

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA



**METODOLOGÍAS DEL CONTROL DE MOTORES DE CORRIENTE
CONTINUA Y EVALUACIÓN DE EQUIPOS DE CONTROL**

INFORME DE SUFICIENCIA

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO ELECTRICISTA

PRESENTADO POR:

CÉSAR AUGUSTO ROLDÁN VILLASIS

PROMOCIÓN
1997- I
LIMA-PERÚ
2003

Dedico este trabajo a:
Mis padres, quienes con su amor y sacrificio,
supieron darme la fuerza para seguir
adelante,
Mis Hermanos, por el apoyo incondicional en
mi carrera,
Y mi esposa e hija quienes me acompañan en
mi constante lucha de superación.

**METODOLOGÍAS DEL CONTROL DE MOTORES DE CORRIENTE
CONTINUA Y EVALUACIÓN DE EQUIPOS DE CONTROL**

SUMARIO

El presente informe da a conocer las metodologías para el control de los motores de corriente continua, el mismo ha recopilado información necesaria para entender el comportamiento del funcionamiento de los motores.

En el capítulo I se describe la constitución física del motor de corriente continua, además, presenta los tipos de motores y la aplicación que tienen cada uno de ellos.

En el capítulo II se representan los tipos de motores de modo que se simplifique las características propias de la maquina.

En el capítulo III presenta las características de operación del motor de corriente continua en régimen permanente, describiendo el arranque y modos de operación del motor, así también el funcionamiento de los motores de imán permanente.

En el capítulo IV se describen las metodologías para el control de los motores de corriente continua.

En el capítulo V se muestran ejemplos de la aplicación del control de los motores de corriente continua.

En el capítulo VI se sugiere la selección de un equipo de control, dependiendo del requerimiento del motor.

ÍNDICE

PRÓLOGO

CAPÍTULO I

ASPECTOS CONSTRUCTIVOS, TIPOS Y CAMPOS DE

APLICACIÓN DE LOS MOTORES DE CORRIENTE CONTINUA	1
1.1 Parte Física del Motor de Corriente Continua	1
1.1.1 Parte fija	1
a) Armazón	2
b) Piezas Polares	2
c) Imán Permanente	3
d) Escobillas y Portaescobillas	3
1.1.2 Parte Giratoria	4
a) Eje	4
b) Núcleo	4
c) Devanado	4

d)	Colector	5
1.2	Tipos de motores de Corriente Continua	5
1.2.1	Motor de Corriente Continua de Excitación Independiente	5
1.2.2	Motor de Corriente Continua en Derivación Paralelo Shunt	5
1.2.3	Motor de Corriente Continua en Serie	6
1.2.4	Motor de Corriente Continua Compuesto	6
1.2.5	Motor de Corriente Continua de Imán Permanente	7
1.2.6	Motor de Corriente Continua Universal en Serie	7
1.2.7	Motor de Corriente Continua sin Escobillas	8
1.2.8	Motor de Corriente Continua con Inducido sin Ranuras e Impreso	8
CAPÍTULO II		
MODELAMIENTO DE MOTORES DE CORRIENTE CONTINUA		10
2.1	Motor de Corriente Continua de Excitación Independiente	12
2.2	Motor de Corriente Continua en Derivación Paralelo Shunt	14
2.3	Motor de Corriente Continua en Serie	16
2.4	Motor de Corriente Continua Compuesto	18
2.5	Motor de Corriente Continua de Imán Permanente	21
CAPÍTULO III		
CARACTERÍSTICAS DE OPERACIÓN DE LOS MOTORES DE CORRIENTE CONTINUA		23
3.1	Típico Funcionamiento del Motor de Corriente Continua	23
3.2	El Régimen Permanente Estacionario	25
3.2.1	Característica par – velocidad	25

3.2.2	Característica Velocidad vs. Flujo de Excitación	30
3.3	Región Admisible de Operación en Régimen Permanente Estacionario	30
3.4	Arranque del Motor de Corriente Continua	33
3.5	Funcionamiento de los Motores de Imán Permanente	35
3.6	Limitaciones en la Operación de los Motores de Corriente Continua	36
3.7	Modos de Operación de los Motores de Corriente Continua	39
3.7.1	Cuatro Cuadrantes	39

CAPÍTULO IV

METODOLOGÍAS DE CONTROL DE LOS MOTORES DE

CORRIENTE CONTINUA 41

4.1	Control Por Efecto de Campo de Inducción	42
4.2	Control por Efecto de Tensión de Armadura	46
4.3	Control por Efecto de la Combinación de Campo de Inducción y Tensión de Armadura	49
4.4	Otra Forma de variar la Velocidad de los Motores de Corriente Continua	49
4.5	Forma de Controlar el Motor de Corriente Continua de Imán Permanente	51
4.6	Participación de los Dispositivos Electrónicos en el Control de los Motores de Corriente Continua	53

CAPÍTULO V

APLICACIÓN DE CONTROL A LOS MOTORES DE

CORRIENTE CONTINUA 55

5.1	Ejemplo de Aplicación de Control: Movimiento de Brazo de Robot	55
5.1.1	Control Desacoplado	56
5.1.2	Controlador Posicional para una Articulación	62
5.1.3	Cálculo de Inercias y Amortiguamientos Equivalentes	65
5.1.4	Efecto de la Carga Externa y la Posición	65
5.2	Otros ejemplos esquemas de circuitos de control	66
5.2.1	Carros Calcina	66
5.2.2	Corazón Artificial	67
5.2.3	Cañón Antiaéreo	68
5.2.4	Circuito Sencillo de Control de Velocidad para Motor de Corriente Continua	69
5.3	Ejemplo de Calculo de dispositivos para el Control de motor de 1/4 HP	70
5.3.1	Características del Motor a Controlar	70
5.3.2	Desarrollo del Proyecto	70
a)	Etapas de Potencia	71
a.1)	Tiristor como Dispositivo de Control de Potencia	71
a.2)	Diodo de Conmutación	72
a.3)	Diodos Rectificadores	73
a.4)	Buffer de Disparo	73
a.5)	Circuito Rectificador para la Alimentación del circuito de control	74
a.6)	Capacitor del Filtro de Alimentación de 5 Voltios	74

a.7)	Potencia en los Transformadores	75
a.8)	Elemento Fusible	75
b)	Etapas de Control	75
b.1)	Microcontrolador	75
b.2)	Circuitos Periféricos	76

CAPÍTULO VI

SELECCIÓN DEL APARATO DE CONTROL PARA

MOTORES DE CORRIENTE CONTINUA 78

6.1	Criterios Para la Selección del Equipo de Control	78
-----	---	----

CONCLUSIONES 81

ANEXOS 83

Anexo A	84
---------	----

Anexo B	91
---------	----

Anexo C	105
---------	-----

BIBLIOGRAFÍA 110

PRÓLOGO

Con el advenimiento de los accionamientos electrónicos, el motor de corriente continua, por su flexibilidad, regularidad y elevado rendimiento, se ha manifestado y mantenido como un natural e importante componente de la automatización.

Las condiciones impuestas por las informaciones obtenidas de los distintos sistemas que utilizan motores de corriente continua, fijaron las características constructivas y de funcionamiento requeridas en los más importantes procesos de la industria siderúrgica, metalúrgica, mecánica, del papel, plástica, etc. Como también en los sistemas de tracción.

Cabe añadir que los estudios comparativos de características y costos de los motores de corriente continua se basan en la combinación del motor y de su equipo de control.

CAPÍTULO I

ASPECTOS CONSTRUCTIVOS, TIPOS Y CAMPOS DE APLICACIÓN DE LOS MOTORES DE CORRIENTE CONTINUA

El presente capítulo tiene por interés describir la constitución física del motor de corriente continua, así como la función que cumplen cada una de las piezas que lo constituyen. Además, forma parte del capítulo, dar a conocer los principales tipos y campos de aplicación de los motores de corriente continua.

1.1 Parte Física del Motor de Corriente Continua

El motor de corriente continua normalmente está constituido por una parte fija, que produce el flujo de excitación o inducción, llamada **inductor** (generalmente presenta devanado interno que se alimenta con corriente continua) y otra parte giratoria, que contiene las bobinas del arrollamiento en el cual se produce la fuerza electromotriz inducida (o fuerza contra electromotriz), llamada **inducido** o armadura.

A continuación una breve descripción de los componentes que integran la Parte Fija y la Parte Giratoria del motor de corriente continua:

1.1.1 Parte Fija (denominado también estator)

Constituye parte esencial del circuito magnético, su función es suministrar y proporcionar la trayectoria para el flujo magnético, que será usado por el bobinado del rotor permitiéndole realizar su movimiento giratorio, está formado por:

- a) Armazón
- b) Piezas Polares
- c) Imán Permanente (se presenta para motores de corriente continua de imán permanente)
- d) Escobillas y Portaescobillas

a) Armazón: Denominado también yugo, tiene dos funciones primordiales: servir como soporte y proporcionar una trayectoria de retorno al flujo magnético, generalmente está constituido por una estructura cilíndrica hecha normalmente de aleación de acero con alta permeabilidad magnética. Su construcción para motores pequeños es maciza, para motores grandes y medianos es con chapas apiladas.

b) Piezas Polares: Denominado también polos, se compone en unos casos de polos y sus bobinas (normalmente reúne a los polos principales y polos auxiliares) y en otros de imán permanente, se encuentra fijado al armazón o carcasa del estator. Su función es proporcionar un campo magnético uniforme al bobinado del rotor o armadura, los mismos que están dispuestos de manera alternada (formando de esta manera polos norte y sur), a excepción de los polos auxiliares que lo hacen dependiendo de la posición de los polos principales y del sentido de giro del motor. Las bobinas son instaladas en la saliencia del estator (estator de polos salientes).

c) Imán Permanente: Se utilizan normalmente en motores de corriente continua de pequeña potencia, como es el caso de los motores de corriente continua de imán permanente, se compone de material ferromagnético altamente remanente, se encuentra fijado al armazón o carcasa del estator. Su función es proporcionar un campo magnético uniforme al devanado del rotor o armadura. Los imanes son instalados de forma similar al de los polos principales, permitiendo la magnetización en dirección radial.

d) Escobillas y Portaescobillas: Las escobillas están fabricadas normalmente de carbón, y poseen una dureza menor que la del colector, para evitar que éste se desgaste rápidamente, se encuentran albergadas por los portaescobillas. La función de las escobillas es transmitir la tensión y corriente de la fuente de alimentación hacia el colector y, por consiguiente, al bobinado del rotor.

Los portaescobillas son aisladas convenientemente para evitar contactos a masa o cortocircuitos entre escobillas, su función es mantener a las escobillas en su posición de contacto firme con los segmentos del colector, esta función la realiza normalmente por medio de resortes, los cuales hacen una presión moderada sobre las escobillas contra el colector. Esta presión debe mantenerse en un nivel intermedio pues, de ser excesiva, la fricción desgastaría tanto a las escobillas como al colector; por otro lado, de ser mínima esta presión, se produciría lo que se denomina "chisporroteo", que es cuando aparecen chispas entre las superficies del colector y las escobillas, debido a que no existe un buen contacto. Las escobillas presentan una forma que permite que se adapte perfectamente a la superficie circular del colector.

1.1.2 Parte Giratoria (denominado también armadura o rotor)

Es el órgano giratorio del motor, contiene las bobinas que proporcionan el torque para mover la carga y proporciona un trayecto de baja reluctancia para el flujo magnético, está formado por:

- a) Eje
- b) Núcleo
- c) Devanado
- d) Colector

a) Eje: Cumple la función de impartir la rotación al núcleo, el devanado del inducido y al colector, en motores de corriente continua de pequeña potencia, normalmente es formado por una barra de acero fresada.

b) Núcleo: Se localiza sobre el eje. El núcleo es formado con chapas magnéticas apiladas (fabricado en motores pequeños, normalmente con laminaciones de acero al silicio), su función es proporcionar un trayecto magnético entre los polos para que el flujo magnético del devanado circule.

Las laminaciones tienen por objeto reducir las corrientes parásitas en el núcleo, el núcleo laminado contiene ranuras a lo largo de su superficie para albergar al devanado de la armadura (bobinado).

c) Devanado: Lo conforma las bobinas de arrollamiento del inducido, son bobinas aisladas entre sí y entre el núcleo de la armadura, se encuentran alojadas en las ranuras, y conectadas eléctricamente con el colector.

d) Colector: Denominado también conmutador, está constituido de láminas de material conductor (delgas), separadas entre sí y del centro del eje por un material aislante, para evitar cortocircuito con dichos elementos. El colector se encuentra sobre uno de los extremos del eje del rotor, de modo que gira con éste y está en contacto con las escobillas. Los extremos de las bobinas del arrollamiento del inducido se conectan a los segmentos del conmutador, que a su vez se conectan sucesivamente a la alimentación a través de las escobillas (llamadas también cepillos).

1.2 Tipos de Motores de Corriente Continua

Se presenta a continuación motores de corriente continua de uso general y especiales:

1.2.1 Motor de Corriente Continua de Excitación Independiente

El Motor presenta par de arranque muy elevado, por la forma de su conexionado tendrá características similares al motor derivación shunt, generalmente se usa en sistemas de tensión de alimentación constantes y para aplicaciones de velocidades prácticamente invariables, además, permite el fácil control de su velocidad de forma automática, es necesario que cuente con reóstato de arranque.

Se utiliza normalmente para propulsores de velocidad, y motores de pequeña y gran potencia.

1.2.2 Motor de Corriente Continua en Derivación Paralelo Shunt

El par de arranque puede considerarse mediano (siendo menos elevado que el del motor serie), el motor se usa en sistemas de tensión constante, donde se requiere una

velocidad prácticamente invariable (constante), la misma que es independiente de las variaciones de carga (par de operación), en el caso de motores de cierta potencia se añade un devanado en serie con el inducido para evitar un embalamiento eventual del motor o conseguir una ligera reducción de la velocidad cuando la carga aumenta. Para el arranque se recomienda colocar un reóstato de arranque en el bobinado del inducido.

Utilizados en accionamientos que exigen una velocidad constante, como taladradoras, tornos, etc. y para el control de cargas compresoras, bombas, ventiladores, tracción (transporte) generadores DC o AC

1.2.3 Motor de Corriente Continua en Serie

Son motores de alto par de arranque, y la velocidad varia en proporción inversa con la carga, al aumentar la carga la velocidad disminuye y vice versa, además, presenta tendencia a sobreacelerarse (embalarse) con cargas bajas, es imprescindible reóstato de arranque (colocado en el circuito de la bobina del inducido), necesariamente la carga debe ser acoplada o conectada a través de engranajes al eje del motor. Se utiliza generalmente para accionamientos de transporte eléctrico y en los mecanismos de elevación, grúas, cabrestantes. Este tipo de motor se adapta perfectamente a la impulsión de vagones de locomotoras o locomotoras de tracción y otros vehículos eléctricos, además como dispositivo de frenado (frenado eléctrico de tranvías).

1.2.4 Motor de Corriente Continua Compuesto

Este motor reúne las características de los motores de corriente continua serie y derivación. Posee un buen par de arranque (mejor al del tipo shunt, aunque no tan alto como el del tipo serie), el motor no se sobreacelera (no se embala), es imprescindible que se incluya reóstato de arranque (colocado en el circuito de la bobina del inducido).

Estos motores por la forma del conexionado y el efecto de la bobina de excitación en serie y la bobina de excitación en derivación pueden clasificarse en: motores compuesto aditivo (donde las fuerzas magnetomotrices de los campos de ambas se suman), y motores compuesto diferencial (donde las fuerzas magnetomotrices de los campos de ambas bobinas se restan).

Este motor es utilizable principalmente en máquinas herramientas y tracción.

1.2.5 Motor de Corriente Continua de Imán Permanente

En este tipo de motor no existen devanados de campo (en su lugar se tiene imán permanente, como responsable de generar el campo magnético) y la alimentación se conecta únicamente a las escobillas para la armadura, este motor se emplea con más frecuencia en regímenes de corta duración o de corta duración de funcionamiento con repetición. Es utilizado en la transmisión de poca potencia de automóviles y aviones, así como diversos sistemas de la automática (entre ellos la robótica), y de computadoras.

1.2.6 Motor de Corriente Continua Universal en Serie

Es un tipo especial de motor de corriente continua serie, consta de yugo de chapas apiladas, permite la implementación de conexiones para la conexión de la excitación

en serie, derivación y compuesto, puede combinarse con un dispositivo de estado sólido que le permitiría un mejor control de la velocidad y par. Tiene la capacidad de funcionar tanto con corriente continua o alterna, es un motor de alta velocidad (trabajando generalmente a velocidades comprendidas de 1 500 a 15 000 r/min),, tiene una vida relativamente corta, y su desventaja es el ruido que genera.

Son requeridos como motores pequeños por su bajo peso, se utilizan en aspiradoras, electrodomésticos, herramientas portátiles.

1.2.7 Motor de Corriente Continua sin Escobillas

Son motores pequeños con posibilidad de tener velocidades de hasta 50 000 r/min, pero esta disponible en potencias pequeñas de 20 W, o algo más, opera normalmente conectado a una fuente de potencia en corriente continua, cuenta normalmente con un rotor de imán permanente, un estator con devanados de tres o más fases de tensión, tiene un sensor de posición y un circuito electrónico para controlar las fases del devanado del rotor.

Los motores eléctricos sin escobillas se han venido utilizando en la industria en general, aplicándose en grandes servos, aire acondicionado, ventiladores, etc. en la transmisión en poca potencia de aviones y barcos. Además, se aplican en el campo de la medicina moderna como por ejemplo en un corazón artificial.

1.2.8 Motor de Corriente Continua con Inducido sin Ranuras e Impreso

En los motores de inducido sin ranuras, el devanado es sujeto a la superficie ferromagnética cilíndrica lisa (circuito magnético liso), el mismo que puede ser llamado motor con inducido estampado, de este modo se consigue menores

momentos de inercia y constante electromagnética de tiempo del inducido, permitiendo accionamiento rápido en los sistemas de mando automático. Estos motores tienen aplicación en accionamientos para los cañones antiaéreos de las fragatas de mar.

CAPÍTULO II

MODELAMIENTO DE MOTORES DE CORRIENTE CONTINUA

El presente capítulo muestra la representación empleada en los tipos de motores de corriente continua, así como las principales características y comportamiento de estos motores. Se desarrollan los siguientes modelos para los diferentes tipos de motores:

-Motor de Corriente Continua de Excitación Independiente

-Motor de Corriente Continua en Derivación Paralelo Shunt

-Motor de Corriente Continua en Serie

-Motor de Corriente Continua Compuesto

-Motor de Corriente Continua de Imán Permanente

Se representa al motor de corriente continua de manera que simplifique los elementos y parámetros que intervienen en la conversión de la energía eléctrica en energía mecánica, esta representación es la más simple posible, pero permite entender el funcionamiento del motor. La figura 2.1 muestra al motor de corriente continua con alimentación U_a en las escobillas, corriente I_a denominada corriente de la armadura (corriente del inducido), R_a es la resistencia de armadura (resistencia del

inducido), e es la fuerza contraelectromotriz generada, la bobina f representa el devanado de excitación, la forma en que es conectada esta bobina al circuito entre la fuente y la armadura determinara características particulares en los diferentes tipos de motores. La figura 2.1 muestra el esquema representativo del motor de corriente continua.

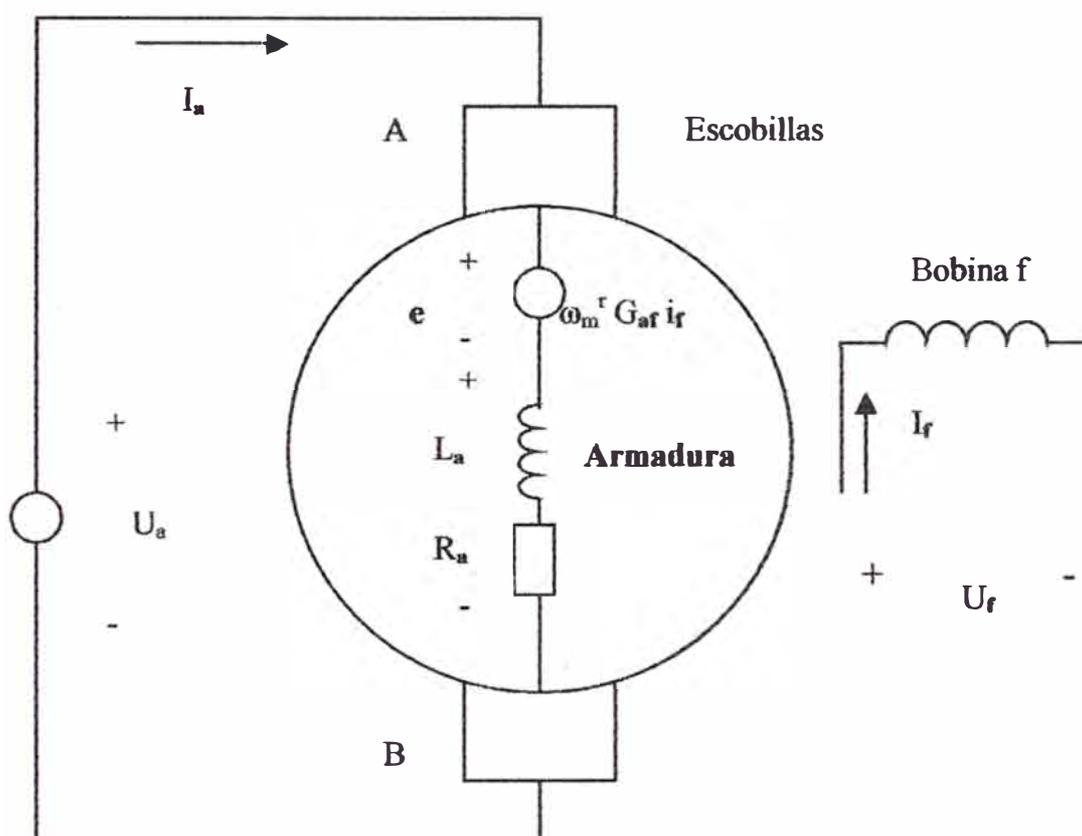


Figura 2.1 Representación del motor de corriente continua.

La representación simplificada del motor es aplicada para los siguientes tipos de motores, pero con variación en la ubicación del circuito de excitación.

- La tensión en las escobillas del motor U_a , es la tensión de alimentación U_L .
- La corriente que ingresa a la armadura I_a , es la corriente de carga I_L .
- La fuerza contraelectromotriz e , es dependiente de la velocidad del motor y del campo de excitación ($k \phi \omega$).
- El par y la velocidad angular tienen el mismo sentido de giro.
- El campo de excitación es independiente, la corriente que circula por el devanado es
- La variación en la resistencia R_e , permite la variación del campo aplicado al inducido.
- El flujo magnético ϕ es directamente proporcional a la corriente del inductor I_f .
- El par T_d es proporcional al producto entre la corriente de armadura y el flujo magnético.

El motor presenta las siguientes ecuaciones características:

$$U_a = e + R_a i_a + L_a \frac{di_a}{dt} \quad (2.1)$$

$$T_d = J \frac{d\omega}{dt} + B\omega + T_L \quad (2.2)$$

Para régimen permanente

$$U_a = e + R_a I_a \quad (2.3)$$

$$I_L = I_a \quad (2.4)$$

Además se tiene que:

$$e = k \phi \omega \quad (2.5)$$

luego,

$$U_a = k \phi \omega + I_a R_a \quad (2.6)$$

Puesto que,

$$T_d = k_t \phi I_a \quad (2.7)$$

$$\omega = \left[\frac{U_a}{k\phi} \right] - \left[\frac{R_a T_d}{k k_t \phi^2} \right] \quad (2.8)$$

$$T_d = B\omega + T_L \quad (2.9)$$

$$P_d = T_d \omega \quad (2.10)$$

Donde **B** es la constante de la fricción viscosa (unidades: N.m.(rad/s)⁻¹), ω velocidad angular del motor (unidades: rad/s), T_L par motor de la carga (unidades: N.m), P_d Potencia desarrollada por el motor (unidades: w), T_d par desarrollado por el motor (unidades: N.m), **k** (unidades: V.Wb⁻¹.(rad/s)⁻¹) es la constante de tensión del motor y k_t (unidades: N.m.Wb⁻¹.A⁻¹) es la constante de par motor, en el sistema de unidades SI, estos dos parámetros **k** y k_t , son iguales numéricamente.

2.2 Motor de Corriente Continua en Derivación Paralelo Shunt

El esquema del circuito representativo del motor de corriente continua en Derivación Paralelo Shunt es mostrado en la figura 2.3. Se observa en la figura la similitud con el motor de corriente continua de excitación independiente, por ello, se deduce que el comportamiento de ambas máquinas sean similares. En este motor la armadura (inducido) y el armazón (las piezas polares) se conectan en paralelo o derivación a la tensión de alimentación.

Para la figura 2.3 se determinan las siguientes relaciones:

-La tensión en las escobillas del motor U_a , es la tensión de alimentación U_L .

-La corriente que ingresa a la armadura I_a , es la diferencia de la corriente de carga I_L con la corriente que ingresa al campo de excitación I_f

-La fuerza contraelectromotriz e , es dependiente de la velocidad del motor y del campo de excitación ($k \phi \omega$).

-La variación en la resistencia R_e , permite la variación del campo aplicado al inducido.

-El flujo magnético ϕ es directamente proporcional a la corriente del inductor I_f .

-El par T_d es proporcional al producto entre la corriente de armadura y el flujo magnético.

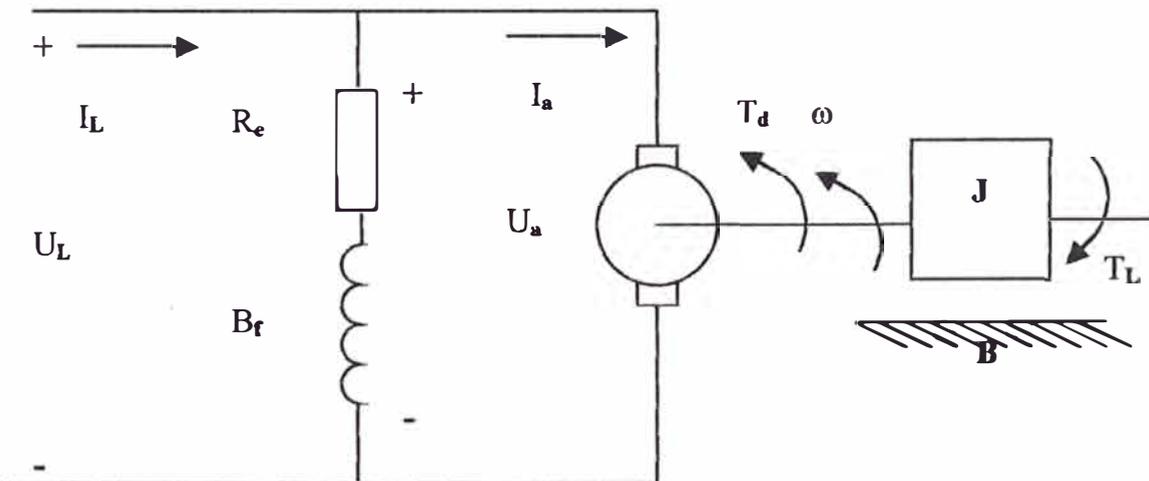


Figura 2.3 Esquema del circuito representativo del Motor de Corriente

Continua en Derivación Paralelo Shunt

El motor presenta las siguientes ecuaciones características:

Para régimen permanente:

$$I_L = I_a + I_f \quad (2.11)$$

Además, de manera similar al motor de excitación independiente se cumplen las ecuaciones (2.5), (2.6) y (2.7):

Ecuación (2.5)

$$e = k \phi \omega \quad (2.12)$$

Ecuación (2.6):

$$U_a = k \phi \omega + I_a R_a \quad (2.13)$$

Y la ecuación (2.7):

$$T_d = k_t \phi I_a \quad (2.14)$$

$$\omega = \left[\frac{U_a}{k \phi} \right] - \left[\frac{R_a T_d}{k k_t \phi^2} \right] \quad (2.15)$$

2.3 Motor de corriente continua Serie

El esquema del circuito representativo del motor de corriente continua Serie es mostrado en la figura 2.4. Se observa en la figura, al devanado de campo de excitación conectado en serie con el circuito del inducido. En el circuito la tensión de alimentación se distribuye al devanado de excitación y al devanado de la armadura.

Para la figura 2.4 se determinan las siguientes relaciones:

- La tensión en las escobillas del motor U_a , es la diferencia de tensión de alimentación U_L con la caída de tensión representada en el campo de excitación en serie U_s ,
- La corriente que ingresa a la armadura I_a , es la corriente de carga I_L
- La fuerza contraelectromotriz e , es dependiente de la velocidad del motor y del campo de excitación ($k \phi \omega$).
- El campo de excitación esta en serie con la armadura, y la corriente que circula por el devanado de excitación es la corriente de carga I_L .

-La variación en la resistencia R_e , permite la variación del campo aplicado al inducido.

-El flujo magnético ϕ es directamente proporcional a la corriente del inductor I_a .

-El par T_d es proporcional al producto entre la corriente de armadura y el flujo magnético.

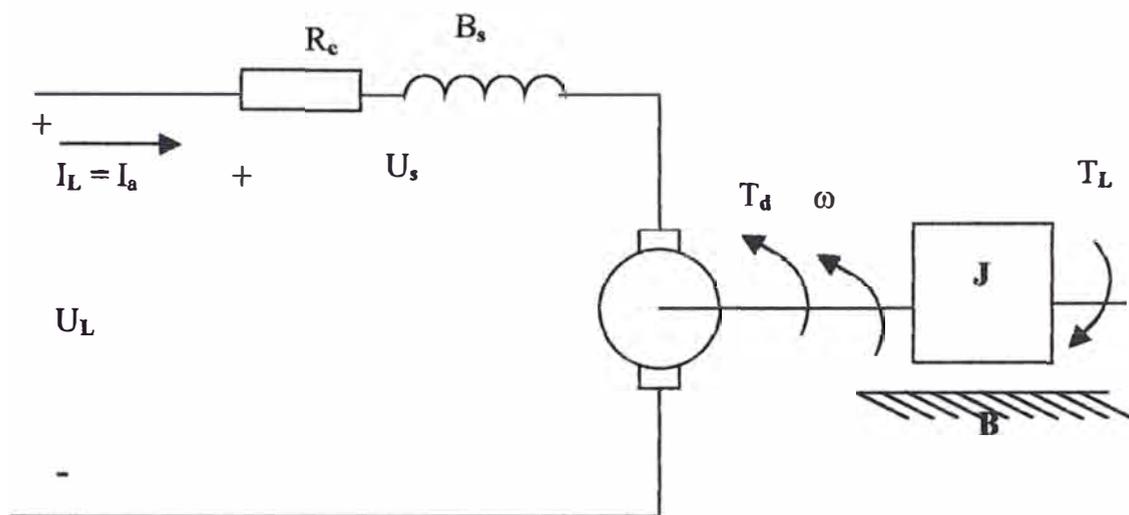


Figura 2.4 Esquema de excitación del Motor de Corriente Continua Serie

El motor presenta las siguientes ecuaciones características:

Para régimen permanente:

$$U_L = e + I_a R_a + I_a R_f \quad (2.16)$$

$$I_L = I_a = I_f \quad (2.17)$$

Además se tiene que:

$$e = k \phi \omega \quad (2.18)$$

luego,

$$U_L = k \phi \omega + I_a R_a + I_a R_f \quad (2.19)$$

Puesto que,

$$T_d = k_t \phi I_a \quad (2.20)$$

$$\phi = c I_a \quad (2.21)$$

$$T_d = k_t c (I_a)^2 \quad (2.22)$$

$$I_a = \sqrt{\left(\frac{T_d}{k_t c}\right)} \quad (2.23)$$

$$\omega = \left[\frac{U_L k_t^{1/2}}{k c^{1/2}} \right] \times \left[\frac{1}{T_d^{1/2}} \right] - \left[\frac{R_a + R_f}{k c} \right] \quad (2.24)$$

Donde k es la constante de tensión del motor (unidades: $V \cdot Wb^{-1} \cdot (rad/s)^{-1}$), k_t (unidades: $N \cdot m \cdot Wb^{-1} \cdot A^{-1}$) es la constante de par motor, en el sistema de unidades SI, estos dos parámetros k y k_t , son iguales numéricamente, c (unidades: $Wb \cdot A^{-1}$) es la constante de proporcionalidad aplicado al tramo lineal de la curva de magnetización previa a la saturación.

2.4 Motor de Corriente Continua Compuesto

El esquema del circuito representativo del motor de corriente continua de excitación compuesto es mostrado en la figura 2.5. Se observa en la figura, la distribución de los circuitos de campo los cuales están conectados en serie y en paralelo con la armadura (el motor presenta campo en derivación y campo en serie).

Para la figura 2.5 se determinan las siguientes relaciones:

- La tensión en las escobillas del motor U_a , es la diferencia de la tensión de alimentación U_L con la caída representada en el campo de excitación en serie U_s .
- La corriente que ingresa a la armadura I_a , es la diferencia de la corriente de carga I_L con la corriente que ingresa al campo de excitación I_f

-La fuerza contraelectromotriz e , es dependiente de la velocidad del motor y del campo de excitación ($k \phi \omega$).

-El par T_d es proporcional al producto entre la corriente de armadura y la combinación de los campos magnéticos de excitación, generados por el devanado en serie y el devanado en paralelo.

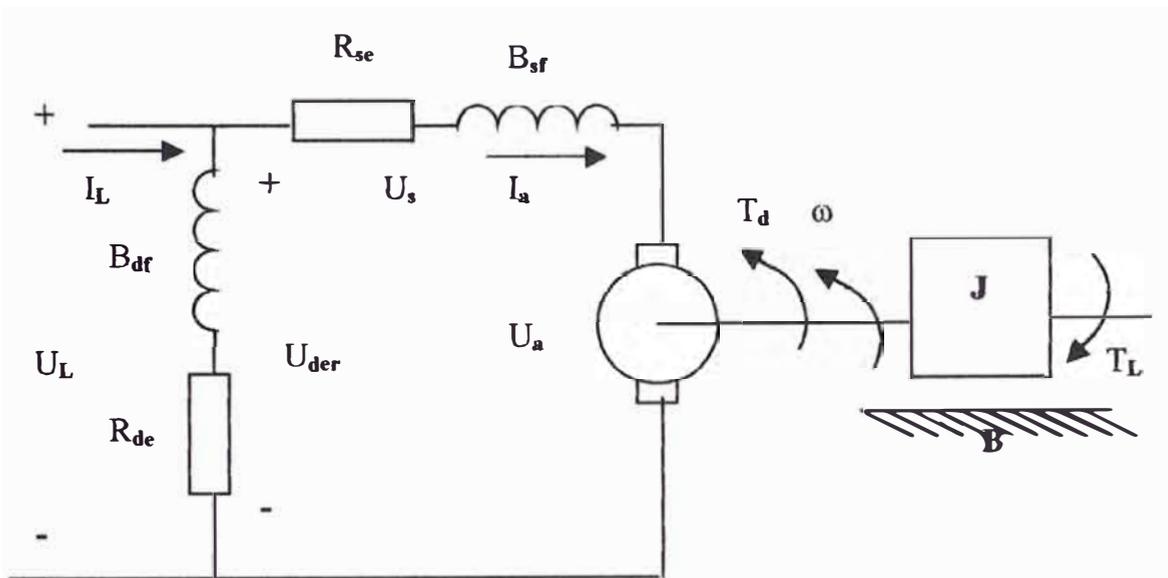


Figura 2.5 Esquema de excitación del Motor de Corriente Continua Compuesto

El motor presenta las siguientes ecuaciones características:

Para régimen permanente (para conexión derivación larga):

$$U_L = e + I_a R_a + I_a R_{sf} \quad (2.25)$$

$$I_L = I_a + I_{der} \quad (2.26)$$

Además se tiene que la fuerza magnetomotriz en el motor está dada por:

$$I_{\text{der}} = \left[\frac{U_L}{R_{\text{dr}}} \right] \quad (2.27)$$

$$e = k (\phi_{\text{dr}} \pm \phi_{\text{sr}}) \omega \quad (2.28)$$

$$T_d = k_t (\phi_{\text{dr}} \pm \phi_{\text{sr}}) I_a \quad (2.29)$$

$$\omega = \left[\frac{U_a}{k (\phi_{\text{dr}} \pm \phi_{\text{sr}})} \right] - \left[\frac{R_a T_d}{k k_t (\phi_{\text{dr}} \pm \phi_{\text{sr}})^2} \right] \quad (2.30)$$

La proporción entre los circuitos (circuito serie y circuito paralelo) determinará si la característica del motor tiende más hacia el tipo serie o hacia el tipo derivación. La proporción del flujo total producida por el campo en serie determina el grado de combinación (compounding), el cual puede variarse hasta obtener la característica deseada. Un campo en serie fuerte hará que la característica de la máquina se asemeje a la del motor serie, mientras que un campo débil hará que se asemeje al motor derivación.

Se presentan dos tipos de motores de corriente continua compuesto: uno es el motor de corriente continua Compuesto Acumulativo y el otro el motor Compuesto Diferencial

2.5 Motor de Corriente Continua de Imán Permanente

El esquema del circuito representativo del motor de corriente continua de imán permanente es similar al motor de excitación independiente (figura 2.2), pero a diferencia de este último, los polos están hechos de imanes permanentes y no tienen circuito de campo externo (no tienen devanados de campo), por ello estos motores pueden ser pequeños comparados con los motores en derivación, son en su mayoría

motores de potencia de caballaje fraccional y subfraccional. Al no existir devanado de campo, la alimentación se conecta únicamente a las escobillas para la armadura o rotor.

- La tensión en las escobillas del motor U_a , es la tensión de alimentación U_L .

-La corriente que ingresa a la armadura I_a , es la corriente de carga I_L .

-La fuerza contraelectromotriz e , es dependiente de la velocidad del motor y del campo de excitación constante ($k \phi \omega$).

-El par T_d es proporcional al producto entre la corriente de armadura y el campo magnético de excitación generado por el imán permanente.

El motor presenta las siguientes ecuaciones características:

Para régimen permanente:

$$U_L = e + R_a I_a \quad (2.31)$$

$$I_L = I_a \quad (2.32)$$

Además se tiene que:

$$e = k \phi \omega \quad (2.33)$$

luego,

$$U_L = k \phi \omega + I_a R_a \quad (2.34)$$

Puesto que,

$$T_d = k_t \phi I_a \quad (2.35)$$

$$\omega = \left[\frac{U_a}{k \phi} \right] - \left[\frac{R_a T_d}{k k_t \phi^2} \right] \quad (2.36)$$

Estos motores se encuentran limitados, por que los imanes permanentes no pueden producir tan alta densidad de flujo, además al darse un excesivo aumento de la

corriente de armadura por encima del nominal se corre el riesgo de la desmagnetización.

CAPÍTULO III

CARACTERÍSTICAS DE OPERACIÓN DEL MOTOR DE CORRIENTE CONTINUA

CONTINUA

3.1 Típico Funcionamiento del Motor de Corriente Continua

Se describe el procedimiento común para el arranque y puesta en marcha del motor de corriente continua:

Se aplica a los bornes del inducido (armadura) una tensión U_a para provocar la rotación del inducido, en los devanados del inducido circulará la corriente de arranque quien al encontrarse en un medio donde existe un campo magnético (campo de excitación generado por el inductor) producirá una fuerza electromagnética F , esta fuerza es normal al campo magnético y a la corriente del devanado del inducido. La acción de F y su distancia (distancia radial al eje de rotación) producirá la rotación del inducido, el sentido de giro que toma depende del sentido de la corriente en los devanados del inducido. Una vez que empieza a girar el inducido se genera una tensión inducida e (también llamado fuerza contraelectromotriz), este nuevo voltaje es opuesto en la dirección al voltaje en los bornes que se aplica al inducido, la e aumenta proporcionalmente al crecimiento de la velocidad angular ω (e puede llegar

a obtener valores de hasta el 95 % de la tensión de alimentación U_L , luego el motor alcanzará sus valores nominales para su normal funcionamiento. La corriente entonces es pequeña, y la velocidad del motor permanecerá constante.

Normalmente los motores de potencia inferior a 1 / 2 HP consumen poca corriente en el arranque, por ello pueden ser conectados directamente a la plena tensión de la red de alimentación, en los motores de mayor caballaje se exige hacer el arranque a tensión reducida.

Cuando el inducido está parado, no tiene prácticamente resistencia, y si se aplica el voltaje de funcionamiento normal, se producirá una gran corriente, que podría dañar el conmutador y las bobinas de la armadura, en el arranque pueden obtenerse corrientes de hasta 10 veces el valor de la corriente nominal, esto se debe a que las características de diseño del motor presentan como elemento limitador de la corriente a la resistencia del inducido R_a , y que en condiciones normales la caída de tensión de esta resistencia solo representa a no más del 15% de U_a , por ello la necesidad de colocar en serie una resistencia de arranque de gran potencia para obtener corrientes de arranque del orden de 1,5 veces la corriente nominal. Luego a medida que el motor se va acelerando, esta resistencia se elimina gradualmente, permitiendo el incremento de la corriente I_a y del par T_d hasta alcanzar las condiciones nominales. Paralelamente se manifiesta el incremento en la velocidad lo que provoca el aumento del voltaje inducido, luego el motor alcanzará sus valores nominales, resultando la corriente del inducido pequeña, y la velocidad del motor constante siempre que el motor no esté bajo carga y tenga que realizar otro trabajo mecánico que no sea el requerido para mover al inducido.

Bajo carga, la armadura gira más lentamente, reduciendo el voltaje inducido y permitiendo que fluya una corriente mayor en la armadura. El motor puede así recibir más potencia eléctrica de la fuente, suministrándola y haciendo más trabajo mecánico.

3.2 El Régimen Permanente Estacionario

3.2.1 Característica par - velocidad

Las características estáticas son muy útiles para resolver una serie de problemas que van desde la selección de una máquina hasta el cálculo de puntos de operación, pasando por el análisis cualitativo de propiedades de regulación (regulación de velocidad, regulación debido a la carga, regulación debida al sobrecalentamiento, etc). Son curvas provistas por los fabricantes, caso contrario pueden obtenerse ensayando las máquinas y midiendo valores de régimen permanente (estáticas). Tomemos las ecuaciones representativas obtenidas como resultado del capítulo anterior para determinar el par y la velocidad:

$$\omega = \left[\frac{U_a}{k\phi^*} \right] - \left[\frac{R_a T_d}{k k_f (\phi^*)^2} \right] \quad (3.1)$$

Donde: ϕ^* representa en los motores de corriente continua derivación y serie como un solo flujo de excitación, y para los motores compound representa la combinación de dos flujos; para el caso del motor compound serie aditiva los flujos se suman, y para compound serie diferencia los flujos se restan uno del otro. Al flujo de excitación del devanado en derivación (flujo prácticamente constante) se resta el flujo de excitación del devanado serie (flujo variable, depende de I_a)

R_a^{**} representa en los motores derivación la resistencia del devanado del inducido, pero en los motores serie y compound, representa la suma de la resistencia del devanado del inducido con la resistencia del devanado del campo de excitación serie. En la expresión (3.1), los parámetros ϕ^* y U_a son constantes, entonces se determina que la curva típica de los motores será de curva de pendiente negativa, pero en el caso del motor de corriente continua de excitación serie es una curva tipo inversa (ver expresión (2.24) del capítulo anterior). En la figura 3.1 se muestra las curvas características de par – velocidad de los motores de corriente continua.

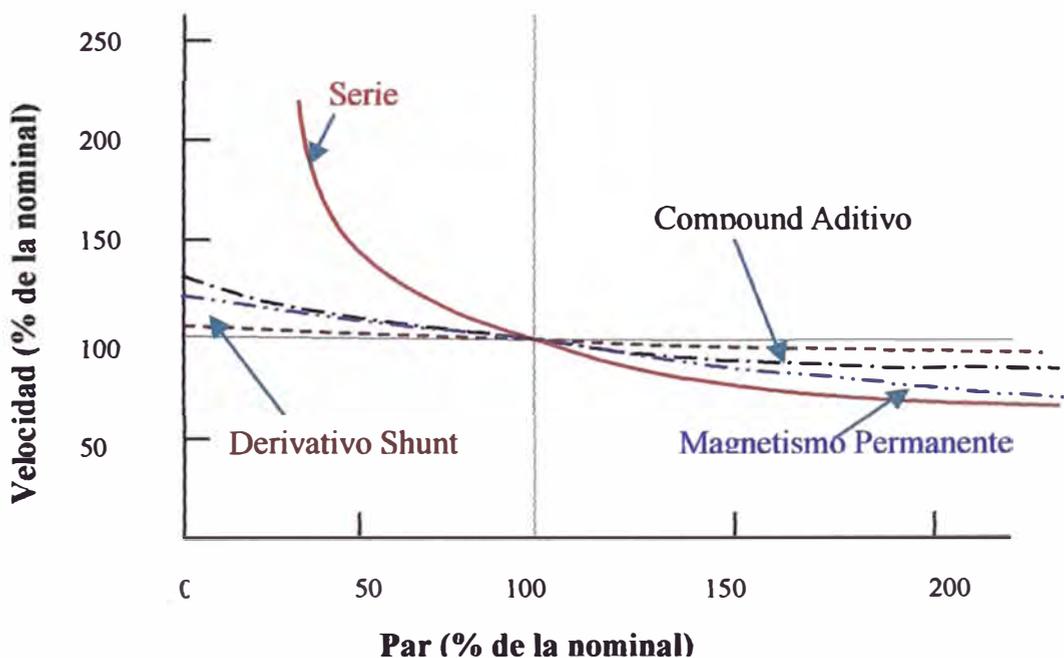


Figura 3.1 Curvas par – velocidad de motores de corriente continua

Los motores de corriente continua que accionan máquinas operadoras deben superar el par antagónico impuesto por el proceso de trabajo, roces y otras influencias. Siendo el par de giro desarrollado por el motor superior en todo instante al momento antagónico durante la marcha acelerada. Es necesario para el comienzo del arranque que el motor supere el par de roce en parado de todo el accionamiento y el par necesario para que la máquina operadora empiece a funcionar. Se muestra en la tabla 3.1 ejemplos de par para diferentes tipos de arranque de máquinas operadoras.

Tabla 3.1. Arranque de Maquinas Operadoras

Clase de arranque	Valor del par antagónico	Ejemplos	Curva Característica de la figura 3.2
Arranque en vacío	Par antagónico reducido, puesto que la carga se aplica terminado el periodo de aceleración	Torno, compresoras de émbolos con arranque sin carga, prensas, estampadoras	3
Arranque bajo carga	El par nominal crece con la velocidad al máximo valor	Ventiladores con carga, turbobombas, turbocompresores.	2
	Par antagónico constante, del orden del par nominal	Elevadores, bombas Arranque bajo carga, cintas de transporte	1
Arranque pesado	El par antagónico o par de aceleración necesario es muy superior al par nominal	Trenes de laminación, molinos de bolas, calandrias, centrífugas.	---

En la figura 3.2 se muestran las curvas características del par antagónico – velocidad de las máquinas operadoras (cargas típicas) según tipo de arranque, las curvas que se

muestran han sido designadas del siguiente modo: arranque a plena carga (1), arranque con carga y par de giro creciendo al cuadrado (2) y arranque sin carga (3).

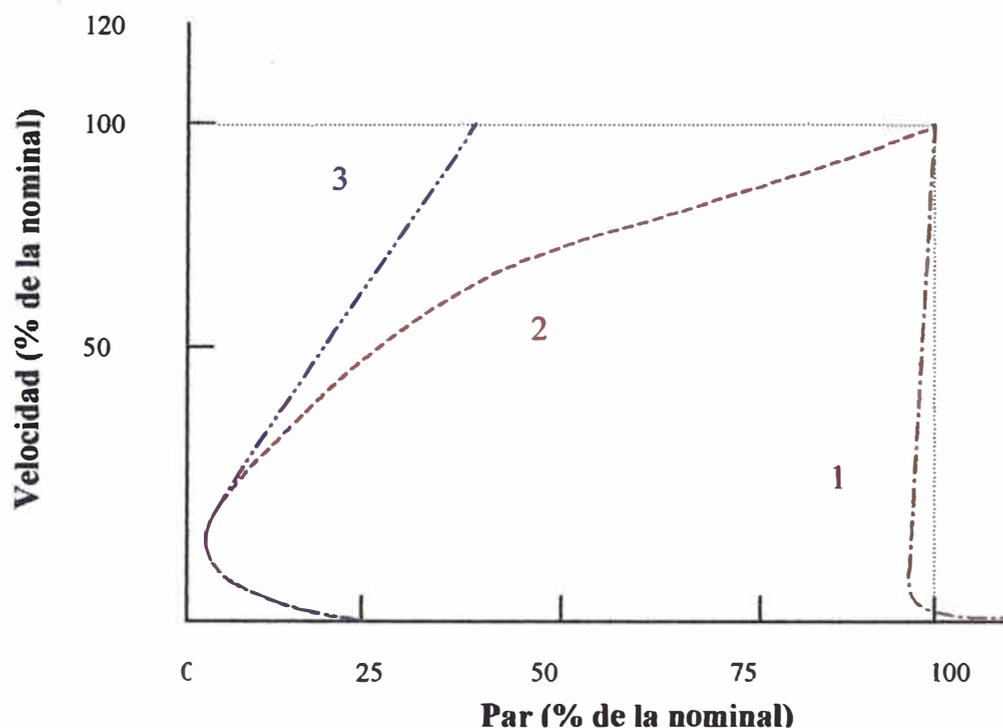


Figura 3.2 Curvas par – velocidad en el arranque de cargas típicas

El cambio de velocidad de un motor se relaciona principalmente con la resistencia ohmica de los devanados, con el efecto de la carga aplicada y la temperatura sobre el flujo magnético producido, la variación de velocidad desde la carga nominal a la carga vacío expresada en tanto por ciento de la velocidad nominal, se denomina regulación de velocidad; el cambio de velocidad se debe a las características intrínsecas del motor al ser modificada la carga o la temperatura de operación, la magnitud de la regulación indica que tan empinada es la pendiente de la curva par de la carga – velocidad, ese determina que para un motor de corriente continua una regulación de la velocidad positiva significa que la velocidad del motor disminuye

con el aumento de la carga (el par y la carga son relacionados proporcionalmente) y

Una regulación negativa significa que la velocidad aumenta al aumentar la carga.

Regulación de la velocidad se define como:

$$\text{Regulación de Velocidad} = \left(\frac{\omega_{n1} - \omega_n}{\omega_n} \right) \times 100 \% \quad (3.2)$$

Los motores en derivación pueden clasificarse como de velocidad bastante constante, con regulación de velocidad es buena (un tanto por ciento pequeño), para el caso del motor serie y compound aditivo tienen regulación variable (valor más alto) y el motor compound diferencial su regulación de velocidad es negativa. Ahora la aparición de la reacción del inducido es un efecto interno del motor que puede afectar la forma de la curva par – velocidad. Si el motor presenta reacción del inducido, el efecto de debilitamiento de flujo reduce el flujo en la máquina a medida que aumenta la carga. La reducción del flujo aumenta la velocidad del motor, a cualquier carga dada, más allá de la velocidad a la que podría girar si no se presentara la reacción del inducido, haciendo al motor susceptible al embalamiento. Por ello es necesario la presencia en el motor del de anado de compensación, este permitirá obtener flujo constante, pues no presentará los problemas de debilitamiento de flujo en la máquina.

En lo referente a la regulación debido al calentamiento se considera la elevación de temperatura en el devanado de excitación a medida que el motor adquiera su temperatura normal de funcionamiento. Esta elevación provoca el aumento de la resistencia del devanado lo cual reduce el flujo de excitación, ocasionando que el

motor adquiera mayor velocidad a medida que se eleve la temperatura en el devanado.

3.2.2 Característica Velocidad vs. Flujo de Excitación

Dado que el flujo se modifica sólo cuando se quiere operar en Régimen Permanente Estacionario en la zona de potencia constante, es interesante graficar esta dependencia en las condiciones de tal régimen: U_a e I_a ; son constantes. Para esto, se debe de considerar la expresión siguiente (para el caso del motor de excitación independiente o shunt), para el circuito equivalente del inducido (armadura) se tiene la siguiente expresión:

$$\omega = \left[\frac{U_a}{k\phi^*} \right] - \left[\frac{R_a^{**} I_a}{k\phi^*} \right] \quad (3.3)$$

La expresión (3.3) la llamaremos Ecuación fundamental de la velocidad de un motor de corriente continua. Con ayuda de esta ecuación podemos determinar el comportamiento de la velocidad del motor ante las variaciones de flujo de excitación, para el caso del aumento del flujo de excitación la velocidad disminuye y para cuando el flujo se aproxime a cero la velocidad aumenta peligrosamente (el motor se embalara) y puede propiciar la destrucción del motor.

3.3 Región Admisible de Operación en Régimen Permanente Estacionario

En general las máquinas son dimensionadas para que puedan ser operadas permanentemente a potencia nominal, la cual está determinada por los límites de la sollicitación térmica a que pueden ser sometidas sus diferentes partes, especialmente

el colector, las escobillas y la aislación de los arrollamientos. La viabilidad del punto de operación deseado se determina sobre la gráfica “Región Admisible de Operación en Régimen Permanente Estacionario. La figura 3.3 muestra la curva característica par – velocidad en operación permanente, de la figura se observa que a velocidades inferiores a la velocidad nominal el par es constante, y con velocidades superiores a la nominal el par es variable y disminuye a medida que aumenta la velocidad.

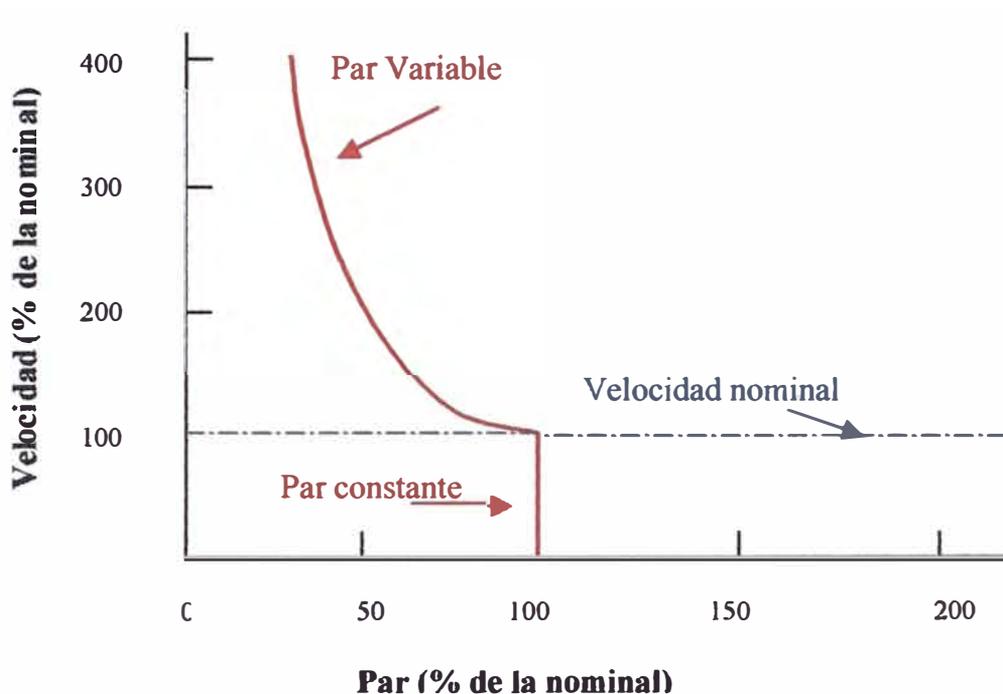


Figura 3.3 Curvas par – velocidad de motores de corriente continua en operación permanente

La figura 3.4 muestra la curva característica potencia – velocidad en operación permanente, de la figura se observa que a velocidades inferiores a la velocidad nominal la potencia es variable y disminuye conforme disminuye, y con velocidades

superiores a la nominal la potencia es constante. La figura 3.5 muestra las características par y potencia de cargas típicas.

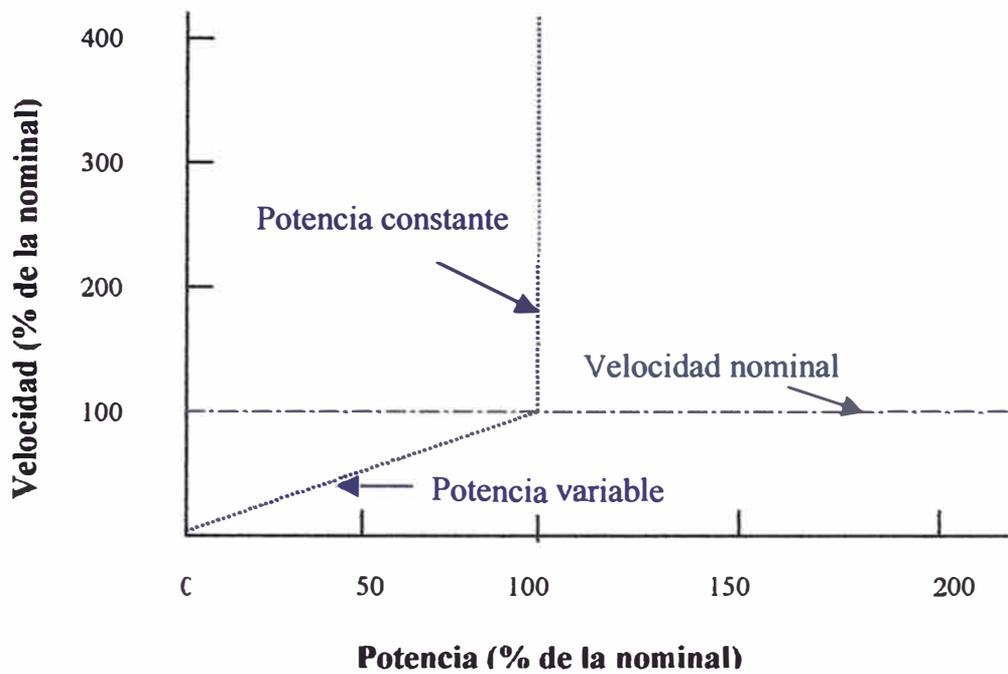


Figura 3.4 Curvas par – velocidad de motores de corriente continua

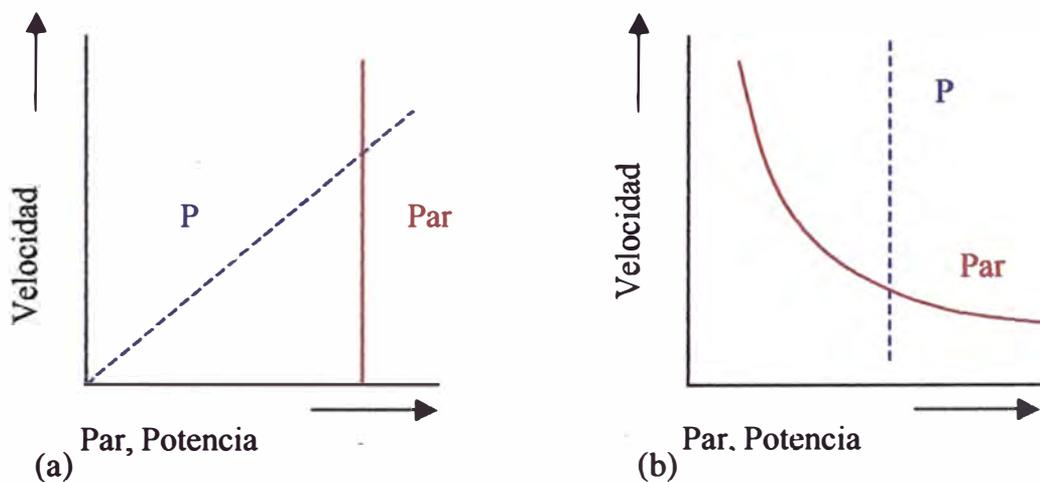


Figura 3.5 Par y Potencia necesaria P en función de la velocidad,

(a) para ventilador y (b) para devanadora

La tabla 3.2 muestra algunas cargas típicas que operan a par constante o a potencia constante.

Tabla 3.2 Cargas típicas que operan con Par constante o Potencia constante

Cargas de Par constante	Cargas de Potencia constante
Transportadores	Tornos
Malacates	Estiradores de alambre
Grúas	Enrolladoras
Escaleras eléctricas	Taladros
Elevadores	

3.4 Arranque del Motor de Corriente Continua

Para el motor de excitación shunt, se analiza el arranque hasta llegar a la velocidad nominal, se consideran un reóstato de arranque R_{arranq} y los parámetros ϕ , U_L y M_s constantes, además la inductancia del arrollamiento del inducido es nula, con estas condiciones, las ecuaciones durante el periodo de arranque son las siguientes:

Del capítulo II, adaptamos las ecuaciones (2.13), (2.2) y (2.7), y se obtiene:

$$U_L = k_1 \omega + i_a (R_{arranq} + R_a) \quad (3.4)$$

$$T_d = J \frac{d\omega}{dt} + M_s \quad (3.5)$$

$$T_d = k_2 i_a \quad (3.6)$$

Luego igualando las ecuaciones (3.5) con (3.6), y despejando i_a :

$$i_a = \frac{1}{k_2} \left(J \frac{d\omega}{dt} + M_s \right) \quad (3.7)$$

Luego en la ecuación (3.4), reemplazando $(R_{arranq} + R_a)$ por R y dividiendo ambos miembros de la ecuación por k_1 , se obtiene:

$$\frac{U_L}{k_1} = \omega + \frac{JR}{k_1 k_2} \frac{d\omega}{dt} + \frac{M_s R}{k_1 k_2} \quad (3.8)$$

La ecuación (3.8) tiene la forma de:

$$\omega_\bullet = \omega + T_M \frac{d\omega}{dt} + \Delta\omega_s \quad (3.9)$$

Donde:

$$\omega_0 = \frac{U_L}{k_1} \quad ; \text{velocidad de giro del motor durante la marcha en vacío ideal.}$$

$$\Delta\omega_s = \frac{M_s R}{k_1 k_2} \quad ; \text{diferencia de velocidades en carga}$$

$$T_M = \frac{JR}{k_1 k_2} = \frac{J\omega_0}{M_{cc}} \quad ; \text{constante de tiempo electromagnético}$$

La constante de tiempo electromagnética es el tiempo durante el cual el momento de inercia habría pasado sin carga desde el estado de reposo a la velocidad en vacío ideal ω_0 , bajo la acción de un par constante igual al par de cortocircuito M_{cc} . El valor de la constante de tiempo electromagnético no depende de la carga.

La ecuación (3.9) se puede expresar de la forma siguiente:

$$\frac{d\omega}{dt} + \frac{\omega}{T_M} = \frac{\omega_\bullet - \Delta\omega_s}{T_M} \quad (3.10)$$

La solución de la ecuación diferencial es:

$$\omega = \omega_0 - \Delta\omega_s + (\omega_{mic} - \omega_s) e^{-t/T_M} \quad (3.11)$$

Para $t = 0$ el valor inicial de la velocidad $\omega = \omega_{mic}$ y ω_s es la velocidad de giro permanente del motor.

En la ecuación (3.11), para el arranque con carga desde la parada, se tiene:

$$\omega = \omega_s \left(1 - e^{-t/T_M} \right) \quad (3.12)$$

En la ecuación (3.11), para el arranque en vacío, se tiene:

$$\omega = \omega_0 \left(1 - e^{-t/T_M} \right) \quad (3.13)$$

En la figura 3.6 se muestra el arranque del motor shunt en carga (curva 1) para la ecuación (3.12) y en vacío (curva 2) para la ecuación (3.13).

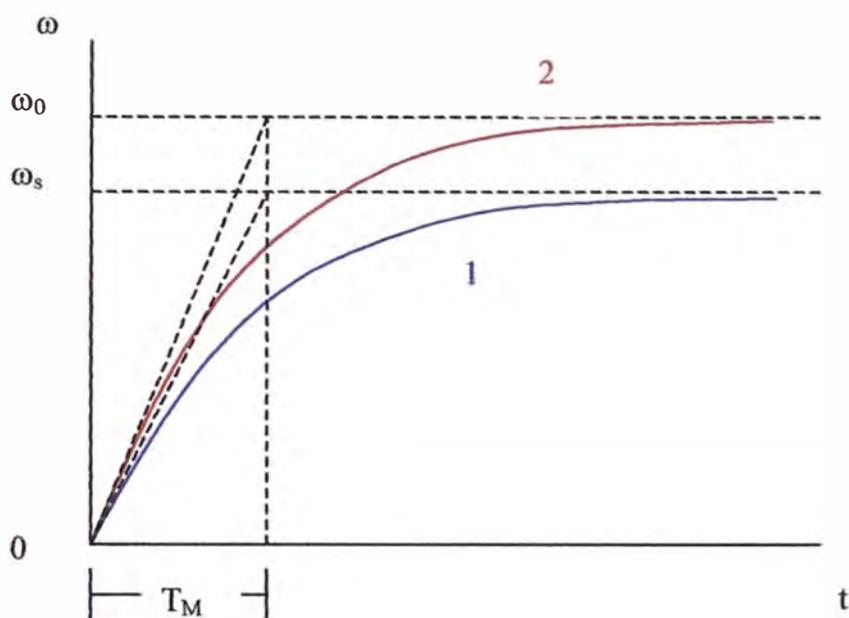


Figura 3.6 Curva de arranque del motor shunt en carga (1) y en vacío (2).

3.5 Funcionamiento de los Motores de Imán Permanente.

Sabemos que el campo de excitación se genera mediante imanes permanentes, estos imanes normalmente son de aleaciones especiales como Alnico o samario-cobalto. Además, en el caso de algunos motores, para disminuir la inercia que poseería un

rotor bobinado, que es el inducido, se construye este mediante una serie de espiras serigrafiadas en un disco plano.

Los motores pequeños pueden ser arrancados en forma directa. Inicialmente los imanes permanentes establecen un campo de excitación estable casi independiente de la temperatura, se logra una magnetización total, luego la alimentación es conectada únicamente a las escobillas. para la armadura al aumentar la tensión del inducido le corresponde el aumento de la velocidad del motor. Si el motor está alimentado a tensión constante, se puede aumentar la velocidad disminuyendo el flujo de excitación mediante impulsos de corriente, para generar estos impulsos se utiliza un equipo magnetizante.

En el caso de marcha en vacío, se utiliza para ajustar la velocidad, con tolerancia de menos del 1%, mientras que bajo carga, inicialmente se magnetiza totalmente, y luego regula la velocidad con impulsos finos de desmagnetización.

Las velocidades de rotación que se consiguen con estos motores son del orden de 1000 a 3000 r.p.m. con un comportamiento muy lineal y bajas constantes de tiempo.

Las potencias que pueden manejar pueden llegar a los 10KW.

3.6 Limitaciones en la Operación de los Motores de Corriente Continua

Las máquinas eléctricas de corriente continua, en general, están limitadas principalmente en sus prestaciones por los siguientes factores:

- a. Calentamiento máximo admisible impuesto por las normas en función de la clase de aislamiento.
- b. Inducciones en las distintas partes del circuito magnético.
- c. Tensión máxima entre delgas del colector.

d. Tensión de reactancia (inducida en la espira que conmuta)

Muchos son los problemas difíciles que han tenido que encarar los constructores, también para ellos la disponibilidad de los modernos medios de cálculo (computadoras y programas) ha permitido importantes avances en los proyectos, y en particular para los estudios de campos y otros problemas muy complejos que se presentan.

Por ejemplo se ha recurrido a la utilización de programas de cálculo para:

- a. Determinar el comportamiento de la tensión de reactancia inducida en la espira en conmutación.
- b. Determinar la forma de la expansión polar del polo auxiliar o de conmutación de manera de lograr realizar una compensación de la tensión de reactancia lo más perfecta posible.
- c. Investigar la forma de ranura del rotor que haga mínima la tensión de reactancia.
- d. Determinar el perfil de la expansión del polo principal, para hacer despreciable la distorsión del flujo causado por la reacción del inducido y por lo tanto limitar la tensión máxima entre las delgas del colector para cada condición de funcionamiento.

El principal requisito que debe satisfacer un moderno motor es su completa adaptabilidad para ser alimentado con rectificadores y la posibilidad de regulación por medio de dispositivos electrónicos.

Como es bien conocido, las características principales de la alimentación con convertidores a tiristores son:

- a. la existencia en la corriente de una componente ondulada con una armónica fundamental de frecuencia elevada.
- b. Una gran rapidez de respuesta del sistema, es decir, los modernos reguladores electrónicos, para controlar la velocidad de los motores, imponen en régimen transitorio variaciones de corriente di/dt muy elevadas.

La ondulación de la corriente genera pulsaciones de flujo que provocan vibraciones de la estructura mecánica y por lo tanto un aumento del rumor producido; además un calentamiento general más elevado debido al aumento de las pérdidas óhmicas y la presencia de pérdidas adicionales en el hierro, y especialmente una degradación de la conmutación.

Las pulsaciones de flujo, en efecto, generan corrientes parásitas en la carcasa y en los polos auxiliares, determinando un amortiguamiento del campo de los polos auxiliares y un defasaje del mismo respecto a la corriente de la armadura.

Si la máquina se alimenta con corriente continua pura es posible compensar perfectamente la tensión de reactancia con los polos auxiliares, en cambio con una corriente ondulada, (alterna superpuesta a la continua) este equilibrio no se logra, ya que aparece superpuesto el fenómeno de inducción de corriente alterna (variable) y que no se puede compensar.

Para mejorar la conmutación es indispensable reducir las corrientes parásitas. Este resultado se puede obtener realizando el circuito magnético completamente laminado (yugo estático y eventualmente polos auxiliares) y previendo para la carcasa una solución que ofrezca todas las garantías funcionales y que contemporáneamente resulte industrialmente válida en términos de costo.

El motor de corriente continua presenta el inconveniente del obligado mantenimiento de las escobillas. Por otra parte, no es posible mantener el par con el rotor parado más de unos segundos, debido a los calentamientos que se producen en el colector.

Para evitar estos problemas, se han desarrollado en los últimos años motores sin escobillas. En estos, los imanes de excitación se sitúan en el rotor y el devanado de inducido en el estator, con lo que es posible convertir la corriente mediante interruptores estáticos, que reciben la señal de conmutación a través de un detector de posición del rotor.

3.7 Modos de Operación de los Motores de Corriente Continua

En las aplicaciones de velocidad variable, un motor de corriente continua puede operarse en uno o más modos, uno de ellos es por medio de los cuatro cuadrantes.

3.7.1 Cuatro Cuadrantes

El análisis se presenta para un motor de corriente continua de excitación independiente. En la figura 3.7 se muestra la operación en cuatro cuadrantes del motor de Corriente Continua de Excitación Independiente. A continuación se describe brevemente las características de cada cuadrante.

Como **motor hacia delante** (Cuadrante I) U_a , e y I_a son todos positivos, también son positivos en este cuadrante el par motor (T_d) y la velocidad (ω).

Durante el **frenado directo o hacia adelante** (Cuadrante II) el motor opera en dirección directa y la fuerza contraelectromotriz inducida (e) permanecerá positiva.

Para que el par motor sea negativo y se invierta la dirección del flujo de energía, La

corriente de armadura deberá ser negativa. El voltaje de alimentación debe conservarse inferior a e .

Como **motor en reversa (Cuadrante III)**, U_a , e y I_a son todos negativos, en este cuadrante también el par motor y la velocidad son negativos. Para conservar negativo el par motor y el flujo de energía de la fuente al motor, la fuerza contraelectromotriz e debe satisfacer la condición $|U_a| > |e|$.

Durante el **frenado en reversa (Cuadrante IV)**, el modo de girar en dirección inversa. U_a , e permanecen negativos, para que el par motor sea positivo y la energía fluya del motor a la fuente, la corriente de la armadura debe ser positiva. La fuerza contraelectromotriz inducida e debe satisfacer la condición $|U_a| < |e|$.

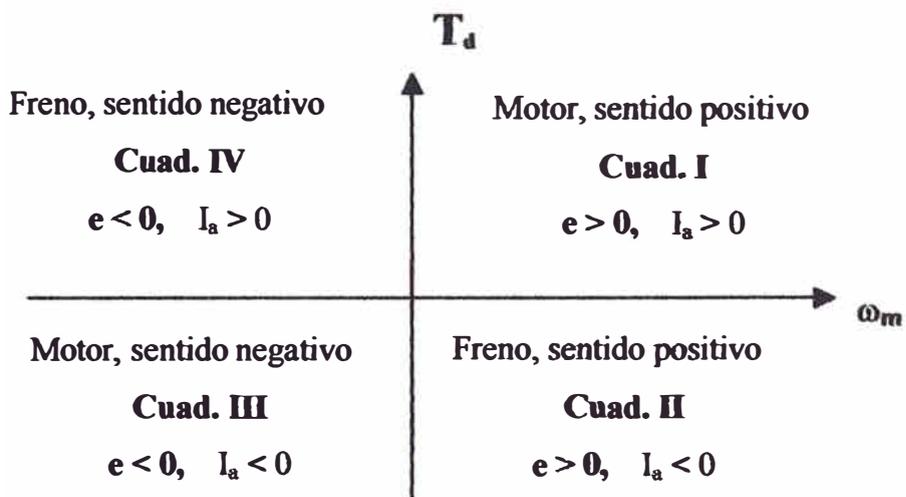


Figura 3.7 Operación en cuatro cuadrantes del motor de Corriente Continua de Excitación Independiente

CAPÍTULO IV
METODOLOGÍAS DE CONTROL DE LOS MOTORES DE CORRIENTE
CONTINUA

En el presente capítulo describiremos los métodos de control usados normalmente en los motores de corriente continua en régimen permanente, estos métodos son los siguientes:

1. Control por efecto del campo de Inducción (control de excitación)
2. Control por efecto de la tensión de armadura (control de Inducido)
3. Control por efecto de la combinación del control de excitación y control de Inducido

La posibilidad de variación de la velocidad se deduce de las expresiones siguientes validas para el régimen permanente:

Del capítulo III, de la ecuación (3.3), obtenemos:

$$\omega = \left[\frac{U_a}{k\phi^*} \right] - \left[\frac{R_a^{**} I_a}{k\phi^*} \right] \quad (4.1)$$

Para el par T_d :

$$T_d = k \phi^* I_a \quad (4.2)$$

Del capítulo II, se tiene las ecuaciones (2.15), (2.24) y (2.30), las mismas que permiten determinar la velocidad para los motores de corriente continua:

Para los motores de excitación independiente, shunt y de imán permanente:

$$\omega = \left[\frac{U_a}{k\phi} \right] - \left[\frac{R_a T_d}{k k_t \phi^2} \right] \quad (4.3)$$

Motor serie:

$$\omega = \left[\frac{U_L k_t^{1/2}}{k c^{1/2}} \right] \times \left[\frac{1}{T_d^{1/2}} \right] - \left[\frac{R_a + R_f}{k c} \right] \quad (4.4)$$

Motor compuesto

$$\omega = \left[\frac{U_L}{k(\phi_{df} \pm \phi_{sf})} \right] - \left[\frac{(R_a + R_{sf}) T_d}{k k_t (\phi_{df} \pm \phi_{sf})^2} \right] \quad (4.5)$$

De las ecuaciones anteriores se determina la velocidad angular, la misma que está en función de la tensión del inducido U_a (en el caso del motor serie y compuesto, se corrige por la tensión de alimentación), de la resistencia del inducido R_a , el par desarrollado por el motor T_d y del flujo ϕ . El control de la velocidad del motor se rige por la variación de estos parámetros.

4.1 Control por Efecto de Campo de Inducción

También llamado control a través del campo de excitación o control de excitación, se basa en el debilitamiento del campo producido por el inductor, este tipo de control permite variar la velocidad y el par en función del flujo de excitación. Esta variación normalmente se logra añadiendo una resistencia de ajuste (resistencia de campo) al circuito de campo de excitación, para de esta forma controlar la corriente de campo y con ello el flujo aplicado al inducido, también, se puede controlar a través de circuitos con dispositivos electrónicos; en máquinas normales se permite un debilitamiento de campo máximo hasta de aproximadamente el 50%. Durante la aplicación de este control la potencia del motor permanece prácticamente constante, mientras la capacidad para desarrollar par en forma continua disminuirá a medida que se incremente la velocidad.

A continuación se describe el control por efecto del campo de inducción del motor de corriente continua de excitación independiente y paralelo shunt:

Del capítulo II, se tiene las siguientes ecuaciones:

Ecuaciones (2.1), (2.5) y (2.7):

$$U_a = e + R_a i_a + L_a \frac{di_a}{dt} \quad (4.6)$$

$$e = k \phi \omega \quad (4.7)$$

$$T_d = k_t \phi I_a \quad (4.8)$$

De la figura 2.2, del circuito de excitación, se deducen las siguientes expresiones:

$$I_f = \frac{U_f}{R_f + R_e} \quad (4.9)$$

$$\phi = k_f I_f \quad (4.10)$$

Donde: U_f es la tensión de alimentación del circuito de excitación, I_f es la corriente de campo de excitación, R_f es la resistencia del devanado de campo, R_e es la resistencia variable del campo de excitación, k_f es la constante de proporcionalidad (unidades: $\text{Wb}\cdot\text{A}^{-1}$), k es la constante de tensión del motor, k_t es la constante de par motor.

De la ecuación (4.6), despejando I_a , para régimen permanente:

$$I_a = \frac{U_a - e}{R_a} \quad (4.11)$$

$$\omega = \frac{U_a - R_a I_a}{k k_f I_f} \quad (4.12)$$

$$\omega = \left[\frac{U_a}{k \phi} \right] - \left[\frac{R_a}{k_f^2 \phi^2} \right] \times T_a \quad (4.13)$$

Donde: k_f es la constante de proporcionalidad de campo, k es una constante que depende del número de conductores de la armadura y del tipo de devanado (sí la velocidad tuviera unidades de r.p.m. se añadiría una constante que dependería del número de polos); y $k_t = k \times k_f$

El comportamiento Causa – Efecto del método de control, es descrito brevemente de la forma siguiente:

1. El aumento de R_e causa una disminución de I_f (ecuación 4.9)
2. Ante la disminución de I_f , disminuye ϕ .(ecuación 4.10)
3. La disminución de ϕ , provoca disminución de e (ecuación 4.7).
4. La disminución de e , provoca gran aumento de I_a (ecuación 4.11).

5. El aumento de I_a incrementa T_d (ecuación 4.8), a saberse, con el cambio de I_a predominante sobre el cambio en el flujo.
6. El aumento de T_d , hace a $T_d > T_L$ y aumenta ω (rotor acelera).
7. El aumento de ω aumenta otra vez e (ecuación 4.7).
8. El aumento de e disminuye I_a . (ecuación 4.11)
9. La disminución de I_a reduce T_d hasta que $T_d = T_L$ a una velocidad mayor a ω .

Así pues, una disminución de la corriente de excitación I_f , provoca una disminución en el flujo ϕ , y por lo tanto, disminuye el par T_d aumentando ω . Es decir, la velocidad aumenta en relación inversa con la corriente de campo. Además, el efecto de aumentar la resistencia de campo, implica la disminución del flujo en la máquina, con ello la velocidad del motor en vacío aumenta y provoca que la pendiente de la curva par – velocidad se incline más, esta característica se deduce de la ecuación (4.13) de pendiente negativa. Si se encontrase a muy bajas velocidades, un aumento en la resistencia del campo disminuirá realmente la velocidad del motor. Este efecto ocurre por que a muy bajas velocidades, el aumento en la corriente del inducido ocasionado por la disminución de e no es suficientemente grande para compensar la disminución de flujo en la ecuación del par inducido. Cuando el efecto de disminución de flujo es mayor que el efecto producido por el aumento en la corriente del inducido, el par inducido se reduce y el motor disminuye su velocidad.

De este tipo de control se obtienen velocidades superiores a la velocidad en régimen permanente, pero no ofrece una gama amplia de variación de velocidad (se tiene de 1:3 hasta 1:4) puesto que se encuentran dificultades en el dimensionado del motor y una mayor influencia de la reacción del inducido; tiene la ventaja que su control se

efectúa con corrientes pequeñas por lo que el equipo es más económico que el equivalente con control de inducido (sea de la tensión o de la corriente).

La regulación de la velocidad por efecto del campo de inducción a potencia constante, es empleado preferentemente para máquinas herramientas de accionamiento principal (ver tabla 3.2), con la capacidad productiva de virutas como tornos, taladros, etc.

En el caso del motor de corriente continua en serie, el flujo depende de la corriente del inducido. Ahora bien en el motor serie puede variarse también la velocidad, aquí el debilitamiento del campo se logra con resistencias en paralelo con el devanado de campo, y el refuerzo del campo por resistencias en derivación paralelas al devanado del inducido.

4.2 Control por Efecto de Tensión de Armadura

Es un método de control simple y el más utilizado, consiste en el cambio del voltaje aplicado al inducido del motor sin cambiar el voltaje aplicado al campo (constante), este control permite una rápida regulación de la velocidad manteniendo el par constante. Para el control se recurre normalmente a circuitos con dispositivos electrónicos; durante la aplicación de este control el par desarrollado por el motor permanece constante, mientras que la potencia del motor decrece en forma proporcional a la disminución de la velocidad (se entiende, que la velocidad como punto de partida es la velocidad en régimen permanente).

A continuación se describe el control por efecto de la tensión de armadura del motor de corriente continua de excitación independiente y paralelo shunt:

De la ecuación (4.6), para régimen permanente:

$$U_a = e + R_a i_a \quad (4.14)$$

De la ecuación (4.14), despejando I_a :

$$I_a = \frac{U_a - e}{R_a} \quad (4.15)$$

De la ecuación (4.7):

$$e = k_\phi \omega \quad (4.16)$$

De la ecuación (4.8)

$$T_d = k_{t\phi} I_a \quad (4.17)$$

De ecuación (4.12):

$$\omega = \frac{U_a - R_a I_a}{k_\phi} \quad (4.18)$$

Cuando el flujo ϕ es constante, se tiene las siguientes constantes de proporcionalidad:

$$k_\phi = k \phi \text{ y } k_{t\phi} = k_t \phi.$$

El comportamiento Causa – Efecto del método de control, es descrito brevemente de la forma siguiente:

1. Disminución de U_a disminuye I_a (ecuación 4.15).
2. La disminución de I_a disminuye T_d (ecuación 4.17).
3. La disminución de T_d hace que $T_d < T_L$, y disminuye ω (rotor decelera).
4. La disminución de ω disminuye e (ecuación 4.16)
5. La disminución de e hace que aumente I_a , una pequeña disminución de e tiene mayor efecto sobre I_a (ecuación 4.15).

6. El aumento de I_a aumenta a T_d (ecuación 4.17), hasta que $T_d = T_L$ a una menor velocidad de ω .

De la expresión (4.18) se deduce que el modo más simple de regular la velocidad de un motor es variando la tensión de armadura debido a que la velocidad de un motor de corriente continua es directamente proporcional a ella. También, si aumentamos la tensión de armadura y mantenemos el flujo, la velocidad del motor puede incrementarse continuamente desde el reposo hasta alcanzar la velocidad nominal. Este control permite mantener el par desarrollado constante (a corriente de armadura constante) mientras no se varíe la corriente de campo y consecuentemente el flujo.

Permite con facilidad regular la velocidad del motor para velocidades inferiores a la nominal pero no para velocidades por encima de ella. Para alcanzar una velocidad mayor que la nominal mediante el control por voltaje inducido, se requeriría excesivo voltaje en el inducido y podría dañarse el circuito.

La gama de valores disponibles con este método de control es más amplia que en el caso anterior, se tiene valores de 10:1, y sus efectos sobre la potencia y par son opuestos a los observados para el control por efecto de campo inductor.

El cambio en la tensión de armadura debe ser hacia abajo desde el valor nominal, por lo que el ajuste de velocidad será también hacia abajo desde el valor nominal.

En el funcionamiento por encima de la velocidad base existe límites mecánicos y eléctricos que no deben ser superados por problemas estructurales, o de conmutación

Es conveniente señalar que la velocidad mínima es establecida por el aumento de temperatura alcanzado por el motor, y dependerá en gran parte del sistema de enfriamiento empleado.

La regulación de velocidad por efecto de la tensión del inducido (armadura) a par constante, es empleado preferentemente para máquinas herramientas de accionamientos de avance, para arranque y frenados controlados (ver tabla 3.2).

4.3 Control por Efecto de la Combinación de Campo de Inducción y Tensión de Armadura

Cabe indicar que las dos técnicas de control mencionadas anteriormente son complementarias. El control de voltaje del inducido funciona bien para velocidades inferiores a la nominal; la resistencia de campo o control por corriente de campo, funciona bien para velocidades por encima de la nominal. Al trabajar en forma mixta combinando las dos técnicas de control en el mismo motor, es posible obtener un rango de variación de velocidad de hasta de 40:1 o más. Los motores de corriente continua en derivación tienen excelentes características de control de velocidad.

La figura 4.1, muestra la característica par – velocidad del método combinado, se observa que al utilizarse el método por control de armadura, la potencia varía y el par obtenido del motor es constante, la variación de la velocidad del motor comprende desde la velocidad nominal a velocidades mínimas. En el caso del control por campo de excitación, la potencia se mantiene constante y el par varía con variación de velocidad del motor que comprende de la velocidad nominal a las altas velocidades.

4.4 Otra Forma de Variar la Velocidad de los Motores de Corriente Continua.

La velocidad de los motores de corriente continua (motor de corriente continua de excitación independiente, shunt o compuestos) se puede variar también cambiando la resistencia del inducido.

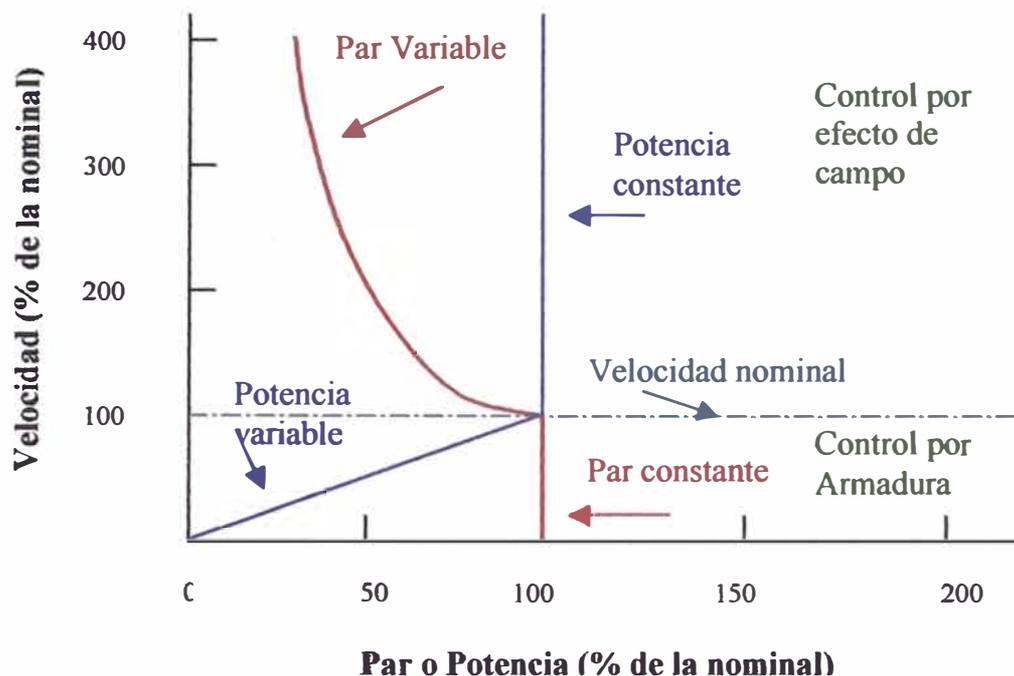


Figura 4.1 Zonas de aplicación para el método combinado de control de tensión de armadura y control por campo de inductor

La inserción de resistencias en el inducido produce el aumento drástico de la pendiente de la característica par – velocidad del motor que lo hace operar con más lentitud si es cargado. Este método es costoso y por ello se aplica en situaciones en que el motor operara la mayor parte del tiempo a plena velocidad o en aplicaciones tan baratas que no implican el empleo de una forma mejor de controlar la velocidad. Debe tenerse precaución de que no se desconecte el circuito de campo de un motor del tipo derivación cuando funciona sin carga.

La velocidad del motor de corriente continua serie puede variarse punteando todo el devanado de campo, poniendo en cortocircuito solo algunas de sus espiras, o

agregando resistencia extra en uno u otro, o ambos circuitos de campo y de armadura.

Para las máquinas de corriente continua se define una velocidad nominal, que corresponde a una condición de funcionamiento en la cual la máquina entrega potencia y par nominales.

Una forma de control de velocidad diferente lo experimenta el motor de corriente continua sin escobillas. En este motor, el rotor es de imanes permanentes, y en el estator se encuentran los devanados, estos últimos producirán el campo magnético necesario que hará girar al rotor. Para controlar la velocidad en el motor de corriente continua sin escobillas, se utiliza conmutación electrónica.

La forma en que es generado el movimiento del rotor es el siguiente: en el estator se tienen tres bobinas que se encuentran geométricamente distanciadas una de la otra, al energizar la primera bobina, se produce un polo de polaridad opuesta al imán permanente del rotor, haciendo que el rotor se atraiga hacia la posición angular de la bobina energizada, pero al aproximarse el rotor a esa posición el sistema electrónico desconecta la primera bobina y energiza la segunda bobina permitiendo que continúe el sentido de giro adoptado, luego del mismo modo se repite en la segunda bobina lo ocurrido con la primera bobina y se energizará la bobina 3, manteniendo el sentido de giro adoptado. Normalmente para el control del motor, se cuenta con sensores e interruptores que permitan energizar secuencialmente cada uno de los devanados del estator.

4.5 Forma de Controlar el Motor de Corriente Continua de Imán Permanente

Los motores de imán permanente tienen los imanes en el estator, produciendo un campo magnético constante ϕ .

Para régimen permanente:

De la ecuación (4.14)

$$U_a = e + R_a i_a \quad (4.19)$$

De la ecuación (4.16):

$$e = k_E \omega \quad (4.20)$$

De la ecuación (4.17):

$$T_d = k_T I_a \quad (4.21)$$

Donde: $k_T = k_t \phi$ y $k_E = k_e \phi$

Tenemos la expresión siguiente:

$$\omega_m = \frac{1}{K_E} \left(U_a - \frac{R_a}{K_T} T_d \right) \quad (4.22)$$

Esta expresión puede visualizarse en la siguiente figura.4.2, a medida que aumenta el par, la característica par – velocidad para una tensión U_a es esencialmente vertical, excepto por la caída de tensión que se produce en la resistencia de armadura R_a , la disminución de velocidad es muy pequeña para motores de corriente continua, aunque puede ser sustancial en servomotores. Lo importante es que la característica (línea recta) varía al cambiar la tensión aplicada U_a ; en consecuencia, la velocidad de una carga arbitraria puede ser regulada controlando U_a , esta característica lineal, proporciona excelentes prestaciones dinámicas a un accionamiento con un motor de corriente continua.

El motor de corriente continua de imán permanente tiene flujo fijo, lo que no hace posible el control de velocidad variando la velocidad a través del flujo de campo. Por ello los métodos aplicables para estos motores son los de voltaje del inducido y del control de la resistencia del inducido.

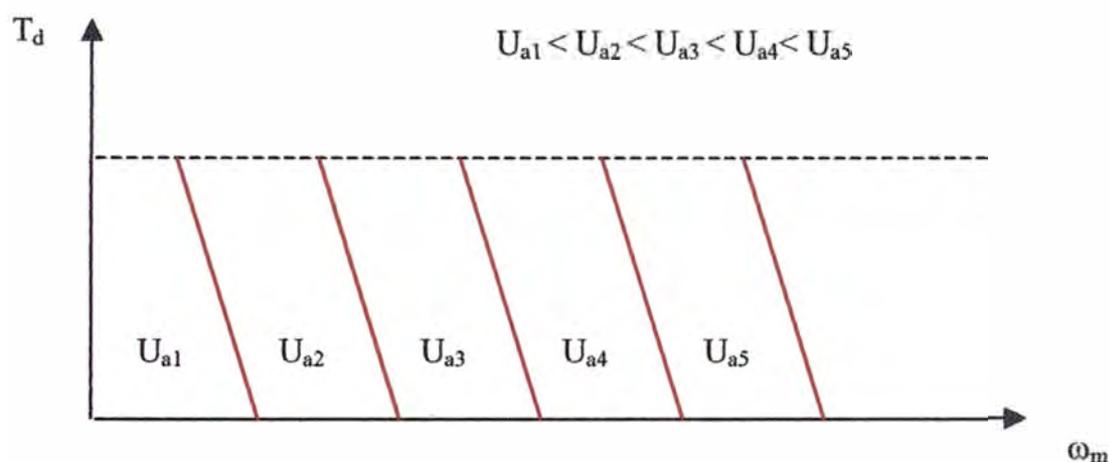


Figura 4.2 Características par – velocidad de un motor de corriente continua de imanes permanentes.

4.6 Participación de los Dispositivos Electrónicos en el Control de los Motores de Corriente Continua

El principal requisito que debe satisfacer un moderno motor es su completa adaptabilidad para ser alimentado con rectificadores y la posibilidad de regulación por medio de dispositivos electrónicos. Entre estos dispositivos se encuentra el tiristor, que puede actuar como interruptor, rectificador, amplificador y regulador de señales, la utilización de tiristores permite obtener un sistema excelente para el control o ajuste de la velocidad de los motores de corriente continua. También, en el caso de no contar con fuente de alimentación en continua, normalmente se requiere

utilizar convertidores a tiristores, que permitan transformar la alimentación de corriente alterna en corriente continua.

CAPÍTULO V

APLICACIÓN DE CONTROL A LOS MOTORES DE CORRIENTE CONTINUA

Este capítulo muestra varios ejemplos de aplicación de motores de corriente continua que son normalmente controlados por dispositivos electrónicos, tales ejemplos son de interés didáctico mostrando la manera de controlar los motores, resulta entonces, que no se pretende hacer cálculos demostrativos.

Los ejemplos de aplicación comprenden el análisis teórico del control de motores para un brazo de robot, el carro de transporte de minerales en mina, el corazón artificial, cañón antiaéreo de fragata de mar y circuitos electrónicos de control de pequeños motores de imán permanente.

5.1 Ejemplo de Aplicación de Control: Movimiento de Brazo de Robot.

Este ejemplo muestra la aplicación de las variables de transferencia al control del motor de corriente continua de imán permanente, para ello se ha recurrido a un extracto del informe de control de movimiento del robot Andes I.

El presente ejemplo muestra un esquema de control desacoplado para el movimiento del robot, desarrollado mediante la utilización de variables de transferencia que

relaciona las variables de cada una de las 6 articulaciones. Las articulaciones son independientes unas de otras, considerándose un servosistema por cada articulación, para poder efectuar las tareas programadas por el usuario, es necesario ajustar las variables de control del sistema mediante la realimentación de los parámetros del mismo.

Para la aplicación sólo se analiza la función de transferencia para un servomecanismo, en este caso el motor 1. La figura 5.1 muestra la estructura articular del robot de seis grados de libertad.

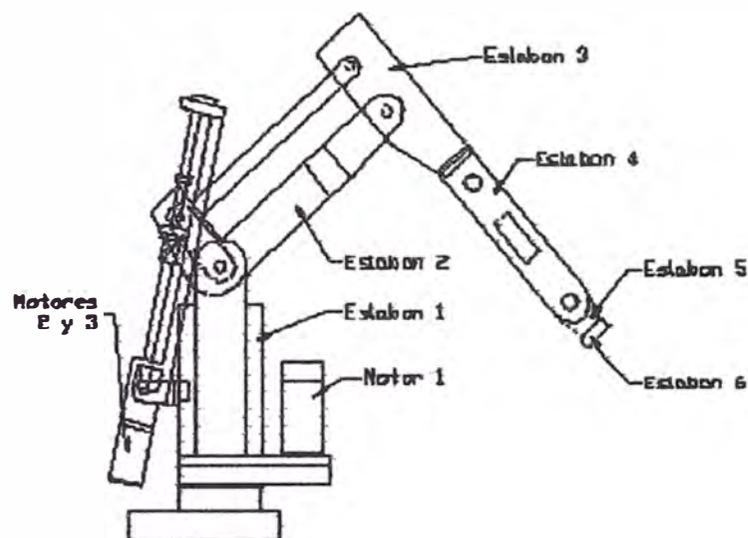


Figura 5.1. Estructura articular del robot Andes I.

5.1.1 Control Desacoplado

Esta estrategia de control es seleccionada, dado que se tienen altas reducciones en la transmisión del movimiento. Esto es un requisito indispensable para este esquema, ya que el efecto de los demás eslabones es tomado como una perturbación del sistema.

De este modo la dinámica no lineal del mecanismo articulado se refleja débilmente como carga de los actuadores. Cada articulación resultará perturbada por el resto de la estructura a través de los denominados pares de perturbación.

Se emplean los motores de corriente continua de imán permanente para la maniobrabilidad del robot, siendo controlados electrónicamente, y para realizar operaciones repetitivas, en la figura 5.2 se representa al motor y el conjunto de elementos a controlar en el manipulador.

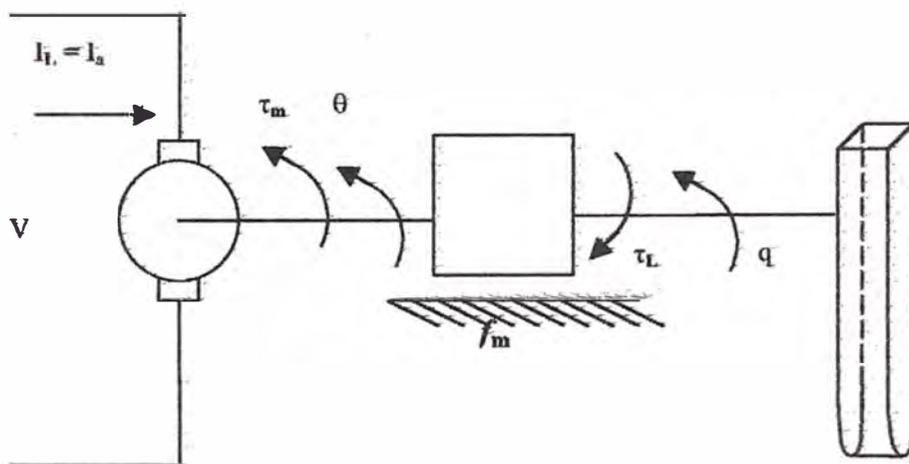


Figura 5.2. Esquema del motor de corriente continua con acople de la articulación robótica.

De la figura 5.2, se tiene:

θ : posición angular del eje motor

q : posición angular de la articulación robótica

r : relación de reducción de la transmisión mecánica

- τ_m : par en el eje del motor
- τ_l : par de carga en el eje de la articulación
- K_a : constante de par del motor
- R_a : resistencia de armadura del motor
- L_a : inductancia de armadura del motor
- K_b : constante de fuerza contraelectromotriz del motor
- i_a : corriente de armadura del motor
- e_b : fuerza contraelectromotriz del motor o tensión inducida
- v : tensión de armadura del motor tensión en bornes del motor
- J_m : momento de inercia del motor y el reductor
- f_m : fricción del motor y el reductor

Para obtener las funciones de transferencia de cada una de las articulaciones es necesario partir del circuito de un motor de corriente continua al cual se le aplica una carga.

Aplicando leyes de Kirchhoff se tiene:

$$V_{(t)} = R_a i_a + L_a \frac{di_a}{dt} + e_b \quad (5.1)$$

$$e_b = K_b \frac{d\theta}{dt} \quad (5.2)$$

$$\theta = r q \quad (5.3)$$

$$\tau_m = K_a i_a \quad (5.4)$$

Donde: $K_a = K_t \phi$

En la ecuación (5.1) se aplica la transformada de Laplace, obteniendo:

$$V_{(s)} = R_a I_{a(s)} + L_a I_{a(s)} S + K_b \theta_{(s)} S \quad (5.5)$$

De la ecuación (5.5), se despeja $I_{a(s)}$:

$$I_{a(s)} = \frac{V_{(s)} - K_b \theta_{(s)} S}{R_a + L_a S} \quad (5.6)$$

El par desarrollado por el motor es igual a la suma de los pares disipados por el motor y su carga reflejado en el eje del motor.

$$\tau_{(t)} = \tau_{m(t)} + \tau_{L(t)}^* \quad (5.7)$$

$$\tau_{m(t)} = J_m \frac{d^2 \theta}{dt^2} + f_m \frac{d\theta}{dt} \quad (5.8)$$

$$\tau_{l(t)} = J_L \frac{d^2 q_L}{dt^2} + f_L \frac{dq_L}{dt} \quad (5.9)$$

El trabajo realizado por la carga respecto a su eje es igual al trabajo realizado por la carga referido al eje del motor, por lo tanto:

$$\tau_{L(t)}^* = \frac{\tau_{l(t)}}{r} \quad (5.10)$$

$$\tau_{L(t)}^* = \frac{1}{r} \left(J_L \frac{d^2 q_L}{dt^2} + f_L \frac{dq_L}{dt} \right) \quad (5.11)$$

$$\frac{d^2 q_L}{dt^2} = \frac{1}{r} \frac{d^2 \theta}{dt^2}, \quad \frac{dq_L}{dt} = \frac{1}{r} \frac{d\theta}{dt} \quad (5.12)$$

$$\tau_{L(t)}^* = \frac{1}{r} \left(J_L \frac{1}{r} \frac{d^2 \theta}{dt^2} + f_L \frac{1}{r} \frac{d\theta}{dt} \right) \quad (5.13)$$

$$\tau_{L(t)}^* = \frac{1}{r^2} \left(J_L \frac{d^2 \theta}{dt^2} + f_L \frac{d\theta}{dt} \right) \quad (5.14)$$

Reemplazando las ecuaciones (5.8) y (5.13) en la ecuación de (5.7), se tiene:

$$\tau_{(t)} = \left(J_m + \frac{J_L}{r^2} \right) \frac{d^2\theta}{dt^2} + \left(f_m + \frac{f_L}{r^2} \right) \frac{d\theta}{dt} \quad (5.15)$$

$$\tau_{(t)} = J_{\text{eff}} \frac{d^2\theta}{dt^2} + f_{\text{eff}} \frac{d\theta}{dt} \quad (5.16)$$

Aplicando la transformada de Laplace en la ecuación (5.16), se tiene:

$$T_{(s)} = S^2 J_{\text{eff}} \theta_{(s)} + S f_{\text{eff}} \theta_{(s)} \quad (5.17)$$

Se sustituye la ecuación (5.6) en la transformada de Laplace de la ecuación (5.4), obteniendo:

$$T_{(s)} = K_a \left[\frac{V_{(s)} - k_b \theta S}{R_a + L_a S} \right] \quad (5.18)$$

Aunque en términos funcionales, la constante del par K_a y la constante de fuerza contraelectromotriz K_b , los mismos que por tratarse del motor de imán permanente, se tiene campo de excitación constante, son parámetros independientes para un motor dado, sus valores están íntimamente relacionados. Para mostrar esta relación, se parte de la potencia P desarrollada en la armadura del motor, así:

$$P = e_{b(t)} i_{a(t)} \text{ Watt} \quad (5.19)$$

La potencia P mecánica se expresa como:

$$P = \tau_{m(t)} \omega_{m(t)} \text{ Watt} \quad (5.20)$$

Al sustituir las ecuaciones (5.2) y (5.4) en las ecuaciones (5.19) y (5.20) respectivamente, e igualando las potencias, se obtiene:

$$K_a = K_b \quad (5.21)$$

Sin embargo, esta igualdad no se aplica, porque a partir de los datos del fabricante se conocen sus respectivos valores.

Igualando las ecuaciones (5.17) y (5.18), se obtiene la función de transferencia que relaciona la salida angular del motor θ y el voltaje V aplicado en los terminales del mismo, así:

$$\frac{\theta(s)}{V(s)} = k_a \left[\frac{1}{(R_a + L_a S) \left(S^2 J_{\text{eff}} + S f_{\text{eff}} + \frac{k_a k_b S}{R_a + S L_a} \right)} \right] \quad (5.22)$$

El diagrama de bloques correspondiente para esta función de transferencia es el mostrado en la Figura 5.3.

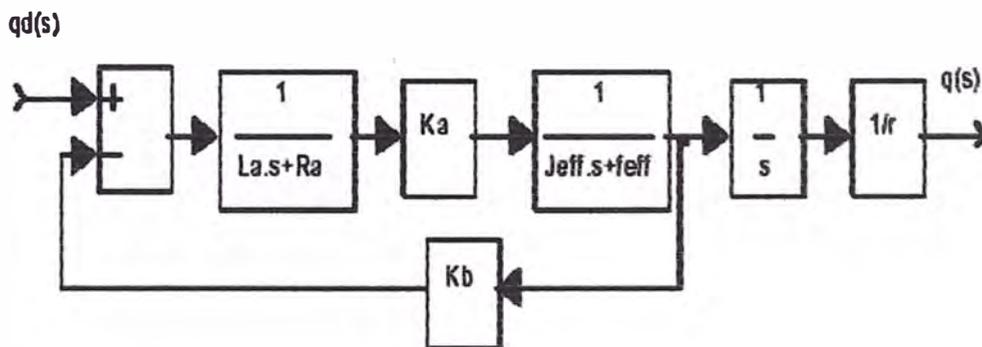


Figura 5.3. Diagrama de Bloques de una Articulación.

Se desprecia el efecto de la inductancia L_a y la ecuación (5.22) se convierte en:

$$\frac{\theta(s)}{V(s)} = k_a \left[\frac{1}{S(SJ_{\text{eff}} R_a + f_{\text{eff}} R_a + k_a k_b)} \right] \quad (5.23)$$

Como la salida del sistema de control es el desplazamiento angular de la articulación $q_L(s)$, se utiliza el equivalente en transformada de Laplace, para relacionar la posición angular de la articulación con la tensión del inducido del motor.

Reemplazando la ecuación (5.3) en la ecuación (5.23) se obtiene lo siguiente:

$$\frac{q_{L(s)}}{V_{(s)}} = \left(\frac{k_a}{r} \right) \left[\frac{1}{S(SJ_{\text{eff}} R_a + f_{\text{eff}} R_a + k_a k_b)} \right] \quad (5.24)$$

5.1.2 Controlador Posicional para una Articulación.

El objetivo de un controlador posicional es regular el motor de manera que el desplazamiento angular actual de la articulación siga al desplazamiento angular deseado especificado por una trayectoria preplanificada. La tensión aplicada es linealmente proporcional al error entre el desplazamiento angular deseado y actual de la articulación:

$$V_{(t)} = K_p e_{(t)} r = K_p [q_{L^d(t)} - q_{L(t)}] r \quad (5.25)$$

Donde: K_p es ganancia de realimentación de la posición (unidades: V/rad), $q_{L^d(t)}$ es posición deseada en la articulación, $q_{L(t)}$ es la posición real de la articulación y $e_{(t)} = q_{L^d(t)} - q_{L(t)}$ es el error del sistema.

Aplicando la transformada de Laplace en la ecuación (5.25), se tiene:

$$V_{(s)} = \mathcal{L} \{ K_p e_{(t)} r \} = K_p [q_{L^d(s)} - q_{L(s)}] r \quad (5.26)$$

Reemplazando la ecuación (5.26) en la ecuación (5.24), se obtiene:

$$\frac{q_{L(s)}}{q_{L^d(s)} - q_{L(s)}} = k_a k_p \left[\frac{1}{S(SJ_{\text{eff}} R_a + f_{\text{eff}} R_a + k_a k_b)} \right] \quad (5.27)$$

$$\frac{q_{L(s)}}{q_{L^d(s)}} = \left[\frac{k_a k_p}{J_{\text{eff}} R_a} \right] \left[\frac{1}{S^2 + \left(S \frac{f_{\text{eff}} R_a + k_a k_b}{J_{\text{eff}} R_a} + \frac{k_a k_p}{J_{\text{eff}} R_a} \right)} \right] \quad (5.28)$$

Esta es la función de transferencia en lazo cerrado que relaciona el desplazamiento angular real $q_{L(s)}$ con el desplazamiento angular deseado $q_{L^d(s)}$. La ecuación

muestra que el controlador proporcional para el robot es un sistema de segundo orden, que es estable si todos los parámetros del sistema son positivos.

Para aumentar el tiempo de respuesta del sistema y reducir el error de estado estacionario, se puede aumentar la ganancia de realimentación posicional K_p e incorporar un amortiguamiento en el sistema añadiendo una derivada del error posicional K_v . Luego la tensión aplicada al motor de la articulación es linealmente proporcional al error de posición y sus derivadas:

$$V_{(t)} = K_p [q_L^d(t) - q_L(t)] r + K_v \left[\frac{dq_L^d}{dt} - \frac{dq_L}{dt} \right] r \quad (5.29)$$

Aplicando Laplace a la ecuación (5.29), se tiene:

$$V_{(s)} = E_{(s)} r (K_p + S K_v) \quad (5.30)$$

y luego reemplazando en la ecuación (5.24) se tiene:

$$\frac{q_L(s)}{E_{(s)}} = K_a [K_p + S K_v] \left[\frac{1}{S(S J_{\text{eff}} R_a + f_{\text{eff}} R_a + k_a k_b)} \right] \quad (5.31)$$

$$\frac{q_L(s)}{q_L^d(s)} = \left[\frac{K_a (K_p + S K_v)}{S^2 J_{\text{eff}} R_a + S(f_{\text{eff}} R_a + K_a K_b + K_a K_v) + K_a K_p} \right] \quad (5.32)$$

El diagrama de bloques correspondiente a la función de transferencia ecuación (5.32) se muestra en la Figura 5.4.

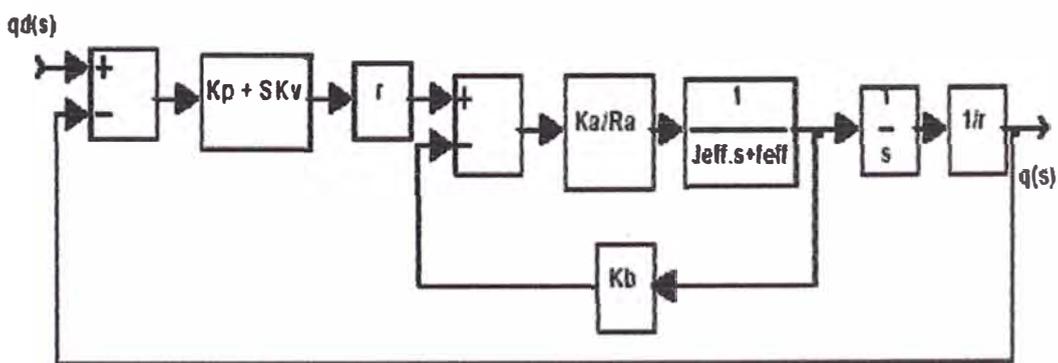


Figura 5.4. Diagrama de bloques con ganancia proporcional y derivativa.

Como el manipulador está bajo influencia de perturbaciones $[D(s)]$ debidas a cargas gravitatorias y a efectos centrífugos del elemento, en la ecuación (5.17) el par generado en el eje del motor tiene que compensar los pares del motor, la carga y las perturbaciones, luego:

$$T(s) = [S^2 J_{\text{eff}} + S f_{\text{eff}}] \theta(s) + D(s) \quad (5.33)$$

La función de transferencia que relaciona las entradas de perturbación con el desplazamiento de la articulación cuando la entrada de la posición deseada $q_L^d(s)$ es cero, es:

$$\frac{q_L(s)}{D(s)} = \left[\frac{-nR_a}{S^2 J_{\text{eff}} R_a + S(f_{\text{eff}} R_a + K_a K_b + K_a K_v) + K_a K_p} \right] \quad (5.34)$$

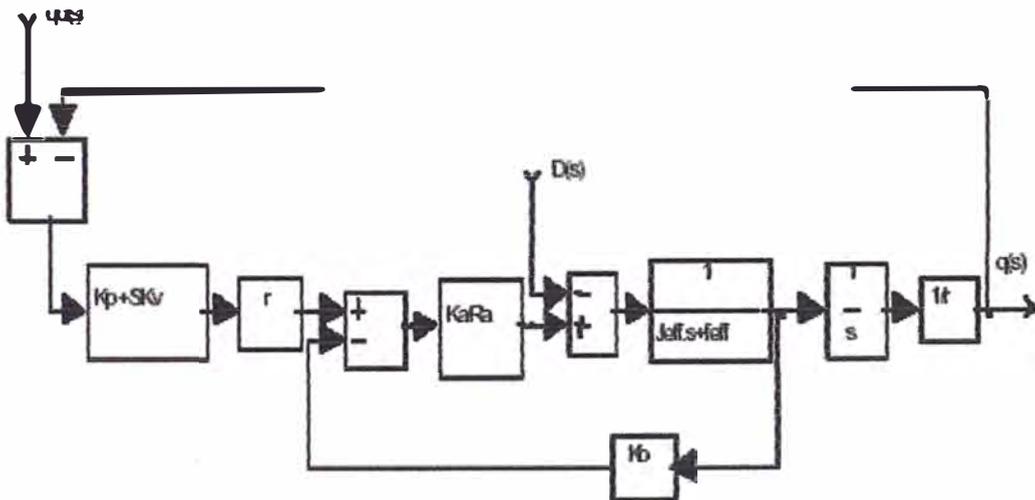


Figura 5.5. Diagrama de Bloques con perturbación.

Utilizando superposición se obtiene el desplazamiento real de la articulación para las dos entradas $q_L^d(s)$ y $D(s)$, en la ecuación (5.34), se tiene:

$$\frac{q_{L(s)}}{D(s)} = \left[\frac{K_a (K_p + SK_v) q_{L^d(s)} - \frac{1}{r}}{S^2 J_{\text{eff}} R_a + S(f_{\text{eff}} R_a + K_a K_b + K_a K_v) + K_a K_p} \right] \quad (5.35)$$

Al incluir el efecto de la perturbación (desplazamiento del centro de masa y demás efectos externos) el diagrama de bloques correspondiente se muestra en la Figura 5.5.

5.1.3 Cálculo de las Inercias y Amortiguamientos Equivalentes.

Los sistemas de transmisión de movimiento se pueden representar mediante un sistema con una inercia equivalente conectada directamente al motor impulsor. La inercia o masa indica la propiedad de un cuerpo para almacenar energía cinética de un movimiento.

El amortiguamiento equivalente depende de factores como la composición de las superficies, la presión entre las mismas, sus velocidades relativas y otras, que son difíciles de medir y generan una disipación de energía. Sin embargo, debido a que los efectos de amortiguamiento en los eslabones del robot actúan como una carga, se deben llevar al eje del motor dividiendo en el cuadrado de la relación de reducción.

Las inercias equivalentes se obtiene a partir de las ecuaciones de energía cinética de los elementos que influyen sobre el eje del motor de la articulación (barras y tornillos de transmisión de movimiento, inercia del rotor de cada motor y los eslabones) y expresando todos los términos en función de la velocidad angular del mismo.

5.1.4 Efecto de la Carga Externa y la Posición.

La estructura del robot Andes 1 se diseñó para manipular una carga de 10 Kg en el extremo, en el análisis, es considerado como una carga puntual concentrada a 0.2 m

del extremo del eslabón 6. El efecto sobre los eslabones 4 y 6 no se incluye porque la carga puntual se considera ubicada sobre el mismo eje de giro. La geometría de la carga es la que modifica las inercias equivalentes sobre estos eslabones. Las distintas posiciones del robot también alteran los valores de la inercia equivalente.

5.2 Otros Ejemplos de Aplicación

5.2.1 Carros Calcina

Son vehículos de transporte de carga, similares a pequeñas locomotoras, utilizados en centros mineros para el traslado de minerales, cuenta con dos motores de corriente continua tipo serie, con tensión de 250 VDC y potencia de 30 HP cada uno, controlados mediante resistencias de aceleración. Los motores operan inicialmente en el arranque de forma seriada, luego lo hacen de forma paralela, de manera que ambos motores sirven para desplazar al vehículo en un sentido, y para desplazar en sentido contrario se invierte la corriente del inducido a través de contactores.

El sistema se alimenta con corriente continua a través de hilo de contacto, los motores se arrancan mediante resistencias. Con el debilitamiento del campo en uno o varios escalones se obtiene un amplio margen de velocidades, y con ello se obtienen mayores esfuerzos de tracción.

Los circuitos de los motores y las resistencias se controlan con interruptores y contactores.

Para el frenado se cambia el sentido de la corriente en el inducido, ya que el sentido del campo se mantiene con la finalidad de aprovechar la remanencia. Por reducción paulatina de la resistencia del frenado con velocidad decreciente (en el servicio de marcha esta resistencia sirve como resistencia de arranque), de este modo se logra un

amplio margen de velocidades y un esfuerzo de frenado casi constante. Los diagramas de conexiones eléctricas se muestran en los diagrama A 1 y A 2 (ver anexo A).

5.2.2 Corazón Artificial

Es un dispositivo diseñado para bombear la sangre a los pulmones y al resto del cuerpo, simulando el ritmo cardiaco, el dispositivo consiste en una unidad torácica interna que pesa cerca de 900 gr e incluye 2 ventrículos artificiales con sus válvulas y un sistema de bombeo hidráulico impulsado por un motor. Un regulador y un dispositivo electrónico internos regulan la velocidad de bombeo. El funcionamiento se produce gracias a una batería interna que se recarga continuamente con una externa. Ésta se sujeta alrededor de la cintura del paciente y mediante un dispositivo de transducción a través de la piel se transmite la carga a la batería interna. Está fabricado a base de titanio y plástico.

El corazón artificial para cumplir con las funciones de bombeo de la sangre utiliza al motor de corriente continua sin escobillas de 12 VDC y 9 W, acompañado de sensores, dispositivos electrónicos y microprocesadores. En el motor el voltaje de los devanados del estator se controla mediante modulación de ancho de pulso (PWM), además, utiliza sensores de efecto hall para determinar la posición del rotor, el trabajo que realiza el motor es el de aplicar torque a los discos de compresión, tal que permitan el bombeo de la sangre en los ventrículos artificiales. La estructura del corazón artificial se muestra en el diagrama A 3 (ver anexo A).

5.2.3 Cañón antiaéreo

Es un arma especialmente adaptada para la defensa, contra los cohetes antinave, contra los aviones de asalto modernos, y contra blancos navales veloces de poco tonelaje.

Es un arma de elevada maniobrabilidad, lo cual permite mediante telecomando, una adquisición inmediata de la puntería y un correcto seguimiento de los blancos, aviones veloces y a distancia cercana, logrando esto aun en condiciones de mar, tales como imponer a la unidad un balanceo de 30° con un periodo de 6 segundos, un cabeceo de 10° con un periodo de 3 segundos y un desvío de la proa de 40° por segundo.

Para maniobrabilidad utiliza servomecanismos de tipo eléctrico con alimentación de tiristores, estos servomecanismos los constituyen los motores de corriente continua con inducido de bobina estampada, con excitación tipo serie doble en T, las funciones a cumplir por el motor en el arma en mención, es proporcionar la elevación del sistema de tiro y para el sistema de giro (ronza) de toda la masa móvil (cúpula móvil).

Los motores para ronza y elevación estan colocados sobre la parte posterior de la parte derecha de la plataforma del montaje, y el de elevación sobre la parte externa del flanco izquierdo del montaje.

El sistema de elevación es con maniobra en manual o telecomando, para velocidad máxima de desplazamiento de $30^\circ / s$, en el caso del sistema de giro la velocidad máxima de desplazamiento es de $90^\circ / s$. Los diagramas de las conexiones eléctricas del cañón antiaéreo se muestran en los diagramas A 4, A 5 y A 6 (ver anexo A)

5.2.4 Circuito Sencillo de Control de Velocidad para Motor de Corriente

Continua.

Este circuito permite alterar la velocidad desde el estado de detenido hasta el máximo posible de velocidad de giro del motor por medio de un potenciómetro. Gracias a que funciona por modulación de ancho de pulso (PWM) la fuerza del motor se ve poco afectada incluso a velocidades mínimas.

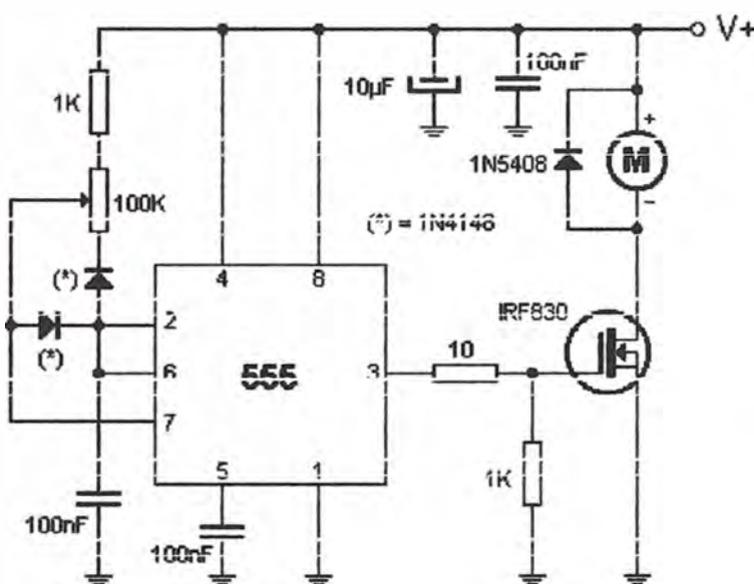


Figura 5.6 Esquema del circuito de control por PWM para motor de corriente continua

El circuito se basa en un integrado NE555 el cual genera el tren de impulsos necesario para controlar el transistor, el cual acciona por pulsos el motor de continua. El diodo en paralelo con el motor impide que al ser retirada la corriente, el transistor se queme. Los componentes entre los terminales 2, 6 y 7 del integrado regulan la frecuencia de oscilación del circuito y, por ende, la velocidad del motor. El transistor, con un buen disipador de calor, puede manejar hasta 75W de potencia. El esquema del circuito es mostrado en la figura 5.6.

5.3 Ejemplo de Cálculo de dispositivos para el Control de Motor de 1/4 HP.

El ejemplo de aplicación se desarrolla de acuerdo al esquema de control electrónico para el motor de corriente continua en serie, se describe el sistema de control y potencia, y los dispositivos que los conforman. Además, se efectúan algunos cálculos básicos de verificación.

5.3.1 Características del Motor a Controlar.

- Alimentación: 110 Voltios
- Potencia: 1/4 HP
- Corriente Nominal: 1,7 A
- Corriente de Arranque: 10 A
- Velocidad Máxima: 1500 r.p.m.

5.3.2 Desarrollo del Proyecto.

El circuito de la figura 5.7 muestra al motor de corriente continua y el control con semi convertidor monofásico, el circuito en general puede dividirse en dos etapas: etapa de potencia y etapa de control. Para el desarrollo del ejemplo, se conocen las características eléctricas y mecánicas del motor de corriente continua en serie, además, habiendo determinado los parámetros a controlar para el funcionamiento del motor, procedemos a describir los dispositivos que conforman la etapa de potencia y la etapa control.

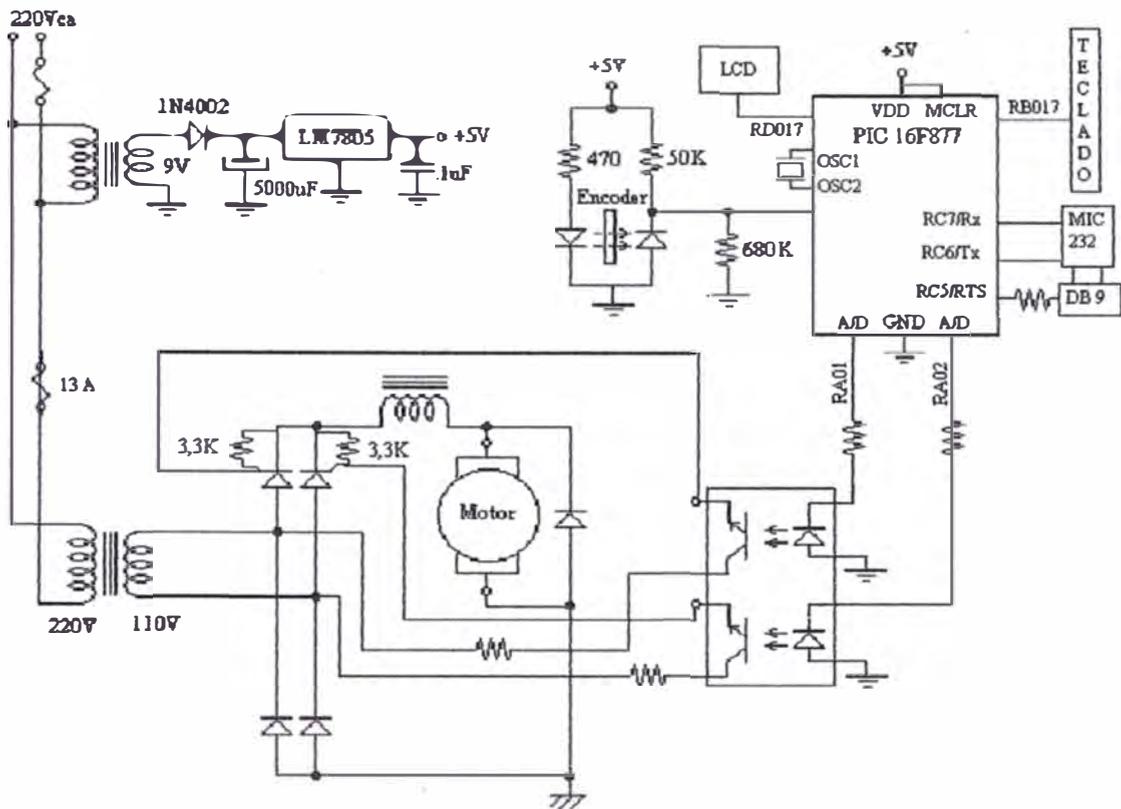


Figura 5.7 Esquema del circuito electrónico de control

a) Etapa de Potencia:

a.1) Tiristor como Dispositivo de Control de Potencia

Las funciones básicas que cumple el tiristor, son la amplificación (elevación de potencia), regulación, rectificación y conmutación (interruptor), en el circuito de la figura 5.10 permitirá rectificar la corriente alterna para convertirla en corriente continua de amplitud modulable, mediante un circuito especial de cebado podremos disparar el tiristor en un instante determinado de cada semionda positiva de tensión, para amplificar bastara un pequeño impulso de tensión (de microvatios) aplicado a la puerta del tiristor y con ello modular la potencia de centenares de vatios a través del tiristor.

Característica del tiristor: tendrá una Corriente Directa máxima de 10 A, considerando que el sistema de control efectuara un arranque suave del motor, evitando de este modo alcanzar la corriente máxima de arranque del motor (10 A), se utiliza el tiristor de menor corriente máxima directa sin tener problema con la disipación de potencia en el momento de arranque.

El voltaje inverso de bloqueo será de 200 Voltios, pues el motor presenta una impedancia de tipo inductiva y aparecen sobre tensiones en los transitorios, que no superarán los 200 Voltios en el peor de los casos. Además se implementa un circuito de excitación que impide que el tiristor reciba voltaje positivo de compuerta, cuando esta polarizado en inverso.

$$V_a = (V_m / \pi) (1 + \cos(\alpha)) \quad (5.36)$$

Donde:

V_m =tensión pico de la tensión alterna de entrada

α = ángulo de disparo de los tiristores, esta comprendido entre 0 y π radianes

La tensión continua en la armadura puede ser ajustada según convenga, este ajuste se consigue con solo cambiar el ángulo de disparo de los tiristores.

Por motivos prácticos se utiliza el Tiristor S-2800-D

a.2) Diodo de Conmutación.

Para este dispositivo de potencia se analiza su comportamiento para el caso más desfavorable, este será cuando se produce un corte en la alimentación del motor, ya que la corriente nominal del mismo circulará por este diodo, o sea $I_{\text{diodo}} = 1,67$ A.

Por seguridad se utiliza un diodo de conmutación con una corriente directa de 2 A.

El Diodo de recuperación inversa propuesto es Motorola MUR 490 E. Con la potencia de disipación de:

$$P_f = (2/2\pi)_0 \int^\pi I_0 V_d \text{sen } wt \, d(wt) \quad (5.37)$$

Resultado, $P_f = 1,59 \text{ W} \approx 1,6 \text{ W}$

a.3) Diodos Rectificadores.

Estos diodos conducen en la semionda positiva, y conjuntamente con los tiristores permiten utilizar casi toda la potencia disponible del transformador.

Para rectificar se tiene los Diodos del tipo MUR 420 que tienen las siguientes especificaciones, y para los cuales satisfacen las requeridas del circuito de potencia.

Calcularemos la potencia a disipar, según la fórmula anterior y tomando una corriente directa de 2 A:

$$P_d = (1/2\pi)_0 \int^{2\pi} I_0 V_d \text{sen } wt \, d(wt) \quad (5.38)$$

Resultado, $P_d = 0.56 \text{ W}$

a.4) Buffer de Disparo.

De los datos del tiristor (características del Tiristor S-2800-D) vemos que la corriente de compuerta I_g en el disparo es de 8mA y la tensión de disparo es de 0,9 Voltios.

Para disparar el Tiristor se utiliza el circuito optoacoplador (MOCD 213) y a su vez este dispositivo permite el desacople del circuito de potencia y control.

Tomamos la corriente pico $I_{0\text{pico}} = 10\text{mA}$ y la corriente en la puerta del tiristor $I_{g\text{tiristor}} = 20\text{mA}$, con estos valores y los datos característicos de estos dispositivos, obtenemos la Resistencia del LED y la Resistencia del transistor.

$$R_{\text{LED}} = V_{\text{led}}/I_{\text{LED}} \quad (5.39)$$

Resultado, $R_{LED} = 500 \Omega \approx 490 \Omega$ y $R_{trans} = 5,15 K\Omega \approx 5,6 K\Omega$

a.5) Circuito Rectificador para la alimentación del circuito de control

En el circuito rectificador para la alimentación del circuito de control utilizamos un rectificador de media onda con un solo diodo rectificador 1N4002 y como los requerimientos de potencia son mínimos y la tensión inversa de ruptura del diodo es lo suficientemente elevada, no realizaremos los cálculos de verificación de potencia.

a.6) Capacitor del Filtro de Alimentación de 5 Voltios.

El tiempo de descarga de un capacitor a través de una carga resistiva es:

$$\tau = R_0 \times C \quad (5.40)$$

Donde R_0 es la resistencia de carga y puede obtenerse de la tensión de salida del transformador y la corriente de salida.

$$R_0 = 9 \text{ Volts}/I_0 \quad (5.41)$$

Resultado, $R_0 = 9 \Omega$

La corriente de carga I_0 es la suma de la corriente que consume el microcontrolador PIC, los transistores y el codificador, y su valor es de 1 A. Y con tiempo de descarga de 2 ciclos de la tensión de línea.

$$\tau = 2 \times T_{red} \quad (5.42)$$

Resultado, $\tau = 40 \text{ mseg}$

Entonces:

$$C \approx \tau / R_0 \quad (5.43)$$

Resultado, $C \approx 4000 \mu\text{F}$

a.7) Potencia en los Transformadores.

La potencia del transformador es de 9 VA y sirve para la alimentación del circuito de control.

$$P_t = 9 \text{ Voltios} \times 1 \text{ A} = 9 \text{ VA} \quad (5.44)$$

La potencia del transformador alimenta al motor de corriente continua, con relación de transformación de 220/110 Voltios:

$$P_t = 110 \text{ Voltios} \times 10 \text{ A} = 1,1 \text{ KVA} \quad (5.45)$$

a.8) Elemento Fusible.

Tiene características de corriente del 30% por encima de la corriente máxima, con la finalidad de proteger el circuito.

$$I_{\text{fusible}} = I_{\text{máx}} \times 30 \% + I_{0\text{máx}} \quad (5.46)$$

Resultado, $I_{\text{fusible}} = 13 \text{ A}$

b) Etapa de Control.

b.1) Microcontrolador.

En esta etapa se utiliza un microcontrolador 16F877, el mismo que cuenta con módulos conversores analógico-digitales, timers, contadores, puerto paralelo esclavo, PWM, comunicación serie, etc. además, contiene un software de control de todas las características de la aplicación, siendo por ello más fácil y más rápido realizar cualquier modificación de la aplicación con sólo modificar el programa. Este microcontrolador deja abierta la posibilidad de añadir en el software de control la tabla de las características del motor, permitiendo que la aplicación se adapte a diferentes tipos de motor.

El Microcontrolador utilizado posee las siguientes características.

- Velocidad de Operación: 20Mhz
- Memoria de Programa: 8Kbytes
- Memoria de Datos (RAM): 368 bytes
- Memoria de Datos EEPROM: 256 bytes.
- Alta corriente de salida por pin: 25mA
- Número de terminales o patas: 40 patas.

Al disponer de una alta velocidad del procesamiento (20 MHz) y una alta capacidad de memoria tanto de datos (368 bytes) como de programa (8Kbytes) nos permite desarrollar un sistema de control optimo.

b.2) Circuitos Periféricos.

Los Circuitos Periféricos Integrados son los siguientes:

- Dos Timers / contadores de 8 bits.
- Un Timer / contador de 16 bits.
- Dos módulos de PWM con resolución de 10 bits.
- Un Conversor Analógico Digital multiplexado de 10 bits.
- Puertos serie I²C, USART SCI.
- Puerto paralelo de 8 bits.
- Se utiliza un circuito de adaptación de niveles RS 232 (MIC 232)

El sistema tiene dos salidas analógicas, esto permite controlar las dos salidas con la misma tensión o con distinta para un ciclo útil menor al 50%.

Tiene una entrada para transductor de velocidad o encoder. La entrada es del tipo Smith-trigger conectada internamente a un contador de 16 bits.

Tiene una matriz de 16 teclas: para las teclas de arranque y parada del motor, programación de la velocidad o secuencia temporizada de diferentes velocidades del motor.

Tiene un display de 16 dígitos de matriz LCD: que permite visualizar los estados de programación, la velocidad, la temporización y mensajes en caso de falla.

Tiene una entrada RS 232: elemento que permite la interfase con la PC, con la cual el envío de datos del funcionamiento del sistema a la PC y la recepción de instrucciones para el funcionamiento.

CAPÍTULO VI

SELECCIÓN DEL APARATO DE CONTROL PARA MOTORES DE CORRIENTE CONTINUA

6.1 Criterios Para la Selección del Equipo de Control

Los motores de corriente continua son alimentados con corriente continua pura o en el caso de no contar la alimentación en continua se utiliza el convertidor. En los motores de corriente continua alimentados por medio de un convertidor estático de potencia, la ondulación de la tensión y de la corriente influyen sobre las características de funcionamiento de la máquina, si hacemos la comparación de un motor con este tipo de alimentación, con otro que se alimenta con una fuente de corriente continua pura, se observa que las pérdidas y el calentamiento se incrementan y la conmutación se dificulta, para el primer caso.

En el diseño de los motores es necesario tener en cuenta las características de la alimentación, que puede asemejarse a una fuente de corriente continua con armónicas superpuestas.

Para reducir la ondulación en algunos casos se incluyen en el circuito de alimentación inductancias adicionales (que cumplen la función de filtros).

Además con frecuencia para reducir el diámetro y momento de inercia, se acoplan dos o más motores en un solo eje, con esto se logra también tener motores de menor tamaño, y en consecuencia el fabricante puede tener mayor posibilidad de ofrecer su solución al problema específico.

Los equipos de control de motores de corriente continua tienen previsto la alimentación en alterna, por ello, normalmente se constituyen con convertidores. Estos equipos a la vez que permiten el control de la velocidad y torque, pueden prestar protección al motor, en el ajuste de la corriente límite, sobrecorriente y sobrecarga del motor, control de la caída de tensión de alimentación y sobretensión de alimentación, sobrevelocidad del motor, pérdida de campo, pérdida de fases y otros.

Además los equipos permiten el control de la velocidad y/o torque según el requerimiento de operación del motor. Permiten ajustar la aceleración así como la deceleración de la maquina, tanto para el avance como para la reversa, también, lo acompañan dispositivos sensores que reportan en tiempo real el estado del motor.

Para seleccionar un equipo de protección determinado, se toma en cuenta los requerimientos a que será sometido el motor, potencia nominal, rendimiento, tensión nominal, corriente en armadura, características de la excitación, modos de operación del motor, altura de instalación (m.s.n.m.), el ambiente de trabajo, las cargas, esfuerzos, altura, condiciones ambientales, mantenimiento y otros.

A modo de ejemplo, el presente capítulo muestra la selección de equipos de control para los motores de corriente continua del anexo C, con ayuda de los cuadros de equipos de control del anexo B, pero en este caso se dispondrá de la potencia

nominal, tensión nominal de armadura y corriente de armadura, como parámetros que definen la solicitud del equipo.

A continuación ejemplos de motores de corriente continua donde se ha determinado el aparato de control necesario:

Del cuadro C 1, la tabla del motor **A** (Anexo C) muestra las características para un motor de corriente continua con potencia de 147.2 kW y comparando con los datos de los equipos de control (Anexo B, cuadros B-3 y B-6). Se determinó los siguientes equipos de control para el control del motor indicado.

catálogo Baldor **BC19H4200-CO** (tipo One Way, costo US \$ 10 669.00) y **BC20H4200-CL** (tipo Regenerative, costo US \$ 13 307.00).

Del cuadro C 2, la tabla del motor **B** (Anexo C) muestra las características para un motor de corriente continua con potencia de 0,8 kW y comparando con los datos de los equipos de control (Anexo B, cuadros B-1 y B-4). Se determinó los siguientes equipos de control para el control del motor indicado.

catálogo Baldor **BC 140** (tipo One Way, costo US \$ 254.00) y **BC 202** (tipo Regenerative, costo US \$ 342.00).

Del cuadro C 3, la tabla del motor **C** (Anexo C) muestra las características para un motor de corriente continua con potencia de 3,9 kW y comparando con los datos de los equipos de control (Anexo B, cuadros B-2 y B-4). Se determinó los siguientes equipos de control para el control del motor indicado.

catálogo Baldor **BC19H210-CO** (tipo One Way, costo US \$ 4 146.00) y **BC20H210-CL** (tipo Regenerative, costo US \$ 4 831.00)

CONCLUSIONES

- 1 Los motores de corriente continua de excitación independiente, shunt, compuesto e imán permanente presentan curvas (similar a recta lineal) de pendiente negativa, y donde la velocidad varia muy poco o casi nada al variar la carga. Las ecuaciones (4.3), (4.4), (4.5) y la figura (3.1) muestran el comportamiento de la velocidad con el par.
- 2 El par aplicado por el motor será mucho mayor que el par antagónico requerido por la maquina operadora.
- 3 La acción combinada de los métodos de control por tensión de inducido y campo de excitación permiten al motor mayor variación de velocidades.
- 4 La reacción del inducido seria un primer recurso de debilitamiento de campo y aumento de la velocidad, al incrementarse la carga; si este no provocara cambios en la forma de la curva par - velocidad del motor.
- 5 Los tres métodos de control de motores no son los únicos pero si los más utilizados, en el caso del motor de corriente continua sin escobillas, el control se lleva a cabo a través de la energización de las bobinas principales del estator, las que producen un polo de polaridad opuesta al del imán permanente (el rotor esta

constituido por imanes permanentes formando polos), propiciando de esta manera el giro del motor.

- 6 Los motores de corriente continua con el gran avance de la electrónica de potencia se han abierto nuevas formas de aplicación, gracias a esta, ha prolongado su permanencia en los importantes procesos de la industria siderúrgica, metalúrgica, mecánica, del papel, plástica, etc. como también en los sistemas de tracción.
- 7 El control por efecto de campo es recomendable para obtener velocidades superiores a la velocidad base. Mientras que el control por efecto de la armadura es recomendable para velocidades inferiores a la velocidad base, pero este último con una mayor gama de velocidades.
- 8 Para la selección de equipos de control de motores de corriente continua se debe tener presente los requerimientos de operación del motor a ser controlado, la alimentación del sistema, ambientes, altura de instalación, mantenimiento, predisposición del equipo a controlar sin problemas una variedad de potencia de motores, etc.

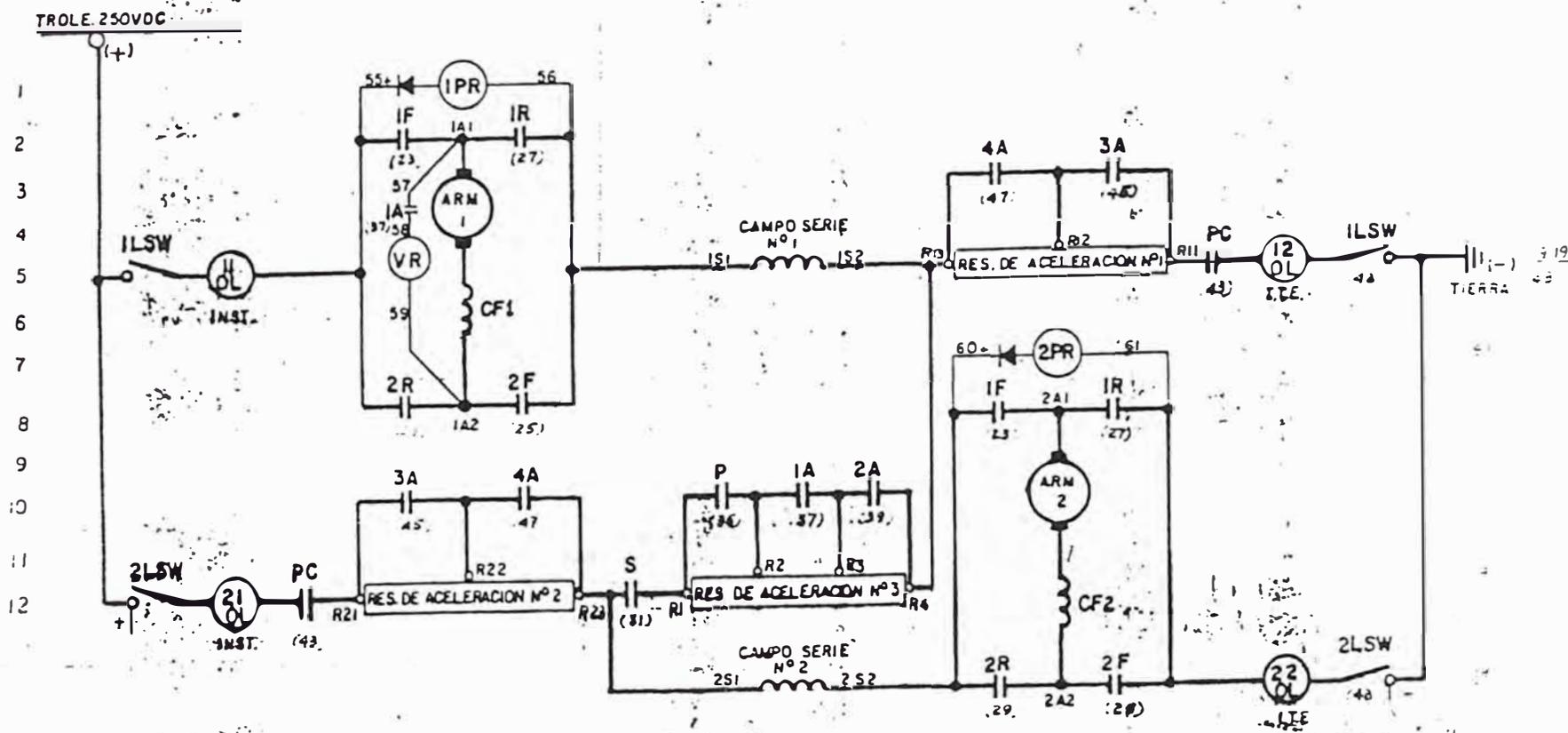
ANEXOS

ANEXO A

ANEXO A

DIAGRAMA A 1

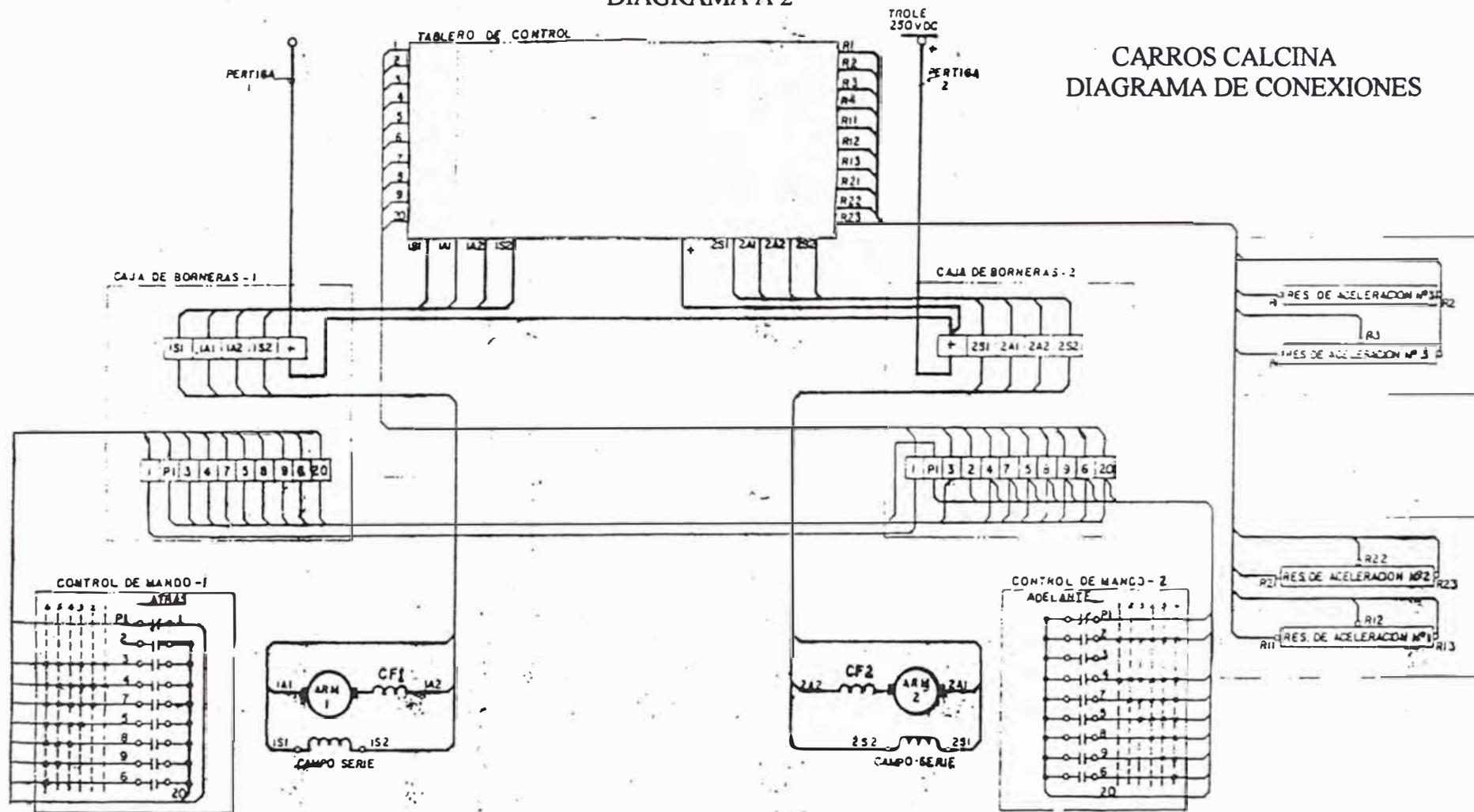
CARROS CALCINA
DIAGRAMA ELEMENTAL



ANEXO A

DIAGRAMA A 2

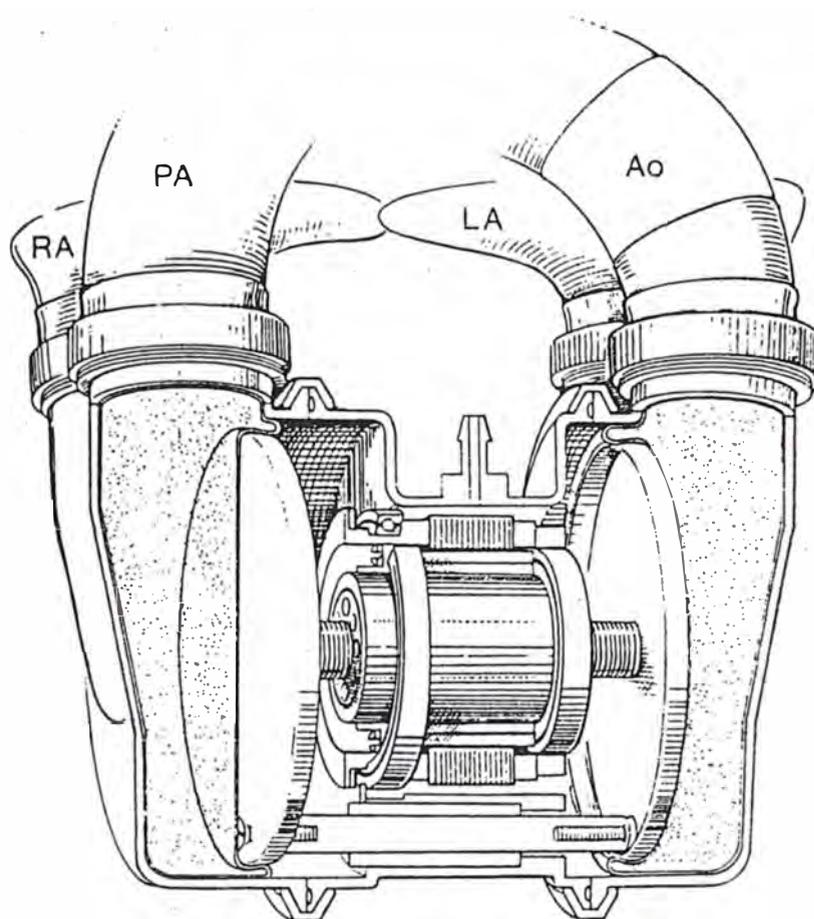
CARROS CALCINA
DIAGRAMA DE CONEXIONES



ANEXO A

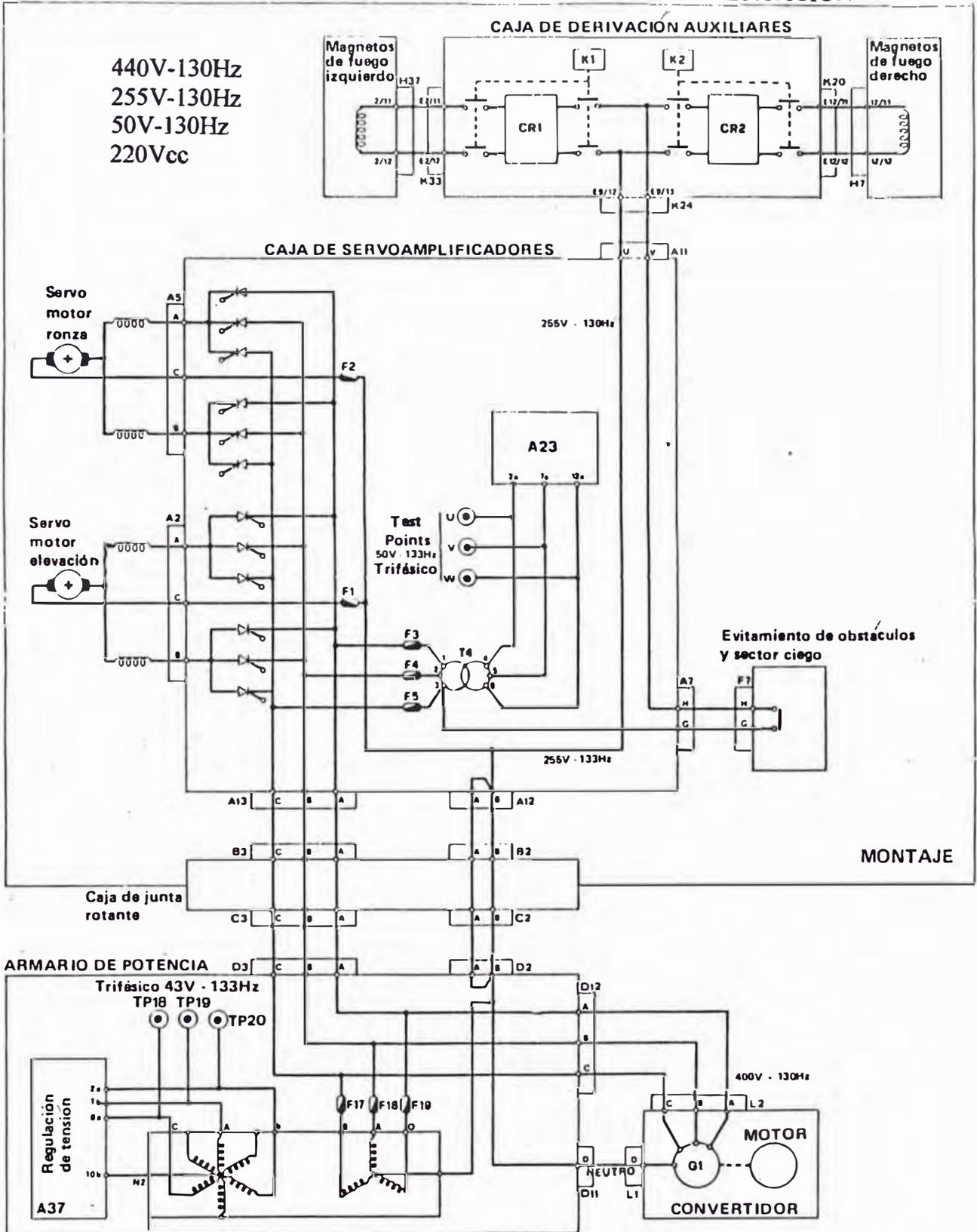
DIAGRAMA A 3

CORAZÓN ARTIFICIAL



ANEXO A

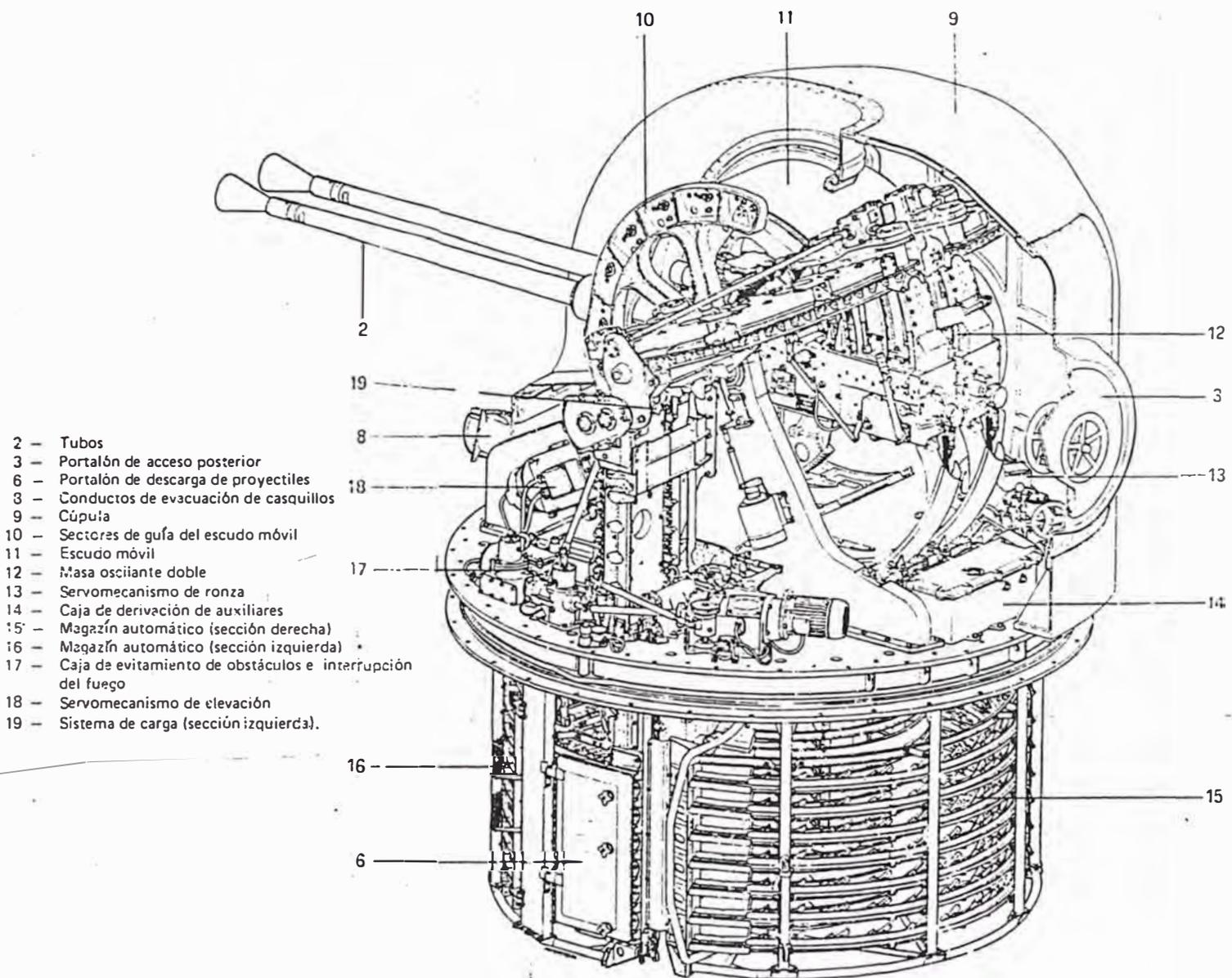
DIAGRAMA A 4
CAÑÓN ANTIAÉREO - CIRCUITOS DE ALIMENTACIÓN



ANEXO A

DIAGRAMA A 6

CAÑÓN ANTI-AÉREO - DIAGRAMA ESTRUCTURA DEL CAÑÓN



ANEXO B

ANEXO B

CUADRO B 1

ESPECIFICACIONES DE APARATOS DE CONTROL PARA MOTORES DE CORRIENTE CONTINUA (CUADRO RESUMEN EXTRAÍDO DE CATÁLOGO BALDOR PARA CONTROL TIPO ONE WAY)

Catalog Number:	BC138	BC139	BC141	BC140	BC140-FBR	BC154	BC142	BC160	BC155
Specification Number:									
Horsepower:	0.33	0.75	1.5	2	2	2	3	3	5
Input Voltage/Hertz:	115	230	115	115/230	115/230	115/230	230	230	230
Input Phase - Rated:	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Enclosure:	NEMA 1	NEMA 1	Chassis	NEMA 1	NEMA 1	NEMA 4X	Chassis	NEMA 4X	Chassis
Cooling Type:	CONVECTION								
Ambient Temperature Min:									
Ambient Temperature Max:	40	40	40	40	40	40	40	40	40
Control Type:	ANALOG								
Number of Axis:	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Operator Interface:	POT	POT	POT	POT	POT	POT	PCT	PCT	PCT
Dynamic/Regenerative Braking:	NONE	NONE	NONE	NONE	DYNAMIC	NONE	NONE	NONE	NONE
Agency Approvals									
UL:	Approved								
CSA:	Approved								
CUL:	Approved								
CE:	Approved								
IEEE519:	N/A								
Installed Options									
RS232:	N/A								
RS422/RS485:	N/A								
Pneumatic-In/Relay-Out:	N/A								
Isolated Input:	N/A	N/A	Optional	N/A	N/A	Optional	Optional	Optional	Optional
Master/Pulse/Follower:	N/A								
DC Tach Interface:	N/A								
Hi-Res Analog Input	N/A								
Isolated Encoder:	N/A								
Resolver Input:	N/A								
Field Power Supply:	N/A								
Dimensions:									20.6" h x 11" w x 9.87" d

ANEXO B

CUADRO B 2

ESPECIFICACIONES DE APARATOS DE CONTROL PARA MOTORES DE CORRIENTE CONTINUA
(CUADRO RESUMEN EXTRAÍDO DE CATÁLOGO BALDOR PARA CONTROL TIPO ONE WAY)

Catalog Number:	BC19H210-CO	BC19H410-CO	BC19H215-CO	BC19H220-CO	BC19H420-CO	BC19H225-CO	BC19H430-CO	BC19H240-CO	BC19H440-CO
Specification Number:	BC0022A00	BC0031A00	BC0023A00	BC0024A00	BC0034A00	BC0025A00	BC0037A00	BC0026A00	BC0036A00
Horsepower:	10	10	15	20	20	25	30	40	40
Input Voltage/Hz:	230	460	230	230	460	230	460	230	460
Input Phase - Rated:	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Enclosure:	OPEN	OPEN	OPEN	OPEN	OPEN	OPEN	OPEN	OPEN	OPEN
Cooling Type:	CONVECTION	CONVECT CN	CONVECTION	CONVECTION	CONVECTION	CONVECTION	CONVECTION	CONVECTION	CONVECTION
Ambient Temperature Min:	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ambient Temperature Max:	40	40	40	40	40	40	40	40	40
Control Type:	DIGITAL	DIGITAL	DIGITAL	DIGITAL	DIGITAL	DIGITAL	DIGITAL	DIGITAL	DIGITAL
Number of Axis:	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Operator Interface:	KEYPAD	KEYPAD	KEYPAD	KEYPAD	KEYPAD	KEYPAD	KEYPAD	KEYPAD	KEYPAD
Dynamic/Regenerative Braking:	NONE	NONE	NONE	NONE	NONE	NONE	NONE	NONE	NONE
Agency Approvals									
UL:	Approved	Approved	Approved	Approved	Approved	Approved	Approved	Approved	Approved
CSA:	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
C.U.I.:	Approved	Approved	Approved	Approved	Approved	Approved	Approved	Approved	Approved
CE:	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
IEB2519:	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
Installed Options									
RS232:	Optional	Optional	Optional	Optional	Optional	Optional	Optional	Optional	Optional
RS422/RS485:	Optional	Optional	Optional	Optional	Optional	Optional	Optional	Optional	Optional
Pneumatic In/Relay Out:	Optional	Optional	Optional	Optional	Optional	Optional	Optional	Optional	Optional
Isolated Input:	Optional	Optional	Optional	Optional	Optional	Optional	Optional	Optional	Optional
Master/Pulse/Follower:	Optional	Optional	Optional	Optional	Optional	Optional	Optional	Optional	Optional
DC Tach Interface:	Optional	Optional	Optional	Optional	Optional	Optional	Optional	Optional	Optional
Hi-Fas Analog Input:	Optional	Optional	Optional	Optional	Optional	Optional	Optional	Optional	Optional
Isolated Encoder:	Optional	Optional	Optional	Optional	Optional	Optional	Optional	Optional	Optional
Resolver Input:	Optional	Optional	Optional	Optional	Optional	Optional	Optional	Optional	Optional
Field Power Supply:	Optional	Optional	Optional	Optional	Optional	Optional	Optional	Optional	Optional
Dimensions:		25.7" h x 11" w x 9.87" d		20.6" h x 11" w x 9.87" d			25.7" h x 11" w x 9.87" d		

ANEXO B

CUADRO B 3

ESPECIFICACIONES DE APARATOS DE CONTROL PARA MOTORES DE CORRIENTE CONTINUA (CUADRO RESUMEN EXTRAÍDO DE CATÁLOGO BALDOR PARA CONTROL TIPO ONE WAY)

Catalog Number:	BC19H450-CO	BC19H260-CO	BC19H275-CO	EC19H475-CO	EC19H410C-CO	BC19H4125-CO	BC19H4150-CO	EC19H4200-CO	BC19H4250-CO
Specification Number:	BC0039A00	BC0028A00	BC0029A00	BC0068A00	BC0067A00	BC0032A00	BC0033A00	BC0072A00	BC0035A00
Horsepower:	50	60	75	75	100	125	150	200	250
Input Voltage/Hertz:	460	230	230	460	460	460	460	460	460
Input Phase - Rated:	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Enclosure:	OPEN	OPEN	OPEN	OPEN	OPEN	OPEN	OPEN	OPEN	OPEN
Cooling Type:	CONVECTION	CONVECTION	CONVECTION	CONVECTION	CONVECTION	CONVECTION	CONVECTION	CONVECTION	CONVECTION
Ambient Temperature Min:	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ambient Temperature Max:	40	40	40	40	40	40	40	40	40
Control Type:	DIGITAL	DIGITAL	DIGITAL	DIGITAL	DIGITAL	DIGITAL	DIGITAL	DIGITAL	DIGITAL
Number of Axis:	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Operator Interface:	KEYPAD	KEYPAD	KEYPAD	KEYPAD	KEYPAD	KEYPAD	KEYPAD	KEYPAD	KEYPAD
Dynamic/Regenerative Braking:	NONE	NONE	NONE	NONE	NONE	NONE	NONE	NONE	NONE
Agency Approvals									
UL:	Approved	Approved	Approved	Approved	Approved	Approved	Approved	Approved	Approved
CSA:	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
CUL:	Approved	Approved	Approved	Approved	Approved	Approved	Approved	Approved	Approved
CE:	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
IEEES19:	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
Installed Options									
RS232:	Optional	Optional	Optional	Optional	Optional	Optional	Optional	Optional	Optional
RS422/RS485:	Optional	Optional	Optional	Optional	Optional	Optional	Optional	Optional	Optional
Pneumatic In/Relay Out:	Optional	Optional	Optional	Optional	Optional	Optional	Optional	Optional	Optional
Isolated Input:	Optional	Optional	Optional	Optional	Optional	Optional	Optional	Optional	Optional
Master Pulse Follows:	Optional	Optional	Optional	Optional	Optional	Optional	Optional	Optional	Optional
DC Tach Interface:	Optional	Optional	Optional	Optional	Optional	Optional	Optional	Optional	Optional
Hi-Fas Analog Input:	Optional	Optional	Optional	Optional	Optional	Optional	Optional	Optional	Optional
Isolated Encoder:	Optional	Optional	Optional	Optional	Optional	Optional	Optional	Optional	Optional
Resolver Input:	Optional	Optional	Optional	Optional	Optional	Optional	Optional	Optional	Optional
Field Power Supply:	Optional	Optional	Optional	Optional	Optional	Optional	Optional	Optional	Optional
Dimensions:					25.7" h x 11" w x 9.87" d	25.7" h x 11" w x 9.87" c	25.7" h x 11" w x 9.87" d	25.7" h x 11" w x 9.87" d	

ANEXO B

CUADRO B 4

ESPECIFICACIONES DE APARATOS DE CONTROL PARA MOTORES DE CORRIENTE CONTINUA (CUADRO RESUMEN EXTRAIDO DE CATÁLOGO BALDOR PARA CONTROL TIPO REGENERATIVE)

Catalog Number:	BC202	BC200	BC204	BC254	BC201	BC203	BC20H205-CL	BC20H210-CL	BC20H410-CL
Specification Number:							BC0001A00	BC0002A00	BC0011A00
Horsepower:	1.5	2	2	2	3	5	5	10	10
Input Voltage/Hertz:	115/230	115/230	115/230	115/230	115/230	230	230	230	480
Input Phase - Rated:	1	1	1	1	1	1	3	3	3
Enclosure:	Chassis	Chassis	Chassis	NEMA 4X	Chassis	Chassis	OPEN	OPEN	OPEN
Cooling Type:	CONVECTION	CONVECTION	CONVECTION						
Ambient Temperature Min:							0	0	0
Ambient Temperature Max:	40	40	40	40	40	40	40	40	40
Control Type:	ANALOG	ANALOG	ANALOG	ANALOG	ANALOG	ANALOG	DIGITAL	DIGITAL	DIGITAL
Number of Axis:	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Operator Interface:	POT	POT	POT	POT	POT	POT	KEYPAD	KEYPAD	KEYPAD
Dynamic/Regenerative Braking	REGEN	REGEN	REGEN	REGEN	REGEN		REGEN	REGEN	REGEN
Agency Approvals									
UL:	Approved	Approved	Approved						
CSA:	Approved	Approved	Approved	Approved	Approved	Approved	N/A	N/A	N/A
CUL:	Approved	Approved	Approved						
CE:	Approved	Approved	Approved	Approved	Approved	Approved	N/A	N/A	N/A
IEEE519:	N/A	N/A	N/A						
Installed Options									
RS232:	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	Optional	Optional	Optional
RS422/RS485:	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	Optional	Optional	Optional
Pneumatic-In/Relay-Out:	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	Optional	Optional	Optional
Isolated Input:	Optional	Optional	Optional						
Master/ Pulse/Follower:	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	Optional	Optional	Optional
DC Tach Interface:	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	Optional	Optional	Optional
Hi-Res Analog Input	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	Optional	Optional	Optional
Isolated Encoder:	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	Optional	Optional	Optional
Resolver Input	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	Optional	Optional	Optional
Field Power Supply:	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	Optional	Optional	Optional
Dimensions:							20.6" h x 11" w x 9.87" d	20.6" h x 11" w x 9.87" d	

ANEXO B

CUADRO B 5

ESPECIFICACIONES DE APARATOS DE CONTROL PARA MOTORES DE CORRIENTE CONTINUA
(CUADRO RESUMEN EXTRAÍDO DE CATÁLOGO BALDOR PARA CONTROL TIPO RENEGATIVE)

Catalog Number:	BC20H215-CL	BC20H220-CL	BC20H420-CL	BC20H225-CL	BC20H430-CL	BC20H240-CL	BC20H440-CL	BC20H250-CL	BC20H450-CL
Specification Number:	BC0003A00	BC0004A00	BC0014A00	BC0005A00	BC0017A00	BC0006A00	BC0018A00	BC0007A00	BC0009A00
Horsepower:	15	20	20	25	30	40	40	50	50
Input Voltage/Hertz:	230	230	460	230	460	230	460	230	460
Input Phase - Rated:	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Enclosure:	OPEN	OPEN	OPEN	OPEN	OPEN	OPEN	OPEN	OPEN	OPEN
Cooling Type:	CONVECTION	CONVECTION	CONVECTION	CONVECTION	CONVECTION	CONVECTION	CONVECTION	CONVECTION	CONVECTION
Ambient Temperature Min:	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ambient Temperature Max:	40	40	40	40	40	40	40	40	40
Control Type:	DIGITAL	DIGITAL	DIGITAL	DIGITAL	DIGITAL	DIGITAL	DIGITAL	DIGITAL	DIGITAL
Number of Axis:	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Operator Interface:	KEYPAD	KEYPAD	KEYPAD	KEYPAD	KEYPAD	KEYPAD	KEYPAD	KEYPAD	KEYPAD
Dynamic/Regenerative Braking:	REGEN	REGEN	REGEN	REGEN	REGEN	REGEN	REGEN	REGEN	REGEN
Agency Approvals									
UL:	Approved	Approved	Approved	Approved	Approved	Approved	Approved	Approved	Approved
CSA:	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
CUL:	Approved	Approved	Approved	Approved	Approved	Approved	Approved	Approved	Approved
CE:	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
IEE519:	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
Installed Options									
RS232:	Optional	Optional	Optional	Optional	Optional	Optional	Optional	Optional	Optional
RS422/RS485:	Optional	Optional	Optional	Optional	Optional	Optional	Optional	Optional	Optional
Pneumatic In/Relay Out:	Optional	Optional	Optional	Optional	Optional	Optional	Optional	Optional	Optional
Isolated Input:	Optional	Optional	Optional	Optional	Optional	Optional	Optional	Optional	Optional
Master/Pulse/Follower:	Optional	Optional	Optional	Optional	Optional	Optional	Optional	Optional	Optional
DC Tach Interface:	Optional	Optional	Optional	Optional	Optional	Optional	Optional	Optional	Optional
Hi-Freq Analog Input:	Optional	Optional	Optional	Optional	Optional	Optional	Optional	Optional	Optional
Isolated Encoder:	Optional	Optional	Optional	Optional	Optional	Optional	Optional	Optional	Optional
Resolver Input:	Optional	Optional	Optional	Optional	Optional	Optional	Optional	Optional	Optional
Field Power Supply:	Optional	Optional	Optional	Optional	Optional	Optional	Optional	Optional	Optional
Dimensions:	25.7" h x 11" w x 9.87" d		25.7" h x 11" w x 9.87" d	25.7" h x 11" w x 9.87" d					25.7" h x 11" w x 9.87" d

ANEXO B

CUADRO B 6

ESPECIFICACIONES DE APARATOS DE CONTROL PARA MOTORES DE CORRIENTE CONTINUA (CUADRO RESUMEN EXTRAÍDO DE CATÁLOGO BALDOR PARA CONTROL TIPO REGENERATIVE)

Catalog Number:	BC20H260-CL	BC20H275-CL	BC20H475-CL	BC20H4125-CL	BC20H4100-CL	BC20H4150-CL	BC20H4200-CL	BC20H4250-CL	BC20H4300-CL
Specification Number:	BC0008A00	BC0009A00	BC0062A00	BC0065A00	BC0061A00	BC0013A00	BC0071A00	BC0075A00	BC0016A00
Horsepower:	60	75	75	125	100	150	200	250	300
Input Voltage/Hertz:	230	230	460	460	460	460	460	460	460
Input Phase - Rated:	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Enclosure:	OPEN	OPEN	OPEN	OPEN	OPEN	OPEN	OPEN	OPEN	OPEN
Cooling Type:	CONVECTION	CONVECTION	CONVECTION	CONVECTION	CONVECTION	CONVECTION	CONVECTION	CONVECTION	CONVECTION
Ambient Temperature Min:	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ambient Temperature Max:	40	40	40	40	40	40	40	40	40
Control Type:	DIGITAL	DIGITAL	DIGITAL	DIGITAL	DIGITAL	DIGITAL	DIGITAL	DIGITAL	DIGITAL
Number of Axis:	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Operator Interface:	KEYPAD	KEYPAD	KEYPAD	KEYPAD	KEYPAD	KEYPAD	KEYPAD	KEYPAD	KEYPAD
Dynamic/Regenerative Braking:	REGEN	REGEN	REGEN	REGEN	REGEN	REGEN	REGEN	REGEN	REGEN
Agency Approvals									
UL:	Approved	Approved	Approved	Approved	Approved	Approved	Approved	Approved	Approved
CSA:	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
CUL:	Approved	Approved	Approved	Approved	Approved	Approved	Approved	Approved	Approved
CE:	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
IEEE519:	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
Installed Options									
RS232:	Optional	Optional	Optional	Optional	Optional	Optional	Optional	Optional	Optional
RS422/RS485:	Optional	Optional	Optional	Optional	Optional	Optional	Optional	Optional	Optional
Pneumatic In/Relay Out:	Optional	Optional	Optional	Optional	Optional	Optional	Optional	Optional	Optional
Isolated Input:	Optional	Optional	Optional	Optional	Optional	Optional	Optional	Optional	Optional
Master/Pulse/Follower:	Optional	Optional	Optional	Optional	Optional	Optional	Optional	Optional	Optional
DC Tach Interface:	Optional	Optional	Optional	Optional	Optional	Optional	Optional	Optional	Optional
Hi-Flex Analog Input:	Optional	Optional	Optional	Optional	Optional	Optional	Optional	Optional	Optional
Isolated Encoder:	Optional	Optional	Optional	Optional	Optional	Optional	Optional	Optional	Optional
Resolver Input:	Optional	Optional	Optional	Optional	Optional	Optional	Optional	Optional	Optional
Field Power Supply:	Optional	Optional	Optional	Optional	Optional	Optional	Optional	Optional	Optional
Dimensions:	25.7" h x 11" w x 9.87" d				25.7" h x 11" w x 9.87" d	25.7" h x 11" w x 9.87" c	25.7" h x 11" w x 9.87" d	25.7" h x 11" w x 9.87" d	25.7" h x 11" w x 9.87" d

ANEXO B

CUADRO B 7

CARACTERÍSTICAS DE APARATOS PARA EL CONTROL MOTORES DE CORRIENTE CONTINUA - CATALOGO BALDOR: TIPO ONE WAY

<p>Catalog Number: BC138</p> <p>Descripción: DC SCR CONTROL, 115V, 1/100-1/3 HP, NEMA 1</p> <p>Ship Weight: 1 lbs.</p> <p>List Price: \$169</p>	<p>FEATURES</p> <ul style="list-style-type: none"> * Full wave SCR control with free wheeling diode (NEMA type K) * Field power supply allows use with shunt wound DC motors as well as permanent magnet motors * Adjustable accel, decel, current limit, IR comp, min and max speed * Current limit indicating LED * 5K speed pot for speed control * Anti-damage circuit protects PM motors and helps protect the SCR power bridge against direct shorts * Noise rejection circuit eliminates false starts and blown SCRs * UL and cUL recognized 	<p>APPLICATIONS</p> <p>Conveyors, mixers, packaging machinery and other applications requiring variable speed and constant torque.</p>
<p>Catalog Number: BC141</p> <p>Descripción: DC SCR CONTROL, 115V, 1/100-1.5 HP, CHASSIS</p> <p>Ship Weight: 1 lbs.</p> <p>List Price: \$139</p>	<p>FEATURES</p> <ul style="list-style-type: none"> * Full wave SCR control with free wheeling diode (NEMA type K) * Field power supply allows use with shunt wound DC motors as well as permanent magnet motors * Adjustable accel, decel, current limit, IR comp, min and max speed * Current limit indicating LED * 5K speed pot for speed control * Anti-damage circuit protects PM motors and helps protect the SCR power bridge against direct shorts * Noise rejection circuit eliminates false starts and blown SCRs * UL and cUL recognized 	<p>APPLICATIONS</p> <p>Conveyors, mixers, packaging machinery and other applications requiring variable speed and constant torque.</p>
<p>Catalog Number: BC139</p> <p>Descripción: DC SCR CONTROL, 230V, 1/50-3/4 HP, NEMA 1</p> <p>Ship Weight: 1 lbs.</p> <p>List Price: \$149</p>	<p>FEATURES</p> <ul style="list-style-type: none"> * Full wave SCR control with free wheeling diode (NEMA type K) * Field power supply allows use with shunt wound DC motors as well as permanent magnet motors * Adjustable accel, decel, current limit, IR comp, min and max speed * Current limit indicating LED * 5K speed pot for speed control * Anti-damage circuit protects PM motors and helps protect the SCR power bridge against direct shorts * Noise rejection circuit eliminates false starts and blown SCRs * UL and cUL recognized 	<p>APPLICATIONS</p> <p>Conveyors, mixers, packaging machinery and other applications requiring variable speed and constant torque.</p>
<p>Catalog Number: BC141</p> <p>Descripción: DC SCR CONTROL, 115V, 1/100-1.5 HP, CHASSIS</p> <p>Ship Weight: 1 lbs.</p> <p>List Price: \$139</p>	<p>FEATURES</p> <ul style="list-style-type: none"> * Full wave SCR control with free wheeling diode (NEMA type K) * Field power supply allows use with shunt wound DC motors as well as permanent magnet motors * Adjustable accel, decel, current limit, IR comp, min and max speed * Current limit indicating LED * 5K speed pot for speed control * Anti-damage circuit protects PM motors and helps protect the SCR power bridge against direct shorts * Noise rejection circuit eliminates false starts and blown SCRs * UL and cUL recognized 	<p>APPLICATIONS</p> <p>Conveyors, mixers, packaging machinery and other applications requiring variable speed and constant torque.</p>
<p>Catalog Number: BC140</p> <p>Descripción: DC SCR CONTROL, 115/230V, 1/100-2 HP, NEMA 1</p> <p>Ship Weight: 3 lbs.</p> <p>List Price: \$254</p>	<p>FEATURES</p> <ul style="list-style-type: none"> * Full wave SCR control with free wheeling diode (NEMA type K) * Field power supply allows use with shunt wound DC motors as well as permanent magnet motors * Adjustable accel, decel, current limit, IR comp, min and max speed * Current limit indicating LED * 5K speed pot for speed control * Anti-damage circuit protects PM motors and helps protect the SCR power bridge against direct shorts * Noise rejection circuit eliminates false starts and blown SCRs * UL and cUL recognized 	<p>APPLICATIONS</p> <p>Conveyors, mixers, packaging machinery and other applications requiring variable speed and constant torque.</p>
<p>Catalog Number: BC140-FBR</p> <p>Descripción: DC CTRL, 115/230V, 1/100-2 HP, NEMA 1, FBR SWITCH</p> <p>Ship Weight: 3 lbs.</p> <p>List Price: \$352</p>	<p>FEATURES</p> <ul style="list-style-type: none"> * Full wave SCR control with free wheeling diode (NEMA type K) * Field power supply allows use with shunt wound DC motors as well as permanent magnet motors * Adjustable accel, decel, current limit, IR comp, min and max speed * Current limit indicating LED * 5K speed pot for speed control * Anti-damage circuit protects PM motors and helps protect the SCR power bridge against direct shorts * Noise rejection circuit eliminates false starts and blown SCRs * UL and cUL recognized 	<p>APPLICATIONS</p> <p>Conveyors, mixers, packaging machinery and other applications requiring variable speed and constant torque.</p>
<p>Catalog Number: BC154</p> <p>Descripción: DC SCR CONTROL, 115/230V, 1/50-2 HP, NEMA 4X</p> <p>Ship Weight: 6 lbs.</p> <p>List Price: \$322</p>	<p>FEATURES</p> <ul style="list-style-type: none"> * Full wave SCR control with free wheeling diode (NEMA type K) * Field power supply allows use with shunt wound DC motors as well as permanent magnet motors * Adjustable accel, decel, current limit, IR comp, min and max speed * Current limit indicating LED * 5K speed pot for speed control * Anti-damage circuit protects PM motors and helps protect the SCR power bridge against direct shorts * Noise rejection circuit eliminates false starts and blown SCRs * UL and cUL recognized 	<p>APPLICATIONS</p> <p>Conveyors, mixers, packaging machinery and other applications requiring variable speed and constant torque.</p>

ANEXO B

CUADRO B 8
 CARACTERÍSTICAS DE APARATOS PARA EL CONTROL MOTORES DE
 CORRIENTE CONTINUA - CATALOGO BALDOR: TIPO ONE WAY

<p>Catalog Number: BC142 Description: DC SCR CONTROL, 230V, 1/50-3 HP, CHASSIS Ship Weight: 2 lbs. List Price: \$139</p>	<p>FEATURES</p> <ul style="list-style-type: none"> • Full wave SCR control with free wheeling diode (NEMA type K) • Field power supply allows use with shunt wound DC motors as well as permanent magnet motors • Adjustable accel, decel, current limit, IR comp, min and max speed • Current limit indicating LED • 5K speed pot for speed control • Anti-dump circuit protects PM motors and helps protect the SCR power bridge against direct shorts • Noise rejection circuit eliminates false starts and blown SCR's • I.R. and I.R. compensated 	<p>APPLICATIONS</p> <p>Conveyors, mixers, packaging machinery and other applications requiring variable speed and constant torque.</p>
<p>Catalog Number: BC160 Description: DC SCR CONTROL, 230V, 3 HP, NEMA 4X Ship Weight: 5 lbs. List Price: \$371</p>	<p>FEATURES</p> <ul style="list-style-type: none"> • Full wave SCR control with free wheeling diode (NEMA type K) • Field power supply allows use with shunt wound DC motors as well as permanent magnet motors • Adjustable accel, decel, current limit, IR comp, min and max speed • Current limit indicating LED • 5K speed pot for speed control • Anti-dump circuit protects PM motors and helps protect the SCR power bridge against direct shorts • Noise rejection circuit eliminates false starts and blown SCR's • I.R. and I.R. compensated 	<p>APPLICATIONS</p> <p>Conveyors, mixers, packaging machinery and other applications requiring variable speed and constant torque.</p>
<p>Catalog Number: BC155 Description: DC SCR CTRL, 230V, 5 HP, CHASSIS Ship Weight: 5 lbs. List Price: \$456</p>	<p>FEATURES</p> <ul style="list-style-type: none"> • Full wave SCR control with free wheeling diode (NEMA type K) • Field power supply allows use with shunt wound DC motors as well as permanent magnet motors • Adjustable accel, decel, current limit, IR comp, min and max speed • Current limit indicating LED • 5K speed pot for speed control • Anti-dump circuit protects PM motors and helps protect the SCR power bridge against direct shorts • Noise rejection circuit eliminates false starts and blown SCR's • I.R. and I.R. compensated 	<p>APPLICATIONS</p> <p>Conveyors, mixers, packaging machinery and other applications requiring variable speed and constant torque.</p>
<p>Catalog Number: BC19H205-CO Description: DGT DC CTRL, 230V, 18H, 5HP, OPEN NONE, 1X Ship Weight: 39 lbs. List Price: \$4,146</p>	<p>FEATURES</p> <ul style="list-style-type: none"> • Three phase, full wave SCR armature control, NEMA type C • Current regulated power supply, 15 amps standard with field economy circuit • High peak overload, 200% • Automatic tuning to motor with manual over-ride • Analog motor outputs • Buffered encoder output • Chassis mounting 	<p>APPLICATIONS</p> <p>Constant torque applications. New installations, replacements and original equipment manufacturers (OEM).</p>
<p>Catalog Number: BC19H210-CO Description: DGT DC CTRL, 230V, 18H, 10HP, OPEN NONE, 1X Ship Weight: 40 lbs. List Price: \$4,146</p>	<p>FEATURES</p> <ul style="list-style-type: none"> • Three phase, full wave SCR armature control, NEMA type C • Current regulated power supply, 15 amps standard with field economy circuit • High peak overload, 200% • Automatic tuning to motor with manual over-ride • Analog motor outputs • Buffered encoder output • Chassis mounting 	<p>APPLICATIONS</p> <p>Constant torque applications. New installations, replacements and original equipment manufacturers (OEM).</p>
<p>Catalog Number: BC19H410-CO Description: DGT DC CTRL, 480V, 18H, 10HP, OPEN NONE, 1X Ship Weight: 39 lbs. List Price: \$4,223</p>	<p>FEATURES</p> <ul style="list-style-type: none"> • Three phase, full wave SCR armature control, NEMA type C • Current regulated power supply, 15 amps standard with field economy circuit • High peak overload, 200% • Automatic tuning to motor with manual over-ride • Analog motor outputs • Buffered encoder output • Chassis mounting 	<p>APPLICATIONS</p> <p>Constant torque applications. New installations, replacements and original equipment manufacturers (OEM).</p>
<p>Catalog Number: BC19H215-CO Description: DGT DC CTRL, 230V, 18H, 15HP, OPEN NONE, 1X Ship Weight: 39 lbs. List Price: \$4,455</p>	<p>FEATURES</p> <ul style="list-style-type: none"> • Three phase, full wave SCR armature control, NEMA type C • Current regulated power supply, 15 amps standard with field economy circuit • High peak overload, 200% • Automatic tuning to motor with manual over-ride • Analog motor outputs • Buffered encoder output • Chassis mounting 	<p>APPLICATIONS</p> <p>Constant torque applications. New installations, replacements and original equipment manufacturers (OEM).</p>
<p>Catalog Number: BC19H220-CO Description: DGT DC CTRL, 230V, 18H, 20HP, OPEN NONE, 1X Ship Weight: 94 lbs. List Price: \$4,816</p>	<p>FEATURES</p> <ul style="list-style-type: none"> • Three phase, full wave SCR armature control, NEMA type C • Current regulated power supply, 15 amps standard with field economy circuit • High peak overload, 200% • Automatic tuning to motor with manual over-ride • Analog motor outputs • Buffered encoder output • Chassis mounting 	<p>APPLICATIONS</p> <p>Constant torque applications. New installations, replacements and original equipment manufacturers (OEM).</p>

ANEXO B

CUADRO B 9

CARACTERÍSTICAS DE APARATOS PARA EL CONTROL MOTORES DE CORRIENTE CONTINUA - CATALOGO BALDOR: TIPO ONE WAY

<p>Catalog Number: BC18H20-CO Description: DGT DC CTRL_480V,19H,20HP,OPEN,LINE,1X 40 lbs. Ship Weight: List Price: \$4.223</p>	<p>FEATURES</p> <ul style="list-style-type: none"> • Three phase, full wave SCR armature control, NEMA type C • Current regulated power supply, 15 amps standard with field economy circuit • High peak overload, 200% • Automatic tuning to motor with manual over-ride • Analog meter outputs • Buffered encoder output • Chassis mounting 	<p>APPLICATIONS</p> <p>Constant torque applications. New installations, replacements and original equipment manufacturers (OEM).</p>
<p>Catalog Number: BC18H25-CO Description: DGT DC CTRL_230V,19H,25HP,OPEN,LINE,1X 69 lbs. Ship Weight: List Price: \$5.073</p>	<p>FEATURES</p> <ul style="list-style-type: none"> • Three phase, full wave SCR armature control, NEMA type C • Current regulated power supply, 15 amps standard with field economy circuit • High peak overload, 200% • Automatic tuning to motor with manual over-ride • Analog meter outputs • Buffered encoder output • Chassis mounting 	<p>APPLICATIONS</p> <p>Constant torque applications. New installations, replacements and original equipment manufacturers (OEM).</p>
<p>Catalog Number: BC18H30-CO Description: DGT DC CTRL_480V,19H,30HP,OPEN,LINE,1X 41 lbs. Ship Weight: List Price: \$4.558</p>	<p>FEATURES</p> <ul style="list-style-type: none"> • Three phase, full wave SCR armature control, NEMA type C • Current regulated power supply, 15 amps standard with field economy circuit • High peak overload, 200% • Automatic tuning to motor with manual over-ride • Analog meter outputs • Buffered encoder output • Chassis mounting 	<p>APPLICATIONS</p> <p>Constant torque applications. New installations, replacements and original equipment manufacturers (OEM).</p>
<p>Catalog Number: BC18H40-CO Description: DGT DC CTRL_230V,19H,40HP,OPEN,LINE,1X 78 lbs. Ship Weight: List Price: \$6.508</p>	<p>FEATURES</p> <ul style="list-style-type: none"> • Three phase, full wave SCR armature control, NEMA type C • Current regulated power supply, 15 amps standard with field economy circuit • High peak overload, 200% • Automatic tuning to motor with manual over-ride • Analog meter outputs • Buffered encoder output • Chassis mounting 	<p>APPLICATIONS</p> <p>Constant torque applications. New installations, replacements and original equipment manufacturers (OEM).</p>
<p>Catalog Number: BC18H40-CO Description: DGT DC CTRL_230V,19H,40HP,OPEN,LINE,1X 78 lbs. Ship Weight: List Price: \$6.508</p>	<p>FEATURES</p> <ul style="list-style-type: none"> • Three phase, full wave SCR armature control, NEMA type C • Current regulated power supply, 15 amps standard with field economy circuit • High peak overload, 200% • Automatic tuning to motor with manual over-ride • Analog meter outputs • Buffered encoder output • Chassis mounting 	<p>APPLICATIONS</p> <p>Constant torque applications. New installations, replacements and original equipment manufacturers (OEM).</p>
<p>Catalog Number: BC18H40-CO Description: DGT DC CTRL_480V,19H,40HP,OPEN,LINE,1X 97 lbs. Ship Weight: List Price: \$4.929</p>	<p>FEATURES</p> <ul style="list-style-type: none"> • Three phase, full wave SCR armature control, NEMA type C • Current regulated power supply, 15 amps standard with field economy circuit • High peak overload, 200% • Automatic tuning to motor with manual over-ride • Analog meter outputs • Buffered encoder output • Chassis mounting 	<p>APPLICATIONS</p> <p>Constant torque applications. New installations, replacements and original equipment manufacturers (OEM).</p>
<p>Catalog Number: BC18H50-CO Description: DGT DC CTRL_230V,19H,50HP,OPEN,LINE,1X 104 lbs. Ship Weight: List Price: \$8.998</p>	<p>FEATURES</p> <ul style="list-style-type: none"> • Three phase, full wave SCR armature control, NEMA type C • Current regulated power supply, 15 amps standard with field economy circuit • High peak overload, 200% • Automatic tuning to motor with manual over-ride • Analog meter outputs • Buffered encoder output • Chassis mounting 	<p>APPLICATIONS</p> <p>Constant torque applications. New installations, replacements and original equipment manufacturers (OEM).</p>
<p>Catalog Number: BC18H45D-CO Description: DGT DC CTRL_480V,19H,50HP,OPEN,LINE,1X 85 lbs. Ship Weight: List Price: \$5.187</p>	<p>FEATURES</p> <ul style="list-style-type: none"> • Three phase, full wave SCR armature control, NEMA type C • Current regulated power supply, 15 amps standard with field economy circuit • High peak overload, 200% • Automatic tuning to motor with manual over-ride • Analog meter outputs • Buffered encoder output • Chassis mounting 	<p>APPLICATIONS</p> <p>Constant torque applications. New installations, replacements and original equipment manufacturers (OEM).</p>
<p>Catalog Number: BC18H20-CO Description: DGT DC CTRL_230V,19H,20HP,OPEN,LINE,1X 40 lbs. Ship Weight: List Price: \$7.720</p>	<p>FEATURES</p> <ul style="list-style-type: none"> • Three phase, full wave SCR armature control, NEMA type C • Current regulated power supply, 15 amps standard with field economy circuit • High peak overload, 200% • Automatic tuning to motor with manual over-ride • Analog meter outputs • Buffered encoder output • Chassis mounting 	<p>APPLICATIONS</p> <p>Constant torque applications. New installations, replacements and original equipment manufacturers (OEM).</p>

ANEXO B

CUADRO B 10
CARACTERÍSTICAS DE APARATOS PARA EL CONTROL MOTORES DE
CORRIENTE CONTINUA - CATALOGO BALDOR: TIPO ONE WAY

<p>Catalog Number: BC19H275-CO Description: DGT DC CTRL_230V,19H,75HP,OPENLINE,1X Ship Weight: 94 lbs. List Price: \$8,392</p>	<p>FEATURES</p> <ul style="list-style-type: none"> * Three phase, full wave SCR armature control, NEMA type C * Current regulated power supply, 15 amps standard with field economy circuit * High peak overload, 200% * Automatic tuning to motor with manual over-ride * Analog meter outputs * Buffered encoder output * Chassis mounting 	<p>APPLICATIONS</p> <p>Constant torque applications. New installations, replacements and original equipment manufacturers (OEM).</p>
<p>Catalog Number: BC19H75-CO Description: DGT DC CTRL_460V,19H,75HP,OPENLINE,1X Ship Weight: 77 lbs. List Price: \$8,841</p>	<p>FEATURES</p> <ul style="list-style-type: none"> * Three phase, full wave SCR armature control, NEMA type C * Current regulated power supply, 15 amps standard with field economy circuit * High peak overload, 200% * Automatic tuning to motor with manual over-ride * Analog meter outputs * Buffered encoder output * Chassis mounting 	<p>APPLICATIONS</p> <p>Constant torque applications. New installations, replacements and original equipment manufacturers (OEM).</p>
<p>Catalog Number: BC19H100-CO Description: DGT DC CTRL_460V,19H,100HP,OPENLINE,1X Ship Weight: 121 lbs. List Price: \$7,305</p>	<p>FEATURES</p> <ul style="list-style-type: none"> * Three phase, full wave SCR armature control, NEMA type C * Current regulated power supply, 15 amps standard with field economy circuit * High peak overload, 200% * Automatic tuning to motor with manual over-ride * Analog meter outputs * Buffered encoder output * Chassis mounting 	<p>APPLICATIONS</p> <p>Constant torque applications. New installations, replacements and original equipment manufacturers (OEM).</p>
<p>Catalog Number: BC19H125-CO Description: DGT DC CTRL_460V,19H,125HP,OPENLINE,1X Ship Weight: 70 lbs. List Price: \$8,038</p>	<p>FEATURES</p> <ul style="list-style-type: none"> * Three phase, full wave SCR armature control, NEMA type C * Current regulated power supply, 15 amps standard with field economy circuit * High peak overload, 200% * Automatic tuning to motor with manual over-ride * Analog meter outputs * Buffered encoder output * Chassis mounting 	<p>APPLICATIONS</p> <p>Constant torque applications. New installations, replacements and original equipment manufacturers (OEM).</p>
<p>Catalog Number: BC19H150-CO Description: DGT DC CTRL_460V,19H,150HP,OPENLINE,1X Ship Weight: 75 lbs. List Price: \$8,701</p>	<p>FEATURES</p> <ul style="list-style-type: none"> * Three phase, full wave SCR armature control, NEMA type C * Current regulated power supply, 15 amps standard with field economy circuit * High peak overload, 200% * Automatic tuning to motor with manual over-ride * Analog meter outputs * Buffered encoder output * Chassis mounting 	<p>APPLICATIONS</p> <p>Constant torque applications. New installations, replacements and original equipment manufacturers (OEM).</p>
<p>Catalog Number: BC19H200-CO Description: DGT DC CTRL_460V,19H,200HP,OPENLINE,1X Ship Weight: 281 lbs. List Price: \$10,889</p>	<p>FEATURES</p> <ul style="list-style-type: none"> * Three phase, full wave SCR armature control, NEMA type C * Current regulated power supply, 15 amps standard with field economy circuit * High peak overload, 200% * Automatic tuning to motor with manual over-ride * Analog meter outputs * Buffered encoder output * Chassis mounting 	<p>APPLICATIONS</p> <p>Constant torque applications. New installations, replacements and original equipment manufacturers (OEM).</p>
<p>Catalog Number: BC19H250-CO Description: DGT DC CTRL_460V,19H,250HP,OPENLINE,1X Ship Weight: 243 lbs. List Price: \$13,923</p>	<p>FEATURES</p> <ul style="list-style-type: none"> * Three phase, full wave SCR armature control, NEMA type C * Current regulated power supply, 15 amps standard with field economy circuit * High peak overload, 200% * Automatic tuning to motor with manual over-ride * Analog meter outputs * Buffered encoder output * Chassis mounting 	<p>APPLICATIONS</p> <p>Constant torque applications. New installations, replacements and original equipment manufacturers (OEM).</p>
<p>Catalog Number: BC19H300-CO Description: DGT DC CTRL_460V,19H,300HP,OPENLINE,1X Ship Weight: 85 lbs. List Price: \$14,288</p>	<p>FEATURES</p> <ul style="list-style-type: none"> * Three phase, full wave SCR armature control, NEMA type C * Current regulated power supply, 15 amps standard with field economy circuit * High peak overload, 200% * Automatic tuning to motor with manual over-ride * Analog meter outputs * Buffered encoder output * Chassis mounting 	<p>APPLICATIONS</p> <p>Constant torque applications. New installations, replacements and original equipment manufacturers (OEM).</p>

ANEXO B

CUADRO B 11

CARACTERÍSTICAS DE APARATOS PARA EL CONTROL MOTORES DE CORRIENTE CONTINUA - CATALOGO BALDOR: TIPO REGENERATIVE

Catalog Number: BC202 Description: DC SCR REGEN CONTROL, 115/230V, 1/4-1.5 HP CHASSIS Ship Weight: 3 lbs. List Price: \$342	FEATURES <ul style="list-style-type: none"> * Field power supply allows use with shunt wound DC motors as well as permanent magnet motors * Adjustable accel, decel, current limit, IR comp, min and max speed * Current limit indicating LED * 5K speed pot for speed control * Anti-damag circuit protects PM motors and helps protect the SCR power bridge against direct shorts * Noise rejection circuit eliminates false starts and blown SCR's * UL and cUL recognized 	APPLICATIONS Conveyors, mixers, packaging machinery and other applications requiring variable speed and constant torque.
Catalog Number: BC200 Description: DC SCR REGEN CONTROL, 115/230V, 1/4-2 HP, CHASSIS Ship Weight: 3.5 lbs. List Price: \$488	FEATURES <ul style="list-style-type: none"> * Field power supply allows use with shunt wound DC motors as well as permanent magnet motors * Adjustable accel, decel, current limit, IR comp, min and max speed * Current limit indicating LED * 5K speed pot for speed control * Anti-damag circuit protects PM motors and helps protect the SCR power bridge against direct shorts * Noise rejection circuit eliminates false starts and blown SCR's * UL and cUL recognized 	APPLICATIONS Conveyors, mixers, packaging machinery and other applications requiring variable speed and constant torque.
Catalog Number: BC204 Description: DC SCR REGEN CONTROL, 115/230V, 1/8-2 HP, CHASSIS Ship Weight: 3 lbs. List Price: \$290	FEATURES <ul style="list-style-type: none"> * Field power supply allows use with shunt wound DC motors as well as permanent magnet motors * Adjustable accel, decel, current limit, IR comp, min and max speed * Current limit indicating LED * 5K speed pot for speed control * Anti-damag circuit protects PM motors and helps protect the SCR power bridge against direct shorts * Noise rejection circuit eliminates false starts and blown SCR's * UL and cUL recognized 	APPLICATIONS Conveyors, mixers, packaging machinery and other applications requiring variable speed and constant torque.
Catalog Number: BC254 Description: DC SCR REGEN CONTROL, 115/230V, 1/50-2 HP, CHASSIS Ship Weight: 6 lbs. List Price: \$465	FEATURES <ul style="list-style-type: none"> * Field power supply allows use with shunt wound DC motors as well as permanent magnet motors * Adjustable accel, decel, current limit, IR comp, min and max speed * Current limit indicating LED * 5K speed pot for speed control * Anti-damag circuit protects PM motors and helps protect the SCR power bridge against direct shorts * Noise rejection circuit eliminates false starts and blown SCR's * UL and cUL recognized 	APPLICATIONS Conveyors, mixers, packaging machinery and other applications requiring variable speed and constant torque.
Catalog Number: BC201 Description: DC SCR REGEN CONTROL, 115/230V, 1/4-3 HP, CHASSIS Ship Weight: 4 lbs. List Price: \$579	FEATURES <ul style="list-style-type: none"> * Field power supply allows use with shunt wound DC motors as well as permanent magnet motors * Adjustable accel, decel, current limit, IR comp, min and max speed * Current limit indicating LED * 5K speed pot for speed control * Anti-damag circuit protects PM motors and helps protect the SCR power bridge against direct shorts * Noise rejection circuit eliminates false starts and blown SCR's * UL and cUL recognized 	APPLICATIONS Conveyors, mixers, packaging machinery and other applications requiring variable speed and constant torque.
Catalog Number: BC203 Description: DC SCR REGEN CONTROL, 230V, 5 HP, CHASSIS Ship Weight: 5 lbs. List Price: \$729	FEATURES <ul style="list-style-type: none"> * Field power supply allows use with shunt wound DC motors as well as permanent magnet motors * Adjustable accel, decel, current limit, IR comp, min and max speed * Current limit indicating LED * 5K speed pot for speed control * Anti-damag circuit protects PM motors and helps protect the SCR power bridge against direct shorts * Noise rejection circuit eliminates false starts and blown SCR's * UL and cUL recognized 	APPLICATIONS Conveyors, mixers, packaging machinery and other applications requiring variable speed and constant torque.
Catalog Number: BC20-GDS-CL Description: DGT DC CTRL, 230V, 20H, 5HP, OPEN, RCN REA, 1X Ship Weight: 42 lbs. List Price: \$4,831	FEATURES <ul style="list-style-type: none"> - Three phase, full wave SCR armature control, NEMA type C * Current regulated full wave field power supply, 15 amp standard, 40 amp optional * Programmable linear or S-curve acceleration to 0-3600 seconds * Free run or programmable linear or S-curve deceleration (0-3600 seconds) * 15 preset speeds (7 in host mode) * Analog meter outputs * Buffered encoder output * Chassis mounting (except 400 & 600 Hp) 	APPLICATIONS Constant torque applications. New installations, replacements and original equipment manufacturers (OEM).

ANEXO B

CUADRO B 12
CARACTERÍSTICAS DE APARATOS PARA EL CONTROL MOTORES DE
CORRIENTE CONTINUA - CATALOGO BALDOR - TIPO REGENERATIVE

Catalog Number: BC2D10-CL Descripción: DGT DC CTRL,230V,20H,10HP,OPEN,RGN REA,1X Ship Weight: 42 lbs. List Price: \$4.831	FEATURES <ul style="list-style-type: none"> * Three phase, full wave SCR armature control, NEMA type C * Current regulated full wave field power supply, 15 amps standard, 40 amp optional * Programmable linear or S-curve acceleration to 0-3600 seconds * Free run or programmable linear or S-curve deceleration (0-3600 seconds) * 15 preset speeds (7 in host mode) * Analog meter outputs * Buffered encoder output * Chassis mounting (except 400 & 600 Hp) 	APPLICATIONS Constant torque applications. New installations, replacements and original equipment manufacturers (OEM).
Catalog Number: BC2D110-CL Descripción: DGT DC CTRL,460V,20H,10HP,OPEN,RGN REA,1X Ship Weight: 39 lbs. List Price: \$3.084	FEATURES <ul style="list-style-type: none"> * Three phase, full wave SCR armature control, NEMA type C * Current regulated full wave field power supply, 15 amps standard, 40 amp optional * Programmable linear or S-curve acceleration to 0-3600 seconds * Free run or programmable linear or S-curve deceleration (0-3600 seconds) * 15 preset speeds (7 in host mode) * Analog meter outputs * Buffered encoder output * Chassis mounting (except 400 & 600 Hp) 	APPLICATIONS Constant torque applications. New installations, replacements and original equipment manufacturers (OEM).
Catalog Number: BC2D115-CL Descripción: DGT DC CTRL,230V,20H,15HP,OPEN,RGN REA,1X Ship Weight: 40 lbs. List Price: \$4.831	FEATURES <ul style="list-style-type: none"> * Three phase, full wave SCR armature control, NEMA type C * Current regulated full wave field power supply, 15 amps standard, 40 amp optional * Programmable linear or S-curve acceleration to 0-3600 seconds * Free run or programmable linear or S-curve deceleration (0-3600 seconds) * 15 preset speeds (7 in host mode) * Analog meter outputs * Buffered encoder output * Chassis mounting (except 400 & 600 Hp) 	APPLICATIONS Constant torque applications. New installations, replacements and original equipment manufacturers (OEM).
Catalog Number: 6L2D120-CL Descripción: DGT DC CTRL,230V,20H,20HP,OPEN,RGN REA,1X Ship Weight: 103 lbs. List Price: \$5.084	FEATURES <ul style="list-style-type: none"> * Three phase, full wave SCR armature control, NEMA type C * Current regulated full wave field power supply, 15 amps standard, 40 amp optional * Programmable linear or S-curve acceleration to 0-3600 seconds * Free run or programmable linear or S-curve deceleration (0-3600 seconds) * 15 preset speeds (7 in host mode) * Analog meter outputs * Buffered encoder output * Chassis mounting (except 400 & 600 Hp) 	APPLICATIONS Constant torque applications. New installations, replacements and original equipment manufacturers (OEM).
Catalog Number: BC2D1420-CL Descripción: DGT DC CTRL,460V,20H,20HP,OPEN,RGN REA,1X Ship Weight: 41 lbs. List Price: \$5.084	FEATURES <ul style="list-style-type: none"> * Three phase, full wave SCR armature control, NEMA type C * Current regulated full wave field power supply, 15 amps standard, 40 amp optional * Programmable linear or S-curve acceleration to 0-3600 seconds * Free run or programmable linear or S-curve deceleration (0-3600 seconds) * 15 preset speeds (7 in host mode) * Analog meter outputs * Buffered encoder output * Chassis mounting (except 400 & 600 Hp) 	APPLICATIONS Constant torque applications. New installations, replacements and original equipment manufacturers (OEM).
Catalog Number: BC2D1225-CL Descripción: DGT DC CTRL,230V,20H,25HP,OPEN,RGN REA,1X Ship Weight: 95 lbs. List Price: \$5.702	FEATURES <ul style="list-style-type: none"> * Three phase, full wave SCR armature control, NEMA type C * Current regulated full wave field power supply, 15 amps standard, 40 amp optional * Programmable linear or S-curve acceleration to 0-3600 seconds * Free run or programmable linear or S-curve deceleration (0-3600 seconds) * 15 preset speeds (7 in host mode) * Analog meter outputs * Buffered encoder output * Chassis mounting (except 400 & 600 Hp) 	APPLICATIONS Constant torque applications. New installations, replacements and original equipment manufacturers (OEM).
Catalog Number: 6L2D1430-CL Descripción: DGT DC CTRL,460V,20H,30HP,OPEN,RGN REA,1X Ship Weight: 60 lbs. List Price: \$5.248	FEATURES <ul style="list-style-type: none"> * Three phase, full wave SCR armature control, NEMA type C * Current regulated full wave field power supply, 15 amps standard, 40 amp optional * Programmable linear or S-curve acceleration to 0-3600 seconds * Free run or programmable linear or S-curve deceleration (0-3600 seconds) * 15 preset speeds (7 in host mode) * Analog meter outputs * Buffered encoder output * Chassis mounting (except 400 & 600 Hp) 	APPLICATIONS Constant torque applications. New installations, replacements and original equipment manufacturers (OEM).

ANEXO B

CUADRO B 13
CARACTERÍSTICAS DE APARATOS PARA EL CONTROL MOTORES DE
CORRIENTE CONTINUA - CATALOGO BALDOR: TIPO REGENERATIVE

Catalog Number: BC20H440-CL Description: DGT DC CTRL,230V,20H,40HP,OPEN,RGN REA,1X Ship Weight: 62 lbs. List Price: \$7,398	FEATURES <ul style="list-style-type: none"> * Three phase, full wave SCR armature control, NEMA type C * Current regulated full wave field power supply, 15 amps standard, 40 amp optional * Programmable linear or S-curve acceleration to 0-3600 seconds * Free run or programmable linear or S-curve deceleration (0-3600 seconds) * 15 preset speeds (7 in host mode) * Analog meter outputs * Buffered encoder output * Chassis mounting (except 400 & 600 Hp) 	APPLICATIONS Constant torque applications. New installations, replacements and original equipment manufacturers (OEM).
Catalog Number: BC20H440-CL Description: DGT DC CTRL,480V,20H,40HP,OPEN,RGN REA,1X Ship Weight: 69 lbs. List Price: \$5,480	FEATURES <ul style="list-style-type: none"> * Three phase, full wave SCR armature control, NEMA type C * Current regulated full wave field power supply, 15 amps standard, 40 amp optional * Programmable linear or S-curve acceleration to 0-3600 seconds * Free run or programmable linear or S-curve deceleration (0-3600 seconds) * 15 preset speeds (7 in host mode) * Analog meter outputs * Buffered encoder output * Chassis mounting (except 400 & 600 Hp) 	APPLICATIONS Constant torque applications. New installations, replacements and original equipment manufacturers (OEM).
Catalog Number: BC20H250-CL Description: DGT DC CTRL,230V,20H,50HP,OPEN,RGN REA,1X Ship Weight: 60 lbs. List Price: \$8,004	FEATURES <ul style="list-style-type: none"> * Three phase, full wave SCR armature control, NEMA type C * Current regulated full wave field power supply, 15 amps standard, 40 amp optional * Programmable linear or S-curve acceleration to 0-3600 seconds * Free run or programmable linear or S-curve deceleration (0-3600 seconds) * 15 preset speeds (7 in host mode) * Analog meter outputs * Buffered encoder output * Chassis mounting (except 400 & 600 Hp) 	APPLICATIONS Constant torque applications. New installations, replacements and original equipment manufacturers (OEM).
Catalog Number: BC20H430-CL Description: DGT DC CTRL,480V,20H,50HP,OPEN,RGN REA,1X Ship Weight: 98 lbs. List Price: \$8,077	FEATURES <ul style="list-style-type: none"> * Three phase, full wave SCR armature control, NEMA type C * Current regulated full wave field power supply, 15 amps standard, 40 amp optional * Programmable linear or S-curve acceleration to 0-3600 seconds * Free run or programmable linear or S-curve deceleration (0-3600 seconds) * 15 preset speeds (7 in host mode) * Analog meter outputs * Buffered encoder output * Chassis mounting (except 400 & 600 Hp) 	APPLICATIONS Constant torque applications. New installations, replacements and original equipment manufacturers (OEM).
Catalog Number: BC20H280-CL Description: DGT DC CTRL,230V,20H,40HP,OPEN,RGN REA,1X Ship Weight: 106 lbs. List Price: \$8,483	FEATURES <ul style="list-style-type: none"> * Three phase, full wave SCR armature control, NEMA type C * Current regulated full wave field power supply, 15 amps standard, 40 amp optional * Programmable linear or S-curve acceleration to 0-3600 seconds * Free run or programmable linear or S-curve deceleration (0-3600 seconds) * 15 preset speeds (7 in host mode) * Analog meter outputs * Buffered encoder output * Chassis mounting (except 400 & 600 Hp) 	APPLICATIONS Constant torque applications. New installations, replacements and original equipment manufacturers (OEM).
Catalog Number: BC20H775-CL Description: DGT DC CTRL,230V,20H,75HP,OPEN,RGN REA,1X Ship Weight: 71 lbs. List Price: \$10,383	FEATURES <ul style="list-style-type: none"> * Three phase, full wave SCR armature control, NEMA type C * Current regulated full wave field power supply, 15 amps standard, 40 amp optional * Programmable linear or S-curve acceleration to 0-3600 seconds * Free run or programmable linear or S-curve deceleration (0-3600 seconds) * 15 preset speeds (7 in host mode) * Analog meter outputs * Buffered encoder output * Chassis mounting (except 400 & 600 Hp) 	APPLICATIONS Constant torque applications. New installations, replacements and original equipment manufacturers (OEM).
Catalog Number: BC20H475-CL Description: DGT DC CTRL,480V,20H,75HP,OPEN,RGN REA,1X Ship Weight: 115 lbs. List Price: \$8,410	FEATURES <ul style="list-style-type: none"> * Three phase, full wave SCR armature control, NEMA type C * Current regulated full wave field power supply, 15 amps standard, 40 amp optional * Programmable linear or S-curve acceleration to 0-3600 seconds * Free run or programmable linear or S-curve deceleration (0-3600 seconds) * 15 preset speeds (7 in host mode) * Analog meter outputs * Buffered encoder output * Chassis mounting (except 400 & 600 Hp) 	APPLICATIONS Constant torque applications. New installations, replacements and original equipment manufacturers (OEM).

ANEXO C

ANEXO C

CUADRO C 1

Motor A. Potencia Nominal: 147,2 KW
(Pfaff, Gerhard, Regelung Elektrischer Antriebe I, 4. Auflage, Oldenbourg Verlag,
München, Wien, 1 990)

CARACTERÍSTICAS	CANTIDAD	UNIDADES
Datos de Armadura		
Potencia Nominal (P)	147,2	KW
Tensión Nominal de Armadura (U_a)	460	V
Corriente Nominal de Armadura (I_a)	320	A
Resistencia de Armadura (R_a)	0,05	Ω
Inductancia de Armadura (L_a)	0,003	H
Datos de Excitación		
Resistencia de Campo (R_f)	25,2	Ω
Inductancia de Campo en zona Lineal (L_f) (ver abajo característica magnética con saturación)	63,5	H
Flujo de excitación nominal (concatenado)	408,5	Wb
Conversión Electromagnética - Mecánica		
Constante de Conversión	0,0166	Nm/WbA
Constante de Conversión a Flujo Nominal	6,78	Nm/A = Vs
Datos del Rotor		
Momento de Inercia	15	Kgm ²
Velocidad Nominal	625	rpm

ANEXO C

CUADRO C 2

Motor B. Potencia Nominal: 0,8 KW
 (Hofer, Klaus, Sensorlose Antriebsregelung, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1 990)
 Datos correspondientes a una máquina de imán permanente.

CARACTERÍSTICAS	CANTIDAD	UNIDADES
Datos de Armadura		
Potencia Nominal (P)	0,8	KW
Tensión Nominal de Armadura (U_a)	160	V
Corriente Nominal de Armadura (I_a)	5	A
Resistencia de Armadura (R_a)	1,2	Ω
Inductancia de Armadura (L_a)	0,088	H
Datos de Excitación		
Máquina de Imán Permanente		
Conversión Electromagnética - Mecánica		
Constante de Conversión	0,6	Nm/WbA
Datos del Rotor		
Momento de Inercia	0,2	Kgm ²
Velocidad Nominal	1860	rpm

ANEXO C

CUADRO C 3

Motor C. Potencia Nominal: 3.9 KW

(Krause, P. C., Oleg Wasynczuk, and Scott Sudhoff, Analysis of Electric Machinery, IEEE, Inc., New York, 1 995, pp 90)

Datos correspondientes a un motor con excitación en derivación.

CARACTERÍSTICAS	CANTIDAD	UNIDADES
Datos de Armadura		
Potencia Nominal (P)	3,9	KW
Potencia Nominal en el Eje	3,73	KW
Tensión Nominal de Armadura (U_a)	240	V
Corriente Nominal de Armadura (I_a)	16,2	A
Resistencia de Armadura (R_a)	0,6	Ω
Inductancia de Armadura (L_a)	0,012	H
Datos de Excitación		
Resistencia de Campo (R_f)	240	Ω
Inductancia de Campo (L_f)	120	H
Inductancia Mutua entre el campo y los arrollamientos de armadura rotante (L_{AF})	1,8	H
Datos del Rotor		
Momento de Inercia (motor + carga)	1	Kgm ²
Velocidad Nominal	1220	rpm

ANEXO C

CUADRO C 4

Motor D. Potencia Nominal: 158.3 KW
 (Krause, P. C., Oleg Wasynczuk, and Scott Sudhoff, Analysis of Electric Machinery,
 IEEE, Inc., New York,
 1 995, pp 94)

Datos correspondientes a un motor con excitación en derivación.

CARACTERÍSTICAS	CANTIDAD	UNIDADES
Datos de Armadura		
Potencia Nominal (P)	158,3	KW
Potencia Nominal en el Eje	149	KW
Tensión Nominal de Armadura (U_a)	250	V
Corriente Nominal de Armadura (I_a)	633	A
Resistencia de Armadura (R_a)	0,012	Ω
Inductancia de Armadura (L_a)	0,0035	H
Datos de Excitación		
Resistencia de Campo (R_f)	12	Ω
Inductancia de Campo (L_f)	9	H
Inductancia Mutua entre el campo y los arrollamientos de armadura rotante (L_{AF})	0,18	H
Datos del Rotor		
Momento de Inercia (motor + carga)	30	Kgm ²
Velocidad Nominal	617	rpm

BIBLIOGRAFÍA

1. Irving L. Kosow. "Máquinas Eléctricas y Transformadores", Ed. Reverté S.A., 1 994
2. Stephen J. Chapman. "Máquinas Eléctricas" Ed. Nomos S.A., 2 000
3. W. Nürnberg y F. Lax "Máquinas de Corriente Continua" Ed. Paraninfo S.A., 1 980
4. A. V. Ivanov-Smolenski "Máquinas Eléctricas" Ed. Mir Moscú, 1 984
5. A. E. Fitzgerald "Máquinas Eléctricas" Ed. McGraw-Hill S.A., 1 994
6. Enciclopedia CEAC de electricidad "Maniobra Mandos y Control Eléctricos" Ed. CEAC S.A., 1 980
7. José Roldán Vilorio "Motores Eléctricos Automatismo de Control" Ed. Paraninfo S.A., 2 001
8. William J. Weiss "Permanent Circulatory Support Systems at The Pennsylvania State University" Revista IEEE Biomedical Engineering, 1 990
9. Robert, J. Lawrie "Biblioteca Práctica de Motores Eléctricos" Volumen 1, Ed. Océano/Centrum, 1 980.