CCM
CONSEJO DE COMPETENCIAS MINERAS

Cuaderno del Instructor

Módulo 4: “Mantenimiento de motores y generadores de equipos mina”.

PFMEI-3-02/V.1[PE01-M04/v.1]

Una iniciativa de:

CONSEJO MINERO

Con la asesoría experta de:

Innovum | FCH FUNDACIÓN CHILE

Equipo Consejo Minero

Joaquín Villarino H., Presidente Ejecutivo
Carlos Urenda A., Gerente General
Christian Schnettler R., Gerente del Consejo de Competencias Mineras
José Tomás Morel L., Gerente de Estudios
María Cecilia Valdés V., Gerente de Comunicaciones
Sofía Moreno C., Gerente de Comisiones y Asuntos Internacionales
Claudia Díaz R., Jefe de Proyectos

Equipo Innovum Fundación Chile

Hernán Araneda D., Gerente
Diego Richard M., Director Programa Fuerza Laboral Minera
Rafael Pizarro G., Jefe de Proyecto Empresas
Susana Gallardo S., Especialista de Formación
Eduardo Soto S., Consultor Senior
Ignacio Riffo C., Consultor Senior
Álvaro Aguilar H., Consultor de Proyectos
Carolina Gutiérrez M., Consultor de Proyectos

Consejo Minero
Dirección: Apoquindo 3500, Piso 7, Las Condes, Santiago.
Teléfono: (562) 2347 2200
www.ccm.cl

Propiedad del Consejo de Competencias Mineras (CCM) del Consejo Minero:

Este material es propiedad del Consejo de Competencias Mineras (CCM) del Consejo Minero. Está disponible para instituciones que imparten formación en el ámbito minero en Chile, a las que se autoriza la reproducción total o parcial de los contenidos de este material para fines de formación, citando siempre al Consejo de Competencias Mineras del Consejo Minero y pudiendo incluso adaptarlo para satisfacer los requerimientos de los participantes. Se prohíbe la reproducción o adaptación con fines comerciales.

El uso del género masculino en esta publicación no constituye discriminación; tiene el sólo propósito de aligerar el texto cuando la redacción así lo exige.

TODOS LOS DERECHOS RESERVADOS, QUEDA AUTORIZADA SU REPRODUCCIÓN Y DISTRIBUCIÓN CITANDO LA FUENTE. © Anglo American Norte S.A., Anglo American Sur S.A., Anglo American Chile Ltda.; Antofagasta Minerals S.A.; BHP Chile Inc.; Compañía Minera Barrick Chile Ltda.; Compañía Minera Cerro Colorado Ltda., Minera Escondida Ltda., Minera Spence S.A.; Compañía Minera Zaldívar Ltda.; Corporación Nacional del Cobre de Chile; Compañía Minera Doña Inés de Collahuasi SCM; Compañía Contractual Minera Candelaria, Sociedad Contractual Minera El Abra; FreeportMcMoran South America Inc.; Glencore Chile S.A.; SCM Minera Lumina Cooper Chile; Sierra Gorda SCM; Teck Resources Chile Ltda.; Yamana Chile Servicios Ltda.; 2013.

Consejo de Competencias Mineras – CCM:

El Consejo de Competencias Mineras (CCM) es una iniciativa de articulación entre las empresas mineras, cuyo fin es proveer información sectorial, estándares y herramientas que permitan al mundo formativo adecuar la formación de técnicos a la demanda del mercado laboral minero, tanto en términos cualitativos como cuantitativos. Con la asesoría experta de Innovum Fundación Chile, este organismo genera, con un enfoque sistémico, insumos para el mundo formativo, dando a conocer qué necesidades de capital humano tiene la minería y transfiriendo buenas prácticas para su formación.

El Consejo de Competencias Mineras – el primero de su naturaleza en el país – opera al alero del Consejo Minero. Fue formado en 2012 y cuenta con 12 empresas socias. A tres años de su creación, el CCM ha desarrollado una serie de productos y sistemas que han marcado un cambio de paradigma en la vinculación del mundo productivo con el de la formación para el trabajo, y han significado un aporte de fondo para el mejoramiento y la valoración de la educación técnico-profesional en el país, con un alcance que trasciende ampliamente a la sola industria minera.
Los Paquetes para Entrenamiento, son uno de estos productos. Se han creado además: Estudios de Fuerza Laboral, El Marco de Cualificaciones para la Minería (MCM), Marco de Calidad de Buenas Prácticas Formativas, Marco de Calidad para Instructores e impulsamos el apoyo sectorial al Sistema de Certificación de Competencias Laborales.

Si bien el Consejo de Competencias Mineras es una entidad privada, sus productos están concebidos como bienes públicos y gratuitos, de valor compartido para todos los estamentos de la sociedad en Chile. Toda la información y los productos generados por el CCM, además de un breve video explicativo, están disponibles en el sitio web: www.ccm.cl

El desafío que ahora enfrenta el CCM es que, tanto el mundo formativo como el minero, incorporen los estándares generados a sus procesos de negocio y a su quehacer diario. Esto generará una fuerza laboral más productiva y, por ende, mayor competitividad del país en el contexto internacional.

Contribución del CCM

Para trabajadores actuales y personas interesadas en trabajar en la minería:

- Mejor empleabilidad.
- Aprendizaje adecuado a los requerimientos del mercado.
- Acceso no sólo a un oficio, sino a rutas de formación y aprendizaje.

Para el sector minero:

- Mitigación de la escasez de personal, anticipándose al problema de manera coordinada y con visión de futuro.
- Mejora de productividad, al contar con más trabajadores preparados para los requerimientos de la industria, tanto propios como de proveedores.
- Mayor competitividad de esta industria, que repercute positivamente también en la competitividad del país.

Para las instituciones educacionales:

- Mejor empleabilidad de sus egresados.
- Mejor información proyectada a 8 a 10 años, para potenciar programas formativos en los oficios para los cuales se anticipa una mayor brecha de capital humano.
- Oportunidad para el reconocimiento de la industria respecto a su calidad formativa.

Para la comunidad y el país:

- Asignación más eficiente de fondos públicos de educación y capacitación, al tener identificados programas adecuados para satisfacer requerimientos del mercado.
- Disminución de la presión que se ejerce sobre otros sectores productivos por la demanda de trabajadores, al aumentar la cantidad de personas calificadas para la minería.

Índice

Descripción del documento 7

Módulo IV: Mantenimiento de motores y generadores de equipos mina 8

1. Máquinas Eléctricas 9

1.1 Introducción a motores eléctricos dc y ac 9

1.2 Control de procesos orientado a motores y variadores de velocidad 38

1.3 Tipos de variadores de velocidad en motores AC 42

1.4 Etapa de potencia en variadores de velocidad de motor ac. 45

1.5 Etapa de control en variadores de velocidad de motores ac 48

1.6 Alimentación de un motor trifásico 51

2. Generadores 56

2.1 Inducción electromagnética 56

2.2 Funcionamiento del generador síncrono 58

2.3 Alternadores 62

3. Desarme de un motor de CA y toma de datos 73

3.1 Procedimiento para el desarmado del motor 74

3.2 Mantención de un motor cc para palas 77

3.3 Lubricación 82

3.4 Ajuste de motor en neutro 93

Actividad N°6 101

Actividad N°7 104

Descripción del documento

El Cuaderno del instructor contiene la totalidad de los contenidos a utilizar por el instructor para el desarrollo del programa de formación de **Mantenedor Eléctrico Avanzado Equipos Móviles.**

El documento está dividido en módulos, los cuales están organizados en secciones de temas y contenidos específicos.

El instructor, podrá, además, sugerir actividades como las que se indican a continuación:

- Charlas y/o reflexiones de seguridad.
- Discusiones o foros de debate.
- Reforzamientos.
- Actividades en terreno.
- Preparación para la evaluación final

Específicamente para las actividades relacionadas a tecnologías de comunicación audiovisual se entregarán links a modo referencial, sin embargo el instructor tendrá la libertad de utilizar los recursos que estime conveniente a fin de lograr los objetivos planteados para la actividad.

Todo el material es susceptible de ser mejorado, adaptado o modificado en función de las características del grupo con el que se trabaje. Por ello se ha diseñado desde un enfoque flexible, que permite al instructor agregar recursos que enriquezcan algún contenido, favoreciendo también el aporte de los participantes, cuidando siempre de lograr los aprendizajes esperados de cada módulo.

Respecto de las evaluaciones se sugiere que éstas sean elaboradas por el instructor de acuerdo a los siguientes lineamientos

La evaluación de los módulos y sus contenidos debe estar compuesta por a lo menos 10 preguntas, las cuales deben ser extraídas del documento de evaluación de proceso. Cada pregunta será evaluada con puntajes entre 0 y 10.La escala de calificación será de 0 a 100%. Considerando el 0% cuando el participante no tiene respuestas correctas y el 100% cuando posee la totalidad de respuestas correctas.

La nota de aprobación de las evaluaciones de los distintos módulos corresponderá a un 75% de aciertos.

Módulo IV: Mantenimiento de motores y generadores de equipos mina

1. Máquinas Eléctricas

1.1 Introducción a motores eléctricos dc y ac

La fabricación de imanes artificiales por medio del paso de corriente eléctrica a través del arrollamiento de bobinas de alambre de cobre sobre un núcleo de metal permeable al flujo magnético, es la base fundamental que ha permitido el desarrollo de los motores eléctricos.

Campos magnéticos

En la Figura 1 se muestran algunos imanes artificiales de uso muy difundido. Se observa que tienen dos polos denominados norte (N) y sur (S). Actúan sobre otros materiales magnéticos ejerciendo fuerzas de atracción o repulsión, sin que haya de por medio contacto físico.

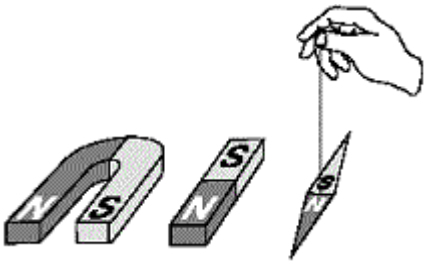

Figura 1

Imán Artificial

En la Figura 2 podemos ver las líneas de campo magnético saliendo del polo norte y retornando por el polo sur. Se observa que dicho campo tiene la capacidad de propagarse por el aire y ejercerá su influencia sobre cualquier material permeable magnéticamente (acero, hierro, otro imán, etc.).

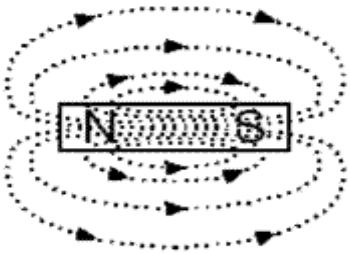

Figura 2

Campo Magnético

En la Figura 3 se muestran las fuerzas de atracción (polos diferentes se atraen) y repulsión (polos iguales de rechazan) que se ejercen entre dos imanes dependiendo de la posición de sus polos. El término “air gap” significa “brecha de aire” traducido al español comercial, pero la traducción técnica es conocido como “entre-hierro”.

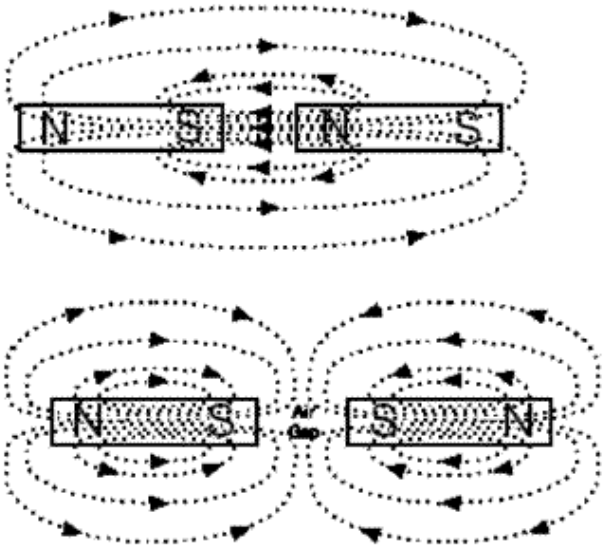

Figura 3

Fuerzas de atracción y repulsión

La Figura 4 nos muestra la generación de un campo magnético concéntrico al alambre conductor por el cual fluye corriente continua. El sentido del campo magnético se determina por medio de la “regla de la mano izquierda”. Si apuntamos con el dedo pulgar en el sentido de los electrones, los dedos restantes nos indican la dirección del campo magnético.

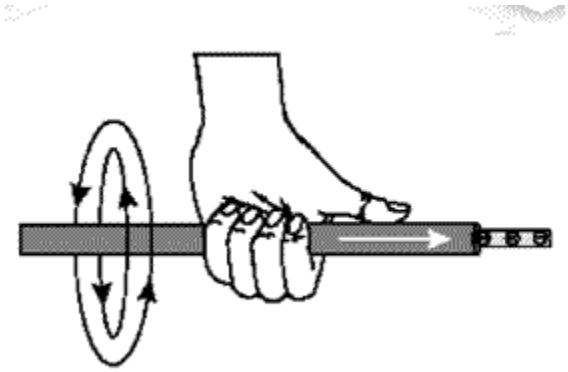

Figura 4

Generación de un campo magnético

En el caso de corriente AC, se muestra en la Figura 5 la generación de campo magnético cuando pasa corriente eléctrica alterna a través de un conductor. Podemos ver que el campo magnético es variable y depende del valor instantáneo que tiene la corriente. La dirección del campo magnético cambia cuando lo hace el sentido de la corriente que pasa por el conductor.

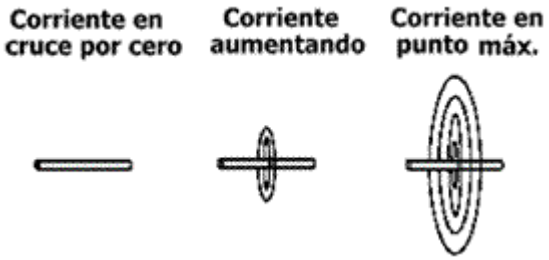

Figura 5

Campo magnético cuando pasa corriente eléctrica alterna.

De las Figuras 4 y 5 se concluye que:

a) Un campo magnético constante (en valor y dirección) es producido por corriente DC que pasa por un conductor.

b) Un campo magnético variable (en valor y dirección) es producido por corriente AC que pasa por un conductor. Los electro-imanes se implementan con un núcleo magnético, arrollamiento de alambre conductor y el paso de una corriente continua por dicho alambre. En la Figura 6 se ha dibujado el núcleo en modo transparente para poder ver con claridad el arrollamiento. La finalidad de usar el núcleo magnético es conseguir mayor intensidad de campo magnético.

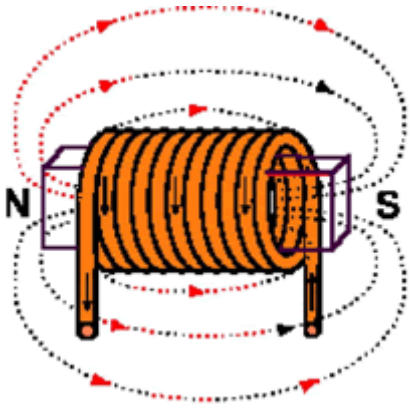

Figura 6

Núcleo magnético, arrollamiento de alambre conductor

En la Figura 7 se muestra un método para determinar la posición de los polos norte y sur. Los dedos de la mano izquierda apuntan en el sentido del flujo de electrones y el pulgar apuntará al polo norte. Obviamente dicho campo magnético es constante en magnitud y dirección pues la corriente que pasa por el alambre es continua.

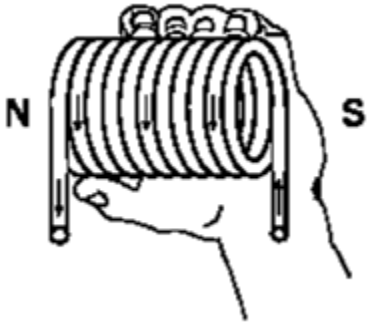

Figura 7

Método para determinar la posición de los polos

Inducción de movimiento en motores eléctricos

Inducción de movimiento

La información anterior nos enseña que dos imanes experimentan una fuerza de atracción o repulsión cuando se encuentran, cada una, comprendidas dentro del radio de acción de la otra.

También aprendimos la forma de implementar electro-imanes por medio de un núcleo magnético, arrollamiento de alambre de cobre y una fuente de alimentación continua o alterna.

Por lo tanto se concluye que, si colocamos un electro-imán dentro del campo magnético de otro, tal como se muestra en la Figura 8, y alimentamos con corriente continua el alambre de cobre (una espira), ésta experimentará una fuerza en el sentido indicado por el dedo pulgar de la mano derecha. Tal es el principio de funcionamiento en que se basan los motores eléctricos de corriente continua.

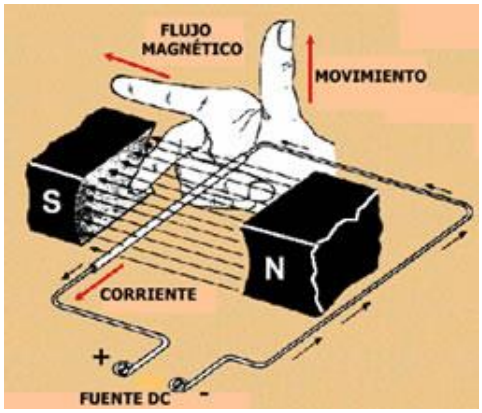

Figura 8

Principios de Inducción de Movimiento

En el caso de inducción de movimiento para motores de corriente alterna, el principio de funcionamiento se basa en la producción de un campo magnético giratorio. Si consideramos que el imán de la Figura 9 con sus polos N-S puede girar sobre el eje X-Y, y que un disco de cobre o aluminio que se halla sometido al campo magnético del imán, también puede girar sobre el mismo eje, entonces tenemos que, si giramos el imán, su campo magnético gira igualmente, barriendo el disco próximo a él, con lo cual el campo que ahora es variable, es la causa que según los principios de inducción magnética, aparezcan en el disco corrientes inducidas. Estas corrientes reaccionan dando lugar a una fuerza magneto motriz con un torque motor suficiente como para vencer el torque resistente del eje y originar la rotación del disco.

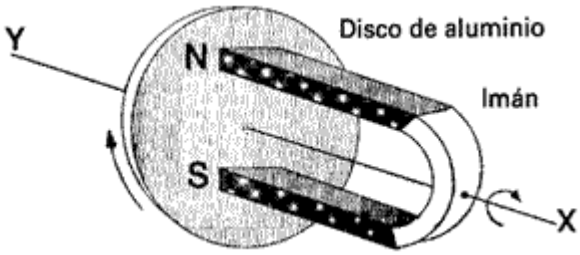

Figura 9

Imán con sus polos N-S girando sobre el eje X

Una forma práctica de generar un campo magnético giratorio se consigue mediante la alimentación, con voltaje alterno trifásico, de un bobinado también trifásico instalado en un núcleo de material magnético llamado “estator”, tal como se muestra en la Figura 10.

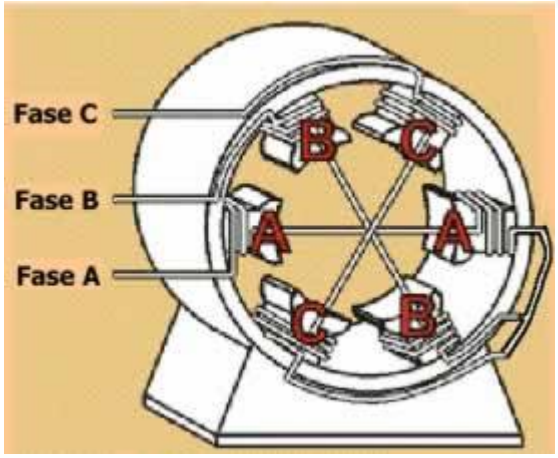

Figura 10

Alimentación con voltaje alterno trifásico de un bobinado trifásico (estator)

A la velocidad de giro del campo magnético se le denomina “velocidad síncrona”. Dicho campo magnético giratorio corta las varillas de aluminio del “rotor” que se encuentra instalado al interior del estator, ver Figura 11, sobre las cuales se induce una corriente de rotor que causará a su vez un campo magnético de rotor, produciéndose una interacción de campos y provocando el giro del rotor en igual sentido que el campo magnético del estator, pero a una velocidad ligeramente menor que la síncrona. Más adelante veremos que a la diferencia de dichas velocidades se la denomina “deslizamiento”.

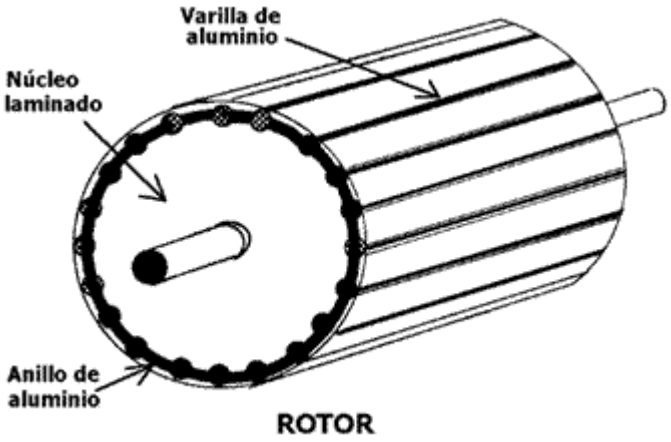

Figura 11

Movimiento de rotación en un motor dc

La Figura 12 nos muestra un primer modo práctico de implementar un motor de corriente continua.

La energía eléctrica continua de entrada es aplicada al conmutador por medio de las escobillas nombradas como + (positivo) y − (negativo). El flujo de corriente pasa a la espira (denominada “armadura”), la cual experimenta fuerzas en los segmentos AB y CD, causando el giro en la dirección indicada.

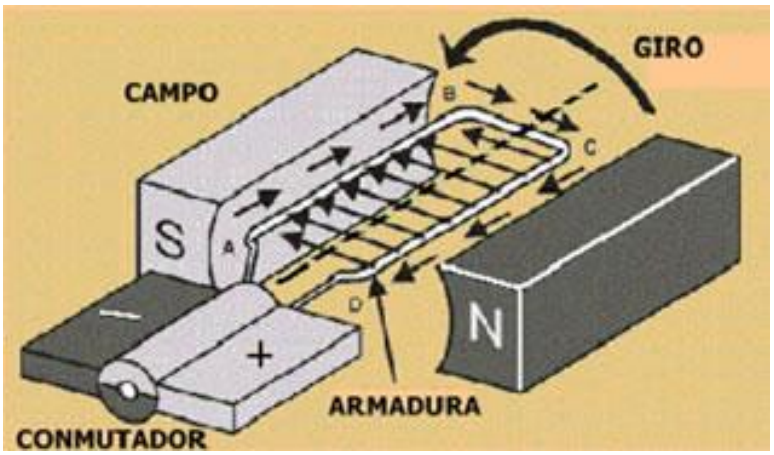

Figura 12

En la Figura 12, anterior, se muestra a la armadura formada únicamente por una espira, lo cual no es cierto, pues para aplicaciones prácticas dicha espira debe ser montada sobre un núcleo magnético tal como se ve en la Figura 13. Debido al paso de corriente a través de la armadura y por influencia del campo, se induce una fuerza F, la que produce un Par (Fuerza por distancia) que provoca el movimiento de giro del rotor.

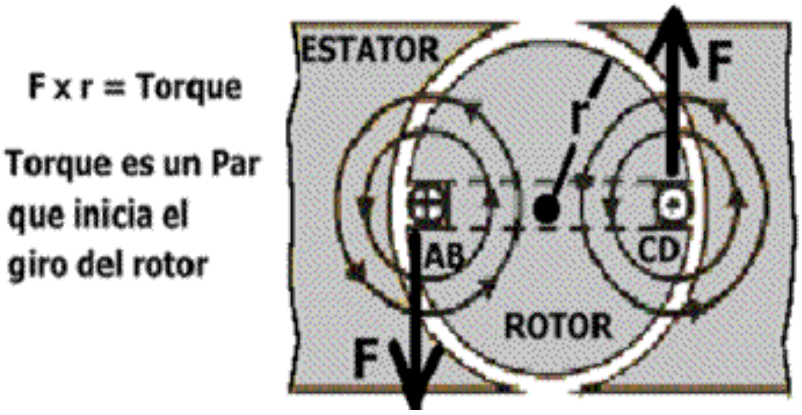

Figura 13

Existen diversos tipos de motor de corriente continua, pero el motor más usado a nivel de aplicación industrial, es aquel denominado “motor DC shunt de excitación independiente”. En la Figura 14 se muestra dicho tipo de motor.

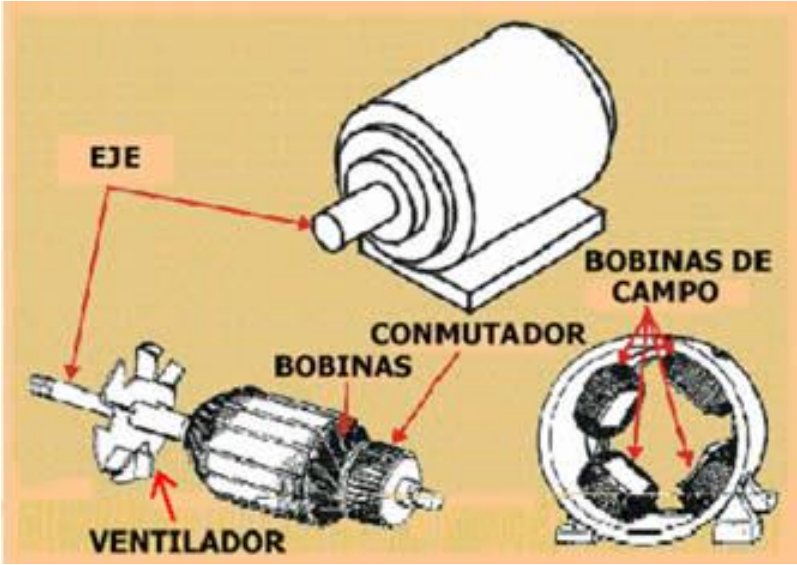

Figura 14

Observamos que:

a) La armadura está conformada por un conjunto de bobinas arrolladas convenientemente sobre un núcleo laminar de metal magnético, la cual se encuentra montada y unida a presión sobre una barra de acero denominada eje. Dicho eje tiene en sus extremos un par de rodajes que permitan su movimiento de giro y van montados sobre unas tapas fijadas al estator.

b) El campo es un electro-imán conformado por un conjunto de bobinas arrolladas sobre un núcleo laminar de metal magnético. Dichos núcleos van montados al interior del estator.

Características de un motor dc shunt

La Figura 15 muestra el esquema de un motor DC Shunt de excitación independiente y su respectivo circuito equivalente. Para facilitar la comprensión de los conceptos básicos de control de motor DC, el modelo matemático será tomado de forma idealizada.

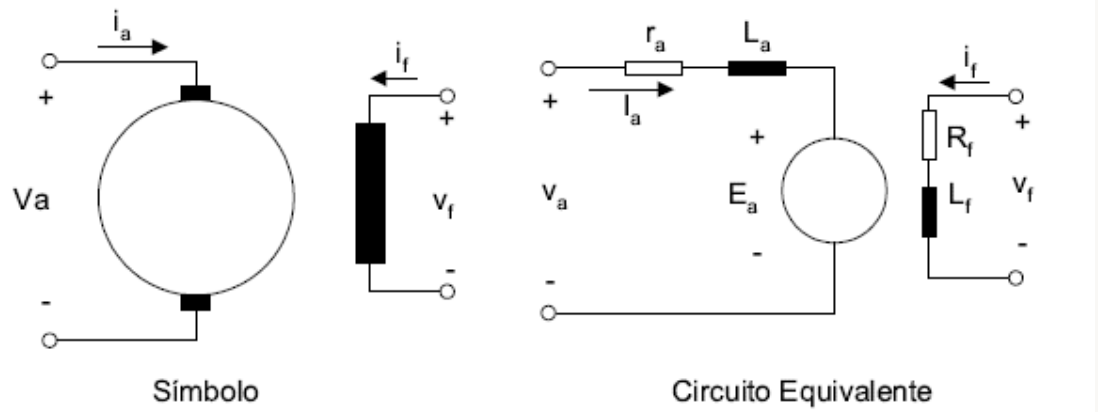

Figura 15

En la Figura 16, r_a es la resistencia de armadura; L_a es la inductancia de armadura y E_a es la tensión contra-electromotriz. Esta tensión E_a es dada por:

$$E_a = k\, n\, I_f \qquad (1\text{-}1)$$

Dónde:

n: Velocidad del eje del motor;

I_f: Corriente de campo y `

k: Constante.

Para esta máquina la corriente de armadura I_a es:

$$I_a = \frac{V_a - E_a}{r_a + X_{l_a}} \qquad (1-2)$$

Dónde:

$X_{l_a} = j2\pi f l_a$ es la impedancia inductiva de L_a.

El torque electromagnético T_e, generado en el eje de esta máquina es dado por:

$$T_e = k I_f I_a$$

Y la potencia en el eje es dado por:

$$P = V_a I_a (Eficiencia) = T_e \, n \, (Eficiencia) \qquad (1-4)$$

El torque T_e es el resultado del producto del flujo magnético debido a la corriente de campo (kI_f) por la corriente de armadura (I_a). Debe notarse que esta expresión solo es válida si la fuerza magnetomotriz debida a la corriente I_a fuese especialmente perpendicular al flujo debido a I_f. Esto en general es garantizado por construcción.

Para el control del torque electromagnético generado es necesario:

1) Controlar la corriente de armadura de forma de anular los efectos de la resistencia de armadura, reactancia de dispersión y tensión contra-electromotriz, que aparecen cuando se opta por control de tensión de la armadura;
2) Controlar la corriente de campo (en general en el valor máximo);
3) Manteniendo el ángulo entre la fuerza magnetomotriz (fmm) de la armadura y el flujo magnético debido al campo en un ángulo de 90°, el ítem 3 es garantizado por la posición mecánica de los conmutadores. Un ángulo diferente de 90° hace que la variación de la corriente de armadura afecte directamente al campo y viceversa.

El método clásico de control de velocidad de motor DC fue propuesto por Ward-Leonard, siendo inclusive conocido por este nombre. En este control, la velocidad es controlada por dos modelos distintos. La Figura 16 muestra las características de torque y potencia en función de la velocidad.

Para la velocidad de rotación entre 0 y n_0 (velocidad base) el torque es mantenido en su valor máximo a través del control de las corrientes de armadura y campo. Este control es conseguido manteniendo el campo constante y aumentando la tensión de armadura V_a proporcionalmente a la velocidad, de tal forma que I_a sea constante (torque máximo).

La velocidad del eje en el cual la potencia alcanza su valor nominal es llamada "velocidad base" y a partir de ese punto el control de velocidad solo puede ser hecho por medio de la disminución de la corriente de campo I_f manteniendo la corriente de armadura en su valor nominal. De esa forma es posible operar la máquina entre n_0 y n_{max}, con el torque disminuyendo en forma hiperbólica (proporcional a $1/n^2$), mientras la potencia es mantenida constante.

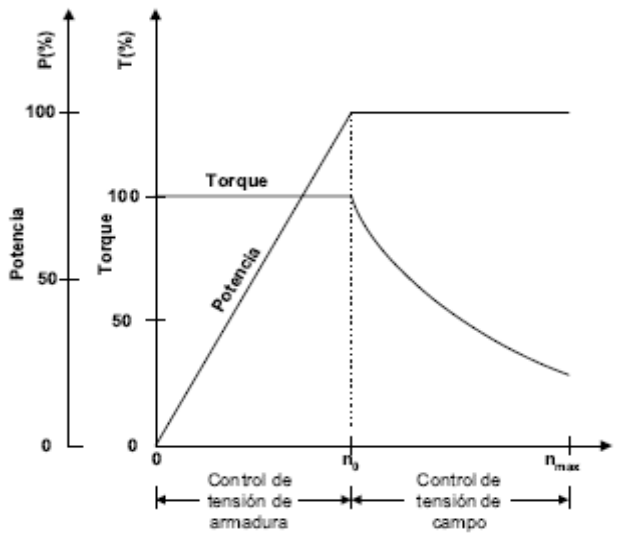

Figura 16

Figura 16

Movimiento de rotación en el motor AC

Los dos principales grupos de motores AC son los del tipo inducción y síncrono. Los motores tipo inducción incluyen los monofásicos, trifásicos y rotor bobinado. Los motores tipo síncrono incluyen los auto-excitados y DC excitados.

De los tipos de motores AC nombrados, el más usado es el motor de inducción de jaula de ardilla. En la Figura 17 podemos ver el motor jaula de ardilla, en el cual distinguimos que el estator presenta un bobinado trifásico simétricamente distribuido entre sus ranuras formando un ángulo de 120° mecánicos.

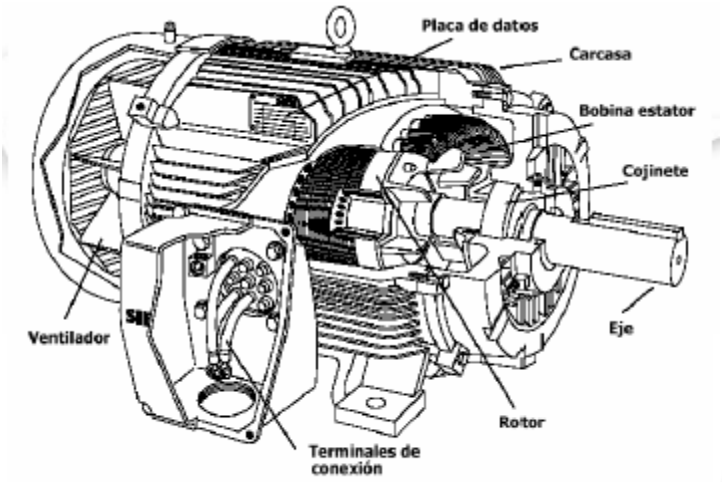

Figura 17

Figura 17

También observamos que el rotor la conforman un núcleo de hierro laminado atravesado longitudinalmente por varillas de aluminio unidas en sus extremos por anillos del mismo material (ver Figura 18). Al aplicar en el estator un voltaje de alimentación trifásico desfasado 120° eléctricos, se forma un campo magnético giratorio (teorema de Ferraris) de magnitud y velocidad constante que gira a una velocidad denominada "sincronismo" (N_s), tal como se observa en la figura 18.

La siguiente ecuación sirve para determinar el valor de la velocidad síncrona:

$$N_s = 120\frac{f}{p} \qquad (1-5)$$

Dónde:

- f : frecuencia del voltaje de alimentación (50Hz)
- p : número de polos del estator del motor.

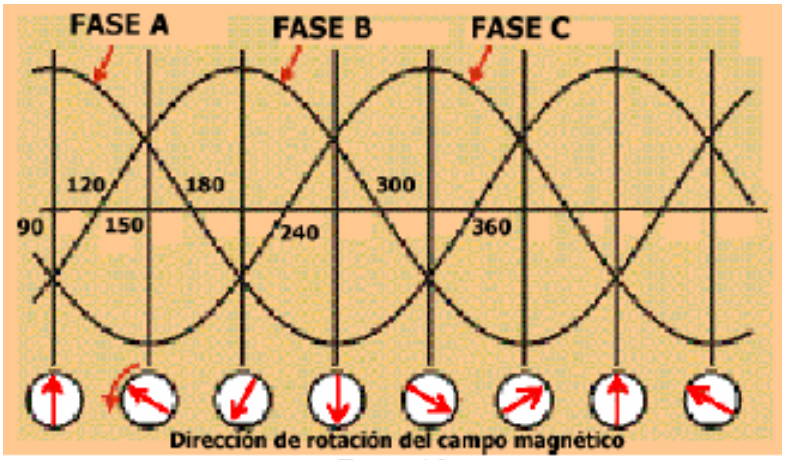

Figura 18

Figura 18

Dicho campo magnético giratorio induce corriente en las varillas de aluminio del rotor, las que a su vez generan sus propios campos magnéticos tal como se observa en la Figura 19. Ahora se tienen dos imanes que interactúan entre sí dando lugar a que el imán del rotor persiga al imán del estator, creando la rotación. El rotor gira a velocidad N_r.

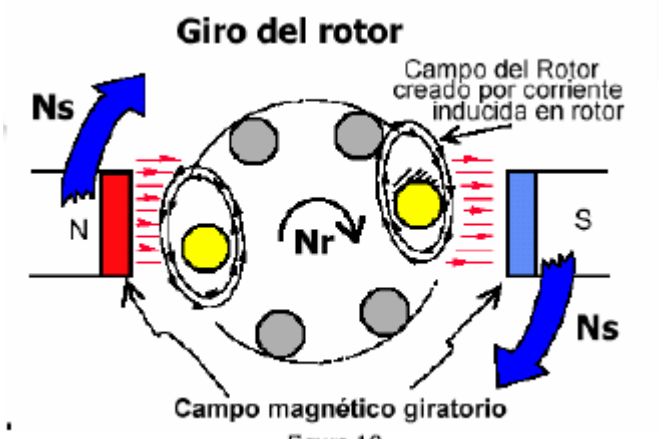

Figura 19

Figura 19

La velocidad de rotación del campo magnético del estator determina la velocidad del rotor, y la fuerza de los campos magnéticos determina la fuerza de atracción entre ellos. Dicha fuerza de atracción es conocida como torque y se mide en Libras fuerza-pie (lb-ft) o Newton-mt (Nw·mt).

La velocidad del rotor siempre debe ser menor que la velocidad síncrona, dicha diferencia de velocidad se denomina "deslizamiento" ("slip" en inglés) y es representada por:

$$slip = s = \frac{N_s - N_r}{N_s} \qquad (1-6)$$

La Tabla 18, nos muestra la relación entre polos por fase y torque por HP y kW de potencia. Un motor de 1 HP y 2 polos, producirá 1,5 lb-ft de torque cuando se carga a su capacidad nominal. Un motor de 50 HP y 2 polos, producirá 50HPx1,5 lb—ft/HP o 75 lb-ft de torque cuando se carga a su capacidad nominal.

Polos por fase	Torque/HP (lb-ft)	Veloc. Nom. (RPM) 60Hz	Veloc. Síncr. (RPM) 60Hz	Torque/kW (N-m)
2	1,5	3 460	3 600	3,3
4	3,0	1 750	1 800	6,6
6	4,5	1 175	1 200	9,9
8	6,0	875	900	13,2
10	7,5	708	720	16,5
12	9,0	580	600	19,8

Tabla 1

Tabla 1

Características del motor de inducción AC.

Para poder estudiar y comprender las características de funcionamiento del motor de inducción de jaula de ardilla, es necesario tener una representación matemática que refleje fielmente lo que sucede en su interior. Suponiendo que el motor trabaja con voltaje y corriente balanceados, en la Figura 20, se muestra un circuito equivalente por fase del motor de inducción, válido para el régimen permanente.

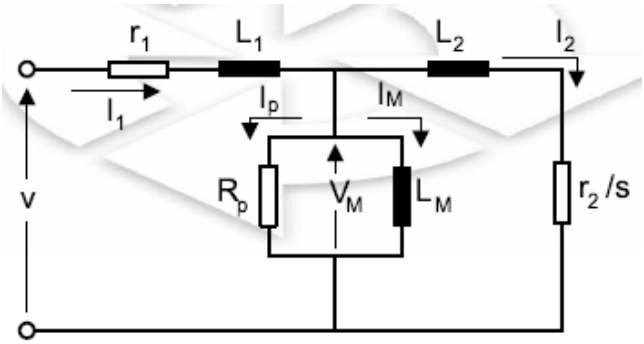

Figura 20

Figura 20

Dónde:

r_1 =Resistencia por fase del bobinado del estator.

L_1 = = Inductancia por fase del bobinado del estator.

I_1 = Corriente total por fase consumida por estator.

R_p = Resistencia de pérdidas por magnetización.

I_p = Corriente de pérdidas por magnetización.

V_M = Voltaje inducido en el estator a frecuencia de línea, debido al voltaje en el entrehierro (fuerza contra-electromotriz).

L_M = Inductancia de magnetización (establece el flujo en el entre-hierro).

I_M = Corriente de magnetización que establece el flujo magnético en el entre-hierro.

L_2 = Inductancia por fase en el rotor referida al estator.

I_2 = Corriente en el rotor responsable de producir el torque electro-magnético (T_e).

${}^{r_2}/_{S}$ = Resistencia por fase en el rotor referida al estator.

S = Deslizamiento.

El torque electro-magnético generado por esta máquina está dado por la siguiente ecuación:

$$T_e = k_2\, I_M\, I_2\, \cos\gamma \qquad (1-7)$$

Dónde:

k_2 = Constante.

γ = Ángulo de desfasaje entre la corriente del rotor I_2 y la corriente de magnetización I_M.

La potencia en el eje (P) es:

$$P = P_{ag} - P_r = T_e \omega \qquad (1-8)$$

Dónde:

P_{ag} = Potencia que cruza el entre-hierro.

P_r = Potencia perdida en el rotor.

ω = Velocidad angular del eje del motor. _

La expresión del torque electro-magnético en (1-7) es similar al del motor DC shunt (1-3) salvo por el ángulo y, que en el caso de los motores DC tiene el valor de 90° fijado por construcción, teniendo en consecuencia la posibilidad de controlar las corrientes en forma independiente lo cual facilita su control.

Como se observa en la Figura 20, tanto I_M como I_2 ingresan al motor de inducción por un terminal, lo que dificulta el control independiente de cada componente.

Por otro lado, si se desea que el motor de inducción presente una característica de torque similar al de un motor DC shunt, debe controlarse I_1de tal modo que se tengan los valores adecuados de I_2, I_M y el ángulo γ. Tal forma de control era imposible de realizar hasta hace una década, pero en la actualidad debido al avance de la microelectrónica y a la fabricación de componentes electrónicos más potentes, se han logrado estrategias de control que permiten grandes prestaciones de funcionamiento del motor de inducción tanto como si se tratase de un motor DC.

La característica de torque y corriente en función de la velocidad del motor de inducción es mostrada en la Figura 21. Se observa que el motor presenta gran consumo de corriente (hasta 6 veces su valor nominal) al ser arrancado con voltaje nominal aplicado a sus bornes. El torque alcanza 200% de su valor de nominal.

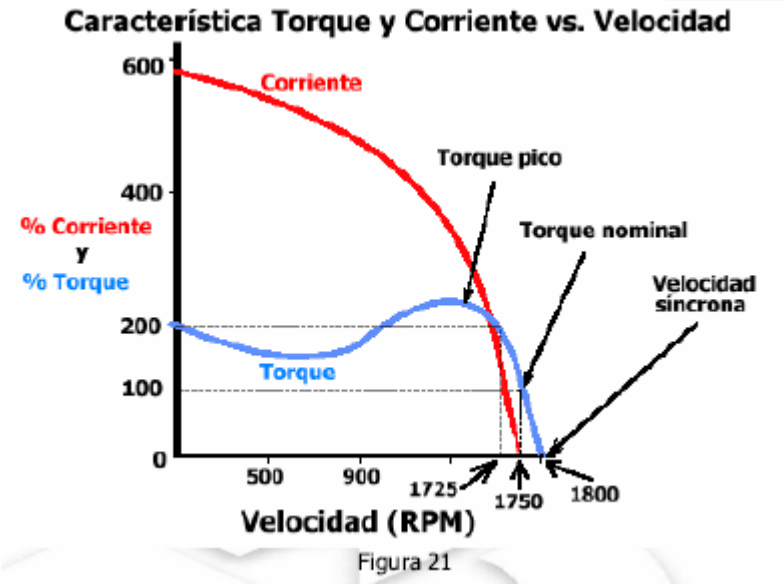

Figura 21

De la Figura anterior se observa que la velocidad del eje del motor depende de la carga aplicada, logrando mantenerse con una pequeña variación debido a la característica casi vertical de una parte de la curva de torque.

Respecto del deslizamiento "S", se podrá decir que dicho valor aumenta en proporción directamente proporcional a la carga; es decir, a mayor carga el deslizamiento se incrementa. De la Figura 21 podríamos decir que el deslizamiento a carga nominal y dos veces carga nominal son:

$$S_{nom} = \frac{1800 - 1750}{1800} \times 100\% = 2{,}77\% \quad y \quad S_{2\times nom} = \frac{1800 - 1725}{1800} = 4{,}16\%$$

Variadores de velocidad de motores dc

Fundamentos

Las características de funcionamiento de los motores DC de excitación independiente y el desarrollo de la electrónica de potencia, han permitido fabricar equipos variadores de velocidad que controlan prácticamente todos los parámetros importantes del motor, permitiendo su uso en todo tipo de aplicaciones industriales. Dichas aplicaciones van desde el control de velocidad del motor hasta el control de su posición (servo-variadores).

Los motores DC tienen numerosos inconvenientes, pues necesitan alimentaciones de potencia en continua. Además para la misma potencia, estas máquinas son de dimensiones y costos mayores que los motores de inducción y necesitan más mantenimiento debido al conmutador. Las ventajas de los motores DC es que pueden proporcionar altos pares de arranque, su margen de velocidad es grande por encima y

por debajo de los valores nominales y su procedimiento de regulación es más sencillo y económico que los correspondientes a los motores de inducción.

Por las razones expuestas líneas arriba, se siguen usando los motores DC y por lo tanto los variadores de velocidad para dicho tipo de motor han seguido desarrollándose sobre todo en lo que respecta a su etapa de control (comunicación por computadora, panel digital de programación, auto-sintonía, etc.), pues su etapa de potencia (rectificadores controlados mediante tiristores o transistores) permanece invariable.

Variación de velocidad

De las ecuaciones anteriores se tiene que la velocidad n depende de:

$$n = \left(\frac{V_a - I_a \, r_a}{k I_f} \right) \qquad (2\text{-}1)$$

Por lo tanto, el control de la velocidad de un motor DC se consigue mediante la variación del voltaje de armadura (V_a) o por variación del flujo magnético del campo (proporcional a I_f).

Hasta antes de la llegada de los variadores electrónicos de velocidad para motores DC, las formas de regular la velocidad eran por procedimientos que se citan a continuación:

a) Por variación de la tensión en bornes de armadura V_a:

- Control reostático de la tensión de armadura. Tracción eléctrica.
- Empleando un elevador/reductor.
- Modificando el acoplamiento de dos motores por medio de engranajes.
- Sistema Ward-Leonard.

b) Por variación de flujo de campo:

- Reóstato de regulación de campo.

Inversión de giro de motores de dc

La inversión de giro de un motor DC se necesita en gran cantidad de aplicaciones. Para cambiar el sentido de giro hay que variar el campo magnético en uno de los dos circuitos del motor (armadura o campo). En la práctica, la variación del sentido del campo magnético se hace sobre el bobinado de armadura tal como se muestra en la Figura 22. En este caso la posición del interruptor nos permite cambiar el sentido de la polaridad del voltaje DC que recibe la armadura y por lo tanto cambiará el sentido de giro del motor.

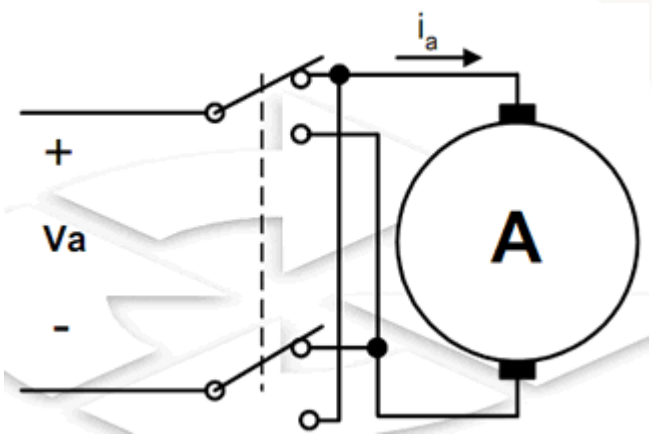

Figura 22

Frenado de motores dc

El frenado o parada rápida es una de las maniobras más importantes a realizar en el mando de un motor. Dicho objetivo se puede lograr por:

- Frenado por recuperación de energía o también llamado regenerativo.
- Frenado reostático o también llamado dinámico.
- Frenado por inversión de corriente de armadura

Etapa de potencia en variadores de velocidad dc con tiristores

Usualmente, una unidad de potencia de estado sólido convierte la energía AC de la planta a un voltaje DC ajustable. Este voltaje alimenta a la armadura del motor. La velocidad del motor DC varía proporcionalmente al voltaje de armadura asumiendo:

- El motor es suficientemente grande para alimentar a la carga conectada.
- La corriente de campo del motor es constante.

Los motores DC tienen dos componentes principales: armadura y campo. La interacción de los campos magnéticos de ambos componentes provoca la rotación del rotor.

La etapa puede ser implementado mediante el uso de:

- Tiristores
- Transistores.

Variador a tiristores

Los Rectificadores Controlados de Silicio (SCR) normalmente llamados “tiristores”, usados en la unidad de potencia convierten voltaje AC a un voltaje DC controlado. El SCR conduce corriente cuando un pequeño impulso de voltaje es aplicado a su terminal “gate”, ver Figura 23.

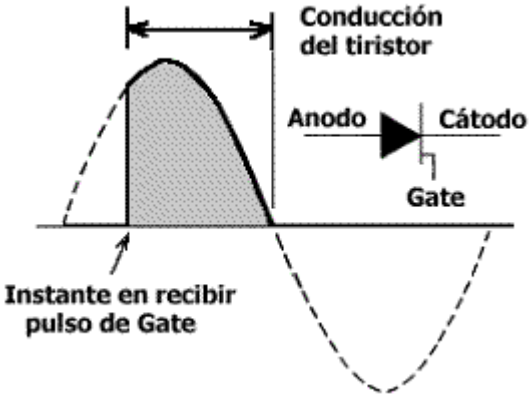

Figura 23

La mayoría de variadores a tiristor diseñados para operar con alimentación AC monofásica, tienen 4 tiristores. Las unidades que operan con alimentación trifásica son frecuentemente construidas con seis tiristores, ver Figura 24. Una variante de dicho diseño incluye el reemplazo de la fila inferior de tiristores por diodos rectificadores y adicionando un diodo de conmutación a través de la salida de armadura DC.

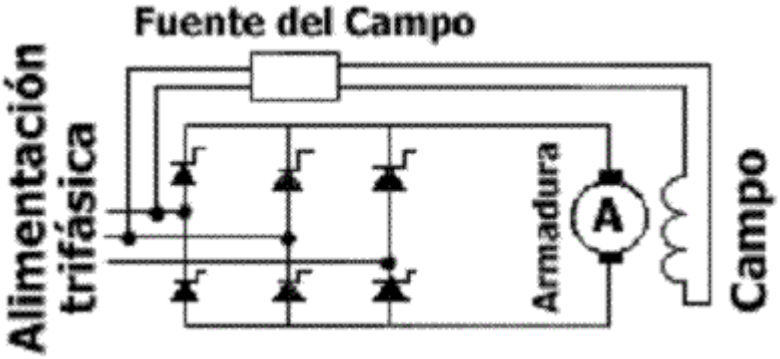

Figura 24

La fuente del campo mostrada en la Figura 24 se encuentra implementada por un puente de diodos, por lo tanto el campo recibe un voltaje DC fijo de valor igual a su nominal. La armadura recibe voltaje DC variable, con la finalidad de que el motor trabaje en la región de torque constante tal como se vio en la Figura 23 de la primera parte. Para desconectar físicamente al motor de la unidad de potencia de estado sólido, se utiliza un contactor (M). Al energizar la bobina de control del contactor M, el puente rectificador a tiristores alimenta a la armadura haciendo que dicha máquina trabaje como motor impulsando a la carga acoplada a su eje. Cuando se desea tener control de frenado de dicho motor, se puede frenar rápidamente por medio de una resistencia de frenado dinámico (Dynamic Brake: DB) a través de la armadura del

motor. La bobina de control del contactor M debe ser desenergizada para permitir que la resistencia DB actúe como una carga de la armadura, la cual por acción de la inercia de su carga, se ha convertido en generador. Dicho frenado dinámico sólo es efectivo mientras la armadura se encuentre en movimiento. Adicionando otro grupo de tiristores (denominados sección reversa) conectados con polaridad invertida, ver Figura 25, el variador obtiene capacidades regenerativas y puede operar en los cuatro cuadrantes, ver Figura 26. Dicha configuración ofrece operación bidireccional sin el uso de contactores de inversión y frenado regenerativo controlado.

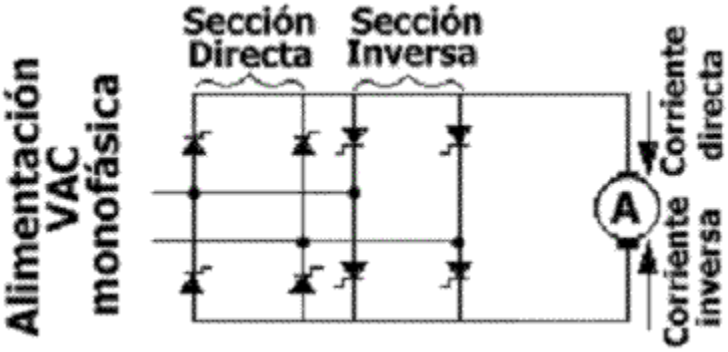

Figura 25

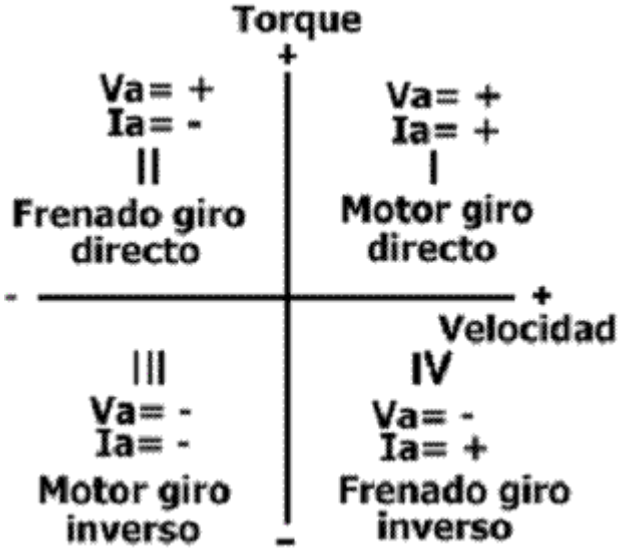

Figura 26

El frenado regenerativo se entiende como el retorno de energía desde el motor (durante el instante de frenado se comporta como generador) hacia la fuente de alimentación AC. Dicha energía debe ser de algún modo absorbida por la fuente. La Figura 26 nos muestra que durante el frenado, la polaridad de la armadura no cambia pero si el sentido de la corriente. Esto quiere decir que para el frenado regenerativo el voltaje de alimentación a la armadura se debe hacer menor que la tensión contra-electromotriz. Ver ecuación (1-1) de la primera parte. Los variadores a tiristores son los normalmente

utilizados en la industria pues pueden controlar motores DC de fracciones de potencia hasta decenas de MW.

Etapa de control de variadores de velocidad dc

Control realimentado

Se presenta el Diagrama de Bloques del variador de velocidad de motor DC en el cual presentamos las principales partes que la conforman. Ver Figura 27.

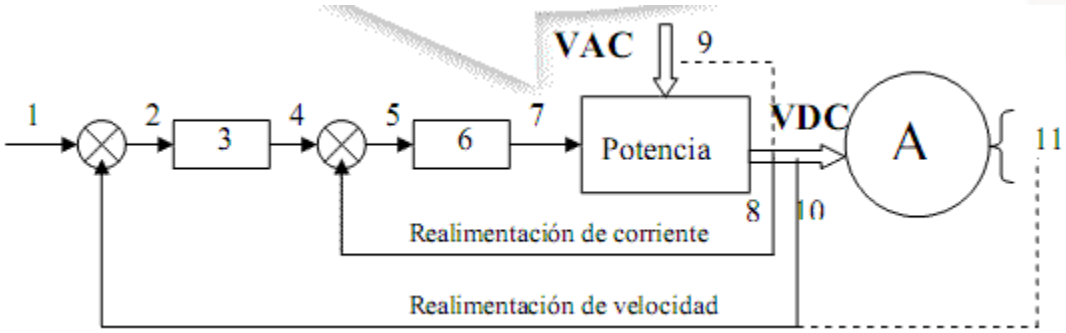

Figura 27

Las partes numeradas se detallan a continuación:

1. **Valor de referencia de velocidad ingresando al bloque comparador.** Normalmente es un valor de voltaje proporcionado por un potenciómetro o señales normalizadas 0-10V / 4-20mA provenientes de un controlador.
2. **Error de velocidad.** Es el resultado de la comparación de las señales denominadas valor de referencia de velocidad y realimentación de velocidad.
3. **Bloque regulador de velocidad.** Reacciona con características proporcional-integral (PI) ante el error de velocidad que recibe a su entrada. La señal 4 es la salida.
4. **Valor de referencia de torque.** Denominado así porque se compara con la realimentación de corriente, la cual es proporcional al torque que desarrolla el motor.
5. **Error de torque.** Es el resultado de la comparación de las señales denominadas valor de referencia de torque y realimentación de corriente.
6. **Bloque regulador de torque.** Reacciona con características proporcional-integral (PI) ante el error de torque que recibe a su entrada. La señal 7 es la salida.
7. **Mando disparo de tiristores.** Es la señal DC que se transforma en pulsos de disparo luego de ingresar al circuito de disparo. El ángulo de disparo es tal que la potencia DC recibida por la armadura del motor sea la necesaria para mantener la velocidad del motor al valor de referencia deseado.

8. **Realimentación de corriente.** Es la señal que representa a la corriente de armadura, medida en forma directa por medio de un transformador de corriente DC o en forma indirecta por medio de una resistencia de pequeño valor (resistencia shunt).

9. **Realimentación de corriente.** Es la señal de medida de corriente de armadura pero en forma indirecta por medio de transformadores de corriente AC ubicados en la entrada de la etapa de potencia. Dicho valor de corriente debe ser rectificado por medio de puente de diodos y transformado en VDC por medio de una resistencia.

10. **Realimentación de velocidad.** Es la señal de medida de velocidad en forma indirecta por medio de tomar una muestra del voltaje de armadura (ver siguiente ecuación 2-2). Dicho valor tiene un error inherente de velocidad medida debido a la caída la r_a, razón por la cual el variador pierde precisión al tratar de controlar la velocidad. Para minimizar dicho problema se aplica la técnica de Compensación IxR.

11. **Realimentación de velocidad.** Es la señal de medida de velocidad en forma directa. El medidor de velocidad se acopla directamente al eje del motor. Existen dos tipos de dichos medidores los que se denominan: Tacogenerador (Dinamo-Tacométrica) y Encoder. El tacogenerador proporciona una señal tipo voltaje analógico DC proporcional a la velocidad del eje del motor y con polaridad dependiendo del sentido de giro. Usar el tacogenerador permite una precisión de velocidad del orden de $\pm$ 0,1%. El encoder proporciona cuatro señales digitales desfasadas de a dos, los cuales proporcionan información de velocidad, sentido de giro y posición. Usar el encoder permite una precisión de velocidad del orden de $\pm$ 0,01%.

Se tiene los siguientes ejemplos:

a. Las instrucciones desde una estación de control de operador u otra entrada, son enviadas hacia el regulador, ver Figura 28. El regulador compara las instrucciones con las realimentaciones de voltaje y corriente y envía la señal apropiada hacia el circuito de disparo. Dicha etapa acondiciona los pulsos de disparo que activarán a los Transistores o tiristores, causando su conducción. En algunos diseños, el regulador y circuito de disparo están unidos en un solo circuito digital.

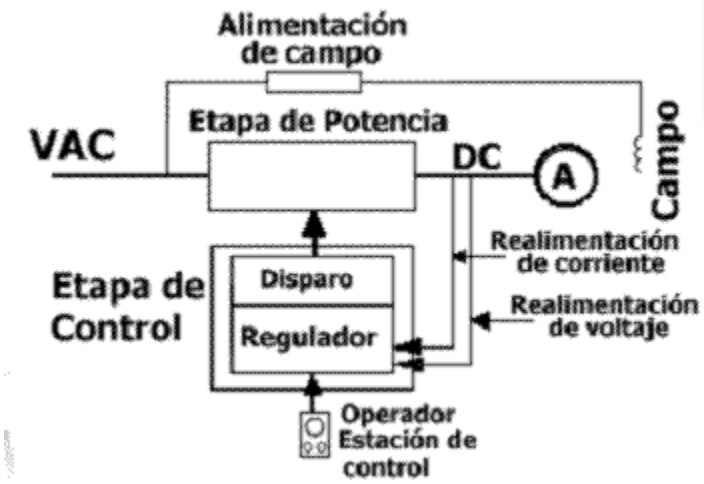

Figura 28

La realimentación de voltaje da una indicación de la velocidad del motor, y la corriente indica el torque del motor tal como se vio en la ecuación (1-1) y (1-2) de la primera parte.

De dichas ecuaciones y despreciando la caída en la inductancia L_a se tiene:

$$n = \left(\frac{V_a - I_a r_a}{k I_f}\right) \qquad (2-1)$$

De la ecuación anterior observamos que la realimentación de voltaje de armadura V es una forma indirecta de medir la velocidad n en el motor.

Lo ideal sería medir el valor del voltaje contra-electromotriz E_a pero, eso es imposible, por lo tanto lo mejor es medir el voltaje de armadura aplicado y restar de ella un voltaje igual a la caída Ia r_a; esto es posible gracias a que la caída de voltaje en los extremos de cualquier resistencia es proporcional a la caída en la resistencia de la armadura.

Los ajustes típicos en el regulador incluyen: mínima velocidad, máxima velocidad, límite de corriente (torque), compensación IR (carga) y ajuste de la tasa de aceleración.

b. Para un control más preciso de la velocidad, un encoder o tacogenerador pueden ser montados en el motor para dar una señal de realimentación, ver Figura 29, que es proporcional a la velocidad actual del motor. La calidad de estos y del regulador determina la precisión total del variador.

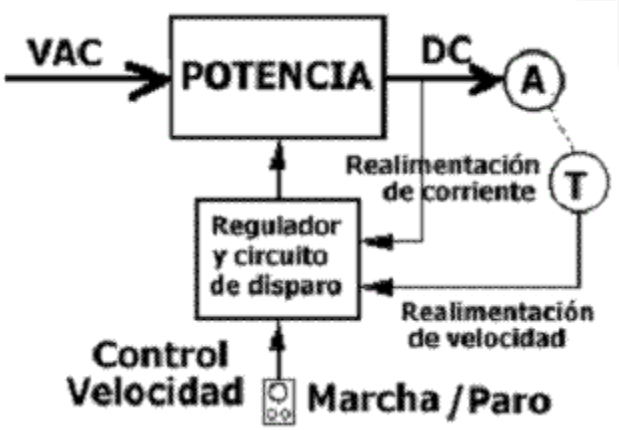

Figura 29

En la Figura 28 se observa que las bobinas de campo y armadura son alimentadas por circuitos independientes. Generalmente la alimentación que recibe el campo es constante, por lo que se facilita la característica de control de torque, la cual dependerá únicamente de la corriente aplicada a la armadura.

En la Figura 29 se representa el modo de control mencionado, el cual es del tipo "Control Vectorial" pues se tiene la habilidad de controlar independientemente las corrientes que producen el flujo y torque en un motor con el propósito de controlar con precisión su torque y potencia.

El ángulo "d" es de 90° debido a la posición mecánica entre el conmutador y las escobillas, por lo tanto el torque es directamente proporcional a la corriente de armadura (I_a) ya que I_f es constante. Observe que al aumentar la carga del motor, la velocidad tiende a disminuir y por lo tanto el variador debe ser capaz de proporcionar mayor I_a al motor para compensar dicho incremento de carga y así mantener la velocidad constante.

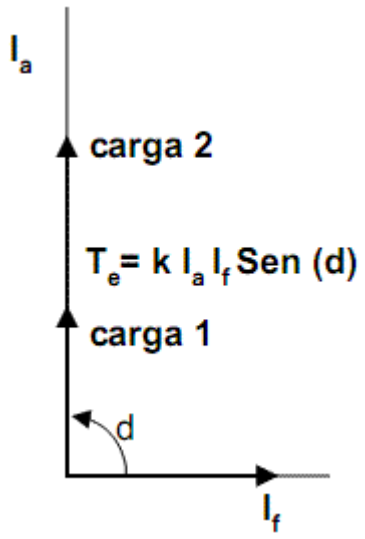

Figura 30

Transductores de velocidad y corriente para motores

Los transductores son elementos que cambian una magnitud física a otra, es decir.

- Magnitud física de velocidad angular se puede cambiar a una magnitud física de voltaje.
- Magnitud física de corriente se cambia a voltaje.
- Magnitud física de movimiento angular se cambia a voltajes senoidales.

Entre los transductores que se utilizan para medir velocidad tenemos:

A. Encoder

Los encoder están divididos en dos grupos:

- Incremental y
- Absoluto.

Encoder Incremental, cuentan simplemente el paso de una división del círculo y entregan salidas pulsantes que permiten almacenar la cuenta y conocer el sentido de rotación. Este método es conocido como sistema de salida “A Quad B” y se muestra en la Figura 31.

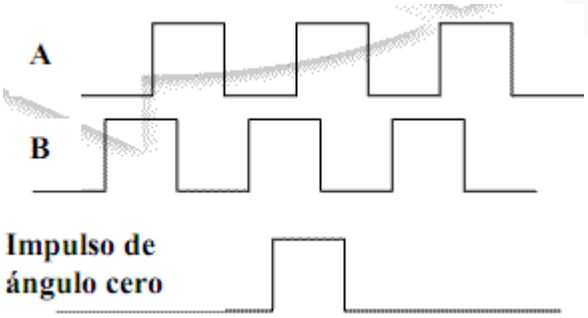

Figura 31

En este método, el sentido de giro se deduce de la presencia de los frentes de los trenes de impulsos A y B. Una transición de 0 a 1 en “A” se produce antes que una transición de la misma forma en “B” en un sentido de rotación, y lo contrario sucede si el giro es en sentido opuesto, ver Figura 32.

Durante la rotación del eje, cada vez que pasa por la posición cero se genera un impulso sincrónicamente con A y B. Los encoder incrementales producen estos impulsos a partir de dispositivos fotoeléctricos.

La ventaja del encoder incremental es que la posición inicial no es conocida en el instante de la puesta en marcha.

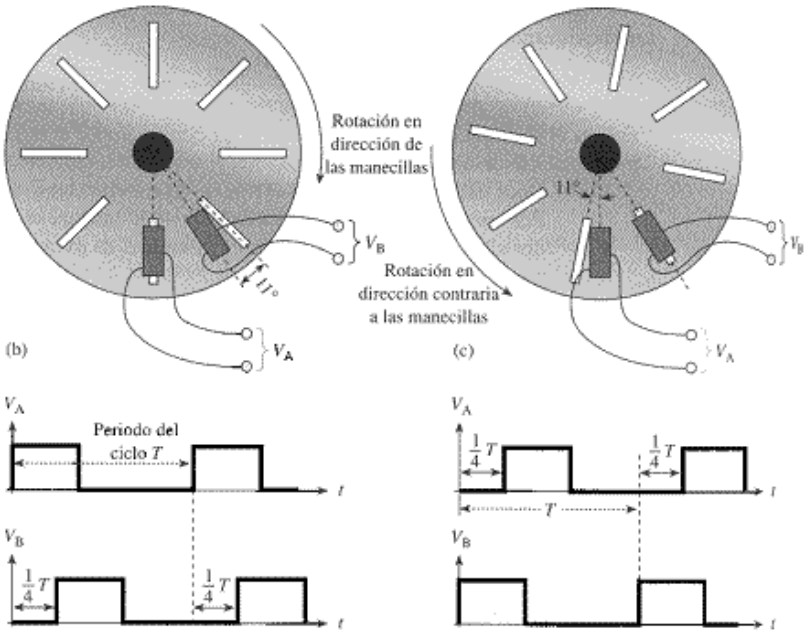

Figura 32

Algunos valores nominales de los encoder incrementales son: 1024 pulsos por revolución, 300 pulsos por revolución, etc.

Encoder Absoluto, proporcionan una salida digital paralelo que es generada por un patrón situado sobre un disco rotativo acoplado al eje. Los sensores empleados en este caso pueden ser contactos eléctricos o un sistema fotoeléctrico. Pueden utilizarse diversos códigos, siendo el binario y el Gray los más corrientes y es posible alcanzar resoluciones y precisiones muy altas, del orden de 16 bits (20 segundos de arco) y superiores.

Este método tiene el inconveniente de su elevado costo y presenta el problema de la transmisión de los datos en paralelo si el encoder se halla distante del sistema electrónico de medida.

B. Resolver

Resolver, es un transformador rotativo cuya tensión analógica de salida está relacionada únicamente con el ángulo de su eje. Es, por lo tanto, un transductor de posición absoluta con un ángulo de rotación de 0 a 360°. Ver Figura 33.

El resolver como transductor de medida de ángulo presenta diversas ventajas. En primer lugar, es un dispositivo mecánico robusto que puede soportar ambientes agresivos de polvo, aceite, temperaturas extremas y radiaciones. En segundo lugar, por ser un transformador introduce separación de señal y el rechazo natural de modo común de las interferencias eléctricas.

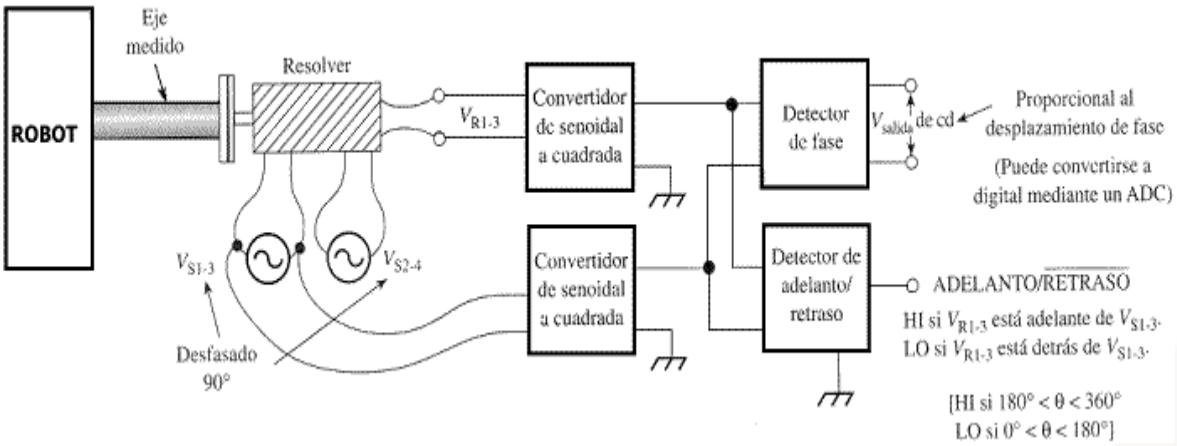

Figura 33

Esta característica, asociada con el hecho de que sólo se necesitan cuatro hilos para la transmisión de datos angulares, hace al resolver único en la medida de ángulos e idealmente apropiados para operar en las duras condiciones ambientales propias de la industria pesada y aeroespacial. Actualmente se dispone de resolvers sin escobillas, que no necesitan establecer ningún contacto con el rotor, lo que aumenta en gran medida la duración y fiabilidad del dispositivo.

C. Tacómetros

Tacogenerador (Tach) o Dínamo Tacométrica (DT), es una máquina eléctrica DC que convierte energía mecánica a energía eléctrica, es decir que trabaja como generador DC.

Sus partes son:

- Estator conformado por un imán permanente que proporciona el flujo magnético 0F, y
- Rotor construido de un núcleo laminado ranurado, sobre el cual se tienen bobinados de alambres de cobre, los que terminan en el conmutador y escobillas necesarios para transformar el voltaje inducido en salida disponible DC. Ver Figura 34.

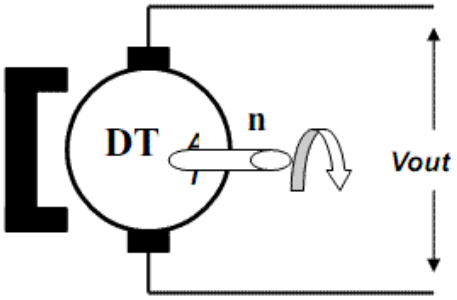

Figura 34

El eje del tacómetro se acopla con el eje del motor del cual se va a tomar la medida de velocidad. Al girar el motor, su eje arrastra al del tacómetro, el cual responde en su salida con un voltaje DC directamente proporcional a la velocidad del motor. Se tiene la siguiente ecuación que relaciona la velocidad de entrada n (en RPM) y el voltaje DC de salida Vout del tacómetro:

$$V_{out} = k\emptyset_f n$$

D. Transformador de corriente ac

Conformado por un núcleo laminado toroidal alrededor del cual se encuentra el bobinado inducido que viene a ser el secundario. Por el agujero del núcleo toroidal va el cable de la corriente a medir (Iprimario), dicha corriente es AC; la corriente de salida se denomina Isecundario, y también es AC pero de un valor menor, de acuerdo a la relación de transformación según su placa de datos. La corriente secundaria debe ser rectificada mediante puente de diodos y convertida a voltios tal como se muestra en la Figura 35.

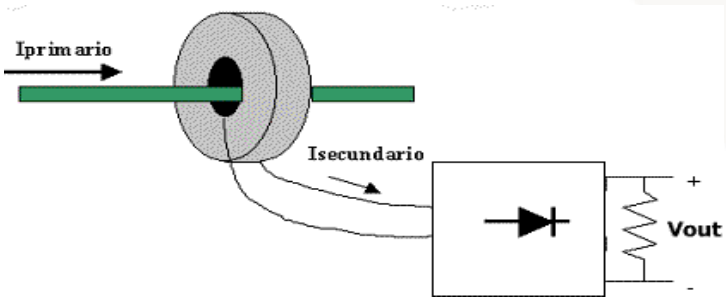

Figura 35

E. Transformador de corriente dc

Se basa en el fenómeno de “efecto Hall” en el que los portadores de carga que se mueven a través de un campo magnético son forzados hacia un lado del medio del conductor, luego la distribución no uniforme de la carga produce una diferencia de potencial de lado a lado, el cual se denomina Voltaje Hall. En la Figura 36 se muestra una aplicación como medidor de flujo de potencia.

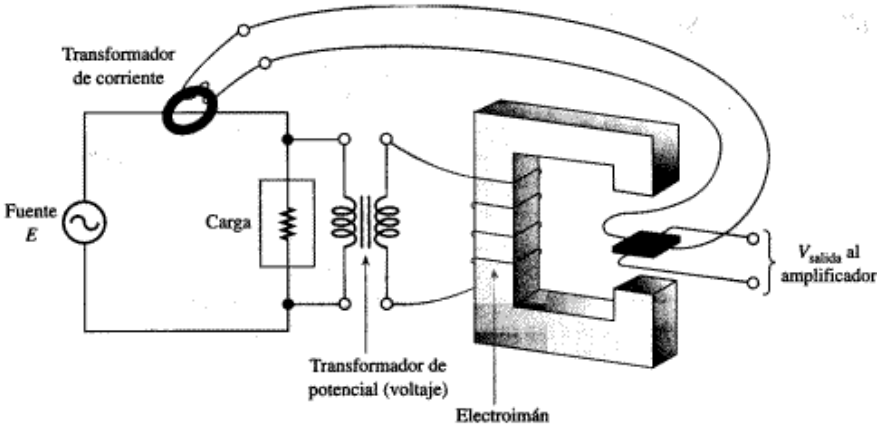

Figura 36

F. Resistencia shunt

Conformado por una barra de cobre o bronce, la cual es colocada en serie con el conductor cuya corriente DC se desea medir. Ver Figura 37.

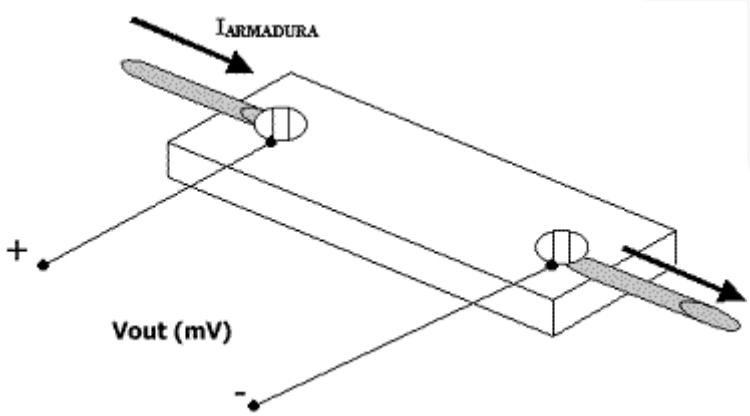

Figura 37

Se basa en el principio de caída de voltaje que produce una resistencia al ser atravesada por una corriente (Ley de Ohm).

La ecuación que representa la relación es:

$$V_{out(mv)} = k_2 \, I_a$$

Donde k2 es la relación de transformación en mV/Amperios nominales dada en la placa de datos de dicha resistencia shunt.

Se especifica del siguiente modo: k2=20mV/50A, k2=50mV/50A, etc. Lo cual quiere decir, para el primer caso, que al pasar una corriente máxima de 50ADC existe una caída de voltaje igual a 20mV en los bornes de la resistencia shunt.

Su ventaja es el costo económico.

La desventaja es que no tiene aislamiento entre etapa de potencia y etapa de control; además es necesario amplificar la señal de salida del orden de mV a V.

En algunas aplicaciones, para conservar el aislamiento entre etapa de potencia y control, se utiliza una tarjeta convertidora DC/DC la cual cumple también la función de amplificar la señal proporcional a la corriente que va a recibir la etapa de control.

1.2 Control de procesos orientado a motores y variadores de velocidad

Es un método por el cual un “Proceso” de fabricación puede ser controlado de forma continua y automática, con resultados regulares y coherentes. El control de procesos define el sistema general, sus componentes, y sus respectivas capacidades. El control de procesos puede tener los siguientes nombres.

- Control de lotes (batch) continuos.
- Control de bucle cerrado.
- Control de bomba. Control de nivel.
- Control térmico de zona. Control automático.

Se tienen las siguientes ventajas:

- La capacidad de fabricar un producto con exactitud repetible.
- El uso más eficaz y eficiente de las instalaciones de la planta.
- Permite al operador dedicarse a trabajos más productivos y que requiera mayor destreza.
- Se reducen las tareas aburridas y se evita que haya trabajadores expuestos a operaciones peligrosas.
- Mayor productividad, menor desperdicio.

Control de bucle abierto (sin realimentación)

Se denomina así a un sistema de control que no detecta su propia salida y por lo tanto no hace correcciones en el proceso. No hay retroalimentación al sistema de control que le permita a éste regular el proceso.

Control de bucle cerrado (con realimentación)

Ofrece al usuario la capacidad de programar una determinada operación de modo que se realice en forma regular y coherente. Un sistema de control que haya sido correctamente preparado hará ello independientemente de casi todas las influencias (perturbaciones) externas.

El control Proporcional-Integral-Derivativo (PID) tiene como fin específico mantener la regularidad del proceso y compensar las perturbaciones externas.

Diagrama de bloques de un sistema realimentado

Los sistemas de control se representan usualmente mediante una serie de bloques interconectados. Los bloques representan las funciones específicas del sistema. Ver Figura 38.

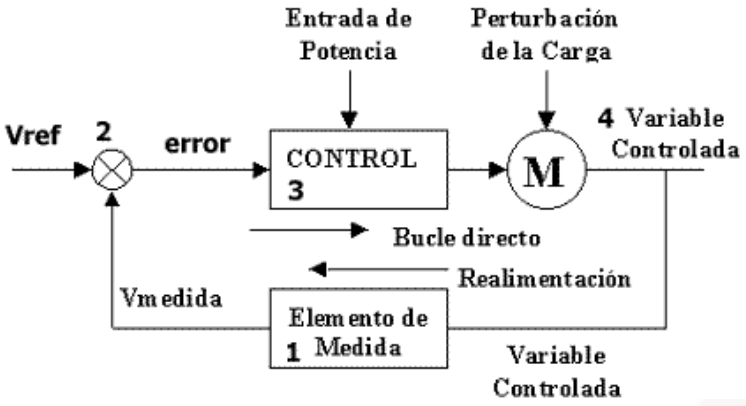

Figura 38

Todo sistema realimentado puede dividirse en cuatro operaciones básicas:

1. **Medición de la variable controlada**

La variable controlada puede ser temperatura, velocidad, espesor, presión de agua, etc. Como elemento de medición se usa un sensor, y la medición obtenida se convierte luego en una señal compatible con las entradas del control, por lo general voltaje (0-10V) o corriente (4-20mA). Esta señal representa a la variable controlada.

2. **Determinación del error**

Esto se realiza en la sección de comparación.

$$Error = V_{ref} - V_{medida} \qquad (2-16)$$

3. **La señal de error**

Es usada luego por el control para cambiar el torque o la velocidad del motor.

4. **La variable controlada**.

Se emplea después el torque o la velocidad del motor para reducir la señal de error accionando el control de manera que el valor real de la variable controlada se aproxime al valor de referencia (Vref). Es importante notar que los sistemas de control realimentados son accionados mediante el error; es decir, deberá existir un error antes que el sistema trate de hacer la corrección respectiva.

Definición de "p" (ganancia proporcional)

Es la amplificación que se aplica a la señal de error del proceso y que va a resultar en una determinada salida del control. La ganancia proporcional se define como:

$$Aout = k_p \varepsilon \qquad (2-17)$$

Dónde:

- $Aout =$ Salida del control
- $K_p =$ Ganancia proporcional
- $\varepsilon =$ Señal de error del proceso

La ecuación (2-7) se puede interpretar como:

- La amplitud de la salida del control es función del error del proceso, multiplicado por la ganancia proporcional.
- Para una determinada magnitud del error, cuanto mayor sea la ganancia proporcional, mayor será la salida.
- Para un determinado valor de la ganancia proporcional, cuanto mayor sea el error, mayor será la salida.

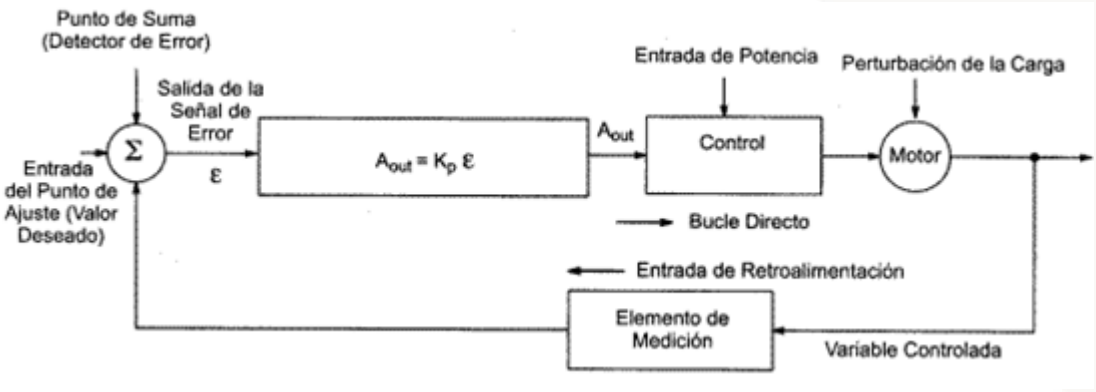

Figura 39

Definición de "I" (ganancia integral)

La ganancia integral (al igual que la ganancia proporcional) es una amplificación de la señal de error del proceso, pero depende del tiempo.

Un error de estado estacionario que se mantienen durante un largo período de tiempo es conocido como desviación (offset o desequilibrio). La ganancia integral compensa esta desviación o error a largo plazo.

La ganancia integral se define como:

$$Aout = k_i\ \varepsilon\ \Delta t \qquad (2-8)$$

Dónde:

$Aout =$ Salida del control.

$\varepsilon =$Señal de error del proceso.

$\Delta t\ =$ Cambio en el tiempo.

- La salida del control (Aout) es igual a la ganancia integral (ki), multiplicada por el error acumulado durante un intervalo de tiempo t.
- El error de largo plazo se acumula a través del tiempo y la ganancia integral permite compensar y reducir el error de largo plazo.

En general, si usted usara en un proceso tan solo el control proporcional, la salida del control nunca haría que la variable controlada sea exactamente igual al valor de referencia. Siempre habría una pequeña cantidad de error. La característica integral detecta esta desviación de largo plazo y corrige la salida del control para reducir el efecto de tal desviación.

Definición de "d" (ganancia diferencial)

El elemento diferencial es proporcional a la tasa de cambio del error del proceso. La ganancia diferencial se proporciona para reducir la sobre modulación (overshoot o

sobre-impulso) del control de procesos durante perturbaciones repentinas de gran magnitud. El elemento diferencial responde únicamente durante las condiciones transitorias.

La ganancia diferencial se define como:

$$Aout = k_D \frac{\Delta\varepsilon}{\Delta t} \qquad (2-9)$$

Dónde:

K_D = Ganancia Diferencial

$\Delta\varepsilon/_{\Delta t}$ = Cambio en la señal de error del proceso dividida por el cambio del tiempo.

La interpretación de la ecuación (2-9) es:

- Al producirse un gran cambio en el error del proceso durante un período fijo de tiempo, el término diferencial ejercerá un efecto grande sobre la salida de control.
- Un pequeño cambio en el error del proceso durante un período fijo de tiempo ejercerá menor efecto sobre la salida del control.

En la mayoría de las aplicaciones la ganancia diferencial es raramente usada. De ser necesaria, se la deberá emplear con sumo cuidado, puesto que podría provocar inestabilidad.

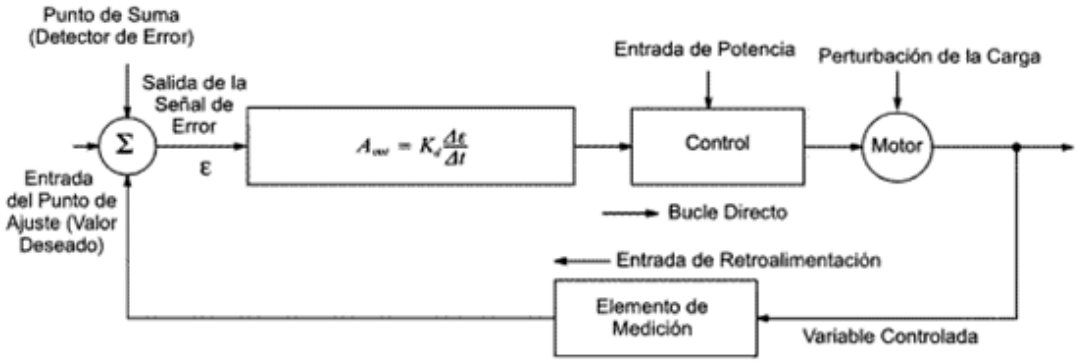

Figura 40

1.3 Tipos de variadores de velocidad en motores AC

Para propósitos generales, los controladores de variadores AC de frecuencia ajustable son fabricados en tres tipos: Voltaje de Entrada Variable (VVI), Entrada de Fuente de Corriente (CSI) y Modulación por Ancho de Pulso (PWM). Cada uno tiene ventajas características específicas.

Voltaje de entrada variable (vvi)

Aunque este diseño fue común en la década de los 70s y comienzos de los 80s, es hoy en día limitado para aplicaciones especiales tal como variadores que desarrollan alta velocidad (400 a 3000 Hz).

El diseño VVI, recibe voltaje AC de la planta, lo rectifica y controla, desarrollando un voltaje DC variable hacia el amplificador de potencia (etapa inversora). El amplificador de potencia invierte el voltaje DC variable a frecuencia variable y voltaje variable AC. Esto puede ser realizado por transistores de potencia o SCRs.

La salida de voltaje desde una unidad VVI es frecuentemente llamada “onda de seis pulsos”. El VVI fue uno de los primeros variadores AC de estado sólido que tuvo aceptación general.

Inversor fuente de corriente (csi)

Se usa en variadores con potencias mayores a 50HP. Las unidades CSI se encuentran bien situadas para el manejo de bombas y ventiladores como una alternativa de ahorro de energía para el control de flujo.

Capaces de trabajar con eficiencias cercanas a los variadores DC, el diseño CSI ofrece economía sobre las unidades VVI y PWM para aplicaciones en bombas, ventiladores y similares. El CSI ofrece capacidad de regeneración. Con una sobre carga, el controlador alimenta energía de retorno al sistema AC.

Modulación por ancho de pulso (pwm)

Muchas unidades PWM (frecuentemente llamadas “variadores V/Hz”) ofrecen operación a cero velocidad. Algunos proporcionan rango de frecuencias cercanas a 200:1. Este amplio rango es posible pues el controlador convierte voltaje de entrada AC a un voltaje DC fijo por medio del rectificador de potencia.

Luego de este amplificador, el voltaje DC es modulado por medio de un inversor para producir pulsos de diversos anchos, para variar el voltaje efectivo. A pesar que el voltaje es modulado, la forma de onda de la corriente es cercana a una onda senoidal, mucho mejor que cualquier otro sistema. Las unidades PWM usan transistores de potencia IGBT’s.

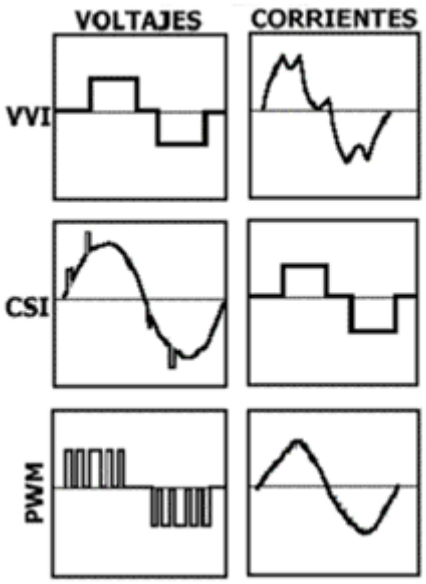

Figura 41

Observando las formas de onda de corriente de la Figura 41, deducimos que el variador tipo PWM es el que proporciona mejor calidad de corriente al motor AC, logrando que trabaje con mejor eficiencia y produciendo un control de torque más fino. Son por lo tanto los más usados en la actualidad.

La onda de voltaje producida por el variador tipo PWM se denomina “Seno PWM” y es producto del trabajo a gran velocidad (llegando hasta 20 kHz) de los transistores IGBT, los cuales son comandados por medio de un sofisticado circuito de control micro computarizado.

1.4 Etapa de potencia en variadores de velocidad de motor ac.

El transistor igbt

Los transistores bipolares de compuerta aislada comúnmente llamados IGBT's son el resultado de muchas investigaciones desarrolladas por los fabricantes de componentes electrónicos, con el objetivo de conseguir un dispositivo de gran velocidad de conmutación, mínimo consumo de corriente de control y gran capacidad de soporte a voltajes y corrientes elevados. El símbolo del IGBT según norma alemana se muestra en la Figura 42.

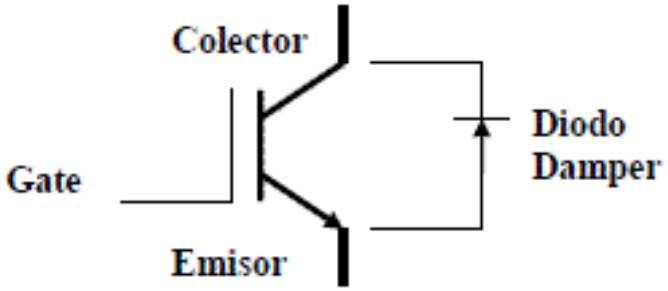

Figura 42

Observe que los terminales Colector-Emisor normalmente vienen con un diodo "Damper" instalado en dicha posición para protección contra cargas inductivas.

Para activar un IGBT (turn on), se debe aplicar voltaje de un valor determinado a sus terminales de control Gate-Emisor. El consumo de corriente de dicho terminal de control es prácticamente cero; por lo tanto se dice que el IGBT no consume corriente. Esto evita los retardos de tiempo asociados con dispositivos que consumen corriente de control tal como los transistores bipolares BJT.

Un transistor IGBT responde rápidamente a los cambios de señal (menores a 1 μs), reduciendo los niveles audibles en el motor AC mientras se está controlando el torque y la velocidad. Y, su gran frecuencia de conmutación (frecuencia portadora) provee un control de corriente de gran respuesta dinámica. También, las pérdidas en un IGBT son muy pequeñas como resultado de disponerse en encapsulados compactos dentro del variador. Las medidas correctas del transistor IGBT mediante un multímetro digital en escala de diodos (Transistor IGBT con diodo Damper) se muestra en la Figura 43. El valor "OL" de la tabla 19 representa máxima escala.

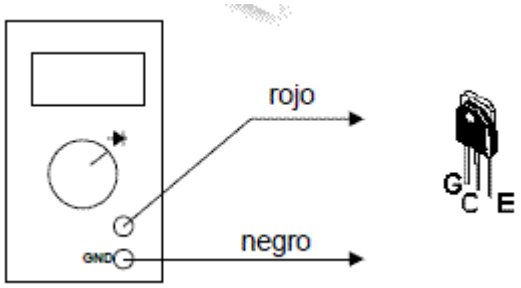

Figura 43

Cable Rojo Multímetro	Cable Negro Multímetro	Valor Medido (V)
C	E	OL
E	C	Ejm: 0,6
C	G	OL
G	C	OL
G	E	OL
E	G	OL

Tabla 3-1

Tabla 2

El puente inversor trifásico

La Figura 44 nos muestra el circuito que puede cumplir con los requisitos solicitados por la ecuación (3-4). Por lo tanto el motor AC puede ser controlado a velocidades diferentes a su valor nominal y aún conservar las características nominales de su torque.

La única forma de poder conseguir una onda de voltaje que cumpla con el requisito de cambiar proporcionalmente su voltaje y frecuencia al mismo tiempo, es por medio de un circuito Inversor.

En la Figura 44 se muestran las partes que conforman la etapa de potencia de todo tipo de variador de velocidad de motor AC en la actualidad.

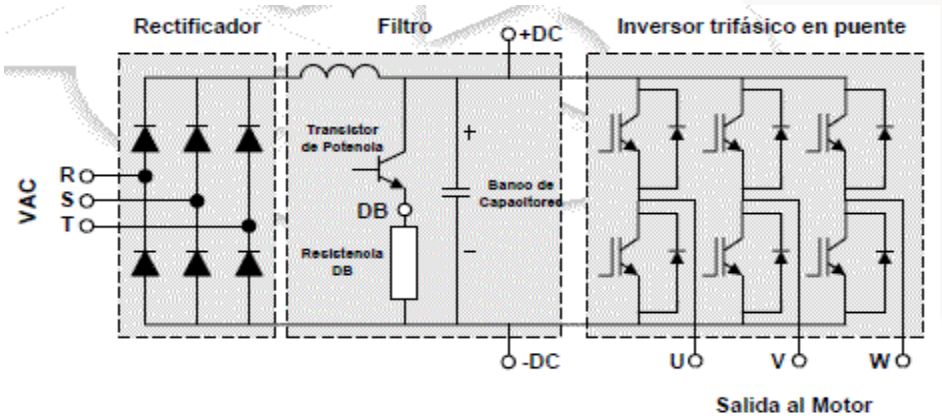

Figura 44

La alimentación de entrada es VAC monofásico o trifásico dependiendo de la potencia del motor AC a controlar. Dicho voltaje AC es rectificado por medio de un puente de diodos.

Luego tenemos la etapa de filtrado compuesta de filtro de corriente (bobina) y filtro de voltaje (capacitor), con el objetivo de disponer de una barra de voltaje DC lo más continua posible (bornes +DC/-DC).

Dicha barra DC es la entrada al circuito inversor, el cual por medio del trabajo conmutado de los IGBT la convierte en un voltaje de salida (bornes U, V, W) denominada “Seno-PWM”, que cumple con el requisito de mantener la relación V/f a proporción constante.

Voltaje seno-pwm

La Figura 45 muestra en forma detallada la onda “Seno-PWM” de salida del inversor trifásico en puente. La amplitud (Vd) de dicha onda es igual a la barra de voltaje DC (bornes +DC/-DC de entrada al circuito inversor).

El motor recibe dicha onda de voltaje por los bornes de salida U,V,W y la filtra obteniendo corrientes (IU, IV. IW) casi senoidales. El promedio de voltaje eficaz “V” depende del ancho de los pulsos y la frecuencia efectiva “f” vista por el motor es 1/T. La velocidad de conmutación de los transistores IGBT es 1/t denominada “frecuencia portadora”.

El resultado es que el motor recibe la relación “V/f” proporcional a sus valores nominales, consiguiendo que desarrolle su trabajo aún a velocidades menores que lo normal y sin pérdida de torque.

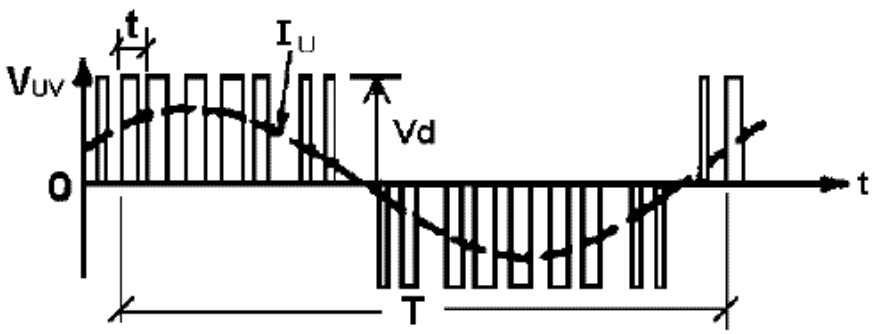

Figura 45

1.5 Etapa de control en variadores de velocidad de motores ac

Si examinamos con detenimiento el modelo matemático del motor de inducción mostrado en la Figura 46, se puede notar que los circuitos de flujo y torque no están separados.

En los terminales del motor AC se tienen tres cables que transportan el vector suma de las corrientes que producen flujo y torque. Esta es la razón por la cual el control vectorial de un motor AC es más dificultoso que el correspondiente a un motor DC.

El reto para el control del variador de Velocidad de motor AC es distinguir ambas corrientes sin el beneficio de circuitos separados.

La Figura 46 nos muestra el problema. La corriente del estator $I1$ es el vector suma de las corrientes que producen flujo y torque. El ángulo entre IM e $I2$ cambia constantemente bajo diversas condiciones. La corriente del estator debe entonces ser variada con el fin de producir la corriente de torque requerida, mientras la corriente de magnetización debe ser mantenida.

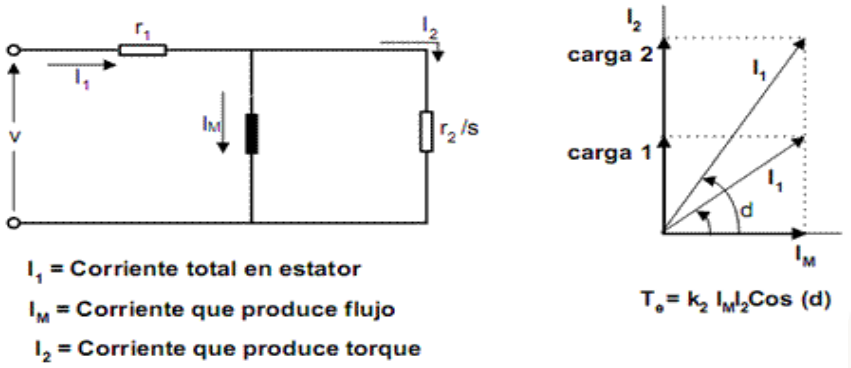

Figura 46

Desde que se tienen diversas variables envueltas en el cálculo de las corrientes, habrá entonces muchos modos de diseñar el control del variador. Estos incluyen esquemas directos e indirectos. Los esquemas directos miden eléctricamente el ángulo del flujo del rotor. El control indirecto de campo-orientado usa realimentación de velocidad o posición del motor y consideraciones de deslizamiento para suministrar comandos instantáneos de torque y flujo.

El circuito PWM de potencia es comúnmente usado con tres tipos básicos de reguladores. Son estos reguladores los que determinan las capacidades del variador, incluyendo la respuesta, regulación de velocidad debido a cambios transitorios de carga y capacidad del torque a baja velocidad.

Regulador v/f.

La configuración más común y de menor costo, es usado en aplicaciones con o sin realimentación de velocidad. Este diseño ofrece generalmente los ajustes básicos de un variador, incluyendo ajuste de velocidad, límite de torque, V/Hz, peldaño de voltaje a bajas velocidades, mínima y máxima velocidad, tasas de aceleración y deceleración y otros ajustes similares, que reúnen los requerimientos para la mayoría de aplicaciones.

El control V/f en su forma más simple lleva un comando de referencia de velocidad desde una fuente externa y varía el voltaje y frecuencia aplicado al motor.

Debido a que mantiene una relación constante de V/f, el variador puede controlar la velocidad del motor conectado. No es capaz de regular el torque. En la Figura 47 se muestra el diagrama de bloques del regulador V/f.

Típicamente, un bloque limitador de corriente supervisa la corriente del motor y altera el comando de frecuencia cuando el motor excede el valor de corriente predeterminada. El variador sólo trabaja con la corriente total del motor y no puede distinguir los límites de capacidad de IM de I2. El pico de torque máximo es de 150%.

El bloque “compensación de deslizamiento” altera la referencia de frecuencia cuando la carga cambia para mantener la velocidad actual del motor cerca de la velocidad deseada.

Mientras este tipo de control es suficiente para muchas aplicaciones, no lo es tanto cuando se tienen aplicaciones que requieren gran rapidez de respuestas dinámicas, tal como cuando el motor debe trabajar a muy bajas velocidades o aplicaciones que requieren control directo del torque del motor en vez de frecuencia del motor.

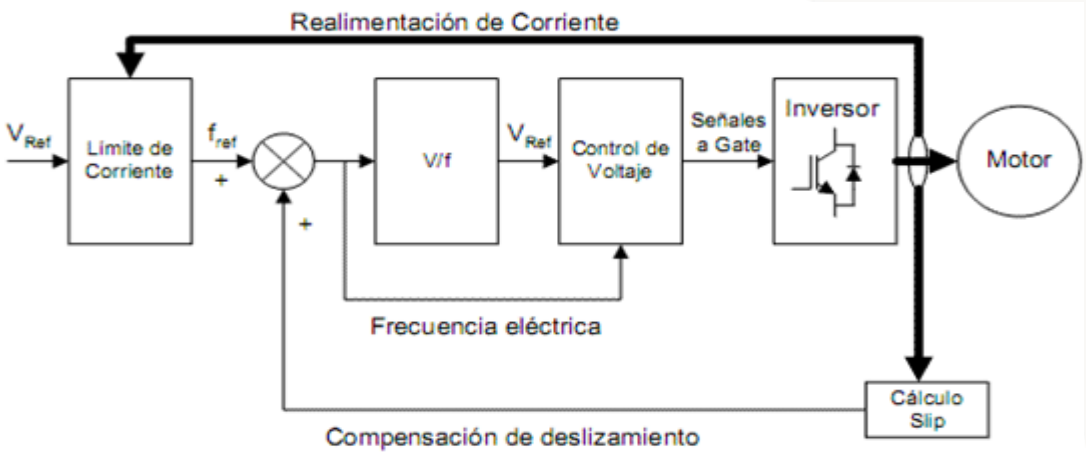

Figura 47

Regulador vector básico

Introducido a mediados de los 80s, este regulador fue un avance significativo sobre el diseño V/Hz. Cada unidad usa un método de aproximación para controlar el ángulo del flujo del rotor-estator para optimizar la operación del motor. Algunos variadores vector tenían la expectativa de tener regulación de velocidad en lazo abierto equivalente a un variador de velocidad DC con realimentación. Muchas unidades no se acercaron a estas expectativas. A pesar de esto el Vector Básico ofrece mejores rendimientos.

Regulador sensorless vector

Más recientemente, a mediados de los 90s, fueron introducidos muchos reguladores Vector mejorados. Estos tenían los recientes avances en microprocesadores y DSPs que enriquecieron significativamente las operaciones del variador, incluyendo la capacidad de regulación de respuesta y posición. Una razón para que las capacidades del Vector funcionaran mucho mejor es la habilidad de “ver” la EMF (fuerza contra-electromotriz) producida por el motor, entonces la circuitería ajusta el arranque de cada tren de pulsos PWM y la duración específica de cada pulso.

Los variadores Vector se usan en prensas de impresión de alta velocidad, imprentas, bobinadoras y otros sistemas de maquinarias de trabajo coordinado. Los variadores Vector también se usan en sistemas de servo posicionamiento, como en las maquinas ovilladoras. Algunos pueden acelerar desde reposo a velocidad máxima en tiempos de 1 a 200 ms.

Con todos estos tipos de variadores, una señal de realimentación de velocidad o posición mejora el trabajo del variador. En la Figura 48 se muestra el tipo de regulador indicado, en donde se ha optado por tomar la señal de velocidad del motor mediante una dínamo-tacométrica en vez de estimarla con un observador. En cambio el torque generado y la intensidad magnetizante se obtienen del correspondiente observador.

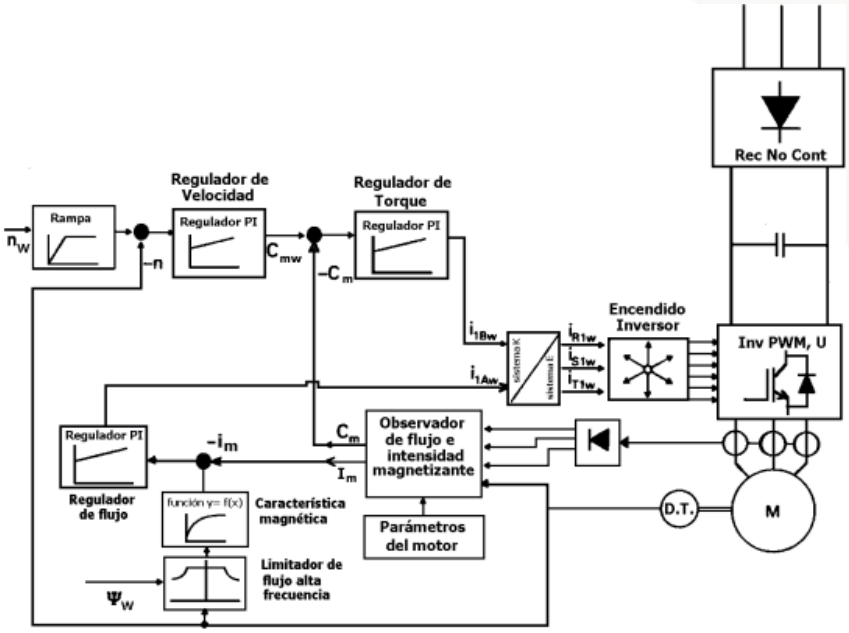

Figura 48

1.6 Alimentación de un motor trifásico

Existen dos posibilidades de conectar el estator de un motor trifásico a una red trifásica.

- **En conexión triángulo**, si disponemos de una red trifásica cuyo valor nominal coincide con la máxima tensión que pueden soportar las bobinas del motor.
- **En conexión estrella**, si la tensión de la red es $\sqrt{3}$ veces superior a la tensión que soportan las bobinas del motor.

Representamos ambas conexiones en la Figura 49, junto a cada una de ellas colocamos la disposición gráfica que justifica su nombre.

Por este motivo todo motor trifásico tiene siempre dos tensiones de alimentación en su placa de características. Por ejemplo, 220 V/380 V o 380/ 660 V

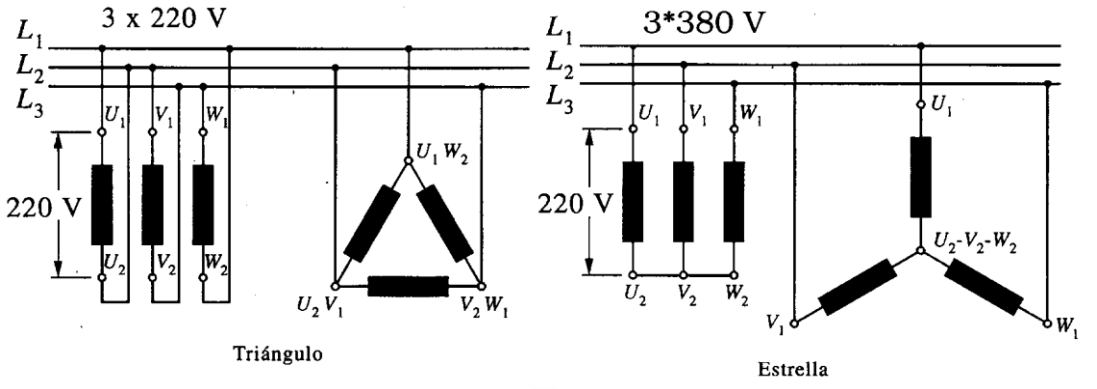

Figura 49

Debemos de tener bien en cuenta, que la tensión nominal del motor es la menor de ellas, pero que existe la posibilidad de conectarlo a una red de tensión $\sqrt{3}$ veces mayor conectándolo en estrella.

Para realizar fácilmente uno u otro conexionado, se disponen los seis bornes de los devanados en posición alternada, como mostramos en la caja de bornes de la Figura 50. Con unas simples pletinas metálicas realizamos los puentes indicados.

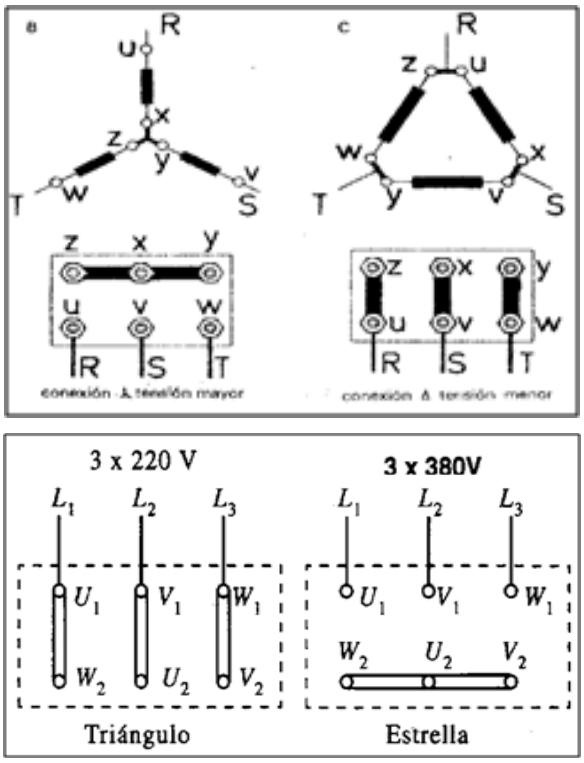

Figura 50

Motores de polos conmutables

Estos motores son conocidos con el nombre de motores Dahlander.

Esta clase de motores sólo permite la obtención de dos velocidades (4 y 8 polos, 6 y 12, etc.), contiene 6 bornes.

En función de sus características, los motores pueden ser de potencia constante, par constante o de par y potencia variables. Para una de las velocidades, la red está conectada a los 3 bornes correspondientes, para la segunda, éstas están unidas entre sí y la red conectada a los otros 3 bornes, como lo muestra la Figura 51.A menudo el arranque se efectúa directamente tanto en gran velocidad como en pequeña velocidad.

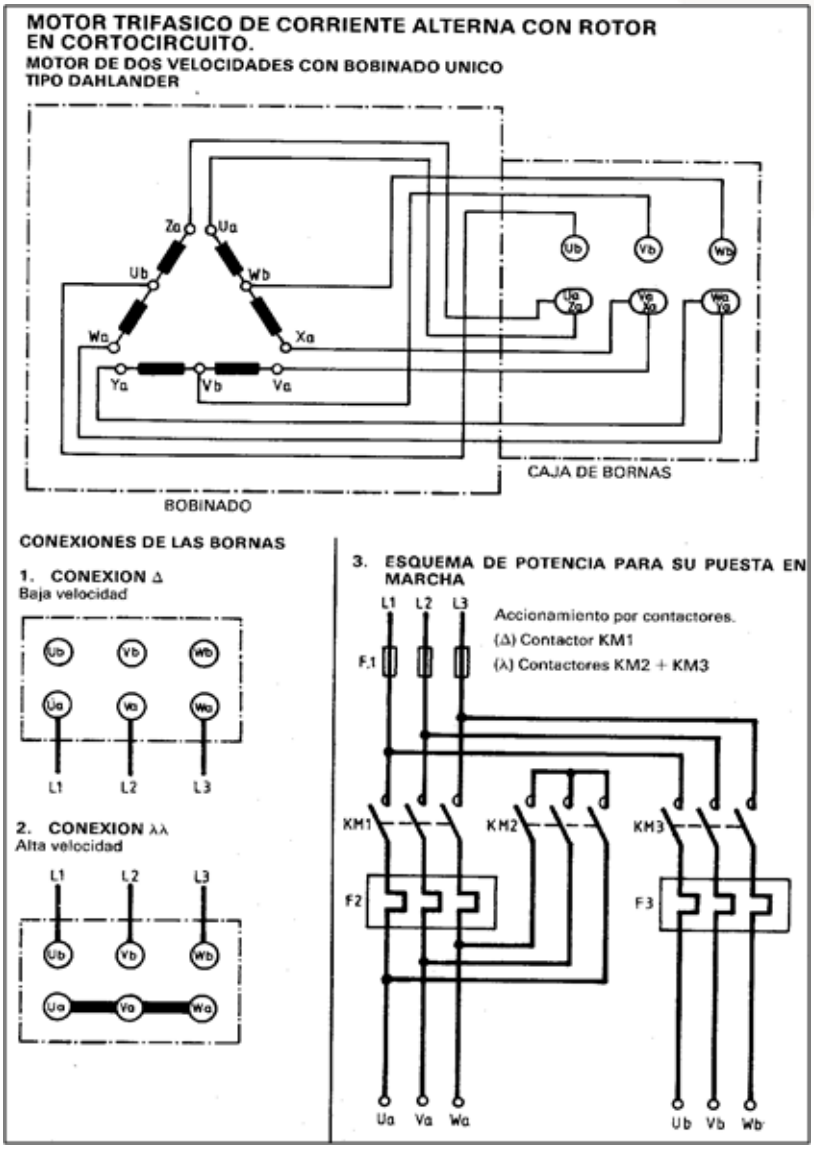

Figura 51

Consecuencias de una variación de tensión o de frecuencia en un motor asíncrono

Aumento o Disminución de Tensión

Velocidad

La velocidad de sincronismo no se modifica con la variación de tensión.

En un motor en carga, un aumento de la tensión conlleva una disminución del deslizamiento y como consecuencia la velocidad. Este fenómeno es limitado por la saturación de la máquina. Por el contrario si la tensión de alimentación decrece la velocidad también lo hará.

Par

El par es proporcional al cuadrado de la tensión, aumenta cuando la tensión es más elevada. Inversamente, disminuye considerablemente cuando la tensión es más débil. Si el motor ha sido calculado demasiado justo, puede no arrancar, o pararse con el riesgo de deteriorarse en caso de caída de tensión persistente.

Intensidad de Arranque

Varia proporcionalmente a la tensión de alimentación, si es muy elevada, la intensidad absorbida al instante del arranque aumenta. Por el contrario, si la tensión disminuye, la intensidad de arranque disminuye. La intensidad en régimen permanente varía de forma análoga.

Aumento o disminución de frecuencia

Velocidad

En un motor asíncrono, como hemos visto anteriormente, la velocidad de sincronismo es proporcional a la frecuencia.

Esta propiedad es frecuentemente utilizada para hacer funcionar a grandes velocidades los motores especialmente concebidos para una alimentación por ejemplo de 400 Hz (aparatos de laboratorio o quirúrgicos, etc...).

Es posible igualmente obtener una velocidad variable regulada por la frecuencia, por ejemplo de 6 a 50 Hz (cintas transportadoras, aparatos de elevación, etc...).

Par

A tensión constante el par es inversamente proporcional al cuadrado de la frecuencia. Si esta aumenta, el par desarrollado por el motor disminuye considerablemente. A la inversa, si la frecuencia decrece, el par crece.

Intensidad de Arranque

A tensión constante, la intensidad de arranque varía en sentido inverso a la frecuencia. De esta forma, aumenta si la frecuencia disminuye e inversamente.

En régimen permanente la intensidad es la misma. Estas variaciones de par y de corriente son generalmente molestas. En la práctica, para evitarlas, se aconseja variar la tensión de alimentación proporcionalmente a la frecuencia.

Arranque de los motores de jaula trifásicos

El motor de jaula es el único que puede ser acoplado directamente a la red con un aparataje sencillo.

Sólo los extremos de los devanados del estator tienen salida sobre la placa de bornes. Las características del rotor han sido determinadas de una vez para siempre por el constructor, los diversos procedimientos de arranque permiten hacer variar únicamente la tensión en los bornes del estator. En este tipo de motores la reducción de la punta de intensidad está acompañada de una fuerte reducción del par.

Arranque Directo

Es un sistema de arranque obtenido en un solo tiempo; consiste simplemente en conectar el devanado estatórico a la red, previamente dispuesto en triángulo o en estrella, según corresponda. El motor arranca con sus características naturales con una fuerte punta de intensidad. Este procedimiento es ideal si es tolerable la punta de intensidad y si el par inicial de arranque del motor es el conveniente para la puesta en marcha de la máquina.

En estos casos, el interruptor K puede ser manual o con mando a distancia (contactor).

La punta de intensidad, en la puesta en tensión, es muy elevada, del orden de 4 a 8 veces la intensidad nominal. El par durante el arranque es siempre superior al par nominal, sobre todo para motores modernos de jaulas complejas.

Es máximo cuando el motor alcanza el 80 % de su velocidad; en este momento, la punta de intensidad está considerablemente amortiguada.

Este dispositivo permite arrancar las máquinas incluso en plena carga, si la red admite la punta de corriente en el momento del arranque. Es pues indicado para las máquinas de pequeña y mediana potencia.

Sin embargo, el par en el momento de la puesta en tensión es cerca de 1.5 Cn, este procedimiento no está recomendado si el arranque debe hacerse lenta y progresivamente (determinados montacargas, cintas transportadoras, etc.).

Si es necesario, para un motor de jaula, reducir la punta de intensidad en la puesta en tensión o el par inicial de arranque, es preciso recurrir a un dispositivo que permita alimentar a lo largo del primer tiempo el estator del motor con tensión reducida.

Para una velocidad dada, la corriente de un devanado del motor se reduce proporcionalmente a la tensión y el par proporcionalmente al cuadrado de la tensión.

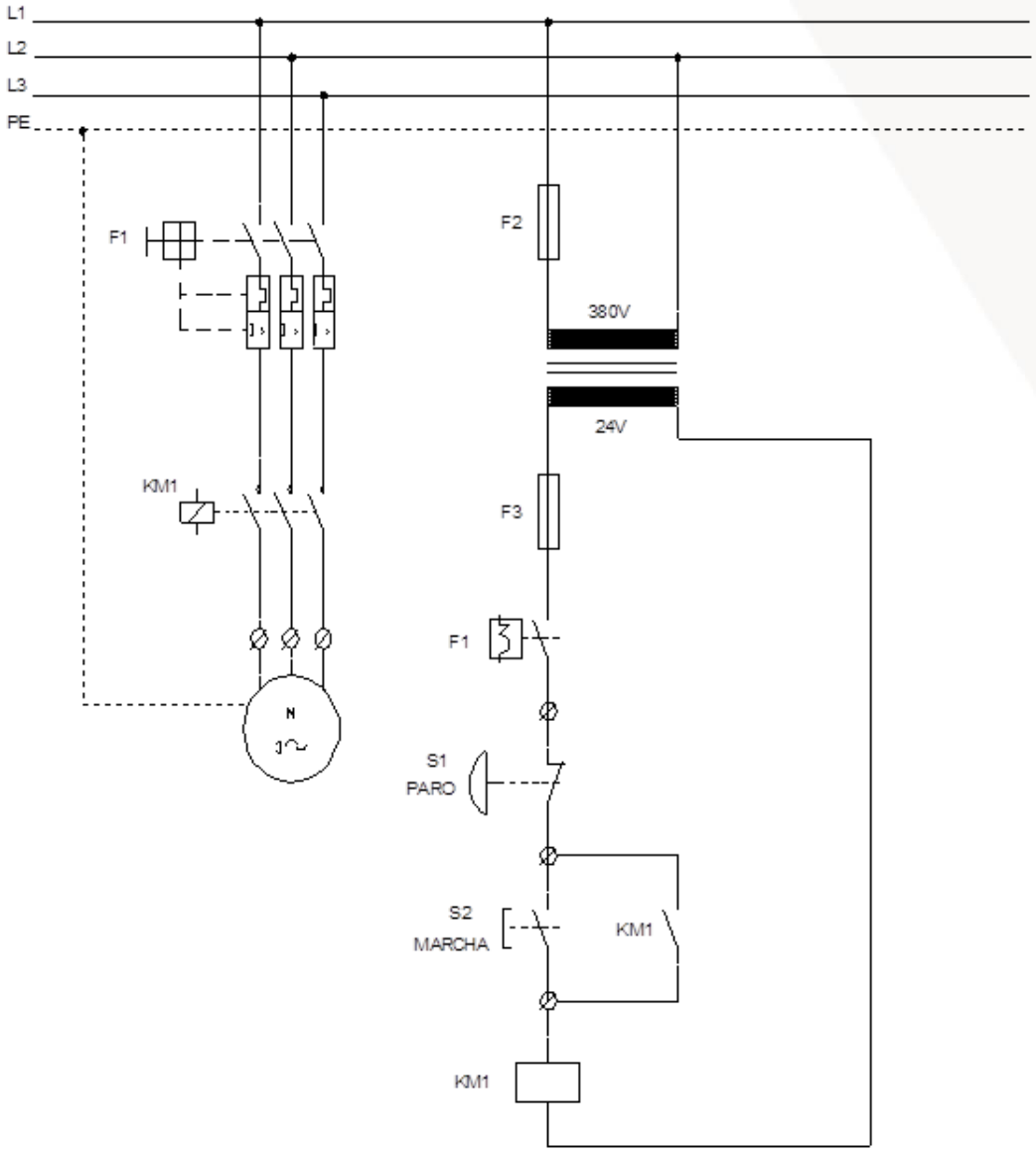

Figura 52

2. Generadores

2.1 Inducción electromagnética

Un generador eléctrico es todo dispositivo capaz de mantener una diferencia de potencial eléctrico entre dos de sus puntos, llamados polos, terminales o bornes. Los generadores eléctricos son máquinas destinadas a transformar la energía mecánica en eléctrica. Esta transformación se consigue por la acción de un campo magnético sobre los conductores eléctricos dispuestos sobre una armadura (denominada también estator). Si mecánicamente se produce un movimiento relativo entre los conductores y el campo, se generara una fuerza electromotriz (F.E.M.).

En la actualidad, la generación de C.C. se realiza mediante pilas y acumuladores o se obtiene de la conversión de C.A. a C.C. mediante los puentes rectificadores. El uso de la dinamo para la producción de energía en forma de C. C. se estuvo utilizando hasta la llegada de los alternadores, que con el tiempo la han dejado totalmente desplazada. Hoy en día únicamente se utilizan las dinamos para aplicaciones específicas, como por ejemplo, para medir las velocidades de rotación de un eje (taco dinamos), ya que la tensión que presentan en los bornes de salida es proporcional a la velocidad de la misma.
Se puede decir que una dinamo es una máquina eléctrica rotativa que produce energía eléctrica en forma de CC, provechando el fenómeno de inducción electromagnética. Esta máquina consta fundamentalmente de un electroimán encargado de crear un campo magnético fijo conocido por el nombre de inductor, y un cilindro donde se enrollan bobinas de cobre, que se hacen girar a una cierta velocidad cortando el flujo inductor, que se conoce como inducido.

El descubrimiento, debido a Hans Christian Oersted, de que una corriente eléctrica produce un campo magnético estimuló la imaginación de los físicos de la época y multiplicó el número de experimentos en busca de relaciones nuevas entre la electricidad y el magnetismo. En ese ambiente científico pronto surgiría la idea inversa de producir corrientes eléctricas mediante campos magnéticos. Algunos físicos famosos y otros menos conocidos estuvieron cerca de demostrar experimentalmente que también la naturaleza apostaba por tan atractiva idea. Pero fue Faraday el primero en precisar en qué condiciones podía ser observado semejante fenómeno. A las corrientes eléctricas producidas mediante campos magnéticos Michael Faraday las llamó corrientes inducidas. Desde entonces al fenómeno consistente en generar campos eléctricos a partir de campos magnéticos variables se denomina *inducción electromagnética.*

Ley de Lenz

"Cuando varía el flujo magnético que atraviesa una bobina, esta reacciona de tal manera que se opone a la causa que produjo la variación"

Es decir, si el flujo aumenta, la bobina lo disminuirá; si disminuye lo aumentará.

Para conseguir estos efectos, tendrá que generar corrientes que, a su vez, creen flujo que se oponga a la variación. Se dice que en la bobina ha aparecido una CORRIENTE INDUCIDA, y, por lo tanto, UNA FUERZA ELECTROMOTRIZ INDUCIDA.

Se verá un ejemplo aclaratorio: Supongamos que la bobina, situada a la izquierda en la Figura 53, tiene un flujo nulo. Por lo que la corriente I será nula también.

Si le acercamos un imán, parte del flujo de éste atravesará la propia bobina, por lo que el flujo de la bobina pasará de ser nulo a tener un valor. La bobina reaccionará intentando anular este aumento de flujo creando una corriente, porque de esa manera, esta corriente creará un flujo contrario oponiéndose al aumento impuesto desde el exterior. Una vez transcurrido cierto tiempo, la bobina se ha amoldado a las nuevas

condiciones y el flujo que la atraviesa será el que le impone el imán. Al amoldarse dejará de crear la corriente indicada, que pasará de nuevo a ser cero.

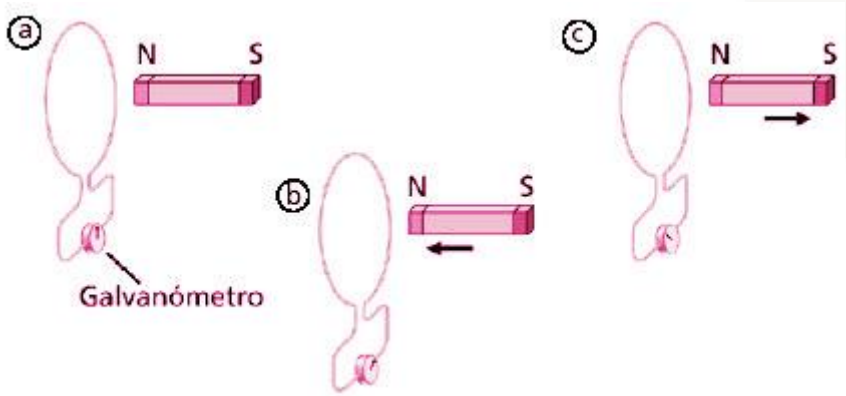

Figura 53

Si ahora se aleja el imán, el flujo que estaba atravesando la bobina disminuirá, por lo que la bobina reaccionará creando de nuevo una corriente está vez designo contrario al anterior, para producir un flujo que se oponga a la disminución.

Ley de Faraday

La Ley de Lenz solamente habla de la forma en que se comporta la bobina pero no dice nada acerca de la magnitud de la corriente o de la fuerza electromotriz inducida. Faraday llegó a la conclusión que ésta (la fuerza electromotriz)E vale:

$$E = -N\frac{\Delta f}{\Delta t}$$

Siendo:

E: f.e.m. inducida

N:Número de espiras de la bobina

Δf: Variación del flujo

Δt:Tiempo en que se produce la variación de flujo

El signo menos $(-)$ indica que se opone a la causa que lo produjo (Ley de Lenz)

2.2 Funcionamiento del generador síncrono

Los generadores síncronos o alternadores son máquinas sincrónicas que se usan para convertir potencia mecánica en potencia eléctrica de corriente alterna. Son utilizados en aplicaciones donde el generador de cc convencional no es capaz de suministrar la corriente suficiente para grandes demandas de electricidad.

El generador síncrono consiste en un electroimán girando, llamado rotor cilíndrico generalmente, al lado de una bobina, estator conectado en estrella el cual por efecto de la rotación del rotor va a inducir tensión trifásica en el estator, para esto tiene que haber

una velocidad relativa entre el rotor (también llamado campo) y el estator (o armadura). Se conectan las bobinas en estrella principalmente por dos razones:

- Para obtener una mayor tensión de línea con menor esfuerzo, además se trabaja con conductores más delgados.
- Tiene que ver con las armónicas. En conexión estrella se anula el efecto de la 3ra armónica, esto reduce pérdidas por calor contribuyendo a una máquina más eficiente. En conexión delta las armónicas se suman y las corrientes ya no son cero, sino una pequeña corriente que empieza a calentar el sistema.

Si en un generador síncrono se aplica al embobinado del rotor una corriente continua, se producirá un campo magnético en el rotor. Entonces el rotor del generador se impulsará por medio de un motor primario, lo cual producirá un campo magnético rotatorio dentro de la máquina. Este campo magnético rotatorio inducirá un sistema trifásico de voltajes dentro del embobinado del estator del generador.

El rotor de un generador síncrono es esencialmente un gran electroimán. Los polos magnéticos del rotor pueden ser de construcción saliente o no saliente. El término saliente significa protuberante o resaltado; y un polo saliente es un polo magnético que resalta de la superficie del motor. Los rotores de polo no saliente se usan normalmente para rotores de dos y cuatro polos, mientras que los de polo saliente se utilizan normalmente en rotores de cuatro o más polos. Como el rotor está sujeto a cambios en los campos magnéticos, se construye de láminas delgadas para reducir pérdidas por corriente parásitas.

Un flujo de cc debe alimentar el circuito de campo del rotor. Puesto que éste está girando, se necesita un arreglo especial para llevar la fuerza de cc a su embobinado de campo. Hay dos métodos comunes para suministrar esta fuerza de cc:

- Suministrarle al rotor la potencia de cc desde una fuente externa de cc, por medio de anillos de rozamiento y escobillas.
- Suministro de potencia de cc desde una fuente de cc especial, montado directamente en el eje del generador síncrono.

Los anillos de rozamiento son anillos metálicos que envuelven completamente el eje de la máquina, pero aislados de él. Cada extremo del embobinado del rotor de cc está unido a cada uno de los dos anillos de rozamiento del eje de la máquina síncrona y sobre cada uno de ellos se coloca una escobilla. Si el extremo positivo de una fuente de voltaje de cc se conecta a una escobilla y el extremo negativo a otro, entonces el mismo voltaje de cc llegará al embobinado de campo en todo momento, sin tener en cuenta la posición angular o la velocidad del rotor.

Los anillos de rozamiento y las escobillas crean algunos problemas cuando se usan para suministrar potencia de cc a los embobinados de campo de una máquina síncrona. Ellos aumentan la cantidad de mantenimiento requerido por la máquina, puesto que las escobillas deben examinarse periódicamente para ver su estado de desgaste. Además, la caída de voltaje en las escobillas puede ser la causa de pérdidas significativas de potencia de rozamiento y las escobillas se usan en todas las máquinas síncronas más pequeñas, porque ningún otro método es tan económico para suministrar la corriente de campo.

Clasificación de los generadores síncronos

Según la ubicación del campo magnético, los generadores síncronos se clasifican en:

- Campo en el estator: la resistencia variable nos permite hacer más o menos intenso el campo del electroimán.
- Campo en el rotor: con este tipo se consigue una mayor eficiencia, pues se necesita menor energía para hacer lo mismo que el anterior. Se puede decir que el imán es una especie de catalizador el cual permite convertir potencia mecánica en potencia eléctrica.

Según la forma del campo magnético:

- Polos salientes: existe una inclinación para la magnetización en la dirección de las expansiones polares.
- Polos cilíndricos: el entrehierro es constante. Entonces el flujo es independiente de la posición.

Ecuaciones características del generador síncrono

Generador síncrono monofásico

La ecuación básica del generador síncrono monofásico es:

$$N = \frac{120\,f}{P}$$

Dónde:

- N: número de revoluciones por minuto
- f: frecuencia en Hz
- P: número de polos

A diferencia del motor asíncrono, esta relación se cumple exactamente en una máquina síncrona. En el caso más típico la frecuencia será 50 Hz y el generador tendrá 2 polos, así que la velocidad de giro será de 3000 RPM.

El generador síncrono puede ser monofásico o trifásico, pero a partir de los 5 kW resulta más económico fabricar generadores trifásicos, igualmente a medida que aumenta el tamaño de la máquina el campo se encuentra en el rotor. Un generador pequeño a condiciones nominales tiene baja eficiencia, por ejemplo un generador de 1 kW puede tener una eficiencia de 50 a 60%, mientras que uno de 10 MW puede tener una eficiencia de 90% y uno de 1000 MW puede alcanzar 99% de eficiencia.

El siguiente modelo corresponde a un generador alimentado con una fuente de corriente continua llamada excitadora. Antiguamente este excitador era un generador de cc en conexión paralela y alimentaba al campo del generador síncrono mediante un sistema de anillos, escobillas y carbones. Hoy en día se usa un excitador que consiste en un pequeño generador síncrono con el campo en el estator. La corriente alterna generada en el estator es rectificada y así se alimenta el campo del generador síncrono sin el uso de anillos ni escobillas. El siguiente modelo es válido para un generador de rotor cilíndrico y pierde precisión cuando el generador es de polos salientes.

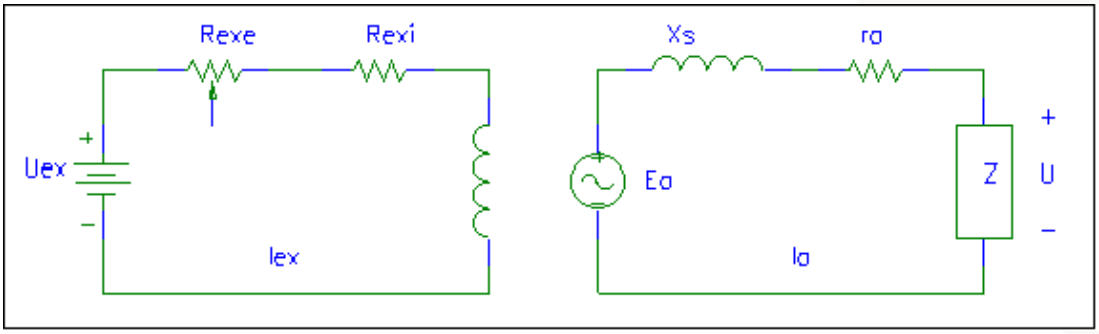

Figura 54

- $Rexi$:resistencia de excitación interna
- $Rexe$: resistencia de excitación externa (con la que se regula Iex y el flujo $Øm$)

Del circuito se deduce que:

$$Ea = U + Ia\,(ra + jXs)$$

Pero;

$$Ea = 4.44\, f\, Øm\, w = k\, Øm\, w,$$

Dónde:

$$w = 2P\, f$$

Por otro lado, la potencia mecánica suministrada por el generador viene dada por:

$$Pmec = Tw = Ea\, Ia \cos Øt$$

Dónde:

$$Øt : \text{ángulo de } ra + jXs + Z$$

Entonces:

$$Tw = k\, Øm\, Ia \cos Øt$$

Adicionalmente deducimos la ecuación:

$$Uex = Iex\,(Rexe + Rexi)$$

Para los fines del curso, normalmente la resistencia ra es despreciable.

Este modelo es correcto en el caso del rotor cilíndrico. Cuando la máquina es de polos salientes se prefiere utilizar otro modelo llamado el modelo "*d-q*", que toma en cuenta el efecto de tensiones que aparecen porque el campo no es totalmente sinusoidal.

Generador síncrono trifásico

Para el caso del generador síncrono trifásico, el circuito equivalente es:

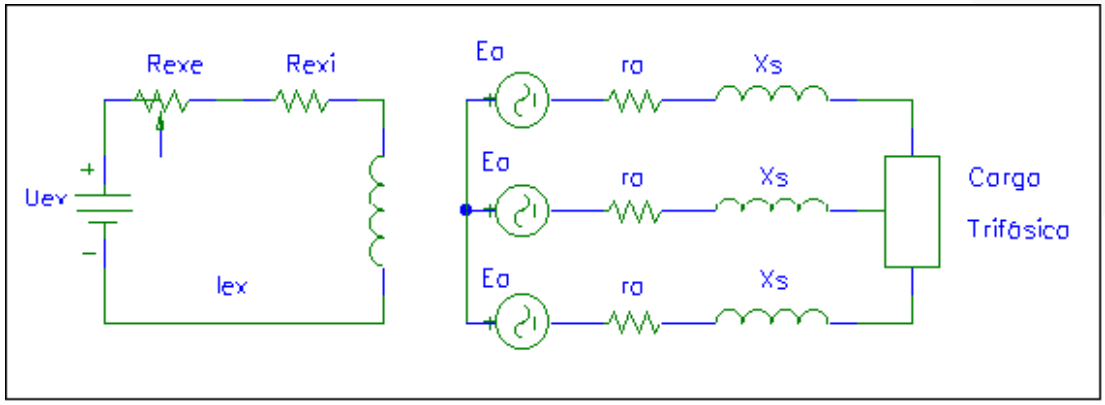

Figura 55

Similarmente al circuito monofásico, las ecuaciones características por fase son:

$$Eaf = Uf + Ia\,(ra + jXs)$$

$$Eaf = 4.44\,f\,Øm\,w = k\,Øm\,w$$

$$Uex = Iex\,(Rexe + Rexi)$$

Y la potencia mecánica total será:

$$Pmec = Tw = 3\,k\,Øm\,Ia\cos Øt$$

2.3 Alternadores

El generador sincrónico trifásico o alternador es la máquina que se utiliza en las centrales eléctricas (Turboalternador) o bien como sistema autónomo de generación (Grupo electrógeno). Es una maquina compuesta por dos partes:

- Una fija o estator, constituido por un paquete de chapas magnéticas conformando un cilindro con una serie de ranuras longitudinales, sobre las cuales están colocados conductores, conectados entre sí, de forma tal de crear un conjunto de bobinas.
- Una parte móvil o rotor, ubicada dentro del estator y que consiste en un electroimán alimentado por corriente continua.

El giro del rotor se produce mediante una maquina impulsora (primo motor: Motor diésel, turbina de vapor, de gas, hidráulica, eólica), que mantiene una velocidad angular constante. La alimentación del electroimán se logra a través de un par de anillos rozantes que permiten la continuidad eléctrica entre una parte fija y una parte móvil. Los alternadores de cierta potencia cuentan con excitatriz, que es a su vez un generador de corriente alterna trifásico (Cuyo inductor está montado sobre el estator del alternador y el inducido sobre el rotor), en cuya salida se encuentra un rectificador trifásico, que alimenta el electroimán, con lo cual se evitan los anillos mencionados, que ocasionan perdidas en los mismos y desgaste de los carbones. El esquema elemental de un generador sincrónico trifásico es el mostrado en la figura 56.

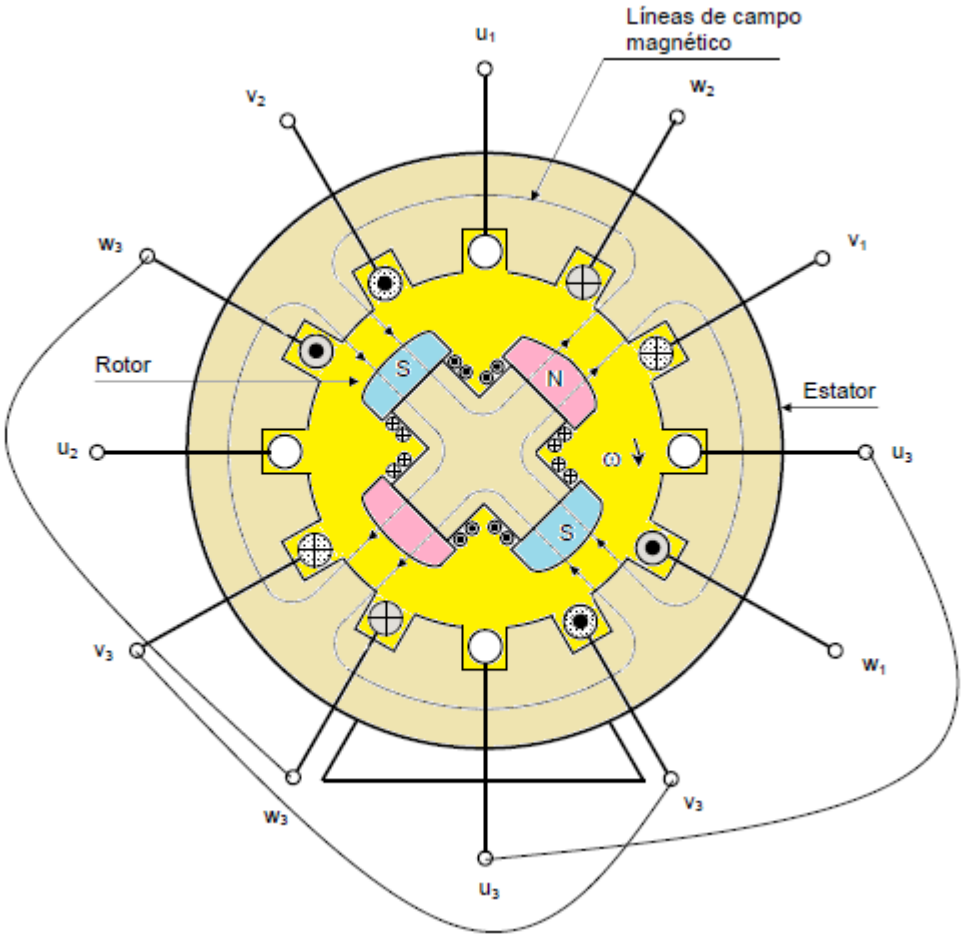

Figura 56

Generador sincrónico trifásico de 4 polos en rotor (excitatriz)

En la figura 57 se ha esquematizado la bobina 1, donde se puede ver cómo están ubicados los conductores en las ranuras, siendo las otras dos bobinas idénticas, pero con sus ejes magnéticos, formando un Angulo de 120 °, entre sí. Dado que el

electroimán produce un flujo magnético [Φ] de valor constante, las bobinas Concatenaran un valor de dicho flujo de acuerdo a la posición instantánea del rotor.

Esta máquina presenta dos pares de polos en el rotor y además en el estator la cantidad de ranuras es el doble que en el caso anterior, de tal forma que cada fase ocupa el doble de ranuras, estando formada cada una de ellas por dos bobinas conectadas en serie, con el mismo eje magnético de la siguiente forma:
Fase 1: u1 - u3 - u3 - u2
Fase 2: v1 - v3 - v3 - v2
Fase 3: w1 - w3 - w3 - w2

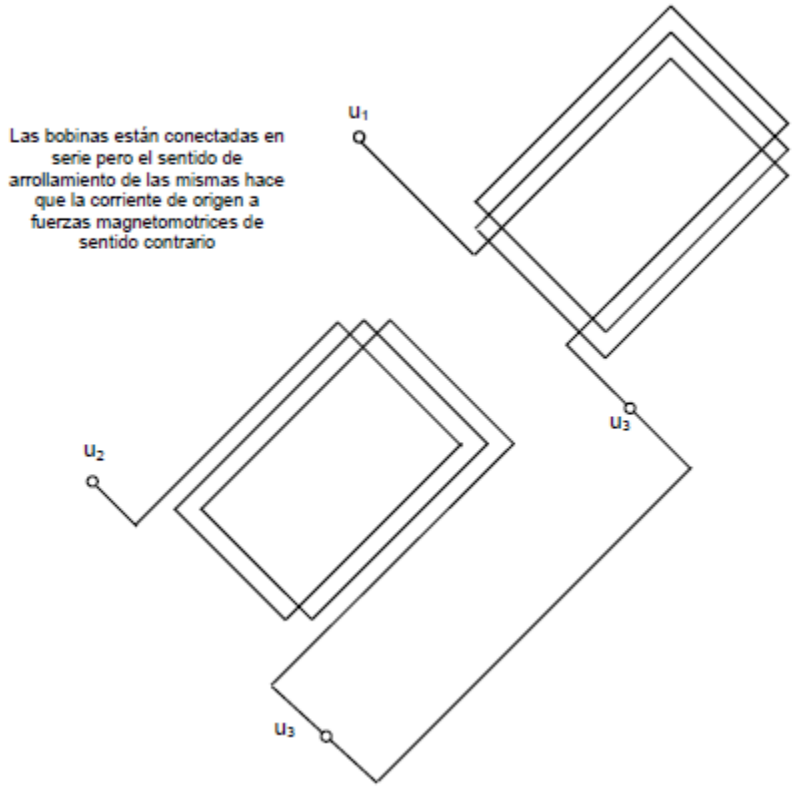

Figura 57

Esquema de las bobinas u1 – u3 – u3 – u2 para una fase de la maquina

De acuerdo a la ley de Faraday-Lenz, entre los terminales de la bobina figura 58 se inducirá una fuerza electromotriz cuyo valor está dado por:

eu1-u2 = - N dϕ/dt = N φω□□sen ωt

Siendo ω velocidad angular del rotor y φ el flujo del electroimán

Llamando Emax = N φω□□□□Nos queda

eu1-u2 = Emax□□sen ωt

Si analizamos la bobina v1 – v2 , vemos que el fenómeno se repite pero con un atraso de 120°, debido a la disposición geométrica en que las mismas están colocadas, o sea que:

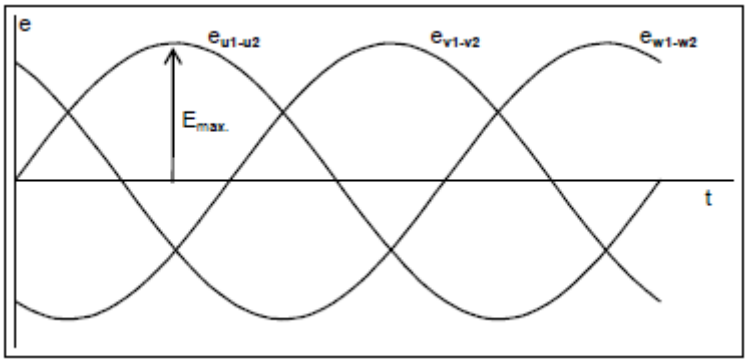

Figura 58

Sistema trifásico de tensiones

Si analizamos el valor eficaz de la tensión en bornes de cada una de las bobinas o fases del generador, el mismo será:

$$E_F = \frac{E_{Max}}{\sqrt{2}}$$

Característica de vacío

La característica de vacío de la máquina, es la relación de la tensión en sus bornes, con la corriente de excitación que se hace circular en la bobina del rotor manteniendo la **velocidad angular** del mismo **constante** y sin que circule corriente por las bobinas del estator (No entrega potencia). En este caso esta tensión coincide con la fuerza electromotriz inducida por efectos del flujo magnético originado en el rotor. El circuito de ensayo es el mostrado en la siguiente figura 59.

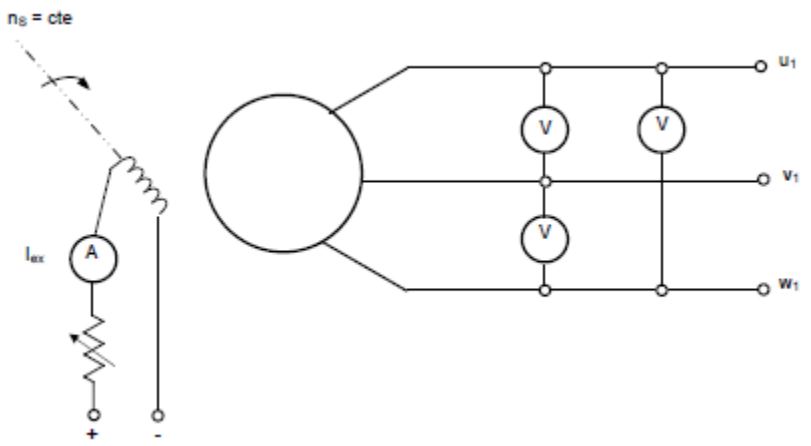

Figura 59

Circuito de ensayo en vacío de un generador sincrónico.

Alimentando con una fuente de corriente continua la bobina del rotor, variando la intensidad de la misma y efectuando las lecturas de los voltímetros se obtiene la curva de la figura 60.

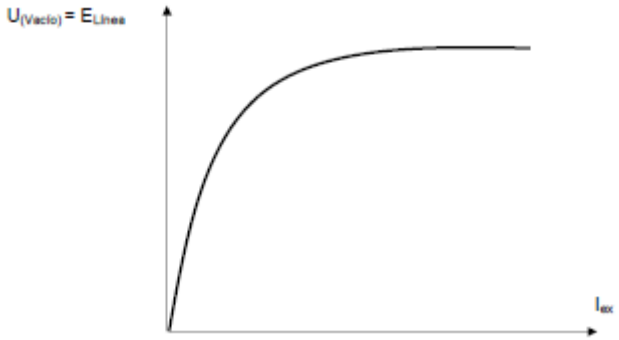

Figura 60

Curva de vacío de un generador sincrónico

De la curva figura 60, observamos que en la primera parte hay una relación lineal entre la corriente de excitación y la fuerza electromotriz, luego aparece un codo de saturación y por ultimo una zona saturada en la cual para un incremento de la corriente de excitación, se logran pequeños incrementos de la tensión. El análisis que efectuamos sobre la maquina lo hacemos dentro de la zona lineal a los efectos de simplificar los conceptos. Esta curva se corresponde con la de imanación de la maquina (Para una determinada velocidad del rotor), ya que la tensión es función del flujo y la intensidad de campo magnético es proporcional a la corriente de excitación.

Característica de cortocircuito

La característica de cortocircuito es la relación entre la corriente estatórica y la corriente de excitación con los bornes cortocircuitados. Este ensayo se realiza cortocircuitando los bornes del generador a través de amperímetros, y manteniendo la velocidad constante, se varía la corriente de excitación y se efectúan las lecturas de la corriente estatórica, utilizando el circuito de la figura 61.

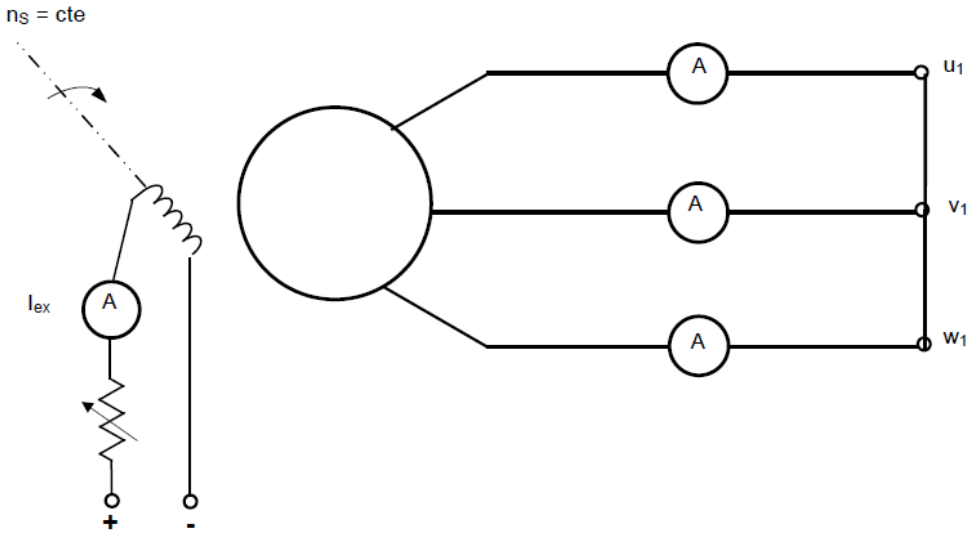

Figura 61

Circuito para ensayo en cortocircuito de un generador sincrónico

Dado que la reacción de armadura es netamente desmagnetizaste, debido a que la propia reactancia sincrónica de la maquina actúa de única carga, la relación entre ambas corrientes es lineal, ya que el circuito magnético no se satura, según se observa en la figura 62.

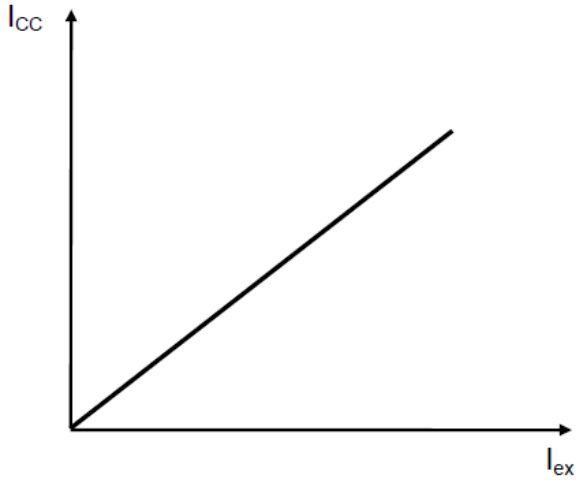

Figura 62

Curva de cortocircuito de un generador sincrónico

Dada la relación prácticamente lineal entre ambas corrientes, con determinar un punto de la misma, se la puede graficar, trazando la recta al origen.

Alimentación del bobinado inductor del rotor

La corriente continua para alimentar el bobinado inductor del rotor se puede obtener desde una fuente exterior a través de anillos rozantes que se encuentran montados sobres su eje, aislados eléctricamente del mismo y conectados a los terminales de la bobina, que permiten el pasaje de la corriente mencionada desde una parte fija exterior, a la parte en movimiento, mediante un sistema de escobillas o carbones que apoyan sobre dichos anillos, tal como puede
Observarse en la figura 63.

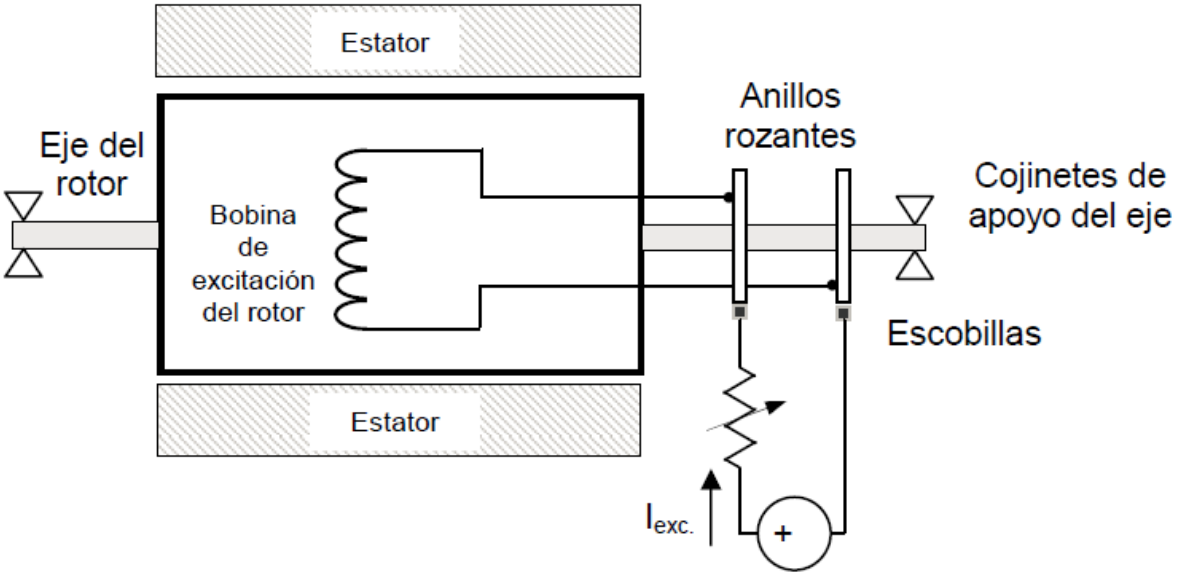

Figura 63

Alimentación de la bobina de excitación desde una fuente exterior

Otra forma de alimentar dicho bobinado, es mediante un pequeño alternador, el cual tiene los bobinados trifásicos montados sobre el rotor y la bobina de excitación en el estator del generador principal. Mediante el sistema de tensiones originado en el estator se alimenta un equipo rectificador, que provee la corriente continua de la bobina de excitación del generador auxiliar, generando un sistema trifásico de tensiones en los bobinados que se encuentran sobre el rotor y a su vez estos alimentan otro equipo rectificador que suministra la energía a la bobina de excitación principal. Al hacer girar la máquina, el magnetismo remanente del electroimán del rotor induce en el estator una tensión que alimenta el rectificador y que hace incrementar el efecto mencionado. En la figura 64, se observa la disposición mencionada.

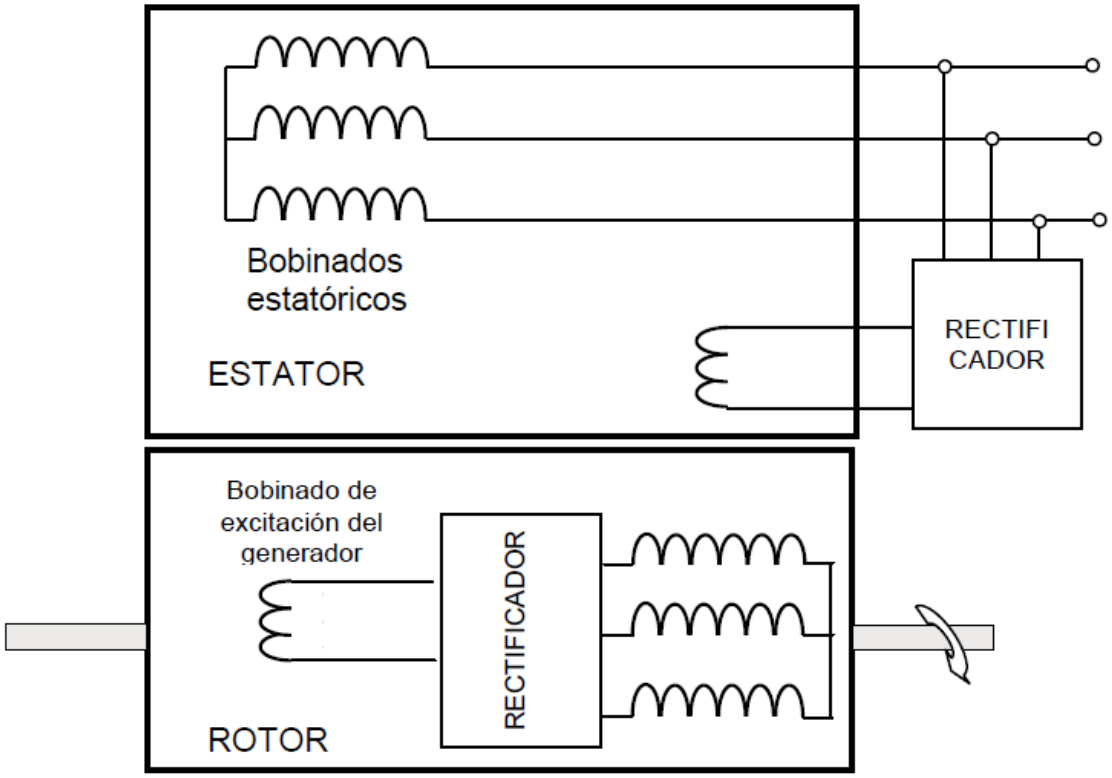

Figura 64

Alimentación del bobinado de excitación retorico sin escobillas (brusshless)r

Alternadores en paralelo

En numerosas instalaciones se precisa conectar en paralelo varios generadores con el fin de atender una carga variable según las horas o circunstancias. Para que esto se pueda cumplir se deben cumplir las siguientes condiciones:

- Igualdad de secuencia
- Igualdad de frecuencia
- Igualdad de los módulos de tensión
- Igualdad de fase

Analizaremos el caso de tener que conectar un generador con una red de potencia mucho
Mayor que la propia, con lo cual la tensión y la frecuencia están impuestas por dicha red.
La forma práctica de la maniobra, se basa en la indicación de tres lámparas conectadas entre los terminales del generador y la red de acuerdo al esquema de la figura 65.
Con los frecuencímetros y los voltímetros verificamos la igualdad de frecuencia y módulo de tensión entre la red y el generador.

Para variar los valores en la maquina debemos actuar:
a) Para variar la frecuencia sobre la velocidad de la maquina impulsora.

b) Para variar el módulo de la tensión, fundamentalmente sobre la excitación (También varía con la velocidad de la maquina impulsora)

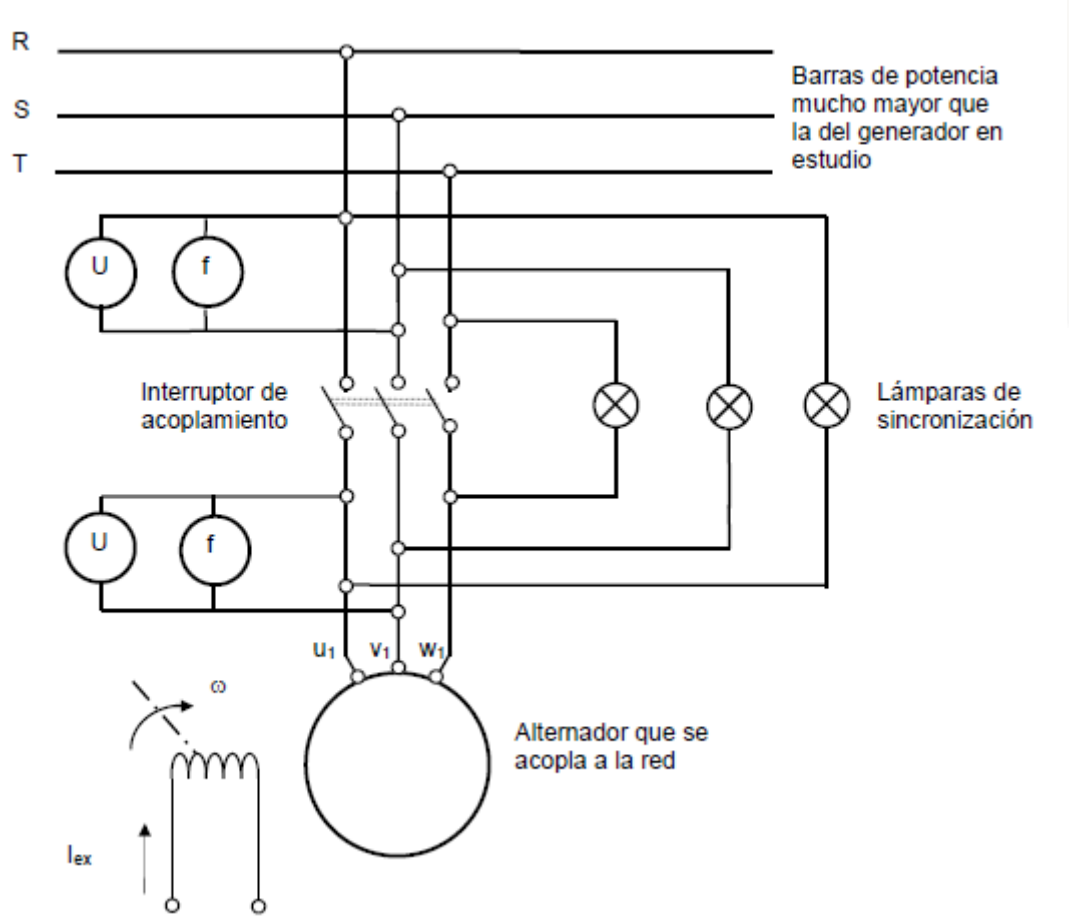

Figura 65

Circuito para puesta en paralelo de un generador sincrónico

Si la secuencia de la red y de la maquina son coincidentes los fasoriales superpuestos se muestran en la siguiente figura 66.

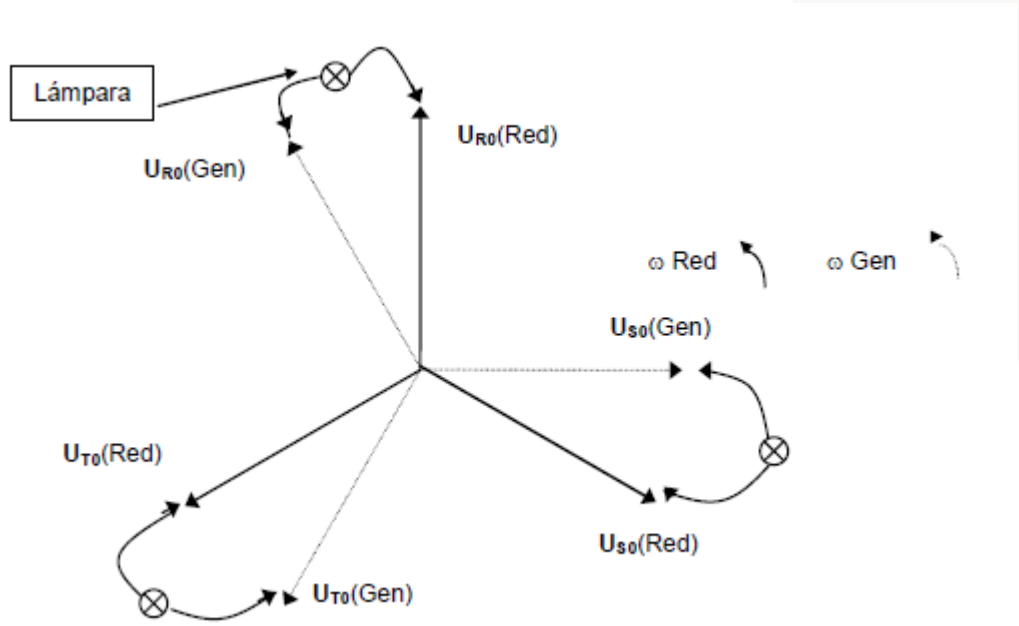

Figura 66

Diagrama fasoriales superpuestos del generador y la red eléctrica

Vemos que las tensiones que aparecen sobre las lámparas son iguales y su valor es la diferencia de potencial entre las tensiones de fase de la red y las del generador. Si hay diferencia de velocidades angulares, el brillo de las lámparas varía en forma simultánea con un mismo valor para las tres, pasando por un máximo cuando los fasores de la misma fase están en sentido opuesto y un mínimo cuando son coincidentes (En fase).
En el caso de que el "**brillo de las lámparas sea cero**", los módulos de las tensiones son iguales.
Para acoplar el generador a la red, se debe maniobrar de forma tal que si las lámparas no se llegan a apagar, se debe actuar sobre la excitación de la máquina para variar su tensión hasta que las lámparas lleguen a estar apagadas (Mayor corriente de excitación, mayor tensión), en algún instante. Luego si la variación en el brillo de las lámparas es muy rápido se debe actuar sobre la velocidad de la maquina impulsora (Modificación de frecuencia), hasta que la variación sea lenta, y en el momento en que las lámparas se apaguen se debe cerrar el interruptor de acoplamiento, ya que en ese momento se cumplen las condiciones de sincronismo. En esa situación el generador tiene la misma tensión en sus bornes e igualdad de frecuencia (Impuestos por la red). Si las secuencias son distintas tenemos **luces brillantes**.

Alternadores industriales

Características constructivas (Gentileza de WEG)

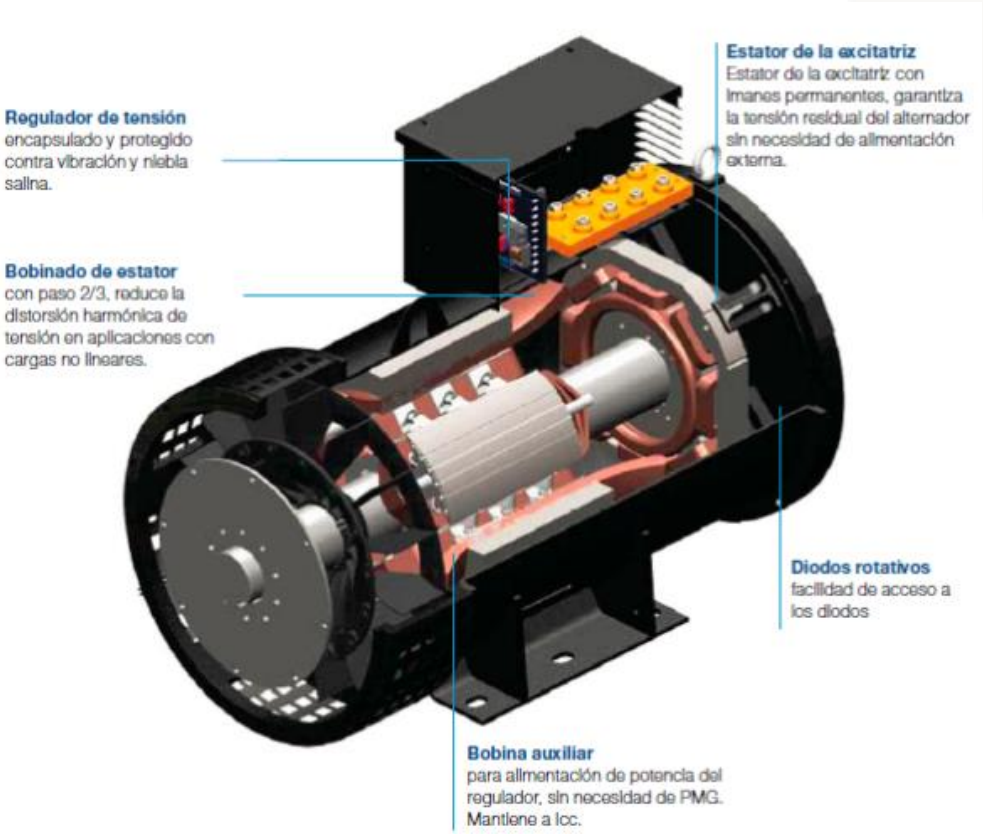

Figura 67

Características constructivas, gentileza de WEG

Características técnicas

Altitud
Las potencias nominales se refieren a instalaciones hasta 1.000 m.a.n.m. Para aplicaciones encima de esta altitud, el siguiente factor de corrección de potencia debe ser aplicado:

Altitud (m.a.n.m.)	1000	1500	2000	2500	3000
Factor K	1	0.94	0.9	0.85	0.8

Temperatura ambiente

Las potencias nominales se refieren a instalaciones con temperatura ambiente de 40°C. Para aplicaciones con temperatura ambiente diferente de 40°C, el siguiente factor de corrección de potencia debe ser aplicado:

Temperatura ambiente (°C)	30	35	40	45	50	55
Factor K	1	1	1	0.94	0.89	0.85

Polvareda abrasiva
Protecciones adicionales son recomendadas cuando el alternador es utilizado en un ambiente donde la polvareda abrasiva puede entrar a través de la ventilación. Aunque las bobinas del alternador sean protegidas contra ambientes abrasivos, las condiciones severas pueden necesitar de protecciones adicionales como: deflectora, cabina cerrada, filtros u otra protección adecuada.

Régimen S1 / continuo / prime
(Temperatura ambiente 40ºC). El alternador opera con la potencia nominal por un periodo ilimitado de tiempo, con la posibilidad de sobrecarga de hasta 10% durante 1 hora a cada 12 horas, sin sufrir ningún daño en su sistema de aislamiento. El régimen S1, también llamado de régimen “Continúo o Prime” es aplicado principalmente donde no hay otra fuente de energía disponible, tales como: grupos para alquiler, grupos para irrigación, refrigeración, cogeneración y aplicaciones para horarios pico. Para el régimen continuo es admitida elevación de temperatura en los bobinados, hasta 125°C.

3. Desarme de un motor de CA y toma de datos

En ciertas ocasiones para mantenimiento, y en otras para reparación, se requiere desarmar los motores eléctricos, por lo que es conveniente dar algunas indicaciones para facilitar este trabajo. Se recomienda seguir las siguientes reglas generales:

1. Desconectar la alimentación del motor (desenergizar).
2. Tomar nota (elaborar un diagrama) de las conexiones del motor para evitar errores cuando se vuelva a poner en servicio.
3. Quitar todo el equipo auxiliar que no permita el acceso libre al motor.
4. Analizar si se requiere o no remover el motor del lugar de su instalación.
5. Seguir preferentemente las recomendaciones del fabricante para su montaje y maniobras a realizar.

Conviene seleccionar un área de trabajo limpia cuando el motor se desarma. Estando en su lugar de montaje, se debe tener suficiente cuidado con el manejo de sus partes, y éstas deben ser marcadas y debidamente etiquetadas para su correcto armado posterior.

Algo que es básico al desarmar un motor, es la colocación de marcas entre las tapas y el estator, a fin de conservar la misma posición para el armado posterior. Después de marcar las tapas y la carcasa del motor, se puede proceder al desarmado. Se recomienda seguir las siguientes precauciones:

- No usar martillos metálicos directamente sobre cualquier parte del motor, ya que el impacto puede romper o fracturar al hierro fundido, o bien, puede deformar otras partes.
- No usar desarmadores (desatornilladores) para forzar las tapas al querer separarlas, esto puede producir marcas o daño.
- Estar preparado para registrar el procedimiento de desarmado y arreglar la disposición de las partes en un orden que identifique su armado.
- Tener listo un cuaderno de notas y lápiz para anotar cómo están las conexiones internas de los devanados.

3.1 Procedimiento para el desarmado del motor

1. Si el motor tiene escobillas, quitarlas de sus portaescobillas.
2. Después de los pasos anteriores, se está en posición de retirar las tapas de la carcasa. Tan pronto como se separen las tapas, el rotor o armadura queda soportado por el estator. Se deberán tomar precauciones para evitar que el rotor sufra daño, usando soportes o caballetes. Entre más grande es el motor, se tiene mayor riesgo de daño.
3. Usar un martillo de bola (preferentemente) y un bloque de madera (para proteger contra daño).
4. Remover las tapas de ambos lados del motor, retirando de la flecha lentamente y procurando previamente haber desconectado todos los alambres de circuitos que pueda haber (por ejemplo el switch centrífugo en los motores de arranque con capacitor).
5. En la medida que se continua con el proceso de desarmado, registrar todas las partes que se retiran y el orden en que van. Elaborar un diagrama para el alambrado. Hacer una lista de colores, de acuerdo a los códigos para cada terminal, o bien usar la numeración convencional.
6. Una vez que se han retirado las tapas del eje del motor, se puede retirar el rotor, teniendo cuidado de que no se golpee contra el estator o los devanados del estator para evitar daños; por lo que dependiendo del tamaño del motor (en consecuencia del rotor), se deben adoptar distintas formas de soporte del rotor.

Mantenimiento Eléctrico

Características de la corriente consumida.

Se verifica la constancia de la intensidad de corriente consumida por el motor cuando funciona con carga estable y, simultáneamente, en el caso del motor trifásico, si son prácticamente iguales las corrientes en las tres fases.

Si se observan fluctuaciones de la corriente con carga constante, se procederá a revisar la jaula del rotor.

Si se aprecian diferencias entre las intensidades de corriente de las tres fases, se revisará el bobinado estatórico.

Esta observación puede hacerse mediante instrumentos ubicados en el tablero de control, si los hubiera, o con una pinza amperimétrica.

Tensión de la red y carga del motor

Se controlan los valores de tensión en bornes del motor y de la corriente consumida a plena carga, para comprobar que el funcionamiento se desarrolla en las condiciones prefijadas. Corrientes mayores que la nominal llevan a calentamientos que reducen la vida útil del motor.

Arranque

Observar un arranque para verificar su correcta acción, controlando la actuación de los elementos de maniobra. Deben revisarse los contactos de los guarda motores, interruptores y contactores, reemplazándolos a estos últimos cuando sea necesario.

Elementos de protección

Verificar las protecciones termomagnéticas, para comprobar que estén bien reguladas.

Conexionado y puesta a tierra

Conviene controlar periódicamente el apriete de todas las conexiones y la rigidez de los empalmes y terminales, para asegurar que no queden elementos flojos que originen calentamientos localizados excesivos, que podrían provocar incluso el incendio del motor

Valores de apriete recomendados, en Nm.

ϕ del borne	M5	M6	M8	M10	M12	M16
Mínimo	1.8	3.0	8.0	10	20	60
Máximo	2.5	4.0	9.0	17	30	73

Tabla 3

Estado del aislamiento

Un indicador del estado del aislamiento es la resistencia de aislamiento de los bobinados. Este valor a temperatura de régimen (entre 80 °C y100 °C aproximadamente) deberá superar al obtenido con la siguiente expresión:

$$\text{Resistencia de aislación} = \frac{\text{Tensión nominal del motor } [V]}{\text{Potencia del motor } [KVA] + 1000}$$

Y no debe ser menor a 1 MW.

El elemento de medición será un megóhmetro, de un valor de tensión similar a la tensión nominal del motor.

En el supuesto caso de no alcanzar el valor indicado, deberá procederse a:

- La limpieza del bobinado, puesto que el depósito de suciedad es lo que más comúnmente reduce la resistencia de aislamiento, si este paso no da resultado;
- Se procede al secado, considerando que la causa es la presencia de humedad.

La tarea de limpieza del bobinado se realizará con el motor abierto, mediante el soplado de aire a presión, o la aplicación de un cepillo suave. Ante la presencia de aceite o grasa, se soplará con algún solvente, asegurándose que éste no ataque químicamente el aislamiento. Se recomienda el solvente dieléctrico ya que, además, no es inflamable.

Limpieza

En ambientes de gran suciedad o con partículas en suspensión, se instalarán motores del grado de protección adecuado. Aún en este caso, será necesaria una permanente vigilancia, con revisiones periódicas para evaluar y prevenir las consecuencias de la acción de partículas sobre el aislamiento. En motores abiertos, lo dicho es esencial.

La limpieza periódica, realizada en la forma ya indicada, será la primera acción a seguir, el agregado de sistemas filtrantes en el circuito del aire de ventilación será solución cuando aquella sea requerida con mucha frecuencia. En este último caso será conveniente verificar que la ventilación no se ha empobrecido, lo que provocaría incrementos del calentamiento.

Revisión de rotor

Motores de Jaula: La revisión de la jaula podrá prevenir en alguna medida un futuro defecto. En general solo cabrá una inspección visual, buscando algún indicio de anormalidades. En caso de jaulas de cobre, se observarán sus soldaduras y rigidez mecánica.

Revisión de otros elementos del motor:

- Centrífugo y
- Condensadores.

Centrífugo

Se controlará su accionamiento: carrera suave y suficiente superficie de contacto eléctrico. En el caso que esta última sea escasa, se podrá corregir aplicando cuidadosamente una lima para eliminar protuberancias.

Condensadores

Cabrá verificar la correcta conexión de los terminales. Si ha habido pérdidas de líquido electrolítico, se aconseja el recambio del elemento.

Medición de la resistencia óhmica de los bobinados

Servirá para verificación de las conexiones, particularmente en los casos en que haya sido necesario abrirlas.

Prueba de la rigidez dieléctrica

Sólo se justificará en los casos en que se dude acerca del estado del aislamiento y siempre que la circunstancia de una eventual falla posterior del motor detenga un mecanismo imprescindible.

Si la resistencia de aislamiento tiene un valor elevado, no será necesaria la prueba de rigidez dieléctrica, en los casos en que aquella no se pueda elevar con los procesos de limpieza y secado, cabrá realizarla para eliminar la duda que este fenómeno se debe a un defecto incipiente localizado, que puede repararse preventivamente, o haber llegado al extremo de la vida del aislante, lo que implica la necesidad de un rebobinado. El ensayo se realiza al 75% de la tensión de prueba de un motor nuevo, aplicada durante un minuto. Si esta prueba se ejecuta para agregar confiabilidad a la medición de la resistencia de aislamiento, podrá tener una duración de sólo unos segundos.

3.2 Mantención de un motor cc para palas

Inspección del motor

Previo al primer uso

Antes de utilizar los motores de la Pala Eléctrica 4100XPB, los motores deben ser inspeccionados. Esta sección describe lo que se debe buscar antes de usar los motores.

Cojinetes

Asegúrese que todos los tapones de engrase estén apretados. Los cojinetes de bola o rodillo son engrasados en fábrica y no necesitarán ser inspeccionarlos hasta que sea necesaria su relubricación, como se sugiere en el Tópico X.

Aislación

Tome nota y registre las lecturas del megger (megóhmetro) para determinar si existe la presencia de humedad o suciedad en las superficies de los devanados. Las lecturas para el almacenamiento interior deben registrarse mensualmente. Cualquier tendencia descendente en las lecturas del megger indica que es necesario tomar medidas de mantención apropiadas.

Conmutador y escobillas

Las escobillas de conmutación deben tener por lo menos 85% de contacto sobre la superficie de la escobilla y un contacto continuo desde talón a punta. La superficie del conmutador y los socavamientos de la mica deben estar limpios y libres de suciedad, grasa, sectores con pintura o polvo de escobilla.

Revise todas las escobillas para asegurarse que tengan un desplazamiento libre en los portaescobillas. Todos los resortes o muelles deben estar comprimidos y asegurados. Las conexiones flexibles de las escobillas deben estar apretadas y los conductores flexibles no deben interferir con el funcionamiento del resorte o la escobilla y no debiera hacer contacto con ningún objeto que no opere al potencial de los portaescobillas.

Conexiones

Se deben verificar todas las conexiones terminales comparándolas con el diagrama de conexiones del motor para asegurar que la polaridad o la dirección de rotación sean las correctas.

Verifique que las conexiones apernadas se encuentren apretadas, adecuadamente aisladas y que exista un espacio adecuado entre conductores de diferente polaridad y entre conductores y tierra. Las conexiones apernadas del cable flexible deben estar aisladas.

RTD (detector de temperatura resistiva)

El RTD es un dispositivo de monitoreo de temperatura. No pretende limitar la carga del motor o proporcionar una vida útil de aislamiento normal. Se encuentra montado en contacto con la bobina de conmutación, la cual es la única parte accesible del circuito de la armadura. Puesto que los factores, tales como la velocidad del eje, ventilación, ondulación de corriente y la sobrecarga de corto tiempo afectan la relación de temperatura entre la armadura y el campo de conmutación, no es posible lograr una protección completa de todas las condiciones resultantes de una sobre temperatura. El dispositivo es especialmente útil en la protección contra pérdidas de aire de ventilación normal, ambientes de altas temperaturas y operaciones prolongadas de motores auto-ventilados a muy bajas velocidades.

Ventilación

Verifique que los sopladores estén preparados para suministrar aire frío. Los filtros de aire deben estar en su lugar, si es necesario. Verifique la rotación correcta de los sopladores.

Inspección mecánica general

Revise el interior del motor en busca de herramientas, virutas de metal o cualquier material extraño que pueda haberse acumulado durante su almacenamiento o instalación. Asegúrese que todas las partes giratorias mantengan suficiente distancia con las partes fijas. Si es posible, gire el motor a mano y verifique que no existan sonidos raspantes o cualquier otro signo de interferencia mecánica. Verifique el ajuste de los pernos en la base, acoplamientos, carcasa, cajas de cojinetes y cualquier perno que haya sido alterado.

Debido a que los pernos sueltos pueden causar fallas tanto mecánicas como eléctricas, todos los pernos y tuercas deben mantenerse apretados. El chequeo del apriete de los pernos debe ser incluido en los programas de mantención. Tabla técnica de pernos entregan los valores de torque de los pernos para partes metálicas. Para los pernos de interpolo y polo principal, refiérase a la Tabla 4.

Tamaño de Llave	Tamaño de Hilo	Cabeza Hexagonal C1C5 Acero al Carbono Medio (Conexión Eléctrica)	
		Torque	
		Libra-Pie	Newton-Metros
7/16″	1/4-20	7-9	9-12
1/2″	5/16-18	13-17	18-23
9/16″	3/8-16	24-30	33-40
3/4″	1/2-13	60-75	80-100
15/16″	5/8-11	120-150	160-200
1-1/8″	3/4-10	210-260	280-350
1-3/16″	7/8-9	320-400	430-540
1-1/2″	1-8	460-580	620-790

Tabla 4

Valores de Torque para Apriete de Pernos - Partes Metálicas

La información contenida en la Tabla 4 es aplicable a todas las uniones apernadas, excepto cuando las partes no metálicas se encuentran apernadas a las partes metálicas. En este caso se recomiendan los valores de menor torque indicados en la Tabla 5 con el fin de impedir la fracturación de partes.

Valores de Torque para Apriete de Pernos - Partes No Metálicas a Partes Metálicas

Tamaño de Llave	Tamaño de Hilo	Cabeza Hexagonal C1C5 Acero al Carbono Medio (Yugos, prisioneros escobilla, soportes de bobinas)	
		Libra-Pie	Newton-Metros
7/16″	1/4-20	5-7	7-9
1/2″	5/16-18	7-9	9-12
9/16″	3/8-16	13-17	18-23
3/4″	1/2-13	24-30	33-41
15/16″	5/8-11	60-75	80-100

Tabla 5

Las siguientes precauciones, las cuales aplican al apriete de las uniones apernadas, deben ser consideradas en los procedimientos de mantención:

- Use una llave con limitador de torque solamente para apretar. Cuando sea necesario soltar los pernos, use otro tipo de llave.
- Las superficies de presión de los cojinetes y los hilos de las tuercas y pernos deben encontrarse limpias, secas y libres de aceite y grasa, en el momento de ajustarlas al valor de torque dado. Al encontrarse los hilos con aceite, se debe reducir los valores de torque en un 10%.
- Al apretar inicialmente una unión apernada, el último giro debe apretarse con una llave con limitador de torque para obtener un ajuste exacto.
- Cuando se revise el apriete de las uniones apernadas, la llave de torque debe usarse a los valores de torque máximo indicados en la Tabla 1 y Tabla 2 para asegurar un apriete adecuado.

Los pernos de polo sueltos pueden causar serias fallas catastróficas. A pesar que todos los pernos de polo son ajustados según los valores de torque específicos durante la fabricación, estos deben inspeccionarse periódicamente en terreno. La experiencia ha demostrado que las uniones apernadas tienden a soltarse durante el embarque y que la vibración, el calentamiento y el enfriamiento de las uniones apernadas provocan que se suelten.

Nota:

Realice una inspección visual y un chequeo rápido del apriete de perno del polo principal e interpolo con una llave de torque. Refiérase a la Tabla 6 para verificar torques específicos de pernos de polo principal e interpolo.

Puede resultar muy difícil usar la llave de torque en algunos pernos de polo, debido a la ubicación del motor y los accesorios montados. Un buen método para verificar el torque de estos pernos es obtener primero la sensación del torque deseado, con una llave de torque en un perno accesible. Una vez que tenga esta sensación del torque, verifique inmediatamente el perno difícil usando una llave normal, con aproximadamente la misma presión. La mayoría de los mecánicos obtendrán dentro de un 10% del torque deseado.

Car-caza del Motor	Pernos de Polo Principal				Pernos de Interpolo			
	Ctd	Grado 2 HHCS con revestimiento de protección de material	Mate-rial del Perno	Valor de Torque en (Pie /libras)	Ctd	Grade 2 HHCS con revestimien-to de protección de material	Material del perno	Valor de Torque en (Pie /libras)
K-558A	4	1″-8 × 4″ lg	Acero	310	4	3/4″-10 × 3-1/4″ lg	Acero Grado 2	155
K-700B	3	1-1/4″-7 × 6.0″ lg	Acero	660	3	3/4″-10 × 5.0″ lg	Acero Grado 5	270
K-1690	5	1″-8 × 5.0″ lg	Acero	310	5	5/8″-11 × 5-1/2″ lg	Acero Grado 5	155

Tabla 6

Especificaciones de Pernos de Polo Principal e Interpolo

Después del arranque

Luego de la puesta en marcha de la Pala Eléctrica 4100XPB y que ésta entre en operación, se deberán inspeccionar los motores. Esta sección describe los puntos a inspeccionar después que los motores hayan sido arrancados.

Cojinetes

Monitoree los RTD de los cojinetes o coloque termómetros sobre los alojamientos de los cojinetes a fin que la temperatura pueda ser observada por unas horas. La temperatura del alojamiento de los cojinetes de bolas o rodillos no debe ser mayor a 40°C (104°F) sobre la temperatura ambiental, o de un máximo de 80°C (176°F). Las temperaturas mayores a las mencionadas indican problemas. La temperatura interna del cojinete será efectivamente más alta que la temperatura del alojamiento del cojinete. Revise el alineamiento y la lubricación. No sobre engrase.

Ruido y vibración

Verifique que no haya vibraciones o ruidos inusuales que puedan indicar fricción o interferencia. Los motores nuevos pueden oler a calentamiento o tener un olor a barniz, pero no deberán oler a quemado.

La vibración de los motores nuevos no debe exceder de 0.002” (0.05mm) en los alojamientos de los cojinetes. Las causas más comunes de vibración en los motores nuevos es la desalineación debido a una instalación inadecuada, aflojamiento de pernos de base, acuñamiento desnivelado o daños al motor durante el traslado o instalación. La ondulación de la corriente debido a fuentes de poder rectificadas puede ser también una causa de vibración y ruido acústico.

Inspección general mecánica

Después de completar 24 horas de operación, revise el torque de todos los pernos del polo principal y del interpolo según la Tabla 7. Para mayor información sobre la mantención del torque de los pernos del polo principal e interpolo.

Car-caza del Motor	Pernos de Polo Principal				Pernos de Interpolo			
	Ctd	Grado 2 HHCS con revestimiento de protección de material	Mate-rial del Perno	Valor de Torque en (Pie /libras)	Ctd	Grade 2 HHCS con revestimien-to de protección de material	Material del perno	Valor de Torque en (Pie /libras)
K-558A	4	1”-8 × 4” lg	Acero	310	4	3/4”-10 × 3-1/4” lg	Acero Grado 2	155
K-700B	3	1-1/4”-7 × 6.0” lg	Acero	660	3	3/4”-10 × 5.0” lg	Acero Grado 5	270
K-1690	5	1”-8 × 5.0” lg	Acero	310	5	5/8”-11 × 5-1/2” lg	Acero Grado 5	155

Tabla 7

Especificaciones de los Cojinetes

3.3 Lubricación

General

Los motores de la Pala Eléctrica 4100XPB están equipados con una combinación de cojinetes de rodillo esférico en el terminal extremo de excitación y cojinetes de rodillo cilíndrico en el extremo opuesto. Una excepción a esto son los motores que tienen un cojinete de bola y un cojinete de rodillo cilíndrico en el extremo opuesto del cojinete de bola. El juego axial del eje se controla por medio del espacio interno del cojinete montado, más el espacio axial entre el anillo de rodadura exterior y las tapas de los cojinetes. Refiérase a la Tabla.

Debido a los severos impactos vibratorios encontrados en la actividad minera, se usan montajes o ajustes reforzados entre las pistas interiores y los ejes. Además, todas las pistas interiores de los cojinetes de rodillos esféricos están aseguradas con contra-tuercas. Los ajustes de los cojinetes se indican en la Tabla.

Los cojinetes de todos los motores son lubricados antes que abandonen la fábrica o las instalaciones de reconstrucción de P&H. Los motores son diseñados para tener fittings específicos de entrada y salida del lubricante y la grasa puede ser aplicada solamente en una dirección. Por esta razón, las entradas están equipadas con un fitting para grasa y la salida con un tapón de tubo.

Precaución:

Nunca intente bombear grasa hacia el interior de los cojinetes a través de las salidas.

Carcaza de Motor	Movi-miento Pala	Cojinete de Transmisión			Cojinete de Transmisión Opuesto			Juego Axial Extremo	
		Tipo y Nº de Parte del Cojinete	Tipo Ajte. Cjnte	Interfer. de Cojinete a Eje	Tipo y Nº de Parte del Cojinete	Tipo Ajte. Cjnte	Interfer. de Cojinete a Eje	MAX	MIN
K558a	Swing	Cojinete de Bola /C6326/ C3 25Z749025	m6	0.0006″ min a 0.0026″ max	Cojinete de Rodillo N-222/C3 25Z732D20	m6	0.0006″ min a 0.0022″ max	0.0497″	0.0289″
K700B	Crowd/ Propel	Cojinete de rodillo esféri-co 22230/C3 25Z755D15	m6	0.0006″ min a 0.0026″ max	Cojinete de rodillo cilín-drico N-224/ C3 25Z732D21	m6	0.0005″ min a 0.0023″ max	0.0714″	0.0291″
K1690	Hoist	Cojinete de rodillo esféri-co 22230/C3 25Z755D15	m6	0.0006″ min a 0.0026″ max	Cojinete de rodillo N-234/C3 25Z1035D26	p6	0.0020″ min a 0.0040″ max	0.0714″	0.0291″

Tabla 8

Especificaciones de los Cojinetes

Prácticas de lubricación

Existen muy pocas entradas y salidas de grasa en los cojinetes del motor que tengan el fitting de grasa o el tapón ubicado justo en el extremo frontal del motor. Por razones de accesibilidad, la mayoría de los puntos de entrada y salida están equipados con un tubo corto y el fitting de la grasa o el tapón están instalados al final del tubo. Estos pequeños tubos son llenados con grasa en la fábrica o las instalaciones de reconstrucción. Sin embargo, en algunos casos, como en los motores de giro, se reemplaza una manguera por el tubo; estas mangueras puede que no estén llenas con grasa.

Precaución:

Es importante asegurar que las extensiones de mangueras flexibles a la entrada de grasa sean llenadas con una grasa compatible, antes de poner el motor en funcionamiento.

Intervalos de lubricación

Cada motor está equipado con un rótulo metálico.

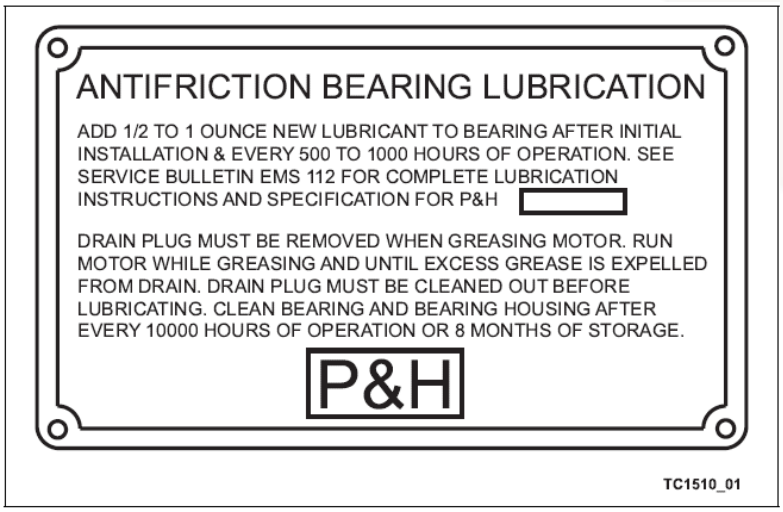

Figura 68

Placa de Lubricación de Cojinetes

La cantidad de grasa a agregar y la frecuencia de la lubricación dependen de las condiciones de funcionamiento.

Generalmente, se prefiere agregar un poco de grasa a intervalos más frecuentes, que una gran cantidad de grasa a intervalos poco frecuentes.

Procedimientos de lubricación

Antes de engrasar cada cojinete, limpie los fittings de grasa con un paño seco y limpio, limpiando cuidadosamente el fitting de la pistola de engrase. Remueva el tapón de drenaje y cualquier resto de grasa endurecida. Elimine también la grasa endurecida dentro de los tubos de grasa con una varilla de plástico flexible o un pedazo de alambre, si es necesario.

Precaución

Proceda con cuidado para asegurar que la varilla o el alambre no se rompa en el tubo o la manguera.

Cuidado

Al no proceder con cuidado mientras se trabaja alrededor de los equipos en rotación, puede resultar en lesiones o la muerte. Asegúrese que las protecciones se encuentren en su lugar. Establezca una buena comunicación con el operador y notifique a todo el personal que trabaje dentro y fuera de la pala sobre cualquier movimiento inminente.

Idealmente, se debe agregar la grasa mientras el motor se encuentre caliente y funcionando lentamente. Se debe bombear la grasa dentro del cojinete lenta y gradualmente con una pistola de engrase operada a mano. Comúnmente las pistolas de engrase tipo cartucho expulsarán aproximadamente 0.05 pulgadas cúbicas de grasa por descarga. Si se considera la onza como una unidad de medida para el volumen o el

peso, la cantidad de grasa “estándar” expulsada por una pistola de engrase en 20 descargas es igual a ½ onza aproximadamente.

Añada la grasa lentamente, hasta que la grasa sea expulsada desde la línea de drenaje o en 20 descargas de la bomba. Deje los orificios de salida abiertos y encienda el motor para liberar presión hasta no expulsar más grasa. Cambie los tapones.

Precaución

Si es importante no sobre-engrasar ningún cojinete, también es especialmente importante no sobre-engrasar los cojinetes superiores de los motores verticales. Además de producirse la falla prematura del cojinete, el exceso de grasa puede gotear hacia el interior del conmutador y las partes adyacentes, provocando un cortocircuito con emisión de chispas.

Evite contaminar el conmutador y los devanados con grasa durante la mantención. Al rellenar los cojinetes, llene la cavidad alrededor de 1/2 a 1/3 de su capacidad. No llene la cavidad completamente.

No intente purgar los cojinetes del motor bombeando grandes cantidades de grasa dentro de los cojinetes. Existen pasos de laberintos dentro de los cabezales extremos del motor que pasan grasa internamente sin forzarla hacia afuera del drenaje. Al purgar causará un sobre engrase del cojinete lo que conducirá a una falla que puede terminar en un cortocircuito.

Selección de grasa

La grasa debe ser compatible con la utilizada durante la fabricación y debe ser para presión extrema (EP) con una especificación NLGI de grado 0, 1 o 2, conforme a la especificación P&H 472A, 472B o 472C, respectivamente. Asegure que se utilice el grado NLGI correcto de grasa según la temperatura ambiente. Consulte la especificación del lubricante P&H 472.

Precaución

Bajo ninguna circunstancia se deben usar grasas que contengan bisulfuro de molibdeno (M052) o grafito en aplicaciones de motores eléctricos, debido a la conductividad eléctrica de estos sólidos. La contaminación del conmutador y piezas adyacentes con grasas conductivas provocará cortocircuitos con emisión de chispas.

Si se utiliza la grasa equivocada o se sospecha que la grasa se encuentra contaminada, se debe limpiar completamente tanto el cojinete como la cavidad del cojinete.

Prácticas de montaje en la pala

A pesar que todos los cojinetes son rellenados con grasa en fábrica, aun así es necesario revisar todas las mangueras flexibles conectadas a las entradas durante el montaje, especialmente en el motor swing.

La manguera de suministro debe ser desconectada del fitting en el extremo delantero del motor y se debe bombear la grasa a través del fitting de grasa hasta que salga por

el extremo de la manguera. Luego reconecte la manguera. Este procedimiento es necesario debido a que no existe una forma segura de predecir cuándo la manguera se ha llenado. Si usted continúa bombeando grasa dentro del fitting mientras espera que ésta salga por el drenaje, entonces usted sobre engrasará el motor.

Siga los procedimientos de lubricación detallados en el Subtópico 3.2. Se recomienda instalar todos los motores principales de movimiento en el sitio de montaje, con el fin de hacerlos funcionar sin carga por algunas horas, usando una máquina soldadora para suministrar energía.

Se debe tomar en consideración el grado NLGI de la grasa a utilizar durante el montaje, además la persona encargada del montaje debe estar al tanto que el grado estándar del lubricante usado en la fábrica y en la mayoría de las instalaciones de reparación es NLGI 2. El grado NLGI 2 puede ser totalmente inapropiado para los motores en climas fríos. Durante el montaje es necesario mover los motores a un área donde se puedan realizar los procedimientos de operación sin carga y de lubricación en un ambiente más cálido.

Lubricación después de un largo período de almacenaje

La grasa utilizada como lubricante de cojinetes se deteriorará gradualmente cuando el motor se encuentra detenido por largos períodos de tiempo. La grasa de los cojinetes puede contaminarse al almacenarlos en ambientes contaminados, aunque la separación del aceite de la matriz jabonosa de la grasa es la forma más probable de deterioro. La separación del aceite deja solo la matriz jabonosa, la cual no es exactamente un lubricante efectivo.

Por consiguiente, aún si el motor es almacenado en un área protegida por un período de 8 meses o más, se debe eliminar la grasa vieja de los cojinetes y las cápsulas y luego relubricar los cojinetes con grasa limpia y fresca.

La relubricación es también recomendada luego de un almacenaje en el exterior o en un ambiente contaminado por períodos de 5 meses o más. Sin embargo, los motores nunca deben almacenarse a la intemperie.

Cada cojinetes debe ser llenado con grasa durante la instalación, dejándolos entre 1/2 a 1/3 de su capacidad.

(Los cojinetes son totalmente engrasados en fábrica). Se debe agregar una capa de grasa tanto a la cápsula interna o externa del cojinete, a través de los sellos de laberinto para evitar el ingreso de suciedad y tierra durante el embarque y almacenaje. No sobre engrase. Opere el motor a bajas RPM y con cargas livianas por unos cuantos minutos después de la instalación.

Lubricación de motores remanufacturados

Siga los procedimientos descritos en el Subtópico 3.2 al instalar motores reconstruidos o ENCORE.

Mantención de escobillas y conmutador

Inspección de escobillas

Peligro

La alimentación eléctrica de los motores de corriente continua puede causar serias lesiones o la muerte. Desconecte y bloquee a apertura la fuente de alimentación de los motores, antes de ajustar las escobillas o realizar cualquier tipo de mantención. Siga todos los procedimientos específicos de lockout/tagout.

Proceda como sigue:

- **Paso 1:** Aísle el motor a inspeccionar del suministro eléctrico. Siga los procedimientos específicos de lockout/ tagout.
- **Paso 2:** Verifique que las caras de las escobilla estén en pleno contacto con el conmutador.
- **Paso 3:** Asegúrese que las escobillas se deslicen libremente en sus respectivos portaescobillas. Refiérase a la Figura 69.

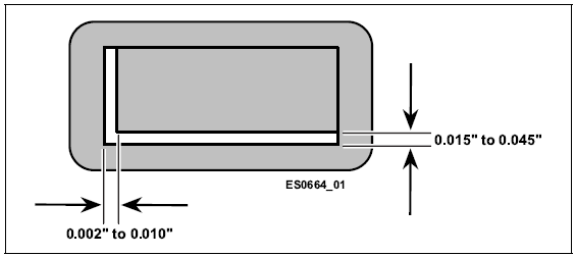

Figura 69

Espacio libre entre las Escobillas de Carbón en la Caja.

- **Paso 4:** Revise el largo de las escobillas. Las escobillas con un desgaste de 1.0” de longitud deben ser cambiadas por escobillas nuevas, según lo indicado en la Tabla 9.

Carcaza de Motor	Nº de Porta escob.	Nº Cajas Escob. por Soporte	Nº de Escobillas requeridas	Tamaño y Nº de Parte de Escobillas	Nº de Placas de Contacto
K-558A	4	5	20	1-1/8″ × 1-3/4″ × 2-1/4″ LG 73Q14D38	3
K700B	4	4	16	1-1/8″ × 1-3/4″ × 2-3/4″ LG 73Q14D17	3
K-1690	6	5	30	1″ × 1-3/4″ × 2-1/4″ LG 73Q14D27	3

Tabla 9

Especificaciones de la Escobilla

- En la Tabla 10 se indican los diferentes grados y tipos de escobilla y las conexiones terminales opcionales. Los tipos de escobilla de baja humedad y muy baja humedad se usan en ambientes de condiciones secas, de alturas elevadas o polvorientas, donde la falta de revestimiento y el desgaste excesivo de la escobilla son evidentes.

Tipo de Escobilla	K558a	K700B	K1690
Escobilla Estándar	73Q14D38	73Q14D17	73Q2D27
Grado Estándard de Vendedor Alternativo	73Q2D38	73Q2D17	73Q2D27
Escobilla Estándar con Terminal HDQ (H45)	R38464D38	R38464D27	R38464D27
Baja Humedad Opción 1 (N6000)	73Q2D42	73Q2D43	73Q2D44
Baja Humedad Opción 2 (DE-25)	73Q2D40	73Q2D33	73Q2D30
Baja Humedad Opción 3 (A451)	73Q2D39	73Q2D29	73Q2D28
Terminal HQD - Baja Humedad Opción 4 (D41)	R38464D39	R38464D29	R38464D28
Terminal HQD - Humedad Muy Baja Opción 5 (H44)	R38464D40	R38464D33	R38464D30

Tabla 10

Grado y Tipo Opcional de Escobillas

- La escobilla de terminal HQD tiene una característica de conexión rápida, la cual permite cambiar rápidamente la escobilla.

Cuando se usan grados o tipos de escobillas alternados, asegúrese de cambiar todas las escobillas y que no haya una mezcla de escobillas en el mismo motor. La mezcla de escobillas ocasionará un desequilibrio en la distribución de la corriente, causando el desgaste excesivo del conmutador y la escobilla.

- **Paso 5:** Verifique que los tornillos para fijar las orejas del flexible de conexión de la escobilla estén apretados. Una buena conexión eléctrica producirá un flujo de

corriente equitativo a través de la porta escobilla, permitiendo eliminar los cortocircuitos con emisión de chispas y los puntos calientes en la porta escobilla.

- **Paso 6:** Verifique que la tensión del resorte o muelle de la escobilla sea suficiente para lograr una buena conexión eléctrica. La Tabla 11 muestra la tensión correcta y el código de colores del resorte, el cual se pinta en cada resorte en el interior de la bobina.

Carcaza de Motor	Ancho y Diámetro Exterior del Resorte	Fuerza Resorte +25% y -5%	Distancia de Prueba de Deflexión	Código de Color	Nº de Parte de Placa Base y Resorte
K-558A	0.750″ max a 0.625″ min 1.187″ de diám.	10 lbs.	1.562″	naranja	517F9D5
K-700B	0.750″ max. a 0.625″ min. 1.187″ de diám.	13 lbs.	1.562″	negro	517F9D4
K-1690	0.750″ max a 0.625″ min 1.187″ de diám.	10 lbs.	1.562″	naranja	517F9D5

Tabla 11

Código de Colores y Tensión de Resorte

Procedimiento de prueba del resorte de la escobilla

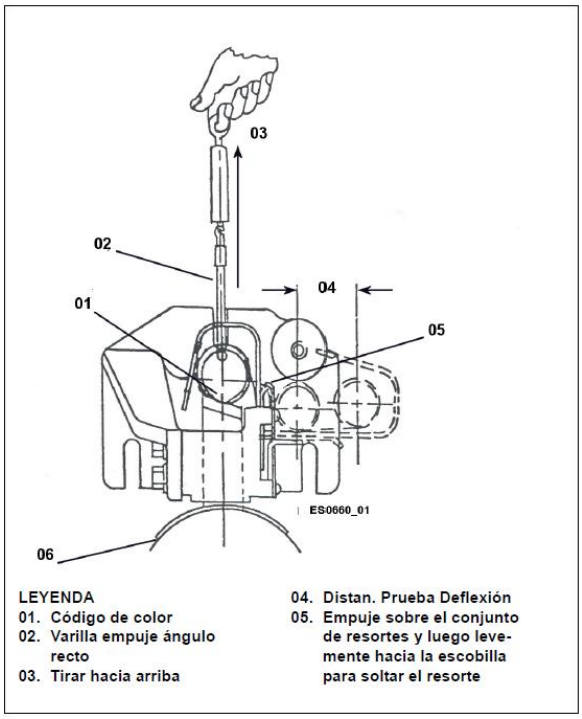

Figura 70

Prueba del Resorte de la Escobilla

Se recomienda usar un medidor de tensión de escobillas “Martin Dale” No. 5T (5 libras de capacidad con escala graduada de 1 onza) y No. 20T (20 libras de capacidad con escala graduada de 4 onzas) o equivalente.

Proceda como sigue refiriéndose a la Figura 70:

- **Paso 1:** Libere el resorte y saque la escobilla de la cara del conmutador. Deslice un pedazo de papel por debajo de la escobilla y trabe nuevamente el resorte en su lugar.
- **Paso 2:** Introduzca una varilla de empuje de ángulo recto hacia el diámetro interior del resorte negador.
- **Paso 3:** Tire hacia fuera el resorte, manteniendo la dirección de tiraje en línea con la escobilla.
- **Paso 4:** Al mismo tiempo, tire cuidadosamente la tira de papel hasta sacarla completamente.
- **Paso 5:** Si el resorte no se puede tirar en línea con el resorte de liberación de la escobilla, mida el esfuerzo de tracción a través de la distancia de prueba de deflexión indicado en la Tabla 11. Para esta distancia, la tracción del resorte debe permanecer constante y equivalente con la fuerza del resorte indica-da en la Tabla 11.

Procedimiento recomendado para el cambio de escobillas

Precaución:

La alta tensión y los motores en rotación pueden ocasionar lesiones graves o la muerte. Las escobillas no se deben tocar o cambiar, cuando el motor está energizado u operando. Desconecte toda la energía eléctrica del motor. Siga todos los procedimientos de lockout/tagout específicos de la mina.

Las escobillas de recambio deben tener la superficie de contacto de su conmutador curvada, con el fin de calzar exactamente con la superficie del conmutador. Esto se logra lijando las escobillas en cada porta escobilla por separado.

Pase una lija de papel no-metálico debajo de las escobillas, con la parte áspera hacia la escobilla, mientras éstas se presionan firmemente hacia el conmutador. Cuando lije las escobillas, no introduzca polvo de carbón dentro de los devanados. El motor debe ser cuidadosamente soplado una vez que haya terminado de lijar las escobillas.

Para cambiar las escobillas, proceda como sigue:

- **Paso 1:** Empuje sobre el resorte de la porta escobilla levemente hacia abajo y luego empújelo hacia la escobilla para soltar el resorte de su retén.
- **Paso 2:** Libere el conjunto resorte–porta escobilla. Sólo entonces se puede sacar la escobilla.
- **Paso 3:** Instale las escobillas nuevas en el orden inverso al desmontaje.
- **Paso 4:** Ajuste cuidadosamente las escobillas al contorno del conmutador con un papel lija fino (#00), según lo descrito anteriormente.

Precaución:

Nunca use una tela esmeril, ya que la arenilla del esmeril es conductora. El papel lija debe extenderse solamente dando una vuelta completa alrededor del conmutador con un traslape mínimo.

- **Paso 5:** Luego de asentar las escobillas, sáquelas de los soportes y límpielas al igual que los soportes para asegurar que las escobillas tengan un libre desplazamiento en los soportes. Asegúrese de soplar o aspirar el polvo de carboncillo del motor, después de lijar las escobillas.

Precaución

No utilice solventes líquidos de ningún tipo, ya que estos remueven las acumulaciones del polvo de carboncillo, más bien lo esparcirán hacia áreas críticas.

No utilice caucho sil icónico o caucho RTV para aplicaciones de sellado en motores de corriente continua. La presencia de vapores de silicona causa el rápido desgaste de la escobilla en motores completamente cerrados.

Método alternativo de cambio de escobillas

Las escobillas se deben cambiar de acuerdo al método descrito en el Subtópico anterior, sin embargo, nos damos cuenta que éste puede no ser práctico en toda situación. Por esta razón, entregamos un método alternativo pero con la convicción que el método preferido es cambiar todas las escobillas al mismo tiempo. Refiérase a la Figura 71 para verificar el diagrama de ubicación general de las escobillas y los ensambles de escobilla.

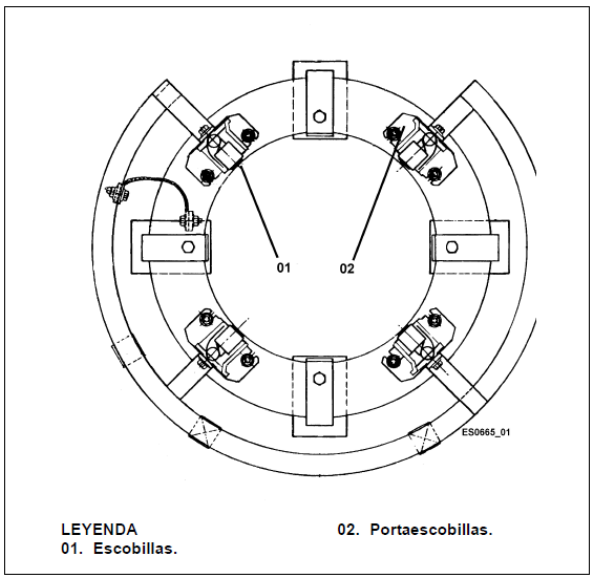

Figura 71

Conexión Cruzada del Porta escobilla

Precaución:

Cambiar las escobillas en el mismo circuito conductivo o todas las escobillas en un solo conjunto portaescobillas, provocará un desequilibrio en la corriente en ese circuito en particular. Esto puede ocasionar un cortocircuito con emisión de chispas en el motor y contribuirá al desgaste excesivo del conmutador y la escobilla.

Las escobillas pueden cambiarse durante un programa tipo mantención, si el orden del cambio de las escobillas se alterna o rota. Refiérase a la Figura 72. Para este ejemplo, cambie todas las escobillas número 1 durante la primera fecha de la mantención programada. Cambie todas las escobillas número 2 en la segunda fecha correspondiente a la mantención programada. Cambie todas las escobillas número 3 en la tercera fecha de la mantención programada. Y finalmente, cambie todas las escobillas número 4 en la cuarta fecha de la mantención programada.

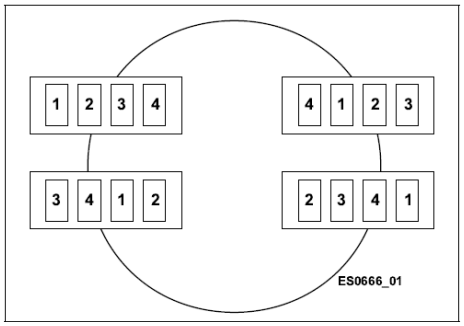

Figura 72

Orden de Cambio de Escobillas

Al utilizar este método, es necesario realizar una inspección completa a la mantención de los motores, para determinar la frecuencia con la cual las escobillas necesitan ser cambiadas y es altamente recomendado que se mantenga un registro para hacer un seguimiento de la fecha y la hora de cada cambio de las escobillas.

Mantención del portaescobillas

Los porta escobillas requieren una mantención mínima. Cada vez que las escobillas sean reemplazadas o sacadas por cualquier razón, revise el espacio entre los soportes y el conmutador. Este espacio debe ser igual para todos los porta escobillas y debe tener una distancia entre 0.062” a 0.093”. Refiérase a la Figura 73.

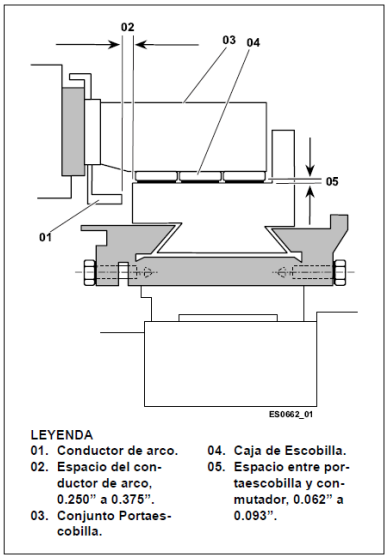

Figura 73

Espacio del Conductor de Arco y la Caja de Escobilla

Mantención del conductor de arco (no aplica a motores k-1690b)

En caso de una formación de arco eléctrico, los conductores de arco en los motores de corriente continua de P&H DC están diseñados para canalizar la energía a tierra. Sin los conductores de arco, el paso sería desde conmutador a tierra vía portaescobillas o a través del cordón de banda.

La separación entre el conductor de arco y el conmutador debe ser de un mínimo de 0.250" a un máximo de 0.375". Si la separación del conductor de arco es mayor a esto, este debe ser desechado y reemplazado por un conductor de arco nuevo. Vea la Figura 73 y la Tabla 12.

Números de Parte del Conductor de Arco

CARCAZA DE MOTOR	CANTIDAD REQUERIDA	Nº DE PARTE DEL CONDUCTOR DE ARCO
K-558A, K-700B	4	579H709
K-1690	6	579H732
K-1690B	12	R50400D112

Tabla 12

3.4 Ajuste de motor en neutro

General

Debido al servicio de inversión, todos los motores de corriente continua de las palas de minas operan con sus escobillas en neutro eléctrico.

Cada vez que se cambie una armadura, el neutro eléctrico debe ser reseteado de acuerdo a los procedimientos descritos más abajo (Procedimiento de Ajuste del Neutro).

Los motores que operan fuera del neutro eléctrico exhibirán una conmutación pobre (varios grados de descarga disruptiva), lo que puede resultar en el deterioro del conmutador y el desgaste excesivo de la escobilla. La conmutación también es afectada por:

- Resistencia de interpolo apropiada (entrehierro y acuñamiento de bronce).
- Grado de escobillas, número de wafers (oblea de silicio), asiento de la escobilla, separación de la escobilla y presión del resorte. Refiérase a la Figura 254, Tabla 26
- Separación circunferencial del polo principal y del interpolo.
- Condiciones de la película y la superficie del conmutador (descentramiento, barras altas o bajas, surcos).
- Ritmo de cambio de la velocidad, velocidad máxima.
- Ritmo de cambio de la corriente, corriente y tensión máxima o de cresta, y componentes sobreimpuestos en CC (potencia rectificada).
- Cambios de carga repentinos, choques y vibración.
- Contaminantes tales como el polvo, gases corrosivos, etc.

Los motores de giro, los cuales operan en paralelo desde un suministro de potencia común, experimentarán distribución de cargas desiguales cuando uno o varios motores tienen sus escobillas fuera del neutro eléctrico. Esto ocurre mayormente durante la aceleración y cuando el desequilibrio de las corrientes se acentúa más, mientras el motor se acerca a la velocidad máxima. El motor que arrastra una corriente más alta puede aproximarse a su límite de conmutación, además de tener una conmutación inherentemente deteriorada como se explicó anteriormente.

Se debe notar que la distribución de carga deficiente pudo haber provocado otras condiciones, además de no estar en neutro. Por ejemplo:

- Motores con intensidad de campos desiguales debido a que el entrehierro del polo principal (en derivación) es incorrecto, conexiones de campo en derivación incorrectas o campos en derivación cortocircuitados.
- Resistencias de compensación externa desiguales o conexiones deficientes.

Procedimientos de ajuste del neutro

Se pueden usar tres métodos diferentes, dependiendo del equipo disponible. En todos los casos, es muy importante que las escobillas estén bien asentadas y que el conmutador esté en buenas condiciones.

MÉTODO A – Realizado en fábrica:

Paso 1: Opere el motor en el dinamómetro a máxima carga y al voltaje, corriente de armadura y corriente de campo nominal.

Paso 2: Suelte los pernos que sostienen los anillos de soporte del portaescobillas.

Paso 3: Gire el mecanismo de maniobra de la escobilla hasta que las velocidades en ambas direcciones, rotación en el sentido horario y contra horario, sean idénticas o estén dentro de unas pocas RPM.

Paso 4: Reapriete los pernos que sostienen los anillos de soporte de los portaescobillas e inspeccione las velocidades como en el Paso 3.

MÉTODO B – Método de impulso de cc.:

Paso 1: Desconecte todos los conductores externos desde los terminales del motor.

Paso 2: Conecte un multímetro de CC ajustado a escala de 50 mV, preferiblemente 50-0-50 mV, entre los portaescobillas positivos y negativos.

Paso 3: Usando una batería de 6VDC o 12VDC (pila seca o húmeda), apliqué voltaje a los terminales de campo en derivación, haciendo e interrumpiendo contacto. El multímetro de corriente continua mostrará una desviación momentánea.

Paso 4: Suelte los pernos que sostienen los anillos de soporte del portaescobillas.

Paso 5: Gire el mecanismo de maniobra de la escobilla, hasta la que la desviación esté en cero o a un valor mínimo. Mientras el mecanismo de la escobilla se rota pasado del neutro, el medidor se desviará en la dirección opuesta.

Paso 6: Reapriete los pernos que sostienen los anillos de soporte del porta escobilla.

MÉTODO C – Método de ca. similar al método b, pero se usa un voltímetro de CA con escala de 50mv:

Paso 1: Desconecte todos los conductores externos desde los terminales del motor.

Paso 2: Conecte un multímetro de CA ajustado a una escala de 50mV, entre los portaescobillas positivos y negativos.

Paso 3: Aplique 110VAC, 50Hz o 60Hz a los terminales de campo en derivación. Esto proporcionará una lectura continua en el multímetro de CA.

Paso 4: Suelte los pernos que sostienen los anillos de soporte del porta escobilla.

Paso 5: Gire el mecanismo de maniobra de la escobilla, hasta la que la desviación esté en cero o a un valor mínimo. Mientras el mecanismo de la escobilla se rota pasado del neutro, el medidor se desviará en la dirección opuesta.

Paso 6: Reapriete los pernos que sostienen los anillos de soporte del porta escobilla.

Actividad N°6

Introcucción a Motores Eléctricos CC y CA.

Campos Magnéticos.

Introducción a la actividad

La siguiente actividad está diseñada para que el participante realice experiencias con distintos tipos de imanes y su interacción. Además se realizarán experiencias con conductores y bobinas atravesando un campo magnético y bobinas a las cuales se les hace pasar una corriente eléctrica para que generen un campo magnético.

Estrategias metodológicas para el instructor

Las estrategias son los procedimientos y/o recursos utilizados para promover el aprendizaje a través de las actividades.

Recurso Plataforma Web	
Explicación demostrativa en aula	
Recurso Audiovisual	
Propuestas de situaciones problemáticas	
Formulación de Preguntas	
Taller de Trabajo	

Objetivos del aprendizaje

Reconocer las cualidades de los imanes, su interacción y cómo generan una corriente eléctrica cuando un conductor se mueve dentro de su campo magnético y la dirección de esa corriente dependiendo hacia dónde se mueva. También se verá cómo una corriente eléctrica genera un campo magnético en una bobina dependiendo de la dirección de la corriente.

Descripción de la Actividad

El instructor podrá realizar esta actividad en grupos o en pares.

Solicitará a los participantes que observen y cumplan con todas las medidas de seguridad para la tarea.

Solicitará a los participantes que realicen la recolección de datos de la actividad a realizar, el instructor colocará imanes uno cerca del otro en diferentes sentidos para ver el efecto de atracción y repulsión de estos, con un amperímetro análogo con punto

medio se mostrará la dirección de la corriente al pasar el conductor por el imán en un sentido y otro.

Con una bobina y corriente continua circulando por ella en un sentido y otro, se demostrará el cambio del sentido del campo magnético al acercarle un imán permanente.

Materiales y Recursos

- Fuente de poder de CC.
- Amperímetro análogo con punto medio.
- Bobina de 12 volts.
- Imanes permanentes.

Seguridad

En todas las actividades de taller es necesario recordar los siguientes aspectos de seguridad:

- Uso obligatorio de implementos personales de seguridad dentro de taller
    - Casco
    - Lente de seguridad
    - Zapatos de seguridad
    - Guantes de faena
    - Chaleco reflectante
    - Protector auditivo. Si aplica
- Identificar riesgos asociados a la trabajo a realizar.
- Consultar al instructor a cargo respecto a cualquier duda
- Al finalizar el taller dejar todo limpio y ordenado.
- Trabajar en ambiente ventilado

Desarrollo de la actividad.

El instructor demostrará la acción de atracción y repulsión en imanes permanentes poniendo frente a frente 2 imanes y cambiando el sentido de éstos al enfrentarlos uno al otro, se medirá el desplazamiento a diferentes distancias y diferentes tamaños de imanes.

Se conectará un conductor a un amperímetro (o en su defecto voltímetro) de cero central y el instructor moverá el conductor dentro del flujo magnético de un imán a diferentes velocidades y distintos sentidos y se anotarán las lecturas (positiva o negativa y mayor o menor) de las inducciones eléctricas en el conductor.

Con una bobina conectada a una fuente de poder de CC de 12 Volts, el instructor creará un electroimán y observará el efecto sobre un imán permanente, se invertirá el sentido de la corriente en la bobina y se anotará la nueva observación. Luego se acercará un trozo de metal ferroso a la bobina invirtiéndose el sentido de la corriente en la segunda ocasión y se anotarán los resultados.

Actividad N°7

El motor DC

Introducción a la actividad

Un aspecto importante de la operación del motor de CD, es el contra-fem;

el voltaje inducido en el devanado de la armadura debido a que este corta por el campo magnético del estator. Contra-fem se opone a la fuente de FEM; por eso, la corriente que pasa por el devanado de la armadura, es una función debido a la diferencia entre la fem y la contra-fem, o CFEM. Si el voltaje aplicado o la fuente de fem se aumenta, la corriente por la armadura también aumentara y además la velocidad del motor. La cfem es causada por la corriente que pasa por las bobinas de la armadura, cortando por el campo magnético entre los polos del estator.

Estrategias metodológicas para el instructor.

Las estrategias son los procedimientos y/o recursos utilizados para promover el aprendizaje a través de las actividades.

Recurso Plataforma Web	
Explicación demostrativa en aula	✓
Recurso Audiovisual	✓
Propuestas de situaciones problemáticas	
Formulación de Preguntas	
Taller de Trabajo	✓

Objetivos del aprendizaje

- Localizar la posición neutra de las escobillas.
- Conocer las conexiones básicas del motor.
- Observar las características de operación de motores conectados en serie y en derivación.

Descripción de la actividad

- El instructor podrá realizar esta actividad en grupos o en pares.
- Solicitará a los participantes que observen y cumplan con todas las medidas de seguridad para la tarea.
- Solicitará a los participantes que realicen la recolección de datos de la actividad a realizar.

Materiales y recursos

- Módulo de fuente de energía (0-220 Vc-a, 220 Vc-a, 0-220 Vc-a)
- Módulo de motor/generador de CD
- Módulo de medición de CA (0-250 V)
- Módulo de medición de CD (0-400 V)
- Tacómetro de mano
- Cables de conexión

Desarrollo de la actividad

El facilitador dará las siguientes instrucciones a los participantes para encontrar la posición neutra de las escobillas del motor, conozca las conexiones en serie y en derivación del mismo.

Para encontrar la posición neutra:

1. Indicara utilizar corriente alterna para que el participante determine la posición neutra de las escobillas del motor de C-d. Con los Módulos EMS de Fuente de Energía, de medición de c-ay de motor/generador de c-d, conectara el circuito que aparece en la Figura 74. Las terminales de la fuente de alimentación proporcionaran un voltaje variablede*0-220Vc-a,* conforme se hace girar la perilla de control de la salida de voltaje.

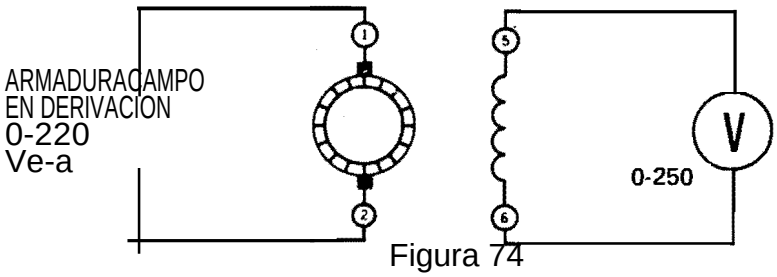

Figura 74

2. Desprender el módulo de motor/generador de CD y adelantarlo aproximadamente 10 cm. Meter la mano detrás de la placa delantera del módulo y mover la palanca de ajuste de la escobilla hasta el extremo máximo en el sentido de las manecillas del reloj. Indicar no volver a poner el modulo en su lugar (tendrá que mover de nuevo las escobillas).

3. Conectar la fuente de energía; colocar en la posición de c-a el conmutador del voltímetro de la fuente de energía y mover lentamente hacia adelante la perilla de control de la salida del voltaje hasta que el voltímetro de c-a conectado al devanado de campo en derivación indique aproximadamente 150 Vc-a. (el voltaje de c-a en el campo en derivación se induce por acción de la corriente alterna que atraviesa la armadura).

4.

a) Meter cuidadosamente la mano detrás de la cara frontal del módulo (cuidando de mantener la otra en el bolsillo) y mueva las escobillas de una posición extrema a la otra. Observar que el voltaje de c-a inducido a través del campo disminuye a cero y luego aumenta nuevamente conforme se llega a la otra posición extrema, siguiendo el sentido contrario al de las manecillas del reloj.

b) Dejar las escobillas en la posición en donde el voltaje inducido es cero. Este punto corresponde al plano neutro del motor/generador de CD. Cada vez que use el motor/generador de CD, las escobillas deben ajustarse a la posición neutra.

c) Reducir el voltaje a cero y desconecte la fuente de energía. Vuelva a colocar el modulo del motor/generador de CD en su lugar y desconectar el circuito.

Para conexiones del motor en serie.

5. Con los módulos EMS de fuente de energía, de medición de CD y del motor generador de CD, conecte el circuito ilustrado en la Figura 75. observe que la armadura está conectada en serie con el devanado de campo en serie, a través del voltaje de entrada.

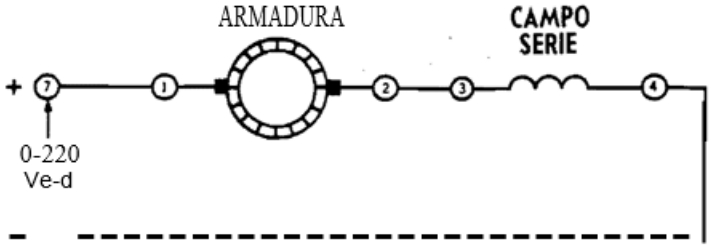

Figura 75

6. Conectar la fuente de energía y nuevamente poner en la posición de c-d el conmutador del voltímetro de la fuente de energía. Ajustar el voltaje de salida a 220 Vc-d.

7.

a) ¿Girar el motor rápidamente? si

b) Usar el tacómetro manual y medir la velocidad del motor en revoluciones por minuto.

Velocidad en serie = 4.850 r/min

8.

a) Reducir el voltaje de la fuente de energía y observar el efecto que se produce en la velocidad del motor. Observaciones:

Al reducir el voltaje de la fuente, se reduce la velocidad del motor.

b) Reducir el voltaje hasta que pueda determinar la dirección de rotación (en el sentido de las manecillas del reloj o contrario a este)

Rotación = ESMR

c) Reducir el voltaje a cero y desconectar la fuente de alimentación.

9. Volver a conectar el circuito de la Figura 75. (el único cambio hecho en relación con el circuito de la Figura 76, es que las conexiones a la armadura quedaron invertidas.)

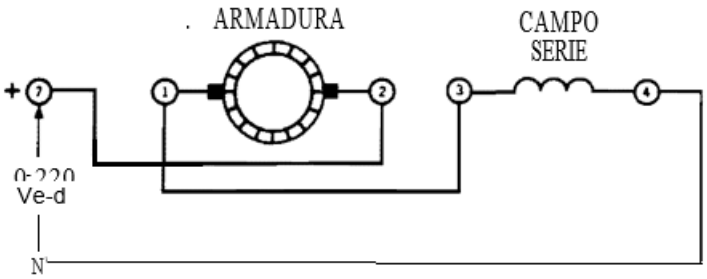

Figura 76

10. Repetir los procedimientos 6 al 8 (con las conexiones de la armadura invertidas que se indican en la Figura 75 o 76)

Velocidad en serie (inversión) = 5000 r/min

Rotación = ESCMR

11. Escribir una regla para cambiar la dirección de rotación del motor de c-d en serie.

La dirección de rotación es invertida si las conexiones de la armadura son invertidas.

PARA CONEXIONES DEL MOTOR EN DERIVACION

12. Conectar el circuito que aparece en la Figura 77. observar que el reóstato está en serie con el campo en derivación y que esta combinación se conecta en paralelo con la armadura a través del voltaje de entrada.

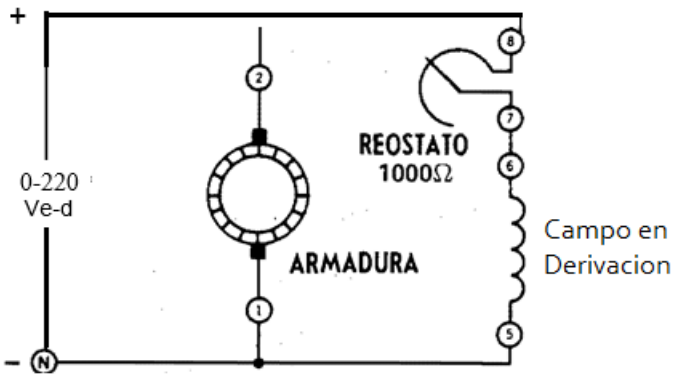

Figura 77

13.

a) Ajustar el reóstato a la resistencia mínima (aproximadamente cero ohms cuando se hace girar a la posición extrema en el sentido de las manecillas del reloj).
b) Conectar la fuente de energía y ajústela a 220 Vc-d.
c) Medir la velocidad del motor con el tacómetro.

Velocidad en derivación (cero ohms) = 1115 r/min

d) Ajustar el reóstato a la resistencia máxima (aproximadamente 1000 ohms) = 2000 r/min.
e) Determinar la dirección de rotación.

Rotación = ESMR

14.

a) Reduzca el voltaje a cero y desconecte la fuente de energía.
b) Invierta la polaridad del voltaje de entrada intercambiando solo los cables de conexión de la fuente de energía.

15. Repetir el procedimiento 13 y compare los resultados:

a) ¿cambio la rotación de dirección? no
b) ¿vario la velocidad? No
c) Reducir el voltaje a cero y desconectar la fuente de alimentación.

16. Intercambiar los cables de conexión que van a la fuente de energía. El circuito debe quedar igual al que se ilustra en la Figura 77. ahora invierta solo las conexiones de la armadura.

17. Repetir el procedimiento 13 y compare la dirección de rotación con la que se encontró en el procedimiento 13.

Rotación = ESCMR

18.

a) Mientras el motor siga funcionando, abrir momentáneamente el circuito del campo en derivación, quitando el cable de conexión de una de las terminales del devanado de campo en derivación (5 o 6). Indicar a los participantes tener mucho cuidado de no tocar ninguna de las otras conexiones de las terminales ni ningún metal mientras realiza este procedimiento. Estar listo para cortar inmediatamente la energía aplicada al motor desconectando la fuente de alimentación.
b) Explicar lo que sucede cuando en un motor de c-d se pierde la alimentación al campo en derivación.

La CFEM se baja debido a la pérdida del campo magnético causando un aumento de la corriente por la armadura, y esto causa aumento de velocidad.

c) ¿puede ocurrir lo mismo en un motor de c-d conectado con el campo en serie? No

Explique por qué Removiendo la potencia del campo también remueve la potencia de la armadura y esto parara el motor.

19. Conectar el circuito de la Figura 78. Observar que la armadura está conectada a la salida variable de 0-220 Vc-a (terminales 7 y N), en tanto que el campo en derivación está conectado a la salida fija de 0-220Vc-d (terminales 8 y N).

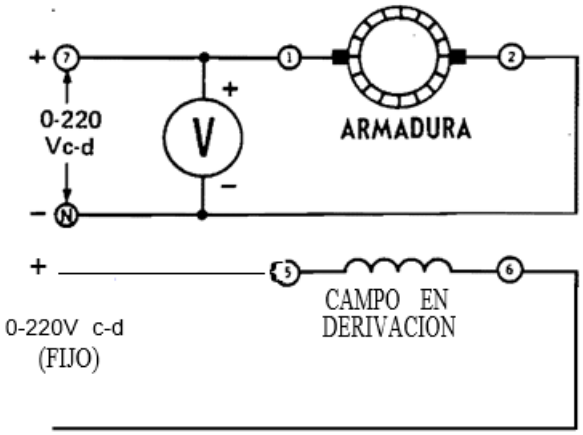

Figura 78

20.

a) Conectar la fuente de energía y ajustar el voltaje de la armadura a 60 Vc-d, guíese por las lecturas que del medidor.

b) Usar el tacómetro manual para medir la velocidad del motor. Anotar en la tabla las mediciones de velocidad. (Espere hasta que la velocidad del motor se estabilice antes de efectuar la medición).

E (VOLTS)	0	60	120	180	220
SPEED (r/min)	0	300	600	900	1110

c) Repita (b) para cada uno de los valores de voltaje que se indican en la tabla.

d) Marque los puntos obtenidos en la tabla, en la gráfica ilustrada en la Figura79. luego trace una línea continua por los puntos marcados.

e) ¿es un buen método de control de velocidad el hacer que varié el voltaje de la armadura (manteniendo constante el voltaje del campo en derivación)?

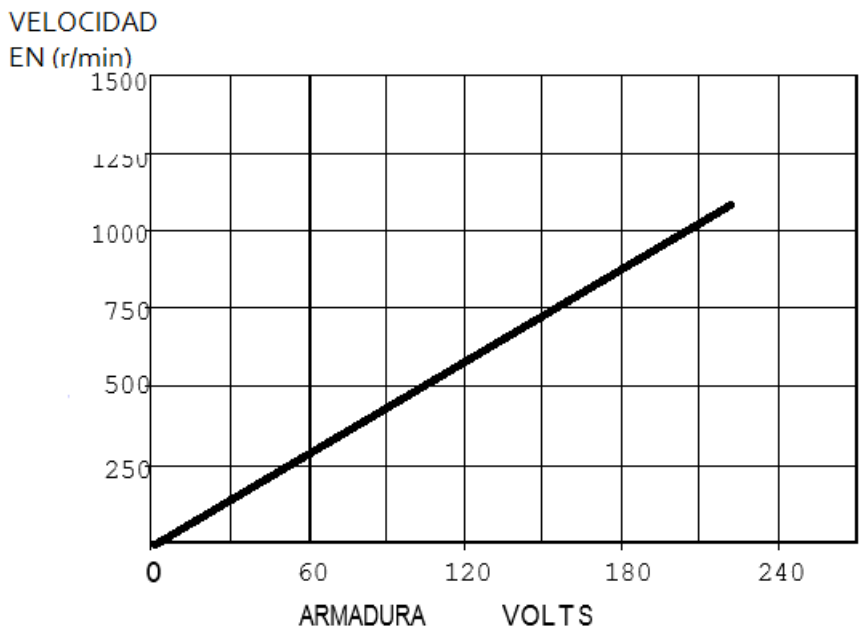

Figura 79

PRUEBA DE CONOCIMIENTOS

1. Explique cómo se localiza la posición neutra de las escobillas en un motor de c-d.

Con CA aplicada a la armadura, ajuste las escobillas para inducir cero CA en la bobina de derivación.

2. ¿Giraría el motor si solo se excitara la armadura (se le aplicara un voltaje)?

No (vea las notas)

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

El motor puede acelerar y destruirse a sí mismo (vea las notas).

4. ¿Cuáles son las dos formas en que se puede invertir la rotación de un motor de c-d conectado en derivación?

Intercambio de las conexiones de la armadura
Intercambio de las conexiones del campo
(vea las notas)

5. ¿Por qué se necesitan detectores de perdida de campo en motores grandes de c-d?

Para prevenir la velocidad excesiva del motor y posible destrucción.

6. En el procedimiento :
   a) ¿Se duplica la velocidad del motor cuando se duplica el voltaje de la armadura? Si
   b) ¿Sería correcto afirmar que “con un voltaje fijo de campo, la velocidad de un motor en derivación es proporcional al voltaje de la armadura? Si

Explique por qué: con la excepción de las pérdidas, la velocidad del motor varia directamente con el voltaje de la armadura.

7. ¿Cuáles son las dos formas en que se puede variar la velocidad de un motor de c-d?
   a) Variar el voltaje del campo en derivación.
   b) Variar el voltaje de la armadura.
8. De los dos métodos dados en (7):
   a) ¿Cuál de los dos da el mayor rango de velocidad? (b) (vea las notas)
   b) ¿Cuál es el más económico (utiliza menos partes)? (a)

Cierre de actividad:

Retroalimentación del instructor y los participantes, así aclarando dudas de la actividad realizada.

Consejo Minero
Dirección: Apoquindo 3500, Piso 7, Las Condes, Santiago.
Teléfono: (562) 2347 2200
www.ccm.cl

AngloAmerican

ANTOFAGASTA MINERALS

BARRICK

bhpbilliton
resourcing the future

CODELCO
Orgullo de Todos

COLLAHUASI

FREEPORT-McMoRAN COPPER & GOLD

GLENCORE

KGHM
POLSKA MIEDŹ S.A.

LUMINA
COPPER CHILE

Teck

YAMANAGOLD