

## Marco Teórico

Durante muchos años ha existido la necesidad de adecuar la potencia eléctrica de los sistemas de tracción y de los sistemas industriales impulsados por motores eléctricos.

La electrónica de potencia es una combinación de la energía, la electrónica y el control; la energía tiene que ver con el equipo de potencia estática y rotativa (giratoria) para la generación, transmisión y distribución de energía eléctrica; la electrónica se ocupa de los dispositivos y circuitos de estado sólido para el control deseado; y el control se encarga del régimen permanente y de las características dinámicas de los sistemas de lazo cerrado.

Por lo anterior, la electrónica de potencia puede definirse como la aplicación de la electrónica de estado sólido para el control y la conversión de la energía eléctrica .

### Introducción

Las emisiones de contaminación asociadas con Vehículos eléctricos (VE) vienen de la generación de la electricidad para recargar las baterías, más que de su operación como medio de transporte. En el peor de los casos, una generación de energía que emplea solamente carbón, generará emisiones contaminantes mucho menores que las emisiones asociadas a vehículos que trabajan con gasolina. Una simulación en 1995 que remplazaba los vehículos a gasolina por eléctricos (en el peor escenario) podrían reducir enormemente las emisiones: NMOG 98%, NO<sub>x</sub> 92%, CO 99%. Ya que la generación eléctrica se ubica en zonas no urbanas, las personas de las ciudades no son expuestas a estas emisiones.

La conversión de potencia y control forman las bases del campo conocido como electrónica de potencia [10]. Recientemente la tecnología de la electrónica de potencia ha sido impulsada por las necesidades de controles eficientes en aplicaciones industriales, y el

desarrollo de fuentes de alimentación conmutadas de menor peso y tamaño, para equipo de computación y comunicaciones [11]. En respuesta a las necesidades tecnológicas de los VE's, el desarrollo de la tecnología en electrónica de potencia se ha acelerado.

Algunas compañías como GM, Nissan, BMW, Honda, Toyota, Mitsubishi y REVA han desarrollado VE's [12]-[14]. Algunos vehículos eléctricos emplean dispositivos semiconductores de potencia llamados MOSFET's/IGBT's [URL 1].

## Baterías

La energía y potencia específicas de baterías electroquímicas son mucho menores a las entregadas empleando gasolina. Por esa razón, un número grande de baterías son requeridas para asegurar un nivel de potencia aceptable. Sin embargo, un VE con muchas baterías presenta varios inconvenientes: La reducción de espacio disponible en el interior, el incremento del peso y costo del vehículo y la degradación del rendimiento del vehículo. Así, el desarrollo de tecnologías de baterías se ha visto acelerado en los siguientes aspectos: eficiencia, razón de carga, ciclo de vida, entorno operativo, seguridad, costo, reciclaje. Los tipos de batería principalmente empleados han sido de ácido de plomo (Pb-Acid). Otras se basan en Nickel (Ni), presentando resultados interesantes en cuanto al peso. Otro tipo de baterías Zinc-Halógeno tales como Zinc-Bromino (Zn-Br), y baterías de alta temperatura tales como Sodio-Sulfuro (Na-S) son también atractivas .

Avances recientes emplean Ion-Litio (Io-Li), sin embargo requieren cobalto, que es un material caro y térmicamente inestable. Una alternativa es sustituir el cobalto con manganeso, ya que los electrodos de óxido de manganeso son más estables y más baratos. Compaq power ha desarrollado un nuevo material, estable a altas temperaturas, para mantener separados los electrodos. Las células de las baterías de Continental, utilizan un cátodo de hierro que es más estable térmicamente que el óxido de manganeso, además de barato y abundante, los electrodos son de fosfatos [URL 2].

## Propulsión eléctrica

La propulsión eléctrica es la interfaz entre las baterías y las ruedas del vehículo, transfiriendo energía en la dirección requerida, con alta eficiencia y controlando la etapa de potencia todo el tiempo. Desde el punto de vista funcional, un sistema de propulsión eléctrico puede ser dividido en 2 partes: eléctrico y mecánico. La parte eléctrica incluye el motor, el convertidor de potencia, y el controlador electrónico. La parte mecánica se forma por el dispositivo de transmisión y las ruedas. Algunas veces el dispositivo de transmisión es opcional. El límite entre las partes eléctrica y mecánica es el núcleo del motor, donde la conversión de energía electromecánica toma lugar.

La propulsión eléctrica, principalmente la electrónica de potencia, juega un rol muy importante en los VE's, algunas veces esto se describe como el corazón de los VE's.

## Propulsión de los vehículos eléctricos

La figura 1.1 ilustra el diagrama a bloques funcional de un sistema de propulsión de un VE, donde las flechas delgadas son señales, y las gruesas representan el flujo de potencia.

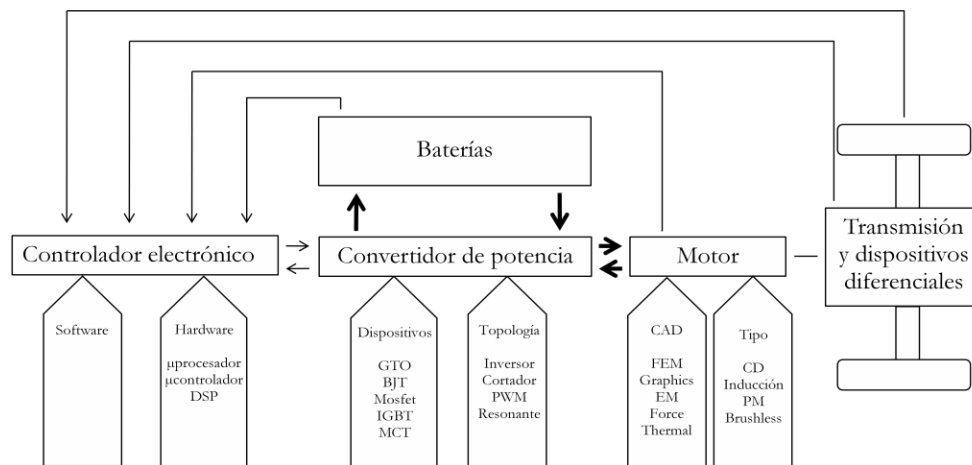


Figura 1.1. Diagrama a bloques funcional del sistema de propulsión de los VE.

Debido a la posibilidad de frenado regenerativo el flujo de potencia es reversible. Dependiendo de la estrategia de control del motor y los datos obtenidos de los sensores, se proporcionan al controlador electrónico las señales que se envían al convertidor de potencia. Estas señales son amplificadas para activar los dispositivos de potencia. Finalmente, el motor

se interconecta con las ruedas a través del sistema de transmisión. Los vehículos eléctricos utilizan dos motores (nissan FEV) o más, y en otros casos solo uno (GM impact 4, BMW E1/E2, y U2001). En la siguiente tabla se muestran algunos modelos de VE y los tipos de motores empleados.

Modelos de VE	Motores de VE
Fiat Panda Elettra	Motor de CD serie
Mazda Bongo	Motor de CD Shunt
Conceptor G-Van	Motor de CD excitado separadamente
Suzuki Senior Tricycle	Motor de CD de imán permanente
Fiat Seicento Elettra	Motor de inducción
Ford Think City	Motor de inducción
GM EV1	Motor de inducción
Honda EV Plus	Motor de imán permanente tipo serie
Nissan Altra	Motor de imán permanente tipo serie
Toyota RAV4	Motor de imán permanente tipo serie
Chloride Lucas	Motor de CD SR

Tabla 1.1. Aplicación de motores de VE's

## Motores

Los motores eléctricos han estado disponibles por más de un siglo. La evolución de los motores ha sido lenta y larga, a diferencia de las ciencias de la electrónica y computación. Sin embargo, el desarrollo de motores es continuamente estimulado por la invención de imanes permanentes de alta energía (Permanent Magnets, PM), topologías sofisticadas y poderosas técnicas de diseño (CAD). La clasificación de motores para VE's se divide principalmente en dos grupos, los conmutados y no conmutados. Los motores de CA con conmutador han quedado obsoletos para la propulsión de VE. En la figura 1.2 se muestra la clasificación de los motores para VE's. Los tipos de motor que se observan en óvalos han sido empleados en VE's .

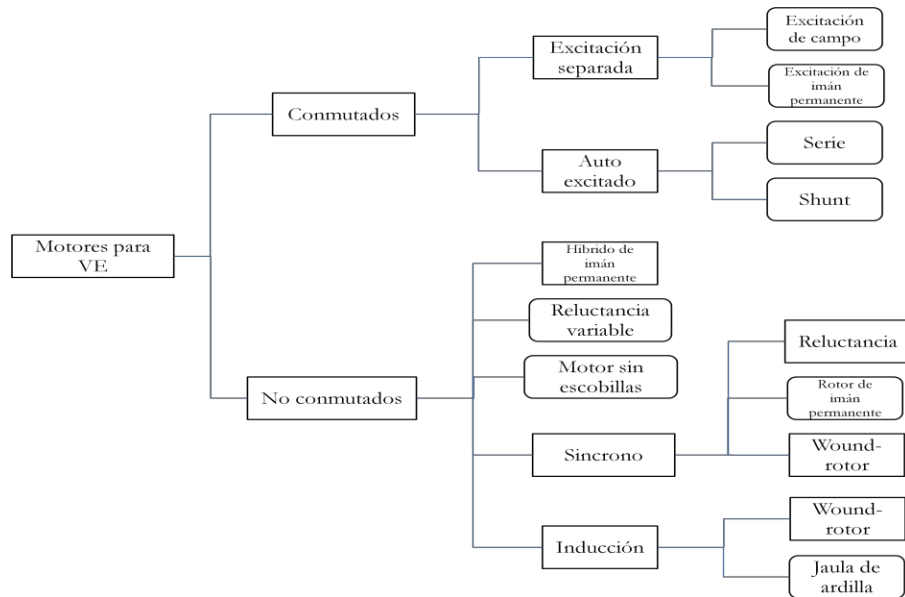


Figura 1.2. Clasificación de los motores de VE.

Los imanes permanentes proveen de una larga vida al motor. El único inconveniente es el costo inicial reflejado en el precio de los motores. Además de ferritas, se han introducido nuevos materiales como el neodimio-acero-boro (Nd-Fe-B), Alnico, Samario- Cobalto (Sm-Co). Debido a su alta inducción magnética y fuerza electromagnética y a su bajo costo, el Nd-Fe-B promete aplicaciones en motores. Con estos nuevos super-imanen, un nuevo número de topologías de motores con alta densidad y eficiencia, han sido recientemente desarrolladas .

Tradicionalmente los motores de CD (con materiales con mejores características) se han empleado en vehículos eléctricos, sin embargo, el problema principal es el mantenimiento en estos motores (conmutadores y escobillas).

Recientes desarrollos tecnológicos han posicionado mejor a los motores de corriente alterna (CA) con respecto de los de CD con las siguientes ventajas: alta eficiencia, alta densidad de potencia, bajo costo, mayor confiabilidad, y libres de mantenimiento. Ya que la alta confiabilidad y la operación libre de mantenimiento son consideraciones principales en la propulsión de los vehículos eléctricos, los motores de CA son más atractivos .

## Historia de la electrónica de potencia

La primera revolución electrónica inició en 1948 con la invención del transistor de silicio; la mayor parte de las tecnologías electrónicas avanzadas actuales tienen su origen en esta invención. A través de los años, la microelectrónica moderna ha evolucionado a partir de los semiconductores de silicio

La segunda revolución electrónica empezó en 1958 con el desarrollo del tiristor comercial. Ese fue el comienzo de la era de la electrónica de potencia. Y desde entonces, se han introducido diversos tipos de dispositivos semiconductores de potencia y nuevas técnicas de conversión .

La revolución de la microelectrónica dio la capacidad de procesar una gran cantidad de información a grandes velocidades. La revolución de la electrónica de potencia está dando la capacidad de dar forma y controlar grandes cantidades de energía con una eficiencia cada vez mayor.

A finales de los años 80 y principios de los 90, la revolución de la electrónica de potencia tuvo un gran auge dentro de los avances tecnológicos. La figura 1.3 muestra la historia de la electrónica de potencia .

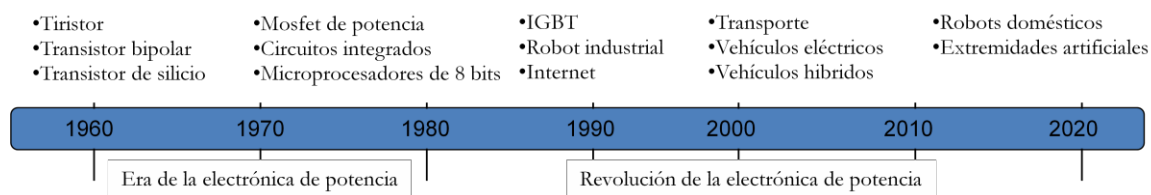


Figura 1.3. Historia de la electrónica de potencia.

## Dispositivos semiconductores de potencia

Desde que se desarrolló el primer tiristor (SCR) a fines de 1957, han surgido grandes adelantos en los dispositivos semiconductores de potencia. Hasta 1970, los tiristores convencionales se habían utilizado en forma exclusiva para el control de la energía en

aplicaciones industriales. A partir de 1970, se desarrollaron varios tipos de dispositivos semiconductores de potencia que llegaron a comercializarse, estos se pueden dividir en cinco tipos

- Diodos de potencia,
- Tiristores,
- Transistores de Unión Bipolar (BJT),
- MOSFET de potencia, y
- Transistores bipolares de compuerta aislada (IGBT).

Las especificaciones de los dispositivos semiconductores de potencia, comercialmente disponibles, aparecen en la tabla 1.2 .

Dispositivos semiconductores	Tipo	Especificación de voltaje/ Corriente	Alta frecuencia (Hz)	Tiempo de conmutación (µs)	Resistencia en estado activo (mΩ)
Diodos	Uso General	5000 V / 5000 A	1k	100	0.16
	Alta velocidad	3000 V / 1000 A	10k	2-5	1
	Schottky	40V / 60 A	20k	0.23	10
Tiristores desactivados en forma forzada	De bloqueo inverso	5000 V / 5000 A	1k	200	0.25
	Alta velocidad	1200 V / 1500 A	10k	20	0.47
	Bloqueo inverso	2500 V / 400 A	5k	40	2.16
	Conducción inversa	2500 V / 1000 A	5k	40	2.1
	GATT	1200 V / 400 A	20k	8	2.24
	Disparo lumínico	6000 V / 1500 A	400	200-400	0.53
TRIAC		1200 V / 300 A	400	200-400	3.57
Tiristores desactivados automáticamente	GTO	4500 V / 3000 A	10k	15	2.5
	SIT	4000 V / 2200 A	20k	6.5	5.75
Transistores de potencia	Individual	400 V / 250 A	20k	9	4
		400 V / 40 A	20k	6	31
		630 V / 50 A	25k	1.7	15
	Darlington	1200 V / 400 A	10k	30	10
SIT		1200 V / 300 A	100k	0.55	1.2
MOSFET de potencia	Individual	500 V / 8.6 A	100k	0.7	0.6
		1000 V / 4.7 A	100k	0.9	2
		500 V / 50 A	100k	0.6	0.4
IGBT	Individual	1200 V / 400 A	20k	2.3	60
MCT	Individual	600 V / 60 A	20k	2.2	18

Tabla 1.2. Especificaciones de los dispositivos semiconductores de potencia.

El transistor MOSFET de potencia presenta como principales ventajas la sencillez de control (por voltaje) y rápida frecuencia de conmutación ( $>300$  KHz); su principal inconveniente es que en conducción se comporta como una resistencia ( $R_{on}$ ), cuyo valor aumenta considerablemente con el voltaje máximo del semiconductor (la variación es proporcional a  $V_{Ds}$ , figura 1.4). Su uso queda limitado para aplicaciones de bajo voltaje ( $<100$  V) y altas frecuencias de conmutación, entre la aplicación que destaca está la fuente de alimentación conmutada .

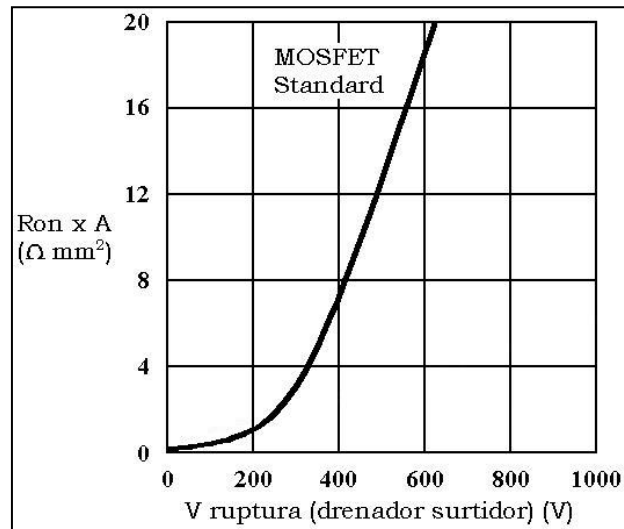


Figura 1.4. Resistencia de canal para MOSFET.

Debido al continuo desarrollo y mejora de los diferentes dispositivos, existen ámbitos de funcionamiento similares, con lo cual es difícil decidir cuál es el dispositivo idóneo. De esta forma, es cada vez más frecuente ver a los IGBT en aplicaciones de baja potencia y altas frecuencias, como fuentes de alimentación conmutadas, que eran de dominio del MOSFET. Sin embargo, en aquellas aplicaciones de bajo voltaje ( $< 250$  V) y/o altas frecuencias ( $>150$  KHz), los MOSFET siguen siendo la mejor opción [4]. En la tabla 1.3 se presenta una comparación entre ambos dispositivos semiconductores.



Características	MOSFET	IGBT
Método de control	Voltaje	Voltaje
Control del circuito	Simple	Simple
Impedancia de entrada	Alto	Alto
Potencia de control	Bajo	Bajo
Velocidad de transición	Rápido(ns)	Medio
Frecuencia de operación	Rápido ( <1 MHz )	Medio
Área segura de operación (SOA)	Amplia	Amplia
Voltaje de saturación	Alto	Bajo

Tabla 1.3. Comparación entre IGBT y MOSFET

Un dispositivo de potencia ideal debe contar con las siguientes características:

- Tener un voltaje activo igual a cero
- Soportar un voltaje infinito fuera de conducción
- Manejar una corriente infinita
- “Activarse” y “Desactivarse” en un tiempo cero, teniendo por lo tanto una velocidad de conmutación infinita

En la figura 1.5 se muestran aplicaciones y rangos de frecuencia de operación de los dispositivos de potencia .

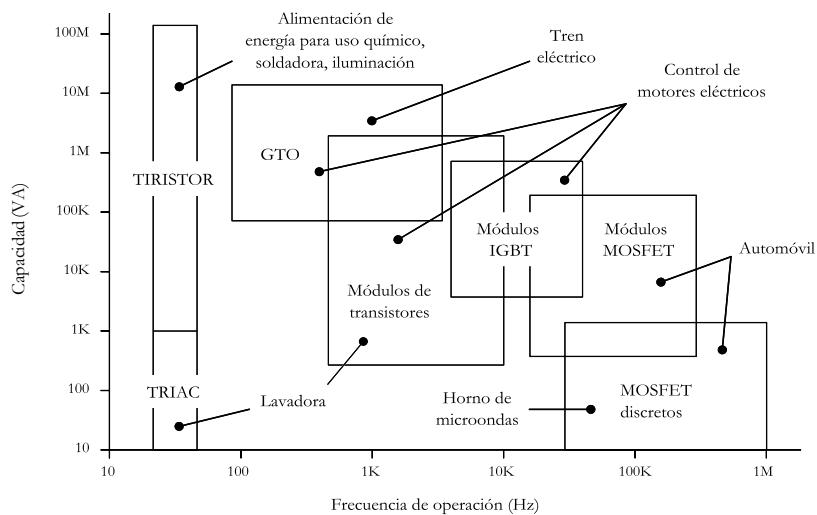


Figura 1.5. Evolución de los dispositivos de potencia.

## Características de control de dispositivos de potencia

Los dispositivos semiconductores de potencia se pueden operar como interruptores mediante la aplicación de señales de control a la terminal de compuerta de los tiristores (y a la base de los transistores bipolares). La salida se controla mediante la variación del tiempo de conducción de estos dispositivos de conmutación .

Los dispositivos semiconductores de potencia se pueden clasificar a partir de:

- Activación y desactivación sin control (diodo).
- Activación controlada y desactivación sin control (SCR).
- Características de activación y desactivación controladas (BJT, MOSFET, GTO, SITH, IGBT, SIT, MCT).
- Requisito de señal continua en la compuerta (BJT, MOSFET, IGBT, SIT).
- Requisito de pulso en la compuerta (SCR, GTO, MCT).
- Capacidad de soportar voltajes bipolares (SCR, GTO).
- Capacidad de soportar voltajes unipolares (BJT, MOSFET, GTO, IGBT, MCT).
- Capacidad de corriente bidireccional (TRIAC, RCT).
- Capacidad de corriente unidireccional (SCR, GTO, BJT, MOSFET, MCT, IGBT, SITH, SIT, diodo).

## Tipos de circuitos electrónicos de potencia

Para el control de la potencia eléctrica o del acondicionamiento de la misma, es necesario convertir la potencia de una forma a otra; las características de conmutación de los dispositivos semiconductores de potencia permiten dicha conversión. Los convertidores de potencia estáticos llevan a cabo estas funciones .

Los circuitos electrónicos de potencia se pueden clasificar en seis tipos:

- Rectificadores de diodos.
- Convertidores de CA-CD (rectificadores controlados).
- Convertidores de CA-CA (controladores de voltaje de CA).
- Convertidores de CD-CD (pulsadores de CD).

- Convertidores de CD-CA (inversores).
- Interruptores estáticos.

La selección de un dispositivo dependerá del voltaje, la corriente y los requisitos de velocidad del convertidor.

El trabajo realizado se basa en un convertidor de CD – CD, para entenderlo mejor, a continuación se explica cómo funcionan estos dispositivos .

## **Pulsadores de CD**

Los pulsadores de CD también conocidos como convertidores de CD a CD, se pueden considerar como un equivalente a un transformador de CA con una relación de vueltas que varía en forma continua; al igual que un transformador, pueden utilizarse como una fuente reductora o elevadora .

Los pulsadores de CD se utilizan ampliamente en el control de los motores de tracción para automóviles, tranvías eléctricos, grúas marinas, montacargas y elevadores de minas. Proporcionan control en aceleraciones continuas, alta eficiencia, respuesta rápida y dinámica. Los pulsadores se pueden utilizar para el frenado regenerativo de motores de CD, para devolver la energía a la alimentación, característica que permiten un ahorro de energía en aquellos sistemas de transporte que hacen paradas frecuentes .

## **Clasificación de pulsadores**

Dependiendo de la dirección en la que fluyan la corriente y el voltaje (ver figura 1.6), los pulsadores se clasifican en cinco tipos, estos son : pulsador de clase A, clase B, clase C, clase D, y clase E.

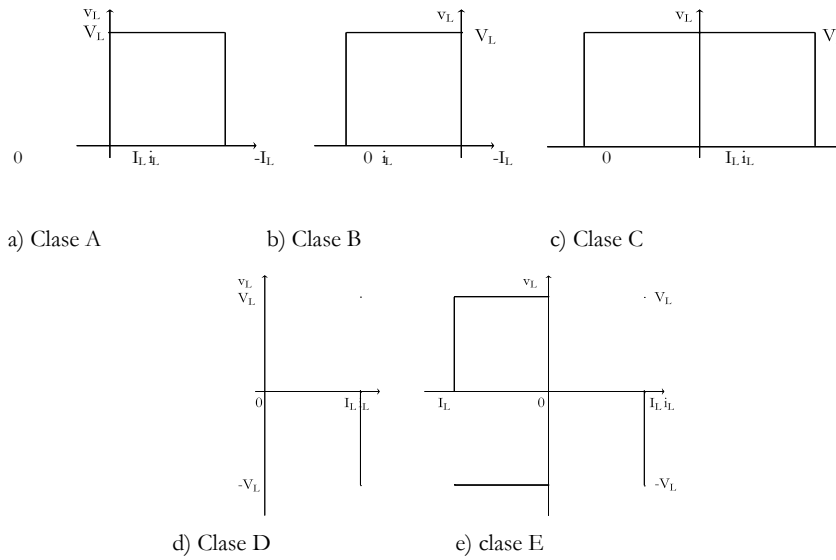


Figura 1.6. Clasificación de los pulsadores.

**Pulsador de clase E**

La corriente de carga puede ser positiva o negativa, como se observa en la figura 1.6- e; el voltaje de carga también puede ser positivo o negativo, éste se conoce como pulsador de cuatro cuadrantes. Se pueden combinar dos pulsadores de clase C para formar un pulsador de clase E (ver figura 1.7). Las polaridades de voltaje de la carga y de la corriente se muestran en la figura 1.8-a; los dispositivos que operan en los diferentes cuadrantes aparecen en la figura 1.8-b. Para operar en el cuarto cuadrante, deberá invertirse la operación de la batería E .

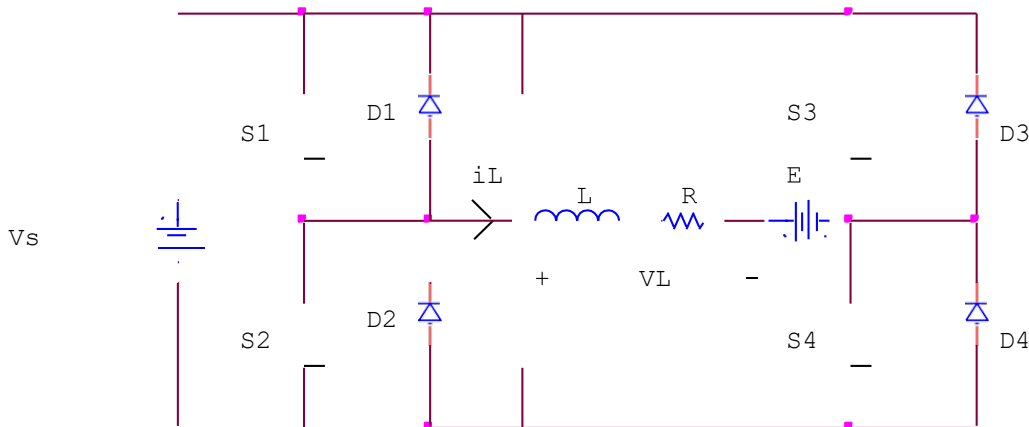


Figura 1.7. Circuito pulsador clase E.

Inversión	$V_L$	Rectificación	
$V_L + V_e$		$V_L + V_e$	
$i_L - V_e$		$i_L + V_e$	
<hr/>		<hr/>	
$V_L - V_e$		$V_L - V_e$	$I_L$
$i_L - V_e$		$i_L + V_e$	
Rectificación		Inversión	

	$V_L$	
S2, D4		S1, S4
D4, D1		D2, D4
<hr/>		<hr/>
S3, S2		S4, D2
S2, D4		D2, D3

a) Polaridades                      b) dispositivos en conducción

Figura 1.8. Polaridades y dispositivos del circuito pulsador clase E.

## Diseño de un circuito pulsador

El requisito principal para el diseño de los circuitos de conmutación es proporcionar un tiempo adecuado de desactivación, a fin de poder desconectar el dispositivo semiconductor principal .

Es más sencillo diseñar el circuito de conmutación si la inductancia de la alimentación se puede despreciar o si la corriente de la carga no es alta. Pero en el caso de una corriente más alta en la carga, las inductancias dispersas siempre presentes en los sistemas reales, juegan un papel significativo en el diseño del circuito. Los esfuerzos que imponen los voltajes sobre los dispositivos semiconductores de potencia dependen de la inductancia de la fuente y de la corriente de la carga .

En general el diseño incluye los siguientes pasos:

- Identificar los modos de operación del circuito pulsador.
- Determinar los circuitos equivalentes para los diversos modos de operación.
- Determinar las corrientes y los voltajes de estos modos y sus formas de onda.
- Evaluar los valores de los componentes de conmutación que satisfagan los límites del diseño.
- Determinar los requisitos de especificación de voltaje de todos los componentes y dispositivos.

Una alta frecuencia de pulsación reduce el tamaño de los elementos del filtro de entrada. Pero las frecuencias de las armónicas generadas por el pulsador también se incrementan en la línea de alimentación, esto puede causar problemas de interferencia con las señales de control y de comunicaciones .

## **Importancia del uso de motores eléctricos**

Avances recientes en baterías de alta energía, combinados con el desarrollo de motores más pequeños y más potentes, han abierto nuevos mercados para un amplio rango de nuevos productos, incluyendo aplicaciones portátiles, equipo de entretenimiento y vehículos eléctricos. La conveniencia de dispositivos tales como taladros portátiles, podadoras, y otras herramientas han resultado del rápido crecimiento del control de motores. Un nuevo énfasis en el diseño de motores se ha concentrado en un bajo consumo de energía para extender la vida útil de las baterías, proporcionando así más horas de duración .

Las preocupaciones de los diseñadores, para un funcionamiento mejorado y mayor eficiencia de operación no se limitan a aplicaciones portátiles. La siguiente generación de motores, en muchas aplicaciones industriales, tomará ventaja de los cambios que puedan ocurrir tanto en los motores como en los sistemas electrónicos que los controlarán y protegerán. Los controladores electrónicos de motores están teniendo mejoras en su empaque, control y potencia, además de que la interconexión y comunicación permite a los motores trabajar más eficientemente, adaptándose rápidamente a las nuevas aplicaciones .

El tamaño de un motor puede ser pequeño, desde una pequeña fracción de Watt hasta varios kilowatts, dependiendo de la aplicación. Las técnicas de control han cambiado de analógicas a digitales. La mejora de la tecnología en los semiconductores y los esquemas de control pueden ser implementados por un avance en los circuitos integrados, incrementando así la eficiencia de los dispositivos de potencia. Los motores están cambiando debido a los nuevos materiales magnéticos, laminaciones y embobinados .

Los motores eléctricos tienen directamente un gran impacto en la calidad de vida, esencialmente en calentadores y enfriadores de agua, aspiradoras, lavadoras de ropa, lava trastes, herramientas, así como en distintas formas de entretenimiento. El número de

motores que se pueden encontrar en casa, fácilmente pueden ser más de 50, mientras algunos automóviles fácilmente pueden exceder los 60 motores, éstos pueden estar en los limpia parabrisas, vidrios, espejos eléctricos, etc. .

## **Necesidad del aumento de control de potencia**

Los motores consumen aproximadamente el 50% de la electricidad generada en USA, cuando no se está realizando algún tipo de trabajo útil, se llega a consumir un 10% de esa energía; debido a esto los motores requieren un control más eficiente .

Los motores funcionan con mayor eficiencia a altas velocidades, el ruido producido por las altas velocidades es determinante para el desempeño de los trabajadores. El ruido excesivo de los motores, puede ser reducido haciendo una disminución en la velocidad del controlador del motor evitando los puntos de operación resonantes. Las unidades de operación en velocidades óptimas pueden producir menor ruido, previendo así un entorno agradable de trabajo. Como resultado, los motores con velocidad variable son atractivos para muchas aplicaciones nuevas. Los controladores de frecuencia variable proveen un ilimitado número de puntos de operación y una reducción considerable del ruido .

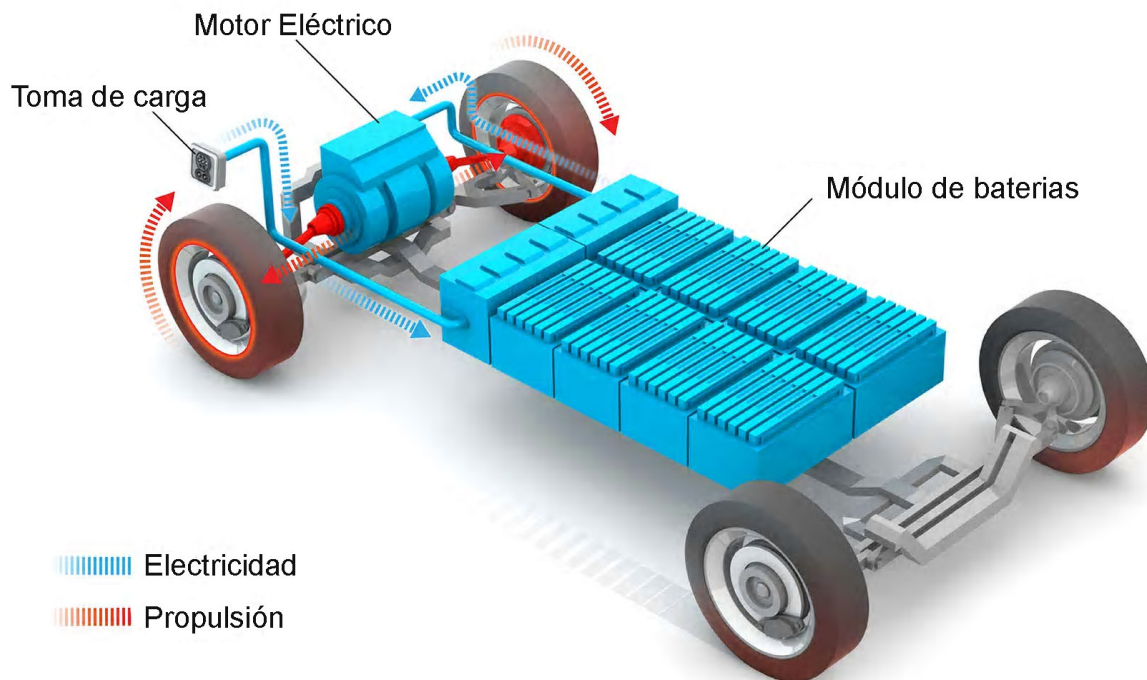
La calidad de aire en el interior de los edificios cerrados es una preocupación creciente, el incremento del aire acondicionado en países en desarrollo ha creado un mercado potencial para los controladores de motores. Un ejemplo claro es China, que incrementó al doble su consumo, de 5 millones a 10 millones de unidades en el año 2000 .

## **Importancia del uso de controles de motor**

Los beneficios de utilizar controles de motores no ocurren sin algunas implicaciones controversiales, incluyendo la necesidad de compatibilidad electromagnética, y la disminución de la interferencia electromagnética, deteriorando la calidad de potencia basada en el incremento del uso de controles digitales, la preocupación por la descarga electrostática como principal problema para los componentes semiconductores y nuevos aspectos de seguridad. No importa que terminología sea utilizada para la conmutación del control digital del motor – controlador de velocidad variable (CVV), controlador de frecuencia variable

(CFV) , o controlador de velocidad ajustable (CVA) – la conmutación del voltaje puede causar interferencia electromagnética .

Las descargas electrostáticas pueden causar daños en los dispositivos semiconductores de potencia y en los circuitos integrados. Afortunadamente, en los controles electrónicos, incluyendo la circuitería y los componentes semiconductores, pueden tratar los campos electromagnéticos, la calidad de potencia y las descargas electrostáticas. Estas soluciones se suman a otros elementos de complejidad para los sistemas de control de motores .





## Disponibilidad de nuevas tecnologías

El control de motores avanza a medida que mejoran las tecnologías motrices, nuevas y revisadas técnicas de control de motores, circuitos integrados diseñados específicamente para aplicaciones de control de motores, y mejoramientos en circuitos semiconductores de potencia. Muchas de estas mejoras permiten el uso de sistemas que anteriormente eran muy caros o técnicamente muy complejos. Como resultado, existe un cambio en el tipo de motores empleados para diferentes aplicaciones .

La reducción de costos es un importante aspecto del incremento en controladores digitales de motores. Por ejemplo, el costo para un controlador de motor industrial de 750 Watts decremento de \$685 dólares en 1981 a \$465 dólares en 1994. La reducción de costos es similar para todos los niveles de potencia .

En la automatización de fábricas en Estados Unidos, los motores controlados electrónicamente produjeron arriba de \$3 billones de dólares en ventas en el año de 1995 como se observa en la figura 1.9. La tecnología está cambiando a favor de los motores trifásicos de AC y los motores sin escobillas (brushless) de CD; para el año 2000 las ganancias rebasaron los \$4.3 billones de dólares en ventas. En Norte América, el 34% de los motores de AC son utilizados para ventiladores y bombas de agua .

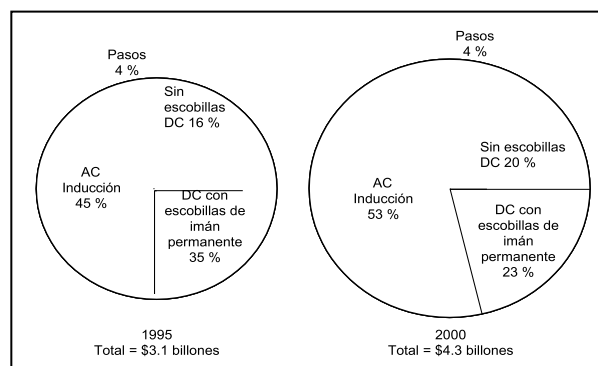


Figura 1.9. Ganancias en USA por la automatización de fábricas con controles de motores.

## Circuitos integrados para el control de motores

Uno de los esfuerzos iniciales para simplificar el control de motores fue la introducción de circuitos integrados específicos para el control de motores, los primeros aparecieron a mediados de los 80's. Estos ejemplificaron algunos de los requerimientos claves para la conmutación y protección de transistores de potencia .

Uno de los primeros circuitos integrados para combinar controles de motor y dispositivos de potencia en un solo encapsulado fue desarrollado para una aplicación en una cámara de video. La cámara requería de alta eficiencia en un espacio limitado y en un circuito impreso flexible. Un puente H completo de MOSFETs fue integrado con una circuitería de control de CMOS en un circuito integrado monolítico que podía ser utilizado para montajes de superficie .

Los tres tipos principales de dispositivos semiconductores normalmente utilizados para los controladores de motor son: Circuitos integrados analógicos, microcontroladores y transistores de potencia .

Además de variar la velocidad del motor o su fuerza de torsión, los controles electrónicos del motor también se pueden utilizar para medir la temperatura, ruido, etc. y para comunicarse con otros sistemas electrónicos .

Es importante que los sistemas a base de motores tengan la capacidad de comunicarse con otros equipos electrónicos. Si varios motores encienden al mismo tiempo, la corriente eléctrica puede exigir altas demandas aumentando la infraestructura eléctrica. Si existiera un encargado de la carga que pueda comunicarse con las aplicaciones eléctricas más grandes, un interruptor controlado ayudaría a optimizar su operación, así también se puede proporcionar la información sobre el estado de cada unidad .

## Tracción eléctrica

La tracción se define como un sistema para obtener el movimiento de un vehículo [URL 14]. Entonces, la tracción eléctrica se puede definir como la obtención del movimiento de un vehículo mediante el uso de la energía eléctrica, esto es, haciendo uso de motores eléctricos.

Se pueden distinguir tres periodos en los avances de la tracción eléctrica:

- El primer periodo llega hasta 1905 y se caracteriza por la aparición del motor eléctrico de corriente continua. La locomotora eléctrica es entonces una máquina autónoma semejante a la de vapor y su energía se obtiene mediante pilas o acumuladores.
- El segundo periodo está unido al desarrollo del transformador de corriente alterna, el cual posibilita corrientes de tensión elevadas. A partir de este momento la corriente se va a producir en lugares alejados de la máquina, con lo cual ésta va perdiendo su autonomía. Aparecen diversos tipos de electrificaciones: de corriente continua o alterna.
- El tercer periodo comienza antes de la Segunda Guerra Mundial, con la aparición de convertidores que permitirán transformar la corriente alterna en corriente continua en el interior de la locomotora [URL 15].

Motores de tracción eléctrica

### **Tipos de motores para automóviles eléctricos**

El tipo de motor eléctrico más empleado en tracción de automóviles eléctricos es el de corriente continua, ya que es de fácil regulación. La regulación puede ser clásica con resistencias, o por puente rectificador controlado. Esta última es electrónica y se emplea según el tipo de alimentación. La mayor desventaja de los motores de corriente continua es su elevado costo de mantenimiento [URL 16].

Dentro de los motores de corriente alterna, el más usado es el asíncrono, trifásico y monofásico. Actualmente se regulan electrónicamente regulando la tensión y la frecuencia de la alimentación por medio de onduladores semicontrolados. Los motores síncronos necesitan un ondulator totalmente controlado en el inducido y puente rectificador en el

inductor. Al ser necesario controlar exactamente la frecuencia de alimentación, su regulación es difícil, siendo poco usado [URL 16].

### **Ventajas y desventajas de los diferentes tipos de motores**

Corriente continua:

- Ventajas:
  - Sencillez en electrónica de control.
  - Sistemas de control económicos y precisos.
- Inconvenientes:
  - No son libres de mantenimiento.
  - Mayor peso y volumen para misma potencia y par que su correspondiente en corriente alterna.

Corriente alterna:

- Ventajas:
  - Robustez mecánica y eléctrica.
  - Reducido peso.
  - Precio.
- Inconvenientes:
  - Electrónica de potencia, control menos preciso.

## Modelado Matemático de motores de CD de imán permanente

Ya que los motores de cd se usan en forma extensa en sistemas de control, para propósitos de análisis, es necesario establecer modelos matemáticos para los motores de cd para aplicaciones de control. Se utilizará el diagrama eléctrico de la figura 1.10 para representar un motor de cd de imán permanente [25].

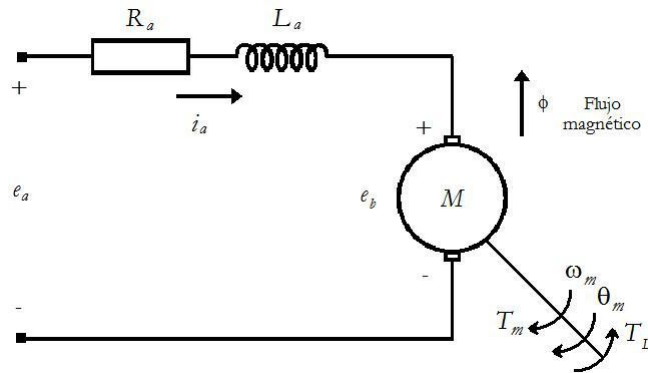


Figura 1.10. Modelado eléctrico de un motor de cd de imán permanente.

El circuito de armadura se modela con una resistencia  $R_a$  conectada en serie a una inductancia  $L_a$ , y a una fuente de voltaje  $e_b$  la cual representa la fuerza contraelectromotriz en la armadura cuando el rotor gira [25]. Las variables y parámetros del motor se definen como sigue:

$i_a$	= Corriente de armadura	$L_a$	= Inductancia de la armadura
$R_a$	= Resistencia de armadura	$e_a$	= Voltaje aplicado
$e_b$	= Fuerza contraelectromotriz	$K_b$	= Constante de la fuerza contraelectromotriz
$T_L$	= Par de carga	$\phi$	= Flujo magnético en el entre hierro
$T_m$	= Par del motor	$\omega_m$	= Velocidad angular del motor
$\theta_m$	= Desplazamiento del rotor	$J_m$	= Inercia del rotor
$K_i$	= Constante del par	$B_m$	= Coeficiente de fricción viscosa

Con referencia al diagrama del circuito de la figura 1.10, el control del motor de cd se aplica a las terminales de la armadura en la forma del voltaje aplicado  $e_a$ . Para un análisis

lineal, se supone que el par desarrollado por el motor es proporcional al flujo en el entre hierro y a la corriente de la armadura [25]. Por lo tanto:

$$T_m t = K_m t \Phi i_a t \quad (1.1)$$

Debido a que  $\Phi$  es constante, la ecuación (1.1) se escribe como:

$$T_m t = K_i i_a t \quad (1.2)$$

en donde  $K_i$  es la constante del par en N-m/A, Lb pie/A, u oz-plg/A [25].

Mediante la ley de voltajes de Kirchhoff, se obtiene la dinámica eléctrica del motor de cd de la figura 1.10.

$$e_t = \frac{d i_a t}{dt} L_a + i_a t R_a = \frac{1}{L_a} \frac{d \lambda_a t}{dt} - \frac{1}{L_a} \lambda_a t \frac{d i_a t}{dt} + i_a t R_a \quad (1.3)$$

donde la fuerza contraelectromotriz está dada por:

$$e_b t = K_b \frac{d \theta_m t}{dt} = K_b \omega_m t \quad (1.4)$$

Por otra parte, a través de la segunda ley de newton se obtiene la dinámica mecánica del motor de cd de la figura 1.10.

$$J_m \frac{d^2 \theta_m t}{dt^2} = T_m t - T_L t - B_m \frac{d \theta_m t}{dt} \quad (1.5)$$

en donde  $T_L t$  representa el par de carga del motor, y  $T_m t$  representa el par eléctrico generado por el circuito de armadura.

$$T_m t = K_i i_a t \quad (1.6)$$

Las ecuaciones (1.3) a (1.6) consideran a  $e_a t$  como la señal de entrada del sistema; entonces la ecuación (1.3) considera que  $di_a t dt$  es el efecto inmediato de aplicar voltaje  $e_a t$ , entonces en la ecuación (1.6),  $i_a t$  produce el par  $T_m t$ , la ecuación (1.4) define la fuerza contraelectromotriz, y finalmente, la ecuación (1.5), el par  $T_m t$  produce la velocidad angular  $\omega_m t$  y el desplazamiento  $\theta_m t$  [25].

Las variables de estado del sistema se pueden definir como  $i_a t$ ,  $\omega_m t$  y  $\theta_m t$ . Al sustituir directamente y al eliminar las variables que no son de estado de las ecuaciones (1.3) a (1.6), las ecuaciones de estado del sistema de motor de cd escritas en forma matricial son:

$$\begin{matrix} \frac{di_a t}{dt} \\ \frac{d\omega_m t}{dt} \\ \frac{d\theta_m t}{dt} \end{matrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_a}{L_a} & 0 & 0 \\ \frac{K_b}{J_m} & -\frac{1}{J_m} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a t \\ \omega_m t \\ \theta_m t \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_a} \\ \frac{K_i}{J_m} \\ 0 \end{bmatrix} e_a t - \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{J_m} \\ 0 \end{bmatrix} T_L t \quad (1.7)$$

Observe que en este caso, las ecuaciones de estado,  $T_L t$  se tratan como una segunda entrada [25].

El diagrama de estado del sistema se muestra en la figura 1.11 empleando la ecuación (1.7).

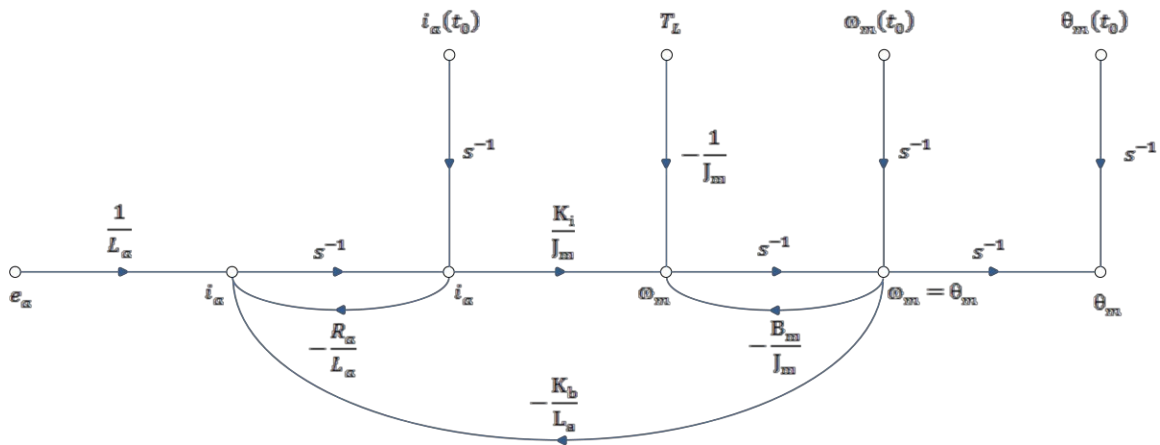


Figura 1.11. Diagrama de estado de un motor de cd.

La función de transferencia entre el desplazamiento del motor y el voltaje de entrada se obtiene del diagrama de estado como:

$$\frac{\theta_m s}{E_a s} = \frac{k_i}{L_a J_m s^3 + R_a J_m s + B_b L_a s^2 + k_b k_i + R_a B_m s} \quad (1.8)$$

en donde  $T_L t$  se igualó a cero.

La figura 1.12 muestra la representación en diagrama de bloques del sistema de un motor de cd. La ventaja de utilizar el diagrama de bloques es que proporciona una visión clara de la relación de funciones de transferencia entre cada bloque del sistema. Ya que se puede factorizar en el denominador de la ecuación (1.8), *el significado de la función de transferencia*

$\theta_m s / E_a s$  es que el motor de cd es esencialmente un dispositivo integrador entre estas dos variables. Eso ya se esperaba puesto que, si  $e_a t$  es una entrada constante, el desplazamiento de salida del motor será la salida de un integrador; esto es, se incrementará linealmente con el tiempo [25].

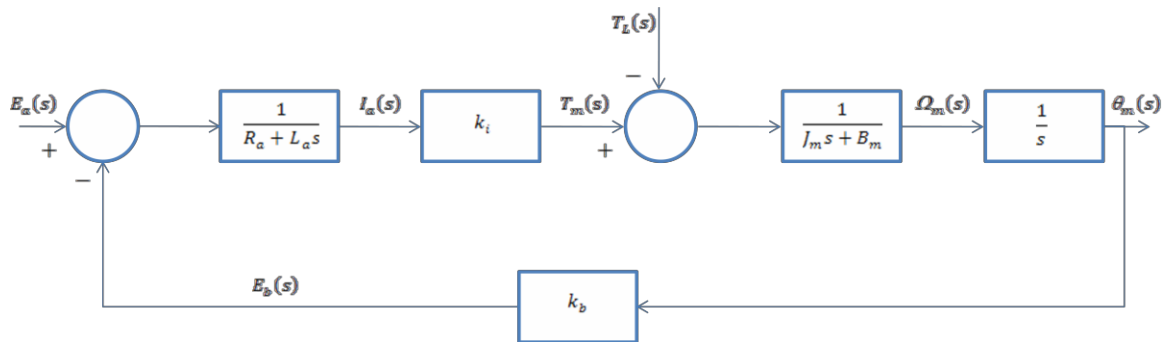


Figura 1.12. Diagrama a bloques de un sistema de motor de cd.

Aunque un motor de cd es por si mismo un sistema de lazo abierto, el diagrama de estado de la figura 1.11 y el diagrama a bloques de la figura 1.12 muestran que el motor tiene “interconstruido” un lazo retroalimentado provocado por la fuerza contraelectromotriz. Físicamente, la fuerza contraelectromotriz representa la realimentación de la señal que es proporcional al negativo de la velocidad del motor. Como se observa en la ecuación (1.7), la constante de la fuerza contraelectromotriz  $K_b$  representa un término que se añade a la



resistencia  $R_a$  y al coeficiente de fricción viscosa  $B_m$ . Por lo tanto, *la fuerza contraelectromotriz es equivalente a una "fricción eléctrica" que tiende a mejorar la estabilidad del motor, y en general, la estabilidad del sistema*

