

c.c. que alimenta el devanado estatorico obteniéndose un par bastante constante en los  $90^\circ$  de cada sentido.

Los motores de giro limitado encuentran aplicación como motores auxiliares de giróscopos utilizados en los dispositivos de estabilización de plataformas espaciales, en los elementos de salida de aparatos registradores, en servomecanismos como amplificadores de par en la regulación fina del control de posición y como servomotores de instrumentos de c.c. tales como indicadores de tacómetros de c.c.

Algunos motores de c.c. sin escobillas de giro limitado tienen el aspecto de motores homopolares ya que tienen discos achatados sin carcasa y no llevan colector.



Figura 97 Drives y motores brushless

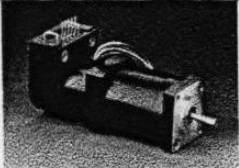
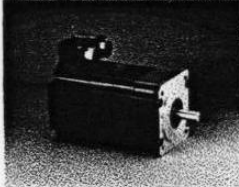
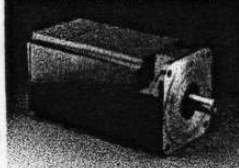
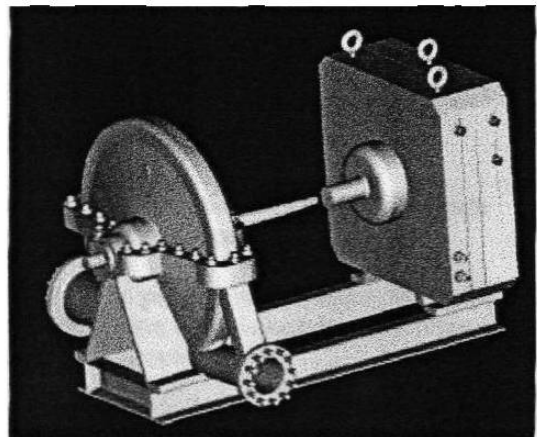
<i>Modelo Americano</i>	<i>Fotografía</i>
IBH 100 Instrument Grade Brushless Motor	
ABH350 Brushless Automation Series	
ABH 750 Automation Grade Brushless Motor	

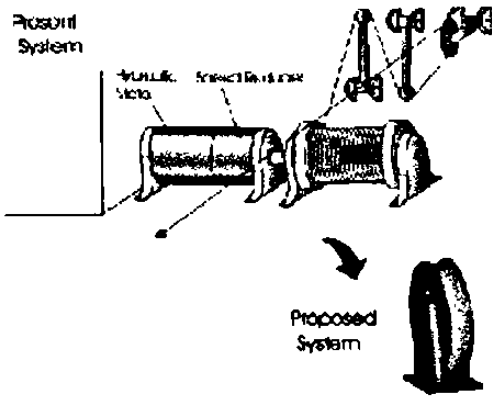
Figura 98 Distintos modelos de brushless d.c. motor

## 9.6 Aplicaciones

*Potencia de la bomba del agua de mar*  
Hp 268 @ 2000 tallas de la RPM

- Ventajas del motor de 36 pulgadas -
- Bajo costo de mantenimiento
- Más confiabilidad
- Más control de la precisión





### *Motor del Tambor de Cable en Sistema de Torno*

Tensión - 8.500 libras de velocidad máxima -  
 aceleración del recorrido del cable de 700 fps - 6,7  
 ventajas máximas fps<sup>2</sup> -

- Menos costo de mantenimiento
- Tamaño más pequeño
- Más liger, peso en pocas piezas móviles
- Menos sensibilidad del sistema .

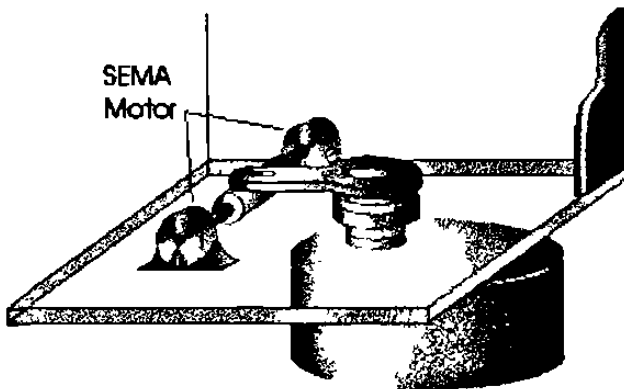
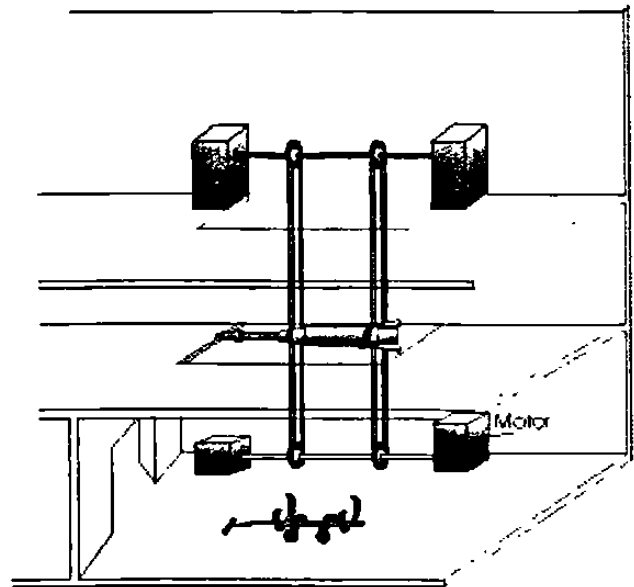
### *Elevador de Avión*

Potencia - 150.000 pies lb-40 de tamaño de 10 seg

Tamaño - cuatro unidades por elevador diámetro de  
 36 pulgadas con mecanismo impulsor del gusano -

#### Ventajas

- Bajo costo de mantenimiento
- Bajo costo de instalación
- Más confiabilidad



### *Dirección / Timón*

Potencia - 40 millones de libras de la pulgada  
 @ 2 1/3 grados / segundo

Medida - 36 pulgadas con ventajas del tornillo de la  
 cumbre (cuatro nuevas unidades substituyen cuatro  
 cilindros hidráulicos) -

#### Ventajas

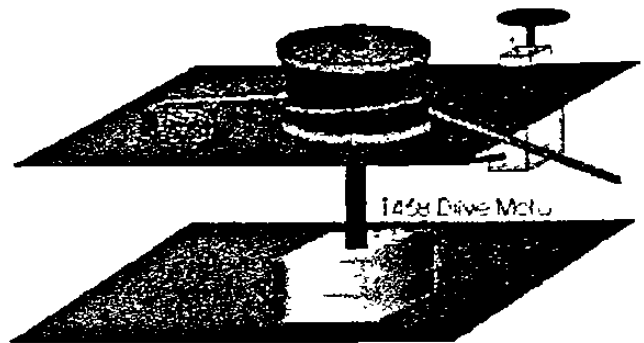
- Bajo el costo de mantenimiento
- Más confiabilidad
- Más control de la precisión

***Cabrestante de Deformación***

Potencia - 220 lb-pies de esfuerzo de torsión 900 RPM

Ventajas de 18,4 pulgadas de diámetro -

- Bajo costo de mantenimiento
- Bajo costo de instalación
- Más control de la precisión



## 10. MOTORES DE PASOS

### 10.1 Introducción

Los Motores de Pasos son motores de mucha importancia, a tal grado que se les puede encontrar formando parte de alguna pieza en casi cualquier equipo o dispositivo electromecánico. He aquí algunos ejemplos de estos dispositivos que emplean los motores a pasos:

- **Impresoras Matriciales:** normalmente contienen por lo menos 2 motores de pasos, a veces con detectores ópticos incrustados a los motores. Estos controlan los movimientos de los cartuchos y del dispositivo que lo sostiene. Como una regla general, impresoras más grandes tendrán más grandes y poderosos motores de pasos en ellos.
- **Floppys del diskette para computadoras:** estos normalmente contienen por lo menos 1 motor de pasos, junto con el motor hará algunas unidades detectoras ópticas para permitirle al motor de pasos distinguir las distintas zonas del diskette, tales como el índice y aquéllas que están protegidas contra escritura.

Estos dos ejemplos de aplicación de los motores de pasos nos dan una idea de su funcionamiento, mismo que se detalla a continuación.

### 10.2 Partes de los Motores de Pasos

La figura 98 muestra las partes fundamentales de cualquier motor a pasos:

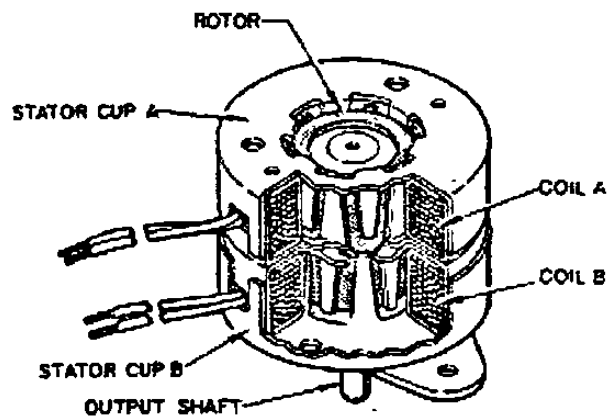


Figura 98 Partes del Motor de Pasos

Las partes del motor mostradas en la figura son:

- Stator cup A: Encapsulado del Estator A
- Stator cup B: Encapsulado del Estator B
- output Shaft: Salida
- coil A: Bobina A
- coil B: Bobina B

### 10.3 Cómo Trabajan Los Motores de Pasos

Los Motores a pasos son usados cuando el movimiento y posición tienen que ser precisamente controlados. Como su nombre implica el motor a pasos se mueve en discretos pasos, cada paso corresponde a un pulso que es suministrada a uno de los embobinados del estator como se muestra a continuación, dependiendo del diseño puede avanzar  $90^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $18^\circ$ , o por una fracción de grado, el desempeño de un motor a pasos depende grandemente del poder suministrado que lo dirige. El poder provisto genera pulsos el cual en su momento es usualmente inicializado por un microprocesador de una computadora.

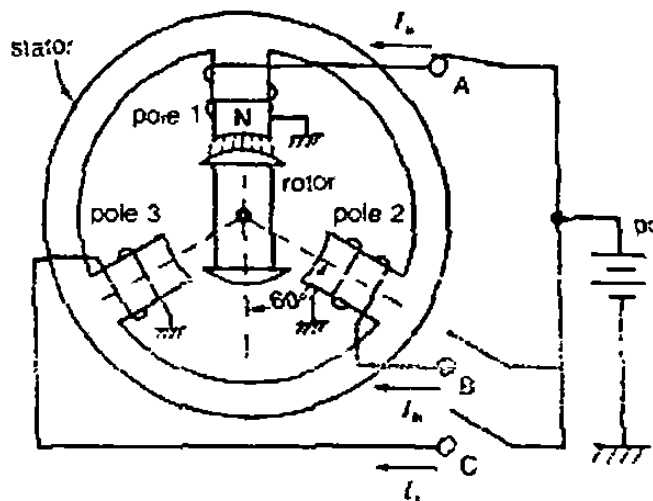


Figura 99 Motor a pasos elemental

Un motor simple de pasos es mostrado en la figura 99, consiste de un estator con 3 polos salientes y un rotor de 2 polos hecho de hierro dulce (moldeable). Las bobinas pueden ser conectadas a una fuente D.C. por medio de 3 switches A, B, C. Cuando los conmutadores están abiertos el rotor puede tomar cualquier posición. De todas maneras si el conmutador A es cerrado el resultante campo magnético creado por el polo 1 atraerá el rotor y entonces se alineará como se muestra.

Si nosotros ahora abrimos el conmutador A y si simultáneamente cerramos el conmutador B el conmutador se alinea con el polo 2, en ese momento rotará unos  $60^\circ$ . La

próxima vez si se abre el conmutador B y simultáneamente cerramos el conmutador C el rotor girara unos 60° adicionales, en ese momento se alinea en la polea 3. Claramente nosotros podemos hacer que el motor avances 60° por pasos cerrando o prendiendo los conmutadores en la secuencia A, B, C, A, B, C. De igual manera nosotros podemos poner en reversa la rotación operando las computadoras en la secuencia de reversa A, C, B, A, C, B. en orden de arreglar la posición final del rotor. El último conmutador que fue cerrado en una secuencia de conmutación debe ser nuevamente cerrado. Esto mantiene el rotor en su última posición y previene de moverlo bajo la influencia de fuerzas externas.

#### 10.4 Diferencias entre el motor de pasos y un motor de c.d. normal (motor de rotor libre)

Al trabajar con motores pequeños de corriente continua o motores de rotación libre. ¿Ha tratado alguna vez de posicionar con precisión algo utilizando un motor de este tipo? Puede ser bastante difícil. Aun cuando solo se le hace arrancar y entonces trata de detenerlo, la armadura no detiene inmediatamente, sino que sigue girando con cierta desaceleración hasta que se detiene por completo. Esto se debe a que estos motores tienen una aceleración y desaceleración muy gradual y su estabilización es lenta.

Si agregamos engranaje al motor ayudará a reducir este problema, pero aún así seguirá deteniéndose tiempo después del deseado y si deseamos controlar posiciones con estos, irán más allá de la posición en la que queremos que se detenga. A este tipo de motores generalmente se le agrega un servomecanismo para mejorar su precisión.

Los Servomecanismos son un pequeño mecanismo de retroalimentación que se agrega a estos motores (usualmente un potenciómetro incrustado en la flecha), y un circuito de control que compara la posición final del motor con la posición deseada y entonces mueve al motor según se necesite. Estos mecanismos pueden hacer bastante complejo y caro las aplicaciones que necesitan controlar posiciones y movimientos por medio de un motor de corriente continua o de rotación libre.

Los Motores de Pasos sin embargo, trabajan de una manera muy diferente y tienen características muy diferentes a estos motores de corriente continua antes mencionados:

- En primer lugar, no pueden rotar libremente por ellos mismos. Como su nombre sugiere ellos rotan o funcionan “a pasos por pasos” es decir van rotando o girando su rotor por instantes pequeños de tiempo, esperando una orden antes de ejecutar cada movimiento.
- Tienen un alto momento de torsión a bajas velocidades, es decir pueden generar un alto par de arranque a velocidades muy bajas. ( Los motores de cc antes mencionados no pueden generar un alto momento de torsión velocidad por ellos mismos, a menos que se les complemente con un mecanismo de engranaje). Esta característica de los motores de pasos les permite mantener firmemente su posición aún cuando no están girando.

Estas características de motores de pasos los hacen muy útiles en aplicaciones donde los motores deben a comenzar a rotar y entonces deben detenerse, mientras la acción de la fuerza de la carga que están moviendo permanece actuando contra él. Estos motores eliminan la necesidad de agregar un mecanismo de frenado mecánico.

Los motores de pasos no solo responden a una señal de reloj de entrada. Tienen varios embobinados que necesitan ser energizados en una secuencia correcta antes de que el rotor comience a trabajar. Si se invierte el orden de la sucesión causará que el rotor del motor gire en la dirección opuesta.

Si la señal de mando no se envía en el orden correcto, el motor no responderá adecuadamente. Simplemente zumbaría y no generaría ningún movimiento o trabajaría pero de una manera muy inadecuada es decir el rotor giraría de una manera brusca y sin ninguna secuencia.

El circuito que es el responsable por determinar el "pasos" y señalar la dirección adecuada de los modelos de energización de los embobinados del motor se le llama transductor (translator). Además del transductor, los motores de pasos necesitan los "drivers", que son los responsables de conducir la alimentación de corriente a los devanados del motor.

Un ejemplo básico de la configuración "transductor + driver" se muestra han la figura 100. Por lógica se separan los voltajes de alimentación al circuito lógico (transductor) y los voltajes de alimentación del motor. Normalmente el motor requerirá un voltaje diferente que el transductor que lo controla. Los valores típicos del voltaje del transductor son de +5 Vcd y de el motor de pasos puede variar desde +5 Vcd hasta aproximadamente +48 Vdc.

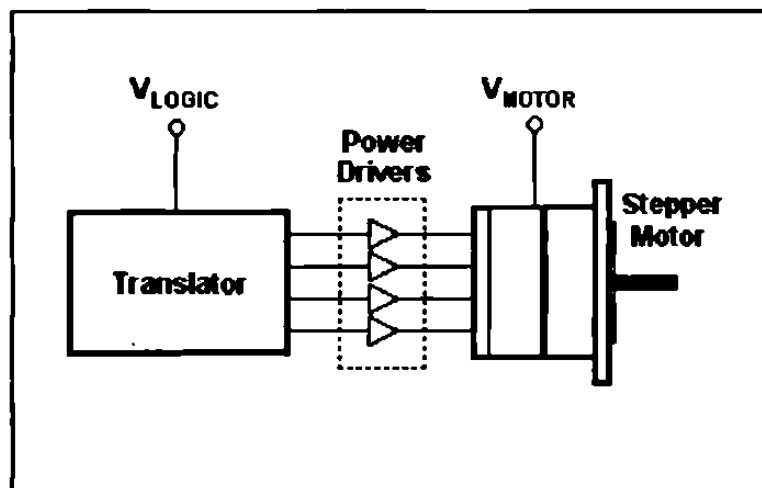


Figura 100 Diagrama básico de una conexión del Transductor y los Drivers de un Motor de Pasos



El driver tiene una configuración de "colector abierto", en qué le toma las salidas de los embobinados de el motor y las mandara a tierra para activar estos embobinados. Esto debido a que la mayoría de los circuitos semiconductores trabajan aterrizados (es decir, al alimentarles a tierra o a un voltaje negativo) que conectados a la fuente de alimentación de voltaje.

## 10.5 Características Más Comunes de Los Motores de Pasos

El comportamiento de los motores de pasos no solo esta determinado por el voltaje. Los siguientes parámetros también definen el comportamiento a la salida de un motor de pasos.

- **Voltaje:**

Los motores de pasos generalmente tienen un rango de voltaje. Este está impreso directamente en la unidad, o se especifica en el manual del fabricante del motor. Exceder el valor del voltaje máximo es algo que se hace para mejorar el momento de torsión del motor, pero esto no sólo lo sobrecalentará, sino que también acortara la vida del motor.

- **Resistencia:**

La resistencia por devanado determinará la trayectoria de alimentación que requiere el motor, también definirá la curva momento de torsión - velocidad en la operación del motor.

- **Grados por pasos:**

Este es a menudo el factor más importante que hay que tomar en consideración al escoger un motor de pasos para una aplicación dada. Este factor especifica el número de grados que el rotor girará por cada pasos completo. Un medio pasos duplicará el número de pasos por revolución y disminuirá el número de grados por pasos a la mitad. Si se tiene un motor de pasos que no tenga especificado el valor de grados por pasos, es posible conocer el número de pasos por revolución del motor. Se pueden calcular los grados por pasos al dividir 360 por el número de pasos en 1 revolución completa del motor. Los valores más comunes de Grados por pasos en los motores de pasos incluyen: 0.72, 1.8, 3.6, 7.5, 15, y 90 grados por pasos. A los grados por pasos se les llama a menudo la resolución del motor. Si se tiene un motor tiene impreso sólo el número de pasos por revolución, se divide 360 por este número y se obtendrá el valor grados por pasos del motor.

## 10.6 Tipos de Motores de Pasos

Los motores de pasos se dividen en tres categorías básicas.

- Motores de pasos con Reluctancia variable.
- Motores de pasos con Magneto permanente.
- Motor de pasos Híbrido

El tipo de motor determinará el tipo de los drivers y el tipo de transductor que utilizará.

Por otro lado, los motores de pasos con magneto permanente se dividen a su vez en tres subcategorías:

1. Motores de pasos con magneto permanente Unipolares
2. Motores de pasos con magneto permanente Bipolares
3. Motores de pasos con magneto permanente con variedad de Multifases

## 10.7 Motores de Pasos con Reluctancia Variable

A veces llamado motores Híbridos, los motores de pasos de reluctancia variable son los más simples de controlar comparándolos con los demás motores de pasos. La secuencia del driver que utiliza este motor es simplemente dar energía a cada uno de los devanados en orden, uno después del otro (ver la tabla de energización mostrada en la figura 101). Este tipo de motores de pasos a menudo tendrá únicamente un cable el cual es el común para todos los devanados. Este tipo de motor se siente como un motor de D.C. cuando la flecha se hace girar a mano, ya que gira libremente y no se pueden sentir los pasos al tocarlo. Este motor de reluctancia variable no se magnetiza permanentemente ni bipolar ni unipolarmente.

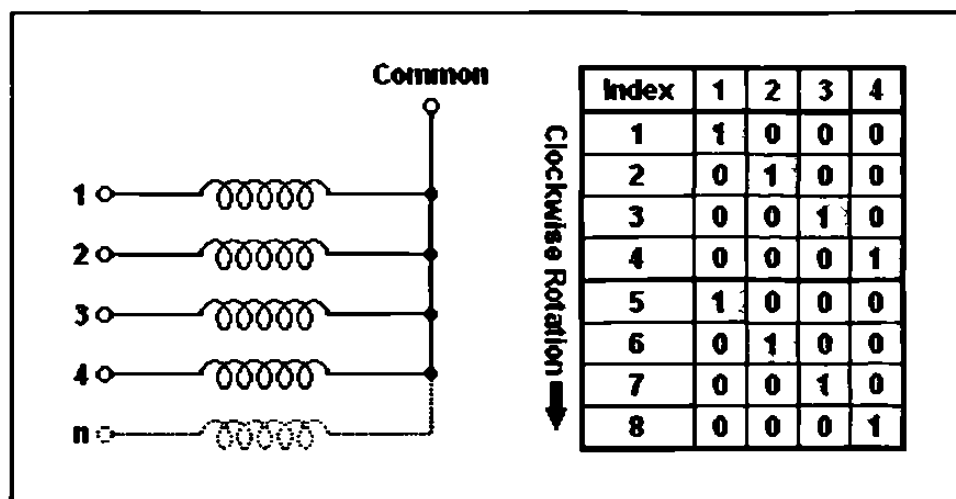


Figura 101

Diagrama básico de los devanados de un motor de reluctancia variable (izquierda) y tabla de secuencia de alimentación del driver (derecha)

En los motores de pasos con reluctancia variable el estator frecuentemente tiene 4 polos principales y las fases de los polos son de 1 a "n" hasta producir un número de polos dados. El rotor también es dentado cada diente corresponde a un polo saliente. El número de dientes (polos) del rotor y estator determina el ángulo de movimiento por pasos. Los valores más comunes de grado por pasos en los motores de reluctancia variable son de  $18^\circ$ ,  $15^\circ$ ,  $7.5^\circ$ ,  $5^\circ$  o  $1.8^\circ$ .

### 10.8 Motores de Pasos con Magneto Permanente:

Son similares a los anteriores con la diferencia que el rotor tiene dos polos Norte y Sur nos evocaremos a la figura antes mostrada que representa a un motor de magneto permanente.

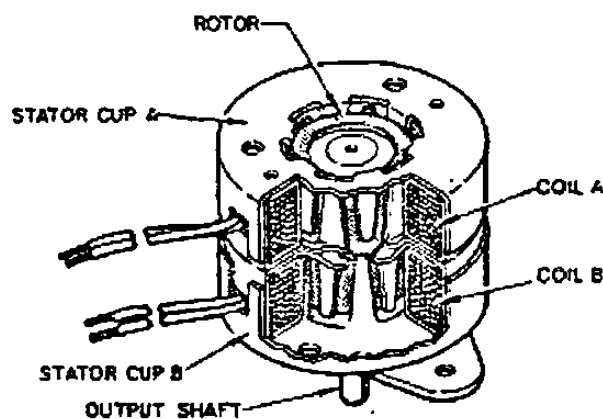


Figura 102 Motor de pasos con magneto permanente

Teniendo los polos magnéticos permanentes el rotor procura alinearse con los 2 últimos polos que fueron excitados por el conductor. En efecto el motor desarrolla un llamado torque de detención que mantiene el rotor colocado a pesar que no ocurran

corrientes en las bobinas del estator. Las bobinas A1, A2, son conectadas en serie como están las bobinas B1, B2. Comenzando de la posición mostrada si las bobinas B son excitadas el rotor se moverá a través de un ángulo de  $30^\circ$ . De todas maneras la dirección de rotación depende de la dirección de corriente.

### 10.8.1 Motores de pasos con magneto permanente Unipolares:

Este tipo de motores son relativamente fáciles controlar. Un circuito contador simple de 1 a 'n' puede generar la secuencia apropiada de pasos para el funcionamiento del motor, y como driver se usa un simple transistor por devanado. Los motores Unipolares son caracterizados por su devanados de derivación central. Un esquema de la instalación eléctrica común se realiza tomando todos los devanados de derivación central y alimentarlos con + MV (voltaje de motor). El circuito del driver aterrizaría cada devanado para energizarlo.

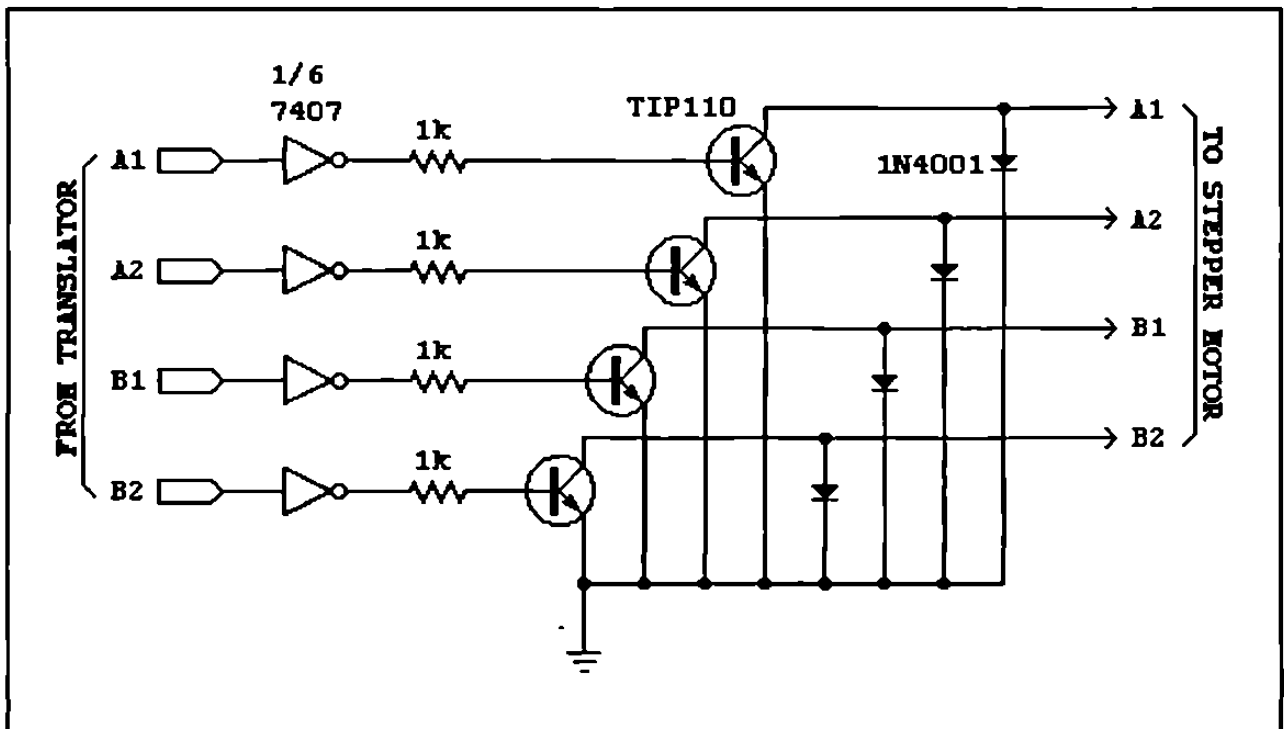


Figura 103

El circuito del driver de un motor de pasos Unipolar típico.  
Nótese los 4 diodos utilizados para la protección del circuito.

Los motores de pasos unipolares son reconocidos por sus devanados de derivación central. El número de fases es dos veces el número de devanados, dado a que cada devanado se divide en dos. Así el diagrama de la figura 104, que tiene dos devanados de derivación central, representa la conexión de un motor de pasos unipolar con 4 fases.

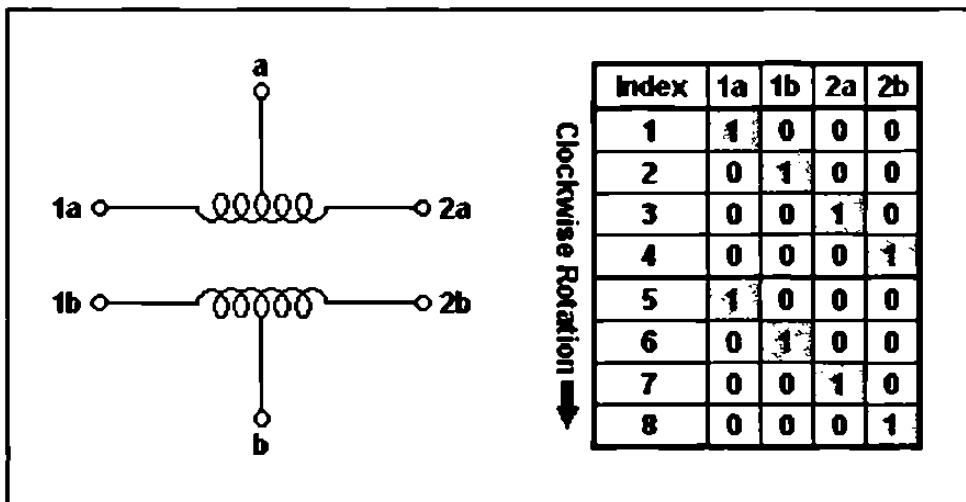


Figura 104

Diagrama básico de los devanados de un motor de pasos unipolar (izquierda) y tabla de secuencia de alimentación del driver (derecha)

Además de la secuencia estándar de energización del driver, es posible tener secuencias para que el motor trabaje con alto momento de torsión o para que trabaje con la mitad de un pasos. Para lograr una secuencia de alto momento de torsión, los dos devanados son activados al mismo tiempo para cada pasos del motor, esta combinación de los dos devanados rinde alrededor de 1.5 veces más momento de torsión que en la secuencia normal, pero consume el doble de corriente.

Para alcanzar una secuencia para la mitad de un pasos se combinan las dos secuencias. Primero, se activan uno de los bobinados, después dos, después uno, etc. Este efectivamente duplica el número de pasos que el motor avanzará por cada revolución de la flecha del motor, y disminuye el número de grados por pasos en la mitad.

Index	1a	1b	2a	2b
1	1	0	0	1
2	1	1	0	0
3	0	1	1	0
4	0	0	1	1
5	1	0	0	1
6	1	1	0	0
7	0	1	1	0
8	0	0	1	1

Alternate Full Step Sequence  
(Provides more torque)

Index	1a	1b	2a	2b
1	1	0	0	0
2	1	1	0	0
3	0	1	0	0
4	0	1	1	0
5	0	0	1	0
6	0	0	1	1
7	0	0	0	1
8	1	0	0	1
9	1	0	0	0
10	1	1	0	0
11	0	1	0	0
12	0	1	1	0
13	0	0	1	0
14	0	0	1	1
15	0	0	0	1
16	1	0	0	1

Half Step Sequence

Figura 105 Secuencia del driver para dos fases por pasos (izquierda) Secuencia del driver para mitad de pasos (derecha)

## 10.8.2 Motores de pasos con magneto permanente Bipolares

A diferencia de los motores de pasos con magneto permanente unipolares, los motores de pasos Bipolares requieren una circuitería del driver más compleja. Los motores de pasos con magneto permanente bipolares se caracterizan por excelentes dimensiones de su radio de torsión, y proporciona más momento de torsión para ese tamaño que los motores unipolares. Se diseñan motores bipolares con devanados separados que necesitan ser energizados en cualquier dirección. (La polaridad necesita invertirse durante su funcionamiento) para el apropiado funcionamiento del motor. Este tipo de motores presenta un driver sofisticado. Los motores de pasos con magneto permanente bipolares utilizan la configuración binaria para alimentar los drivers al igual que los motores unipolares; pero en el caso de los motores bipolares las señales “0” y “1” corresponden a la polaridad del voltaje aplicado a los devanados y no simplemente señales de “encendido” y “apagado” (“on-off”). La figura 106 muestra un arreglo básico de un devanado bipolar de 4 fases y su secuencia de energización.

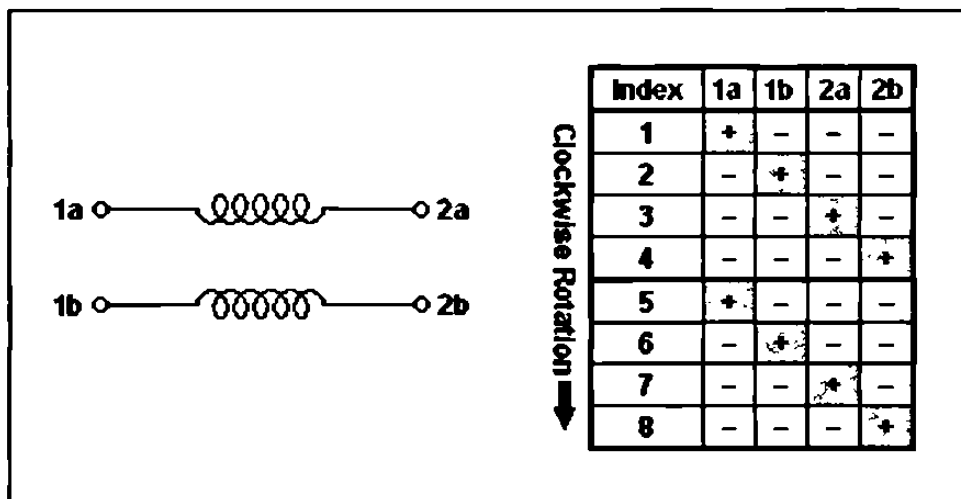
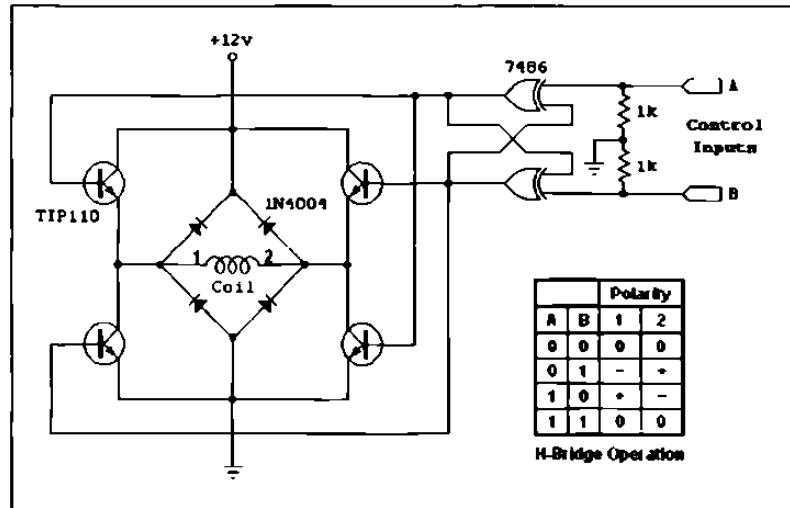


Figura 106 Diagrama básico de los devanados de un motor de pasos bipolar (izquierda) y tabla de secuencia de alimentación del driver (derecha)

Un circuito conocido como Puente-H (figura 107) se usa comunmente. Cada devanado del motor de pasos bipolar necesita su propio driver de Puente-H. Un motor de pasos típico tiene 4 alimentaciones conectadas a dos devanados en el motor. Hay muchos circuitos integrados para ser usados como drivers en el motor de pasos. Convenientemente, estos circuitos integrados para puente-H normalmente tienen un par de puentes-H dentro de ellos, así estos circuitos tienen una cantidad mínima de partes para funcionar, siendo más pequeños los circuitos. Un problema con el puente-H (circuito básico) es que con cierta combinación de valores de entrada tasa (es decir que ambos sean '1's) el resultado es que el voltaje que alimenta al motor es disminuido por el efecto de los transistores. Un circuito EX OR pequeño se agregó circuito de la lógica en figura 107 para evitar que una combinación de '1's entre por los transistores.



**Figura 107**

Un circuito típico de Puente-H. Los 4 diodos son para protección del circuito

## 10.9 Motores De Pasos Híbridos

Tiene 2 armaduras idénticas montadas en el mismo pozo, las armaduras son indexadas de tal manera que los polos salientes están interlapados. El arreglo de los motores híbrido hace que el rotor se vea como un motor de reluctancia variable. Pero tienen un imán permanente PM presionado entre la armadura. Esto produce un campo magnético axial con el resultante de que todas las poleas en la primer armadura son "N" poleas mientras aquellas en la segunda armadura son "S" polos. Las bobinas del estator son conectadas en serie y de la misma manera el rotor recordara en la posición mostrada. La dirección de rotación de nuevo dependerá de la dirección de la corriente en la bobina

## 10.10 Circuitos Transductores

En esta sección mostraremos ejemplos de circuitos básicos transductores para un motor de pasos sencillo. Al implementar un circuito antes de soldarlo es necesario probarlo para verificar su adecuado funcionamiento con el motor trabajando.

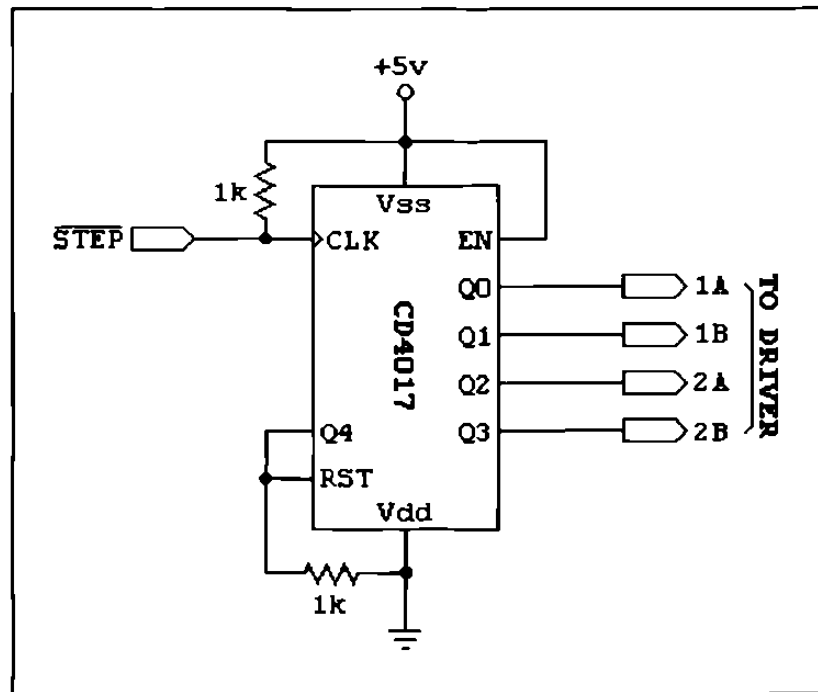
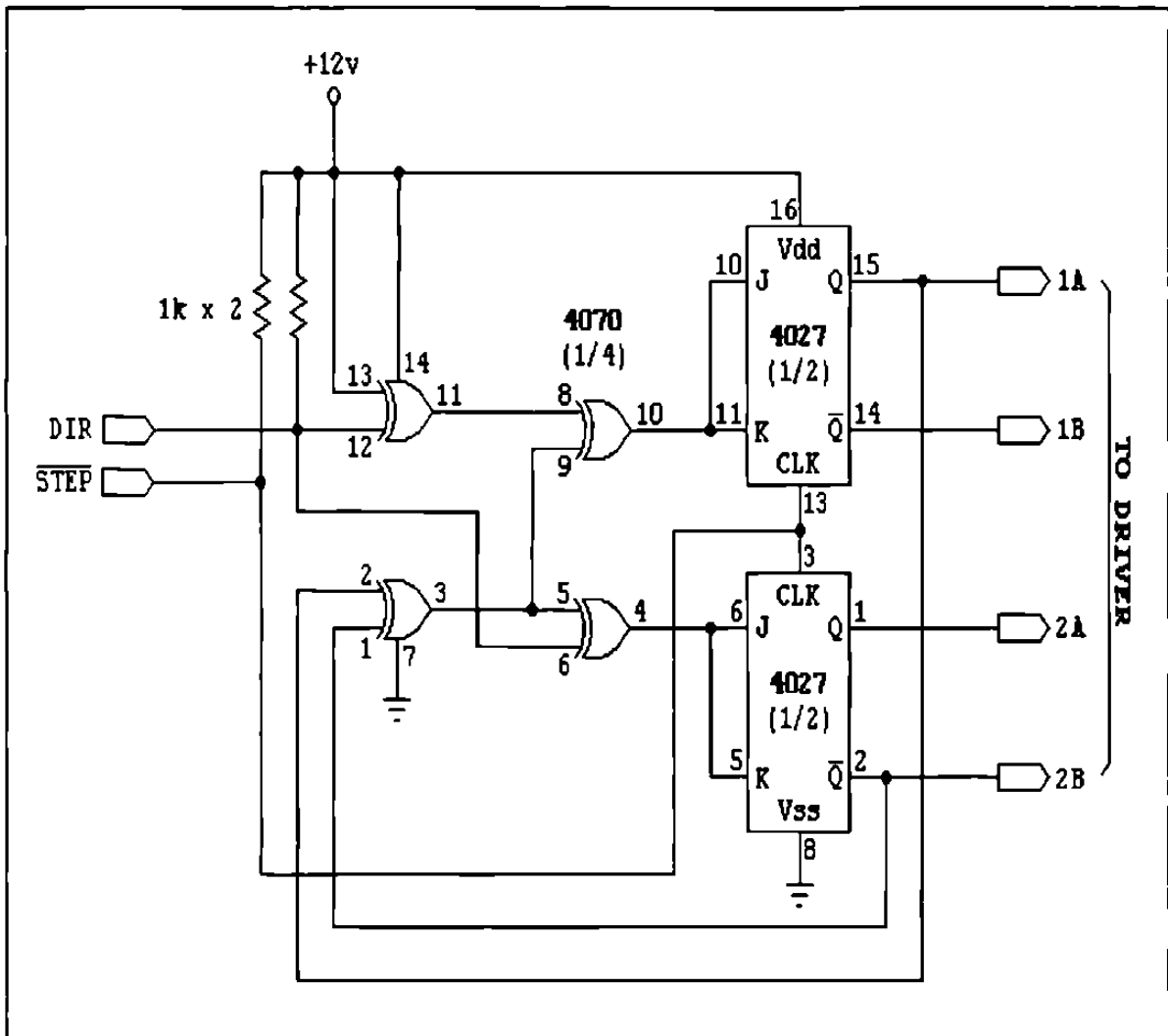


Figura 108 Circuito integrado CD4017

La figura 108 ilustra la solución más simple a generar un uno por fase en la sucesión del driver. Para un motor de pasos unipolar como el mostrado en la figura 104 o para un motor de pasos bipolar de la figura 106, pueden ser conectados a las cuatro salidas de este circuito para proveer un circuito completo de driver - transductor. La limitante de este circuito es que no puede invertir la dirección del giro del motor. Este circuito estaría más útil en aplicaciones donde el motor no necesita cambiar direcciones.

La figura 109 muestra un transductor por funcionamiento de dos fases. Este circuito es. Éste circuito tiene un problema, cuando se invierte la dirección y continúa girando el motor adelantará 1 pasos más en la dirección previa que iba antes de responder.





**Figura 109**

Ejemplo de un transductor para ambas direcciones  
(Con adelantamiento de un grado)

Por último la figura 110 muestra un circuito que trabaja en ambas direcciones sin proporcionar ningún problema.

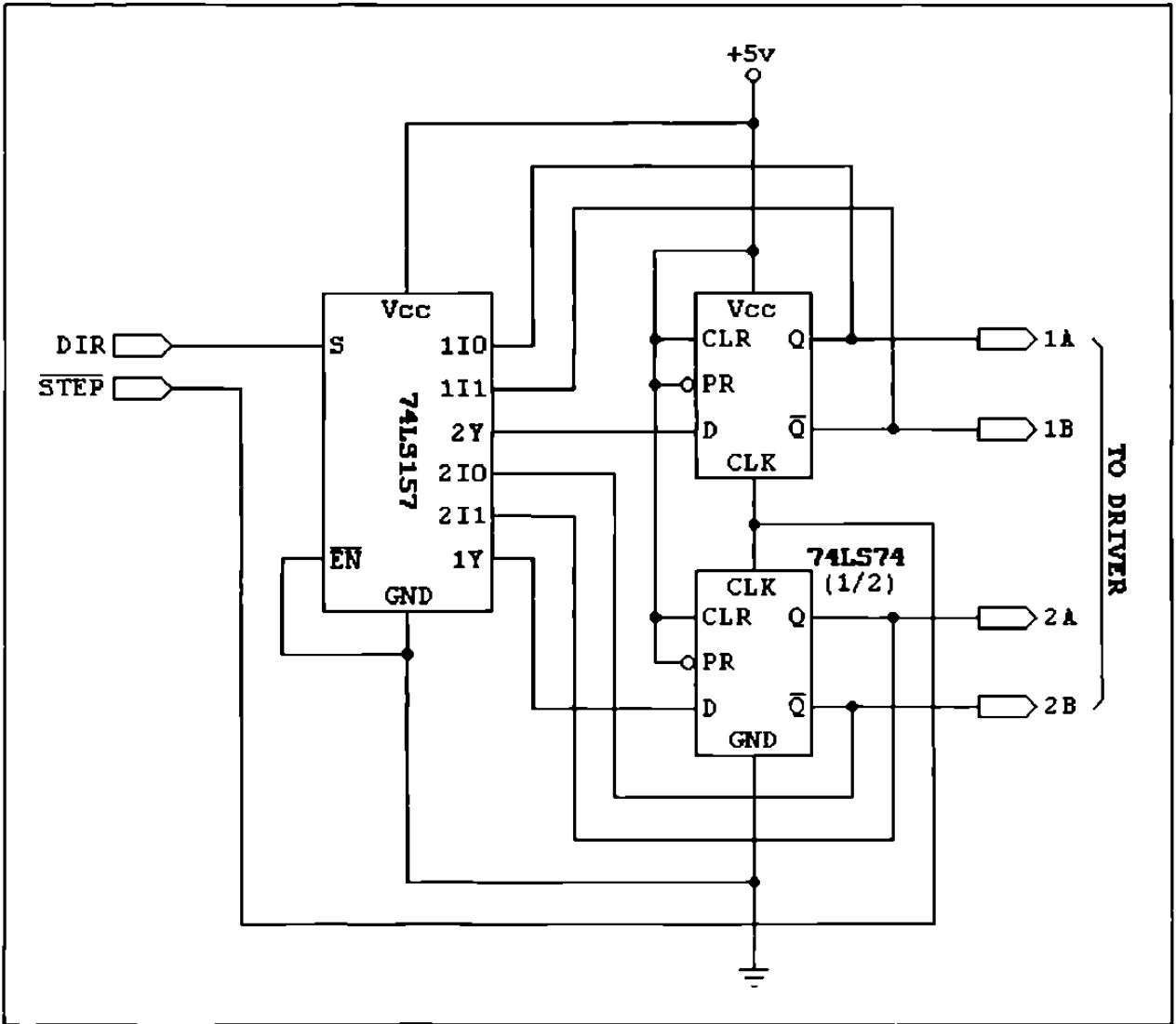


Figura 110 Circuito electrónico bidireccional para motores de paso

# 11. CONTROL ELECTRONICO DE MOTORES

## 11.1 Introducción

La industria, en el sentido más amplio de la palabra, y los transportes, cada vez tienen mas necesidad de sistemas de velocidad variable de forma continua, dotados de flexibilidad y precisión. Evidentemente, todavía se utilizan las soluciones mecánicas e hidráulicas, pero hoy en día, las soluciones eléctricas son, con mucho las mas apreciadas. Su éxito es fruto de las características incomparables que le confiere la electrónica, tanto en el aspecto de conversión de energía como en el de retroalimentación del sistema.

En la actualidad (y todavía por bastante tiempo), los motores de corriente continua, que por naturaleza son maquinas de velocidad variable, son los mas utilizadas, los motores de corriente alterna se introducen en sectores prohibidos a los motores de corriente continua por razones de medio ambiente o limitaciones mecánicas (velocidad) o incluso eléctricas (voltaje), siendo por tanto complementarios.

Ciertamente, los principios del control electrónico de los motores de corriente continua se conocen desde hace mucho tiempo, pero la industrialización se debió a los progresos extraordinarios conseguidos en la última década en el campo de los semiconductores de potencia, los componentes de pequeña señal, de los circuitos integrados, y más recientemente de los microprocesadores lo que ahora hacen posible y hasta cierto punto sencillo poder controlar la velocidad de los motores de c.a. mediante la variación de la frecuencia del voltaje aplicado al motor.

## 11.2 La Regulación de Velocidad

Para efectuar un determinado trabajo con unas prestaciones dadas, el sistema ha de estar retroalimentado. El primer papel de un sistema de regulación es obligar a la magnitud o magnitudes retroalimentadas (salidas del sistema) a conservar valores tan próximos como sea posible a los que se consideren como ideales. Estos valores ideales o teóricos, son a su vez funciones de las magnitudes de entrada del sistema: "referencia" y "perturbación". Si procedemos de forma que como entradas suplementarias utilizaran funciones de las magnitudes de salida, habremos creado un <<lazo cerrado>> o un control con retroalimentación. Inversamente, si no hay retorno de la salida hacia la entrada se habrá hecho un sistema de lazo abierto, como el control del acelerador de un coche.

Hay tres razones para utilizar el control de retroalimentación. En primer lugar, es el medio más cómodo para realizar las relaciones deseadas entre la entrada y la salida. También permite compensar de forma interna las imprecisiones y las derivas de las características de los componentes del sistema. Por último, y es el punto que normalmente se considera más importante, al menos desde el punto de vista del explotador, minimiza las perturbaciones que, procedentes del exterior del sistema, afecta a la salida.

### 11.3 Funciones de un Regulador

A un regulador no solo se le pide hacer coincidir el valor de la variable primaria, sino también realizar un cierto número de funciones necesarias para el buen comportamiento de la máquina:

- Limitación de las magnitudes críticas: como la corriente o la tensión de inducido. Esta es una función de protección.  
Si se alcanza el valor límite de la variable secundaria, el sistema de regulación abandona el control de la variable primaria y se dedica a la vigilancia de la variable secundaria, manteniéndola tanto como necesite en su valor límite.
- Control preciso de las variables de forma que se eviten evoluciones excesivamente rápidas de las mismas.  
Por ejemplo, el control del gradiente de corriente en un inducido es necesario para obtener una conmutación, y como consecuencia para mantener el colector en buen estado.
- Paso sin golpe de un modo de control a otro.  
La conmutación de la regulación de velocidad con limitación de corriente a la Regulación de corriente debe hacerse sin brusquedades.
- Ajuste y optimización fáciles de un lazo de control, independientemente de los otros.

### 11.4 Principios de Regulación

Los tres conceptos de sistemas retroalimentados son:

11.4.1 la regulación en lazos convergentes

11.4.2 la regulación lineal con lazos múltiples o en cascada

11.4.3 la regulación con lazos en paralelo, o de conmutación paralela.

Estos tres métodos permiten controlar la variable principal y limitar las variables secundarias, a continuación se hará un breve análisis de cada uno de ellos.

#### 11.4.1 Regulación en lazos convergentes

Un sistema convergente está formado por un solo regulador, por lo menos en una versión simplificada suficiente para la explicación del principio. La señal de reacción proveniente de la variable realimentada principal (velocidad) está presente constantemente en la entrada de el regulador.

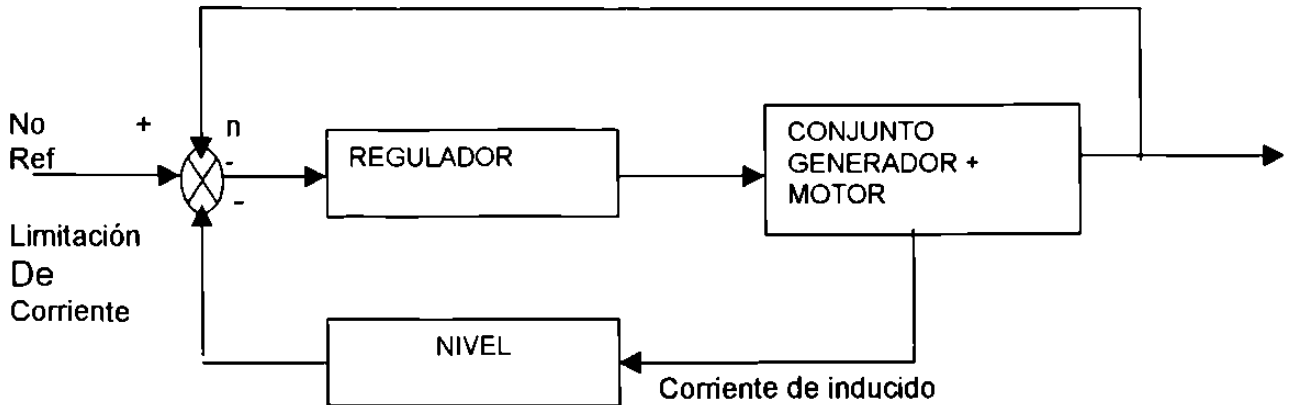


Figura 111 Esquema de regulación convergente.

La señal proveniente de la variable secundaria (en este caso la corriente), se compara aun umbral y de alguna manera se bloquea mientras no se alcanza el valor de limitación. Por encima del umbral, el exceso alcanza la entrada del regulador y contrarresta la señal de retorno de velocidad, tendiendo así a limitar la corriente de inducido.

Una ventaja evidente de este concepto es que pide relativamente poco material, siendo una opción poco costosa; sin embargo, presenta un cierto número de inconvenientes no despreciables. Como solo hay un regulador para dos variables, se ha de llegar a un compromiso entre sus ajustes, lo que provoca en el momento de la puesta en marcha, mayor trabajo para ajustar las ganancias que con los dos sistemas que hemos citado. Por ultimo y quizá sobre todo, la limitación de corriente, no solo depende del umbral impuesto en la señal de reacción (o zona muerta) y de la ganancia del lazo de corriente, sino también de la referencia de velocidad: cuando la referencia de velocidad aumenta, la limitación de la corriente también se eleva. Esto se puede remediar mas o menos limitando la variación de velocidad.

#### 11.4.2 Regulación lineal con bucles múltiples (sistema en cascada)

Un sistema de regulación en cascada esta formada por un regulador individual para cada una de las variaciones controladas. La variable retroalimentada principal (velocidad) se regula por el lazo exterior. La salida del regulador de velocidad sirve de entrada al regulador del lazo interior, en este caso un lazo de corriente. Limitando la salida del regulador externo de velocidad, se limita por tanto la referencia del regulador interno de corriente y se obtiene de forma muy simple la característica de limitación deseada

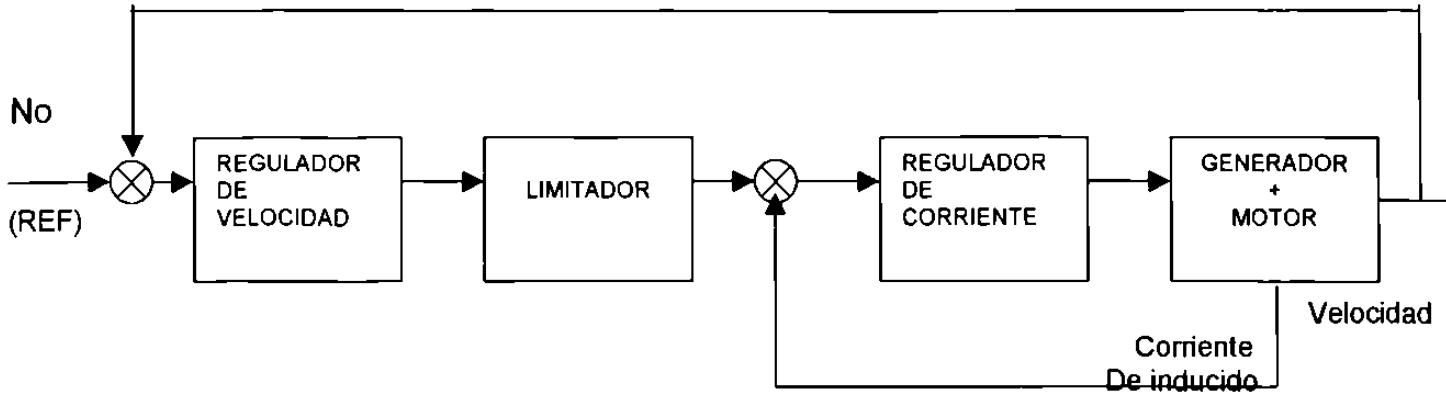


Figura 112 Esquema de regulación en cascada

En general, los sistemas de regulación en cascada se diseñan de forma que solo tengan una o dos constantes de tiempo principales en un lazo, que se puedan compensar directamente en el interior de los reguladores correspondientes, como consecuencia de ello, resulta que el cálculo de estos sistemas es relativamente sencillo.

#### 11.4.3 Regulación paralela

Al igual que en el sistema en cascada, el sistema de comunicación paralela utiliza un regulador separado para cada variable que se ha de controlar.

Por el contrario, las salidas de estos reguladores se conectan, gracias a un dispositivo de conmutación, a una salida común que es el borne de entrada del sistema de potencia que alimenta al motor. En este dispositivo, solo un regulador está en servicio en todo momento: esta es la diferencia fundamental con el montaje en cascada, en que todos los reguladores actúan permanentemente.

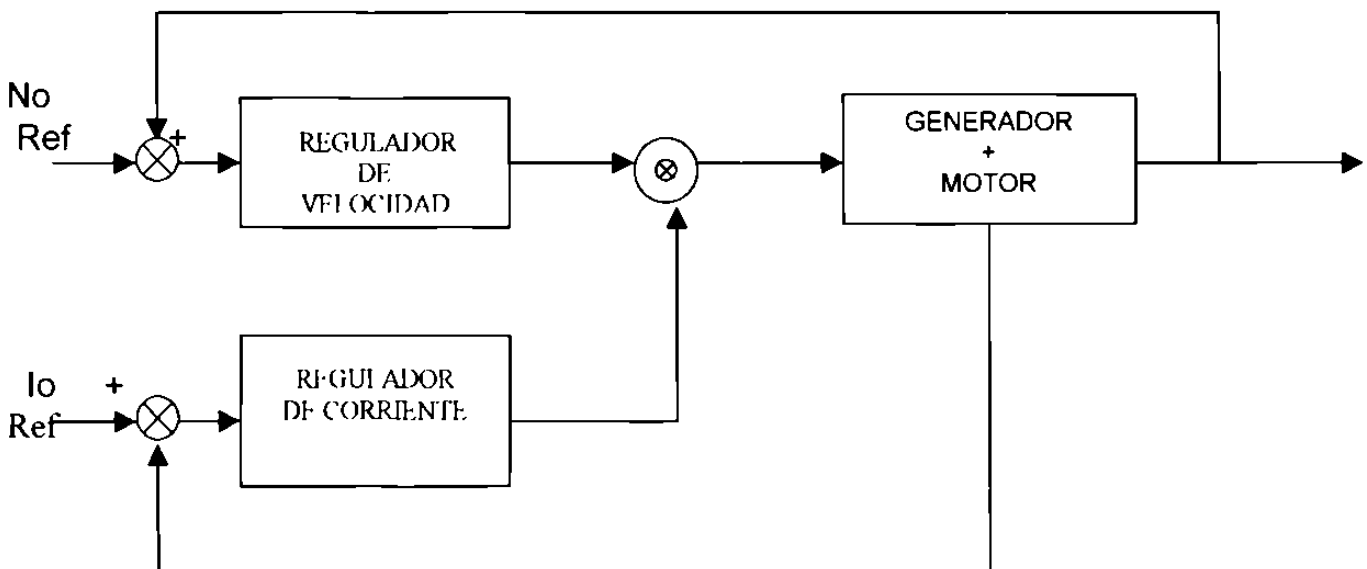


Figura 113 Esquema de la regulación paralela

En resumen, las características de la regulación paralela se describen de la siguiente manera:

- A cada variable bajo control le corresponde un regulador separado; por lo tanto cada lazo se puede regular al óptimo.
- Se pueden regular las características dinámicas y estáticas de una regulación paralela independientemente unas de otras.
- Se puede hacer la transferencia sin golpe de un modo de conmutación a otro.
- El estudio, el cálculo y la puesta en servicio de los reguladores son sencillos, por el hecho de que cada lazo sea independiente con relación a los otros
- Con una relación en paralelo, se puede obtener una respuesta más rápida que con un sistema en cascada, con la condición de que el sistema no contenga más de dos constantes de tiempo mayores.

La conclusión a la que llegamos es que la comparación de los tres conceptos de regulación demuestra que los dos últimos son netamente superiores al montaje con lazos excepto en un punto. Esta es la cantidad de componentes necesarios, que en el caso de una regulación convergente es más pequeña; pero en la práctica, la economía es pequeña y casi siempre se puede considerar despreciable.

Limitando la comparación a los sistemas cascada y paralelo, vemos que cada uno de estos dos conceptos tiene ciertas ventajas específicas, de forma que la elección entre ellos dependerá del sistema al que vaya destinado.

## 11.5 Inversor de Frecuencia para Corriente Alterna

En el área de la industria se requiere del control de velocidad de un motor, esto se puede lograr por medio del cambio de poleas en el motor (variando el diámetro), también aplicando resistencias al devanado (esto es abriendo el devanado y poniendo una resistencia fija con un valor calculado para obtener la velocidad necesitada), otra forma es cambiando el número de polos del motor (es decir cambiando el motor completo, ya que el número de polos de un motor está determinado en su diseño), y otra manera es variando la frecuencia de alimentación del motor, esto se logra con dispositivos llamados Inversores de Frecuencia (o Variador de Velocidad). Este último está sustituyendo a los demás métodos ya que es mucho menos complicado y no requiere de mantenimiento debido a que es un dispositivo electrónico que solo necesita trabajar en condiciones normales de operación establecidas por los fabricantes.

## 11.6 Definición de “Drive” de Corriente Alterna

El drive de frecuencia ajustable es un dispositivo electrónico de estado sólido para controlar la velocidad de los motores de C.A.

Los nombres que recibe son: Inversor de frecuencia, Drive de C.A., Variador de velocidad, Control de velocidad, Invertidor, Convertidor de frecuencia, o simplemente inversor.

En la actualidad, existen dos tipos de inversores:

- Tipo Convencional
- Tipo Vector

## 11.7 El inversor tipo Convencional.

Es para propósitos generales, está diseñado para aplicaciones donde se requiera torque constante, pero la desventaja que tiene es que a bajas velocidades (en un rango de 1 a 10 Hz), empieza a perder torque, ya que por su diseño no es posible obtener más torque a esas velocidades, por lo tanto, en aplicaciones donde se requiera mantener el torque a bajas velocidades se utiliza el inversor tipo Vector, que proporciona un 100% de torque en la flecha del motor a velocidad cero “0”. (Esto es enfocado en la marca Safronics, el modelo de este inversor es VG5).

## 11.8 Inversores tipo Vector

Debido a que los inversores tienen un diseño PWM su salida es escalar. Esto significa que la salida de voltaje está escalada en un método de control de Volts/Hz. Esta relación de Volts/Hz usualmente tiene un número de funciones programables disponibles. Estas funciones o patrones permiten al inversor alcanzar las características de desempeño del motor o motores para alcanzar los requerimientos de alguna aplicación. El microprocesador y el número de bits que procesara determina la regulación de frecuencia o la precisión de control. Por ejemplo, un control de 8 bits tiene incrementos de 0.5 Hz, y un control de 16 bits equivale a una resolución de 0.1 Hz. Debido a que los inversores convencionales son comúnmente de lazo abierto y usualmente no tienen alguna forma de retroalimentación, los inversores tienen un desempeño definido, pero los motores requieren de un deslizamiento sobre una demanda de torque. Un verdadero control de torque y control de regeneración son difíciles de obtener con los inversores convencionales.

El control Vector puede ser definido como:

Control de flujo, control de posición de campo orientado, torque contra control de deslizamiento, la manufactura de los diferentes inversores tipo vector usan varios métodos de software y hardware para la definición de términos de referencia, pero el resultado final usualmente provee de una respuesta rápida, una excelente regulación de velocidad y un control de torque muy preciso. Los métodos del control vector son matemáticamente muy



complejos y por lo tanto no se mencionaran en este escrito. Mencionaremos sin embargo algunas de las habilidades del control y de los elementos que logran el desempeño del control de flujo

Con el fin de obtener una buena regulación de velocidad, control de torque incremental, el motor usado con un inversor tipo vector, debe tener su propia personalidad o características de operación, definidas por el microprocesador del inversor. Entre mayor sea la información obtenida podemos un mejor desempeño del inversor

Una de las características más importantes del inversor tipo vector, es el autotuning para el motor. Autotuning es el método por el cual el inversor vector estudia al motor. En algunas aplicaciones, nosotros necesitamos de información en otras condiciones dinámicas de operación para que el inversor pueda responder mejor a estos cambios. La lógica del inversor requerirá resistencia del estator (en caliente y en frío), resistencia del rotor (frío y en caliente), deslizamiento, factor de potencia, voltaje y corriente del estator, frecuencia del estator, saturación del entrehierro, inductancia del estator, inductancia del rotor, e inductancia de magnetización.

Esta información junto con la información procesada del inversor vector y otros atributos hacen del desempeño vector una realidad.

Características principales del inversor tipo vector:

- ✓ Regulación del 0.01% de la velocidad de referencia para un 100% de cambio en la Carga.
- ✓ Control incremental de torque, mejor del 100% del valor de torque del motor, a velocidad cero.
- ✓ Respuesta tipo servo a cambios instantáneos en la carga o en la referencia.
- ✓ Siempre hay que recordar que, solamente un motor puede ser usado en un inversor tipo vector debido a las características requeridas.

Las características únicas de control del inversor tipo vector han hecho realmente posible, el remplazo de aplicaciones de control de motores de c.d. con control de motores de c.a.

## 11.9 Componentes que Forman a Un Inversor

El inversor puede dividirse en 4 principales componentes

- 1- Convertidor o Rectificador
- 2- Circuito Intermedio.
- 3- Circuito Inversor
- 4- La Electrónica del Circuito de Control

### 1.- Convertidor o Rectificador.

Convierte la alimentación trifásica de c.a. a voltaje de c.d. pulsante, el convertidor puede ser controlado (SCR'S) y no controlado (Diodos).

### 2.- Circuito intermedio:

hay varios tipos, el más usado es el que estabiliza el voltaje de c.d. pulsante y envía este voltaje regulado al circuito inversor.

### 3.- Circuito inversor:

el cuál convierte un voltaje constante de c.d. a voltaje de c.a. variable y control de la frecuencia al motor.

Los principales semiconductores usados son:

- SCR'S (Voltaje medio, 2300, 4160 7200 volts)
- Transistores Bipolares
- Transistores IGBT'S
- MOS-FET
- GTO'S

El switcheo del inversor es en dos patrones, uno llamado PAM "Pulse Amplitude Modulation" y el otro llamado PWM "Pulse Width Modulation". El más empleado es el control PWM.

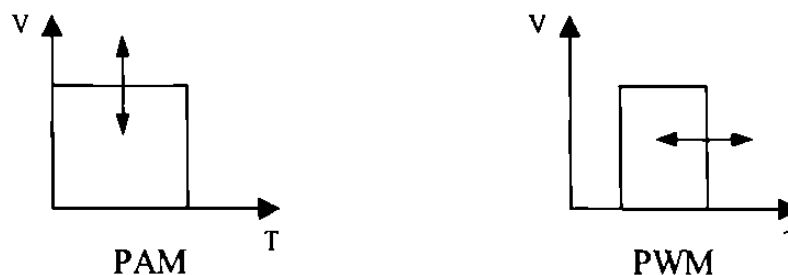


Figura 114 Comparación entre los métodos de modulación PAM y PWM

### 4 - La electrónica del circuito de control:

el cual envía señales al rectificador, circuito intermedio y al circuito inversor, donde se también se encuentra el microprocesador, memorias, puertos de comunicación al drive.

A continuación se muestra un diagrama esquemático de los componentes internos más principales de un inversor. El diseño de los inversores varia entre marcas fabricantes, pero en principio son construidos en el mismo modo.

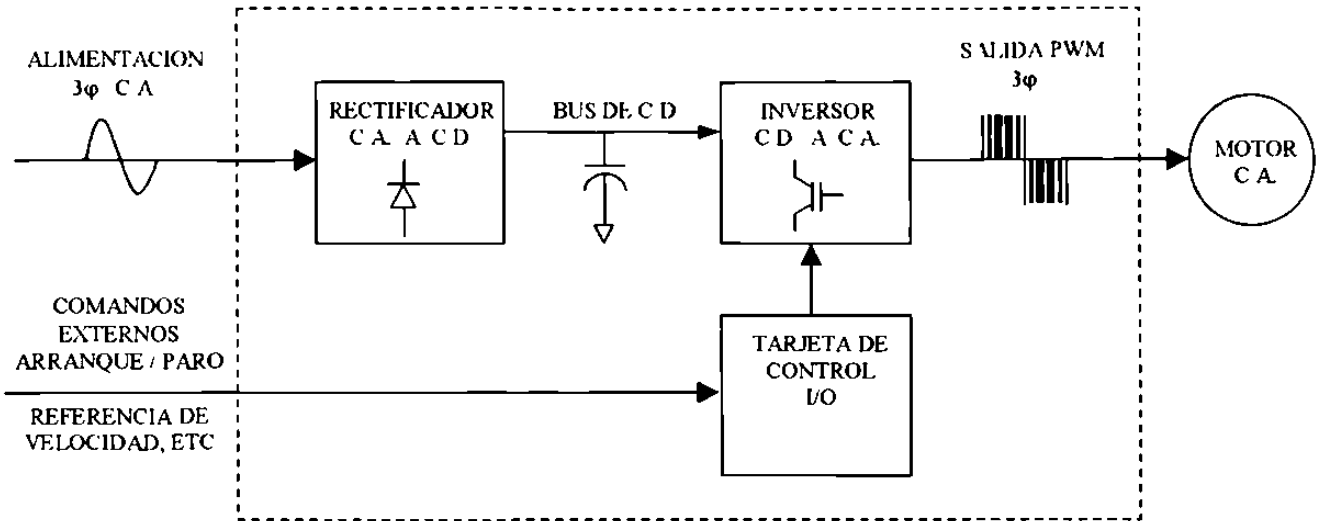


Figura 115 Diagrama de un inversor de frecuencia

En la actualidad se cuenta con la tecnología de los transistores IGBT'S, que combinan las características de los transistores MOSFET y las de los bipolares lo que permite que actúe con grandes tensiones y corrientes a una elevada velocidad. Otra característica de estos nuevos dispositivos es que en condiciones estadísticas no utiliza corriente de excitación en la compuerta.

Se fabrica en una nueva combinación de técnicas MOS y bipolares. Según su característica de entrada es comparable con la de un transistor de efecto de campo de autobloqueo (MOSFET) y por lo tanto se puede controlar casi sin potencia. Del lado de salida, el IGBT es similar al transistor bipolar de potencia (PTR), y consecuentemente puede conmutar con tensiones relativamente altas (actualmente de 600 a 1400 Volts) así como altas corrientes (actualmente 100 Amps por chip), con mayor frecuencia de pulsos.

En módulos con aislación interna eléctrica a la placa metálica de base, los chips de silicio de los IGBT'S así como los diodos inversor rápidos asociados se conectan entre sí de acuerdo con diagramas circulares fijos. Para esto se utiliza una técnica optimizada de unión y armado. Tales módulos partes constituyentes de un inversor.

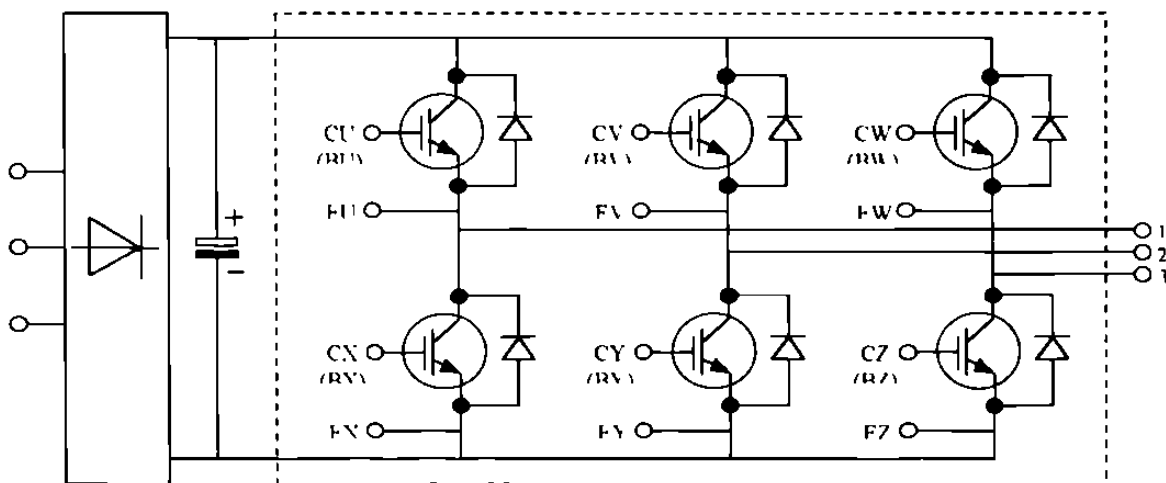


Figura 116 Modulo de transistores de 6 pulsos para un motor trifásico

Con el diseño de los brazos del puente, las posibilidades de protección contra sobrecorriente y sobretensión están influenciadas simultáneamente. Las medidas de protección pueden ser eficaces de manera activa a través de la electrónica de control o de manera pasiva mediante los componentes de supresión.

En condiciones estáticas de operación el IGBT no necesita corriente de excitación de compuerta porque es controlada por tensión. Pero en el encendido y apagado se generan pulsos de corriente de excitación de compuerta de corta duración como consecuencia de la capacidad de entrada que deben tenerse en cuenta.

El apagado se logra en principio, terminando el control positivo y poniendo a cero la tensión compuerta-emisor VGE. Pero normalmente es ventajoso controlar al IGBT negativamente con la tensión emisor-compuerta VEG. Así es posible comenzar tales perturbaciones que actúan sobre la compuerta debido a capacidades parásitas que resultan principalmente de procesos de conmutación.

El resistor de compuerta  $R_G$ , limita la magnitud de los pulsos de corriente de compuerta que ocurren en el encendido y en el apagado. Variando VLF y consecuentemente VGE así como  $R_G$ , es posible influenciar la tensión colector-emisor en la región de saturación, los tiempos de conmutación así como la disipación de conmutación.

## 11.10 Funcionamiento

El inversor de frecuencia: convierte la frecuencia y el voltaje de alimentación de valores fijos a valores variables. Esto se logra a través del circuito inversor (anteriormente explicado).

Es necesario variar la frecuencia debido a que la velocidad del motor de c.a. es proporcional a su frecuencia de alimentación, dado por la siguiente fórmula

$$N = \frac{f \times 120}{\text{No. } P}$$

donde:

$f$  = Frecuencia en Hz.

$N$  = Velocidad del motor en R.P.M.

No.  $P$  = Numero de polos del motor

Como se ve la velocidad es directamente proporcional a la frecuencia, y con el número de polos se determina la velocidad base del motor, es decir, un motor de 4 polos, su velocidad base a 60 Hz. es 1800 R.P.M.

Nota:  $N$  es la velocidad sincrónica, por lo que se está despreciando el deslizamiento, del 2% al 4% aproximadamente en los motores actuales, tipo jaula de ardilla.

El voltaje también se debe variar en la misma proporción en que se varíe la frecuencia, es decir, si el motor es conectado a 460 V a 60 Hz., al alimentar a 30 Hz., el voltaje debe ser aproximadamente la mitad de 460 V, con lo cual es 230 V.

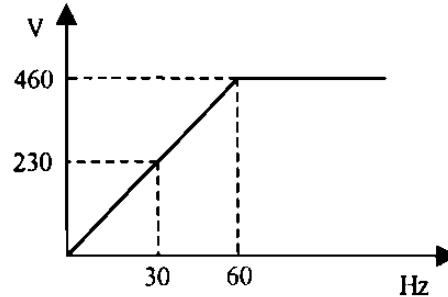
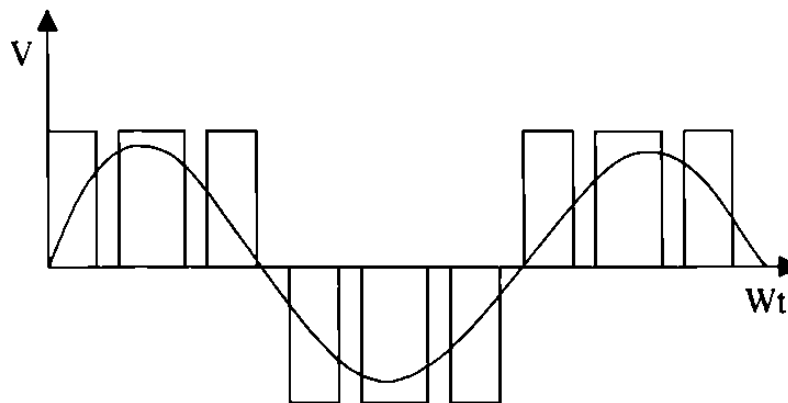


Figura 117 relación de Volts/Hertz en un inversor

A esta relación es llamada Volts/Hz., y es la que produce la magnetización en el motor de C.A., y al mantener esta relación constante, se puede disponer del 100% del torque cuando la carga así lo requiera.

Como ya vimos, en los componentes del inversor, que a la salida del mismo tenemos una señal PWM (Modulación por Ancho de Pulsos), esta señal está codificada senoidalmente, esto es con el fin de simular una señal de corriente alterna senoidal, a esta señal también se le conoce como “Señal de Corriente Alterna No Pura” o “Voltaje de Corriente Alterna No Puro”. A continuación se muestra una gráfica esquemática de esta señal.



Señal PWM

Figura 118 Forma de onda de la señal PWM

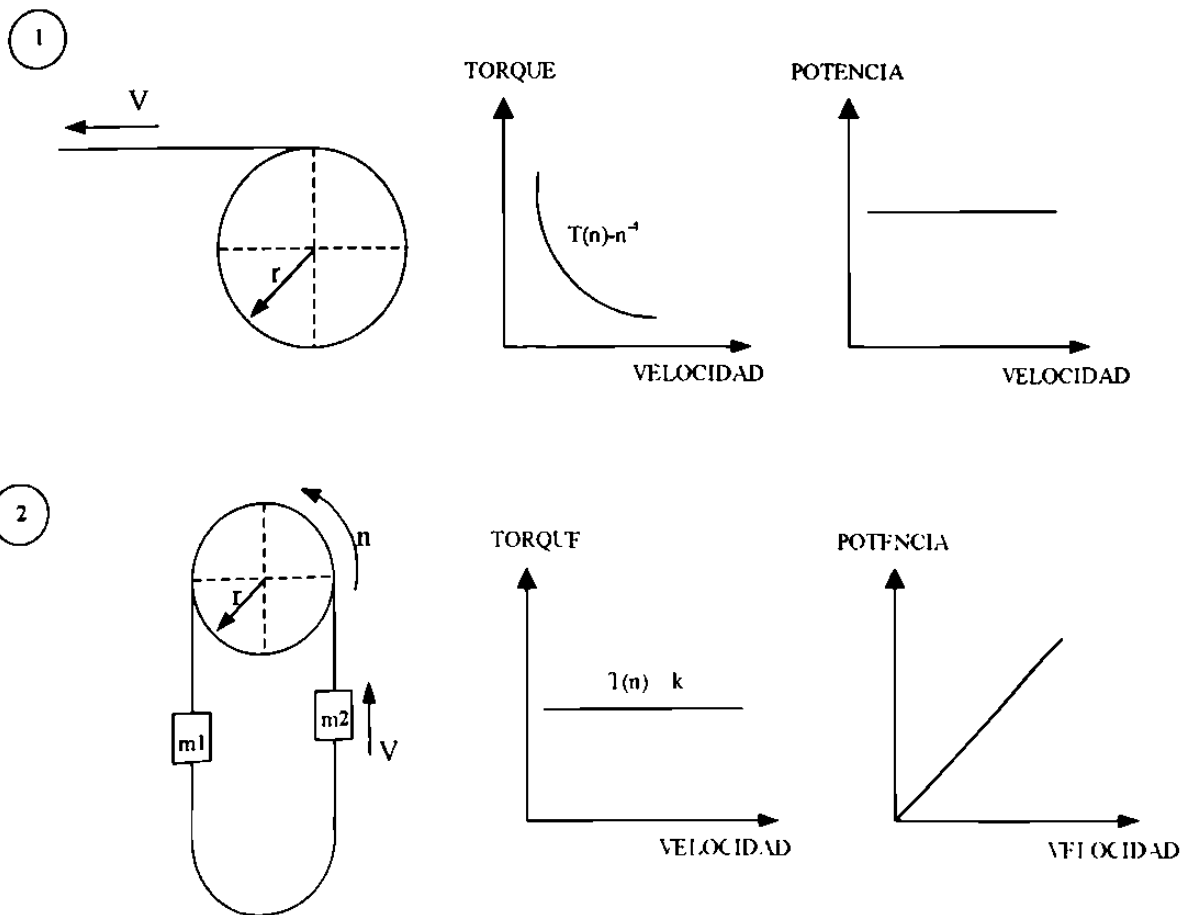
La forma de salida es senoidal, y dependiendo del dispositivo de switcheo en el circuito inversor empleado va a ser la limpieza en la señal de corriente y, por ejemplo empleando transistores bipolares o SCR's el contenido de armónicas a media y bajas frecuencias fundamentales son muy altas, generando con ello calentamiento en el motor.

perdida de torque, y ruido auditivo en el motor. Y ahora con la tecnología de los IGBT la forma de onda se dice que es virtualmente senoidal.

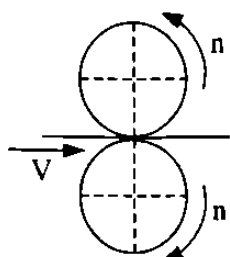
### 11.11 Aplicaciones

Dependiendo de la aplicación (tipo de carga), será el comportamiento del motor; siendo los principales tipos de carga:

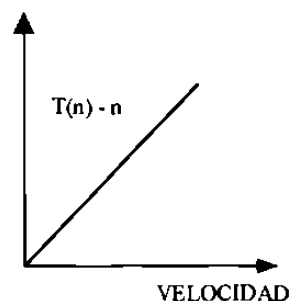
- Embobinadores, Maquinas cortadoras y Maquinas herramientas (Torque variable)
- Transportadores de diferentes tipos de grúas y bombas de desplazamiento positivo, Extrusoras. (Torque constante)
- Maquinas pulidoras, Rodillos de calandra y otras maquinas de procesamiento de materiales. (Torque variable lineal)
- Maquinas trabajando con fuerzas centrifugas, como par ejemplo ventiladores y bombas centrifugas. (Torque variable función  $x^2$ )



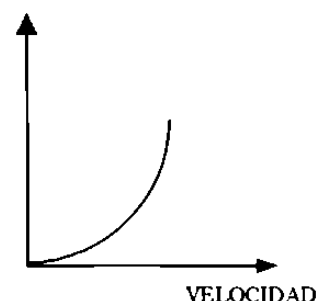
3



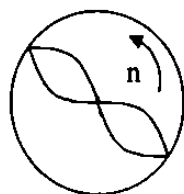
TORQUE



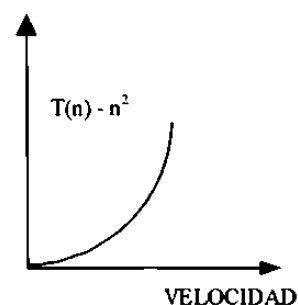
POTENCIA



4



TORQUE



POTENCIA

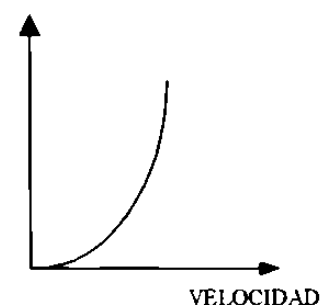


Figura 119 Aplicaciones de velocidad variable

Para poder seleccionar la capacidad del motor y del inversor, se necesitan tomar en cuenta los siguientes datos:

- Aplicación (Tipo de carga)
  - Rango de velocidad a operar
  - Torque de arranque
  - Temperatura Ambiente: para el motor y para el drive
  - Altura de la locación, ejemplo Monterrey 580 mts. s. n. m.
  - Eficiencia del sistema de reducción, poleas, reductor, cadena o combinación de estos.
- Para el drive:
- Tiempo de aceleración
  - Tiempo de desaceleración
  - Tiempo y ciclo de frenado

Nota: El motor de c a al emplearse con un inversor de frecuencia debe tener aislamiento clase F o H.

Si el motor se va a emplear en un rango mayor de 4:1, y la capacidad seleccionada es 20 HP o mayor, se recomienda usar un ventilador o soplador externo para enfriamiento del motor a bajas velocidades.

Los inversores pueden operar con cualquiera de los siguientes motores:

- ◆ Motores de Inducción: Jaula de ardilla
- ◆ Motores Sincrónicos: de Imán permanente  
de Reluctancia  
de Hysterisis

Con los inversores podemos sustituir algunos variadores mecánicos o eléctricos como por ejemplo:

- ✓ Variadores Mecánicos
  - PIV'S
  - Cambio de poleas
- ✓ Variadores Eléctricos
  - Motores de rotor devanado
  - Motores de dos velocidades
  - Motores de polos conmutantes

Las principales ventajas de tener un inversor de frecuencia son:

- No partes móviles, control estático
- Mayor eficiencia que un sistema de C.D o sistema mecánico
- Rango infinito de ajuste de velocidad
- Rápido cambio de velocidad



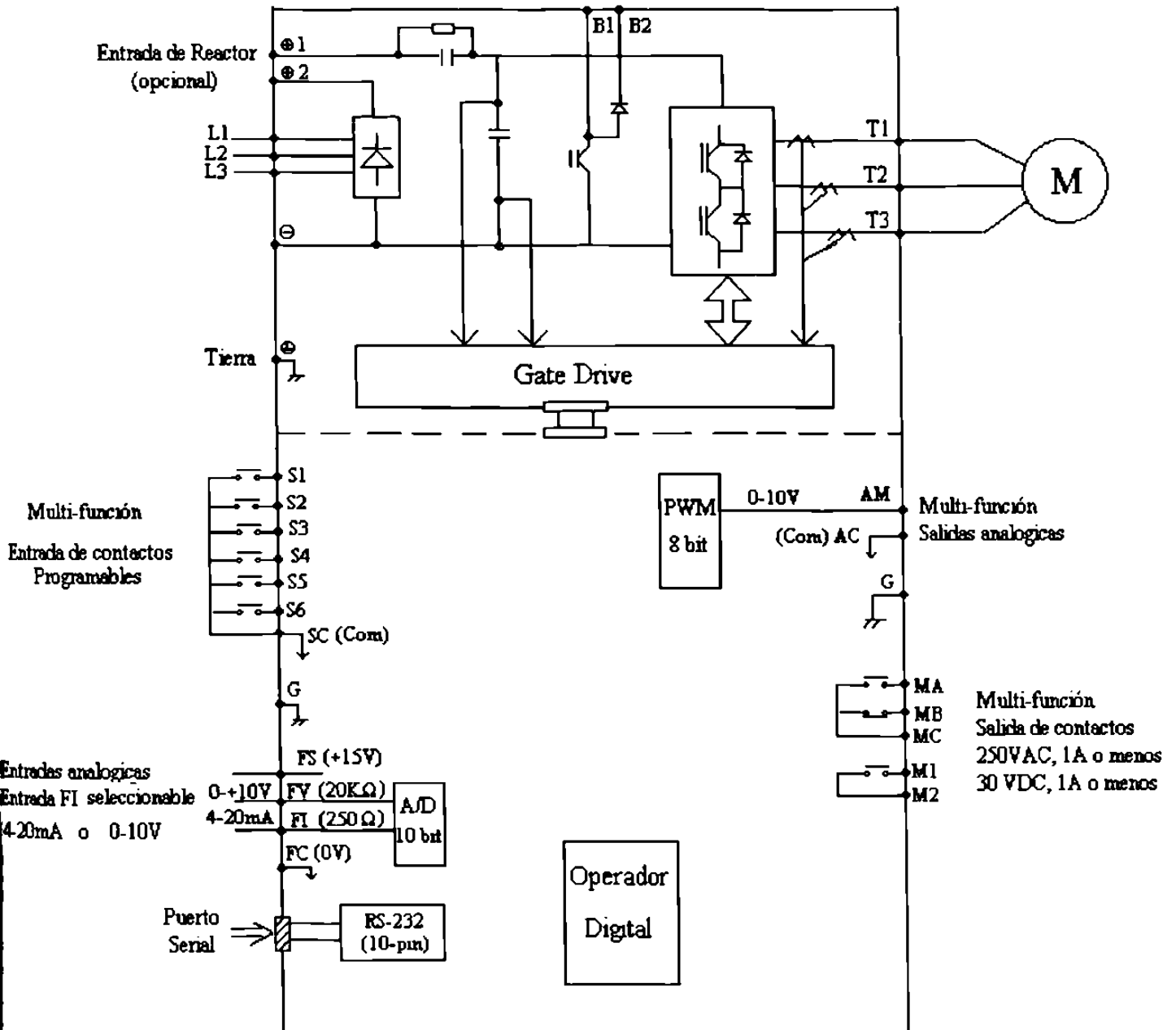


Figura 120 Diagrama de Conexiones para un Inversor Marca Saftromics, Modelo Gp5 (Tipo Convencional)

## 11.12 Algunos Inversores Utilizados En La Industria Marca: Safronics

### Mini Drive VSM

- Capacidades ¼ a 2 HP 230VCA / 460 VCA
- Protección instantánea de sobrecorriente de hasta 250% a bajas velocidades
- Operación local o remota
- Montaje en riel

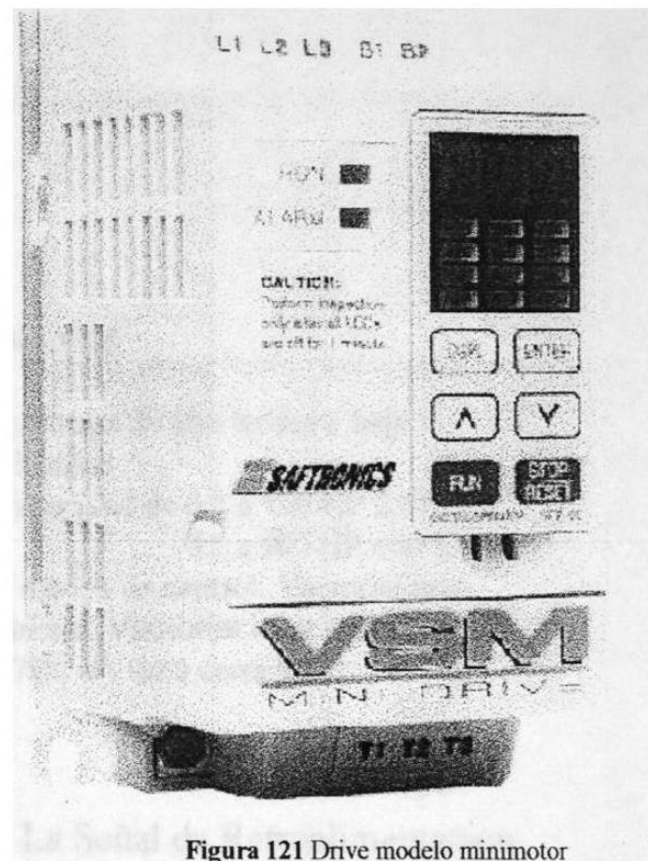


Figura 121 Drive modelo minimotor

### Modelo GP5

- Capacidades desde 3 a 100 HP 230VCA  
3 a 400 HP 460 VCA
- Protecciones de sobrecarga de 150% por 60 seg. corto circuito, entre otras
- Operador digital amigable al usuario
- Uso convencional con rango 40 – 1
- Aplicaciones Torque Constante o Variable
- Control PID integrado

### Modelo PC3

- Capacidades  $\frac{3}{4}$  a 5 HP 460 VCA / 230 VCA
- Protección contra parpadeos en línea por 2 seg.
- Capacidad de sobrecarga a torque constante  
150% por un minuto (200% pico)

### Modelo VG5

- Respuesta de alto torque a baja velocidad
- Capacidad de 0.5 a 100 HP 230 VCA  
0.5 a 500 HP 460 VCA
- 4 modos de control: Vectorial lazo abierto, Vectorial lazo cerrado, V/Hz y V/Hz en lazo cerrado

## 11.13 Dispositivos Utilizados Para Obtener La Señal de Retroalimentacion en Los Inversores de Frecuencia

Existen dos tipos de dispositivos:

- Sensores Opticos
- Sensores Magnéticos

Dentro de los sensores Opticos tenemos:

Sensores Incrementales.

Los encoders opticos utilizan un rotor con un patrón de conteo, el cual interrumpe la fuente de luz del led y cambia la salida de los sensores fototransistores. La señal es amplificada y limpiada internamente. Los encoders ópticos se proveen operación desde velocidad cero y tienen una alta resolución.

## Cuadratura

La salida de cuadratura permite el monitoreo de la dirección para procesos que puedan trabajar en reversa, o que deben mantener una posición cuando se tenga oscilación mecánica.

La señal de cuadratura bidireccional es recomendada para la mayoría de las aplicaciones de posición, velocidad y longitud.

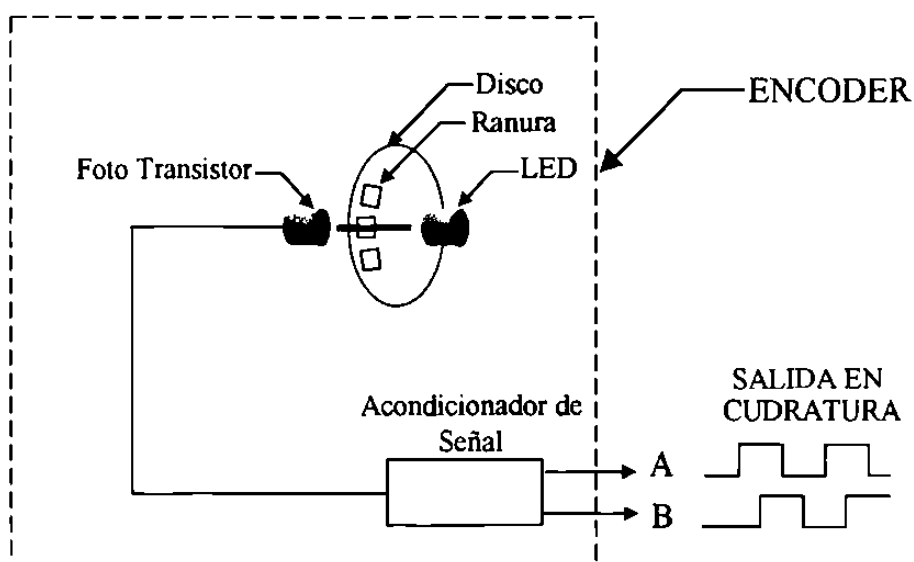


Figura 122 Diagrama de encoder óptico

Dentro de los sensores Magnéticos tenemos:

Reluctancia Variable.

Estos dispositivos utilizan dientes de un engrane ferromagnético para distorcionar el flujo, causando un cambio en la reluctancia. Un voltaje pulsante proporciona, causando un cambio en la reluctancia. Un voltaje pulsante proporcional al movimiento mecánico es generado en el embobinado. Estos son dispositivos precisos para una máxima confiabilidad. La operación a baja velocidad es limitada alrededor de los 50 rpm.

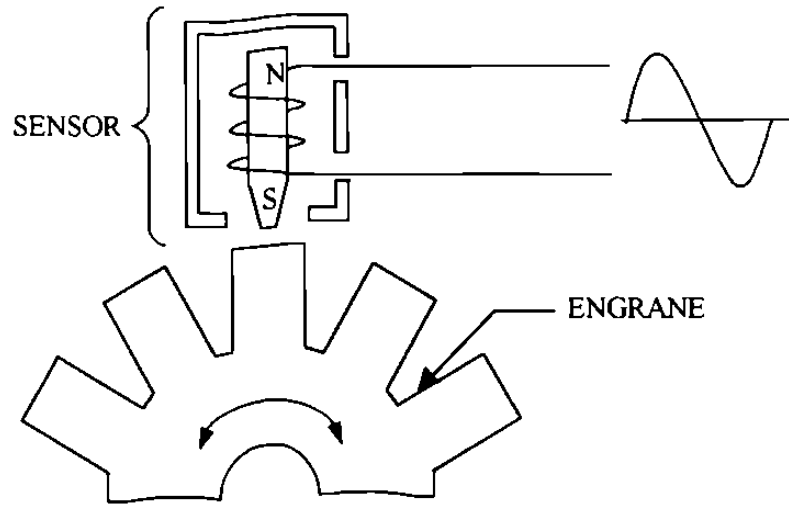


Figura 123 sensor de Reluctancia Variable

Magneto Resistivos.

Estos dispositivos contienen un circuito tipo puente altamente sensible, el cual reacciona al movimiento de la dentadura del engrane ferromagnético. Este desbalance del circuito tipo puente es amplificado para crear la señal de salida. La operación a velocidad cero, alta confiabilidad, y un amplio rango de temperatura, son sus características principales.

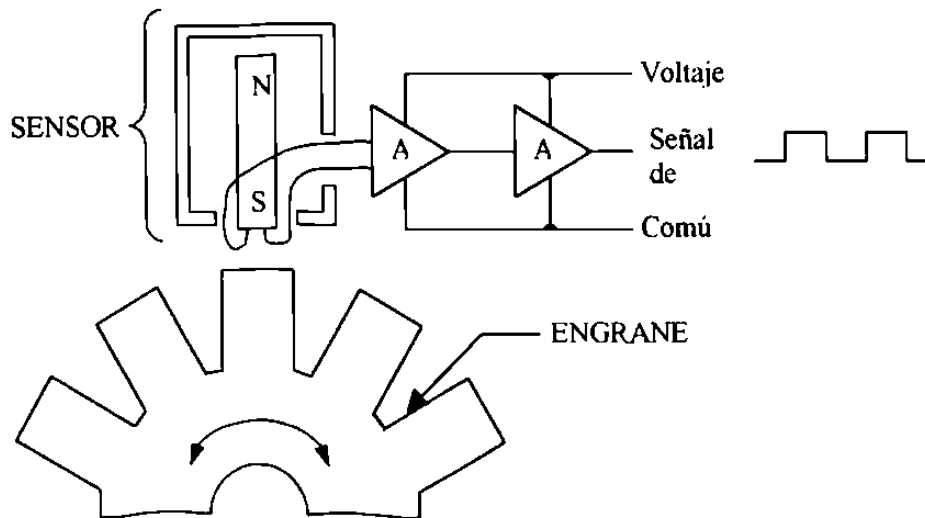


Figura 124 Sensor Magneto-Resistivo

## 11.14 Variadores De Velocidad Para Corriente Directa

En el pasado, el control típico de un motor de c.d. fue realizado usando un generador de voltaje variable para suministrar un voltaje discreto y una polaridad requeridos para obtener la velocidad del motor. El campo del motor fue controlado por un excitador de campo, el cual fue por lo general un encapsulado común con el generador.

A continuación mostraremos en un diagrama a bloques los principales componentes internos de un Drive de c.d. (Esto es en la actualidad).

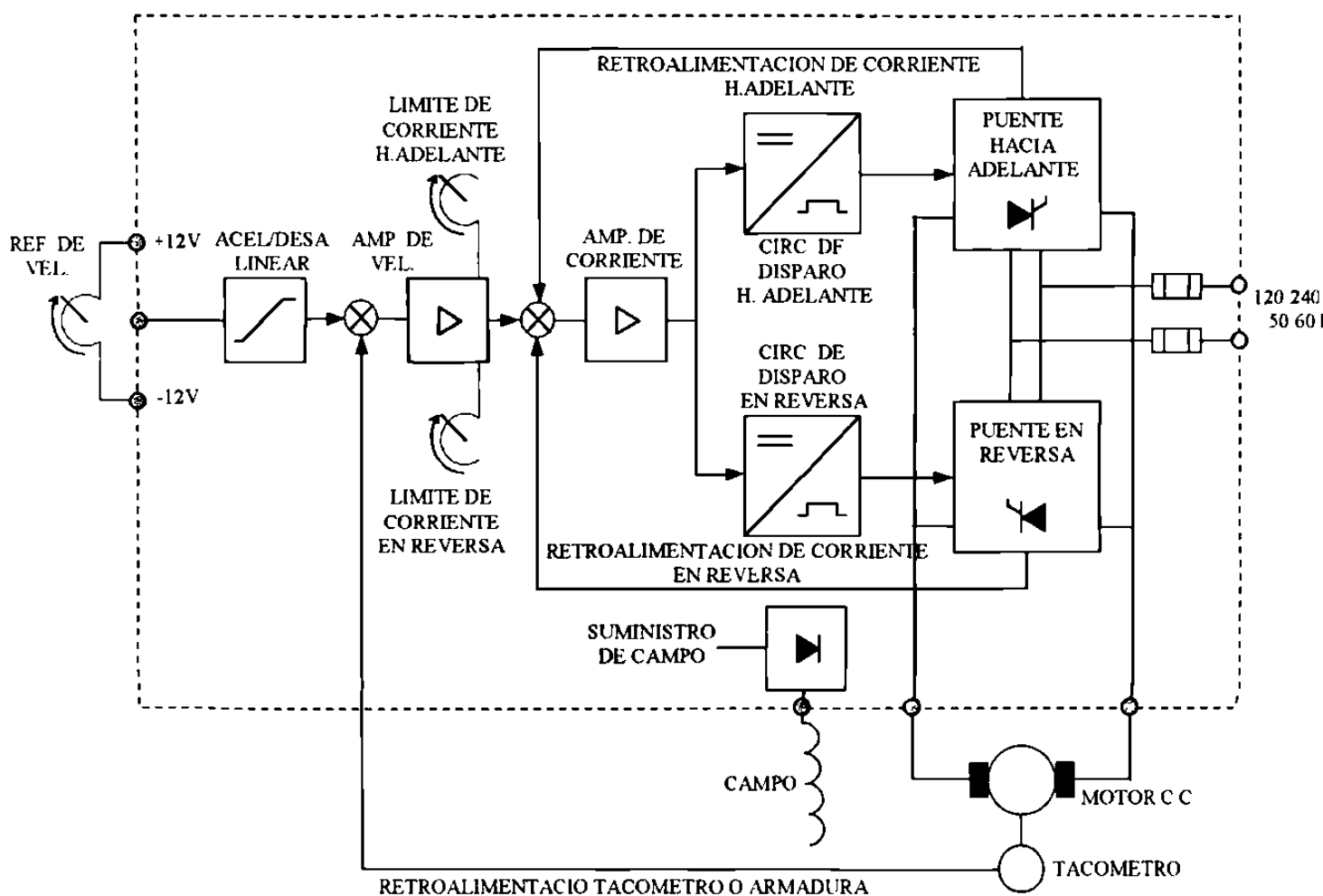


Figura 125 Diagrama a bloques del control interno de un drive de c d

## 11.15 Control de Estado Sólido en los Variadores de Velocidad de Motores de C.C.

En la década de los 60's, con el desenvolvimiento de los SCR'S (Rectificador Controlado de Silicón), los cuales fueron mucho más eficientes para la fuente de poder de los drives de c.d. de voltaje variable. Sistemas eficientes incrementados desde un 65% a un 90%, y requirieron de mucho menos espacio para el gabinete de control. De cualquier forma el progreso, generalmente tiene su precio. La desventaja de los SCR'S y otros dispositivos de switcheo de estado sólido, es que tienen ciertas perturbancias en la línea de alimentación, por ejemplo: armónicos, variaciones de factor de potencia. Una regla general para los drives de C.D., es que siempre tengan un transformador de aislamiento, o reactores en la entrada o inductores adelante del drive para ayudar a solucionar estas perturbancias. Además interferencias electromagnéticas y de radio frecuencia, pueden perturbar otros dispositivos sensitivos, como computadoras, instrumentación y otros tipos de equipos electrónicos.

## 11.16 Métodos de control y aplicación

Un esquema de control básico usado en drives de estado sólido, siempre requiere una señal de referencia o de comando, y una señal de retroalimentación para medir el funcionamiento. Este concepto es necesario ya sea que nosotros queramos controlar la velocidad o el torque, dando los requerimientos de aplicación para el drive.

En los siguientes diagramas se discutirá cuando cada uno de estos métodos serán usados y que efectos debemos considerar para medir sus resultados.

El tiempo de la combinación para el sistema de drive, motor y la carga que toma, respuesta del comando de referencia y medición de error de la señal de retroalimentación es llamada RESPUESTA. El error que existe entre el ajuste de la velocidad original y el resultado después de recibir la carga se llama REGULACION.

Un drive de c.d. proveerá de una fuente de voltaje de c.d. variable de tal manera que la velocidad de un motor de c.d. puede ser controlada, también proveerá de limitantes tanto para el motor como para su carga aplicada.

Para proveer de un voltaje variable de c.d. es empleado el uso de SCR'S. Debe haber alguna forma de circuito para hacer que tanto la velocidad deseada y la velocidad real sean una realidad. Aplicando una señal a la sección del rectificador de un drive el motor puede

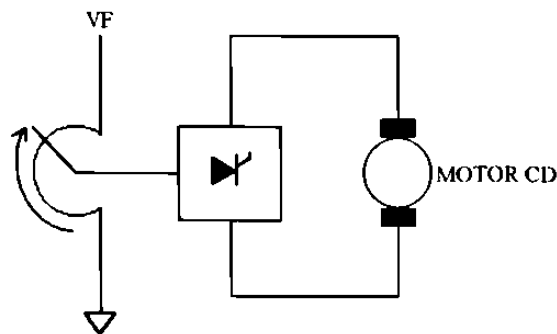


Figura 126 Sistema de control de lazo abierto

hacerse que corra a una velocidad. Sin tener una retroalimentación desde el motor a este tipo de sistema es llamado Lazo abierto (figura 126). Tan pronto como nosotros tengamos una señal de retroalimentación desde el motor, tenemos un sistema de Lazo Cerrado. Con un sistema de lazo cerrado nosotros podemos ahora mantener una velocidad deseada.

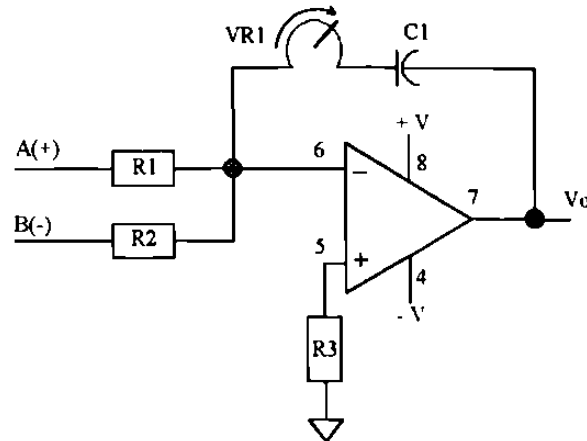


Figura 127 Amplificador de error

Las señales de referencia (A) y la de retroalimentación (B) son alimentadas dentro de un OPAMP. LA unión entre la señal de referencia y la señal de retroalimentación forman un punto de suma. Las polaridades de las dos señales deben ser opuestas de tal manera que cuando sean iguales, el punto de suma será cero. El amplificador de error detectará a ambas señales y si existe una variación habrá un cambio en la salida del amplificador el valor de este cambio será controlado por VR1 (Potenciómetro)

La figura 128 muestra un sistema de lazo cerrado donde Va es un amplificador de error que detecta la señal de referencia como la de retroalimentación

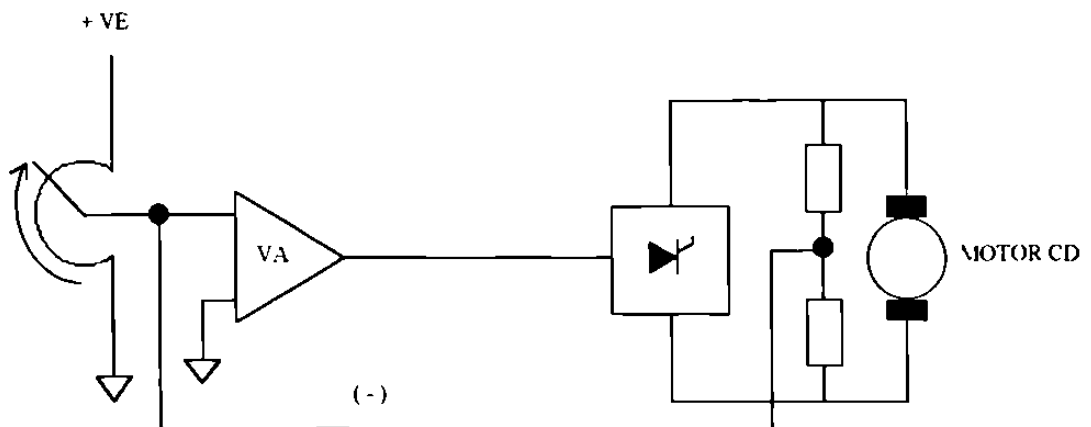


Figura 128 Sistema de control de lazo cerrado



Se sabe que la manera de controlar la velocidad de un motor de c.d. es controlando el disparo de los SCR'S. La señal de referencia y la señal de retroalimentación ajustaran automáticamente la salida del amplificador  $V_a$  el cual controlara el angulo de disparo para mantener la velocidad deseada. Como sea un motor va a tomar tanta corriente como la carga lo requiera. Esto obviamente no es bueno ni para el motor y ni para los SCR'S que son usados para el control de dicho motor. Por lo tanto otra etapa es agregada al drive de c.d. (figura 129) Esta etapa detecta la corriente que maneja el motor y con un circuito limitara la magnitud de corriente que el motor puede soportar o manejar. Este también es un amplificador de error y es conocido como amplificador de corriente ( $I_a$ ).

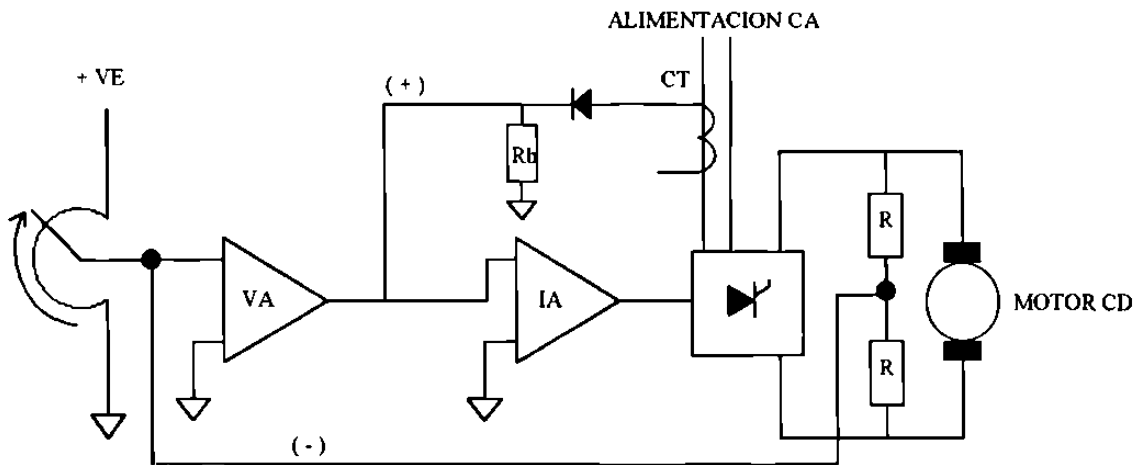


Figura 129 Sistema de control de lazo cerrado con opamp

El amplificador  $I_a$  trabaja exactamente con el mismo principio que el amplificador  $V_a$ , es decir igualmente las polaridades de las señales que alimentan al circuito (referencia y retroalimentación) deben ser opuestas. La importancia de las polaridades opuestas entre la señal de referencia y la de retroalimentación están fuera de este estudio.

Refiriéndonos a la figura 129 si el voltaje de retroalimentación fuese cambiado de negativo a positivo, la salida de  $V_a$  se saturaría negativamente y nunca cambiaría. Asumiendo que la carga en el motor no es excesiva, la salida de la señal de retroalimentación de corriente no tendría efecto sobre el punto de suma entre los amplificadores  $V_a$  e  $I_a$ , por lo tanto esto podría causar que la salida  $I_a$  se sature positivamente y el ángulo de disparo de los SCR'S estaría al máximo haciendo que el motor corriera a una muy alta velocidad. Ajustando el potenciómetro de referencia no tendría el mismo efecto como las señales del motor que estarían manejando los amplificadores.

Cuando las señales son de polaridades opuestas, la señal de referencia original (Positiva) manejaran a los amplificadores para que hagan correr al motor a su maxima velocidad sin embargo tan rápido como exista un voltaje hacia el motor una señal de retroalimentación será detectada en el punto de suma. Esta señal siendo de polaridad opuesta a la señal de referencia tendrá un efecto nulo y las salidas de los amplificadores

serán ajustadas para mantener la salida deseada. Una vez que el amplificador de  $V_a$  esta estable y regulando las señales cualquier cambio en la referencia causara que la salida de los amplificadores cambien. Por ejemplo si la carga se incrementa la señal de retroalimentación de corriente se incrementa lo cual haría tender al motor a que bajara la velocidad, los SCR'S serian disparados en referencia al bajo valor de referencia de salida de  $I_a$ . Este decremento de voltaje de armadura crearia un error que seria detectado en el punto de suma de  $V_a$  y la salida cambiaria para corregirlo suministrando una mayor salida para contrarrestar el incremento de la corriente de retroalimentacion.

#### 10.xxx Regulación del motor

Hay tres diferentes maneras para controlar un motor de corriente directa a traves del uso de un drive de c.d.

- A) regulación de voltaje
- B) regulación de velocidad
- C) regulación de corriente

La figura 129 muestra un simple block de un drive regulado por voltaje. La retroalimentacion del motor hacia el amplificador  $V_a$  llega a través de una de red de divisor de voltaje entre la armadura. Este sistema regulara el voltaje aplicado al motor, sin embargo la velocidad no será constante. Una carga aplicada provocara que el motor baje su velocidad, debido al incremento de caídas de voltaje a través de una resistencia de la armadura conocidas como caídas de  $I_r$ . Para eliminar este problema una señal positiva de retroalimentacion se agrega al punto de suma de  $V_a$ .

La figura 130 muestra el circuito. equivalente. de un motor y muestra el voltaje  $V$  que se necesita para mantener una velocidad estable.

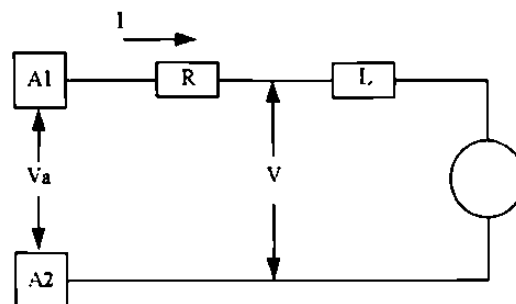


Figura 130 Circuito equivalente de motor

Esto es llamado compensación  $I_r$ . El suministro para esta señal llega a través del circuito de retroalimentacion de corriente por lo tanto solamente es efectivo con cargas aplicadas (figura 131) Con un sistema de regulación de voltaje la regulación de velocidad se limita alrededor de 3%

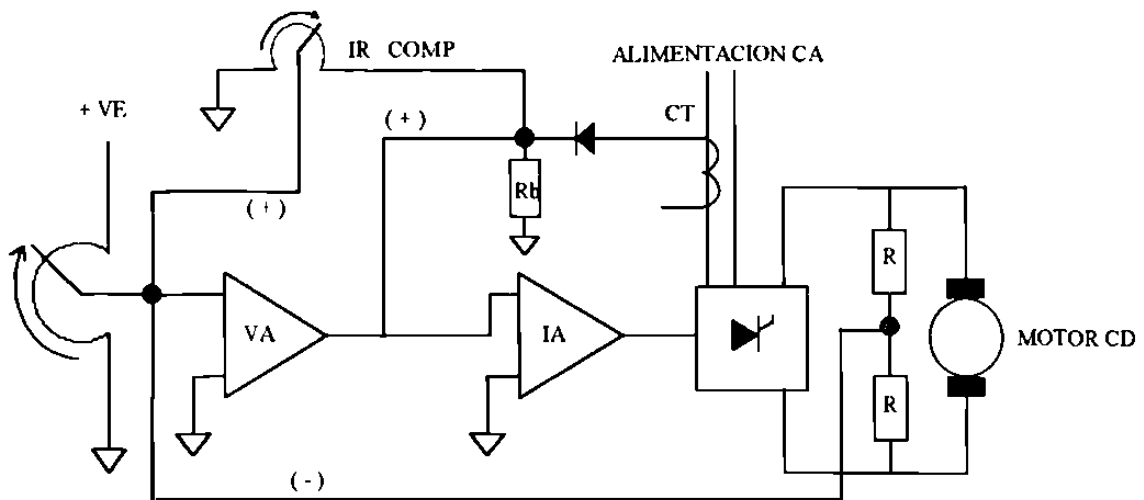


Figura 131 Sistema de regulación de velocidad del 3%

## 11.17 Regulación de Velocidad

En un control de regulación de velocidad (figura 132), la señal de retroalimentación viene de un tacogenerador que está directamente acoplado a la flecha del motor. Eso significa que la señal será proporcional a la velocidad real de motor. Cualquier variación en la velocidad causada por cambios en la carga será compensada por el amplificador  $V_a$ , el cual ahora será llamado amplificador de velocidad. Hay que notar que cuando se utiliza este sistema no existen ajustes en el compensador  $I_r$  es decir que el compensador  $I_r$  ya no se deberá usar.

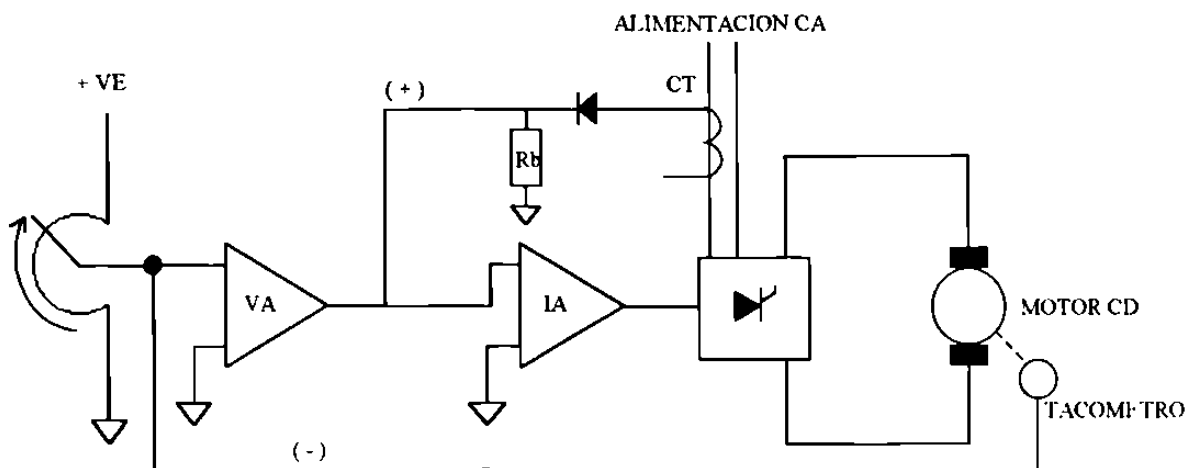


Figura 132 regulador de velocidad usando tacogenerador

Dependiendo de la calidad y tipo del tacogenerador usado, la regulación de velocidad puede ser del 1% o menos, es decir que es muy preciso.

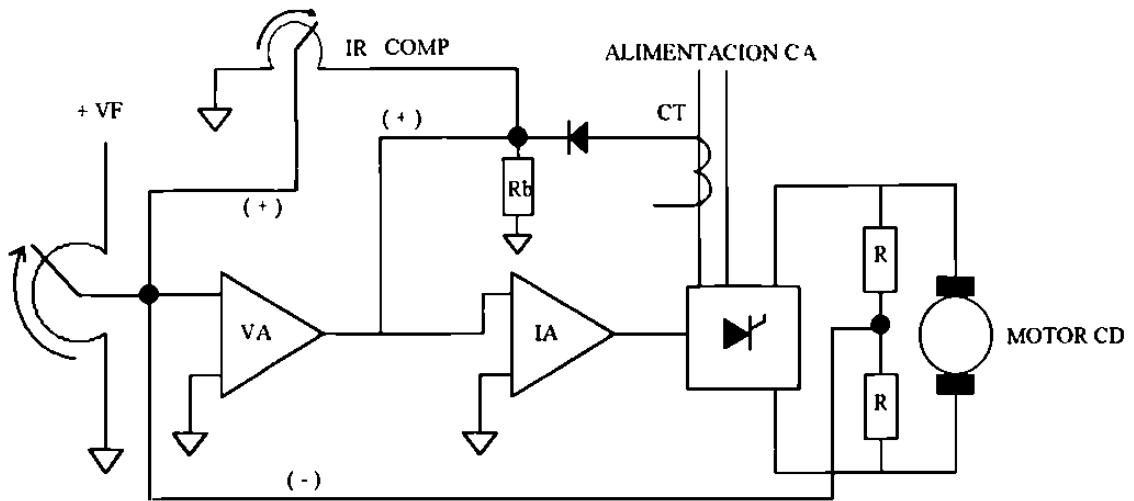


Figura 131 Sistema de regulacion de velocidad del 3%

### 11.17 Regulación de Velocidad

En un control de regulación de velocidad (figura 132), la señal de retroalimentacion viene de un tacogenerador que esta directamente acoplado a la flecha del motor. Eso significa que la señal será proporcional a la velocidad real de motor. Cualquier variación en la velocidad causada por cambios en la carga será compensada por el amplificador  $V_a$ , el cual ahora será llamado amplificador de velocidad. Hay que notar que cuando se utiliza este sistema no existen ajustes en el compensador  $I_r$  es decir que el compensador  $I_r$  ya no se deberá usar.

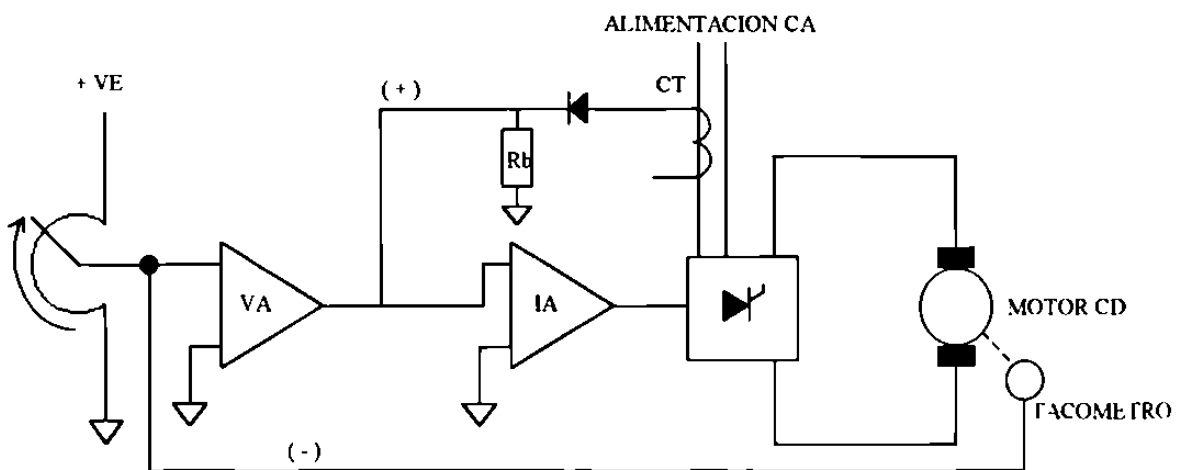


Figura 132 regulador de velocidad usando tacogenerador

Dependiendo de la calidad y tipo del tacogenerador usado, la regulación de velocidad puede ser del 1% o menos, es decir que es muy preciso

Si por alguna razón la señal del tacogenerador se pierde, el drive hará que los SCR'S, disparen al máximo la velocidad del motor haciendo que se desboque. Para evitar esto se puede instalar un switch electrónico, el cual intercambiara de regulación de voltaje a regulación de velocidad al arranque, una vez en marcha se detecta si la señal del tacogenerador ha sido perdida para cambiar a regulación de voltaje y evitando así que el motor se desboque. (Figura 133). La señal del tacogenerador sensara condiciones de sobre velocidad para posteriormente ser corregidas

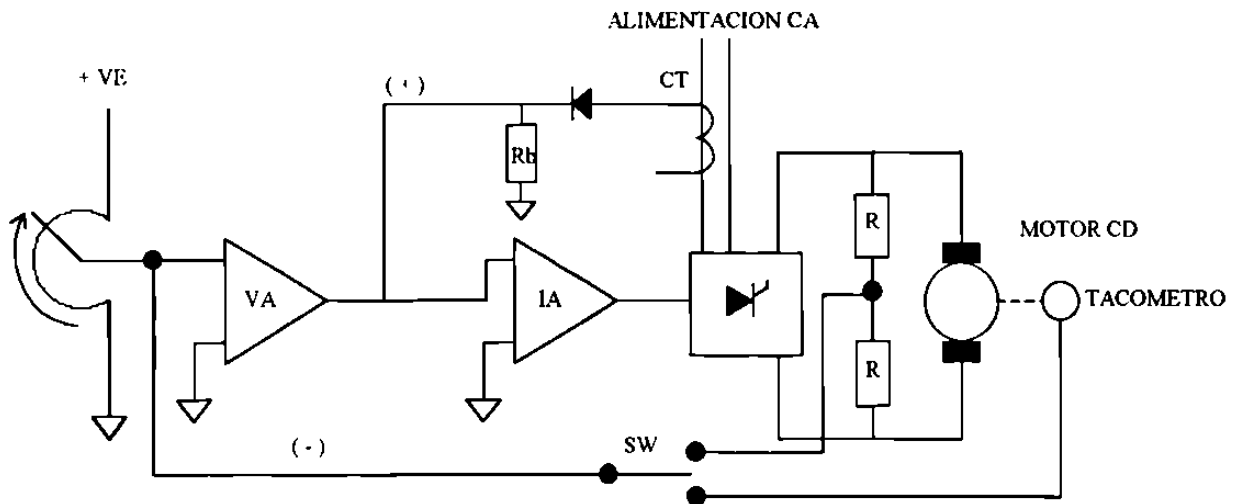


Figura 133 regulador de velocidad modificado con tacogenerador

## 11.18 Regulación de corriente

La figura 134, muestra un diagrama a bloques para un control con regulación de corriente. Lo que antes era la entrada de referencia vía un potenciómetro, ahora ha sido conectado directamente a la fuente de alimentación positiva. Eso significa que la salida de  $V_a$  esta ahora saturada negativamente y la señal de retroalimentación no tendrá efecto. La conexión que se muestra es para retroalimentación con voltaje pero podría ser conectada para retroalimentación de velocidad dependiendo de las características físicas del motor.

Cualquier método de conexión no tiene importancia en la operación del controlador mientras que el controlador este conectado para regulación de corriente.

La salida de  $V_a$ , la cual es mantenida negativa es usada como alimentación para el potenciómetro de referencia. El otro extremo del potenciómetro es conectado al punto de suma de la entrada de  $I_a$ , por lo que el drive ahora regulara la corriente que maneja el motor.

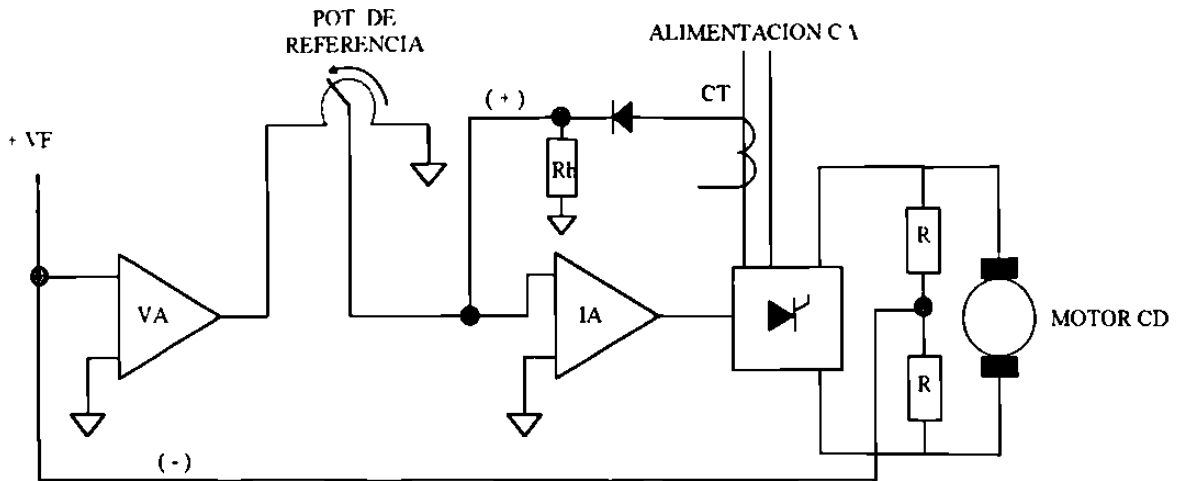


Figura 134 Diagrama a bloques para un regulador de corriente

Cada uno de los tipos de reguladores antes mencionados tienen un lugar en la industria dependiendo de su aplicación. Algunas veces más de un tipo de regulación es requerido para una aplicación específica pero nunca al mismo tiempo. El cambiar de un tipo de regulación a otro, es logrado por un control lógico externo.

### 11.19 Limitador de Corriente

No importando cual tipo de regulación se este usando, una parte muy importante de un controlador es la habilidad para limitar la corriente manejada por el motor. Esto no es solamente necesario para proteger los elementos en la unidad del drive, sino que también para limitar el manejo del motor. Hay diferentes métodos para lograr o alcanzar límites de corriente.

En la figura 135, el potenciómetro IL es energizado por el circuito de retroalimentación de corriente, mientras que el motor trata de tomar más corriente que la especificada por el potenciómetro IL, Q1 se enciende. La salida de IA será retardada y el voltaje del motor será reducido.

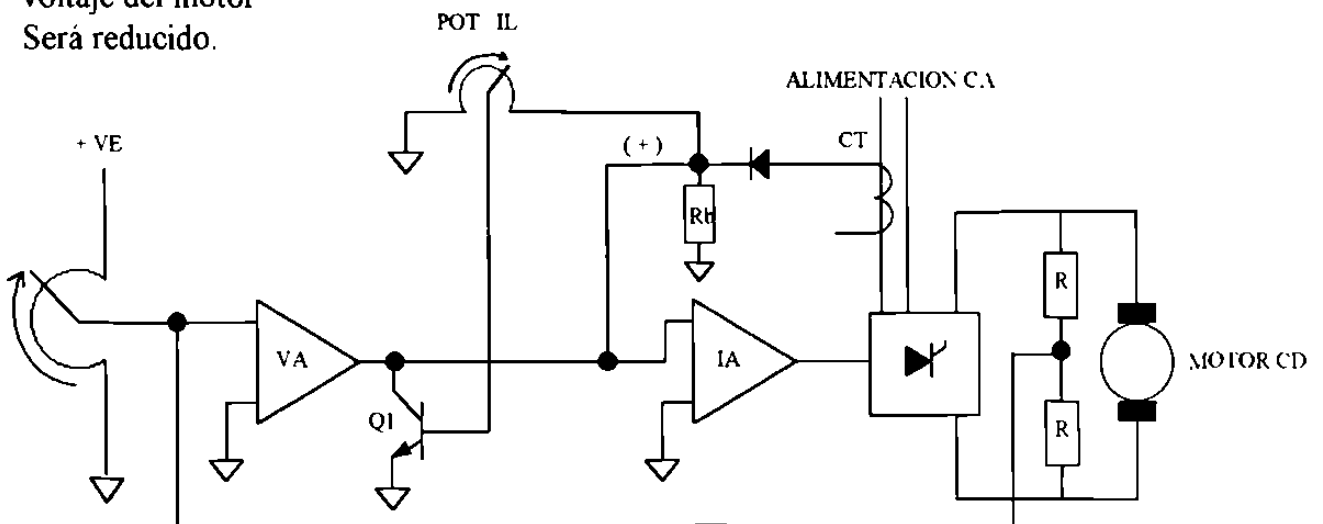
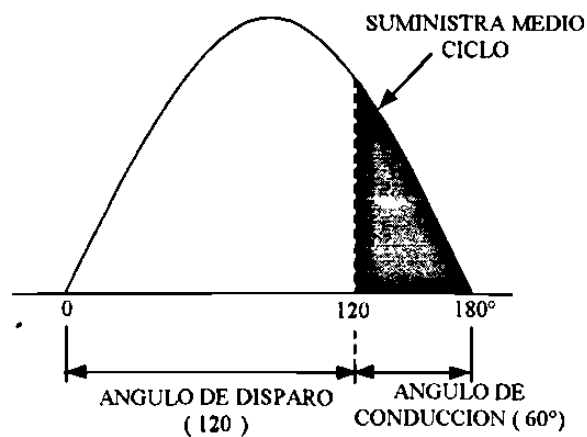


Figura 135 Regular de velocidad con limitador de corriente

Drives electrónicos de velocidad variable de corriente directa usados para el control de motores industriales standard, caen en dos principales categorías drives de Transistores y Tiristores. Los drives de transistores son usualmente de mucho menor valor de potencia y son típicamente usados en aplicaciones especiales, mientras que los drives de Tiristores están disponibles en rangos de valores desde unos cuantos cientos de watts hasta megawatts y tienen una gran variedad en la industria y en otras partes.

El tiristor es un dispositivo semiconductor de potencia formado por un diodo rectificador que puede solamente conducir cuando está polarizado directamente pero que tiene un tercer electrodo, la compuerta, con el cual el dispositivo puede ser puesto en conducción por medio de pulsos de disparo. Una vez disparado el tiristor continuara conduciendo mientras siga en polarización directa; si la polaridad es invertida el tiristor se apagará. Esta inversión de polaridad es convenientemente alcanzado conectando al tiristor a una fuente de voltaje de alterna.



**Figura 136** Angulo de disparo y de conducción de un tiristor

## 11.20 Drives Unidireccionales (No regenerativos)

Por definición la salida de corriente de un rectificador es unidireccional, por lo que el torque producido por el motor estará en un sentido de rotación. En aplicaciones donde solamente una dirección de rotación es requerida, y que la carga pueda ser detenida en forma de paro libre, esto es adecuado.

## 11.21 Drives Bidireccionales (Regenerativos)

Existen sin embargo muchas aplicaciones en las cuales la rotación de reversa es necesaria, o donde grandes cargas de alta inercia deben ser desaceleradas. En tales casos, dos puentes de tiristores son conectados en paralelo inverso, como se muestra en la figura 137. Cuando el puente uno está conduciendo, la corriente que fluye en el motor, es de A1 a A2. El flujo de corriente es invertido cuando el puente dos conduce, y por lo tanto el torque del motor se invierte. Este efecto se puede utilizar para invertir la rotación del motor y para proveer de un torque de frenado.

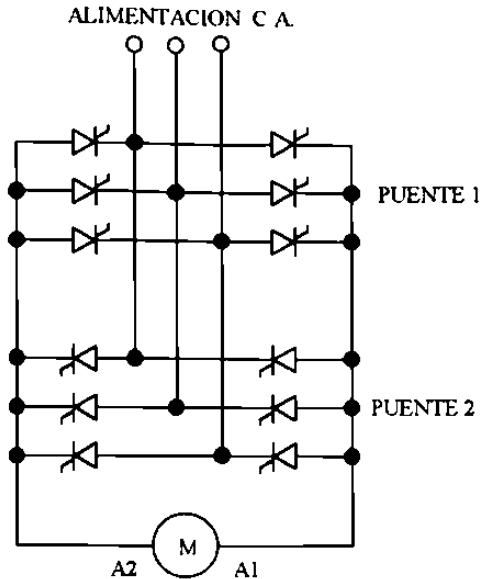


Figura 137 Esquema de control bidireccional regenerativo

El arreglo descrito antes, es conocido como drive de cuatro cuadrantes, debido a que es capaz de operar en cualquiera de los 4 cuadrantes del diagrama de torque contra velocidad (figura 138). En el cuadrante 1 tanto el voltaje y corriente están en la dirección hacia adelante y por lo tanto la velocidad y torque están en la misma dirección. En forma similar, en el cuadrante tres, tanto la velocidad y torque son negativos; esto corresponde a un motor girando en la dirección de reversa.

En los cuadrantes 2 y 4, la velocidad y el torque están mutuamente en direcciones opuestas, esto quiere decir que el torque del motor esta opuesto a su rotación, dando un efecto de frenado. Por consiguiente tenemos que la energía cinética mecánica de la carga ha sido convertida en energía eléctrica; el motor se comporta como generador y el sistema general entrega potencia a la alimentación. Este comportamiento es conocido como regeneración y tiene dos aplicaciones principales. La mas usual es el Frenado regenerativo de una masa en rotación para proporcionar un rápido y controlado paro.

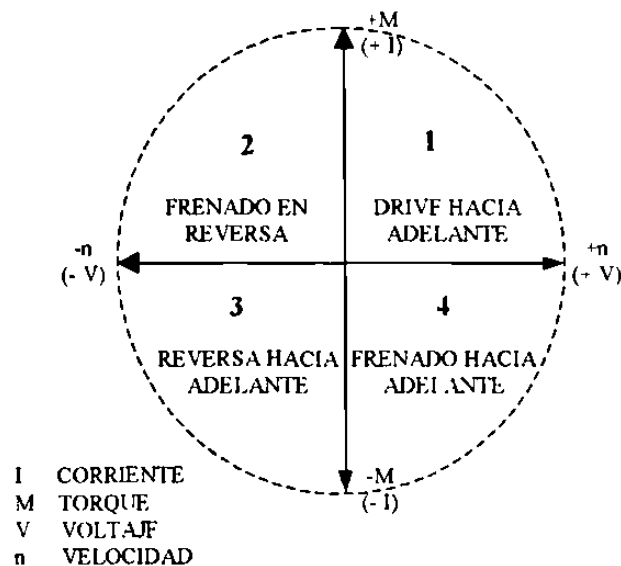
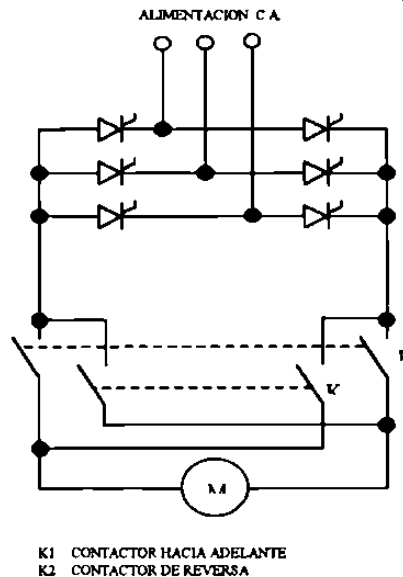


Figura 138 Cuatro cuadrantes de trabajo de un drive de c c



Otra aplicación importante de la regeneración es en los Dinamos, donde un drive regenerativo es usado para proveer una carga para una fuente de potencia mecánica. Ambos para pruebas bajo cargas y para medición de su salida.

Una mayor ventaja de un drive de 4 cuadrantes es la facilidad en la que el motor puede ser puesto en reversa simplemente cambiando los puentes. Un drive que solamente tiene un puente de tiristores, puede ser puesto solamente en reversa por medio de contactores, los cuales invierten las conexiones a la armadura o el campo del motor. Figura 139.



**Figura 139** Esquema de tiristores de un Drive de c.c. regenerativo

## 11.22 Frenado Dinámico.

Debido a que el freno regenerativo depende de la energía que se regresa del motor a la alimentación, no puede trabajar si la fuente de alimentación falla debido a un fusible abierto o un corte de energía. El frenado dinámico de los drives de 4 cuadrantes es encontrado usualmente como una manera de falla-segura para parar al motor y su carga, y como la única manera de frenar drives con un solo puente de tiristores.

Resistencias de frenado dinámico de valores pequeños están construidas usualmente en cerámica mientras que aquellas de valores son fabricadas en acero, metal expandido, hierro, todas estas teniendo grandes áreas de disipación por el calor producido durante el frenado.

Desde que la energía cinética del motor y su carga es convertida en calor por la resistencia de frenado, es importante calcularlas correctamente para el trabajo a desempeñar, tomando en cuenta la inercia de la carga y el número de paros por hora.

## 11.23 Drives de Transistores

Los drives de tiristores tienen bastantes limitaciones importantes que son superadas por los drives de transistores de C.D.; algunas de estas limitaciones son las siguientes:

- El rizo de salida de frecuencia es determinado por la fuente y es, para una fuente de frecuencia de 50 Hz, 100 Hz para equipo monofásico, y 300 Hz para equipos trifásicos. Esto significa que un alizamiento adicional es requerido cuando se usan maquinas de alta velocidad, motores de imanes permanentes o motores de circuitos impresos, todos ellos con una baja inductancia en la armadura.
- Debido al retraso inherente en la operación del tiristor, el ancho de bando del lazo de control de corriente del convertidor del tiristor es limitado aproximadamente 25 Hz, el cual es muy bajo para muchas aplicaciones de servo drives.
- Los tiristores rectificadores de fases controlados tienen un factor de potencia de entrada inherentemente bajo, particularmente a voltajes de salida bajos.
- Protecciones electrónicas de corto circuito no son posibles con los convertidores de tiristores. Esta protección es normalmente lograda con fusibles.

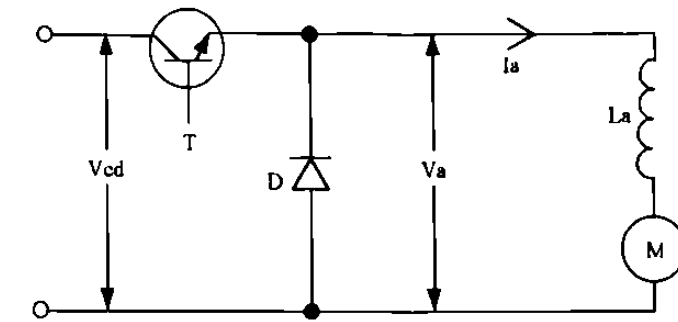
Todos estos problemas pueden ser superados usando transistores. Sin embargo, el convertidor de transistores es más complejo y menos eficiente que su equivalente en tiristor. Además, los transistores todavía no son disponibles en valores de corriente y voltajes altos y su uso esta limitado generalmente a cargas de menos de 150 kWatts.

## 11.24 Aplicaciones de los drives de transistores de C.D.:

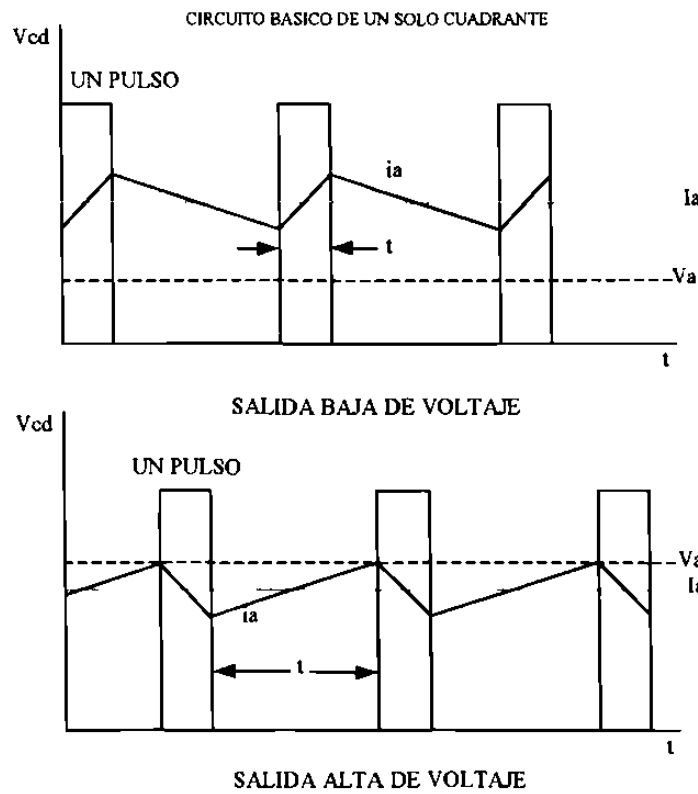
- Servo drives de C.D.
- Drives de baterías de tracción
- Drives de ferrocarriles de tracción
- Drives fraccionarios para motores de imanes permanentes

## 11.25 Convertidores de un solo cuadrante o Chooper

El más básico de los convertidores de C D a C D variable, algunas veces conocido como chooper se muestra en la figura 15. La salida de voltaje es cambiada por modulación de ancho de pulso, que es el variar el tiempo el cual el transistor es encendido. El voltaje aplicado al motor es por lo tanto una señal cuadrada de variacion periodica. Debido a que el motor es inductivo, la forma de corriente es en forma lisa o alisada, el diodo de rueda libre (D) cargando la corriente mientras que el transistor es apagado.



$V_{cd}$  = alimentación de voltaje de c.c.  
 $V_a$  = voltaje c.d. de armadura  
 $L_a$  = inductancia de armadura  
 $i_a$  = corriente de armadura  
 $i_a$  = corriente instantánea de armadura



**Figura 140** Circuito básico de un solo cuadrante y formas de onda del voltaje

La fórmula básica relacionando las variables en este circuito son las siguientes.

$$V_a = V_{cd} * t * f$$

$$\Delta i_a = \frac{V_{cd}}{4L_a * f}$$

$f$  = frecuencia del transistor (un pulso)  
 $i_a$  = máxima desviación de corriente de armadura  
 $L_a$  = inductancia del motor

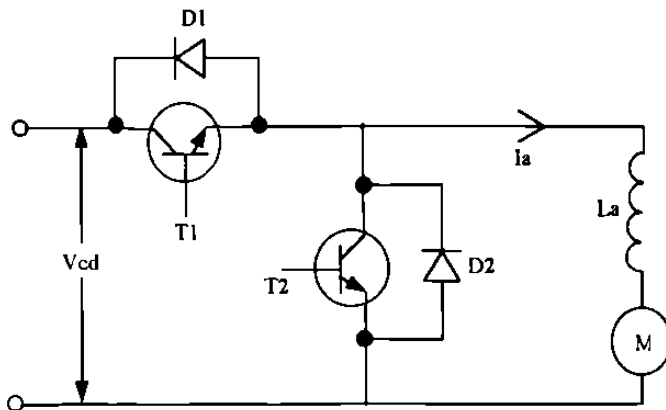
El circuito es solamente capaz de suministrar corriente y voltaje unidireccional al motor y por lo tanto no es capaz de operación en 4 cuadrantes.

Las aplicaciones para estos circuitos son limitadas normalmente a drives por debajo de los 3 kWatts y aplicaciones de variación de velocidad simple.

## 11.26 Convertidores de 2 cuadrantes.

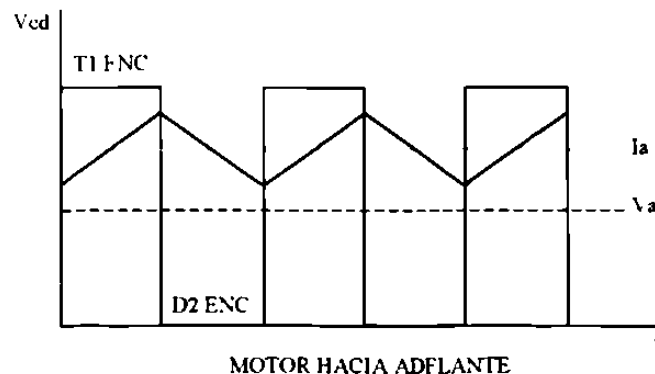
En orden de alcanzar una operación completa de 4 cuadrantes un convertidor debe ser capaz de suministrar voltaje y corriente bidireccional al motor. Un circuito que es capaz de operar en dos cuadrantes (girar y frenar en una sola dirección), se muestra en la figura 16. Este convertidor es capaz de invertir el flujo de corriente al motor pero incapaz de invertir el voltaje del motor y por lo tanto su velocidad. Durante el motorizado el convertidor opera como chooper (drive de un solo cuadrante) básico, con T1 y D2 llevando corriente. Durante el frenado T1 esta deshabilitado y T2 controla la corriente. Durante sus periodos de encendido, la corriente del motor se hace negativa, limitada solamente por la inductancia "La" del motor. Cuando T2 se apaga, la única trayectoria para la corriente es a través de D1 de regreso a la fuente, y por lo tanto el circuito es regenerativo.

Debido a que ese circuito no es capaz de invertir la velocidad del motor, es solamente utilizado en aplicaciones unidireccionales. Sin embargo, debido a su simplicidad es algunas veces utilizado en aplicaciones de tracción donde la reversa se logra mediante un contactor para invertir la alimentación de corriente de la armadura y campo.



Vcd = alimentación de voltaje de c.d.  
 Va = voltaje c.d. de armadura  
 La = inductancia de armadura  
 ia = corriente de armadura  
 ia = corriente instantánea de armadura

Figura 141 Circuito básico de 2 cuadrantes



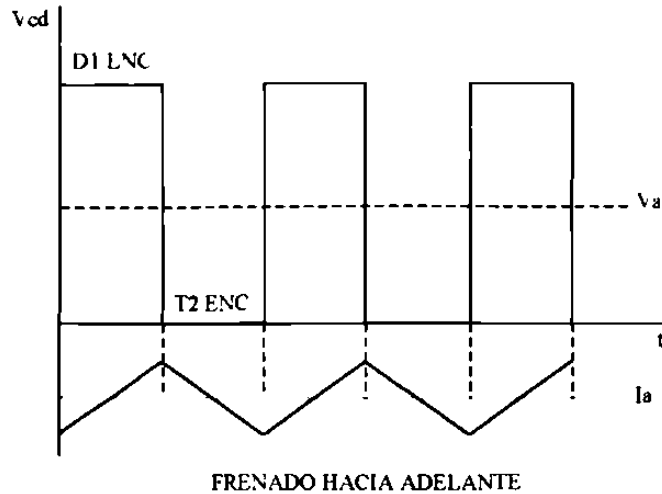


Figura 142 Formas de onda del voltaje para un circuito de 2 cuadrantes

### 11.27 Convertidores de 4 cuadrantes

La figura 143, muestra un convertidor básico de 4 cuadrantes capaz de suministrar un voltaje y corriente invertidos y por lo tanto reversible y regenerativo.

Durante el motorizado, transistores de salida positivos T1 y T4 son habilitados durante el periodo de encendido, mientras que los diodos D2 y D4 conducen durante el periodo de apagado. Cuando D2 y D4 conducen la alimentación del motor es invertida y consecuentemente el voltaje es reducido a cero al 50% del ciclo de trabajo. Con los transistores T2 y T3 conduciendo, la corriente es invertida y por lo tanto se obtiene una operación de 4 cuadrantes completa.

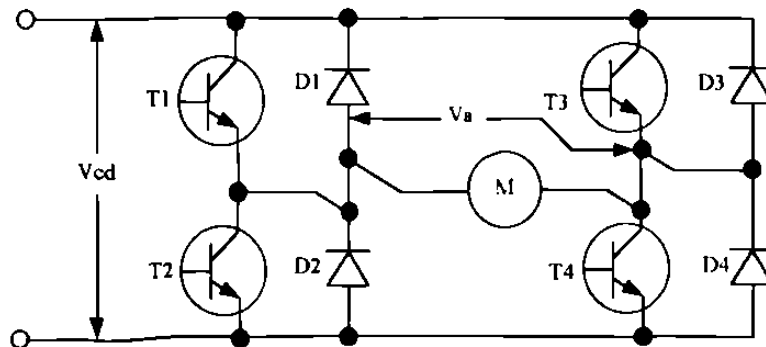


Figura 143 Circuito basico de 4 cuadrantes

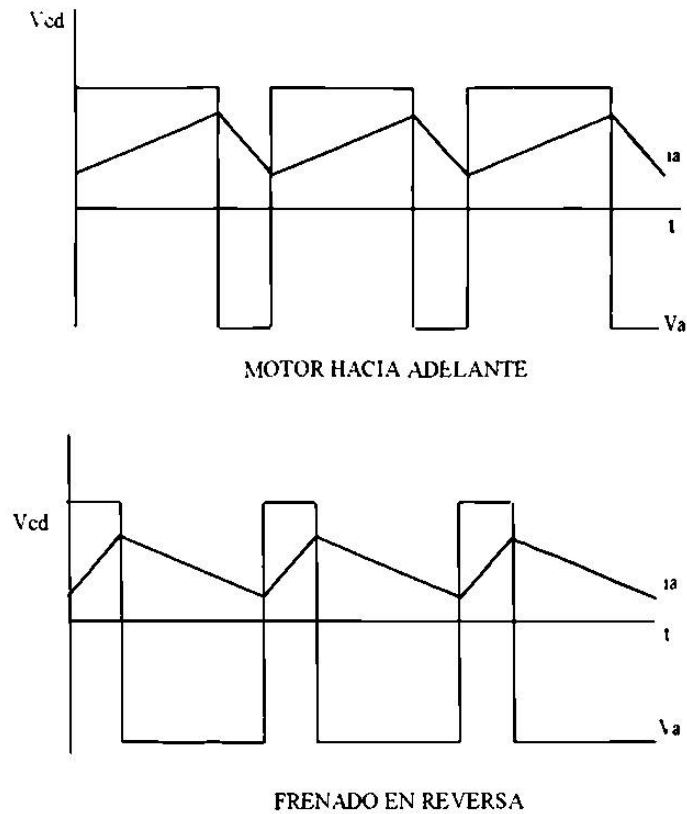


Figura 144 forma de onda del voltaje para un circuito de 4 cuadrantes

## 11.28 Algunos Drives Utilizados En La Industria Marca Safronics

### Modelo DG2 (UNIDIRECCIONAL)

- Capacidades 1 Y 2 HP, EN 120 VCA / 240 VCA, 3 Y 5 HP, EN 240 VCA
- Doble alimentación de voltaje: 120 240 VCA
- Doble suministro de voltaje: 50 / 100 VCD
- Con los siguientes botones de control
  - \* Jog
  - \* Arranque / Paro
  - \* Potenciómetro para variar la velocidad.
  - \* Led indicador de operación.





#### Modelo DF8 (BIDIRECCIONAL)

- Capacidades 1 Y 2 HP, EN 120 VCA / 240 VCA, 3 Y 5 HP, EN 240 VCA
- Doble alimentación de voltaje: 120 / 240 VCA.
- Doble suministro de voltaje: 50 / 100 VCD.
- Con los siguientes botones de control:
  - \* Jog
  - \* Arranque / Paro.
  - \* Potenciómetro para variar la velocidad.
  - \* Led indicador de operación
  - \* Hacia adelante / Reversa.

Figura 145 Drives de mercado para motores de corriente continua

## 12. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Es por demás conocido que con la revolución de la tecnología en cuanto a nuevos equipos electrónicos para el control de velocidad de los motores eléctricos es necesario contar con ingenieros que conozcan tanto de motores eléctricos como de la electrónica asociada a los controles de velocidad, es por eso que este trabajo trata de dar un panorama general al ingeniero en electrónica de los principios básicos de las máquinas eléctricas, así como de la aplicación de estas en la industria, también algo que es poco tratado en los libros que tratan de máquinas eléctricas son las nuevas tecnologías en cuanto a la construcción de motores, tecnologías que ya se están aplicando en la industria de la localidad como son por ejemplo los motores de corriente directa sin escobillas.

En cuanto a las recomendaciones que hago, recuerden que la tecnología cambia minuto a minuto estoy casi seguro que vendrán mejoras en cuanto a la construcción de núcleos de transformadores, motores de alta eficiencia y el mejoramiento de los controles de velocidad de motores es por eso que exhorto al lector para que esta obra sirva como una referencia o un buen principio para cualquier trabajo de investigación que desee realizar.

Por último aclaro que muchos de los temas que se tocan en esta tesis son vistos sin el suficiente soporte matemático que ameritan pero, se pueden profundizar en cada uno de los temas ayudados con la bibliografía que se recomienda.



## BIBLIOGRAFIA

Boylestad Robert / Nashelsky Louis

Electrónica Teoría de Circuitos

Editorial Prentice Hall

1987

Chapman Stephen J.

Maquinas Eléctricas

Editorial Mc. Graw Hill

1991

Chauprades.R.

Control Electrónico de Motores de C.D.

Colección Electrónica Informática.

Editorial GG.

1994

Gourishankar Vembu

Conversión de Energía Electromagnética

Representaciones y Servicios de Ingeniería S A.

1975.

Gwyther H.F.G.

Potencia Eléctrica y Electrónica de Potencia

Editorial Alfa Omega

1993

Kaufman Milton / Seidman Arthur H.

Electrónica Moderna para Ingenieros y Técnicos

Editorial Mc Graw Hill 2ª Edición

1992

Kosow Irving I.

Maquinas Eléctricas y Transformadores.

Editorial Reverte S.A.

1992

Liwschitz / Garik, Michael

Máquinas de Corriente Alterna,

Editorial Continental S.A. de C.V.

1984.

McPherson George

Introducción a las Maquinas Electricas y Transformadores

Editorial Limusa

1987

Mileaf Harry

Electricidad

Editorial Limusa

1982

Nasar I. Bolden.

Máquinas Eléctricas.

Dinámica y Control S A.

Editorial CECSA.

1993

Ney J.

Lecciones de Corriente Alterna

Editorial Marcombo

1977

Pérez Amador Victor  
 Pruebas de Equipo Electrico 2  
 Motores Trifasicos de Inducción  
 Editorial Limusa  
 1983

Sedra Adel / Smith Kenneth.  
 Dispositivos Electrónicos y Amplificadores de Señal  
 Editorial Interamericana  
 1985

Stanley Wolf  
 Guía para Mediciones Eléctricas y Practicas de Laboratorio  
 Editorial Prentice Hall  
 1986

Vázquez Ramírez José/ Domingo Amadeo  
 Pilas y Acumuladores De Máquinas de Corriente Continua  
 Ediciones CEAC  
 1995

#### INTERNET.

<http://www.glentenk.com/profile2.htm>  
<http://www.osvel.home.ml.org>  
<http://www.weg.com.br/espanhol/wau/3.htm>  
<http://www.weg.com.br/espanhol/wmu/wegm.htm>  
<http://www.slip.net/~horizon/motorp/brushless.htm>  
<http://aveox.com/articles.html>  
<http://aveox.com/primer.html>  
<http://www.mcg-net.com/Brshless.htm>  
<http://www.ametektmd.com/controller/140019-o.htm>  
<http://www.qmctech.com/products.htm>  
<http://www.katech.com>  
<http://www.katech.com/4pager.htm>  
<http://www.mfmrtech.com/>  
 [URL: [www.usal.es/~ques/DOC/CMIQ/12](http://www.usal.es/~ques/DOC/CMIQ/12)]

## LISTA DE TABLAS

<b>No. De Tabla</b>	<b>Descripción</b>	<b>Página</b>
<b>CAPITULO 3 CIRCUITOS MAGNETICOS</b>		
Tabla 1	Tabla de conversión de unidades magnéticas	22
<b>CAPITULO 4 TRANSFORMADORES</b>		
Tabla 2	Valores de niveles de ruido en Transformadores	37
Tabla 3	Porcentajes de carga en un Transformador dependiendo de la relación de $Z_1$ en $Z_2$	40
Tabla 4	Tiempos de sobrecargas permitidos en los Transformadores	40
Tabla 5	Dimensiones físicas de Transformadores comerciales	50
Tabla 6	Programa recomendado para pruebas de Mantenimiento en Transformadores	54
Tabla 7	Limites de prueba para aceites tipo vegetal en Transformadores	54
<b>CAPITULO 5 MOTORES DE INDUCCION MONOFASICOS</b>		
Tabla 8	Relaciones de potencia contra el capacitor usado en un motor de inducción con capacitor de arranque	62
<b>CAPITULO 6 MOTORES DE INDUCCION TRIFASICOS</b>		
Tabla 9	Deslizamiento del rotor en función de la velocidad del motor	73
<b>CAPITULO 7 MOTORES DE CORRIENTE CONTINUA</b>		
Tabla 10	Rendimiento de los motores compound de 230 volts	105
<b>CAPITULO 8 MAQUINAS SINCRONICAS</b>		
Tabla 11	Limite económico para la corrección del factor de potencia	119

## LISTA DE FIGURAS

<b>No. De Figura</b>	<b>Descripción</b>	<b>Página</b>
<b>CAPITULO 3   CICUITOS MAGNETICOS</b>		
Fig. 1	Imanes permanentes	15
Fig. 2	Campo Magnético rodeando a un conductor con corriente	17
Fig. 3	Regla de la mano derecha para conductores	18
Fig. 4	Regla de la mano derecha para Bobinas	18
Fig. 5	Limaduras de Hierro sobre una hoja de papel que cubre a una barra magnética	19
Fig. 6	Líneas de flujo en un imán	20
Fig. 7	Ilustración de un Gauss	20
Fig. 8	Comparación entre un circuito eléctrico y uno magnético	22
Fig. 9	Curvas de Imanación	25
Fig. 10	Curvas de imanación para diferentes frecuencias	26
Fig. 11	Lazo de Histeresis	29
Fig. 12	Lazos típicos de Histeresis	30
Fig. 13	Perdidas en los Materiales	30
Fig. 14	Núcleos laminados	31
Fig. 15	Núcleos de polvo de Hierro	31
<b>CAPITULO 4   TRANSFORMADORES</b>		
Fig. 16	Esquema de la relaciones de Energía en una Maquina Eléctrica	33
Fig. 17	Conexión básica de un Transformador	34
Fig. 18	Desplazamientos angulares entre los devanados de un Transformador	37
Fig. 19	Terminales de “Alta” y de “Baja” en un Transformador	38
Fig. 20	Relación de Transformación	38
Fig. 21	Terminales indicando la polaridad de un Transformador	41
Fig. 22	Prueba de polaridad de un Transformador	41
Fig. 23	Conexiones serie-paralelo de un transformador	42
Fig. 24	Modelo de parámetros del transformador “Baja como primario”	42
Fig. 25	Modelo de parámetros del transformador “Alta como primario”	42
Fig. 26	Reflexión de impedancias en el Transformador	43
Fig. 27	Forma de onda del voltaje trifasico	44
Fig. 28	Conexiones Delta-Estrella en un Transformador	45
Fig. 29	Conexiones de 3 Transformadores monofasicos para formar un trifasico	45
Fig. 30	Transformador de distribución comercial “Delta-Abierto”	46
Fig. 31	Transformador tipo poste	51
Fig. 32	Transformador tipo estación	52
Fig. 33	Transformador tipo pedestal	52
Fig. 34	Transformador de potencia	53
Fig. 35	Transformador para control y alumbrado	53
Fig. 36	Transformador comercial tipo poste monofasico de 25 KVA	54
Fig. 37	Diagrama esquemático del Transformador tipo poste monofasico de 25 Kva 440/220 Volts	55

Fig. 38	Transformador comercial tipo poste monofasico de 10 KVA	55
Fig. 39	Diagrama esquemático del Transformador tipo poste monofasico de 25 Kva 13200/440-220 Volts	56
Fig. 40	Transformador comercial tipo poste monofasico de 15 KVA 13200YT/7620-120/240 clase 15Kv	56
Fig. 41	Diagrama esquemático del Transformador tipo poste monofasico de 15 KVA 13200YT/7620-120/240 clase 15Kv	57

#### **CAPITULO 5 MOTORES DE INDUCCION MONOFASICOS**

Fig. 42	Partes principales del motor de inducción monofasico	58
Fig. 43	Fotografía del motor de inducción con y sin capacitor de arranque	59
Fig. 44	Diagrama Electrico de un motor de inducción de fase partida	60
Fig. 45	Curva par-velocidad de un motor de inducción de fase partida	61
Fig. 46	Diagrama eléctrico, curva par-velocidad y fotografía de un motor de inducción con capacitor de arranque	62
Fig. 47	Diagrama electrico y curva par-velocidad, de un motor de inducción con capacitor permanente	63
Fig. 48	Diagrama electrico y curva par-velocidad, de un motor de inducción con capacitor de arranque y capacitor permanente	63
Fig. 49	Diagrama esquemático y curva par-velocidad, de un motor de inducción de polos sombreados	64

#### **CAPITULO 6 MOTORES DE INDUCCION TRIFASICOS**

Fig. 50	Estatórotor y rotor de un motor de inducción trifasico	67
Fig. 51	Sistema de voltaje trifasico producido por C.F.E. , devanado de motor trifasico y el campo magnético Bnet producido por los conductores	68
Fig. 52	Dirección de rotación del campo magnético Bnet para secuencia de fase ABC y ACB	69
Fig. 53	Modelo del motor como transformador giratorio	71
Fig. 54	Curva comparativa B-H entre un motor y un transformador	72
Fig. 55	Modelo de parámetros del rotor	74
Fig. 56	Modelo equivalente de parámetros de un motor de inducción trifasico	74
Fig. 57	Diagrama de potencias en un motor de inducción	76
Fig. 58	Campo magnético del rotor y campo magnético del estator en función de la velocidad	78
Fig. 59	Curva característica par-velocidad de un motor de inducción trifasico	78
Fig. 60	Conexión de un motor de 3 terminales	79
Fig. 61	Devanado de un motor de 6 terminales	80
Fig. 62	Conexiones en la caja de terminales de un motor de 6 puntas	80
Fig. 63	Conexión de un motor de 9 terminales	81
Fig. 64	Conexiones en la caja de terminales de un motor de 9 puntas	81
Fig. 65	Tipos de devanados trifasicos	82
Fig. 66	Devanado trifasico imbricado doble capa, 4 polos y 12 ranuras	84
Fig. 67	Diagrama esquemático de un motor de 4 polos	84
Fig. 68	Curvas características par-velocidad para motores con rotores de diferentes diseños	85

### CAPITULO 7 MAQUINAS DE CORRIENTE CONTINUA

Fig.69	Motor de c.c. con su cable de acero utilizado en ascensores	88
Fig.70	Partes de la maquina de c.c.	88
Fig.71	Construcción de un conmutador	89
Fig.72	Maquina excitada por separado y shunt autoexcitada	91
Fig.73	Diagramas eléctricos de los motores serie, shunt y compound	91
Fig.74	Diagrama esquemático de un generador shunt	92
Fig.75	Característica de carga de un generador shunt	93
Fig.76	Característica de carga de un generador serie	94
Fig.77	Diagrama esquemático de un generador compound	94
Fig.78	Característica de carga de un generador compound	95
Fig.79	Diagrama de conexiones de un motor shunt	96
Fig.80	Diagrama de conexiones de un motor serie	97
Fig.81	Diagrama de conexiones de un motor compound diferencial	98
Fig.82	Curva de velocidad de motores	101
Fig.83	Freno prony	104
Fig.84	Devanado de armadura	106
Fig.85	Devanado imbricado	106
Fig.86	Formas de los devanados de armadura	107

### CAPITULO 8 MAQUINAS SINCRONICAS

Fig.87	Polo de una dinamo sincrónica	109
Fig.88	Efecto de carga sobre la obstrucción del flujo	111
Fig.89	Campo rotatorio del estator con respecto al rotor	112
Fig.90	Devanado amortiguador de jaula de ardilla	113
Fig.91	Conexión de resistencias para el arranque de un motor sincrónico	115
Fig.92	Curvas "v" del motor sincrónico	115
Fig.93	Familia de curvas de factor de potencia contra la corriente de campo	116
Fig.94	Conexiones del circuito de laboratorio para obtener las curvas "v"	117
Fig.95	Diagrama a bloques de un motor sincrónico sin escobillas	121

### CAPITULO 9 MOTORES DE CORRIENTE CONTINUA SIN ESCOBILLAS

Fig.96	Conmutación electrónica en motores de c.c. sin escobillas	124
Fig.97	Drives y motores de c.c. sin escobillas	126

### CAPITULO 10 MOTORES DE PASO

Fig.98	Partes de un motor de pasos	130
Fig.99	Motor a pasos elemental	131
Fig.100	Diagrama básico de conexión del transductor	133
Fig.101	Diagrama básico de los devanados de un motor de reluctancia variable	136
Fig.102	Motor de pasos con magneto permanente	136
Fig.103	Circuito de drivers de un motor de pasos unipolar	137
Fig.104	Diagrama de un motor de pasos unipolar	138
Fig.105	Secuencia del driver para dos fases por pasos y para la mitad de pasos	138
Fig.106	Diagrama básico de los devanados de un motor de pasos bipolar	139
Fig.107	Circuito típico de puente "H"	140
Fig.108	Diagrama esquemático del circuito integrado CD4017	141
Fig.109	Circuito electrónico transductor para motores de pasos	142

Fig.110	Circuito electrónico bidireccional para motores de paso	143
---------	---	-----

### CAPITULO 11 CONTROL ELECTRONICO DE MOTORES

Fig.111	Esquema de regulación convergente	146
Fig.112	Esquema de regulación en cascada	147
Fig.113	Esquema de regulación paralela	147
Fig.114	Comparación entre los métodos de modulación PAM y PWM	151
Fig.115	Diagrama de un inversor de frecuencia	152
Fig.116	Modelo de transistores de 6 pulsos para un motor trifasico	152
Fig.117	Relación de Volts/Hertz en un inversor	154
Fig.118	Forma de onda de la señal PWM	154
Fig.119	Aplicaciones de velocidad variable	156
Fig.120	Diagrama de conexiones de un inversor de mercado	158
Fig.121	Fotografía del drive modelo minimotor	159
Fig.122	Diagrama esquemático de un encoder óptico	161
Fig.123	Diagrama de un sensor de reluctancia variable	162
Fig.124	Diagrama de un sensor magneto-resistivo	162
Fig.125	Diagrama a bloques de un drive de c.d.	163
Fig.126	Sistema de control d lazo abierto	164
Fig.127	Amplificador de error	165
Fig.128	Sistema de control de lazo cerrado	165
Fig.129	Sistema de control de lazo cerrado con opamp	166
Fig.130	Circuito equivalente del motor de c.d.	167
Fig.131	Sistema de regulación de velocidad del 3%	168
Fig.132	Regulador de velocidad usando tacogenerador	168
Fig.133	Regulador de velocidad modificado con tacogenerador	169
Fig.134	Diagrama a bloques para un regulador de corriente	170
Fig.135	Regulador de velocidad con limitador de corriente	170
Fig.136	Angulo de disparo y de conducción de un tiristor	171
Fig.137	Esquema de control bidireccional regenerativo	172
Fig.138	Cuadrantes de trabajo de un drive de corriente directa	172
Fig.139	Esquema de tiristores en un drive de c.d. regenerativo	173
Fig.140	Circuito básico de un solo cuadrante y formas de onda del voltaje	175
Fig.141	Circuito básico de dos cuadrantes	176
Fig.142	Forma de onda del voltaje para un circuito de dos cuadrantes	177
Fig.143	Circuito básico de cuatro cuadrantes	177
Fig.144	Forma de onda del voltaje para un circuito de cuatro cuadrantes	178
Fig.145	Fotografías de drives de mercado para motores de corriente continua	179



## APENDICE

### TABLA DE CONSTANTES Y FACTORES DE CONVERSION

Constantes		
Carga del electrón	$e^- -1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$	
Permeabilidad del Espacio libre	$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$	
Permitividad del Espacio libre	$\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12} \text{ F/m}$	
Factores de Conversión		
Longitud	1 metro (m)	=3.281 pies =39.37 pulgadas
Masa	1 Kilogramo (Kg.)	=0.0685 slug =2.205 libras masa
Fuerza	1 Newton (N)	=0.2248 libras fuerza =7.233 poundsals =0.102 Kg. fuerza
Par	1 Newton-metro (n-m)	=0.738 (lb-pie)
Energía	1 Joule (j)	=0.738 (pie-lb) =3.725 x 10 <sup>-7</sup> (Hp-hora) =2.778 x 10 <sup>-7</sup> (KWh)
Potencia	1 Watt	=1.341 x 10 <sup>-3</sup> Hp =0.7376 pie. Lbf/s
	1 HP	=746 watt
Flujo magnético	1 Weber (Wb)	=108 Maxwell
Densidad de flujo magnético	1 Weber/m <sup>2</sup>	=10000 Gauss =64.5 Kilolneas/pulg <sup>2</sup>
Intensidad de campo magnético	1 Amper-vuelta/m	=0.0254 <sup>a</sup> -vuelta/pulg =0.0126 Oesterd

## GLOSARIO

Acondicionamiento de señal	Es un dispositivo electrónico que cambia los valores de voltaje y corriente originales y los adapta a nuevos valores proporcionales a los primeros.
Asincrónico	Se refiere a los motores que se muevan a una velocidad inferior a la del campo magnético giratorio.
Autoexcitado	Se refiere a máquinas que no requieren de fuente externa de c.c.
c.c.	Corriente continua ( que puede ser del tipo pulsante)
c.d.	Corriente directa (totalmente filtrada o alisada)
Compound	Combinación de bobinas serie y paralelo con la bobina de armadura.
Datos de placa	Son los valores máximos permisibles en los equipos eléctricos o electrónicos.
Devanado compensador	Devanado similar a un jaula de ardilla usado en los motores sincrónicos para el arranque de los mismos.
Devanado imbricado	Devanado usado para tener más capacidad de corriente que de voltaje.
Devanado Ondulado	Devanado que tiene más capacidad de voltaje que de corriente.
Diagrama esquemático	Es un diagrama que muestra la forma de conectar un dispositivo Eléctrico.
Driver	Término empleado para describir generalmente a un circuito electrónico que controla la velocidad de un motor.

Eficiencia	Es la relación de la potencia de salida a la potencia de entrada en un circuito eléctrico o electrónico
Estado sólido	Así se le llama a los elementos electrónicos contruidos con silicio y germanio.
Fototransistor	Es un transistor que es accionada su base mediante un rayo de luz.
Frecuencia	Rapidez de cambio de la señal de C.A. en América es de 60 Hertz
Freno prony	Prueba que se realiza en los motores eléctricos para determinar su capacidad de par y potencia.
Hertz (Hz)	Unidad de medida de la frecuencia eléctrica.
IGBT	Transistor bipolar de compuerta asilada.
Inversor de frecuencia	Dispositivo electrónico que cambia el valor de la frecuencia del voltaje ( se usa para el control de velocidad de motores de c.a.)
KVA	Kilo Volt Amper es la unidad de medida de la potencia aparente y se utiliza para denotar la potencia en un transformador.
MOSFET	Transistor de efecto de campo de metal oxido semiconductor.
Opamp	Amplificador operacional ( circuito integrado)
PAM	Modo de trabajo de un inversor por modulación de amplitud del pulso (Pulse Amplitude Modulation)
PWM	Modo de trabajo de un tiristor por modulación del ancho del pulso (Pulse Width Modulation)

Ranura	Lugar en el rotor o estator de una máquina eléctrica en donde se encuentran alojadas las bobinas.
Rectificador de c.a/c.d	Es un dispositivo electrónico formado por tiristores para convertir la señal de c.a. en c.d.
Regulador de velocidad	Es un dispositivo eléctrico, electrónico o mecánico cuya función es controlar la velocidad de un motor independientemente de la carga.
Rendimiento	Término similar al de Eficiencia pero el rendimiento se usa en motores.
Rotor bloqueado	Se refiere a cuando el rotor de un motor esta frenado y el motor energizado.
SCR	Rectificador controlado de silicio.
Serie	Conexión de la bobina de campo en serie con la armadura.
Shunt	Conexión de la bobina de campo en paralelo con la armadura.
Sincrónica	Se refiere a los motores que se mueven a la misma velocidad que el campo magnético giratorio.
Tensión	Es sinónimo de voltaje.
Transductor	Dispositivo que sirve para el acondicionamiento de señal.
Vacío	Generalmente se refiere a las máquinas eléctricas cuando están sin carga

## RESUMEN AUTOBIOGRAFICO

- Nombre: Jesús Guadalupe Castañeda Marroquín
- Nombre de los padres: Jesús Castañeda Moreno  
María Isabel Marroquín Salazar
- Lugar y fecha de nacimiento: Monterrey, Nuevo León.  
11 de Octubre de 1968
- Grado de escolaridad: Ingeniero en Electrónica y Comunicaciones  
Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica  
Universidad Autónoma de Nuevo León.
- Asociaciones: Miembro de la Sociedad de Ingenieros y Técnicos de  
Monterrey A.C.
- Docencia: Maestro de planta en el Area de Potencia Eléctrica  
Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica  
Universidad Autónoma de Nuevo León  
1989 a la fecha.
- Laboral: Centro de Diseño y Mantenimiento de Instrumentos  
Universidad Autónoma de Nuevo León  
Jefe del Departamento de Equipo Didáctico y Científico  
De 1989 a 1993
- Centro de Capacitación para el Trabajo Industrial No. 92  
SEP-SEIT  
Jefe del Area de Capacitación  
1995 a la fecha.
- Cervecería Cuauhtemoc -Moctezuma S.A.  
Asesor en el Area de Electrónica e Instrumentación  
1994 a la fecha
- Grado que desea obtener: Maestro en Ciencias de la Ingeniería Eléctrica con  
Especialidad en Electrónica
- Nombre de la tesis: Estudio de las Máquinas Eléctricas para el Ingeniero en  
Electrónica



