante que juegan los transformadores dentro del sistema energético del país. Son el enlace que existe entre la generación y el consumo de la energía eléctrica.

Las centrales eléctricas se encuentran en lugares donde sea posible su construcción, es decir, donde existan condiciones naturales para producir energía. Entre estas, las más aconsejables en nuestro país son:

La energía hidráulica, que se genera aprovechando la fuerza del agua en movimiento, ya sea mediante represas, cascadas o corrientes fluviales. Al almacenar agua en represas y luego liberarla, se convierte la energía potencial en energía cinética, que se utiliza para hacer girar turbinas y generar electricidad.

Se considera energía renovable, por cuanto el agua se renueva y no emite productos contaminantes. Otros consideran que produce un gran impacto ambiental debido a la construcción de las presas, que inundan grandes superficies de terreno y modifican el caudal del río y la calidad del agua.

La energía eólica es la energía del viento, es decir, es el aprovechamiento de la energía cinética como consecuencia del movimiento de las masas de aire que se producen por los cambios de temperatura.

El término «eólico» viene de «perteneciente o relativo a Eolo», dios de los vientos en la mitología griega.

La construcción de estos sistemas se tiene que hacer en lugares donde el viento sea constante en una gran parte del año; no tiene que ser ni muy fuerte ni muy débil. Además, se tiene que hacer un análisis técnico económico para su instalación.

Energía geotérmica. Esta se obtiene mediante el aprovechamiento del calor del interior de la Tierra, los volcanes, donde se producen procesos de interacción de agua subterránea con el calor, dando origen a los sistemas geotérmicos.

El término «geotérmico» viene del griego *geo* («Tierra») y *thermos* («calor»); literalmente «calor de la Tierra».

Todas estas fuentes de energía se encuentran lejos de los centros de consumo. Por esta razón se necesita transportar esta energía, desde su generación al consumo, con la menor cantidad de pérdidas y esto se realiza por medio de los transformadores.

Los principales parámetros de la calidad de la energía eléctrica son la frecuencia y el voltaje constantes. La frecuencia depende prácticamente de las centrales eléctricas (velocidad de la turbina), pero el voltaje va a depender de las caídas de tensión, es decir, de las distancias y del consumo. A mayor consumo, mayor caída de tensión (en los cables o en el interior de los generadores) y viceversa.

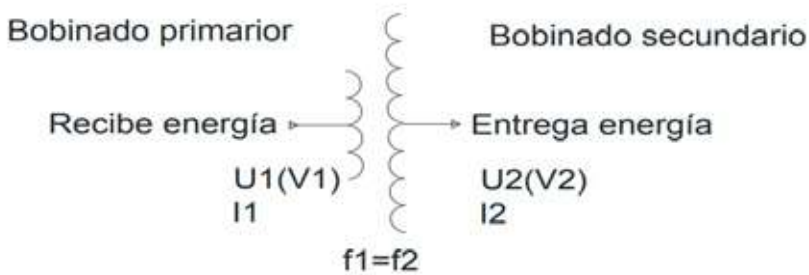
Durante el día, el consumo varía. Existen las horas pico, alrededor de las 19:00 y las horas valle, alrededor de las 06:15.

Las distancias provocan la caída de tensión y las pérdidas de energía. Para solucionarlo, se tiene que aumentar el voltaje en los transformadores y, por ende, bajará la intensidad. Todo esto se verá más adelante.

Se denomina transformador a un aparato electromagnético estático destinado para transformar un sistema primario, de corriente alterna, en otro, secundario, con la misma frecuencia, pero con otras características, en particular, tensión (U) (voltaje) y corrientes distintas (fig. 2.1). Se denomina bobinado primario al que recibe energía de la red y secundario al que la entrega para nuestro uso.

Por regla general el transformador consta del núcleo armado con chapas de acero para transformadores, y dos o varios devanados acoplados electromagnéticamente y, en el caso del autotransformador, se tiene un solo bobinado, por lo que el primario y el secundario están conectados también eléctricamente.

Figura 2.1
Transformador



El transformador que tiene dos devanados se denomina de doble devanado, el transformador con tres o varios devanados se denomina de tres devanados o de devanados múltiples. Según el número de fases, los transformadores se clasifican en: monofásicos, trifásicos y polifásicos. Se entiende por devanado del transformador polifásico el conjunto de todos los devanados de fase de igual tensión, conectados entre sí de un modo determinado. El devanado primario siempre será uno solo.

El devanado del transformador, al cual se aplica la energía de la corriente alterna (recibe energía) se denomina primario y el otro (otros), del cual se toma la energía para un uso explícito (entrega energía), se llama secundario. En concordancia con las denominaciones de los devanados, todas las magnitudes relacionadas con el devanado primario, por ejemplo: voltaje, potencia, corriente, resistencia, etc., se denominan también primarias y las relacionadas al devanado secundario, secundarias.

El devanado conectado a la red de tensión más alta se denomina devanado de alta tensión (AT); y el devanado acoplado a la red de tensión más baja se denomina devanado de baja tensión (BT). Si la tensión secundaria es más baja que la primaria, entonces el transformador se llama reductor, y si es más alta, elevador. Todo transformador es reversible; puede ser reductor o elevador dependiendo de cómo se conecte.

Se denomina transformador de tomas (TAP) (acápite 2.8) al transformador cuyos devanados tienen derivaciones especiales para variar la relación de transformación. Para evitar la influencia nociva del aire sobre el aislamiento de los devanados y mejorar las condiciones de refrigeración del transformador, su núcleo,

junto con los devanados instalados en él, se introduce en una cuba llena de aceite para transformadores. Estos se llaman transformadores en aceite.

Los que no están sumergidos en aceite se denominan transformadores secos y se utilizan dentro de las edificaciones o en lugares en que sea peligrosa la explosión del aceite.

Los transformadores que sirven para aislar eléctricamente los circuitos, es decir, se conectan magnéticamente, se denominan transformadores aislados a tierra TAT. Se usan en los hospitales, en quirófanos, UCI, etc. En estos, el voltaje y la intensidad del primario pueden ser iguales a las del secundario.

2.2 MAGNITUDES NOMINALES DE LOS TRANSFORMADORES

Las magnitudes nominales de los transformadores —potencia, tensión, corriente, frecuencia, etc.—, están marcados en la placa de características que debe estar situada en un lugar de libre acceso. El término «nominal» puede aplicarse también a las magnitudes que no figuran en la placa, pero que pertenecen al régimen nominal, así como el rendimiento nominal, las condiciones nominales de temperatura del medio refrigerante, la impedancia, etc.

Se denomina régimen nominal de servicio de un transformador al indicado en la placa de características del transformador.

Se denomina potencia nominal del transformador la potencia en los bornes del devanado secundario; es decir, la potencia que el transformador entrega. Está indicada en la placa de características y expresada en kilovoltamperios (kVA).

Se toma en VA (voltoamperios) y no en watios, porque la carga tiene componentes activos y reactivos.

La potencia del primario asimila las pérdidas internas del transformador, es decir, aquellas necesarias para que exista la transformación.

Se denomina tensión primaria nominal la tensión indicada en la placa de características técnicas. Si el devanado primario tiene derivaciones, su tensión nominal se indica especialmente.

Se denomina tensión secundaria nominal a la tensión en los bornes del secundario de un transformador en vacío. Cuando el secundario tiene derivaciones, su tensión nominal se marca especialmente.

Se denominan corrientes nominales del transformador (primaria y secundaria) a las corrientes indicadas en la placa de características y calculadas por los correspondientes valores de la potencia y las tensiones nominales. En este caso, teniendo en cuenta que el rendimiento del transformador es muy grande se considera que las potencias nominales de ambos devanados son iguales (pérdidas pequeñas comparadas con la potencia del transformador).

Sea, por ejemplo, la potencia nominal de un transformador trifásico:

$$S_n = 150 \text{ kVA}$$

Y las tensiones nominales primaria y secundaria:

$$U_{1n} = 7960 \text{ V y } U_{2n} = 120 \text{ V}$$

La potencia aparente del transformador es:

$$S_n = \sqrt{3} \times I_n \times U_n$$

La intensidad nominal primaria será:

$$I_{1n} = \frac{S_n}{\sqrt{3} \times U_{1n}}$$

$$I_{1n} = \frac{150000}{\sqrt{3} \times 7960} = 10.89 \text{ A}$$

La intensidad nominal secundaria será:

$$I_{2n} = \frac{150000}{\sqrt{3} \times 120} = 722.54 \text{ A}$$

2.3 TIPOS BÁSICOS DE TRANSFORMADORES

A continuación, daremos una exposición concisa de los transformadores más importantes que existen y cuál es la finalidad de cada uno.

El ingeniero de mantenimiento debe de distinguir los tipos de transformadores y cuáles son sus funciones.

- **Transformador de potencia:** se utilizan para subtransmisión y transmisión de energía eléctrica en alta y media tensión. Se aplican en subestaciones transformadoras, centrales de generación y en grandes usuarios. Se construyen en potencias normalizadas desde 1,25 MVA hasta 20 MVA, en tensiones desde 13,2 kV a 500 kV y frecuencia de 60 Hz, para nuestro país.
- **Transformador de distribución:** se denominan transformadores de distribución generalmente a aquellos de potencias iguales o inferiores a 500 kVA y de tensiones iguales o inferiores a 22 000 V, tanto monofásicos como trifásicos. Aunque la mayoría de tales unidades están proyectadas para montaje sobre postes, algunos de los tamaños de potencia superiores se construyen para montaje en estaciones, cámaras de transformación o en plataformas. Las aplicaciones típicas son para alimentar a urbanizaciones, residencias, edificios o almacenes, talleres, y centros comerciales. En toda actividad que requiera la utilización intensiva de energía eléctrica, industrias, granjas, minería, explotaciones petroleras, bancos, hospitales, etc.

Se utilizan en intemperie o interior para distribución de energía eléctrica en media tensión. Se construyen en otras tensiones primarias según especificaciones particulares del cliente. La variación de tensión se realiza mediante un conmutador exterior de accionamiento sin carga (TAP). A continuación, se detallan algunos tipos de transformadores de distribución:

- *Transformadores secos encapsulados en resina epoxi*
Se utilizan en interior para distribución de energía eléctrica en media tensión, en lugares donde los espacios reducidos y los requerimientos de seguridad en caso de incendio imposibilitan la utilización de transformadores refrigerados en aceite. Se aplican en grandes hospitales en forma general.

Su principal característica es que son refrigerados en aire con aisla-

ción clase F, utilizándose resina epoxi como medio de protección de los arrollamientos, por lo que es innecesario cualquier mantenimiento posterior a la instalación.

En el caso concreto del Hospital Policlínico de Riobamba, se tiene un sistema de distribución a 480 V con tres subestaciones dentro del hospital con dos transformadores secos, uno del sistema normal y el otro de emergencia, los cuales transforman a un voltaje de 208 V a los distintos subtableros.

- *Transformadores herméticos de llenado integral*

Se utilizan en intemperie o interior para distribución de energía eléctrica en media tensión, siendo muy útiles en lugares donde los espacios son reducidos. Se aplican en zonas urbanas, industrias, minería, explotaciones petroleras, grandes centros comerciales y toda actividad que requiera la utilización intensiva de energía eléctrica. Su principal característica es que, al no llevar tanque de expansión de aceite, no necesita mantenimiento, siendo esta construcción más compacta que la tradicional.

- *Transformadores subterráneos*

Transformador de construcción adecuada para ser instalado en cámaras, en cualquier nivel, pudiendo ser utilizado donde exista la posibilidad de inmersión de cualquier naturaleza, generalmente en los centros históricos de las ciudades en las cuales todas las instalaciones eléctricas son soterradas.

- *Transformadores autoprotegidos*

Los transformadores convencionales son aquellos en que las protecciones, tanto de sobrevoltaje como de sobreintensidad, especialmente, son agregados al transformador en el momento de su instalación. En cambio, en los autoprotegidos, las protecciones necesarias vienen incorporadas.

Estos transformadores generalmente son monofásicos y, por su fácil instalación, son muy utilizados tanto en el campo como en las ciudades.

- **Transformador de corriente (TC)**

Los transformadores de corriente desempeñan un papel esencial al extraer muestras de corriente de líneas eléctricas y reducirlas a niveles seguros y

medibles, especialmente en situaciones que implican voltajes elevados o intensidades considerables. Su aplicación abarca las gamas normalizadas de instrumentos, dispositivos de medida y control. Algunos tipos específicos de estos transformadores también actúan como salvaguarda para los instrumentos al detectar cortocircuitos.

Los parámetros clave de los transformadores de corriente son los siguientes: **Potencia nominal:** varía en el rango de 2,5 VA a 200 VA, dependiendo de la función específica del transformador.

Corriente nominal: se encuentra en valores de cinco amperios y un amperio en su lado secundario, establecidos como relaciones entre la corriente primaria y secundaria. Las relaciones típicas varían desde 100/5 hasta 1000/5.

Estos dispositivos suelen venir acompañados de amperímetros adecuados, diseñados con la razón de transformación de los transformadores de corriente. Por ejemplo, un transformador con relación de 500/5 se complementa con un amperímetro graduado en el rango de cero amperios a quinientos amperios.

En resumen, los transformadores de corriente no solo desempeñan un papel vital en la medición y control de corriente, sino que también actúan como salvaguarda al detectar condiciones como cortocircuitos, ofreciendo así una solución integral para entornos eléctricos diversos.

El ingeniero de mantenimiento debe tener presente que estos transformadores tienen que estar cortocircuitados o con el circuito cerrado todo el tiempo, si se abre el circuito, la diferencia de potencial en sus extremos es alta y puede causar accidentes graves en el personal. Tenemos que tomar en cuenta que las conexiones en el secundario de los TC, se los realiza siempre en serie. La corriente de todos los elementos conectados es la misma. Los elementos para conectar son:

- Amperímetro
- La bobina amperimétrica del vatímetro
- Del medidor de energía
- De los relés de protección amperimétrica
- Etc.

Cuando, por defectos, se tenga que sustituir cualquiera de estos elementos, se tiene que cortocircuitar el circuito realizar la sustitución y luego abrir el cortocircuito.

- **Transformador de potencial (TP)**

Es un transformador devanado especialmente, con un primario de alto voltaje y un secundario de baja tensión. Tiene una potencia nominal muy baja y su único objetivo es suministrar una muestra de voltaje del sistema de potencia, para que se mida con instrumentos incorporados.

Además, puesto que el objetivo principal es el muestreo de voltaje deberá ser particularmente preciso como para no distorsionar los valores verdaderos. Se pueden conseguir transformadores de potencial de varios niveles de precisión, dependiendo de qué tan precisas deban ser sus lecturas, para cada aplicación.

Los TP, a diferencia de los TC todas las conexiones se las tiene que realizar en paralelo aquí intervienen los siguientes elementos:

- Voltímetros
- Vatímetros
- Medidor de energía
- Relés de protecciones voltimétricas
- Etc.

Tanto los TC como los TP fueron diseñados para proteger al personal de las altas tensiones, pero, de todas maneras, el personal tiene que cumplir con las normas de seguridad exigidas.

2.3.1. Los transformadores de potencia para la transmisión de la energía eléctrica

Descripción:

Se utilizan para transmisión, subtransmisión y distribución de energía eléctrica utilizando alta y media tensión. Se emplean en subestaciones transformadoras, centrales de generación y en grandes usuarios.

Características generales:

Se construyen en potencias normalizadas, dependiendo si son monofásicas o trifásicas, se colocan tres transformadores monofásicos en lugar de uno trifásico para aumentar su eficiencia.

Estos transformadores son de gran potencia, por lo que requieren algunos tipos de enfriamiento.

Los voltajes van desde 13,2 kV o 13,8 kV (voltaje de generación) a 500 kV, voltaje de transmisión (en Ecuador) y frecuencias de 60 Hz.

2.3.2. Transformador de distribución

Se utilizan para servicios domésticos (edificios, urbanizaciones), industrias, bancos, hospitales, etc. Pueden ser monofásicos o trifásicos.

Los monofásicos generalmente son autoprotegidos; en cambio, los trifásicos son convencionales. También existen los transformadores de jardín o pedestal (tipo *PadMaunted*), estos transformadores son compactos y su instalación es sencilla.

2.3.3. Diferentes tipos de transformadores

- Los autotransformadores sirven para transformar tensiones en límites relativamente moderados, para unir sistemas energéticos de diferentes tensiones, para el arranque de motores de corriente alterna, etc. La relación de transformación ideal sería de 1:2, si se tiene mucha diferencia de este valor, la eficiencia del uso de este tipo de transformadores disminuirá.
- Transformadores para alimentar instalaciones con convertidores estáticos (ignitores, válvulas a semiconductores, etc.) durante la conversión de la corriente alterna en corriente continua (rectificación) y al contrario, la corriente continua en alterna (inversión).
- Transformadores para efectuar ensayos a alta y extra alta tensión.
- Transformadores de potencia para fines especiales: para hornos eléctricos, para soldadura, etc.
- Transformadores de medida para medir la corriente y la tensión al conectarse en los circuitos de los aparatos medidores.

- Los radios transformadores que se usan en radiotécnica, etc.

Transformadores aislados a tierra TAT

Los transformadores aislados a tierra (TAT) son muy importantes para los hospitales, para el área de quirófanos, UCI, partos, etc.

La función de estos transformadores es la de aislar eléctricamente los circuitos del área exterior, es decir, de todo el hospital con el área específica que puede ser el quirófano, UCI, partos, etc. Estas áreas son muy sensibles por cuanto la resistencia fundamental del ser humano se encuentra en la piel, y al tratar el médico dentro del cuerpo, cualquier fuga de corriente, por más pequeña que sea, puede causar la muerte.

Dentro de las áreas sensibles, se tiene su propia puesta a tierra. Incluso el piso tiene vinil conductivo con pega conductiva. Todo esto va sólidamente conectada a una barra equipotencial.

La relación de transformación de los TAT es de 1 a 1; es decir, generalmente de 120 V/120 V, ya que la misión no es de cambiar los parámetros eléctricos de voltaje e intensidad, sino de aislar el circuito eléctrico.

La gama de utilización de los transformadores es muy amplia. Pero, en todos los casos, los procesos fundamentales que determinan el funcionamiento del transformador, así como los métodos de estudio de los fenómenos que ocurren en ellos, son esencialmente los mismos. Por eso, en lo sucesivo, al hablar sobre el transformador, nos referiremos a su tipo básico que es el de potencia de dos devanados monofásico y trifásico.

Las estructuras de los distintos tipos de transformadores que se utilizan en la práctica son muy diferentes y dependen de sus parámetros principales y de su finalidad.

Aunque la estructura es muy diferente en dependencia de la finalidad de los mismos (por ejemplo, hay transformadores de potencia ordinarios y transformadores de medida de corriente y de tensión, transformadores de ensayo y de hornos de alta tensión para grandes corrientes, etc.); no obstante, todos los tipos y todas las estructuras de los transformadores pueden ser representados como una

variedad de un tipo de transformador inicial que se obtiene al cambiar la forma y la disposición mutua de los elementos fundamentales de este transformador, que son: sus devanados y el núcleo de chapas de acero.

2.4 PARTES PRINCIPALES DE LOS TRANSFORMADORES

El transformador consta de las siguientes partes principales: núcleo, devanados primario y secundario, cuba de aceite para los transformadores en aceite, aisladores de salida tanto en el primario como en el secundario.

Se denomina núcleo del transformador el sistema que forma su circuito magnético con todas las piezas. Como fue dicho más arriba, según el tipo de núcleo los transformadores se dividen en:

- Transformadores de columnas, en los cuales los devanados envuelven las columnas del núcleo.
- Transformadores acorazados, en los cuales los devanados están abarcados parcialmente por el núcleo.

Independientemente del tipo de núcleo, este se hace de chapas de acero especial, llamado acero para transformadores, de 0,35 mm y 0,5 mm de espesor. Actualmente se utilizan dos clases principales de acero para transformadores: el acero laminado en caliente y el acero laminado en frío.

Los devanados de los transformadores deben satisfacer una serie de exigencias entre las cuales las principales son:

- El devanado debe ser económico tanto en lo que se refiere a los gastos iniciales, teniendo en cuenta el grado de déficit del cobre, como en lo pertinente al rendimiento del transformador durante su servicio. Los transformadores monofásicos para instalar serán a 7960-240/120 V y deben de cumplir con la norma técnica ecuatoriana INEN 2114; 2003 segunda revisión.
- El régimen térmico del devanado debe corresponder a los requisitos de las normas técnicas, debido a que la divergencia de estas exigencias hacia la tolerancia de altas temperaturas reduce bruscamente el plazo de servicio del transformador.

- El devanado debe ser mecánicamente resistente a los esfuerzos que surgen durante los cortocircuitos instantáneos del transformador.
- El devanado debe poseer una resistencia eléctrica suficiente contra las sobretensiones.
- Estas exigencias son, a menudo, mutuamente contradictorias. Así, por ejemplo, cuando, en el devanado, la densidad de la corriente es mayor, los gastos de cobre son menores, pero se hacen mayores las pérdidas en el cobre, y, por consiguiente, es más bajo el rendimiento del transformador. Tolerando mayores excesos de temperatura en el devanado, se disminuyen las dimensiones exteriores del transformador, pero se reduce la duración de su servicio, etc.

Por lo tanto, la construcción moderna de los devanados de un transformador, particularmente de un transformador de alta tensión, es el resultado de un largo trabajo, comprobado por la experiencia de explotación de los transformadores.

Según la disposición de los devanados de alta y baja tensiones (AT y BT) con respecto uno al otro, estos se dividen en:

- Devanados concéntricos, o sea, los que en todas las secciones transversales representan circunferencias con centro común.
- Devanados alternados en los que las partes de los devanados de AT y BT se suceden alternativamente por la altura de la columna.

Actualmente los transformadores más importantes son los de aceite, en los cuales el propio transformador, o la así llamada parte desmontable, es decir, su núcleo con los devanados instalados en él, está sumergido en una cuba llena de aceite. El aceite se calienta y circula dentro de la cuba efectuando de este modo la refrigeración natural del transformador.

La construcción de la cuba está relacionada estrechamente con el cálculo calorífico del transformador. Las cubas ordinarias de los transformadores de potencia son ovaladas. En sentido mecánico, la cuba debe resistir una sobrepresión interior de 0,5 atm. La cuba se instala sobre un carro de rodillos que deben estar calculados para resistir el peso total del transformador.

Las condiciones de refrigeración del transformador son tanto más duras, cuanto mayor es su potencia.

Los transformadores 3f de muy baja potencia (hasta 15 kVA) tienen una cuba lisa, considerada como la cuba más simple.

En los transformadores 3f de mayor potencia (alrededor de 1000 kVA) se utilizan cubas tubulares en cuyas paredes están soldados tubos de aproximadamente 60 mm de diámetro dispuestos de una a tres filas.

Los transformadores 3f de hasta 10 000 kVA de potencia tienen refrigeradores-radiadores con enfriamiento natural incorporados en las paredes de la cuba.

En los transformadores de 10 000 kVA y más de potencia se utiliza el soplado de los radiadores. Al principio se utilizaba ampliamente el sistema centralizado de soplado con uno o dos grupos de ventiladores. La experiencia ha demostrado que este sistema es menos económico que el sistema de soplado de los radiadores por separado con ayuda de uno o varios ventiladores de 150-200 W de potencia instalados en cada radiador.

En los transformadores instalados en centrales hidroeléctricas, se utiliza la refrigeración del aceite por agua en enfriadores de aceite de uno u otro tipo. En este caso, se practica la circulación forzada del aceite por medio de un grupo especial de bombeo. Los transformadores que tienen este método de refrigeración son de menores dimensiones exteriores que los ordinarios.

Para mejorar el aislamiento y la refrigeración de la parte activa del transformador, se sumerge en una cuba rellena de aceite mineral diseñado específicamente para transformadores. Las características principales del aceite son las siguientes (se asume que se refiere al aceite en uso):

- Densidad (a +20 °C en comparación con el agua a +40 °C): no superior a 0,895.
- Rigidez dieléctrica: de 20 a 35 kV/mm.
- Capacidad calorífica: de 1790 a 1870 W/(kg·°C).
- Temperatura de inflamación: no menor de 135 °C.
- Temperatura de congelación: 35 °C.
- Coeficiente de dilatación cúbica: 0,069 % por cada grado.

Junto con las propiedades indicadas anteriormente, el aceite para transformadores tiene dos inconvenientes principales: es inflamable y sus vapores, en ciertas condiciones, forman mezclas explosivas con el aire.

Por esta razón, en lugares como edificios públicos, minas, talleres y fábricas, se prefieren los transformadores secos o llenos de líquidos especiales no inflamables ni explosivos como los *bifenilos policlorados (PCB)* que son una clase de compuestos químicos orgánicos que se utilizaban ampliamente en la industria debido a sus propiedades como aislantes eléctricos y térmicos, así como por su estabilidad química. Fueron comúnmente empleados en la fabricación de equipos eléctricos, como transformadores y capacitores. En Estados Unidos, el PCB tomó el nombre comercial de *Pyranol*, mientras que, en la antigua Unión Soviética, se desarrolló el *Sovtol*. Estos líquidos, debido a sus propiedades aislantes y de refrigeración, son similares al aceite para transformadores, pero no se oxidan y son resistentes a la acción química. Sin embargo, debido a su toxicidad y efectos ambientales adversos, su uso ha sido prohibido en muchos países y se están llevando a cabo esfuerzos para eliminar y descontaminar los equipos que contienen PCB.

Desde este punto de vista, representa gran interés el transformador seco hecho de acero laminado en frío con aislamiento de fibra de vidrio impregnante resistente al calor. Pero con todo, el tipo principal de transformador de potencia sigue siendo el transformador lleno de aceite mineral para transformadores.

2.5 PÉRDIDAS POR LAS CORRIENTES PARÁSITAS DE FOUCAULT

Según el tercer principio expuesto al comienzo del libro, tenemos que el núcleo del transformador o de cualquier máquina eléctrica, al ser cortado por un flujo magnético variable, por ser este un conductor, se induce una *f.e.m.* y, al formar el área transversal del núcleo un circuito cerrado, circulará una corriente eléctrica (fig. 2.2a). Es un fenómeno eléctrico descubierto por el físico francés León Foucault en 1851, al mismo que se le denominó corrientes parásitas; ya que no contribuyen al objetivo de las máquinas eléctricas, sino que, al contrario, generan pérdidas nocivas para el funcionamiento de las mismas.

Figura 2.2a
Corrientes parásitas de Foucault, núcleo sin laminar

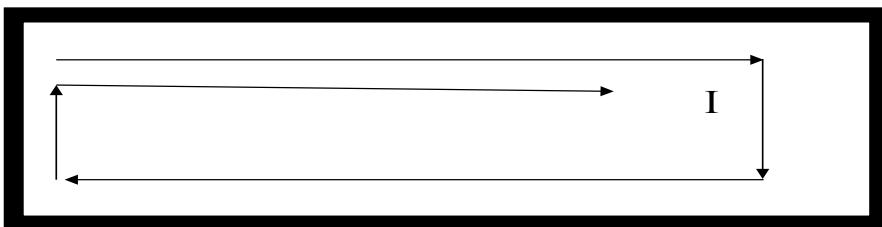


Figura 2.2b
Corrientes parásitas de Foucault, una lámina del núcleo.



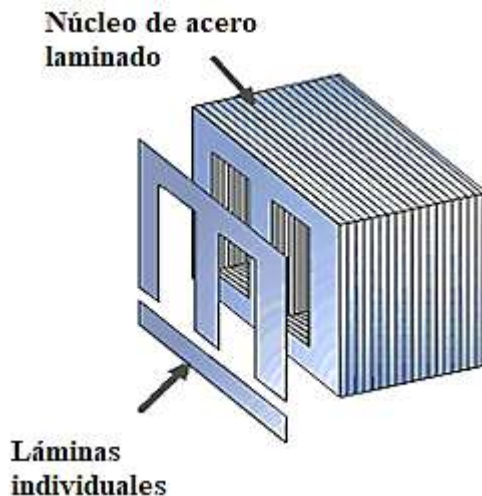
Estas pérdidas se transforman en calor por la Ley de Joule:

$$Q = I^2 R t$$

Las mismas que, a más temperatura, más deterioran el aislamiento de los conductores eléctricos y, en el caso de los transformadores, también deterioran el aceite.

Para combatir estas pérdidas y a la vez, aumentar el rendimiento o eficiencia de las máquinas eléctricas, se procede a la laminación del núcleo (fig. 2.3).

Figura 2.3
Laminación de un núcleo



Fuente: Ingtelecto, s.f.

Nota: la imagen es utilizada con fines académicos

Brevemente explicaremos por qué disminuyen las pérdidas:

- En primera instancia, se tiene un núcleo sin laminar (fig. 2.2a).
- La intensidad que se induce depende de la distancia que recorre.

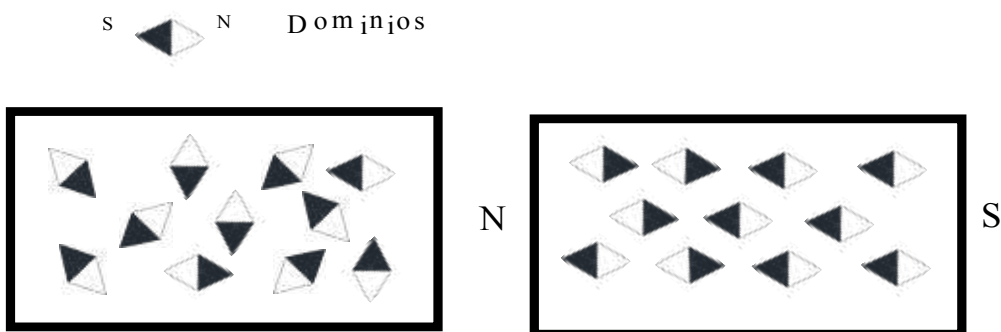
- Para mermar la intensidad, disminuimos la distancia de recorrido. El bucle que forma la intensidad se reduce.
- Esto se consigue laminando.
- Mientras más fina sea la lámina, los bucles serán más cortos; por lo tanto, el valor de la intensidad será más pequeño (fig. 2.2b).
- Por la ley de Joule, las pérdidas disminuyen el cuadrado de la disminución de la intensidad.

Después de la laminación, la intensidad o las corrientes parásitas disminuyen abismalmente y más aún al cuadrado por lo que el proceso de laminación es una decisión completamente acertada. Por supuesto, es cierto que mientras más fina sea la laminación, habrá menos pérdidas. Sin embargo, existe un límite; ya que, las láminas deben soportar esfuerzos mecánicos y esto puede limitar la reducción de la sección de las láminas a valores normalizados.

Por tanto, para lograr un equilibrio entre la reducción de pérdidas y la resistencia mecánica de las láminas, se suelen utilizar valores de sección normalizados que permiten obtener una eficiencia energética óptima en los transformadores. Es importante tener en cuenta que la elección del espesor adecuado de las láminas depende del diseño y uso específico del transformador en cuestión.

2.6 PÉRDIDAS POR HISTÉRESIS O DOMINIOS MAGNÉTICOS

Figura 2.4.
Dominios magnéticos



Las pérdidas por histéresis y la histéresis en general están ampliamente explicadas en muchos libros, por lo que nos dedicaremos a explicar los dominios magnéticos y las pérdidas que causan.

En primer lugar, haremos una analogía con el átomo que se considera la porción más pequeña que posee las propiedades características de un elemento, en este caso, se aplica para los materiales ferromagnéticos considerando al dominio como la porción más pequeña que conserva las propiedades magnéticas; es decir, un norte y un sur magnéticos (fig. 2.4).

Un material ferromagnético está constituido por dominios. Cuando no está magnetizado, los dominios no tienen una dirección determinada; su dirección es caótica. Cuando están dentro de un campo magnético fijo, los dominios se dirigen de acuerdo con la polarización de ese campo, es decir, se magnetizan. Cuando invertimos el campo magnético exterior, los dominios cambian la dirección.

Para entender de donde provienen las pérdidas, tenemos que saber que el campo magnético exterior es producido por un electroimán que está conectado a una fuente de corriente alterna, en nuestro caso, de 60 Hz.; por lo tanto, la inversión de giro de los dominios es también de 60 Hz. Comprendamos que estos dominios se encuentran apretujados entre sí y, en cada giro, existen roces y golpes entre ellos, lo que produce calor (principio de funcionamiento de los utensilios de las cocinas de inducción). Por supuesto, si aumentamos la frecuencia, el efecto será mayor.

Para disminuir las pérdidas, se utilizan aceros al silicio —aceros suaves por cuanto tienen menor resistencia a la inversión de giro y están menos apretujados—; por lo tanto, los roces y los golpes entre ellos son menores. La cantidad de calor que este efecto produce disminuye. En consecuencia, las pérdidas se reducen considerablemente.

2.7 TRANSFORMADORES MONOFÁSICOS

Se compone de dos o más bobinas de alambre que se enrollan alrededor de un núcleo ferromagnético compartido (fig. 2.5). Estas bobinas no están conectadas directamente. La única conexión entre las bobinas es el flujo magnético común presente dentro del núcleo.

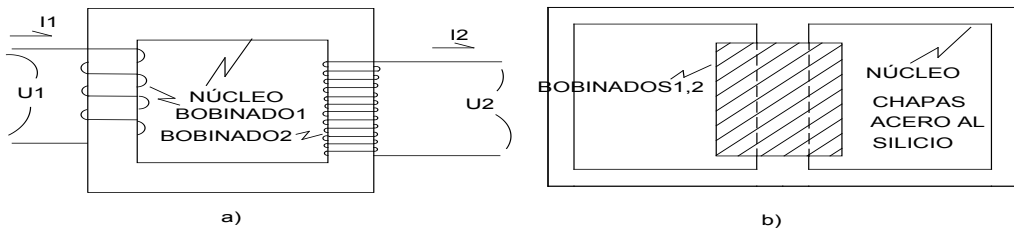
Una de las bobinas del transformador está conectada a una fuente de energía eléctrica de corriente alterna. y la segunda (y quizá una tercera) bobina suminis-

tran fuerza eléctrica a las cargas (consumidores). La bobina del transformador conectada a la fuente de fuerza se llama bobina primaria o bobina de alimentación, y las bobinas conectadas a las cargas se llaman bobina secundaria o bobina de salida o de entrega de energía.

Un transformador cambia un nivel de voltaje de corriente alterna a otro nivel de voltaje sin afectar la potencia real suministrada. Si un transformador eleva el nivel de voltaje de un circuito, debe disminuir la corriente para conservar igual la potencia que ingresa al aparato y la potencia de salida del aparato. Por consiguiente, la potencia eléctrica de corriente alterna puede generarse en una estación central, su voltaje puede elevarse para transmitirlo a las cargas a distancias con muy pocas pérdidas y disminuirlo nuevamente para el uso final. El propósito final de un transformador es convertir la potencia de corriente alterna de un nivel de voltaje de la misma frecuencia en otro nivel de voltaje.

Figura 2.5.

Formas de conectar las bobinas de los transformadores monofásicos: a) tipo columnas y b) tipo acorazado



Uno de los aspectos más importantes es conocer la relación de transformación de los parámetros antes indicados, o sea de voltajes e intensidades. Para el efecto, partimos de la **f.e.m.** inducida tanto en el primario como en el secundario (E_1 , E_2). Para un transformador que funciona en vacío, se tiene lo siguiente:

$$E_1 = U_1;$$

$$E_2 = U_2$$

Considerando que la f.e.m es directamente proporcional al número de espiras del bobinado primario y secundario (N_1 y N_2 , respectivamente).

Se denomina relación de transformación n a las siguientes igualdades:

$$n = N_1/N_2 = E_1/E_2 = U_1/U_2 = I_2/I_1$$

Se incluye las intensidades, porque se considera transformadores ideales (que no tienen pérdidas), en que la potencia de entrada es igual a la de salida:

$$P_1 = P_2$$

O sea:

$$U_1 I_1 = U_2 I_2$$

De aquí fácilmente obtenemos:

$$U_1/U_2 = I_2/I_1$$

2.8 REGULACIÓN DEL VOLTAJE DE UN TRANSFORMADOR

La calidad de la energía eléctrica viene dada por dos parámetros principales, la frecuencia y el voltaje nominal, el primero depende exclusivamente de los generadores, en cambio el segundo depende de los sistemas de transmisión y distribución principalmente.

Para la regulación del voltaje, se emplean los transformadores que vienen incorporados un sistema denominado TAP en las bobinas de AT (fig. 2.6).

Partiendo de la construcción de las centrales eléctricas, especialmente las de energía renovable, que tienen que hacerse en lugares propicios que la naturaleza generosamente nos proporciona, tales como hidroeléctricas, eólicas, etc., esta energía generada tiene que transmitirse a los centros de consumo, que pueden ser, ciudades, industrias, fábricas, etc., los mismos que se encuentran a grandes distancias entre sí, es decir, entre generadoras y consumidores.

En este proceso, va a existir una caída de tensión. Si esto no se regula, el voltaje de salida con el de llegada al usuario final será deficitario e inútil, por lo que es necesario irle corrigiendo en todo el proceso. Para el efecto, se utilizan los TAP del transformador.

Los TAP son una extensión del bobinado primario que tiene algunas derivaciones o tomas que pueden aumentar o disminuir el número de espiras con lo que cambiamos la relación de transformación nominal del transformador.

$$n = N_1/N_2 = U_1/U_2$$

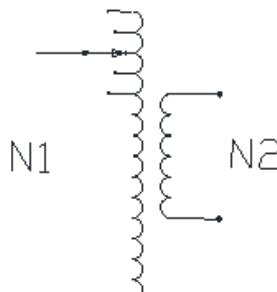
La relación de transformación nominal es la que se indica en la figura 2.6. Se trata de regular la U_2 , por lo que, al ser inversamente proporcionales; al aumentar el número de espira en N_1 , U_2 disminuye y viceversa.

Las derivaciones del TAP vienen dadas en porcentajes y valores determinados técnicamente, 0; $\pm 2,5$; ± 5 %, esto en la mayoría de los transformadores. En los de más potencia, las derivaciones aumentan según las necesidades o circunstancias de trabajo que tengan.

Para aclarar la idea, pongamos el caso de una ciudad que cuenta con algunas subestaciones y estas a su vez tienen diferentes circuitos que alimentan a varios sectores y barrios de la urbe, el voltaje que se suministra desde la S/E, generalmente es mayor al nominal en un 5 % para que al final del circuito la caída de tensión no sea inferior al 5 %.

En concomitancia con lo anterior, es necesario que los transformadores de distribución que se encuentran al inicio de la S/E suban el número de espiras en un 5 % para bajar el sobre voltaje de salida en esa misma proporción. En consecuencia, los que están al final lo bajan el número de espiras del TAP en un 5 % para subir el voltaje en esa misma proporción, asegurando de esta manera que, en el secundario, se tenga el voltaje adecuado; es decir, muy cercano al nominal.

Figura 2.6.
El TAP en la relación de transformación nominal



Rol del transformador en todo el proceso de transmisión y distribución

Partimos de que las centrales eléctricas se encuentran en lugares muchas veces remotos, en lugares donde se puedan realizar las obras, especialmente las centrales hidroeléctricas que dependen de las condiciones geográficas. La distancia, siempre es un factor que implica pérdidas técnicas y económicas.

Vamos a considerar estas pérdidas como las principales, las mismas que están intrínsecamente relacionadas; por eso, nos referimos como técnico-económicas. Mientras más técnica es, más cuesta, por lo que se debe tener un nivel óptimo, en el cual la técnica sea correctamente aceptable a un mínimo costo. Por supuesto que nunca se debe sacrificar la técnica por el gasto. En definitiva, tiene que ser considerada una inversión. Los factores de eficiencia y eficacia son fundamentales.

El material que se va a utilizar para la transmisión es fundamentalmente el conductor:

- Tipo
- Metal; cobre o aluminio
- Calibre

Por ser aéreas, tiene que ser desnudo y, por el precio y peso, será de aluminio con alma de acero. El calibre depende de la intensidad que circule por el mismo.

La intensidad va a depender de la potencia y del voltaje.

$$I = P/U$$

La resistencia del conductor depende del material, la sección (calibre) y la distancia. El material ya está determinado, la distancia es constante y la sección es proporcional a la intensidad.

Como vemos, la intensidad es la clave. Para disminuir las pérdidas técnicas, aplicamos la Ley de Joule:

$$dW = I^2 R t$$

La pérdida de energía es igual a la intensidad al cuadrado por la resistencia y por el tiempo.

También tenemos la dependencia de la resistencia R , en la cual lo único que podemos variar es la sección y esta también depende de la intensidad.

La clave es disminuir la intensidad y esto se soluciona por medio de los transformadores.

De la fórmula:

$$U_1/U_2 = I_2/I_1,$$

Despejamos I_2 :

$$I_2 = (U_1/U_2) * I_1$$

Vemos que I_2 es inversamente proporcional a U_2 . Como conclusión, tenemos que, al aumentar U_2 , disminuye I_2 , alcanzando el objetivo propuesto.

Describamos el proceso que se grafica en la figura 2 del presente libro. El trayecto entre el T1 y el T2 es la transmisión. Por esta razón se debe de elevar el voltaje al máximo (230 kV o 500 kV), por lo que se tendrá la mínima intensidad posible.

Cuando llega a la subestación del sistema interconectado en T2, la energía debe distribuirse entre las subestaciones de las distintas empresas eléctricas a un nivel de voltaje inferior (69 kV) por cuanto voltajes muy altos representan un peligro para los seres humanos. De igual manera, cuando salen los diferentes circuitos de las EE, sale a un voltaje menor de media tensión (13,8-22 kV). Este voltaje recorre las ciudades y el campo.

Para la distribución, los voltajes serán normalizados.

- Monofásicos 120-240 V
- Trifásicos Industriales 220/127 V
- Trifásicos residenciales, bancos, hospitales, educacionales, etc. 208/120 V.

Nota. Los valores nominales de los transformadores son de 210/121 V.

Del voltaje de 120 V (que llega a nuestra casa), existen transformadores para cargar celulares, computadoras portátiles, etc., que rebajarán el voltaje hasta valores de acuerdo con la marca del aparato en cuestión.

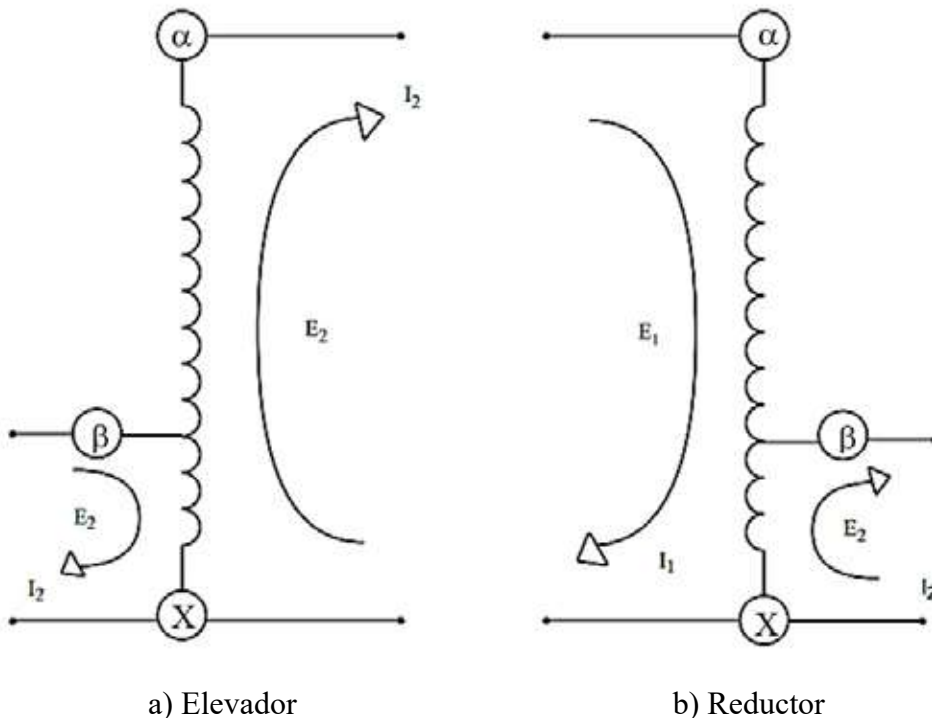
Se debe recordar que los transformadores son reversibles, es decir, puede reducir el voltaje, así como aumentarlo.

2.9 EL AUTOTRANSFORMADOR

En los transformadores, existe un acoplamiento magnético, pero en el autotransformador además de este, existe un acoplamiento eléctrico; es decir, que el mismo devanado sirve tanto para el primario como para el secundario, teniendo un área en común, que pertenece a un bobinado y es parte del segundo bobinado (fig. 2.7).

A diferencia del transformador ordinario, el aislamiento del devanado secundario debe calcularse para la mayor tensión. De igual forma, el calibre del conductor debe de ser para la mayor intensidad; es decir, de la parte que no es común, debido a que, en la parte común, las intensidades se restan (fig. 2.7).

Figura 2.7.
Formas de conectar la bobina de los autotransformadores



Fuente: Wildi y De Vito, , 1975

Esta configuración permite que los autotransformadores sean más eficientes que los transformadores convencionales, ya que no hay pérdida de energía en la

bobina secundaria. Además, los autotransformadores son más compactos y ligeros que los transformadores convencionales, lo que los hace ideales para su uso en aplicaciones donde el espacio es limitado.

Sin embargo, es importante tener en cuenta que los autotransformadores no proporcionan aislamiento galvánico entre la entrada y la salida, lo que significa que cualquier falla en la bobina podría causar un cortocircuito. Por esta razón, los autotransformadores deben ser utilizados con precaución y deben ser inspeccionados regularmente para asegurarse de que están funcionando correctamente.

En resumen, los autotransformadores son dispositivos eléctricos que ofrecen una alternativa más eficiente y precisa a los transformadores convencionales en ciertas aplicaciones. Aunque tienen algunas limitaciones, su uso adecuado y mantenimiento puede proporcionar un beneficio significativo en términos de eficiencia y ahorro de espacio.

Para la relación de transformación, partimos de la figura 2.7, y que del punto c al punto b, tenemos N_{cb} , espiras, por cuanto es proporcional la fuerza electromotriz al número de espiras se tiene que:

$$E_1 = N_{cb}$$

De esta forma podemos formular las siguientes ecuaciones:

$$a) n = E_1/E_2 = N_{cb} / (N_{cb} + N_{ba}) = N_{cb} / N_{ca}$$

$$b) n = E_1/E_2 = (N_{cb} + N_{ba}) / N_{cb} = N_{ca} / N_{cb}$$

En los autotransformadores, hay dos formas de transmitir la energía, en forma eléctrica y electromagnética, siendo la última por la que se tiene que calcular la potencia del transformador, la rentabilidad y la aplicabilidad de estos, resulta cuando está entre $0,5 < n < 1$.

2.10 TRANSFORMADORES TRIFASICOS

La estructura de los transformadores trifásicos es análoga a la de los transformadores monofásicos con la diferencia de que los primeros deben tener tres devanados de fase aislados de mayor tensión y de menor tensión (fig. 2.8). Existen casos especiales en que las tensiones del primario y secundario son iguales. A estos transformadores se les conoce como transformadores para aislar eléctricamente un circuito, se los utiliza en tableros aislados a tierra especialmente en los hospitales, en las áreas de quirófanos y unidades de cuidados intensivos.

Por supuesto que se puede obtener energía trifásica conectando tres transformadores monofásicos, que es utilizado en grandes potencias, pero el costo es mayor. Por esta razón, se tiene, en un solo bloque, los tres devanados primarios y los tres secundarios. Para analizar los tipos de conexiones se designará con las letras mayúsculas los de A.T., las entradas serán las primeras letras del alfabeto A, B y C (también se los puede denominar con U, V y W) y las salidas con las últimas letras del alfabeto X, Y y Z, para la B.T. con letras minúsculas.

Grupos de conexión

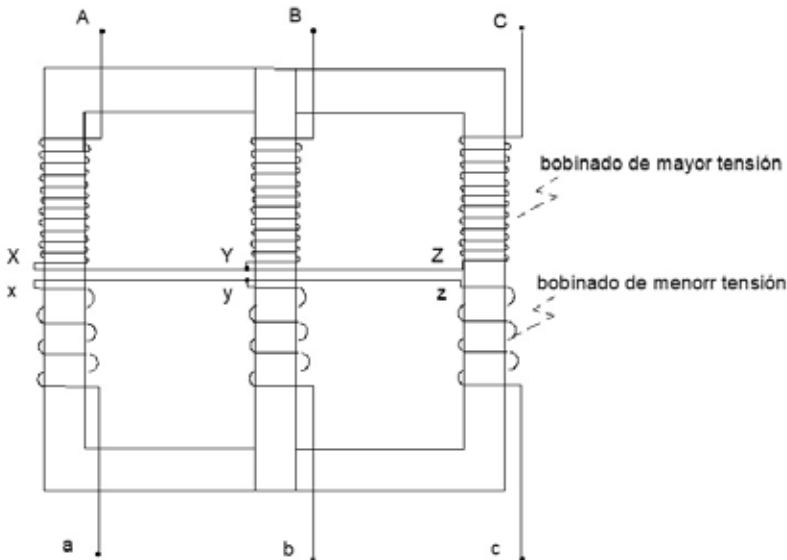
En algunos casos se puede optar por conectar transformadores en paralelo. Los motivos pueden ser los siguientes:

- Aumentar el suministro de potencia
- Fomentar la confiabilidad del sistema

Las industrias generalmente van incrementando su maquinaria. Por lo tanto, crece su consumo y, si bien es cierto que el cálculo original de la carga, incluso considerando el factor de crecimiento, sobrepasa la potencia del transformador instalado, es necesario o cambiar de transformador o colocar un transformador en paralelo.

Figura 2.8.

Transformador trifásico, con bobinas de mayor tensión (AT) y de menor tensión (BT)



Esta disyuntiva la tiene que resolver el ingeniero de mantenimiento, debido a que, al cambiar el transformador por uno más potente, gasta más dinero, se queda con el antiguo y agrega otro de potencia necesaria para cubrir la nueva demanda.

Colocar un transformador en paralelo, significa un costo menor, porque el transformador agregado costará mucho menos que el transformador que se debería cambiar.

Conociendo que, para conectar transformadores en paralelo, no es necesario que las potencias sean iguales, se puede conectar un nuevo transformador de acuerdo con la carga requerida con lo que, respecto al asunto económico, sería la mejor opción.

Si queremos fomentar la confiabilidad, lo mejor sería de tener dos transformadores iguales y de una potencia igual o superior al 70 % de la carga instalada, de tal manera que, si uno de ellos sufre un desperfecto, el otro puede asimilar la carga total por un período de tiempo suficiente para reponer el transformador averiado. De esta manera se consigue que la producción no se detenga. Por supuesto que el costo es mayor a la primera alternativa. Tenemos que considerar que a mayor técnica, mayor será el costo.

Para que dos transformadores se puedan conectar en paralelo, es necesario que tengan el mismo grupo de conexión y, para que aporten en forma proporcional la energía, es necesario que tengan la misma tensión de cortocircuito. Si esta es diferente, cada uno aportará en forma inadecuada.

Existen diferentes grupos de conexión en los transformadores trifásicos. Generalmente se consideran doce.

Cuando varios transformadores se conectan en paralelo se unen entre sí todos los primarios por una parte, y todos los secundarios por otra. Esto obliga a que todos los transformadores en paralelo tengan las mismas tensiones (tanto en módulo como en argumento) primaria y secundaria. De esto se deduce que una condición que se debe exigir siempre para que varios transformadores puedan conectarse en paralelo es que tengan las mismas tensiones asignadas en el primario y en el secundario; es decir, la misma relación de transformación.

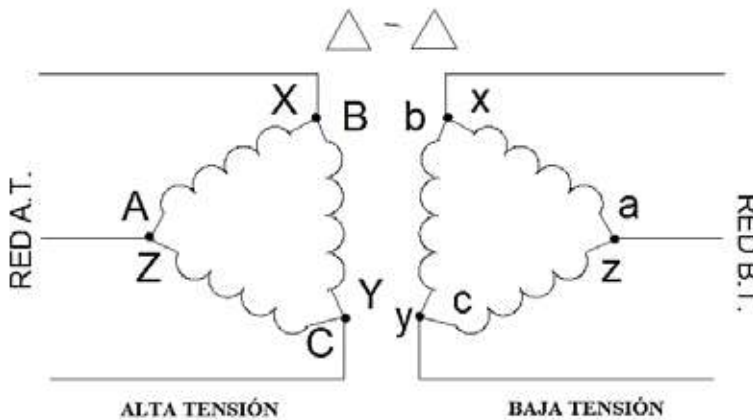
Para los transformadores monofásicos, la condición de puesta en paralelo es más sencilla. Se necesita que el voltaje primario y el voltaje secundario sean el mismo y la tensión de cortocircuito también sea la misma. Caso contrario, el aporte de potencia de cada uno será diferente. No es necesario que las potencias sean iguales.

Las conexiones fundamentales que se derivan de los grupos son una combinación entre las conexiones trifásicas de delta y estrella intercambiándose entre el primario y el secundario y después entre las bobinas; es decir, si se conectan los principios y finales, variarán los diferentes grupos de conexión.

2.10.1 Conexión delta-delta

La configuración delta-delta (fig. 2.9) en transformadores trifásicos suele ser preferida en sistemas con voltajes relativamente moderados. Se elige especialmente en situaciones donde se requiere garantizar la continuidad de un sistema, ya que ofrece flexibilidad tanto para aumentar como para disminuir la tensión.

Figura 2.9.
Conexión delta-delta o triángulo-triángulo



Fuente: Wildi y De Vito, 1975

En eventos de falla o durante operaciones de mantenimiento, la conexión delta-delta puede ser modificada para convertirse en una configuración delta abierta–delta abierta, lo que permite realizar reparaciones o ajustes necesarios sin interrupciones significativas en el suministro eléctrico.

En forma práctica, se utiliza para realizar un banco de transformadores con tres monofásicos, pero, con este sistema, se puede ahorrar uno con la conexión delta abierta o, en otros casos en los cuales la industria o taller ya tiene un transformador monofásico y desea, por necesidad o porque su negocio ha crecido, transformarlo a un sistema trifásico, simplemente agrega otro transformador monofásico no necesariamente de la misma potencia.

El segundo transformador no tendrá el neutro que el primero tenía, ni tampoco el punto no común puede conectarse al neutro existente debido a que su voltaje será 1,73 veces mayor al voltaje de fase que existía. Por ejemplo, si en el sistema monofásico con un solo transformador tenía los voltajes de 240-120 V, con este sistema, tendrá un voltaje de línea de 240 V, pero, para la fase, solo tendrá que utilizar el primer transformador, ya que, conectando la terminal del segundo transformador, el voltaje alcanzará a 208 V en vez de los 120 V. Pensar que las tres líneas tienen el mismo voltaje conectando al mismo neutro es un error muy común que conlleva a la quema de muchos aparatos eléctricos, especialmente computadoras. Para no cometer este error, siempre es necesario medir los voltajes antes de conectar los aparatos eléctricos.

2.10.2 Conexión estrella-estrella

La conexión estrella-estrella, también conocida como conexión Y-Y, es un tipo que se utiliza en sistemas trifásicos de potencia eléctrica. En esta conexión, se unen los tres devanados de fase del transformador en una configuración en estrella en el lado primario, y los tres devanados de fase del transformador en una configuración en estrella en el lado secundario.

En la conexión estrella-estrella, cada uno de los devanados de fase en el lado secundario está conectado a un punto central, o punto neutro, que se une a tierra.

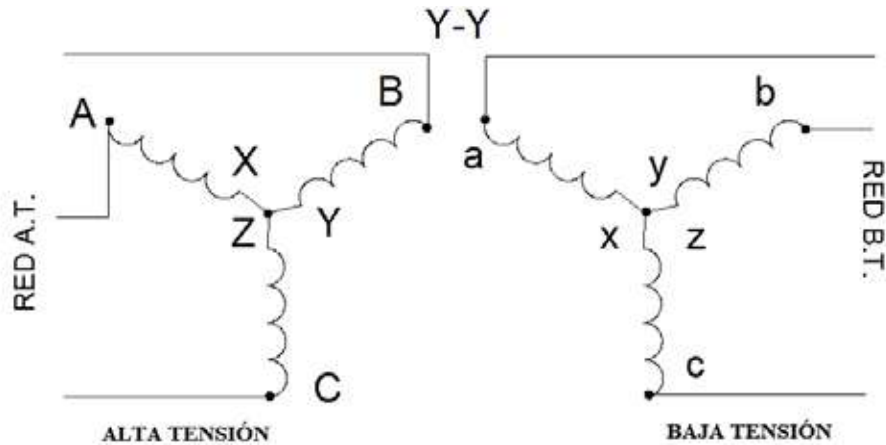
La conexión estrella-estrella (fig. 2.10) da un servicio satisfactorio únicamente en las cargas trifásicas balanceadas. Cuando se desbalancea en la carga, el neutro eléctrico estará en el centro exacto de un punto que hará desigual los tres voltajes de línea a neutro.

También nos sirve en el caso de tener problemas de resonancia ferromagnética. En estos casos, se debe tener mucho cuidado en los cálculos de las redes subterráneas, ya que el efecto capacitivo de estas redes puede ocasionar dicho fenómeno, que disminuye porque se puede conectar los dos neutros a tierra.

Generalmente, el fenómeno de la resonancia magnética se produce cuando se va una fase o se conectan de fase en fase y no las tres a la vez. El resultado es una subida de voltaje y la producción de un zumbido fuerte que puede dañar las instalaciones eléctricas.

Para el sistema de distribución, calza perfectamente, porque se tienen los dos voltajes necesarios, es decir el de línea y el de fase.

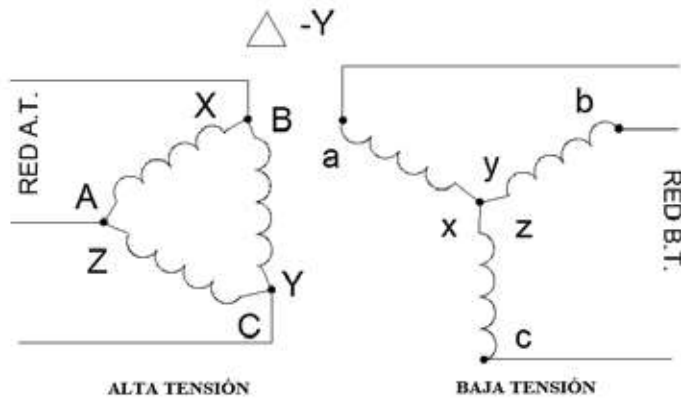
Figura 2.10.
Conexión estrella-estrella o Y-Y.



Fuente: Wildi y De Vito, 1975

2.10.3 Conexión delta-estrella

Figura 2.11.
Conexión triángulo- estrella o Δ -Y.



Fuente: Wildi y De Vito, 1975

La configuración delta-estrella (fig. 2.11), una de las más ampliamente utilizadas, despliega su aplicación en sistemas de potencia con el propósito de reducir voltajes en los sistemas de distribución (empleando cuatro hilos) destinados a suministrar energía tanto para aplicaciones de fuerza como para iluminación.

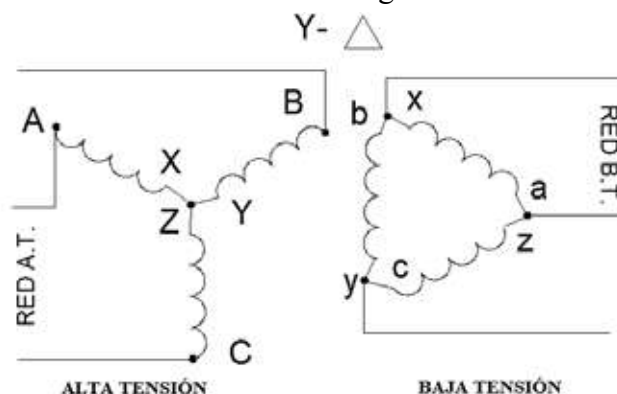
Para el sistema monofásico, se conecta el neutro en el punto común del bobinado de BT, en los puntos xyz. Este cable irá junto con las tres fases ABC, obteniéndose el sistema monofásico entre el punto neutro y cualquiera de las tres fases.

2.10.4 Conexión estrella-delta

La configuración estrella-delta (fig. 2.12) se presenta como la inversa de la conexión delta-estrella. Esta conexión se puede utilizar para los sistemas de transmisión en los cuales van las tres líneas sin el neutro; es decir, van de subestación a subestación y el neutro se vuelve innecesario ahorrando de esta manera material y un gasto de dinero en exceso.

El neutro en el primario no se necesita, por cuanto no se va a utilizar un sistema monofásico.

Figura 2.12.
Conexión estrella-triángulo o Y- Δ .



Fuente: Wildi y De Vito, 1975

2.11 GENERALIDADES SOBRE EL

CÁLCULO DE LOS TRANSFORMADORES

En esta sección se dará una reseña de como calcular un transformador. Será una información en forma general sobre la materia. Si el estudiante desea profundizar sobre el tema, deberá hacerlo con literatura especializada.

Transformador monofásico hasta 1000 VA

Datos:

- Voltaje primario

- Voltaje secundario
- Potencia
- Frecuencia
- Para trabajo continuo o discontinuo

Pasos para seguir y orden del cálculo:

1. Sección del núcleo de hierro
2. Espiras por voltio
3. Sección del conductor

Desarrollo de los cálculos

1. Sección del núcleo de hierro

La potencia de un transformador depende de la sección de su núcleo. Para el cálculo, debemos considerar las pérdidas tanto en el hierro como en el cobre; es decir las pérdidas magnéticas y eléctricas que se puede asumir en un 20 %.

Calculado esta potencia, aplicamos una fórmula práctica para encontrar la sección bruta:

$$S_b = 1,5\sqrt{VA} \text{ (cm}^2\text{)}$$

La constante de 1,5 y la raíz cuadrada nos dan como resultado la unidad de medida en cm^2 .

Para encontrar la sección neta, es decir sin considerar el aislamiento entre chapas, multiplicamos por el 90 %.

$$S_n = 0,9S_b$$

2. Espiras por voltio

Se realiza para conocer cuántos voltios tiene una espira. Por lo tanto, si tenemos un valor de voltaje, simplemente multiplicamos por las espiras/voltio y encontramos cuantas espiras debemos tener o construir.

Las fórmulas empíricas:

- Para 50 Hz $\text{esp/vol} = 45/S_n$

- Para 60 Hz $\text{esp/vol} = 38/S_n$

3. Sección del conductor

Para el efecto, podemos hacerlo primero por la forma práctica para comprobarlo después por la Ley de Ohm.

El parámetro fundamental es la intensidad, la misma que encontramos con la siguiente fórmula:

$$I = P/V$$

Luego, para encontrar la sección, partimos de la densidad, recordando la definición de electricidad que nos dice:

«El valor de la corriente se determina por las cargas eléctricas que pasan a través del área (sección) de un conductor en una unidad de tiempo».

Entonces, la densidad:

$$J = I/S$$

Donde:

J: densidad (A/mm^2)

I: intensidad (A)

S:sección (mm^2)

La densidad va a depender del tiempo de funcionamiento. Mientras más tiempo va a funcionar, la densidad debe ser menor.

La densidad en forma práctica puede variar desde 2,5 a 3 A/mm^2 . De la fórmula de la densidad, se despeja la sección:

$$S = I/J$$

Con este valor, determinamos el calibre del conductor.

2.12 TRANSFORMADORES DE TENSION Y DE CORRIENTE

Antes de cualquier intención de realizar una acción de protección o monitoreo de un equipo de un sistema eléctrico de potencia, el primer paso es la transduc-

ción de los valores de tensión y corriente de los niveles de alta tensión y elevadas corrientes del sistema a valores reducidos de las mismas, que no sean peligrosos para las personas ni para los equipos de medición y protección utilizados.

Las normas más importantes que rigen hoy en día y determinan las exigencias de los transformadores de medición son las europeas IEC 185 para transformadores de intensidad e IEC 186 para transformadores de tensión, y las normas americanas ANSI 057.13 —1978.

A continuación, se verán los aspectos relacionados con los transformadores de tensión y corriente utilizados para esta tarea.

Con los transformadores de tensión (TV) o de potencial (TP) es esencial que la tensión del secundario debe ser proporcional a la tensión del primario. Los TP se diseñan de tal forma que la caída de tensión en los arrollamientos sea pequeña y la densidad de flujo en el núcleo esté lejos por debajo de los valores de saturación para que la corriente de excitación sea también despreciablemente pequeña; de esta forma se obtiene una impedancia de magnetización prácticamente constante sobre el rango de tensión requerido. La tensión del secundario de un TP puede ser 100, 110 (en Europa), 115 o 120 V (en EE. UU.) correspondiente a tensión de fase. La mayoría de los relés de protección tienen una tensión nominal de 120 V o 69,3 V, dependiendo si su conexión es entre fases o fase-tierra.

Relación de transformación nominal:

Por ej. 600/1 o 600/5

La potencia nominal P_n : potencia provista por el TI del lado secundario a corriente y carga nominales, por ej.: 30 VA

Para obtener este valor, es necesario sumar todas las potencias de los aparatos que se van a conectar al mismo. Estos pueden ser aparatos de medida o relés de protección.

Clase de precisión:

5P o 10P

Los transformadores de corriente (TC) o de intensidad nos sirven para disminuir un valor alto de corriente a uno más pequeño mediante el cual se pueda

conectar aparatos de medida o de protección tales como relés.

El transformador de corriente o intensidad se utiliza para obtener una corriente menor pero proporcional a la que discurre por una línea de alimentación.

Las corrientes industriales a menudo son demasiado grandes para pasar directamente a través de los aparatos de medición.

Los transformadores de corriente permiten que estas altas intensidades se reduzcan a valores aceptables para la mayoría de los dispositivos. La intensidad secundaria está normalizada en 5 A. Solo en casos en los que la distancia entre el transformador y el aparato de medida sea muy grande se usan intensidades secundarias de 1 A.

Relación de transformación nominal:

Por ejemplo: 500/1 o 500/5

Ver anexos de los TP y TC

CAPÍTULO III

MÁQUINAS TRIFÁSICAS

INTRODUCCIÓN

Las máquinas trifásicas pueden ser motores o generadores, debido a que son reversibles. Si aplicamos energía eléctrica y obtenemos energía mecánica, es un motor; si aplicamos energía mecánica y obtenemos energía eléctrica, es un generador.

3.1 MOTORES TRIFÁSICOS, GENERALIDADES

Los motores trifásicos los podemos dividir en:

- Asincrónicos
- Sincrónicos

Los *asincrónicos* los podemos definir como una máquina de corriente alterna con un devanado en el estator de corriente alterna que recibe alimentación de la red eléctrica con una frecuencia de 60 Hz (Ecuador), mientras que el segundo devanado se encuentra en el rotor al cual se lo cortocircuita, si es bobinado, o ya viene cortocircuitado en el caso del rotor de jaula de ardilla.

Los *sincrónicos* son máquinas de corriente alterna con dos devanados, el uno, el del estator, se conecta a la red de corriente alterna con una frecuencia de 60 Hz. En cambio, el segundo, que se encuentra en el rotor, es excitado con corriente continua.

3.2 MOTORES TRIFÁSICOS ASINCRÓNICOS

Motores trifásicos asincrónicos son denominados también de inducción. Se fabrican con una amplia gama de potencias, desde fracciones de caballo hasta varios miles de caballos de fuerza. Se caracterizan por su velocidad prácticamente constante respecto al par de arranque. Los hay de muy diversas características. Unos tienen par de arranque elevado; en otros, en cambio, este par es bajo. Según sea su aplicación, algunos se construyen para corriente normal de arranque y

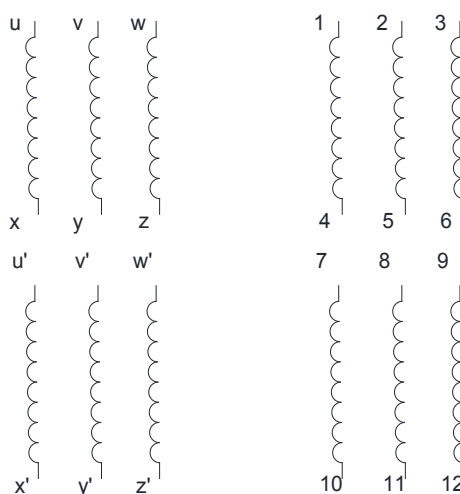
otros para elevada corriente de arranque. Se construyen asimismo para cualquier tensión normal y frecuencia, y muchas veces suelen estar previstos para funcionar con dos o más tensiones.

Para explicar por qué vienen los motores a distintas tensiones, vamos a analizar como vienen contruidos internamente.

Los motores simples tienen un solo bobinado por fase, pero pueden tener dos tensiones en conexión en estrella y en conexión en triángulo. En este caso, no se tendríam problemas en utilizar la antigua nomenclatura.

En la nomenclatura antigua, el comienzo de cada bobina se señala con las letras u, v, w y los finales, con las letras siguientes del alfabeto x, y, z.

Figura 3.1.
Nomenclatura de las bobinas

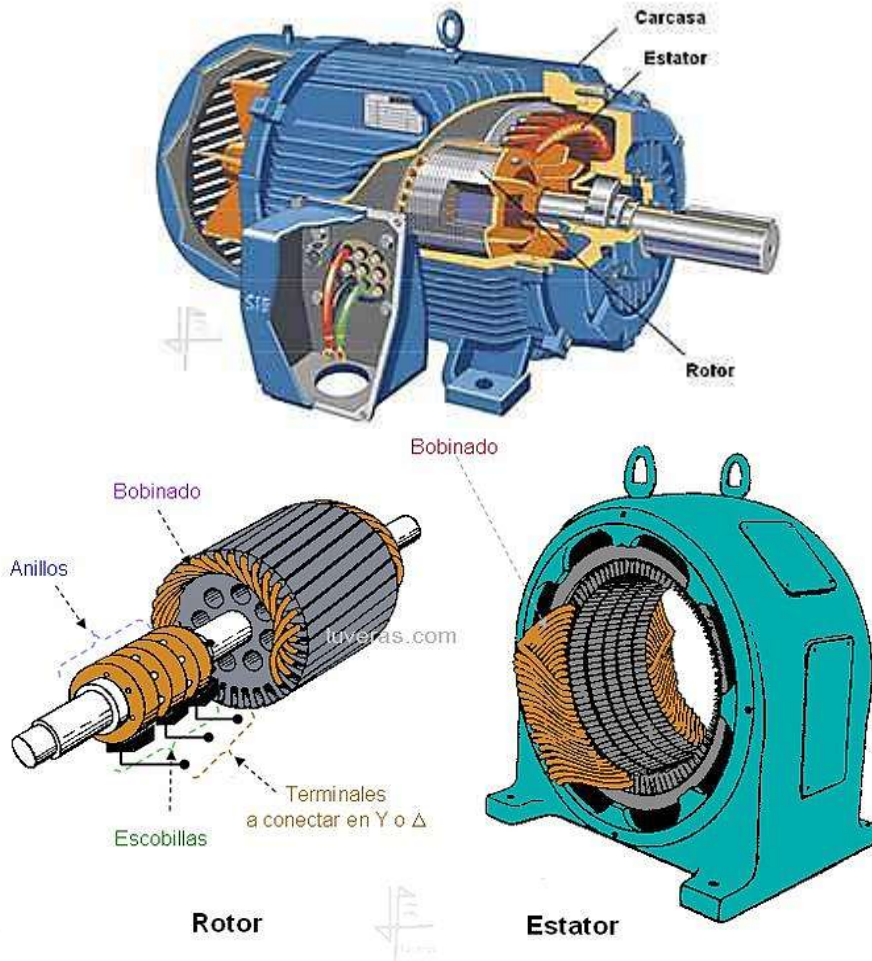


Los motores que se utilizan para algunas tensiones tendrán múltiples bobinados dependiendo del mercado al que se quiera vender. Los fabricantes los hacen para todas las tensiones posibles en las que se pueda utilizar.

En este caso, la nomenclatura antigua se dificulta, ya que, si comenzamos para la primera bobina con las letras u, v, w y los finales con las letras siguientes del alfabeto x, y, z, para la segunda bobina serán con las mismas letras pero primas (u', v', w', x', y', z'). Para la tercera, con doble prima y tres prima a las siguientes bobinas, por cuanto había muchas primas, se optó por poner números. Es así que los comienzos de las bobinas empiezan con 1, 2, 3 y los finales, 4, 5, 6. Las siguientes continúan sobre la base de los números ordinales (fig. 3.1).

Para obtener el voltaje adecuado, podemos conectar en serie, paralelo, estrella, triángulo, es decir cualquier conexión que satisfaga para el voltaje nominal que tenemos.

Figura: 3.2.
Motor asincrónico



Fuente: https://www.academia.edu/31832049/Partes_de_maquina_asincrona

Nota: la imagen es utilizada con fines académicos

En definitiva, el consumidor tendrá que hacer las conexiones debidas para su caso.

Los motores trifásicos encuentran aplicación en una variedad de contextos, impulsando máquinas-herramientas, bombas, montacargas, ventiladores, grúas, ascensores y diversas otras maquinarias.

Entre sus partes principales están el estator y el rotor.

El estator consiste en una armazón de fundición, un núcleo de chapas, idéntico al empleado en los motores de fase hendida, y un arrollamiento formado por varias bobinas alojadas en sus correspondientes ranuras. El rotor puede ser de jaula de ardilla o bobinado. Ambos tipos de rotores incorporan un núcleo de chapas prensado alrededor del eje. El rotor de jaula de ardilla comparte similitudes con el de un motor de fase hendida. Por otro lado, el rotor bobinado se compone de un arrollamiento dispuesto en el núcleo y conectado a tres anillos de toma, uno por cada fase, que están montados sobre el eje.

Los escudos, al igual que en cualquier otro tipo de motor, van firmemente empernados a la carcasa y en ellos se encuentran los cojinetes o rulimanes en los que se apoya y gira el eje del motor. Los cojinetes empleados pueden ser de bolas o de fricción (fig. 3.2).

El principio de funcionamiento

Las bobinas alojadas en las ranuras del estator van conectadas convenientemente formando tres arrollamientos independientes llamados fases. Las bobinas de cada fase van conectadas de manera técnica a fin de que, en el estator, se forme un campo magnético giratorio que induzca al rotor a girar a determinada velocidad. Esto se da gracias a la inducción magnética que se produce en el rotor en el caso de motor de inducción o de proporcionar corriente continua en el caso motor sincrónico.

La velocidad de giro del campo magnético del estator, es decir la velocidad conocida como sincrónica (n_s), depende de la frecuencia (f) y del número de pares de polos (p):

$$n_s = \frac{60f}{p}$$

Para entender por qué se toman los pares de polos, entendamos lo que es un período de una senoide que comprende la parte positiva y negativa de la misma. Esto corresponde al polo positivo y al negativo; entonces, para no hablar de períodos, que son conceptos matemáticos, los cambiamos a pares de polos, que son elementos físicos que los podemos determinar en las máquinas eléctricas (motores y generadores). En algunos casos se toma la cantidad de polos totales p_t y, en vez de 60, se utiliza el 120, que matemáticamente es igual no así en el concepto teórico de donde nace la fórmula:

$$n_s = \frac{120f}{pt}$$

3.2.1 Motor de inducción de rotor devanado

El rotor devanado se lo realiza esencialmente para controlar la intensidad de arranque, debido a que, comparado con los motores de jaula de ardilla que tiene un arranque muy alto, hasta siete veces el valor nominal, se lo puede bajar en una forma muy sustancial por diferentes tipos de métodos, que pueden ser colocando resistencias o autotransformadores en serie.

Hasta ahora se han estudiado campos giratorios del estator producidos por una corriente monofásica. La mayoría de las compañías de energía eléctrica generan y transmiten potencias trifásicas. La potencia monofásica que se utiliza en las viviendas se obtiene de una de las fases de la línea de potencia trifásica. En la industria, se utilizan, en forma mayoritaria, motores trifásicos.

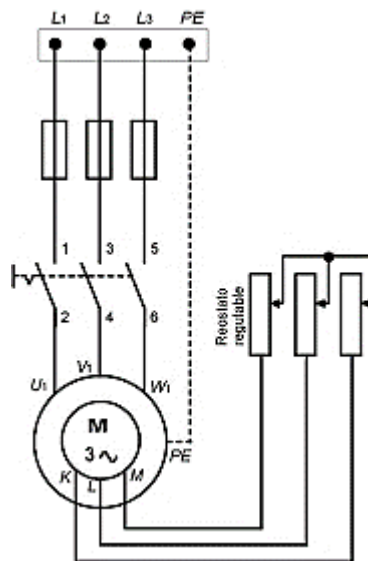
En el sistema trifásico, se genera un campo magnético giratorio mediante tres fases. El estator de un motor trifásico se conecta a una fuente de alimentación trifásica. La corriente pasa por los tres devanados del estator y establece un campo magnético giratorio. Estas tres corrientes de excitación proporcionan la potencia reactiva para establecer el campo magnético giratorio. También proporcionan la potencia que consume el motor debido a las pérdidas en el cobre o circuito eléctrico y en el hierro o circuito magnético.

La velocidad del campo magnético giratorio queda establecida por la frecuencia de la fuente de alimentación trifásica y la cantidad de polos del motor. Esta se conoce como velocidad síncrona. Las centrales de energía eléctrica regulan con precisión la frecuencia de los sistemas de energía eléctrica manteniéndola siempre a la misma frecuencia, en nuestro caso, a 60 Hz; por lo tanto, la velocidad síncrona del campo del estator (en revoluciones por minuto) es constante.

El rotor devanado está constituido por un núcleo que contiene tres devanados en lugar de las barras conductoras características del rotor de jaula de ardilla. En esta configuración, las corrientes se inducen en los devanados de manera similar a como ocurriría en barras en cortocircuito. Sin embargo, la ventaja de usar devanados consiste en que las terminales se pueden sacar a través de anillos colectores, de modo que la resistencia y, por lo tanto, la corriente que pasa por los devanados se puede controlar en forma eficaz.

El sentido de controlar la corriente en el rotor es una forma indirecta de controlar la corriente de arranque que se produce en el estator. Esta corriente, si se prende el motor en forma directa, es excesiva; por tanto, la forma de disminuir estas corrientes es aumentando la impedancia en el bobinado del rotor y esto se consigue conectando al mismo resistencias variables o autotransformadores que, al comienzo del arranque, colocan la máxima impedancia para luego ir bajando hasta que quede cortocircuitado el bobinado del rotor. En este momento, el motor funcionará en forma normal (fig. 3.3).

Figura 3.3.
Motor asincrónico con impedancia en el bobinado del rotor



Fuente: Huasacca Castillo, 2023

Nota: la imagen es utilizada con fines académicos

Las altas intensidades que se producen en el sistema de transición al arranque del motor pueden producir daños en el aislamiento del motor por las altas temperaturas que se generan. Según la Ley de Joule $W = I^2 R t$, intensidad al cuadrado por la resistencia del conductor y por el tiempo que esto transcurre, deteriora constantemente el barniz del conductor hasta que la vida útil disminuye y se provoca el eminente cortocircuito entre espiras. Además, en el arranque por las altas intensidades, se produce una gran caída de tensión que afecta a todo el sistema. Mientras más grande o potente sea el motor, mayor será la caída de tensión e incluso puede ocurrir que el motor, para arrancar, se demore más del tiempo requerido y produzca problemas en los elementos que estén conectados al mismo sistema.

El campo giratorio del estator induce un voltaje alterno y giratorio en cada devanado del rotor. Cuando el rotor se encuentra inmóvil, la frecuencia del voltaje inducido en el rotor es igual a la de la fuente de alimentación. Al comenzar a girar en la misma dirección que el campo giratorio del estator, la velocidad relativa entre el flujo magnético y los devanados del rotor disminuye. Con ello, tanto el voltaje inducido como su frecuencia también experimentan una disminución. A medida que el rotor alcanza la velocidad de sincronización, en la cual gira a la misma velocidad que el campo giratorio del estator, el voltaje inducido y su frecuencia alcanzan valores nulos. En este punto, el rotor ha alcanzado la velocidad síncrona; por lo tanto, no se induce una *f.e.m.*, no circula corriente eléctrica por el rotor, no se crea un campo magnético que se atraiga al campo del estator; por lo tanto, se para momentáneamente. Al suceder esto, se sale de la velocidad síncrona y el proceso se repite, es decir, comienza a girar nuevamente. *En conclusión, nunca alcanzará la velocidad síncrona.*

Cómo se induce el campo magnético en el rotor

Para que se produzca movimiento, es decir, comience a girar el rotor, es necesario que exista un campo magnético en el mismo, de tal manera que se atraiga o se repele con el campo magnético del estator. Para el efecto recordemos los tres principios del funcionamiento de las máquinas eléctricas (Cap. I):

1. En un imán permanente o electroimán, los polos del mismo signo se repelen y del signo contrario se atraen (pueden producir movimiento).
2. Si, por un conductor, circula una corriente eléctrica, alrededor del mismo se crea un campo magnético (creamos el magnetismo).
3. Si un conductor corta o es cortado por un campo magnético, se induce en este una *f.e.m.* (creamos la energía eléctrica). Según la Ley de Faraday, se puede escribir:

$$e = N (d\Phi / dt) \text{ o } e = N \times \Phi \times \omega$$

En primer lugar, describiremos cómo se produce el campo magnético en el estator:

1. El estator tiene un bobinado eléctrico.
2. Al conectar el motor, se produce el segundo principio.
3. Este campo magnético girará a una velocidad de $n = 60f/p$, si tiene dos pares de polos y la frecuencia es de 60 Hz, la velocidad de giro será de 1800 rpm.

Veamos qué pasa en el rotor (como ejemplo, el de jaula de ardilla):

1. El bobinado eléctrico del rotor son las barras de la jaula.
2. Utilizamos el tercer principio ($e = N \times \Phi \times \omega$).
3. La f.e.m. inducida en las barras dependerá de la velocidad de corte, porque tanto el número de espiras y el flujo magnético del estator son constantes.
4. En el instante 0^+ (encendido), la velocidad de corte será de 1800 rpm, ya que la velocidad de corte (N_c) será la diferencia entre la velocidad del giro

$$N_c = N_e - N_r$$

del campo magnético del estator (N_e) y del giro del rotor (N_r).

5. Al existir una f.e.m., en las barras del rotor, comenzará a circular una corriente eléctrica, por cuanto el rotor tiene un circuito cerrado, en este caso, cortocircuitado.
6. Al existir corriente, aplicamos el segundo principio; por lo tanto, aparece el campo magnético inducido en el rotor.
7. Al existir magnetismo, tanto en el rotor, como en el estator, aplicamos el primer principio, dando como resultado el movimiento del motor.

Para el rotor devanado, debe tener un circuito cerrado. De otra manera, no funcionará el motor. Esta es una de las principales causas de avería en esos tipos de motores.

Valor de la intensidad en el arranque y en el trabajo normal

1. Partimos de la Ley de Ohm $I = e/R$, siendo la I la intensidad que circula por el rotor, la e es la **f.e.m.** que se induce en el rotor y la R es la resistencia del bobinado del rotor.

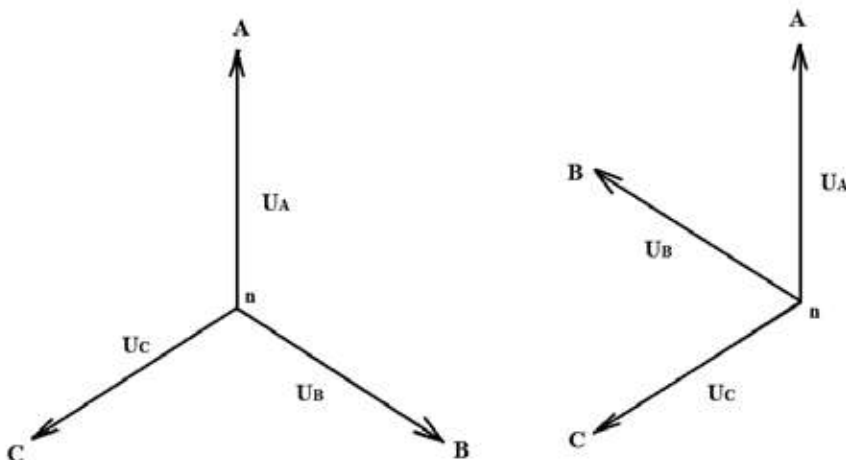
2. Por cuanto la R es constante la I dependerá exclusivamente de la e , y será directamente proporcional.
3. La e dependerá de la N_c .
4. La e será máxima cuando el motor se enciende, pues la N_r es cero.
5. La e será cero en caso de que la velocidad sea síncrona es decir la $N_e = N_c$. En este caso, el rotor se parará (nunca sucederá en los motores de inducción).
6. En el proceso de arranque, el rotor irá acelerando y la N_c irá disminuyendo. Por lo tanto, la e disminuye y la I lo hace en consecuencia.
7. Por la ley de acción y reacción, la intensidad en el estator disminuye y va desde un valor máximo hasta el valor nominal de trabajo.

Pérdida de la inercia en el arranque

Para que comience a girar el motor en el arranque, una de las bobinas del estator, tienen que invertirse automáticamente y esto se consigue en la construcción de este. La razón es que, si hacemos una suma vectorial de las tres fases, nos dará como resultado cero. Por lo tanto, no existirá el giro (ver el libro de electricidad, la suma de tres vectores iguales desfasados en 120°). El resultado será dos veces mayor que el valor de un fasor (fig. 3.4).

Figura 3.4.

Fasores de voltaje, simétricos (suma cero) y después asimétricos por la inversión de una fase cuyo resultado no será cero



Cuando el circuito del rotor está abierto, el motor no girará.

Si los devanados del rotor están en corto circuito, el voltaje inducido producirá grandes corrientes circulantes en los devanados en el momento de arranque e irá disminuyendo a medida que se acerca a la velocidad sincrónica, la misma que no puede alcanzarla, porque en ese momento el voltaje inducido en el rotor es cero. No va a circular corriente por los bobinados del rotor y, al no existir voltaje, no existirá corriente; por lo tanto, no se inducirá un campo magnético que sea atraído por el campo magnético del estator y el motor tiende a detenerse. Al momento que pierde la velocidad de sincronismo, es decir, la velocidad del motor es inferior a la velocidad del campo magnético del estator, se vuelve a inducir una *f.e.m.* en el rotor; por consiguiente, circulará corriente y, como consecuencia de esto, se inducirá un campo magnético que es atraído por el estator. En resumen, *la velocidad del rotor tiene que ser asincrónica con respecto al campo magnético del estator para que exista inducción y dé como resultado su movimiento.*

En el momento de arranque, al producirse un gran voltaje en el rotor, la corriente también será grande. Por la tercera Ley de Newton, para contrarrestar la elevada corriente producida en el rotor, tiene que aumentar la corriente de excitación que se produce en el estator.

Para reducir esta gran corriente en el arranque, es necesario utilizar algunos métodos de arranque. Los más conocidos son:

- Con resistencia en serie con el bobinado del rotor (fig. 3.3)
- Con reactancia en serie con el bobinado del rotor
- Con autotransformador en serie con el bobinado del rotor
- Conexión estrella-triángulo

La potencia (W) consumida en los devanados del rotor (y los circuitos asociados) debe ser suministrada por los devanados del estator.

En definitiva, un motor de inducción de rotor devanado es un motor trifásico, asíncrono de anillos rozantes, cuya característica es la variación de la resistencia del circuito del rotor, conectando resistores variables adicionales, pues los extremos del rotor son accesibles desde el exterior a través de los anillos rozantes. Esto se realiza para disminuir las altas intensidades que se producen al arranque. Después de que arrancó el motor, se varía el resistor hasta que la resistencia sea cero y el rotor quede cortocircuitado.

Control de velocidad

El motor de inducción se considera de velocidad fija o constante porque depende directamente proporcional a la frecuencia e inversamente proporcional al número de pares de polos. Se multiplica por 60 para tener en revoluciones por minuto. Sin el 60, sería en revoluciones en un segundo:

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

Si se desea controlar con el cambio de polos, se tiene el sistema *Dahlander*, el mismo en que se puede cambiar la conexión del número de pares de polos. Actualmente se controla la velocidad por medio de un variador de frecuencia.

Partes constitutivas

El rotor devanado se compone de un núcleo con tres devanados que van conectados a los anillos colectores, los mismos que sirven de terminales. Los devanados del rotor se componen de muchas vueltas de alambre de un diámetro ligeramente mayor que el bobinado del estator, conformado por muchas vueltas de alambre de un diámetro pequeño.

Ventajas

Los motores de inducción son empleados por sus grandes potencias.

La reparación de un motor de inducción es mucho más fácil que la del motor de corriente continua.

Se puede controlar el flujo de intensidad en los devanados del rotor.

Desventajas

La corriente de arranque es mucho mayor que la corriente de funcionamiento nominal; entre tres y siete veces mayor.

Los problemas para resolver podrían ser:

a) Sabiendo que la ecuación de la velocidad síncrona es:

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

En donde:

n : velocidad síncrona

f : frecuencia de la línea de potencia

p : número de pares de polos del estator

Encontrar su velocidad si $p = 2$

$$n = 60 \times 60 / 2 = 1800 \text{ rpm}$$

b) *¿La velocidad del rotor depende del voltaje aplicado?*

La velocidad del rotor NO depende del voltaje aplicado.

La corriente del estator es proporcional al voltaje aplicado al estator, así que, con el 50 % del voltaje, circulara solamente el 50 % de la corriente.

c) *Si el voltaje del estator de un motor con rotor devanado se reduce aproximadamente en un 50 % del valor nominal, ¿en qué proporción se reducirá la potencia aparente?*

Con $\frac{1}{2}$ de E y un $\frac{1}{2}$ de I , la potencia aparente será:

$$= \left(\frac{E}{2}\right) \times \left(\frac{I}{2}\right) \times 1,73 = 1,73 \left(\frac{EI}{4}\right)$$

Esta se reducirá al 25 %.

d) *Si el voltaje del estator de un motor con rotor devanado se reduce aproximadamente en un 50 % del valor nominal ¿En qué proporción se reducirá el par de arranque?*

El torque es proporcional a la intensidad del campo magnético tanto del estator como del rotor. Con la mitad de las corrientes la intensidad de campo se reduce a un cuarto del original.

$$= \left(\frac{E}{2}\right) \times \left(\frac{I}{2}\right) \times 1,73 = 1,73 \left(\frac{EI}{4}\right)$$

Esta se reducirá al 25 %

e) *¿El factor de potencia mejora al aumentar la carga? Explique esto.*

Factor de potencia = Potencia activa / potencia aparente.

Donde la potencia activa es igual a la intensidad por la resistencia al cuadrado, lo que implica que el factor de potencia tiene un valor directamente proporcional a la carga. Es decir, si aumenta la carga, el factor de potencia aumenta y viceversa.

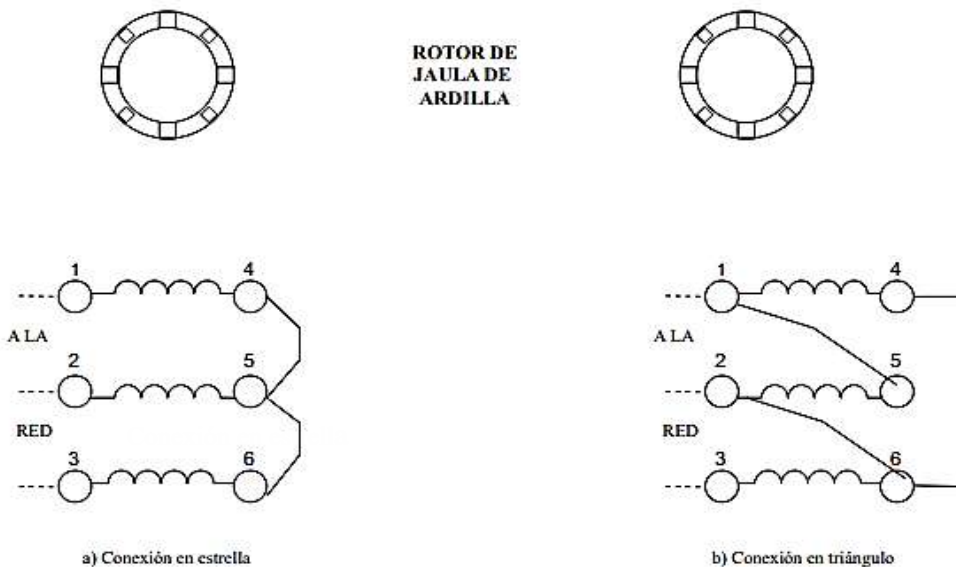
3.2.2 Motor de inducción jaula de ardilla

Posee el rotor más simple y versátil entre los motores de inducción, por lo que es ampliamente aplicado (fig. 3.5).

El rotor tipo jaula de ardilla se compone de un núcleo de hierro laminado con ranuras longitudinales alrededor de su periferia. El estator, por otro lado, está constituido por un bobinado trifásico diseñado para operar con corriente alterna trifásica. La velocidad de rotación del rotor está directamente relacionada con el deslizamiento, que representa la diferencia de velocidad entre el campo magnético y el giro real del rotor. Las partes principales de este sistema incluyen el estator, el rotor (jaula de ardilla), la carcasa y los rodamientos.

Figura 3.5.

Conexiones de un motor de inducción jaula de ardilla.



Entre las ventajas de este motor, se puede mencionar lo siguiente:

- Es el motor más utilizado gracias a su sencilla construcción.
- Presenta un bajo costo de mantenimiento.
- Ofrece mayor seguridad en su operación.

- Se caracteriza por su robustez.
- No requiere aislamiento entre el núcleo y las barras del rotor.

Entre las desventajas de este motor, se puede contar lo siguiente:

- El par de arranque es reducido, debido a que, en estado de reposo, el rotor exhibe una reactancia inductiva relativamente alta en comparación con su resistencia.
- Intensidad de arranque excesivamente alta.

Como se induce el campo magnético en el rotor y este comienza a girar

En el momento de producirse el campo magnético rotatorio en el estator, este comienza a girar a una velocidad $n = 60 f/p$, en cambio el rotor permanece parado, el bobinado del rotor que son las barras de la jaula, son cortadas por las líneas de flujo magnético del estator, por lo tanto se induce en este una **f.e.m.** Al estar cortocircuitada la jaula de ardilla, circula una corriente eléctrica. Al circular una corriente alrededor de esta se forma un campo magnético, el mismo que se atrae o se repele del campo del estator. Por lo tanto, comienza a girar el rotor.

Al comparar las características del motor jaula de ardilla con las del motor de rotor devanado, podemos decir que tiene igual funcionamiento. Se diferencia en su mayor rendimiento. El factor de potencia no cambia ni en vacío ni en carga.

El motor de inducción de jaula de ardilla es una de las máquinas más seguras y usadas en la industria.

Los problemas para resolver podrían ser:

a) Si la frecuencia de la línea de alimentación fuera de 50 Hz, ¿A qué velocidad giraría el motor?

$$n = 60f/p$$

$$f = 50\text{Hz}$$

$$p = 2$$

$$n = (60(50))/2 = 1500 \text{ rpm}$$

b) ¿Aumentaría la corriente de excitación, se reduciría o permanece igual?

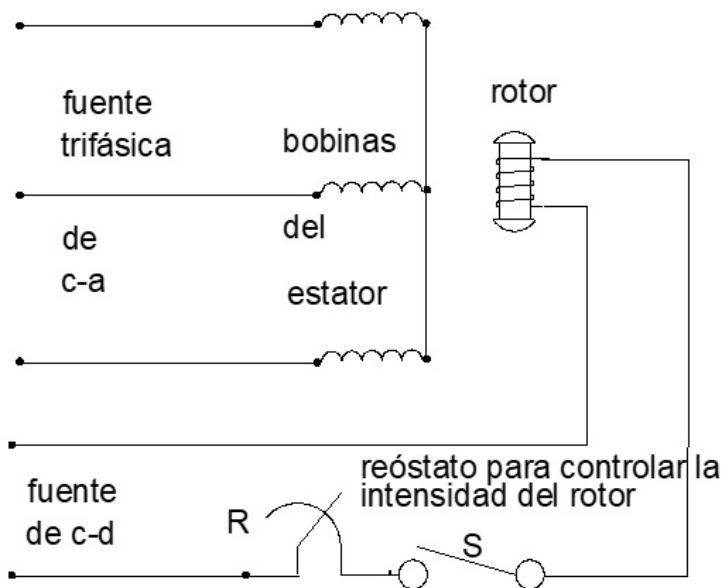
Permanecería igual, por cuanto esta depende del voltaje aplicado.

3.3 MOTORES SINCRÓNICOS

Un motor sincrónico es aquel cuyo rotor gira en perfecta sincronía con el campo magnético creado en el estator (fig. 3.6). Así, por ejemplo, si en un motor tetrapolar (dos pares de polos), un campo magnético de 60 Hz, gira a razón de 1800 rev/min, el rotor girará también a esta velocidad.

Los motores sincrónicos se fabrican con potencias que abarcan desde veinte caballos hasta varios cientos de caballos y se aplican en todas las situaciones que demandan una velocidad constante.

Figura 3.6.
Motor sincrónico



Fuente: Wildi y De Vito, 1975

En muchos casos, se emplean motores sincrónicos para mejorar el factor de potencia de la instalación eléctrica de una fábrica o taller. También se fabrican motores sincrónicos pequeños, pero de construcción diferente a la de los motores grandes.

La mayoría de los motores sincrónicos utilizan un bobinado de jaula de ardilla para el arranque porque no pueden arrancar solos y tienen que hacerlo en vacío.

El principio de funcionamiento consiste en que, cuando se cierra el interruptor de línea y la corriente circula por el arrollamiento del estator, se forma en el

motor un campo magnético giratorio, se induce una corriente en el arrollamiento de jaula de ardilla, arrancando de esta manera como un motor de jaula de ardilla.

Cuando la velocidad aumenta casi a la de sincronismo, las bobinas del campo del rotor se excitan con corriente continua, creando así polos magnéticos definidos que buscan alinearse frente a los polos giratorios del estator, los cuales poseen una polaridad opuesta. De este modo se incrementa la velocidad hasta que el rotor alcance la del sincronismo, en este momento la jaula de ardilla deja de actuar por cuanto no se induce una *f.e.m.*

Cuando se utilizan estos motores para corregir el factor de potencia de una instalación de corriente alterna, se sobreexcitan los arrollamientos del rotor, con lo que el motor absorbe una gran corriente en avance. Con ello se corrige un factor de potencia en retraso, pues en una instalación con varios motores de inducción la corriente va en retraso de fase. La corriente en avance del motor sincrónico mejora el factor de potencia. El motor sincrónico utilizado para la corrección del factor de potencia se denominará en ocasiones condensador sincrónico o compensador de potencia reactiva capacitiva.

Entre sus componentes principales se encuentran: el estator, tres devanados, carcasa, rotor, reóstato y rodamientos. El arrollamiento del estator de un motor sincrónico está compuesto por un número definido de bobinas alojadas en las ranuras del núcleo, de manera similar al motor trifásico de inducción. La conexión de estas bobinas puede configurarse en estrella o en triángulo. Del estator, se sacan al exterior tres hilos para conexión a la red.

Las bobinas de rotor, de las que tiene que haber tantos polos como tenga el estator, estos se devanan de igual manera que las bobinas de campo de los motores de corriente continua.

El arrollamiento del rotor forma un determinado número de polos de campo conectados en serie para crear polaridades alternadas. Se extraen dos terminales hacia el exterior, los cuales se conectan a los anillos de toma para suministrar corriente continua al arrollamiento. Los anillos, junto con sus escobillas correspondientes, desempeñan la función de establecer una conexión entre una parte móvil (los anillos) y una parte fija (las escobillas).

Las bobinas de campo del rotor se alimentan con corriente continua proporcionada por una batería o un pequeño dínamo (excitatriz) generalmente instalado

directamente sobre el eje del motor. También puede ser un rectificador conectado a la red eléctrica. Para el arranque lleva el motor un arrollamiento de jaula de ardilla dispuesto alrededor del rotor, pues estos motores no pueden arrancar por si solos y lo hacen con el arrollamiento de jaula de ardilla como un motor de inducción.

El número de polos saliente del rotor tiene que ser igual al de polos del estator, de los cuales reciben su magnetismo por inducción.

Cuando el motor alcanza la velocidad de sincronismo, el arrollamiento de jaula de ardilla no tiene ya misión alguna, y la rotación persiste gracias a la atracción entre los polos salientes del rotor y los del estator. En ciertos motores, los polos del rotor están hechos de acero imantado, manteniendo permanentemente su magnetismo.

Entre las ventajas de este motor, se destacan las siguientes:

- Útil para cargas pulsatorias.
- Satisface eficientemente la necesidad de velocidad constante.
- Es crucial en aplicaciones donde el control preciso del recorrido es esencial.

Sin embargo, entre las desventajas se pueden enumerar las siguientes:

- Pierde sincronismo con cargas elevadas.
- Tiene un costo algo elevado.

La inversión de rotación se la puede realizar como en cualquier motor trifásico, intercambiando dos de las tres fases que están conectadas al estator.

La corriente en el estator depende de la excitación en el rotor. La más baja será cuando el motor funciones con un factor de potencia $f.p.=1$. Recordemos que estos motores pueden trabajar con potencia reactiva inductiva o con capacitiva. En el segundo caso, se comporta como un compensador de potencia reactiva y sirve para mejorar el factor de potencia de la industria o fábrica donde esté funcionando, evitando y ahorrando, de esta manera, la colocación de un banco de capacitores.

Se debe tomar en cuenta que, para el arranque, es necesario que se quite la excitación del rotor. Vale recordar que estos motores no arrancan solos, necesitan un elemento auxiliar para el efecto por lo que se tiene un rotor de jaula de ardilla

o un motor auxiliar para que le lleve a la velocidad de sincronismo y se acople, es decir se conecte la corriente continua al rotor.

3.4. LOS PARES QUE LOS MOTORES REQUIEREN

El momento de arrancar un motor se considera una de las fases más críticas, denominada *período de transición*.

Todos hemos experimentado que, al conectar un interruptor para encender la luz, existe un chispazo en el mismo. En estos momentos es cuando la intensidad adquiere valores mucho más altos que los nominales. En el caso de motores, los valores pueden alcanzar hasta siete veces más el valor nominal, esto ocurre porque se tiene que vencer la inercia del estado estático al de movimiento. La inercia se vence mediante el par que tiene que desarrollar el motor en el momento de arranque, este valor depende de si el motor arranca con carga o en vacío.

¿Qué es el par?

El par de fuerzas está formado por dos fuerzas paralelas entre sí (F y $-F$), que tienen el mismo módulo, pero de sentidos contrarios y que están aplicadas sobre dos puntos distintos separados por una distancia.

Un par es el producto de una fuerza por la distancia mínima entre su dirección y el punto en que se considera aplicado el par; por tanto, se podrá aumentar el par incrementando la distancia (o brazo de palanca) o la intensidad de la fuerza.

Los motores eléctricos deben accionar a máquinas cuyas exigencias de fuerza motriz pueden ser:

a) Máquinas con par resistente de arranque bajo y velocidad constante

Tales como ventiladores, extractores, bombas centrífugas, máquinas de imprenta, máquinas para labrar metales y maderas, cintas transportadoras livianas, ejes de transmisión y, en general, máquinas que arrancan en vacío o que no exigen una potencia elevada durante el arranque.

Para tal caso se emplean especialmente los motores con rotor en cortocircuito (rotor jaula de ardilla) con las siguientes características:

- Par o torque de arranque: de 1,5 a 2 veces el nominal
- Corriente de arranque: de 4 a 7 veces la nominal

- Potencias: desde 1/6 HP hasta 15 HP
- Velocidades: 300 hasta 3600 RPM
- Voltaje: pueden operar bajo cualquiera de las tensiones normalizadas entre 120 y 480 voltios.

b) *Máquinas con par resistente de arranque ligeramente elevado y velocidad constante*

Tales como compresores, moldeadoras, transportadoras, clasificadoras, elevadoras, sierras de trozar, es decir, máquinas que deben efectuar arranques frecuentes o que deben arrancar accionando desde un principio masas (carga).

Para tal efecto, se emplean los motores con rotor en cortocircuito de alto par de arranque (rotor jaula de ardilla). Sus características son las siguientes:

- Par o torque de arranque: varía entre 2 a 3 veces el nominal
- Corriente de arranque: varía entre 4 a 6 veces la nominal.

Las diferentes potencias y velocidades con que se construyen estos motores son similares a las del primer caso.

c) *Máquinas con par resistente de arranque elevado y velocidad variable dentro de cierto margen*

Tales como bombas de émbolo, prensas, máquinas para estampar y cortar, trituradoras de minerales, es decir, máquinas de potencia más o menos grandes que arrancan a plena carga, con un arranque lento y libre de golpes bruscos.

Se deben emplear motores con rotor devanado y anillos colectores de características:

- Par de arranque: hasta 2,5 veces el nominal
- Potencias: entre ¼ HP hasta 200 HP para operar con bajas tensiones normalizadas. Entre 250 HP y 15000 HP o más para operar con alta tensión.
- Velocidad: varían entre 125 a 1800 RPM

d) *Máquinas con par resistente de arranque bajo y velocidad variable dentro de un amplio margen*

Tales como laminadoras, hileras, máquinas para la industria textil, de papel, caucho, es decir, máquinas de potencia pequeña o mediana que arrancan en vacío o que no exigen una potencia elevada durante el arranque, trabajan con velocidades variables dentro de cierto margen.

Se emplean motores trifásicos de colector, de características *shunt* y regulación de velocidad por medio de desplazamiento mecánico de escobillas. Sus características son:

- Par o torque de arranque: de 1,5 a 2 veces el nominal.
- Corriente de arranque: de 1 a 1,5 veces la nominal

3.5 ARRANQUE DE LOS MOTORES

Arranque directo de los motores de inducción

El motor arranca al 100 % de su voltaje, lo que constituye un arranque directo. Esto se puede realizar con motores de potencia no muy elevadas (menores de 10 HP). Al producir intensidades alta, genera una caída de voltaje momentáneo en la línea de alimentación, lo que puede producir daños a los equipos que estén conectados con el motor.

Para motores de mayor potencia, se tiene que realizar un arranque con tensión reducida. Esto se obtiene conectando al motor en serie con:

- Resistencias variables
- Reactancias variables
- Autotransformador variable

Los mismos que al arrancar tienen el máximo valor y se lo disminuye a cero, después de haber arrancado.

También se considera el arranque estrella-triángulo, es decir, arranca en estrella (voltaje disminuido en 1,73 veces) para después conectarse en triángulo (voltaje nominal).

En los motores de rotor devanado, se puede controlar la intensidad de arranque conectando resistencias en serie con el bobinado del rotor y se procede de la misma manera que con el bobinado del estator.

3.6. TRABAJO ÓPTIMO DE UN MOTOR

El motor será más eficiente cuando trabaje con una carga alrededor del 100 % de su potencia nominal.

En los actuales momentos, se trata de que los motores no solo trabajen a la máxima eficiencia, sino que se construyan motores cada vez más eficientes para reducir el consumo de energía eléctrica, un motor de mayor eficiencia generalmente cuesta un poco más pero el costo se compensa a la larga por el menor pago en la planilla eléctrica.

El valor de la eficiencia viene dado por lo que se consideran pérdidas del motor. Estas son la energía necesaria que tiene que desarrollar el motor para transformar la energía eléctrica en mecánica. La reducción de esta energía necesaria nos da un mejor valor de la eficiencia.

Las pérdidas se catalogan como fijas y variables. Las fijas son constantes sin importar el valor de la carga; en cambio, las variables dependen de la carga. Por esta razón, si el motor funciona al 100 % de su carga, la eficiencia será la máxima.

El factor de potencia (*f.p.*) puede incidir en el pago de la planilla eléctrica, porque un bajo *f.p.* puede recibir una penalización por parte de las empresas eléctricas. Por lo tanto, la corrección de este es necesario y se lo realiza por medio de capacitores, el objetivo es disminuir la intensidad exterior al motor. En consecuencia, merman las pérdidas en las redes exteriores.

También se tiene que considerar las pérdidas mecánicas que son producto de la fricción y esto se refiere a los cojinetes o rodamientos de mala calidad y de mucho rozamiento. El mantenimiento de estos elementos es fundamental. Además se tiene que considerar la ventilación, debido a que un calentamiento excesivo disminuye la eficiencia. Hay que recordar que los motores trabajan menos y duran mucho más cuando todos sus componentes mecánicos están bien ajustados, es decir, bien instalados.

En definitiva, cuando un motor funciona en forma eficiente, se tienen los siguientes beneficios:

- Ahorro energético
- Menor pago por el consumo

- Aumenta la vida útil del motor
- Menor mantenimiento

El ingeniero de mantenimiento, antes de adquirir un motor, tiene que hacer un análisis entre el costo inicial y el costo de operación. Se debe tener en cuenta que un motor de alta eficiencia cuesta más, pero su costo se compensa con el costo de operación y la mayoría de las veces, resulta más económico al final.

La calidad de la energía influye en el rendimiento de un motor por esa razón se debe tener una frecuencia constante. Esta depende de las centrales eléctricas y del voltaje constante, lo depende a su vez de las empresas eléctricas, pero más que todo de una buena instalación (escoger un calibre de conductor correcto considerando la intensidad nominal, distancia y la caída de tensión).

3.7. SELECCIÓN DE UN MOTOR ASINCRÓNICO

Los motores de inducción por su robusta constitución, precio y confiabilidad se han ganado la preferencia dentro de la industria, por lo que es indispensable conocer ciertos parámetros básicos para seleccionarlos:

- Potencia para accionar una carga
- Velocidad de operación
- Pares requeridos, para el arranque y el mínimo para su aceleración y el máximo que se requiera
- Frecuencia nominal

Además de estas condiciones, se tiene que escoger el IP adecuado ya que depende también de las condiciones ambientales a las que va a trabajar.

Después de la selección para la instalación, es necesario cerciorarse de que el voltaje al que se va a conectar sea el adecuado. Para el efecto, siempre tiene que medirse con un multímetro el voltaje de la red y compararse con el voltaje nominal del motor.

No está por demás cerciorarse de que se tiene una puesta a tierra. Esto para protección del personal que va a trabajar.

3.8. REPARACIÓN DEL MOTOR ASINCRÓNICO

El ingeniero de mantenimiento tiene que conocer en forma general aspectos simples de reparación de motores asincrónicos. Por cuanto su área de trabajo es amplia, podría incursionar en este campo.

3.8.1 Generalidades

Primero se tiene que inspeccionar el motor, pues, con esta operación, vamos a obtener algunos datos importantes que nos llevarán a tomar decisiones acertadas acerca de las fallencias de la máquina. Los datos que debemos de escribir, como una bitácora, son los siguientes:

- Datos de placa
- Examen visual

Después, para el desmontaje, los factores a considerar son:

- Tamaño
- Peso aproximado
- Transporte
- Herramientas
- Equipo

Con esta información, podemos analizar una por una y determinar una forma de reparación, no es un postulado, pero puede ser una guía.

- *Datos de placa.* - En los datos de placa, se encuentran los valores nominales mediante los cuales obtenemos una información clara del tipo de motor que tenemos, gracias a esta podemos comprobar los cálculos correctos de los cables que vamos a utilizar y la comprobación posterior de su buen funcionamiento.
- *Examen visual.* - Este examen nos permitirá constatar las condiciones externas en las que nos entregan el motor (si es que existen o no daños externos tales como abolladuras, fisuras, ventilador roto, faltante de componentes del motor, tuercas, etc.). Esto se realiza para evitar reclamos posteriores y problemas con los clientes.

- *Tamaño y peso.* - En caso de motores pequeños y de fácil transportación, esto no tiene mayor importancia. Pero, si el motor es muy grande, entonces el trato es diferente, debido a que se tiene que ver si se puede transportar todo en su conjunto o por partes, o sea desmontado. También, con estos datos, sabremos qué recursos necesitamos para su desmontaje, tanto humanos (cuántas personas) cuanto materiales que pueden ser desde montacargas hasta simples palancas de mano.
- *Herramientas y equipos.* - Con lo expuesto anteriormente, tenemos que planificar el desmontaje. Para esto señalamos el sitio, las personas y las herramientas y equipos necesarios según las características descritas anteriormente. Esto se hace con la finalidad de evitar pérdidas de tiempo (suspensión del trabajo) y, por ende, pérdidas económicas.

Para explicar el proceso, utilizaremos como ejemplo el proceso para motores pequeños, desde que llegan al taller.

En primer lugar, formulamos las hipótesis del daño o avería que puede haber tenido, siendo las mismas las siguientes:

- a) El motor que no arranca
- b) El motor que no tiene fuerza
- c) Calentamiento anormal
- d) Funcionamientos ruidoso

El motor no arranca

- *La interrupción de una fase* es la causante para que el motor trifásico no arranque. Esto provoca un aumento de intensidad en el motor y, como consecuencia, se produce un calentamiento excesivo, razón por el cual, se puede llegar a deteriorar el aislamiento y producir evidentes cortocircuitos, por lo que tendría que rebobinar el motor.
- *El desgaste de los rulimanes* se produce por el uso normal o forzado. Como consecuencia, lleva a una disminución del entrehierro (el espacio entre el rotor y el estator) hasta tal punto que se produce un roce y, como consecuencia, el motor se bloquea. El desgaste se revela por el aumento de

corriente y, al conectar el motor, se puede oír un golpe seco, causado por el choque del rotor contra el estator.

- *Conexiones erradas* producidas por la inversión de una fase en 180° .
- *Interrupción de un bobinado rotórico*. Esta puede ser en las bobinas, en los anillos, en el reóstato, o por la falta de contacto de las escobillas con el respectivo anillo. La prueba del rotor se hace con un multímetro, prueba de continuidad.

El motor no tiene fuerza

- *Tensión muy baja*. La velocidad disminuye considerablemente al aumentar la carga, porque la potencia es proporcional al cuadrado de la tensión de línea. Si el voltaje merma en forma representativa la disminución del número de revoluciones puede ser notable también para cargas inferiores a lo normal.
- *Conexión errada de las fases*. Si el número de los conductores del devanado del estator está calculado para conexión a triángulo, el motor no soporta la carga a paridad de tensión de línea con conexión en estrella. La fuerza motriz resulta notablemente disminuida por cuanto la tensión fue reducida en 1,73 veces. Por lo tanto, la potencia disminuye tres veces. Para el efecto, se cambian las conexiones de las fases a triángulo.
- *Desoldado en la jaula de ardilla*. Sucede normalmente en motores de jaulas con varillas soldadas a estaño a los anillos frontales de cortocircuito. Esto determina un aumento de resistencia del rotor y este se calienta más de lo común y la velocidad resulta siempre inferior a lo normal.

3.8.2 Calentamiento anormal

- *El motor emite un ruido sordo* característico (funcionamiento en monofase) mientras la velocidad disminuye notablemente. Eso absorbe una notable corriente y se calienta fuertemente hasta quemar el bobinado en el funcionamiento con carga. En este caso, hay que parar enseguida el motor y proceder a la reparación. El uso de aparatos como el relé térmico o los interruptores automáticos (termomagnéticos o salvamotores) constituye el sistema más eficaz para prevenir los peligros de una quema del motor.

- *Conexión a triángulo en vez de estrella.* La corriente de absorción en este caso resulta superior a lo normal, puesto que la *f.c.e.m.* (fuerza contra electromotriz) requerida por la conexión a triángulo es de 1,73 veces más la requerida con conexiones a estrella. Hay que deshacer las conexiones de las fases para ejecutar las conexiones a estrella. Un funcionamiento prolongado en estas condiciones puede llegar a quemar el motor.
- *La desigualdad en el número de las espiras de las fases* dan lugar a desequilibrios en las corrientes absorbidas. Generalmente la absorción resulta superior a la normal y el calentamiento es bastante sensible. La desigualdad de las corrientes puede ser revelada cuando el motor funciona, mediante tres amperímetros conectados sobre las fases. Algunas veces, la diferencia puede ser determinada por cortocircuitos en una fase. En este caso, deben rehacerse las conexiones o también sustituirse las madejas defectuosas.
- *Cortocircuito en el rotor.* Generalmente sucede en motores con rotor bobinado por cuanto aquí pueden suceder contactos de bobinas o de espiras entre sí o a masa provocando un aumento de corriente en el estator y, de manera especial, cuando funciona el motor ocasiona un fuerte calentamiento.

3.8.3 Funcionamiento ruidoso

- *Rotor desequilibrado.* El defecto se manifiesta por un ruido periódico y excesivas vibraciones del motor, tanto más acentuado ello cuanto mayor es el desequilibrio del rotor. Esta anormalidad es debida a un rebobinado defectuoso del rotor. Para evitar el rápido desgaste de los cojinetes es menester equilibrar el rotor.
- *Desgaste de los bujes.* El desgaste de los bujes y también de los rulimanes da lugar a un zumbido continuo o interminable. En este caso, hay que reparar el buje o sustituir el rulimán para evitar gastos mayores. El demasiado desgaste lleva al rotor a rozar con el estator.
- *Inducción excesiva.* Un valor elevado de la inducción da lugar a un funcionamiento ruidoso. Las causas principales que producen un aumento de la inducción son sobrecarga, tensión superior a la normal, frecuencia muy baja.

Un motor sobrecargado absorbe una corriente superior a lo normal. El aumento de los amperios espiras determina una sobreexcitación electromagnética y un funcionamiento ruidoso.

La tensión superior a lo normal produce los mismos efectos de sobrecarga. El funcionamiento o frecuencia muy baja, o sea inferior a la que el motor está calculado, equivale a poner la máquina a una tensión superior a la normal.

3.9 OPERACIONES PARA LA REPARACIÓN DE UN MOTOR

ASINCRÓINICO CON ROTOR EN JAULA DE ARDILLA

- a. Revisión general
- b. Reparación mecánica
- c. Arreglo de la parte eléctrica
- d. Reconstrucción del bobinado eléctrico
- e. Pruebas

3.9.1 Revisión general

Antes de empezar a desmontar el motor en todas sus partes, es menester tomar nota, sobre un registro particular, de los datos de la placa. Así será posible poderlo identificar cuando, por exigencias del taller, tenga que entremezclarse con otros en reparación.

Estos datos son:

- a. Nombre de la fábrica que ha construido el motor.
- b. Matrícula y tipo de motor
- c. La potencia efectiva en HP o en KW
- d. La tensión de alimentación
- e. Conexión de bobinado
- f. Frecuencia industrial

- g. El número de polos o revoluciones por minuto
- h. La intensidad en amperios (con carga)
- i. El factor de potencia o $\cos\phi$
- j. El tipo de servicio (continua o ininterrumpidamente)
- k. Si es hermético, autoprotegido; ventilación forzada o normal

Además de estos datos, podemos realizar un dibujo. En este haremos constar puntos, medidas en sí, características que consideremos que sean de mucha importancia y que nos sirvan de referencia en el momento en que nosotros realicemos el montaje.

3.9.2 Reparación mecánica

a) Desarme del motor

- *Librar el eje de la polea*, de engranajes y chavetas y de todo lo que pueda impedir la salida de las tapas o escudos. Después se saca con cuidado el rotor del estator, evitando golpear las bobinas.
- *Retirar las tapas*. Antes de realizar esta operación, es necesario marcar cada tapa con ligeros puntos, tanto con respecto al eje del motor como al estator (se hará un punto en un lado y dos puntos en el otro).
- *Se guardarán* en una cajita todas las piezas; las chavetas, los tornillos y tuercas, los pasadores, las arandelas, etc. Antes de sacar las tapas, asegurarse de que, si el motor es con bujes, los depósitos del aceite estén vacíos. Se levantarán los anillos de lubricación de manera que no reciban golpes que podrían deformarlos e inutilizarlos. Si el motor es con rulimanes deberán desmontarse los discos que los bloquean.
- *Salida del rotor del estator*. Liberado de las tapas del rotor, quedará apoyado sobre la parte inferior del estator. Para sacarlo, será bueno levantarlo y cuidar que las chapas del rotor no rocen, con las del estator, y tampoco con el bobinado.
- *Otra forma para mantener un orden en el desarme* es colocar las piezas según se vayan quitando del motor, en forma inversa a la distancia en la cual se va desarmando, de tal manera que, para armarlo, hay que comen-

zar desde la más cercana hasta la más lejana.

b) Revisión mecánica del motor desmontado

- *Control del eje.* Este podría estar golpeado, torcido, ovalado o presentar signos evidentes de otros daños mal reparados. Los extremos del eje podrían ser reparados con la ayuda de una rectificadora si las deformaciones no son graves o con ligero torneado y acabado; después, con rectificadora si los daños son más graves.
- *Control de bujes.* Los cojinetes planos pueden deformarse por falta de lubricación o por cualquier otra causa, y presentan un desgaste excesivo. En ese caso, es menester reconstruir uno o ambos. Los cojinetes van torneados según las nuevas dimensiones si el eje está rectificado.
- *Si se trata de cojinetes de bolas o rulimanes,* es necesario sustituir los que presentan signos de rayas en las bolas. Lo mismo deberá hacerse cuando el ruido revele que los rulimanes han llegado a un límite que no se puede tolerar para el funcionamiento regular del motor.
- *Control de los órganos de conexión.* Los tornillos o pasadores que sirvan para cerrar las tapas, para fijar las bases de las uniones y poleas, etc. pueden presentar las roscas aplastadas o rotas. Se necesita repararlos con terrajas apropiadas cuando ello sea posible, o bien sustituirlos.
- *Los mismos inconvenientes pueden presentarse en los huecos roscados.* También aquí se necesita reactivarlos con su propio mochuelo. Si esto no es posible porque la rosca está completamente dañada, cuando el espesor lo permite, hay que ensanchar el hueco y hacer rosca con otro mochuelo. También se puede, si el material lo permite, rellenar el hueco en suelda y construir la rosca con las mismas dimensiones primitivas.
- *Verificar las chavetas y las sedes respectivas* reconstruyendo las deformadas o las que tienen desgaste que no permite una segura conexión mecánica.
- *Las operaciones mecánicas aquí indicadas* no podrán ser conducidas a buen fin si todos los elementos que constituyen el motor en revisión no son cuidadosamente limpiados o librados de cualquier residuo, quitando grasa y limpiando las piezas con petróleo o gasolina. En esta clase de trabajo, es indispensable el orden y eliminar todas las causas que puedan

dar lugar a confundir las piezas de una máquina con piezas de otra.

c) Arreglo de la parte eléctrica

Hay algunos casos en los que se puede llegar a un arreglo satisfactorio con el cambio de una sola bobina o de las bobinas de una fase. Esto lo dejamos a buen criterio del técnico, el cual juzgará si es conveniente, ese arreglo y si las circunstancias son favorables y satisfactorias.

- *Cambio del bobinado*, en el caso del motor completamente quemado. Antes de proceder al corte del bobinado, es menester verificar si hay signos evidentes de que ese motor haya tenido reparaciones anteriores en algún taller que no sea la fábrica que haya construido el motor. Si el bobinado del motor no es el original, es necesario dibujar el esquema para poder conocer el tipo de este, si es de paso entero o recortado, el número de ranuras por polo fase, etc.
- *De las primeras bobinas que se sacan*, se hace el recuento del número de espiras por ranura y se llega a conocer la sección del alambre de cobre y el género del aislamiento de este, si está aislado con seda, algodón o esmalte. Un par de espiras en más o en menos para cada ranura, perjudican muchas veces el buen funcionamiento, el rendimiento y la misma duración del motor. En los pequeños talleres, con mucha frecuencia se sustituyen las características de un motor a ellos confiado, debido a una mayor ganancia y a las posibilidades, muchas veces demasiado limitadas, de ese taller. Así, si no se dispone de alambre aislado de las mismas características que el usado por el constructor, se usa con demasiada frecuencia otro de medida inferior y de aislamiento distinto. Si el alambre disponible presenta un diámetro mayor, se llenará la ranura con un número inferior de espiras.
- *Es suficiente un par de alambres menos por ranura* para que la inducción de los dientes del estator supere el valor establecido. Aquí se originan ruidos, fuerte calentamiento de las chapas magnéticas y elevada corriente en funcionamiento a vacío, etc.
- *Será bueno entonces contar las espiras del bobinado quemado*, solo para juzgar si el número de estas es el exacto y si la sección del alambre es la regular. Muchas veces este control nos revela la verdadera causa del mal funcionamiento de un motor.
- *Reparación del estator*: Cuando se ha retirado del estator el bobinado

viejo, hay que limpiarlo perfectamente, con gasolina si está demasiado sucio, o con disolvente.

- *Hay que controlar con cuidado como se encuentran los dientes de las ranuras.* Si se encuentran chapas dobladas, desplazadas o con puntas hay que enderezarlas y prensarlas con una prensa para eliminar todo distanciamiento irregular, sacando todas las irregularidades de entre dientes y entre las ranuras. Luego de quitar todos estos inconvenientes, es necesario limpiar el estator con un fuerte chorro de aire comprimido y seco, de manera que todo residuo de limalla metálica o de otro género sea expulsado.
- *Aislamiento de las ranuras del estator.* El aislamiento de las ranuras constituye una separación entre el bobinado del motor y las partes de este. El aislamiento de las ranuras es de máxima importancia: un aislamiento suficiente y escogido sin técnica se deteriora y se destruye rápidamente, poniendo fuera de servicio las máquinas y perjudicando la seguridad de las personas que las usan.

Un aislamiento puede ofrecer garantías solo con estas condiciones esenciales:

1. Debe ser estudiado y escogido con un justo criterio de personas competentes.
2. Debe ser aplicado por las personas ordenadas y conscientes.

El aislamiento de las ranuras debe ser escogido según el tipo de máquinas y la tensión con la cual deberá funcionar la temperatura a la que deberá trabajar el bobinado, el lugar donde el motor deberá ser colocado —local húmedo, vaporoso, con emanaciones ácidas—; etc. Para satisfacer estas necesidades, se dispone de varios tipos de aislantes dotados de características adecuadas.

Durante la operación de bobinado y las reparaciones que puede practicar el obrero suelen suceder inevitables desgastes que producen un deterioro de los aislantes de la ranura. Es menester prevenir este peligro protegiendo el devanado no según la tensión de ejercicio, sino con un buen margen de seguridad. Entonces, el motor acabado, barnizado y secado al horno será puesto por el tiempo de un minuto, primero con una tensión igual al doble de la tensión de alimentación, más 1000 voltios. La tensión se aplicará entre el bobinado y la masa; la prueba será entonces de:

$$V_m = 2 \times V + 1000$$

V_m : tensión aplicada entre el bobinado y la parte metálica del motor

V : tensión de alimentación medida entre las dos fases del motor. Por ejemplo, si el motor debe funcionar con una tensión de 220 voltios entre las fases (tensión de línea) deberá ser probado por el tiempo de un minuto primero a la tensión:

$$V_m = 2 \times V + 1000 = 1440V$$

3.10 TIPOS DE BOBINADOS

Para hacer los esquemas, se divide la periferia del núcleo o del estator sobre un plano, en tantos sectores como son los polos. Según la manera de efectuar la conexión de los devanados pertenecientes a los polos de distinto signo, se tiene tres sistemas de bobinado:

1. Espiral concéntrica
2. Imbricado
3. Ondulado

Estos tres sistemas se dividen en dos tipos:

- Polos homónimos- tipo A
- Polos alternados- tipo B

Un bobinado se dice tipo A cuando el número de los grupos de bobinas es igual al número de pares de polos (p); o sea, cuando todos los conductores de un sector se conectan con los de un sector adyacente.

Se dice de tipo B, cuando la mitad de los conductores de un sector se conectan con los conductores adyacentes.

Sistema de conexiones: puede conectarse en serie, paralelo y serie-paralelo.

3.11 DIFERENCIA ENTRE GRADOS

ELÉCTRICOS Y GEOMÉTRICOS

El desfase que existe entre dos polos opuestos (N_S), es de 180° eléctricos (e), es decir, un norte más un sur representarán una vuelta completa o sea 360° eléctricos. Si un motor tiene un par de polos los grados eléctricos, serán igual a los geométricos. Para saber cuántos grados eléctricos puede tener el estator basta con multiplicar el número de pares de polos por su equivalente de 360° .

$$^\circ e = 360^\circ p,$$

$$A_r = 360 \times \frac{2}{36} = 20^\circ e$$

Si tenemos dos pares de polos tendremos $720^\circ e$, entonces para saber cuántos grados habrá entre las ranuras, simplemente dividimos los grados eléctricos del estator para el número de ranuras. Por ejemplo:

- Un motor tiene dos pares de polos y treinta y seis ranuras. El ángulo entre ranuras será:
- Por lo tanto, si tiene que existir una diferencia de $120^\circ e$ entre fases, se tendrá desde la primera ranura, que es la entrada a la primera fase, seis ranuras más para la entrada a la segunda fase y así hasta la tercera.
- En nuestro caso, la 1 será la entrada de la primera fase; la 7, de la segunda; y la 13, de la tercera (aunque esta tendrá el signo cambiado).
- Las fases pueden conectarse en estrella o triángulo.

3.12 VELOCIDAD DE SINCRONISMO

La velocidad sincrónica se refiere a la del campo magnético del estator, pero el rotor funciona a una velocidad inferior.

$$N_c = 60 \times \frac{f}{p}$$

Estos motores se llaman asincrónicos porque su velocidad no depende rigurosamente de la frecuencia de la corriente de alimentación, pero resulta siempre un poco menos que la velocidad de sincronismo por razones que derivan de su principio de funcionamiento.

Así, pues, la velocidad de rotación del campo en r.p.m. debe ser:

Siendo:

f : es la frecuencia en períodos por segundo

p : el número de pares de polos

N_c : es la que se llama velocidad de sincronismo del motor

La velocidad de este tipo de motores se puede cambiar en forma proporcional a la variación de la frecuencia e inversamente proporcional a los cambios de los números de polos. La frecuencia se puede variar mediante aparatos eléctricos especiales. En cambio, el número de polos se lo hace cambiando las conexiones de los bobinados (cuando se tiene múltiples).

3.13 DESLIZAMIENTO

Si a un inducido (rotor), cuyas bobinas forman un circuito cerrado, se lo coloca en un campo magnético giratorio, desarrollará un par, porque las corrientes inducidas (las espiras son cortadas por el campo magnético y aparece una f.e.m. Por ser un circuito cerrado, circula una corriente y, al circular, se forma un campo magnético alrededor de esta) actúan juntamente con el campo magnético en rotación. Pero el inducido (rotor) no puede alcanzar la velocidad de rotación del campo. Para que sea así, las bobinas deberían dejar de cortar el flujo y no tendría que haber corriente en el rotor; por lo tanto, tampoco habrá par alguno.

La diferencia entre la velocidad de rotación del campo, y la velocidad del rotor, se llama deslizamiento del motor S .

Llamando N_r a la velocidad del rotor y N_c la velocidad de sincronismo, el deslizamiento, será:

$S = (N_c - N_r) / N_c$, que puede ser expresado en decimales o en tanto por ciento (si multiplicamos por 100).

De la fórmula aquí representada deducimos:

$$N_c \times S = N_c - N_r$$

$$N_r = f \times 60 \times \frac{(1 - S)}{p}$$

$N_r = N_c - N_c \times S = N_c (1 - S)$, que es la velocidad del rotor en función del des-

lizamiento.

El deslizamiento a plena carga de los motores industriales varía entre 1 % y 10 %, según su potencia y tipo. Por lo tanto, la velocidad del rotor de un motor de inducción está dada por la expresión:

, donde N_r se expresa en r.p.m. y S el deslizamiento en decimales.

3.14 ACABADOS Y PRUEBAS

3.14.1 Tratamientos térmicos

Una vez terminado el devanado, se prueba el aislamiento con el óhmetro a corriente continua con tensión de 500 voltios. Faltando el óhmetro se podría usar el «probador de aislamiento» de 500 a 1000 voltios C.A. Si no hay contactos con masa se lleva el estator al horno para el primer tratamiento térmico, o sea el secamiento, después de haberlo soplado con aire seco.

Se lo tendrá al horno de cuatro a cinco horas a la temperatura de 100 a 110 grados centígrados. Una vez que se haya secado el motor en el horno, se lo pondrá en una cuba de barniz aislante. Si no se la tiene, se podrá empapar de barniz con brocha todo el bobinado. Tras esta operación, se deja colocar el bobinado y antes de que la temperatura baje y se enfríe el motor. Se lleva otra vez al horno y se lo deja hasta cuando el barniz esté completamente oxidado. En estas condiciones, se solidifica y se torna insoluble (a los disolventes usados para dichos barnices).

Si el tratamiento está terminado, nos lo dirá el óhmetro que, estando el motor aún caliente, nos dará un aislamiento de 3-5 megaohmios.

3.14.2 Pruebas de rigidez

Acabado el tratamiento, la carcasa del motor deberá ser librada de cualquier residuo de barniz que pueda estorbar el correcto armado. Antes de montar el motor, es bueno proceder a una primera prueba de rigidez con unas tensiones un poco superiores a las normas ya previstas ($2U+1000$ V), de manera que pueda hacerse la debida reparación en el caso que se descubran algunas descargas a distancia en algún punto.

Si todo es regular, se monta el rotor, procurando que este no roce con ninguna parte mecánica ni eléctrica.

Se comprueba la potencia del motor con el electrodinamómetro. Si no se tiene esta herramienta, se hace la prueba en vacío y a cortocircuito.

Si el motor tiene que ser aplicado a máquinas que tengan interés particular, el acabado tiene que atender al punto de vista estético.

3.14.3 Normas para el mantenimiento de las máquinas eléctricas

Es indispensable ejecutar en todas las máquinas eléctricas una esmerada y continua limpieza para obtener un funcionamiento regular.

Es necesario especialmente evitar en los motores abiertos (depende del IP) el polvo que se suele acumular sobre los devanados. A tal objeto debe darse periódicamente una limpieza a la máquina mediante un fuerte chorro de aire seco producido por un compresor o con aparatos aspiradores.

A largos intervalos, se debe lavar el rotor y el estator. Esto se realiza con una brocha limpia y dura empapada en alcohol. Se debe tener cuidado en utilizar gasolina debido a la gran inflamabilidad. Nunca se usa petróleo.

Las partes metálicas de latón adquieren brillo tratándolas con una solución de acetato neutro de Cu, limpiando con piedra pómez las partes ennegrecidas y secando con trapos de lana.

Una inspección hecha muy a menudo de la lubricación es muy útil, pero, con un soporte y un rulimán de buena construcción, no es necesario realizarlo más de tres o cuatro veces al año. En caso de funcionamiento continuo, una vez al mes.

Si un soporte necesita mayor cantidad de aceite, se deberá buscar la causa del demasiado consumo de lubricante y sustituir eventualmente el soporte o el buje. El aceite lubricante tiene que ser muy fluido y no debe alterar su densidad a la temperatura máxima a la cual puede llegar el motor durante el funcionamiento.

El espesor del entrehierro (espacio entre el rotor y el estator) debe ser constante y uniformemente distribuido. Se necesita comprobar el entrehierro por lo menos dos veces al año, sirviéndose de láminas de acero de espesor calibrado o de calibradores sondas. La máquina se puede desarmar por lo menos una vez al año.

Para el cálculo, se necesita conocer lo siguiente:

- La potencia de salida en KW o HP
- La tensión nominal y el tipo de conexión
- El número de revoluciones requerido o el número de polos
- La frecuencia de trabajo

3.16 PRUEBAS DE RECEPCIÓN Y DIAGNÓSTICO

PARA MOTORES DE GRAN POTENCIA

3.16.1 Introducción

El procedimiento para motores grandes incluye, cuando llegan al taller:

- Prueba de resistencia de aislamiento (MEGER)
- Voltaje real
- Intensidad de arranque
- Intensidad de funcionamiento
- Revoluciones por minuto
- Temperatura
- Pruebas de estetoscopio

Este tipo de pruebas se lo realiza antes de desmontar el motor

- *Prueba de aislamiento (MEGER).* - Esta prueba se lo realiza con un instrumento denominado MEGER (ya que el aislamiento tiene que estar por encima de los 1000 ohmios, este aparato —a diferencia del óhmetro— tiene un generador de altísimo voltaje que permite medir grandes resistencias). Una deficiencia en el aislamiento puede ser una de las causas para que el funcionamiento del motor presente algunas anomalías.

La comprobación del aislamiento lo hacemos entre bobinas y entre bobinas y carcasa.

- *Voltaje nominal.* - Al motor, hay que aplicarle el voltaje nominal de placa, por cuanto algunos motores vienen diseñados para algunos voltajes, según la conexión que tengan. Hay que saber cuál es su voltaje nominal y, según esto, hay que darle la tensión adecuada.
- *Intensidad de arranque.* - Por medio de un amperímetro de gancho, podemos medir la intensidad en el momento de arranque o, en su defecto, colocamos los amperímetros en serie. La medida la comparamos con los datos de placa para saber si está dentro de los márgenes permisibles.
- *Intensidad de funcionamiento.* - Con los mismos amperímetros, podemos medir esta intensidad e igualmente comparamos con los datos de placa. Pero, si medimos con un amperímetro de gancho podemos tomar los tres cables a la vez, y si la medida nos da cero, esto significa que las fases están equilibradas.
- *Revoluciones por minuto.* - Las revoluciones por minuto (r.p.m.) se las puede medir con un tacómetro. Se recomienda hacer algunas mediciones durante una media hora, después de lo cual se saca la media.
- *Temperatura.* - Esta prueba se la realiza por medio de un termómetro digital. Los valores se toman en la carcasa y en los bobinados del estator. Esto se lo hace quince minutos después de su funcionamiento.
- *Prueba con estetoscopio.* - Esta prueba se la hace cuando sospechemos que existen ruidos anormales y no son susceptibles a nuestros oídos.

3.16.2 Desmontaje de motores de gran potencia

Después de conocer el diagnóstico previo y haber escogido las herramientas necesarias, se procede al desmontaje, esto se debe de hacer en forma eficiente, de tal manera que no se deforme y peor aún se rompa alguna parte del motor.

Antes de zafar alguna tuerca se debe proceder a la señalización de sus piezas, esto con la finalidad de que se nos facilite el armado. El proceso de desmonte sería el siguiente:

- Aflojamos la tapa del ventilador
- Sacamos el ventilador

- Aflojamos las contratapas
- Sacamos la tapa posterior o delantera
- Sacamos la tapa faltante
- Sacamos el rotor
- Sacamos los rodamientos
- Desconectamos la bornera del estator

Después de esto se puede hacer un inventario de piezas para constatar con cuáles ingresó el motor y las piezas agregadas o cambiadas cuando salga.

Cuando el motor ha sido reparado, se verifican nuevamente todas las características de placa, haciendo las pruebas respectivas.

3.16.3 Mantenimiento

Vamos a ver dos tipos de mantenimiento. Estos son mecánico y eléctrico.

- *Mantenimiento mecánico.* - Primero desmontamos el motor luego limpiamos sus partes con gasolina o diésel, también se puede utilizar aire comprimido, pero teniendo en cuenta que puede haber piezas muy pequeñas que podrían perderse. Cuando vienen elementos con grasa, hay que primero limpiarlos con una franela y después con gasolina. Luego de esto se les pasa una capa de aceite para evitar que se corroan o se oxiden.
- *Mantenimiento eléctrico.* - En primer lugar, se procede a una limpieza general de polvo, tierra, pelusas, etc. Para esto utilizamos brochas adecuadas para no dañar o simplemente lastimar los bobinados. Después se hace una inspección visual para ver el color del bobinado; si es uniforme y no tiene ninguna parte negra ni el aislamiento presente ninguna anomalía (signos visibles de mayor concentración de esmalte en algún punto fijo), se procede a medir el aislamiento. Debido a que la causa de un bajo aislamiento es la humedad, al motor hay que secarlo, esto se lo puede hacer en un horno. Las salidas de las bobinas frecuentemente se deterioran, por lo que hay que revisarlas con frecuencia.

3.17 GENERADORES (ALTERNADORES)

GENERALIDADES

Los generadores, también conocidos como alternadores, son dispositivos que convierten la energía mecánica en energía eléctrica. Su funcionamiento se basa en la inducción electromagnética, lo que significa que generan electricidad al mover un conductor a través de un campo magnético.

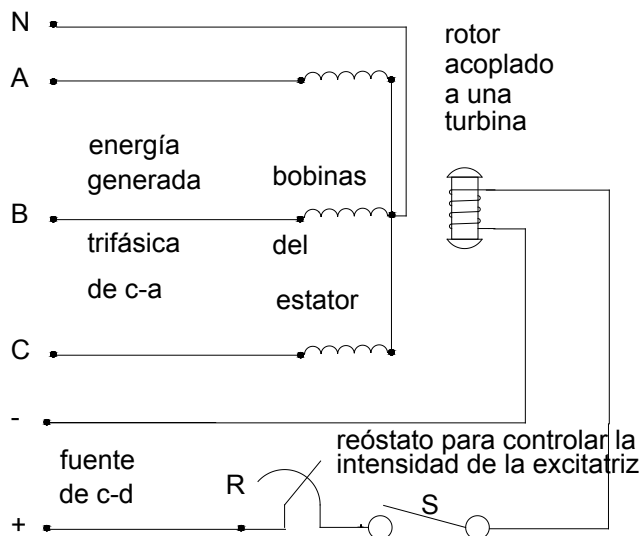
Estos dispositivos son ampliamente utilizados en la generación de energía eléctrica a gran escala en plantas de energía, pero también se pueden encontrar en aplicaciones más pequeñas, como en sistemas de energía de emergencia.

El diseño y la construcción de los generadores varían según su tamaño y aplicación. En general, un generador consta de un rotor (la parte que gira) y un estator (la parte fija).

Un alternador comparte similitudes en su construcción con un motor sincrónico de rotor excitado. Está compuesto por un estator con un arrollamiento trifásico y un rotor con polos salientes excitados mediante corriente continua (fig. 3.7).

Del arrollamiento del estator, que por lo regular va conectado en estrella, se sacan al exterior tres hilos, y cuatro si la distribución se hace con tres fases y neutro.

La turbina pone en marcha el alternador. Posteriormente, los polos del rotor se excitan gradualmente con corriente continua. A medida que el campo magnético generado por el rotor gira, el arrollamiento del estator corta líneas de fuerza,



induciendo así una *f.e.m.* en él.

Dado que la frecuencia de la corriente producida por un alternador depende de la velocidad y del número de polos, la variación de la tensión de excitación no afectará la frecuencia, pero sí influirá en la tensión generada por la máquina. Esta tensión experimenta cambios con la carga, por lo que, para mantenerla constante, se requiere establecer un sistema de regulación del voltaje de excitación. Este ajuste puede realizarse manualmente o mediante un regulador automático de tensión.

Figura 3.7.
Generador trifásico

Fuente: Wildi y De Vito, 1975

Para aumentar la potencia en el suministro de energía eléctrica, se conectan las centrales eléctricas en paralelo y el funcionamiento de estas está regulado en forma centralizada.

Tienen que haber coherencia entre el consumo de energía y la generación de tal manera que no existan desperdicios energéticos, es decir que la generación no sea excesiva ante el consumo.

En las horas pico (entre las 18:30 y 22:00), el funcionamiento de las centrales es el máximo y las del valle (alrededor de las 06:00) es el mínimo.

¿Cómo se genera la fuerza electromotriz?

Para el efecto, recordamos las tres leyes fundamentales del electromagnetismo.

Para que se produzca una *f.e.m.*, es necesario que exista un campo magnético y este se encuentra en el rotor. El campo magnético tiene que ser regulado, por lo tanto, tiene que ser un electroimán. Este se controla por medio de un voltaje de corriente continua. La fuente puede ser independiente o de autoexcitación (excitatriz); lo importante es que se pueda regular mediante un potenciómetro o una resistencia variable.

En el estator, se encuentran las bobinas que tienen que ser cortadas por el flujo magnético producido en el estator, por lo que, la *f.e.m.* , depende de:

$$e = N \times \Phi \times \omega [V]$$

Vamos a explicar cada uno de estos parámetros.

La *N* es el número de espiras del estator. Es un valor constante; depende,

entre otras cosas, de la potencia del generador.

El flujo magnético Φ depende de la construcción del rotor de su número de espiras que es constante y de la intensidad que circula por su bobinado (I_r). Esta es variable y depende del voltaje (U_r) que se aplique y de la resistencia del rotor (R_r):

$$I_r = U_r / R_r$$

Entonces el flujo Φ es directamente proporcional a la .

La velocidad de giro del rotor ω , depende de la turbina. Mayor velocidad de la turbina, mayor ω , es decir, son directamente proporcionales.

Partiendo de lo último, vemos que, si la turbina gira más rápido, mayor será la e , pero la frecuencia depende de la velocidad de giro de la turbina. Por lo tanto, su velocidad debe ser constante, porque uno de los parámetros de la calidad de la energía eléctrica depende de la frecuencia. Con la carga (mayor consumo de energía), por la tercera ley de Newton, se tiende a frenar la turbina, por lo que se debe de aumentar el caudal de agua en el caso de las hidroeléctricas o acelerar en el caso de combustión interna.

En definitiva, por el lado de la velocidad de giro ω , no se debe controlar la f.e.m.; solo se controla la frecuencia.

Una forma efectiva de controlar la f.e.m. es controlando el flujo magnético producido en el rotor y se lo realiza de la siguiente manera:

1. El flujo Φ es directamente proporcional a la I_r , y esta es proporcional al voltaje U_r .
2. La R_r es fija y está conectada en serie con el reóstato R (fig. 3.7).
3. Por lo tanto, el flujo se controla con el reóstato variable de la excitatriz (R).

$$I_r = U_r / (R_r + R)$$

¿Cómo aparece voltaje en la excitatriz de autoinducción?

Cuando el generador con autoinducción es nuevo, se necesita cebarle por medio de una batería para que funcione. Después ya no lo necesita, debido a que tendrá un magnetismo remanente en sus polos.

Para que aparezca una f.e.m., es necesario que exista movimiento y un campo magnético.

Tenemos que recordar que el eje de la turbina está acoplado con el eje del rotor del generador y del rotor de la excitatriz.

3.17.1 Clasificación de los alternadores

El alternador es una máquina sincrónica que funciona como generador. En él se inducen fuerzas electromotrices de frecuencia proporcional a la velocidad, obteniéndose tensiones y corrientes alternas.

Se clasifican según la forma del rotor, siendo estos de polos salientes y polos lisos. Se utilizan de polos salientes cuando la velocidad de rotación no es muy alta, en cambio de polos lisos es para los turbogeneradores, es decir de altas velocidades.

Algunos comentarios sobre las características de cada generador:

- Generador en derivación con excitación (excitatriz) independiente: buena regulación, pero requiere una fuente de c-d independiente para excitación del campo.
- Generador en derivación autoexcitable: provee su propia excitación del campo, pero tiene una regulación poco satisfactoria.
- Generador compuesto: provee su propia excitación del campo y tiene una mejor regulación (controlado por el número de vueltas en el devanado en el campo serie).
- Generador compuesto diferencial: la potencia de salida es baja, la regulación no es buena (el flujo de campo en serie se opone al flujo de campo en derivación).
- Generador serie: el voltaje de salida varía extensamente con cambios de carga.

3.17.2 Generador con carga

Uno de los objetivos fundamentales de los generadores cuando tienen carga es la de regular el voltaje y la frecuencia, parámetros fundamentales de la calidad de la energía eléctrica.

Para la regulación de la frecuencia, se tiene que regular la velocidad de la

turbina de tal manera que nos dé un valor cercano a los 60 Hz.

La frecuencia variará de acuerdo con la carga. Por la tercera ley de Newton, tenemos que, a una acción, se produce una reacción igual y contraria. En este caso, al conectar un aparato eléctrico en nuestras casas, lo que hacemos es frenar a las turbinas de las generadoras. Puede ser un foco, una ducha; mientras más potente sea el aparato que conectemos, con más fuerza frenamos la turbina y, cuando desconectamos, la turbina se acelera.

Para contrarrestar estas acciones, se tiene un control automático de regulación de velocidad de giro de las turbinas.

Para regular el voltaje, nos basamos en la excitatriz. Igual que en el caso anterior, cuando encendemos un equipo eléctrico, comienza a circular corriente. Por lo tanto, se produce una caída de tensión tanto en las redes eléctricas como en los conductores del generador. Para contrarrestar estas caídas de tensión, tenemos que aumentar o disminuir el campo magnético de la excitatriz.

3.17.3 Generadores de corriente continua

Existen generadores con excitación independiente y autoexcitados.

El generador con excitación independiente tiene muchas aplicaciones. Sin embargo, posee la desventaja de que se requiere una fuente de alimentación independiente de corriente directa, para excitar el campo en derivación. Esto es costoso en unos casos y, en ocasiones, inconveniente, por lo que el generador de CD autoexcitable es a menudo más apropiado.

En un generador con autoexcitación, el devanado de campo se conecta a la salida del generador.

Todos los generadores antes citados tienen la misma construcción. La autoexcitación es posible debido al magnetismo remanente de las partes de los polos del estator. Cuando gira la armadura, se induce un pequeño voltaje en sus devanados. Cuando el devanado de campo se conecta en paralelo (en derivación) con la armadura, se tendrá el flujo de una pequeña corriente de campo. Si esta pequeña corriente de campo fluye en sentido adecuado, el magnetismo remanente se refuerza, lo cual aumenta más todavía el voltaje de armadura y, por lo tanto, se produce un rápido aumento de voltaje.

Si la corriente de campo no fluye en el sentido no adecuado, el magnetismo

remanente se reduce y no se genera voltaje. En este caso, la situación se corrige intercambiando simplemente los terminales del campo en derivación.

3.18 CENTRALES ELÉCTRICAS

Las centrales eléctricas son instalaciones industriales diseñadas para generar energía eléctrica a gran escala. Estas instalaciones son esenciales para suministrar energía eléctrica a comunidades enteras, así como a sectores industriales y comerciales. Estas pueden generar energía eléctrica a partir de una variedad de fuentes de energía, como combustibles fósiles (carbón, petróleo y gas), energía nuclear, hidroeléctrica, eólica o solar.

Estos generadores pueden ser movidos por turbinas de vapor, de gas, hidráulicas o eólicas, dependiendo de la fuente de energía usada. La electricidad generada en la central se transmite a través de líneas de alta tensión y se distribuye a las comunidades y a los usuarios finales a través de líneas de distribución.

Las centrales eléctricas son una parte fundamental de la infraestructura eléctrica y son esenciales para satisfacer la creciente demanda de energía eléctrica en todo el mundo. A medida que la tecnología y las fuentes de energía evolucionan, las centrales eléctricas también están evolucionando para producir energía de manera más eficiente y sostenible.

3.18.1 Central hidroeléctrica

La función de una central hidroeléctrica es utilizar la energía potencial del agua almacenada y convertirla, primero en energía mecánica y luego en eléctrica.

La potencia eléctrica que se obtiene en una central es directamente proporcional a la altura del salto de agua y al caudal instalado.

En forma general se calcula por la fórmula:

$$P = K \times 9,81 \times Q \times H$$

Siendo:

K : rendimiento

Q : caudal

H : altura

Ventajas

No requieren combustible, sino que usan una forma renovable de energía, constantemente repuesta por la naturaleza de manera gratuita.

Es limpia, pues no contamina ni el aire ni el agua.

A menudo puede combinarse con otros beneficios, como riego, protección contra las inundaciones, suministro de agua, caminos, navegación y aún ornamentación del terreno y turismo.

Los costos de mantenimiento y explotación son bajos.

La turbina hidráulica es una máquina sencilla, eficiente y segura, que puede ponerse en marcha y detenerse con rapidez y requiere poca vigilancia. Sus costes de mantenimiento, por lo general, son reducidos

Inconvenientes

Las obras de ingeniería necesarias para aprovechar la energía hidráulica tienen una duración considerable.

Los costos de capital por kilovatio instalado son, con frecuencia, muy altos.

El emplazamiento, determinado por características naturales, puede estar lejos del centro o centros de consumo y exigir la construcción de un sistema de transmisión de electricidad, lo que significa un aumento de la inversión y en los costos de mantenimiento y pérdida de energía.

La construcción lleva, por lo común, largo tiempo en comparación con la de las centrales termoeléctricas.

La disponibilidad de energía puede fluctuar de estación en estación y de año en año.

3.18.2 Central eólica

Una central eléctrica eólica es una instalación que utiliza la energía cinética del viento para generar electricidad. El funcionamiento básico de una central eólica implica la utilización de grandes turbinas eólicas que se ubican en lugares

estratégicos para aprovechar la fuerza del viento.

Las turbinas eólicas están diseñadas para captar la energía del viento mediante sus palas giratorias, que son impulsadas por la fuerza del viento. Estas palas giratorias están conectadas a un generador que convierte la energía cinética en energía eléctrica. Esta electricidad generada se transmite a través de líneas de transmisión y se distribuye a los consumidores finales.

Las centrales eléctricas eólicas son una forma de generación de energía renovable debido a que no emiten gases de efecto invernadero ni otros contaminantes atmosféricos. Además, los costos de operación y mantenimiento de estas centrales son relativamente bajos en comparación con otras formas de generación de energía.

Aunque las centrales eléctricas eólicas tienen muchas ventajas, también presentan algunos desafíos, como la dependencia del viento y la necesidad de ubicarse en áreas donde el viento es constante y fuerte. Sin embargo, a medida que la tecnología mejora y los costos de instalación se reducen, se espera que las centrales eléctricas eólicas sean cada vez más populares como una fuente de energía renovable.

Como se produce la energía eólica

La energía del viento está relacionada con el movimiento de las masas de aire que se desplazan de áreas de alta presión atmosférica hacia áreas adyacentes de baja presión, con velocidades proporcionales al gradiente de presión.

Los vientos se generan a causa del calentamiento no uniforme de la superficie terrestre por parte de la radiación solar. Entre el 1 % y 2 % de la energía proveniente del sol se convierte en viento. De día, las masas de aire sobre los océanos, los mares y los lagos se mantienen frías con relación a las áreas vecinas situadas sobre las masas continentales.

La ventaja es que el aire es gratis pero la desventaja es que no podemos controlar la velocidad del viento.

3.18.3 Grupo electrógeno

Un grupo electrógeno es una máquina que mueve un generador eléctrico a través de un motor de combustión interna.

Son comúnmente utilizados cuando hay déficit en la generación de energía eléctrica de algún lugar, o cuando son frecuentes los cortes en el suministro eléctrico.

Si el motor que mueve un alternador es de combustión interna, el grupo se llama grupo electrógeno, que significa grupo que genera energía eléctrica.

Aplicaciones

Primarias

- En sitios remotos
- En áreas totalmente inaccesibles para las líneas de transmisión eléctrica
- Para proveer energía eléctrica a menor costo que las empresas de energía
- En la operación de equipos delicados

Emergencia o auxiliares

Como fuente auxiliar o de emergencia, un grupo electrógeno constituye una especie de seguro eléctrico en caso de fallar el suministro de energía. Las aplicaciones de un grupo electrógeno como fuente auxiliar caen en tres grandes categorías:

- Para cumplir requisitos de seguridad públicas y privada
- Para cumplir requisitos de seguridad económica
- Como fuente para el respaldo de la demanda máxima

Partes

Motor. El motor representa nuestra fuente de energía mecánica para que el alternador gire y genere electricidad. Existe dos tipos de motores: de gasolina y de gasoil (diésel). Generalmente, los motores diésel son los más utilizados en los grupos electrógenos por sus prestaciones mecánicas, ecológicas y económicas.

Regulación del motor. El regulador del motor es un dispositivo mecánico diseñado para mantener una velocidad constante del motor.

Sistema de refrigeración. El sistema de refrigeración del motor puede ser por medio de agua, aceite o aire. El sistema de refrigeración por aire consiste en un

ventilador de gran capacidad que hace pasar aire frío a lo largo del motor para enfriarlo. El sistema de refrigeración por agua/aceite consta de un radiador y un ventilador interior para enfriar sus propios componentes

Generador eléctrico. La energía eléctrica de salida se produce por medio de un alternador apantallado, protegido contra salpicaduras, autoexcitado, autorregulado y sin escobillas acoplado con precisión al motor, aunque también se pueden acoplar alternadores con escobillas para aquellos grupos cuyo funcionamiento vaya a ser limitado y, en ninguna circunstancia, forzado a regímenes mayores.

Silenciador y sistema de escape. El silenciador de escape va instalado en el grupo electrógeno. El silenciador y el sistema de escape reducen la emisión de ruidos producidos por el motor.

Sistema de control. Se puede instalar uno de los diferentes tipos de paneles y sistemas de control para controlar el funcionamiento y salida del grupo y para protegerlo contra posibles fallos en el funcionamiento.

3.19 CAUSAS DE LAS FALLAS EN LAS MÁQUINAS ELÉCTRICAS

Pérdida de aislamiento: la pérdida de aislamiento se produce debido a sobrevoltajes transitorios de corta duración, causados por maniobras, descargas atmosféricas directas o indirectas. Esta falla en el aislamiento resulta en corrientes de falla o cortocircuitos, que pueden alcanzar de diez a treinta veces la corriente nominal del equipo. Normalmente, la corriente de falla disminuye en secuencia, desde las ocasionadas por fallas 3-L, luego L-L-T, seguido de L-L y, finalmente, L-T.

Donde: L – línea, T - tierra

Envejecimiento del aislamiento: este fenómeno puede provocar la interrupción a voltajes con frecuencias normales.

Causas externas: factores externos como ramas de árboles, aves, roedores, etc., que pueden unir dos conductores o un conductor energizado a tierra.

Fallas de fase o tierra: las fallas que involucran más de una fase, con o sin contacto a tierra, se denominan fallas de fase; mientras que las que involucran cualquier fase con contacto a tierra se llaman fallas a tierra.

Fallas permanentes: causadas por perforación o ruptura del aislamiento, ruptura de conductores u objetos en contacto permanente con los conductores de fase. Estas fallas son detectadas por el relé, que envía la señal de apertura al interruptor.

Fallas transitorias: de corta duración, ocasionadas por sobrevoltajes transitorios, generalmente debido a descargas en los aisladores. El relé detecta la falla y el circuito interruptor se dispara para despejarla. Después de un tiempo, la ruta de la falla se desioniza, y el interruptor puede cerrar manual o automáticamente para restaurar el suministro.

Fallas semitransitorias: producidas por objetos externos al sistema, como ramas, árboles o animales. En líneas de media tensión, se puede superar la falla mediante interruptores con recierre automático, especialmente en niveles de tensión más bajos.

Efectos de las fallas: las fallas pueden causar daños en generadores, transformadores, barras y otros equipos debido al sobrecalentamiento y las fuerzas mecánicas. La formación de arcos puede provocar incendios, y las fallas también afectan el nivel de tensión y el perfil de frecuencia en el sistema de potencia, lo que afecta la sincronización de las máquinas y la interconexión de los sistemas de potencia.

Tipos de dispositivos de protección

Relés que actúan sobre interruptores: utilizados en instalaciones eléctricas con tensiones superiores a 1000 V.

Fusibles: empleados en instalaciones industriales y en redes de distribución y subtransmisión.

Reconectores o restauradores automáticos: usados en redes de subtransmisión y distribución.

Interruptores automáticos (térmicos, magnéticos o termomagnéticos): aplicados para la protección de instalaciones de tensión inferior a 1000 V, generalmente en entornos industriales y comerciales.

Confiabilidad: la confiabilidad de un dispositivo o sistema de protección se expresa mediante su capacidad para operar correctamente en situaciones para las cuales fue diseñado. La seguridad implica la certeza de que un dispositivo no operará incorrectamente, independientemente del estado del sistema de potencia.

Sensitividad y selectividad: la sensibilidad se refiere a la relación entre la respuesta del dispositivo y el cambio en la entrada. La selectividad es la capacidad de los dispositivos de protección para diferenciar entre condiciones que requieren operación y aquellas que no. Ambos son esenciales para asegurar el correcto funcionamiento de los interruptores apropiados.

Velocidad de actuación: la velocidad de actuación de una protección se mide por el tiempo que tarda en emitir la orden de apertura a los interruptores. El objetivo principal es despejar el elemento fallado lo más rápido posible para mantener la estabilidad del sistema.

Estabilidad: un relé se considera estable si, partiendo de un estado estacionario, vuelve al mismo estado después de la introducción y remoción de disturbios en el sistema.

Sobrecorriente: este término se utiliza para expresar las consecuencias de un cortocircuito. Los cortocircuitos son el foco principal de atención en la protección de sistemas de media y alta tensión, debido a que generan altas corrientes que pueden causar daño térmico y mecánico.

Sobrecarga: la sobrecarga se refiere a la demanda de carga excesiva, principalmente en sistemas de baja tensión, lo que genera disipación térmica en los elementos conductores.

Interrupción de fase: La interrupción de una fase en un sistema trifásico provoca desequilibrio de corrientes y puede afectar máquinas rotativas. Los sistemas de distribución pueden tolerar la apertura continua de fases sin problemas.

Sobretensiones: pueden originarse interna o externamente y afectar la vida útil de los elementos aislantes. Las sobretensiones externas son causadas por fenómenos atmosféricos, mientras que las internas pueden deberse a cortocircuitos o maniobras de interruptores.

REFERENCIAS

- Aulafácil. (s.f.). *Partes esenciales de un motor y sus nombres*. <https://www.aula-facil.com/cursos/fisica/electromagnetismo/partes-esenciales-de-un-motor-y-sus-nombres-130072>
- Chapman, S. J. (2012). *Máquinas eléctricas*, 5.^a ed. McGraw Hill.
- Cuesta, J. A. (2018). *Análisis de arranque de motores eléctricos monofásicos y bifásicos*. Universidad de Valladolid. <https://uvadoc.uva.es/handle/10324/30524>
- DirectIndustry. (2023). *Motor con condensador*. https://www.google.com/search?sca_esv=551905734&hl=es&q=motor+con+condensador&tbm=isch&source=lnms&sa=X&ved=2ahUKEwjmr7-fs7KAAxX1TDA-BHar9AU8Q0pQJegQIDBAB&biw=1522&bih=726&dpr=1.25#imgsrc=-geNVUR3dG0_TIM
- Documentación técnica (s.f.). *Manuales*. Documentación Técnica. <https://doczz.net/doc/1307587/manuales>
- EcuRobot. (2022, 26 de abril). *Tipos de motores rotativos para proyectos de Arduino*. Ecuarobot. <https://ecuarobot.com/2022/04/26/tipos-de-motores-rotativos-para-proyectos-de-arduino/>
- Galindo, J. (2013, 27 octubre). *Motores trifásicos de inducción (rotor jaula de ardilla y rotor devanado)* [Video]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=kR5ILgdpTpU>
- García, J. R. (s.f.). *Arranque de motores monofásicos de 3 HP*. <https://vdocuments.mx/arranque-de-motores-monofasicos-de-3-hp.html?page=1>
- Huasacca Castilo, José. (2023, 22 de junio). «Motores eléctrico». *Mi Primera Revista Digital*. https://issuu.com/jose2704/docs/motores_trifasicos/s/26855216
- Ingtelecto. (s. f.). *Construcción de transformadores*. Intelegto. <https://ingtelecto.com/construccion-de-transformadores/>
- Ivanov, S. (1984). *Máquinas eléctricas*. Mir.

- Joaquín, J. (s.f.). *Motores de corriente continua*. Junta de Andalucía. <https://www.juntadeandalucia.es/averroes/centrostatic/21700290/helvia/aula/archivos/repositorio/0/29/html/Motores%20de%20corriente%20continua.htm>
- Kosow, I. L. (1969). *Máquinas eléctricas*. Prentice-Hall Hispanoamericana.
- Lawrie, R. J. (1987). *Biblioteca práctica de motores eléctricos* (No. 621.46 L424b). Océano.
- Lozano, J. (s. f.). *Trabajo Nro. 2. El motor asincrónico*. Teoría Electromecánica. <http://adacastrocarlosferminjesusfermin.blogspot.com/2011/09/trabajo-nro-2-el-motor-asincronico.html>
- Martínez, M. C. (1992). *Arrancadores estáticos para motores monofásicos de inducción*. Universidad Nacional Autónoma de México. https://ru.dgb.unam.mx/handle/DGB_UNAM/TES01000013382
- Mier Quiroga, Luis. (2012). *Control difuso de un motor de inducción basado en un sistema de desarrollo PSoC 5*.
- Munizaga, M. (2017). *Análisis del funcionamiento de un motor eléctrico monofásico de 2 HP y propuesta de solución para su reparación*. Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí. <https://repositorio.ulead.edu.ec/bitstream/123456789/3619/1/ULEAM-IEL-0069.pdf>
- Ramírez, G. (2008). *Transformadores eléctricos* [Presentación de diapositivas]. <https://es.slideshare.net/engelfire/transformadores-electricos-presentation>
- Ramonmar. (2024). *Apuntes de máquinas eléctricas*. Ramonmar. <http://ramonmar.mex.tl/>.
- Ramos Becerra, K.E. (2016). *Análisis del mantenimiento preventivo en un motor eléctrico asíncrono por temperatura de trabajo* [Tesis de proyecto de grado]. Universidad Tecnológica de Pereira. <https://repositorio.utp.edu.co/server/api/core/bitstreams/>
- Ricalday Adrian. (2018). *Partes del motor monofásico*. <https://www.google.com/search?q=partes+del+motor+monofasico&tbm=isch&source=lnms&sa=X&ved=2ahUKEwib15i9qrKAAXXTnGoFHcRiBmIQ0pQJegQIDxA-B&biw=1522&bih=726&dpr=1.25#imgrc=GP1sMXej1ufUiM>

- Rodríguez Pozueta, M. A. (2019). *Constitución de las máquinas eléctricas*. Universidad de Cantabria.
- Rosales, E. A. (2000). *Modelo de simulación para la operación de motores eléctricos monofásicos*. Universidad Nacional Autónoma de México. https://ru.dgb.unam.mx/handle/DGB_UNAM/TES01000643340
- Sánchez, J. M. (s.f.). *Arranque de motores monofásicos: controladores y dispositivos de protección*. SlidePlayer. <https://slideplayer.es/slide/11119876/>
- Sandoval, J. L. (1987). *Arranque de motores monofásicos con dispositivos de estado sólido*. Universidad Nacional Autónoma de México. https://ru.dgb.unam.mx/handle/DGB_UNAM/TES01000111573
- Sapiensman. (2017). *Partes de la máquina de corriente continua*. https://www.google.com/search?sca_esv=551860643&q=partes+de+la+M%C3%A1quina+de+corriente+continua&tbm=isch&source=lnms&sa=X&ved=2ahUKEwjil_Py6rGAAXW3SzABHSnWCIEQ0pQJegQIDBAB&biw=1522&bih=682&dpr=1.25#imgsrc=owiuH3VIYQQYWM
- Siaguanta (s.f.). *Motores monofásicos*. Siaguanta. <https://siaguanta.com/c-tecnologia/motores-monofasicos/>
- Smolenski, A. I. (1984). *Máquinas eléctricas: Transformadores*. Mir.
- Tecnología Mariola. (2017). *Transformador monofásico con núcleo de hierro y devanado secundario*. Tecnología Mariola. <http://tecnologiariamariola.blogspot.com/2017/01/51-maquinas-electricas.html>
- Test Motors. (2017). *Defectos de fabricación del rotor en un motor asíncrono de inducción de 4 kW*. Recuperado de <https://www.interempresas.net/Robotica/Articulos/168184-Test-Motors-detecta-defectos-fabricacion-rotor-motor-asincrono-induccion-4-kW.html>
- Universidad de Zaragoza (s.f.). *Técnicas de control de motores eléctricos*. <https://zagan.unizar.es/record/5214>
- UPM (2011). *Control de motores eléctricos: Arranque, parada y variación de velocidad*. <https://oa.upm.es/10791/>
- Ureña Martín, M. (s.f.). *Diseño de un variador de velocidad de CA*. Tesis de maestría, Universidad de Valladolid, Escuela de Ingenierías Industriales

- les, Máster en Ingeniería Industrial. <https://uvadoc.uva.es/bitstream/handle/10324/24292/TFM-P-565.pdf?sequence=1>
- Velasco, M. J. (2000). *Selección de motores eléctricos y diseño de sus circuitos de arranque*. Universidad Nacional Autónoma de México. https://ru.dgb.unam.mx/handle/DGB_UNAM/TES01000685362
- Villa, C. (2015). *Reparación de motores eléctricos monofásicos*. <https://idoc.tips/reparacion-de-motores-1-1pdf-pdf-free.html>
- Wildi, T. (2007). *Máquinas eléctricas y sistemas de potencia*, 6.^a ed. Pearson.
- Wildi, T. y De Vito M. J. (1975). *Experimentos con equipo eléctrico*. Limusa.
- Грубов, В. И., & Кирдан, В. С. (1969). Электронные вычислительные машины и моделирующие устройства: Справочник. Наукова думка.

Anexo 1. Rotor de una máquina eléctrica

El rotor (foto) es una de las partes móviles de una máquina eléctrica. Es el componente que genera un campo magnético al ser alimentado con corriente eléctrica, y al enfrentarse con los polos magnéticos del inductor o estator, provoca la rotación de este.

En el rotor de una máquina eléctrica, podemos identificar diferentes componentes. Por un lado, las bobinas se enrollan alrededor de láminas de acero para potenciar su efecto magnético. Por otro lado, encontramos el colector, cuya función es establecer la conexión entre el rotor y la fuente de energía, que puede ser una pila, batería o dinamo. Este enlace se logra mediante láminas, comúnmente de cobre, conocidas como delgas.

Anexo 1.

Rotor de una máquina eléctrica



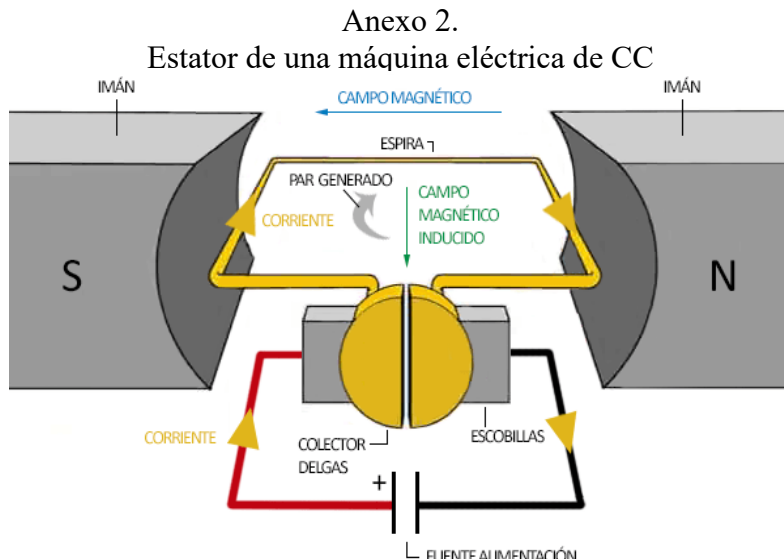
Rotor en jaula de Ardilla

Fuente: <https://www.aulafacil.com/cursos/fisica/electromagnetismo/partes-esenciales-de-un-motor-y-sus-nombres-l30072>

Anexo 2. Estator de una máquina eléctrica de CC

En un motor eléctrico de corriente continua, el estator (ver imagen adjunta) constituye la parte inmóvil equipada con un imán permanente que genera un campo magnético en el interior del motor.

En el interior del estator, se incorpora una espira a través de la cual fluye una corriente eléctrica, que origina un campo magnético adicional. El desfase angular entre estos dos campos magnéticos genera un par de giro, dando inicio al movimiento del rotor hasta que ambos campos magnéticos quedan alineados. Si esta alineación persistiera, el motor se detendría. Para evitar este escenario, es esencial invertir la dirección de uno de los campos magnéticos. Esta inversión se logra al cambiar el sentido de la corriente que atraviesa la espira.



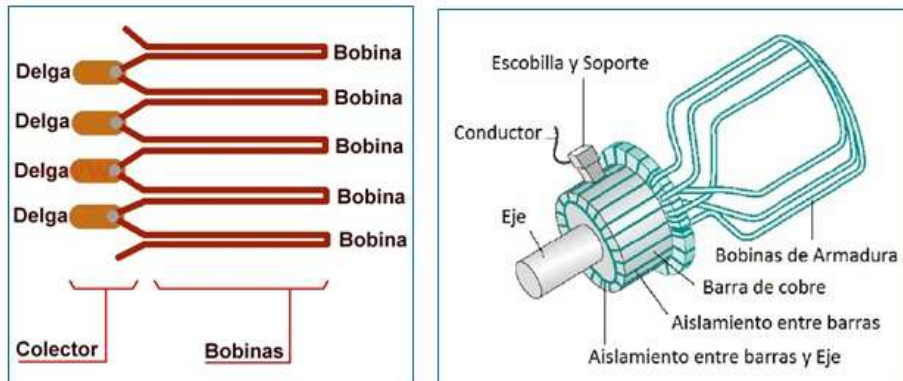
Fuente: <https://www.luisllamas.es/tipos-motores-rotativos-proyectos-arduino/>

En los motores eléctricos de corriente continua, el sistema que alimenta la espira está compuesto por un colector de delgas, que es un anillo dividido unido al eje del motor, y unas escobillas que son contactos deslizantes que rozan contra el colector de delgas y transmiten la electricidad.

Al superar un ángulo específico, las escobillas transitan de una delga a la siguiente. Este cambio de posición ocasiona la inversión de la corriente en la espira. De este modo, el conjunto compuesto por las escobillas y el colector de delgas actúa como un inversor mecánico, posibilitando así el giro continuo del motor.

Anexo 3. Delgas, colector de delgas y bobinas

Anexo 3.
Delgas (izq.), colector de delgas y bobinas (der)

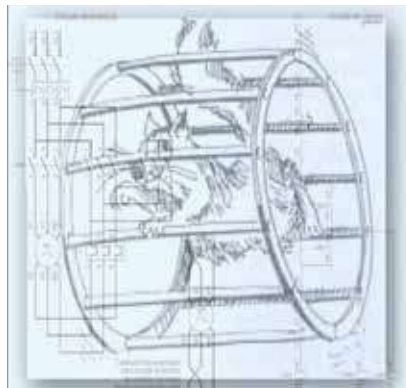


Fuente: <https://tecnologiariamariola.blogspot.com/2017/01/51-maquinas-electricas.html>

Anexo 4. Rotor: jaula de ardilla (1)

El rotor de jaula de ardilla es un tipo de rotor utilizado en los motores eléctricos de inducción. Está compuesto por una serie de barras de cobre o aluminio, que se disponen en paralelo en ranuras del núcleo del rotor, formando una estructura similar a una jaula

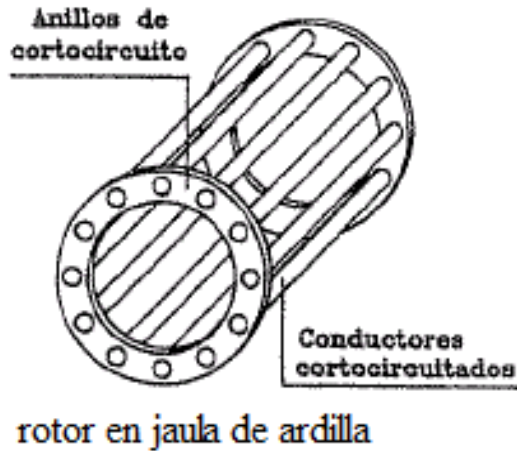
Anexo 4.
Rotor jaula de ardilla (1)



Fuente: <https://www.youtube.com/watch?v=kR5ILgdpTpU>

Anexo 5. Rotor jaula de ardilla (2))

Anexo 5.
Rotor jaula de ardilla (2)



Fuente: https://maaz.ihmc.us/rid=1K0Z5VF8H-20W2JZR-V6P/maquinas_electricas.cmap

Anexo 6. rotorjaula de ardilla (3)

Anexo 6.
Rotor jaula de ardilla (6)



Fuente: <https://www.interempresas.net/Robotica/Articulos/168184-Test-Motors-detecta-defectos-fabricacion-rotor-motor-asincrono-induccion-4-kW.html>

Anexo 7. Grados de protección mecánica de las cubiertas

Tabla 1.1.

Grados de protección mecánica de las cubiertas

<i>Primer guarismo: Sólidos</i>	<i>Segundo guarismo: Líquidos</i>
0 – Máquina abierta	0 – Máquina abierta
1 – Sólidos ≤ 50 mm	1 – Gotas verticales
2 – Sólidos ≤ 12 mm	2 – Gotas dentro de 15° verticales
3 – Sólidos ≤ 2.5 mm	3 – Gotas dentro de 60° verticales (prueba de lluvia).
4 – Sólidos ≤ 1 mm	4 – Salpicaduras (dirección)
5 – Protegido contra polvo	5 – Chorros de agua
6 – Totalmente protegido contra polvo	6 – Máquina para combes de navío
	7 – Máquina protegida contra efectos de inmersión.
	8 – Máquina sumergible

Fuente: <https://faro.es/es/blog/que-es-el-indice-de-proteccion/>

Anexo 8. Estator

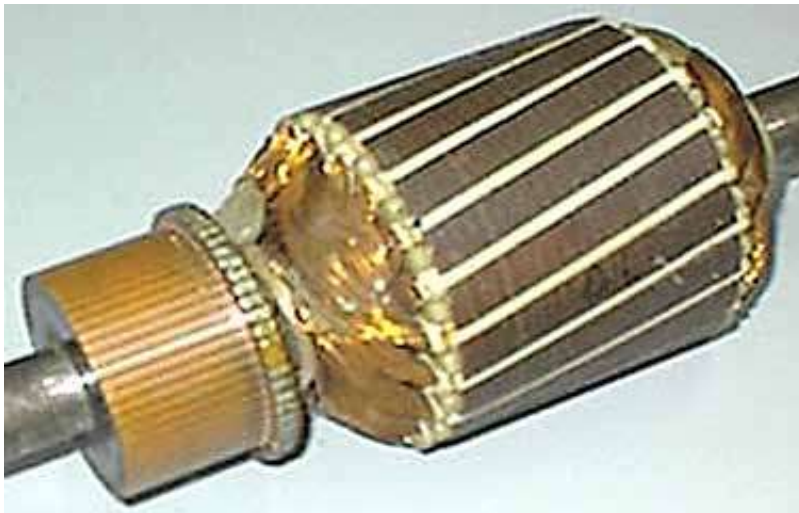
Anexo 8:
Estator



Fuente: <https://www.juntadeandalucia.es/averroes/centros-tic/21700290/helvia/aula/archivos/repositorio/0/29/html/Motores%20de%20corriente%20continua.htm>

Anexo 9. Inducido de motor

Anexo 9.
Inducido de motor



Fuente: https://www.emagister.com/uploads_courses/Comunidad_Emagister_64242_64242.pdf

Anexo 10. Transformador de potencia

Un transformador de potencia es un dispositivo que se utiliza para transferir energía eléctrica de un sistema a otro a través de un campo magnético. Este tipo de transformador se utiliza principalmente en sistemas de transmisión y distribución de energía eléctrica de alta tensión.

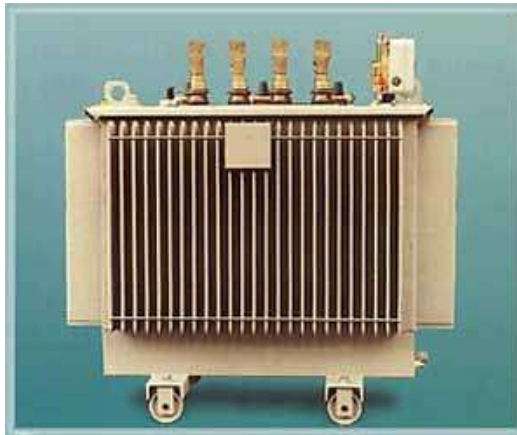
Anexo 10.
Transformador de potencia



Fuente: http://patricioconcha.ubb.cl/transformadores/gral_tipos_y_aplicaciones.htm

Anexo 11. Transformadores herméticos de llenado integral

Anexo 11.
Transformadores herméticos de llenado integral



Fuente: <https://es.slideshare.net/iraissalazar/transformadores-de-distribucion>

Se utilizan en intemperie o en el interior para la distribución de energía eléctrica en media tensión, siendo muy útiles en lugares donde los espacios son reducidos. Estos transformadores se aplican en zonas urbanas, industrias, minería, explotaciones petroleras, grandes centros comerciales y en cualquier actividad que requiera la utilización intensiva de energía eléctrica.

Anexo 12. Transformador monofásico tipo poste

Anexo 12.
Transformador monofásico tipo poste



Fuente: <https://es.slideshare.net/iraissalazar/transformadores-de-distribucion>

Anexo 13. Transformador de corriente tipo dona

Un transformador de corriente tipo dona es un tipo de transformador de corriente en el que la bobina primaria está formada por una dona o anillo de material magnético y la bobina secundaria se encuentra enrollada alrededor de dicha dona. Este tipo de transformador se utiliza para medir la corriente eléctrica en circuitos de alta tensión y en aplicaciones de protección de equipos eléctricos.

Cuando se pasa un conductor por el interior de la dona, la corriente que circula por él crea un campo magnético que atraviesa la dona. Este campo magnético induce una corriente en la bobina secundaria, que es proporcional a la corriente que circula por el conductor. La relación entre la corriente primaria y la corriente secundaria se determina por el número de vueltas de la bobina primaria y la bobina secundaria.

Anexo 13.
Transformador de corriente tipo dona



Fuente: <https://www.monografias.com/trabajos78/tipos-aplicaciones-conexiones-transformadores-trifasicos/tipos-aplicaciones-conexiones-transformadores-trifasicos2>

Anexo 14. Transformador de corriente

Anexo 45.
Transformador de corriente



Fuente: <https://energyev.com/tienda/sin%20categorizar/transformador-de-corriente/>

GLOSARIO DE TÉRMINOS

A

- **Aislante:** material que impide la conducción de electricidad, utilizado para recubrir conductores o partes de máquinas eléctricas.
- **Alternador:** máquina eléctrica que convierte energía mecánica en energía eléctrica en forma de corriente alterna.

B

- **Bobina:** conjunto de espiras de alambre enrolladas que generan un campo magnético al ser atravesadas por corriente eléctrica.
- **Breaker:** también conocido como interruptor automático o disyuntor, es un dispositivo electromecánico diseñado para proteger un circuito eléctrico contra sobrecargas, cortocircuitos o fallas. Su función principal es interrumpir el flujo de corriente eléctrica automáticamente cuando esta excede los valores de seguridad establecidos, con lo que se evitan daños en los equipos, incendios o accidentes.

C

- **Coeficiente de dilatación cubica:** también conocido como coeficiente de expansión térmica volumétrica, es una propiedad física que describe cómo cambia el volumen de un material en respuesta a un cambio de temperatura. Este coeficiente es importante en materiales sólidos y líquidos, ya que indica el grado de expansión o contracción volumétrica de una sustancia cuando se somete a un aumento o disminución de temperatura.
- **Campo magnético:** región del espacio donde actúan fuerzas magnéticas generadas por imanes o corrientes eléctricas.
- **Conmutador:** Dispositivo que invierte el sentido de la corriente en una máquina de corriente continua.
- **Compound:** se refiere a un tipo de configuración en los motores o generadores de corriente continua (CC) que utiliza dos devanados de excitación: uno conectado en serie y otro en paralelo (*shunt*) con el circuito del rotor o armadura.

D

- **Dínamo:** máquina eléctrica que convierte energía mecánica en energía eléctrica en forma de corriente continua.

E

- **Eficiencia:** relación entre la energía útil producida por la máquina eléctrica y la energía suministrada a esta.
- **Electroimán:** dispositivo que genera un campo magnético al ser recorrido por corriente eléctrica.
- **Embalarse:** el término «embalarse» se refiere a un fenómeno que ocurre cuando un motor aumenta su velocidad de manera descontrolada o se acelera excesivamente, por lo general, debido a la pérdida de carga o a una falla en el control de velocidad. Este problema puede ser peligroso porque el motor puede alcanzar velocidades muy altas que lo dañen o causen fallos mecánicos graves.
- **Estator:** parte fija de una máquina eléctrica que contiene los devanados y el núcleo magnético.

F

- **Factor de potencia:** relación entre la potencia real y la potencia aparente en un sistema eléctrico.
- **Frecuencia:** número de ciclos completos por unidad de tiempo.

G

- **Generador:** máquina eléctrica que transforma energía mecánica en energía eléctrica.
- **Guardamotor:** es un dispositivo diseñado para proteger el motor de condiciones adversas que puedan dañarlo, como sobrecargas, cortocircuitos, fallos en el suministro eléctrico o fallos de fase. Su función principal es detectar fallas y desconectar el motor para evitar que sufra daños graves debido a condiciones anormales de operación.

H

- **Histéresis:** pérdida de energía en materiales magnéticos debido a la magnetización y desmagnetización cíclica.

I

- **Impedancia:** resistencia total que ofrece un circuito al paso de corriente alterna.
- **Inducción electromagnética:** fenómeno por el cual un campo magnético variable genera una corriente eléctrica en un conductor.

J

- **Jaula de ardilla:** tipo de rotor utilizado en motores de inducción, compuesto por barras conductoras cortocircuitadas.

M

- **Motor:** máquina eléctrica que convierte energía eléctrica en energía mecánica.
- **Motor de corriente alterna (CA):** convierte energía eléctrica CA en energía mecánica. Los más comunes son los motores de inducción y los motores sincrónicos.
- **Motor de corriente continua (CC):** convierte energía eléctrica CC en energía mecánica.
- **Motor de inducción:** motor de CA en el que el campo magnético rotatorio del estator induce corrientes en el rotor, creando un campo magnético que interactúa con el del estator y produce el movimiento.
- **Motor síncrono:** motor de CA en el que la velocidad de rotación del rotor es sincronizada con la frecuencia de la corriente de alimentación.
- **Magnetización:** proceso de alinear dominios magnéticos en un material para generar un campo magnético.

N

- **Núcleo:** parte interna de una máquina eléctrica donde se concentra el flujo magnético.
- **Neutro:** conexión eléctrica que sirve como referencia de potencial en sistemas trifásicos.

P

- **Par motor:** fuerza de rotación generada por un motor eléctrico.
- **Polo magnético:** zona de mayor concentración de líneas de campo magnético en un imán.

R

- **Rendimiento:** relación entre la potencia útil entregada por una máquina y la potencia absorbida.
- **Rotor:** parte giratoria de una máquina eléctrica que interactúa con el campo magnético para generar movimiento.

S

- ***Shunt*:** hace referencia a un dispositivo o conexión en paralelo que se utiliza para desviar corriente eléctrica o medirla indirectamente. La palabra *shunt* proviene del inglés y significa «desvío». Su función principal es proporcionar un camino alternativo para la corriente en un circuito.
- **Sincronismo:** estado en el que la velocidad del rotor coincide con la frecuencia del campo magnético en motores sincrónicos.

T

- **Transformador:** dispositivo que transfiere energía eléctrica entre circuitos mediante inducción electromagnética.
- **Torque:** sinónimo de par motor, relacionado con la fuerza de rotación generada por el motor.

V

- **Velocidad sincrónica:** velocidad del campo magnético giratorio en una máquina eléctrica.
- **Voltaje nominal:** tensión eléctrica para la cual una máquina eléctrica está diseñada para operar de manera eficiente.

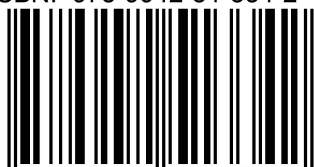
Máquinas eléctricas para ingenieros de mantenimiento industrial es una obra que aborda exhaustivamente los principios fundamentales del electromagnetismo y una amplia gama de máquinas eléctricas, desde motores de corriente continua hasta transformadores y máquinas trifásicas. En sus páginas, se cubren temas como el funcionamiento, selección, montaje, mantenimiento y pruebas de motores de CC y monofásicos, así como aspectos importantes de los transformadores, incluyendo tipos, pérdidas y regulación de voltaje. Además, se exploran los motores asíncronos y síncronos, junto con sus procesos de arranque, trabajo óptimo y reparación. El libro también incluye aplicaciones prácticas de generadores, como centrales hidroeléctricas y grupos electrógenos, y examina las posibles causas de fallas en máquinas eléctricas. Es una guía completa y detallada para estudiantes y profesionales del campo de la ingeniería eléctrica..

César Astudillo Machuca. Ingeniero eléctrico. Master of Science en Ingeniería. Máster en Dirección de Empresas. Diplomado en Formulación y Evaluación de Proyectos de Investigación. Docente de Electricidad, Máquinas eléctricas, Mantenimiento de centrales eléctricas, Mantenimiento de S/E y redes eléctricas. Presidente del congreso nacional del CIEEE en Ambato.

Natali Astudillo Skliarova. Ingeniera en Electricidad de la Escuela Superior Politécnica del Litoral y magíster en Electricidad con mención en Sistemas Eléctricos de Potencia por la Universidad Politécnica Salesiana. La exploración de nuevas tecnologías y la difusión del conocimiento en la comunidad son aspectos que considera de gran importancia para crear un ambiente de convivencia equilibrado como sociedad.



ISBN: 978-9942-51-334-2



9 789942 513342