

# Motor cc de imán permanente

FESTO

**FESTO**

Electricidad y Nuevas  
Energías  
LabVolt Series  
Manual del estudiante



**Alemania**  
Festo Didactic SE  
Rechbergstr. 3  
73770 Denkendorf  
Tel.: +49 711 3467-0  
Fax: +49 711 347-54-88500  
did@festo.com

**Estados Unidos**  
Festo Didactic Inc.  
607 Industrial Way West  
Eatontown, NJ 07724  
Tel.: +1 732 938-2000  
Sin cargo: +1-800-522-8658  
Fax: +1 732 774-8573  
services.didactic@festo.com

**Canadá**  
Festo Didactic Ltée/Ltd  
675, rue du Carbone  
Québec (Québec) G2N 2K7  
Tel.: +1 418 849-1000  
Sin cargo: +1-800-522-8658  
Fax: +1 418 849-1666  
services.didactic@festo.com

Manual del estudiante

Motor cc de imán permanente

Property of Festo Didactic  
www.festo-didactic.com  
Sale and/or reproduction forbidden

Festo Didactic  
es  
579363



000057936300000000000100

**Electricidad y Nuevas Energías**

# **Motor cc de imán permanente**

**Manual del estudiante**

579363

Nº de artículo: 579363 (Versión impresa) 591843 (CD-ROM)

Primera edición

Actualización: 09/2015

Por el personal de Festo Didactic

© Festo Didactic Ltée/Ltd, Québec, Canada 2013

Internet: [www.festo-didactic.com](http://www.festo-didactic.com)

e-mail: [did@de.festo.com](mailto:did@de.festo.com)

Impreso en Canadá

Todos los derechos reservados

ISBN 978-2-89640-865-8 (Versión impresa)

ISBN 978-2-89640-866-5 (CD-ROM)

Depósito legal – Bibliothèque et Archives nationales du Québec, 2013

Depósito legal – Library and Archives Canada, 2013

El comprador adquiere un derecho de utilización limitado simple, no excluyente, sin limitación en el tiempo, aunque limitado geográficamente a la utilización en su lugar / su sede.

El comprador tiene el derecho de utilizar el contenido de la obra con fines de capacitación de los empleados de su empresa, así como el derecho de copiar partes del contenido con el propósito de crear material didáctico propio a utilizar durante los cursos de capacitación de sus empleados localmente en su propia empresa, aunque siempre indicando la fuente. En el caso de escuelas/colegios técnicos, centros de formación profesional y universidades, el derecho de utilización aquí definido también se aplica a los escolares, participantes en cursos y estudiantes de la institución receptora.

En todos los casos se excluye el derecho de publicación, así como la inclusión y utilización en Intranet e Internet o en plataformas LMS y bases de datos (por ejemplo, Moodle), que permitirían el acceso a una cantidad no definida de usuarios que no pertenecen al lugar del comprador.

Todos los otros derechos de reproducción, copiado, procesamiento, traducción, microfilmación, así como la transferencia, la inclusión en otros documentos y el procesamiento por medios electrónicos requieren la autorización previa y explícita de Festo Didactic.

La información contenida en este documento está sujeta a cambios sin previo aviso y no representa ningún compromiso por parte de Festo Didactic. Los materiales Festo descritos en este documento se suministran bajo un acuerdo de licencia o de confidencialidad.

Festo Didactic reconoce los nombres de productos como marcas de comercio o marcas comerciales registradas por sus respectivos titulares.

Todas las otras marcas de comercio son propiedad de sus respectivos dueños. Es posible que en este manual se utilicen otras marcas y nombres de comercio para referirse a la entidad titular de las marcas y nombres o a sus productos. Festo Didactic renuncia a todo interés de propiedad relativo a las marcas y nombres de comercio que no sean los propios.

Property of Festo Didactic  
Sale and/or reproduction forbidden









# Símbolos de seguridad y de uso frecuente

Los siguientes símbolos de seguridad y de uso frecuente pueden encontrarse en este manual y en los equipos:

Símbolo	Descripción
	<b>PELIGRO</b> indica un nivel alto de riesgo que, de no ser evitado, ocasionará la muerte o lesiones de gravedad.
	<b>ADVERTENCIA</b> indica un nivel medio de riesgo, que de no ser evitado, puede ocasionar la muerte o lesiones de gravedad.
	<b>ATENCIÓN</b> indica un nivel bajo de riesgo, que de no ser evitado, puede ocasionar lesiones menores o leves.
	<b>ATENCIÓN</b> utilizado sin el <i>símbolo de riesgo</i>  , indica una situación de riesgo potencial que, de no ser evitada, puede ocasionar daños materiales.
	Precaución, riesgo de descarga eléctrica
	Precaución, superficie caliente
	Precaución, posible riesgo
	Precaución, riesgo al levantar
	Precaución, riesgo de atrapar las manos
	Aviso, radiación no ionizante
	Corriente continua
	Corriente alterna
	Corriente alterna y continua
	Corriente alterna trifásica
	Terminal de tierra (común)

Property of Festo Didactic  
Sale and/or reproduction forbidden

## Símbolos de seguridad y de uso frecuente

Símbolo	Descripción
	Terminal de conductor protegido
	Terminal de chasis
	Equipotencial
	Encendido (fuente)
	Apagado (fuente)
	Equipo protegido con aislamiento doble o reforzado
	Botón biestable en posición pulsado
	Botón biestable en posición no pulsado

# Índice

Prefacio .....	IX
Acerca de este manual .....	XI
<b>Introducción Motores cc de imán permanente.....</b>	<b>1</b>
OBJETIVO DEL MANUAL.....	1
PRINCIPIOS FUNDAMENTALES .....	1
Trabajo, par y potencia .....	1
Funcionamiento del motor cc básico.....	3
Motores cc de imán permanente.....	5
<b>Ejercicio 1 Funcionamiento del motor de impulsión y del freno.....</b>	<b>7</b>
PRINCIPIOS .....	7
Introducción al Dinamómetro/Fuente de alimentación de cuatro cuadrantes.....	7
Freno de par constante de dos cuadrantes .....	7
Motor de impulsión/Freno de velocidad constante, sentido horario .....	8
Motor de impulsión/Freno de velocidad constante, sentido antihorario.....	9
Medición de velocidad, par y potencia mecánica utilizando el Dinamómetro/Fuente de alimentación de cuatro cuadrantes.....	10
Funcionamiento como motor .....	10
Funcionamiento como generador .....	10
PROCEDIMIENTO .....	11
Instalación y conexiones .....	11
Funcionamiento del freno de par constante, de dos cuadrantes.....	13
Funcionamiento del motor de impulsión de velocidad constante.....	16
Motor de impulsión de velocidad constante accionando un generador cargado.....	19
CONCLUSIÓN .....	22
PREGUNTAS DE REVISIÓN .....	23

# Índice

<b>Ejercicio 2</b>	<b>Motor cc de imán permanente funcionando como generador .....</b>	<b>25</b>
	PRINCIPIOS .....	25
	Imanes permanentes.....	25
	Campo magnético alrededor de un conductor.....	27
	Campo magnético en un bucle de alambre (electroimán) ....	28
	Inducción electromagnética .....	29
	Construcción de un motor cc de imán permanente .....	33
	Motor cc de imán permanente funcionando como generador .....	34
	Reducción de las fluctuaciones de la tensión cc generada .....	38
	Curva característica de la tensión generada en función de la velocidad de rotación .....	40
	Par de oposición a la rotación en un motor cc de imán permanente que funciona como generador .....	40
	Curva característica del par de oposición en función de la corriente.....	42
	PROCEDIMIENTO .....	43
	Fenómeno de inducción electromagnética .....	43
	Oposición a la rotación.....	44
	Curva característica de la tensión en función de la velocidad de un motor cc de imán permanente que opera como generador .....	44
	Rotación en sentido horario .....	46
	Rotación en sentido antihorario .....	47
	Curva característica del par en función de la corriente de un motor cc de imán permanente operando como generador .....	49
	CONCLUSIÓN .....	51
	PREGUNTAS DE REVISIÓN .....	51
<b>Ejercicio 3</b>	<b>Motor cc de imán permanente funcionando como motor .....</b>	<b>55</b>
	PRINCIPIOS .....	55
	Funcionamiento de un motor cc de imán permanente como motor .....	55
	Campo magnético producido en el inducido.....	56
	Rotación del inducido que resulta de la interacción entre los campos magnéticos del inducido y los imanes permanentes .....	59
	Diagrama equivalente de un motor cc de imán permanente .....	61

# Índice

PROCEDIMIENTO .....	64
Instalación y conexiones .....	65
Curva característica de la velocidad en función de la tensión de un motor cc de imán permanente operando como motor .....	66
Rotación en sentido horario.....	66
Rotación en sentido antihorario .....	68
Curvas características de par en función de la corriente y de la velocidad en función del par de un motor cc de imán permanente funcionando como motor .....	69
Rotación en sentido horario.....	70
Rotación en sentido antihorario .....	72
CONCLUSIÓN .....	74
PREGUNTAS DE REVISIÓN .....	74
<b>Apéndice A Tabla de utilización del equipo .....</b>	<b>77</b>
<b>Apéndice B Glosario de términos nuevos .....</b>	<b>79</b>
<b>Apéndice C Símbolos de los diagramas de circuitos.....</b>	<b>81</b>
<b>Apéndice D Preparación del bloque de baterías de plomo.....</b>	<b>87</b>
Procedimiento de carga .....	87
Prueba de sulfatación .....	88
Mantenimiento de las baterías.....	89
Índice de términos nuevos.....	91
Bibliografía .....	93

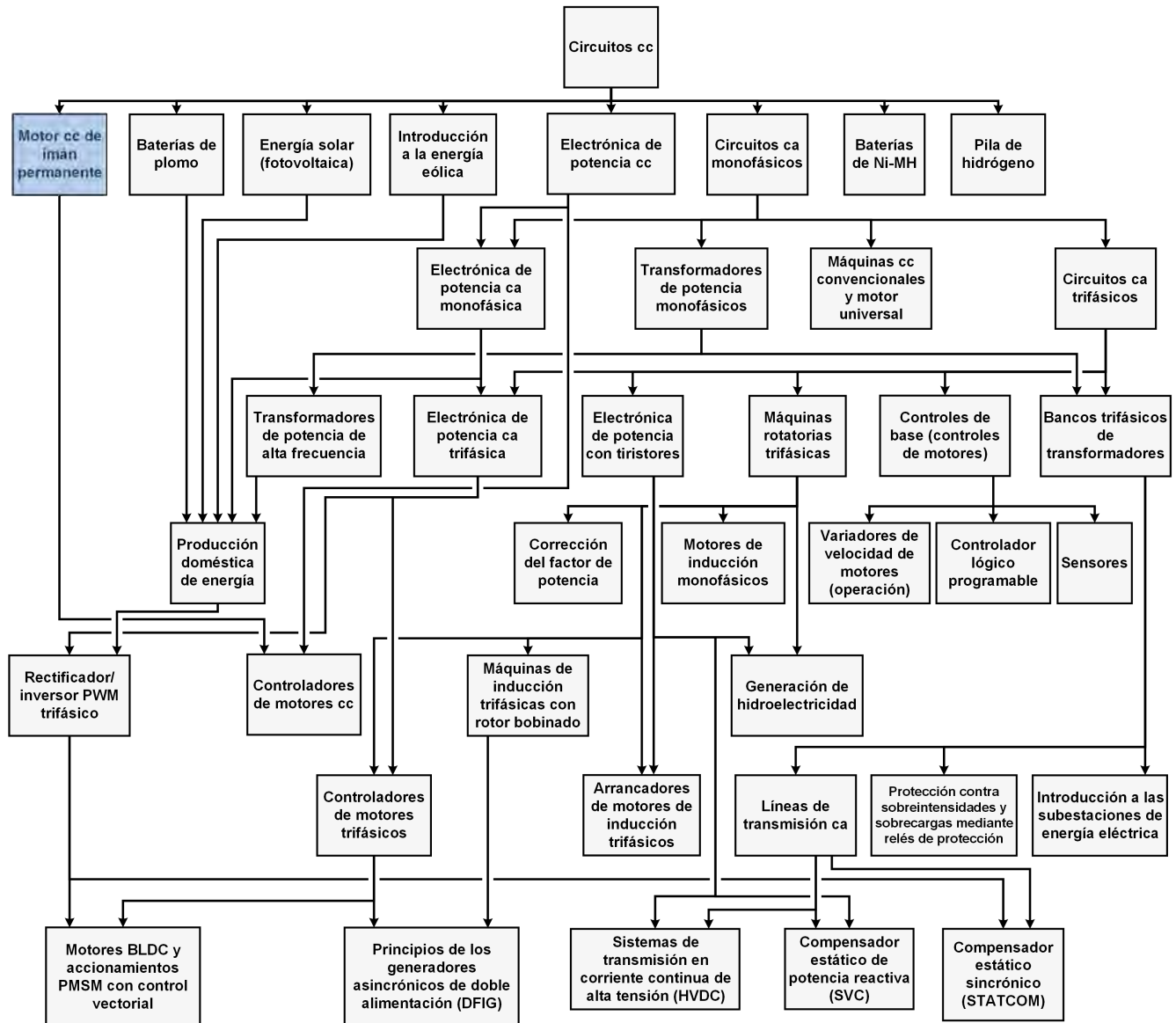


Property of Festo Didactic  
Sale and/or reproduction forbidden

# Prefacio

La producción de energía a partir de recursos naturales renovables como el viento, la luz del sol, la lluvia, las mareas, el calor geotérmico, etc., ha ganado mucho protagonismo en estos últimos años dado que es un medio eficaz para reducir la emisión de gases de efecto invernadero (GEI). Últimamente, ha surgido como una tendencia importante la necesidad de tecnologías innovadoras para hacer que las redes sean más inteligentes debido a que el aumento de la demanda de energía eléctrica que se observa en todo el mundo hace que para las redes actuales de muchos países resulte cada vez más difícil continuar a soportar la demanda de energía. Además, en muchas partes del mundo se desarrollan y comercializan vehículos eléctricos (desde bicicletas hasta automóviles) cada vez con más éxito.

Para responder a las necesidades cada vez más diversificadas en materia de capacitación en el amplio sector de la energía eléctrica, hemos desarrollado el Programa didáctico en tecnologías de la energía eléctrica, un programa de aprendizaje modular destinado a escuelas técnicas, colegios y universidades. El organigrama de más abajo muestra el programa en el que cada caja representa un curso específico.



Programa didáctico en tecnologías de la energía eléctrica.

# Prefacio

El programa comienza con una variedad de cursos que tratan en profundidad los temas básicos relacionados con el campo de la energía eléctrica, como los circuitos de corriente continua y alterna, transformadores de potencia, máquinas rotatorias, líneas de transmisión de corriente alterna y electrónica de potencia. El programa se basa en los conocimientos adquiridos por el estudiante a través de esos cursos básicos para luego aprender temas más avanzados como la producción doméstica de energía a partir de recursos renovables (viento y luz solar), generación de hidroelectricidad a gran escala, producción de energía eléctrica a gran escala a partir de la energía eólica (utilizando las tecnologías de los generadores de inducción de doble alimentación [DFIG], asíncronos y sincrónicos), tecnologías de redes inteligentes (SVC, STATCOM, transmisión HVDC, etc.), almacenamiento de la energía eléctrica en baterías y sistemas de control para pequeños vehículos y automóviles eléctricos.

Invitamos a los lectores de este manual a enviarnos sus opiniones, comentarios y sugerencias para mejorarlo.

Por favor, envíelos a [did@de.festo.com](mailto:did@de.festo.com).

Los autores y Festo Didactic estamos a la espera de sus comentarios.

# Acerca de este manual

Las máquinas rotatorias, como los motores y generadores (o alternadores) eléctricos se encuentran en casi todos los sectores de la industria. Los principios básicos de funcionamiento de estas máquinas se conocen desde hace casi dos siglos. Estas máquinas operan gracias a la interacción entre los campos magnéticos y los conductores que transportan corriente eléctrica. Dichas máquinas se dividen en dos categorías básicas: motores y generadores.

Los motores cc de imán permanente son máquinas rotatorias que funcionan con corriente continua (es decir, están alimentados con este tipo de corriente). Se pueden utilizar como generadores o como motores. Los motores cc de imán permanente son dispositivos robustos, fáciles de conectar y requieren poco mantenimiento. Se encuentran en una gran variedad de aplicaciones, como cargadores de baterías, pequeños vehículos eléctricos, aerogeneradores, pequeñas motos, bombas, fresadoras, electrodomésticos, equipos ópticos, etc.

Este manual permite que el estudiante se familiarice con los motores cc de imán permanente utilizados como generadores o como motores. Este manual también abarca la construcción, principios de funcionamiento y curvas características de dichos motores para cada uno de esos modos de funcionamiento.

El equipo para el curso consiste, principalmente, en los módulos Motor cc de imán permanente y Dinamómetro/Fuente de alimentación de cuatro cuadrantes. El funcionamiento del motor se controla mediante el software LVDAC-EMS, que ofrece también la instrumentación necesaria para registrar los datos experimentales y trazar las curvas características.

## Consideraciones de seguridad

Los símbolos de seguridad que pueden emplearse en este manual y en los equipos están listados en la tabla de Símbolos de seguridad al principio de este manual.

Los procedimientos de seguridad relacionados con las tareas que se le pedirán realizar están indicados en cada ejercicio.

Asegúrese de emplear el equipo protector adecuado al realizar las tareas requeridas en los ejercicios prácticos. Nunca realice una tarea si tiene alguna razón para pensar que una manipulación podría ser peligrosa para usted o sus compañeros.

## Prerrequisito

Como prerrequisito de este curso, usted debe haber leído el manual *Circuitos cc*, p/n 86350.

## Sistemas de unidades

Los valores de los parámetros medidos se expresan utilizando el Sistema internacional de unidades SI seguidos por los valores en el sistema de unidades anglosajón (entre paréntesis).

Property of Festo Didactic  
Sale and/or reproduction forbidden

Property of Festo Didactic  
Sale and/or reproduction forbidden

## Motores cc de imán permanente

### OBJETIVO DEL MANUAL

Cuando haya completado este manual, estará familiarizado con la construcción y el funcionamiento de los motores cc de imán permanente utilizados como generadores o motores. Se familiarizará con las curvas características de estos motores para cada modo de funcionamiento.

### RESUMEN DE LOS PRINCIPIOS

Los Principios fundamentales abarcan los siguientes puntos:

- Trabajo, par y potencia
- Funcionamiento del motor cc básico
- Motores cc de imán permanente

### PRINCIPIOS FUNDAMENTALES

#### Trabajo, par y potencia

El **trabajo** mecánico  $W$  que se hace cuando una fuerza  $F$  mueve un objeto una distancia  $d$  se puede calcular utilizando la siguiente ecuación:

$$W = F \cdot d \quad (1)$$

donde  $W$  es el trabajo mecánico realizado por la fuerza, expresado en julios (J) o en libras-fuerza por pulgada (lbf·pulg.).

$F$  es la magnitud de la fuerza que mueve el objeto, expresada en newtons (N) o en libras-fuerza (lbf).

$d$  es la distancia que la fuerza hace mover el objeto, expresada en metros (m) o en pulgadas (pulg.).

La figura 1 muestra el ejemplo de un bloque que se desplaza sobre una distancia  $d$  de 1 m (39,4 pulg.) por una fuerza  $F$  de 1 N (0,22 lbf). Utilizando la ecuación (1), se puede calcular que se ha realizado un trabajo mecánico  $W$  de 1 J (8,85 lbf·pulg.).

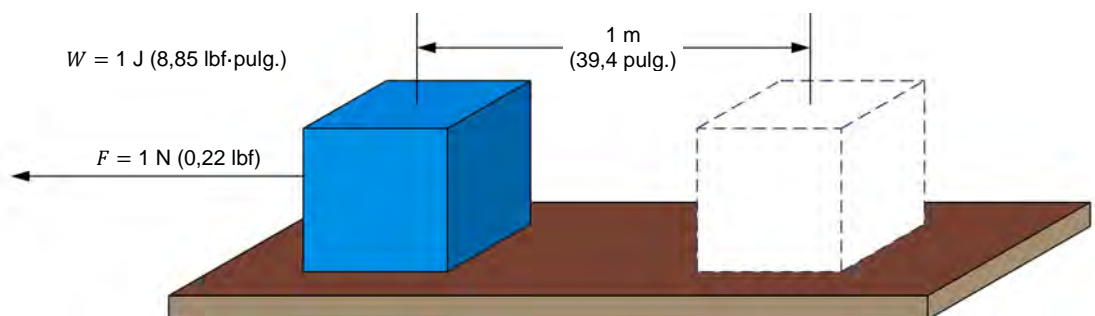


Figura 1. Trabajo requerido para mover un bloque.

Considere ahora que el bloque de la figura 1 se mueve la misma distancia utilizando una polea que tiene un radio  $r$ , como se muestra en la figura 2 .

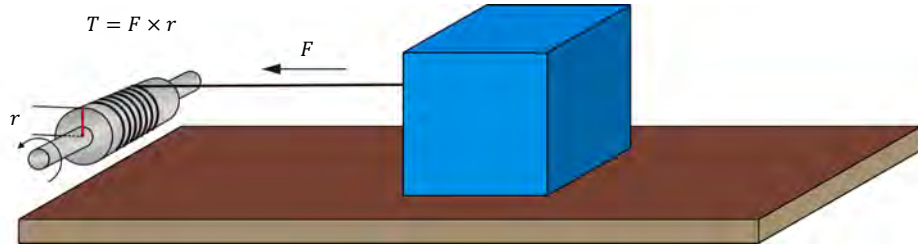


Figura 2 Movimiento de un bloque utilizando una polea.

Se debe aplicar una fuerza de torsión en el eje de la polea para hacerla girar de modo que la cuerda enrollada alrededor de dicha polea tire del bloque con una fuerza  $F$ . Esta fuerza de torsión se conoce como **par**  $T$  y se define mediante la siguiente ecuación:

$$T = F \cdot r \quad (2)$$

- donde  $T$  es el par ejercido sobre el eje de la polea, expresado en newtons por metro (N·m) o en libras-fuerza por pulgada (lbf·pulg.).  
 $F$  es la magnitud de la fuerza que actúa sobre el eje de la polea, expresada en newtons (N) o en libras fuerza (lbf).  
 $r$  es el radio de la polea, expresado en metros (m) o en pulgadas (pulg.).

Al final de cada rotación completa de la polea, el bloque se ha desplazado una distancia de  $(2\pi \cdot r)$  metros o pulgadas, lo que significa que se ha hecho un trabajo de  $(2\pi \cdot r \cdot F)$  J o lbf·pulg. Debido a que  $T = F \cdot r$ , la cantidad de trabajo  $W$  efectuado en una revolución se puede expresar como  $(2\pi \cdot T)$  J o lbf·pulg.

La **potencia**  $P$  se define como el trabajo por unidad de tiempo y se calcula utilizando la siguiente ecuación, cuando el trabajo  $W$  está expresado en julios.

$$P = \frac{W}{t} \quad (3)$$

- donde  $P$  es la potencia del dispositivo que realiza el trabajo, expresada en vatios (W).  
 $W$  es la cantidad de trabajo realizado, expresado en julios (J).  
 $t$  es el tiempo que toma realizar el trabajo, expresado en segundos (s).

Cuando el trabajo  $W$  está expresado en libras-fuerza por pulgada (lbf-pulg.), se debe utilizar la siguiente ecuación para calcular la potencia  $P$ .

$$P = \frac{W}{t} \cdot \frac{1}{8,85} = \frac{W}{8,85 \times t} \quad (4)$$

En la ecuación (4) y en la ecuación (6), el término  $1/8,85$  se utiliza para convertir el trabajo  $W$ , expresado en libras-fuerza por pulgada (lbf-pulg.), en trabajo expresado en julios (J).

donde  $W$  es la cantidad de trabajo realizado, expresada en libras-fuerza por pulgada (lbf-pulg.).

Debido a que la potencia es trabajo realizado por unidad de tiempo, la potencia  $P$  de un motor girando a una velocidad  $n$  se puede calcular utilizando la siguiente ecuación, cuando el par  $T$  está expresado en newtons por metro (N·m).

$$P = n \cdot \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}} \cdot 2\pi T = n \cdot \frac{1 \text{ min}}{9,5 \text{ s}} \cdot T = \frac{n \cdot T}{9,5} \quad (5)$$

En la ecuación (5) y en la ecuación (6), el término  $1/60 \text{ s}$  se utiliza para convertir la velocidad  $n$  del motor, expresada en revoluciones por minuto (rpm), en velocidad expresada en revoluciones por segundo (r/s).

donde  $n$  es la velocidad de rotación del motor, expresada en revoluciones por minuto (rpm).

Cuando el par  $T$  está expresado en libras-fuerza por pulgada (lbf-pulg.), la potencia  $P$  del motor se puede calcular utilizando la siguiente ecuación:

$$P = n \cdot \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}} \cdot 2\pi T \cdot \frac{1}{8,85} = n \cdot T \cdot \frac{1 \text{ min}}{84,5 \text{ s}} = \frac{n \cdot T}{84,5} \quad (6)$$

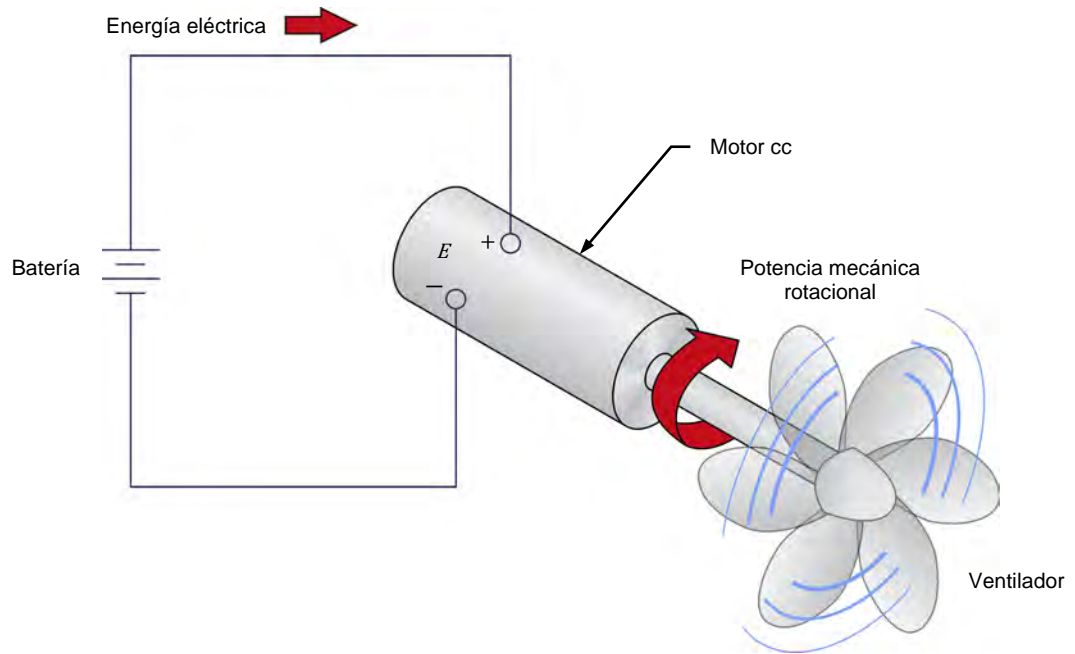
Es posible obtener la potencia  $P$ , expresada en caballos de fuerza (hp), para toda potencia  $P$  dada, expresada en vatios (W), dividiendo el valor de la potencia en vatios por 746.

### **Funcionamiento del motor cc básico**

Un motor cc es una máquina electromecánica rotatoria que funciona con corriente continua (es decir, que está alimentada con esa corriente). Por ejemplo, cuando se conecta una fuente de alimentación cc, como una batería, a los terminales de un motor cc, éste comienza a girar y a producir una potencia mecánica rotacional en su eje, como se muestra en la figura 3.

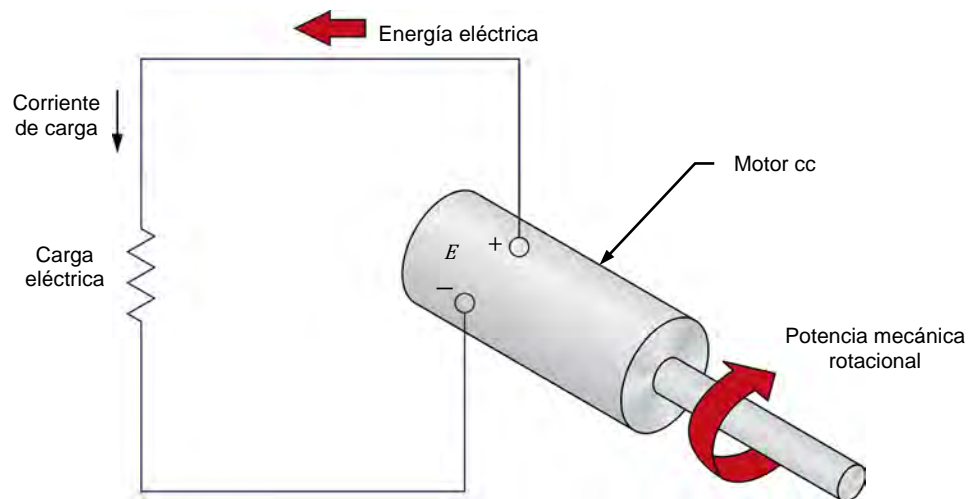
La potencia mecánica rotacional producida en el eje del motor está disponible para hacer rotar un objeto. Este objeto puede ser el rotor de las aspas de un ventilador, las ruedas motrices de un vehículo, etc. De esta manera, el motor cc convierte la energía eléctrica de la batería en potencia mecánica (rotacional).





**Figura 3. Funcionamiento como motor: el motor cc convierte energía eléctrica en potencia mecánica rotacional que hace girar el ventilador.**

Un motor cc también puede realizar la operación opuesta, es decir, convertir potencia mecánica rotacional en energía eléctrica, como se muestra en la figura 4. Cuando se aplica la potencia mecánica rotacional al eje del motor cc, éste comienza a girar y se genera una tensión cc en sus terminales. Cuando se conecta una carga eléctrica a los terminales del motor, la corriente fluye a través de la carga y ésta consume la energía eléctrica generada por el motor. En este caso, el motor cc funciona como generador ya que produce energía eléctrica a partir de la potencia mecánica aplicada a su eje (en lugar de convertir la energía eléctrica aplicada a sus terminales en potencia mecánica).



**Figura 4. Funcionamiento como generador: el motor cc convierte la potencia mecánica rotacional en energía eléctrica que es consumida por una carga eléctrica.**

## Motores cc de imán permanente

Los **motores cc de imán permanente** utilizan el campo magnético producido por los imanes permanentes para funcionar. Los motores de este tipo que se encuentran por lo general en el mercado operan en un rango de potencia de va de unos pocos vatios (W) hasta decenas de kilovatios (kW). En general, los pequeños motores cc de imán permanente están diseñados para tensiones cc de entrada de 5 V, 12 V, 24 V y 48 V.



Figura 5. Motor cc de imán permanente pequeño.

Los motores industriales están diseñados para tensiones cc de 90 a 180 V y, cuando se trata de aplicaciones con grandes potencias, para tensiones cc de 250 V, y a veces superiores.

Los motores cc de imán permanente son dispositivos eléctricos robustos. Son fáciles de conectar, ya que se alimentan únicamente mediante dos cables eléctricos. Además, requieren poco mantenimiento, ya que tienen muy pocas piezas expuestas a desgaste. Las **escobillas** son piezas de fibra de carbono que se desgastan con el uso del motor. Por lo tanto, se deben reemplazar periódicamente. El intervalo de reemplazo de las escobillas depende de la intensidad de utilización del motor.

En general, los motores cc de imán permanente tienen un buen rendimiento, ya que no se pierde energía eléctrica para producir el campo magnético (a éste lo produce de manera natural un imán permanente) necesario para su funcionamiento. Esto hace que este tipo de motores sea una excelente opción en toda aplicación donde el rendimiento es primordial.

Los motores cc de imán permanente se utilizan en muchas aplicaciones, incluyendo pequeños vehículos eléctricos, aerogeneradores, pequeñas motos, carros de golf, electrodomésticos, equipos de jardinería, máquinas herramientas, elevadores, equipos ópticos, robots, accionamientos de bombas y sopladores, bombas sumergibles, malacates, equipos de ferrocarril, etc.



Figura 6. Los motores cc de imán permanente se pueden utilizar para alimentar bicicletas y vehículos eléctricos.



Figura 7. Los motores cc de imán permanente se pueden utilizar en motos y carros de golf.

## Funcionamiento del motor de impulsión y del freno

### OBJETIVO DEL EJERCICIO

Cuando complete este ejercicio, estará familiarizado con las funciones básicas del Dinamómetro/Fuente de alimentación de cuatro cuadrantes que se utiliza en este manual. También estará familiarizado con la polaridad de la velocidad, del par y de la potencia mecánica para una máquina que funciona como motor o como generador.



*Los ejercicios prácticos de este manual requieren que se familiarice con los instrumentos computarizados. Para ello, consulte los manuales del usuario Sistema de adquisición y control de datos, p/n 86716-E e Instrumentos computarizados para EMS, p/n 86718-E.*

### RESUMEN DE LOS PRINCIPIOS

Los Principios de este ejercicio abarcan los siguientes puntos:

- Introducción al Dinamómetro/Fuente de alimentación de cuatro cuadrantes  
*Freno de par constante de dos cuadrantes. Motor de impulsión/Freno de velocidad constante, sentido horario. Motor de impulsión/Freno de velocidad constante, sentido antihorario.*
- Medición de velocidad, par y potencia mecánica utilizando el Dinamómetro/Fuente de alimentación de cuatro cuadrantes  
*Funcionamiento como motor. Funcionamiento como generador.*

### PRINCIPIOS

#### Introducción al Dinamómetro/Fuente de alimentación de cuatro cuadrantes

El módulo Dinamómetro/Fuente de alimentación de cuatro cuadrantes utilizado en este manual consta de complejos circuitos de electrónica de potencia, un microcontrolador y un motor cc. El módulo se puede utilizar para implementar múltiples funciones. Todas las funciones mecánicas (es decir, todas las funciones que utilizan el motor cc) permiten que dicho módulo funcione como un **dinamómetro**, es decir, para medir el par creado por la máquina conectada al mismo. En este ejercicio se describen las siguientes tres funciones básicas:

1. Freno de par constante de dos cuadrantes
2. **Motor de impulsión**/Freno de velocidad constante sentido horario.
3. Motor de impulsión/Freno de velocidad constante sentido antihorario

Estas tres funciones se explican con mayores detalles a continuación.

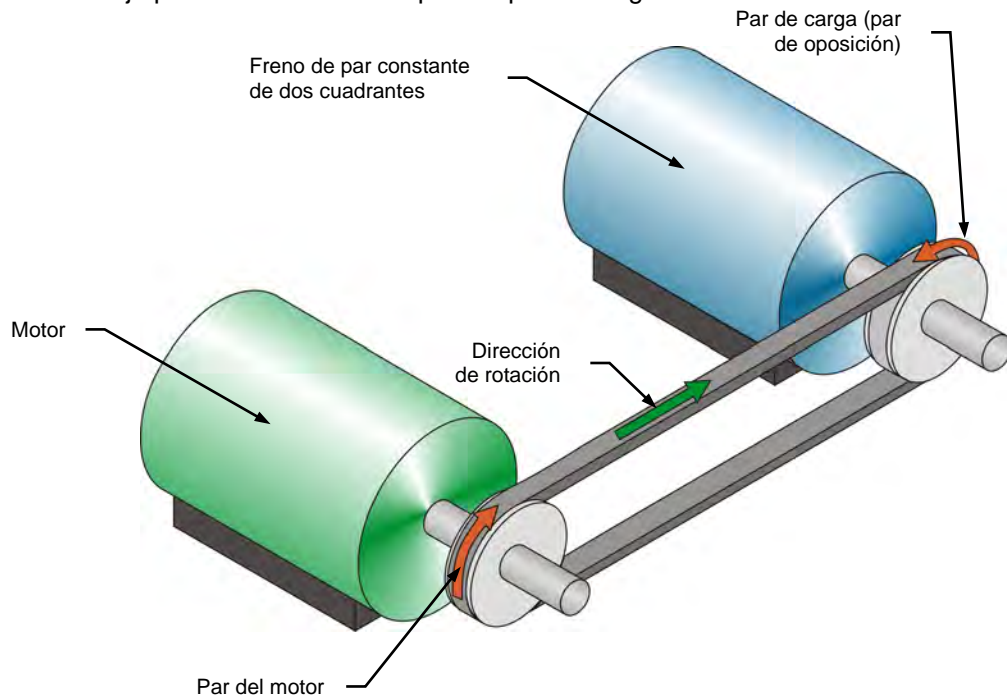
#### *Freno de par constante de dos cuadrantes*

Esta función se utiliza para estudiar las máquinas rotatorias funcionando como motores (es decir, conversión de energía eléctrica en potencia mecánica). El freno de par constante de dos cuadrantes se puede utilizar para cargar

Property of Festo Didactic

Sale and/or reproduction forbidden

mecánicamente un motor (es decir, para crear un par de oposición que actúe contra el par producido por el motor al girar), como se muestra en la figura 8. Por lo tanto, es posible estudiar la velocidad, el par y la potencia mecánica del motor bajo prueba cuando se le aplica el par de carga.



**Figura 8. Motor acoplado a un freno de par constante de dos cuadrantes.**

Cuando el Dinamómetro/Fuente de alimentación de cuatro cuadrantes funciona como un freno de par constante de dos cuadrantes, es posible ajustar la magnitud del par de carga producido por el freno. La ventana Dinamómetro/Fuente de alimentación de cuatro cuadrantes del software LVDAC-EMS tiene medidores de velocidad, par, potencia y energía que indican los diferentes parámetros medidos para la máquina bajo prueba. Por ejemplo, el par indicado por el medidor de par corresponde al par producido por el motor bajo prueba, no al par de carga producido por el freno de par constante de dos cuadrantes.

Cuando se determina el par que produce el motor acoplado al módulo Dinamómetro/Fuente de alimentación de cuatro cuadrantes, éste compensa automáticamente su propio par de fricción y el de la correa. Por lo tanto, el par indicado por el medidor de par de la ventana Dinamómetro/Fuente de alimentación de cuatro cuadrantes del software LVDAC-EMS, representa el par real producido en el eje del motor bajo prueba. Del mismo modo, la potencia mecánica que indica el medidor de dicha ventana representa la potencia mecánica real en el eje del motor bajo prueba.

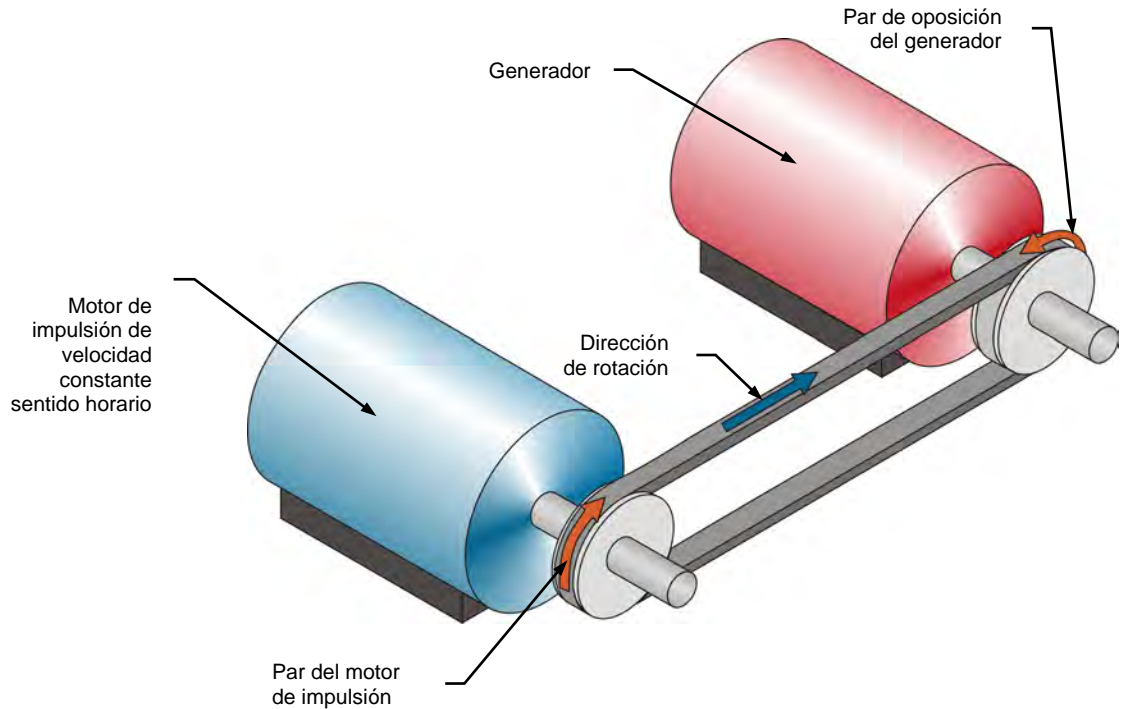
***Motor de impulsión/Freno de velocidad constante, sentido horario***

Esta función de control se utiliza principalmente para estudiar las máquinas rotatorias que funcionan como generadores (es decir, conversión de potencia mecánica en energía eléctrica). El motor de impulsión/freno de velocidad constante, sentido horario, se puede utilizar para accionar una máquina rotatoria (es decir, para hacer que la máquina gire con el motor de impulsión/freno), como

Property of Festo Didactic

Sale and/or reproduction forbidden

se muestra en la figura 9. En este caso, el módulo Dinamómetro/Fuente de alimentación de cuatro cuadrantes funciona como motor de impulsión. Debido a que el motor de impulsión/freno de velocidad constante, sentido horario, puede funcionar en dos cuadrantes, también se puede utilizar para reducir la velocidad de una máquina que funciona como motor (es decir, para crear un par de oposición que actúe contra el par producido por el motor al girar). En este caso, dicho módulo opera como un freno.



**Figura 9. Motor de impulsión de velocidad constante, sentido horario, acoplado a un generador.**

Cuando el Dinamómetro/Fuente de alimentación de cuatro cuadrantes funciona como motor de impulsión/freno de velocidad constante, sentido horario, es posible ajustar la velocidad de rotación. En la ventana Dinamómetro/Fuente de alimentación de cuatro cuadrantes, los medidores de velocidad, par, potencia y energía indican los diferentes parámetros medidos para la máquina bajo prueba.

Cuando el módulo Dinamómetro/Fuente de alimentación de cuatro cuadrantes opera como motor de impulsión de velocidad constante, sentido horario, mantiene constante la velocidad de la máquina a la que está conectado. Cuando la velocidad de la máquina difiere del valor especificado, dicho módulo ajusta automáticamente el par que produce con el fin de mantener la velocidad de la máquina en dicho valor.

#### ***Motor de impulsión/Freno de velocidad constante, sentido antihorario***

Esta función es idéntica a la del motor de impulsión/freno de velocidad constante, sentido horario, con la diferencia de que ahora hace que el Dinamómetro/Fuente de alimentación de cuatro cuadrantes gire en sentido antihorario. En consecuencia, se modifica la polaridad de los parámetros medidos para la máquina bajo prueba.

## **Medición de velocidad, par y potencia mecánica utilizando el Dinamómetro/Fuente de alimentación de cuatro cuadrantes**

Por convención, la velocidad de una máquina que gira en sentido horario es de polaridad positiva, mientras que la de una máquina que gira en sentido antihorario es de polaridad negativa.

La polaridad del par y de la potencia mecánica medida para la máquina conectada al Dinamómetro/Fuente de alimentación de cuatro cuadrantes depende del modo de funcionamiento de la máquina: motor o generador.

### ***Funcionamiento como motor***

Como se muestra en la figura 8, cuando una máquina funciona como motor, el par tiene la misma dirección que la de rotación, es decir, la velocidad con la que gira el motor tiene igual misma polaridad que la del par producido por el mismo. Por consiguiente, la potencia mecánica producida por el motor, que es proporcional al producto de la velocidad por el par del motor, siempre es positiva, independientemente de la dirección de rotación del motor (es decir, independientemente de si la velocidad del motor y el par son positivos o negativos). Esto está de acuerdo con la definición de un motor, que establece que un motor utiliza la energía eléctrica para producir potencia mecánica, lo que resulta en un valor de potencia mecánica positiva.

Todo par de carga aplicado al motor (tal como el creado por el freno de la figura 8) actúa contra el par producido por el motor y, por lo tanto, tiene una polaridad que es opuesta a la del par y velocidad del motor.

### ***Funcionamiento como generador***

Como se muestra en la figura 9, cuando una máquina funciona como generador, su par tiene dirección opuesta a la de rotación, es decir, la velocidad con que gira el generador tiene una polaridad opuesta a la de su propio par. Por consiguiente, la potencia mecánica en el eje del generador, que es proporcional al producto de la velocidad por el par del motor, siempre es negativa, independientemente de la dirección de rotación del generador (es decir, independientemente de si la velocidad del generador es positiva o negativa). Esto está de acuerdo con la definición de un generador, que establece que un generador utiliza la potencia mecánica para producir energía eléctrica, lo que resulta en un valor de potencia mecánica negativa.

El par producido por la máquina que acciona al generador (tal como el par del motor de impulsión de la figura 9), actúa en contra del par del generador y, por lo tanto, tiene la misma polaridad que la velocidad del generador.

## RESUMEN DEL PROCEDIMIENTO

El Procedimiento está dividido en las siguientes secciones:

- Instalación y conexiones
- Funcionamiento del freno de par constante, de dos cuadrantes
- Funcionamiento del motor de impulsión de velocidad constante
- Motor de impulsión de velocidad constante accionando un generador cargado

## PROCEDIMIENTO



En este ejercicio de laboratorio se trabaja con tensiones elevadas. No haga ni modifique ninguna conexión con las fichas tipo banana sin apagar la fuente de alimentación, al menos que se especifique lo contrario.

### Instalación y conexiones



Antes de realizar este ejercicio, mida con un voltímetro la tensión de circuito abierto a través del *Bloque de baterías de plomo* (modelo 8802). Si dicha tensión es menor de 51,2 V, solicite ayuda a su profesor ya que probablemente el *Bloque de baterías de plomo* no está completamente cargado. El apéndice C de este manual indica cómo cargar completamente el *Bloque de baterías de plomo* antes de la práctica de laboratorio.

En esta sección, acoplará mecánicamente el Motor cc de imán permanente al Dinamómetro/Fuente de alimentación de cuatro cuadrantes. Luego ajustará el equipo para estudiar el funcionamiento del freno de par constante de dos cuadrantes.

1. Consulte la Tabla de utilización del equipo que se encuentra en el Apéndice A para obtener la lista del material requerido para realizar este ejercicio.

Instale el equipo en el *Puesto de trabajo*.

Acople mecánicamente el *Motor cc de imán permanente* al *Dinamómetro/Fuente de alimentación de cuatro cuadrantes* utilizando una correa dentada.



Antes de acoplar las máquinas rotatorias, asegúrese bien de que la fuente está apagada para evitar que alguna de las máquinas arranque de manera repentina.

2. Asegúrese de que el interruptor principal de alimentación del *Dinamómetro/Fuente de alimentación de cuatro cuadrantes* está en la posición O (apagado), luego conecte su *Entrada de potencia* a un tomacorriente ca de pared.
3. Conecte el puerto USB del *Dinamómetro/Fuente de alimentación de cuatro cuadrantes* a un puerto USB de la computadora.

Property of Festo Didactic

Sale and/or reproduction forbidden



4. En el **Motor cc de imán permanente**, asegúrese de que el interruptor  $S_1$  está en la posición **O** (apagado).
5. Conecte el equipo como se muestra en la figura 10. El terminal rojo del motor es el terminal positivo.

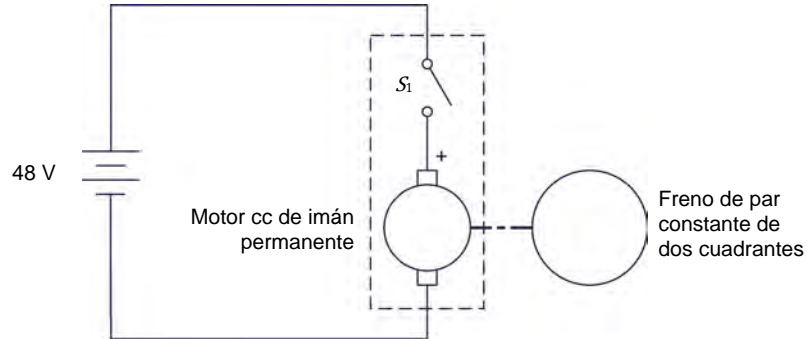


Figura 10. Motor cc de imán permanente acoplado a un freno.

6. En el **Dinamómetro/Fuente de alimentación de cuatro cuadrantes**, lleve el interruptor *Modo de operación* a *Dinamómetro*. Este ajuste permite que el **Dinamómetro/Fuente de alimentación de cuatro cuadrantes** funcione como un motor de impulsión, un freno, o ambos, dependiendo de la función seleccionada.

Encienda el **Dinamómetro/Fuente de alimentación de cuatro cuadrantes** llevando el interruptor principal de alimentación a la posición **I** (encendido).

7. Encienda la computadora, luego inicie el software **LVDAC-EMS**.

En la ventana **Arranque de LVDAC-EMS**, asegúrese de que se detecta el **Dinamómetro/Fuente de alimentación de cuatro cuadrantes**. También, seleccione la tensión y frecuencia de red que corresponden a la red ca local, luego haga clic en el botón **Aceptar** para cerrar la ventana **Arranque de LVDAC-EMS**.

8. En el software **LVDAC-EMS**, abra la ventana **Dinamómetro/Fuente de alimentación de cuatro cuadrantes**, luego haga los siguientes ajustes:
  - Ajuste el parámetro *Función* en *Freno de par constante, de dos cuadrantes*. Este ajuste hace que el **Dinamómetro/Fuente de alimentación de cuatro cuadrantes** funcione como un freno de dos cuadrantes con un ajuste del par que corresponde al parámetro *Par*.
  - Ajuste el parámetro *Relación de poleas* en 24:12. Estas cifras indican el número de dientes de la polea del **Dinamómetro/Fuente de alimentación de cuatro cuadrantes** y el número de dientes de la polea de la máquina bajo prueba (es decir, el **Motor cc de imán permanente**), respectivamente. Es importante asegurarse de que el parámetro *Relación de poleas* corresponde a la relación real entre el **Dinamómetro/Fuente de alimentación de cuatro cuadrantes** y la máquina bajo prueba.

Property of Festo Didactic

Sale and/or reproduction forbidden

- Asegúrese de que el parámetro *Control del par* esté en la posición *Perilla*. Esto permite controlar manualmente el par del freno de dos cuadrantes.
- Ajuste el parámetro *Par* en su valor mínimo (0,0 N·m ó 0,0 lbf·pulg.) entrando este valor en el campo al lado de este parámetro. Esto ajusta el comando par del *Freno de par constante, de dos cuadrantes* en 0,0 N·m (0,0 lbf·pulg.).



*El comando par también se puede ajustar utilizando la perilla de control Par en la ventana Dinamómetro/Fuente de alimentación de cuatro cuadrantes.*

### Funcionamiento del freno de par constante, de dos cuadrantes

*En esta sección, hará que el Motor cc de imán permanente gire en sentido horario y observará qué le sucede al par producido por el motor cuando aumenta el par de carga aplicado al mismo. Observará la polaridad del par y de la potencia mecánica producida por el Motor cc de imán permanente y confirmará que esta máquina está funcionando como motor. A continuación, hará que dicho motor gire en sentido antihorario y observará qué le sucede al par producido por el motor cuando aumenta el par de la carga aplicada. Observará la polaridad del par y de la potencia mecánica producida por el Motor cc de imán permanente y confirmará que la máquina puede funcionar como motor en cualquier dirección de rotación (en sentido horario o antihorario).*

9. En la ventana *Dinamómetro/Fuente de alimentación de cuatro cuadrantes*, inicie el *Freno de par constante, de dos cuadrantes* llevando el parámetro *Estado* a *En marcha* o haciendo clic en el botón *En marcha/Parado*.

En el *Motor cc de imán permanente*, ajuste el interruptor  $S_1$  en la posición I (encendido). Observe que el motor empieza a girar. Esto se debe a que el *Bloque de baterías de plomo* funciona como una fuente de alimentación cc que energiza al *Motor cc de imán permanente* para hacerlo girar.

El medidor de *Velocidad* en la ventana *Dinamómetro/Fuente de alimentación de cuatro cuadrantes* indica la velocidad  $n$  de rotación del *Motor cc de imán permanente*. ¿Esta velocidad es positiva, indicando que el motor está girando en sentido horario?

- Sí       No

10. En la ventana *Dinamómetro/Fuente de alimentación de cuatro cuadrantes*, aumente lentamente el valor del parámetro *Par* hasta 0,5 N·m (4,4 lbf·pulg.). Mientras lo hace, observe el par  $T$  producido por el *Motor cc de imán permanente* (indicado por el medidor de *Par* en la ventana *Dinamómetro/Fuente de alimentación de cuatro cuadrantes*).

¿Qué le sucede al par  $T$  producido por el **Motor cc de imán permanente** cuando el par de carga aplicado al motor por el **Freno de par constante, de dos cuadrantes** aumenta?

---

---

11. ¿Cuál es la polaridad del par  $T$  producido por el **Motor cc de imán permanente**?

---

¿Cuál es la polaridad de la velocidad  $n$  del **Motor cc de imán permanente**?

---

El par  $T$ , ¿tiene la misma polaridad que la velocidad  $n$  del motor?

Sí       No

12. La polaridad de la potencia mecánica  $P_M$  del motor (indicada por el medidor **Potencia** en la ventana **Dinamómetro/Fuente de alimentación de cuatro cuadrantes**), ¿es positiva?

Sí       No

¿Esto confirma que el **Motor cc de imán permanente** funciona en este momento como motor? Explique.

---

---

13. Detenga el **Motor cc de imán permanente** llevando su interruptor de alimentación  $S_1$  a la posición **O** (apagado).

En la ventana **Dinamómetro/Fuente de alimentación de cuatro cuadrantes**, ajuste el parámetro **Par** en 0,0 N·m (0,0 lbf·pulg.).

14. En el **Bloque de baterías de plomo**, invierta las conexiones de la batería para invertir la polaridad de la tensión aplicada al **Motor cc de imán permanente**.



*Si se invierten las conexiones de alimentación en los dos terminales de un motor cc, se invierte la dirección de rotación del mismo.*

Encienda el **Motor cc de imán permanente** llevando su interruptor de alimentación  $S_1$  a la posición **I** (encendido). ¿Es la velocidad  $n$  del **Motor cc de imán permanente** negativa, indicando que la dirección de rotación del motor se ha invertido y que el motor está girando en sentido antihorario?

Sí       No

15. En la ventana *Dinamómetro/Fuente de alimentación de cuatro cuadrantes*, aumente lentamente el valor del parámetro *Par* hasta 0,5 N·m (4,4 lbf·pulg.). Mientras lo hace, observe el par  $T$  producido por el *Motor cc de imán permanente*.

¿Qué le sucede al par  $T$  producido por el *Motor cc de imán permanente* cuando el par de frenado aplicado al motor por el *Freno de par constante, de dos cuadrantes* aumenta?

---

---

16. El par  $T$  producido por el *Motor cc de imán permanente*, ¿tiene la misma polaridad que la velocidad  $n$  del motor?

Sí       No

17. La polaridad de la potencia mecánica  $P_M$  del motor, ¿es positiva?

Sí       No

¿Confirma esto que el *Motor cc de imán permanente* funciona en este momento como motor?

Sí       No

18. Detenga el *Motor cc de imán permanente* llevando su interruptor de alimentación  $S_1$  a la posición O (apagado).

En la ventana *Dinamómetro/Fuente de alimentación de cuatro cuadrantes*, detenga el *Freno de par constante, de dos cuadrantes* llevando el parámetro *Estado* a *Parado* o haciendo clic en el botón *En marcha/Parado*.

19. De acuerdo con sus observaciones, la dirección de rotación del *Motor cc de imán permanente*, ¿determina la polaridad (positiva o negativa) de la velocidad  $n$  y del par  $T$  del motor? Explique.
- 
- 
- 

¿Puede el *Motor cc de imán permanente* funcionar como motor en cualquier dirección de rotación (sentido horario o antihorario)? Explique.

---

---

---

### Funcionamiento del motor de impulsión de velocidad constante

En esta sección, configurará un circuito que contiene un motor de impulsión (implementado con el Dinamómetro/Fuente de alimentación de cuatro cuadrantes) acoplado mecánicamente al Motor cc de imán permanente. Hará que el motor de impulsión gire en sentido horario y confirmará que el Motor cc de imán permanente gira a una velocidad específica determinada por la velocidad del motor de impulsión y la relación de poleas. También confirmará que el par producido por la máquina es prácticamente cero. Hará que el motor de impulsión gire en sentido antihorario y confirmará que la velocidad del Motor cc de imán permanente es negativa cuando éste gira en sentido antihorario. Adicionalmente confirmará que el par producido por la máquina es prácticamente cero.

20. Configure el equipo como se muestra en la figura 11. En este circuito, no se conecta ninguna carga a la salida del Motor cc de imán permanente.

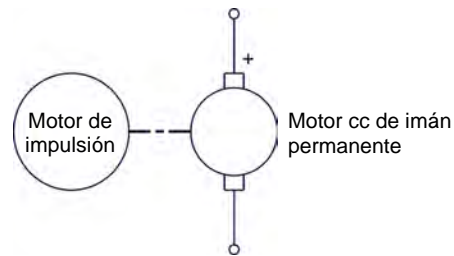


Figura 11. Motor de impulsión acoplado a un motor cc de imán permanente (sin carga eléctrica conectada al motor).

21. En la ventana *Dinamómetro/Fuente de alimentación de cuatro cuadrantes*, haga los siguientes ajustes:

- Lleve el parámetro *Función* a *Motor de impulsión/Freno de velocidad constante SH*. Este ajuste hace que el *Dinamómetro/Fuente de alimentación de cuatro cuadrantes* funcione como un motor de impulsión/freno en sentido horario con un ajuste de la velocidad que corresponde al parámetro *Velocidad*.
- Ajuste el parámetro *Relación de poleas* en 24:12.
- Asegúrese de que el parámetro *Control de velocidad* esté en la posición *Perilla*. Esto permite controlar manualmente la velocidad del motor de impulsión/freno, sentido horario.
- Lleve el parámetro *Velocidad* (es decir, el comando velocidad) a 1000 rpm, entrando 1000 en el campo al lado de este parámetro. Observe que el comando velocidad es la velocidad específica en el eje de la máquina acoplada al motor de impulsión, es decir, la velocidad del *Motor cc de imán permanente* en este caso.



El comando velocidad también se puede ajustar utilizando la perilla *Control de velocidad* de la ventana *Dinamómetro/Fuente de alimentación de cuatro cuadrantes*.

22. En la ventana *Dinamómetro/Fuente de alimentación de cuatro cuadrantes*, encienda el *Motor de impulsión/Freno de velocidad constante SH* haciendo clic en el botón *En marcha/Parado* o llevando el parámetro *Estado* a *En marcha*.

Observe que el motor de impulsión comienza a girar y a accionar el eje del *Motor cc de imán permanente*.

En la ventana *Dinamómetro/Fuente de alimentación de cuatro cuadrantes*, observe que el parámetro *Relación de poleas* ahora se vuelve gris y no se puede modificar mientras el motor de impulsión está girando. El medidor de *Velocidad* indica la velocidad  $n$  de rotación del *Motor cc de imán permanente*. Escriba esta velocidad a continuación.

Velocidad de rotación del *Motor cc de imán permanente* = \_\_\_\_\_ rpm

La velocidad de rotación del *Motor cc de imán permanente*, ¿es aproximadamente igual al valor del parámetro *Velocidad*?

Sí       No

La velocidad de rotación del *Motor cc de imán permanente*, ¿es positiva, indicando que el *motor* está girando en sentido horario?

Sí       No

23. Observe la velocidad de rotación indicada en la pantalla del panel frontal del módulo *Dinamómetro/Fuente de alimentación de cuatro cuadrantes*. Ella corresponde a la velocidad de rotación del motor de impulsión. Observe que esta velocidad es aproximadamente la mitad ( $\cong 500$  rpm) de la velocidad del *Motor cc de imán permanente*. Esto se debe a que la relación de poleas 24:12 hace que el motor de impulsión gire  $\frac{1}{2}$  ( $12 \div 24$ ) revolución por cada revolución del *Motor cc de imán permanente*. ¿Esta es su observación?

Sí       No

24. En la ventana *Dinamómetro/Fuente de alimentación de cuatro cuadrantes*, observe el par  $T$  del *Motor cc de imán permanente*.

¿El par es prácticamente cero, indicando que el *Motor cc de imán permanente* no produce ningún par?

Sí       No

25. En la ventana *Dinamómetro/Fuente de alimentación de cuatro cuadrantes*, aumente el parámetro *Velocidad* hasta 1500 rpm.

La velocidad  $n$  del Motor cc de imán permanente, ¿aumenta con el parámetro *Velocidad* del Motor de impulsión/Freno de velocidad constante SH?

Sí       No

Mientras la velocidad aumenta, ¿el par  $T$  del motor permanece prácticamente en cero?

Sí       No

**26.** En la ventana *Dinamómetro/Fuente de alimentación de cuatro cuadrantes*, detenga el *Motor de impulsión/Freno de velocidad constante SH* haciendo clic en el botón *En marcha/Parado* o llevando el parámetro *Estado* a *Parado*, luego haga los siguientes ajustes:

- Lleve el parámetro *Función* a *Motor de impulsión/Freno de velocidad constante SAH*. Este ajuste hace que el *Dinamómetro/Fuente de alimentación de cuatro cuadrantes* funcione como un motor de impulsión/freno, sentido antihorario, con un ajuste de la velocidad que corresponde al parámetro *Velocidad*.
- Ajuste el parámetro *Relación de poleas* en 24:12.
- Asegúrese de que el parámetro *Control de velocidad* esté en *Perilla*. Esto permite controlar manualmente la velocidad del motor de impulsión/freno, sentido antihorario.
- Ajuste el parámetro *Velocidad* en  $-1000$  rpm.

**27.** En la ventana *Dinamómetro/Fuente de alimentación de cuatro cuadrantes*, encienda el *Motor de impulsión/Freno de velocidad constante SAH* haciendo clic en el botón *En marcha/Parado* o llevando el parámetro *Estado* a *En marcha*.

**28.** Espere unos segundos, luego observe la velocidad y el par del *Motor cc de imán permanente*.

La velocidad de rotación del *Motor cc de imán permanente*, ¿es aproximadamente igual al valor del parámetro *Velocidad*?

Sí       No

La velocidad  $n$  del *Motor cc de imán permanente*, ¿es negativa, indicando que el *Motor cc de imán permanente* está rotando en sentido antihorario?

Sí       No

¿El par  $T$  del motor es prácticamente cero, indicando que el Motor cc de imán permanente no produce ningún par?

- Sí       No

29. En la ventana *Dinamómetro/Fuente de alimentación de cuatro cuadrantes*, aumente el parámetro *Velocidad* hasta  $-1500$  rpm.

Cuando el parámetro *Velocidad* del *Motor de impulsión/Freno de velocidad constante SAH* aumenta, ¿la velocidad  $n$  del Motor cc de imán permanente aumenta (con una polaridad negativa)?

- Sí       No

¿El par  $T$  del motor permanece prácticamente en cero mientras la velocidad aumenta?

- Sí       No

30. En la ventana *Dinamómetro/Fuente de alimentación de cuatro cuadrantes*, detenga el *Motor de impulsión/Freno de velocidad constante SAH* haciendo clic en el botón *En marcha/Parado* o llevando el parámetro *Estado* a *Parado*.

### **Motor de impulsión de velocidad constante accionando un generador cargado**

*En esta sección, configurará un circuito que contiene un motor de impulsión (implementado con el uso del Dinamómetro/Fuente de alimentación de cuatro cuadrantes) acoplado mecánicamente al Motor cc de imán permanente que funciona como generador. La salida del generador estará en cortocircuito. Hará que el generador gire en sentido horario y confirmará que la velocidad y el par del generador tienen polaridad opuesta y que su potencia mecánica es negativa, indicando así que la máquina está funcionando como generador. Luego hará que el generador gire en sentido antihorario y verificará que su velocidad y par tienen polaridad opuesta y que su potencia mecánica es negativa. Finalmente, confirmará que la máquina puede funcionar como generador independientemente de la dirección de rotación.*



31. Conecte el equipo como se muestra en la figura 12.

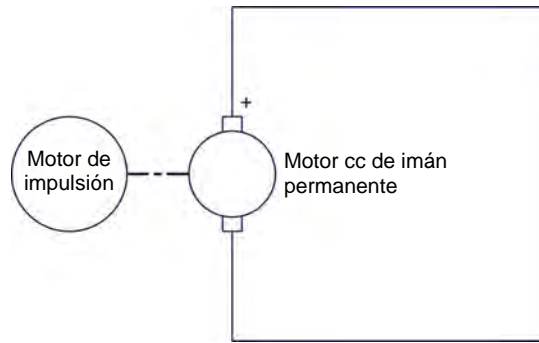


Figura 12. Motor de impulsión acoplado a un motor cc de imán permanente que funciona como generador (salida en cortocircuito).

32. En la ventana *Dinamómetro/Fuente de alimentación de cuatro cuadrantes*, haga los siguientes ajustes:

- Lleve el parámetro *Función* a *Motor de impulsión/Freno de velocidad constante SH*.
- Ajuste el parámetro *Relación de poleas* en 24:12.
- Asegúrese de que el parámetro *Control de velocidad* esté en la posición *Perilla*.
- Ajuste el parámetro *Velocidad* en 1000 rpm.

33. En la ventana *Dinamómetro/Fuente de alimentación de cuatro cuadrantes*, encienda el *Motor de impulsión/Freno de velocidad constante SH* para hacer que el *Motor cc de imán permanente* gire.

34. ¿Cuál es la polaridad del par  $T$  producido por el *Motor cc de imán permanente*?

---

¿Cuál es la polaridad de la velocidad  $n$  del *Motor cc de imán permanente*?

---

El par y la velocidad, ¿tienen polaridad opuesta?

- Sí       No

35. La potencia mecánica del motor, ¿es de polaridad negativa?

- Sí       No

¿Confirma esto que el **Motor cc de imán permanente** funciona en este momento como generador? Explique.

---

---

36. Aumente lentamente el parámetro *Velocidad* hasta 1500 rpm. Mientras lo hace, observe la velocidad  $n$ , el par  $T$  y la potencia mecánica  $P_M$  del **Motor cc de imán permanente** en los medidores del **Dinamómetro/Fuente de alimentación de cuatro cuadrantes**.

Describa qué le sucede al par y a la potencia mecánica cuando se aumenta la velocidad.

---

---

37. Observe la velocidad de rotación indicada en la pantalla del panel frontal del módulo **Dinamómetro/Fuente de alimentación de cuatro cuadrantes**. Ésta corresponde a la velocidad de rotación del motor de impulsión. Observe que esta velocidad es aproximadamente la mitad ( $\cong 750$  rpm) de la velocidad del generador. Esto se debe a que la relación de poleas 24:12 hace que el motor de impulsión gire  $\frac{1}{2}$  ( $12 \div 24$ ) revolución por cada revolución del generador. ¿Ésta es su observación?

Sí       No

También observe el par indicado en la pantalla del panel frontal del módulo **Dinamómetro/Fuente de alimentación de cuatro cuadrantes**. Éste corresponde al par del motor de impulsión. Observe que este par es aproximadamente el doble del par del generador. Esto se debe a que la relación de poleas 24:12 hace que el par del motor de impulsión sea 2 veces ( $24 \div 12$ ) más grande que el par del generador. ¿Ésta es su observación?

Sí       No

38. En la ventana **Dinamómetro/Fuente de alimentación de cuatro cuadrantes**, detenga el **Motor de impulsión/Freno de velocidad constante SH**, luego haga los siguientes ajustes:

- Lleve el parámetro *Función* a **Motor de impulsión/Freno de velocidad constante SAH**.
- Ajuste el parámetro *Relación de poleas* en 24:12.
- Asegúrese de que el parámetro *Control de velocidad* esté en la posición *Perilla*.
- Ajuste el parámetro *Velocidad* en  $-1000$  rpm.
- Encienda el **Motor de impulsión/Freno de velocidad constante SAH** para hacer que el **Motor cc de imán permanente** gire.

Property of Festo Didactic

Sale and/or reproduction forbidden

39. Aumente lentamente el parámetro *Velocidad* hasta -1500 rpm. Describa qué le sucede al par  $T$  mientras la velocidad aumenta.

---

La velocidad  $n$  y el par  $T$  del generador, ¿tienen polaridad opuesta?

Sí       No

40. La polaridad de la potencia mecánica del motor  $P_M$ , ¿es negativa?

Sí       No

¿Esto confirma que el *Motor cc de imán permanente* funciona en este momento como generador?

Sí       No

41. En la ventana *Dinamómetro/Fuente de alimentación de cuatro cuadrantes*, detenga el *Motor de impulsión/Freno de velocidad constante SAH* llevando el parámetro *Estado* a *Parado* o haciendo clic en el botón *En marcha/Parado*.

42. De acuerdo con sus observaciones, ¿la dirección de rotación determina la polaridad de la velocidad  $n$  y del par  $T$  del generador? Explique.

---

---

---

---

El *Motor cc de imán permanente*, ¿puede funcionar como generador en cualquier dirección de rotación (sentido horario o antihorario)?

Sí       No

43. Apague el *Dinamómetro/Fuente de alimentación de cuatro cuadrantes* llevando el interruptor principal de alimentación a la posición **O** (apagado). Cierre el software *LVDAC-EMS*. Desconecte todos los cables y vuelva a colocarlos en su lugar de almacenamiento.

## CONCLUSIÓN

En este ejercicio, se familiarizó con las funciones básicas del *Dinamómetro/Fuente de alimentación de cuatro cuadrantes* utilizado en este manual. Observó la polaridad de la velocidad, del par y de la potencia mecánica para una máquina rotatoria que funciona como motor o como generador.

**PREGUNTAS DE REVISIÓN**

1. Calcule la potencia  $P$  de un motor que gira a una velocidad  $n$  de 2000 rpm y que produce un par  $T$  de 1,2 N·m (10,6 lbf·pulg.).

---

---

---

2. Describa brevemente un freno y un motor de impulsión.

---

---

---

---

3. Describa brevemente la conversión de energía que ocurre en un motor y la conversión de energía que se produce en un generador.

---

---

4. Considere un motor girando en sentido horario y acoplado a un freno que aplica un par de carga al motor. Determine la polaridad de la velocidad y del par del motor, así como la polaridad del par de frenado. También determine la polaridad de la potencia mecánica del motor.

---

---

5. Considere un motor de impulsión que hace que un generador gire en sentido horario. Determine la polaridad del par del motor de impulsión, así como la polaridad de la velocidad y del par del generador. También determine la polaridad de la potencia mecánica del generador.

---

---

Property of Festo Didactic  
Sale and/or reproduction forbidden

## Motor cc de imán permanente funcionando como generador

**OBJETIVO DEL EJERCICIO** Cuando complete este ejercicio, estará familiarizado con la construcción de los motores cc de imán permanente, así como con su funcionamiento como generadores.

### RESUMEN DE LOS PRINCIPIOS

Los Principios de este ejercicio abarcan los siguientes puntos:

- Imanes permanentes
- Campo magnético alrededor de un conductor
- Campo magnético en un bucle de alambre (electroimán)
- Inducción electromagnética
- Construcción de un motor cc de imán permanente
- Motor cc de imán permanente funcionando como generador
- Reducción de las fluctuaciones de la tensión cc generada
- Curva característica de la tensión generada en función de la velocidad de rotación
- Par de oposición a la rotación en un motor cc de imán permanente que funciona como generador
- Curva característica del par de oposición en función de la corriente

### PRINCIPIOS

#### Imanes permanentes

Un **imán permanente** es una pieza de hierro o de metal rodeada por un campo magnético, como se muestra en la figura 13. Este campo magnético es constante, es decir, persiste naturalmente sin necesidad de una corriente eléctrica. El imán tiene un polo norte (N) y uno (S). Estos polos están situados cerca a los extremos donde la intensidad del campo magnético es mayor.

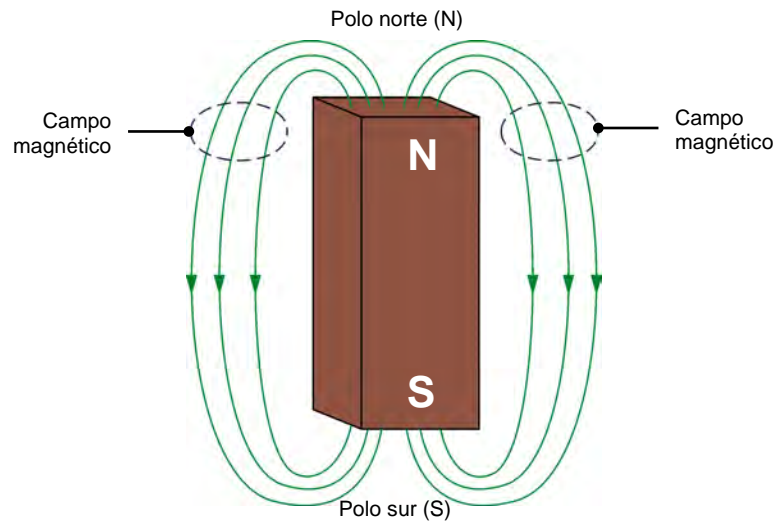


Figura 13. Imán permanente con sus polos llamados norte (N) y sur (S).

La dirección del campo magnético está indicada por las flechas de las líneas: de norte a sur por fuera del imán y de sur a norte dentro del imán.

Los polos iguales de dos imanes se repelen mientras que sus polos opuestos se atraen, como se muestra en la figura 14.

- **Repulsión:** como se muestra en la figura 14(a), al acercar los polos iguales de dos imanes éstos se repelen.
- **Atracción:** como se muestra en la figura 14(b), al acercar los polos opuestos de dos imanes, éstos se atraen.

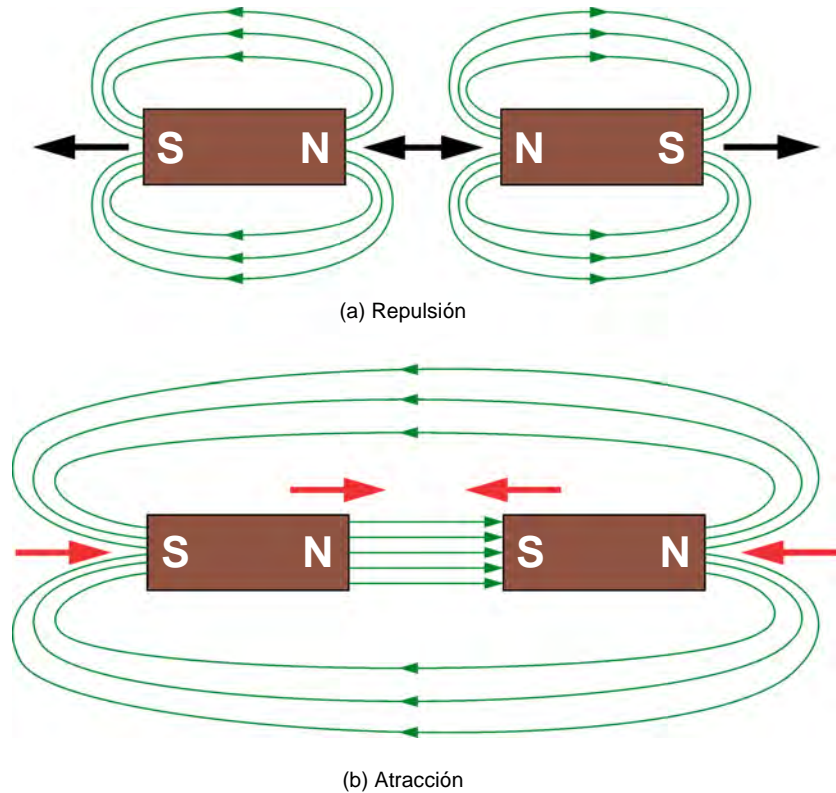


Figura 14. Los polos iguales se repelen mientras que los polos opuestos se atraen.

### Campo magnético alrededor de un conductor

Cuando una corriente eléctrica fluye a través de un conductor, como un cable eléctrico, se crea un campo magnético. Ese campo se representa mediante líneas concéntricas centradas alrededor del eje del cable, como se muestra en la figura 15. La dirección de las líneas del campo magnético se puede determinar con el uso de la regla de la mano derecha, como se muestra en la figura 15.

- El pulgar representa la dirección de la corriente en el conductor.
- Los otros dedos representan la dirección de las líneas del campo magnético.



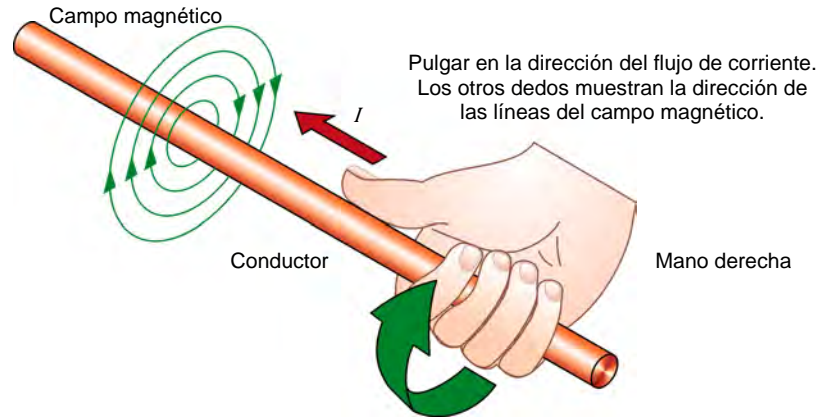


Figura 15. Cuando una corriente eléctrica fluye a través de un conductor, se crea un campo magnético alrededor del mismo.

### Campo magnético en un bucle de alambre (electroimán)

Cuando la corriente fluye a través de un bucle de alambre, se crea un campo magnético en dicho bucle. Como se muestra en la figura 16, este campo magnético tiene un polo norte y uno sur, al igual que un imán permanente. En esta condición, el bucle de alambre forma un **electroimán**.

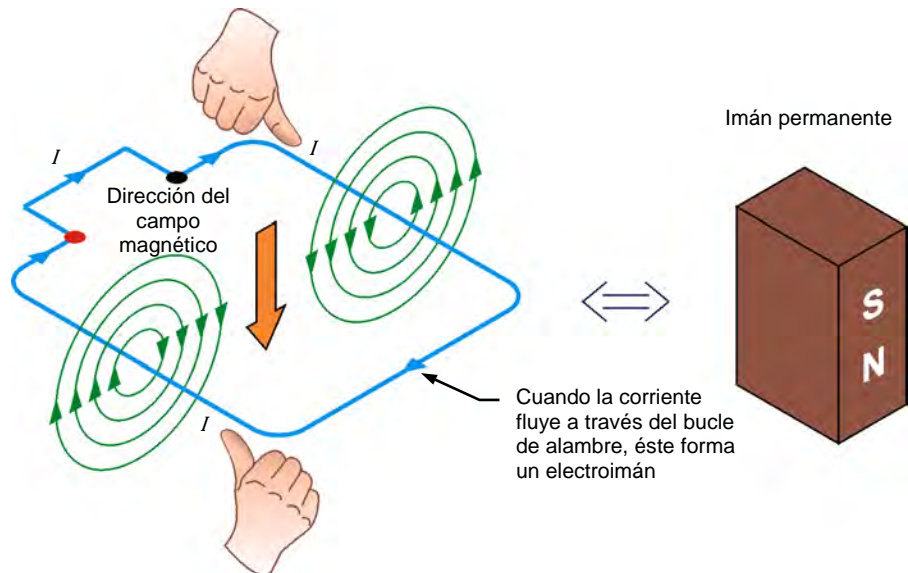


Figura 16. Campo magnético creado en un bucle de alambre.

Mediante la regla de la mano derecha, se puede determinar la dirección del campo magnético dentro del bucle de alambre y, por lo tanto, la ubicación de los polos norte y sur. Cuanto mayor es la corriente que fluye a través del bucle, más intenso es el campo magnético producido en el bucle. Cuando se interrumpe el flujo de corriente, el campo magnético desaparece.



Figura 17. Los generadores cc de imán permanente se pueden utilizar para cargar baterías.



Figura 18. Los generadores cc de imán permanente se pueden utilizar en pequeños aerogeneradores.

### Inducción electromagnética

El funcionamiento de varios dispositivos eléctricos (transformadores, generadores, alternadores, motores, etc.) está basado en la ley de **inducción electromagnética** de Faraday, que establece lo siguiente:

1. Se induce una tensión en los terminales de un bucle de alambre si el flujo magnético que pasa a través del bucle varía en función del tiempo.

Property of Festo Didactic  
Sale and/or reproduction forbidden

2. El valor de la tensión inducida es proporcional a la variación magnética.

La tensión inducida a través de los terminales de un bucle de alambre, cuando el flujo magnético que pasa a través de éste varía, se puede calcular utilizando la siguiente ecuación:

$$E = N_{vueltas} \cdot \frac{\Delta\phi}{\Delta t} \quad (7)$$

donde  $E$  es la tensión inducida a través de los terminales del bucle de alambre, expresada en voltios (V).  
 $N_{vueltas}$  es el número de vueltas de alambre del bucle.  
 $\Delta\phi$  es la variación de la intensidad del flujo magnético que pasa a través del bucle de alambre, expresada en Webers (Wb).  
 $\Delta t$  es el intervalo de tiempo durante el cual ocurre la variación del flujo magnético, expresado en segundos (s).

La figura 19 ilustra un ejemplo de la tensión inducida a través de un bucle de alambre que está expuesto a un flujo magnético de intensidad variable. Entre los instantes  $t_0$  y  $t_1$ , la intensidad del flujo magnético  $\phi$  permanece constante (3 mWb) y, por lo tanto, la tensión inducida es cero. Entre los instantes  $t_1$  y  $t_2$ , la intensidad del flujo magnético  $\phi$  aumenta de manera constante y, por lo tanto, se induce una tensión constante en el bucle de alambre. Entre los instantes  $t_2$  y  $t_3$ , la intensidad del flujo magnético  $\phi$  permanece constante (5 mWb) y, por lo tanto, la tensión inducida es cero.

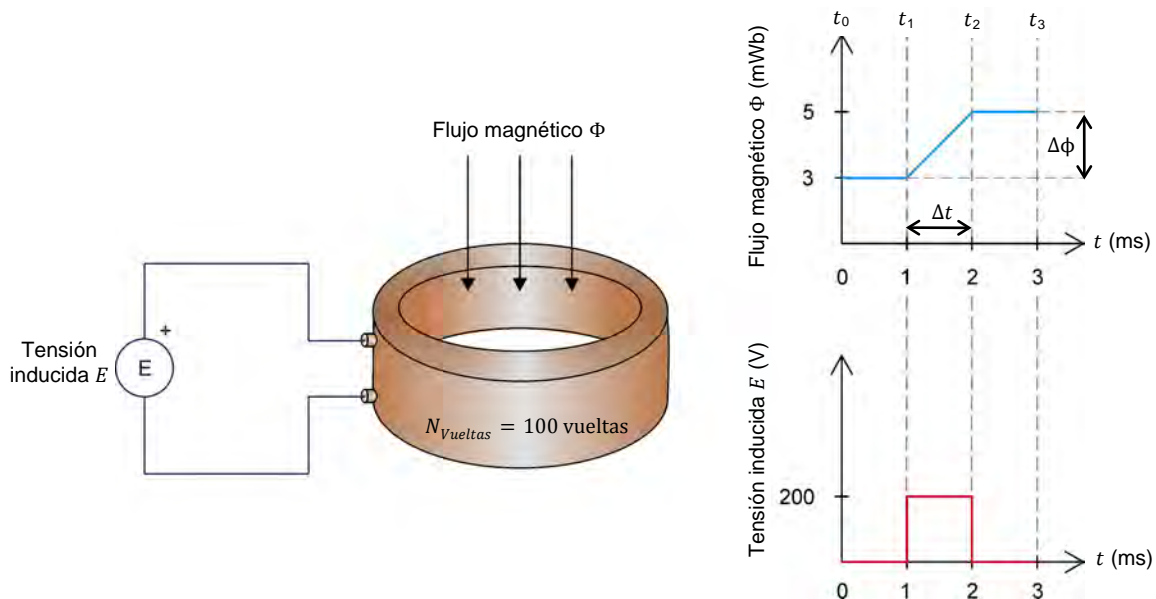


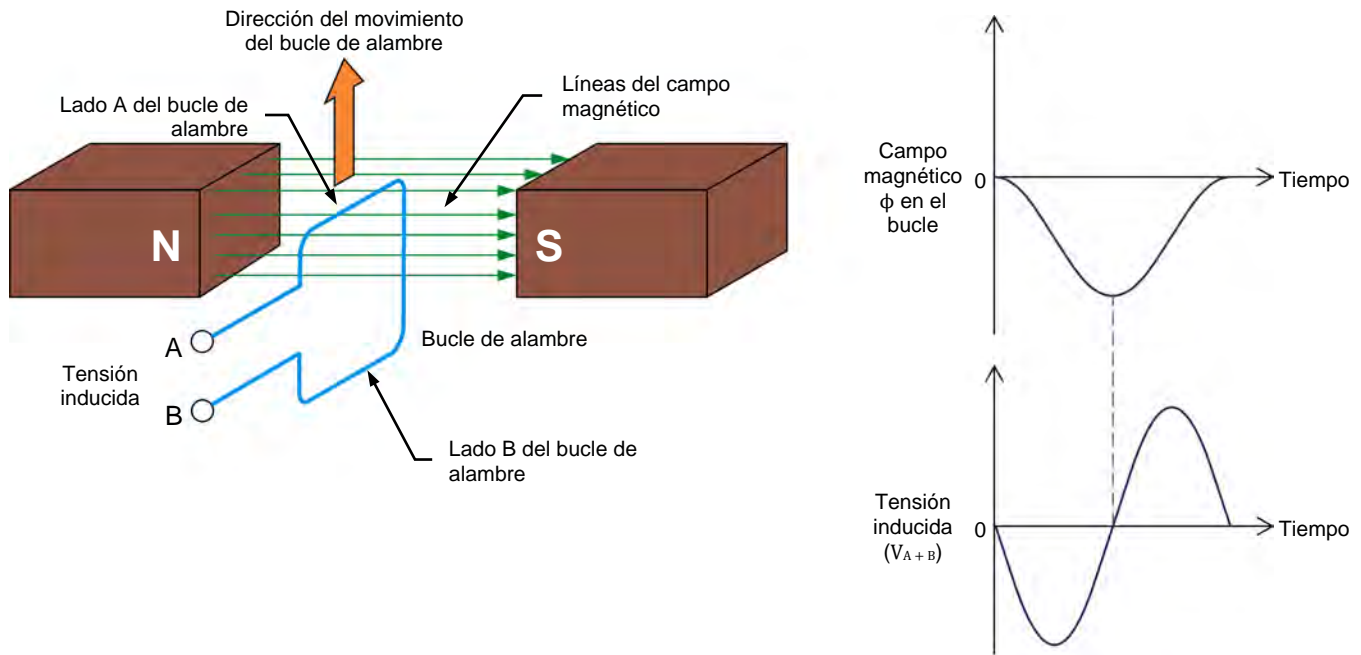
Figura 19. Tensión inducida en un bucle expuesto a un flujo magnético de intensidad variable.

Con los valores dados en la figura 19, la tensión  $E$  inducida a través la bobina en los instantes  $t_1$  y  $t_2$  se puede calcular utilizando la ecuación (7):

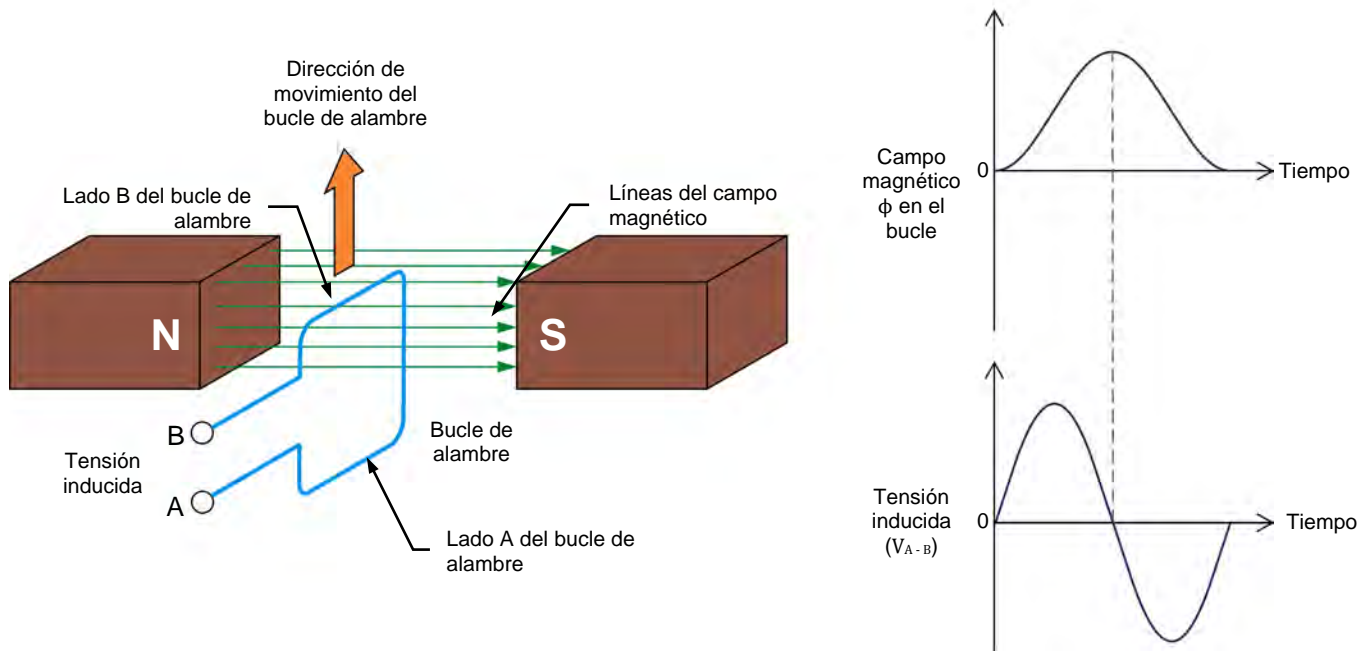
$$E = N_{\text{vueltas}} \cdot \frac{\Delta\phi}{\Delta t} = 100 \text{ vueltas} \cdot \frac{0,005 \text{ Wb} - 0,003 \text{ Wb}}{0,001 \text{ s}} = 200 \text{ V}$$

La figura 20 muestra otro ejemplo en el que se ilustra la inducción electromagnética. Dos imanes permanentes se alinean de tal forma que los polos opuestos queden enfrentados. Esto crea un campo magnético que va de izquierda a derecha entre ambos imanes, como lo indican las líneas del campo magnético que aparecen en la figura. Como el bucle de alambre se mueve hacia arriba entre los dos imanes, el flujo magnético  $\phi$  que atraviesa el bucle aumenta hasta un valor máximo y luego vuelve a cero, por lo tanto, se induce una tensión a través de los terminales del bucle.

- En la figura 20(a), las líneas del campo magnético pasan del lado A del bucle de alambre al lado B del mismo, resultando en un flujo magnético  $\phi$  de polaridad negativa a través del bucle. La tensión  $V_{AB}$  inducida a través de los terminales del bucle tiene una polaridad negativa cuando el flujo magnético pasa de cero al valor máximo negativo, porque la variación  $\frac{\Delta\phi}{\Delta t}$  del flujo magnético tiene un valor negativo. La tensión inducida  $V_{AB}$  es cero cuando el flujo magnético  $\phi$  alcanza el máximo negativo porque el flujo magnético deja de variar momentáneamente (es decir, la variación  $\frac{\Delta\phi}{\Delta t}$  del flujo magnético es cero). La tensión inducida  $V_{AB}$  invierte su polaridad (es decir, se vuelve positiva) cuando el flujo magnético pasa del máximo negativo a cero, porque la variación  $\frac{\Delta\phi}{\Delta t}$  del flujo magnético tiene un valor positivo.
- En la figura 20(b), el mismo bucle de alambre se mueve hacia arriba entre ambos imanes. Sin embargo, el bucle giró  $180^\circ$ , de tal forma que las líneas del campo magnético pasan del lado B al lado A del bucle, resultando en un flujo magnético  $\phi$  de polaridad positiva a través del bucle (es decir, la polaridad del flujo magnético es opuesta a la de la figura 20(a)). En consecuencia, el flujo magnético  $\phi$  y la tensión  $V_{AB}$  inducida a través del bucle son similares a las de la figura 20(a) pero con polaridad opuesta. Por consiguiente, la tensión  $V_{AB}$  inducida a través de los terminales del bucle tiene una polaridad positiva cuando el flujo magnético pasa de cero al máximo positivo, porque la variación  $\frac{\Delta\phi}{\Delta t}$  del flujo magnético tiene un valor positivo. La tensión inducida  $V_{AB}$  es cero cuando el flujo magnético  $\phi$  alcanza el máximo positivo porque este flujo deja de variar momentáneamente. La tensión inducida  $V_{AB}$  invierte su polaridad (es decir, se vuelve negativa) cuando el flujo magnético pasa del máximo positivo a cero porque la variación  $\frac{\Delta\phi}{\Delta t}$  del flujo magnético tiene un valor negativo.



(a) Las líneas del campo magnético pasan del lado A al lado B del bucle de alambre.



(b) Las líneas del campo magnético pasan del lado B al lado A del bucle de alambre.

**Figura 20. Tensión inducida a través de un bucle de alambre que se mueve dentro del campo magnético creado por imanes permanentes.**

### Construcción de un motor cc de imán permanente

La figura 21 muestra un diagrama simplificado de un motor cc de imán permanente.

- El **estator** es la parte fija del motor, en la que gira el rotor. El estator consta de un par de imanes permanentes alineados de tal forma que los polos opuestos quedan enfrentados entre sí. Por lo tanto, el polo norte (N) de uno de los imanes y el polo sur (S) del otro están cerca del inducido, o armadura. Por consiguiente, las líneas del campo magnético pasan de un imán permanente al otro a través de la parte metálica del inducido.
- El **rotor** es la parte giratoria del motor. Consta de un bucle de alambre montado sobre una armadura metálica rotatoria. Los extremos del bucle de alambre están conectados a los terminales ubicados en el estator del motor, a través de un **colector** y un par de **escobillas** (generalmente de carbono). El colector tiene dos segmentos aislados entre sí. Cada segmento está conectado a un terminal del bucle de alambre. (La función del colector se explicará más adelante.)

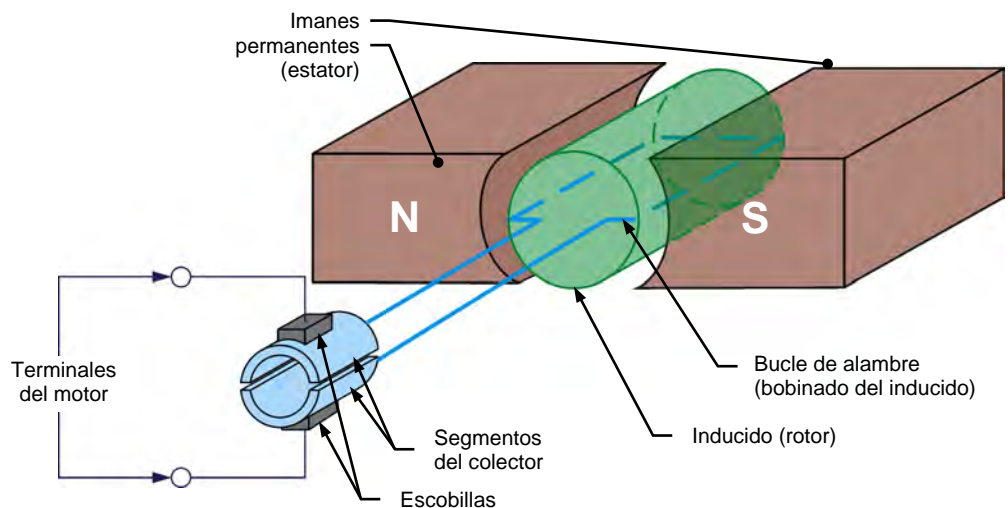


Figura 21. Construcción de un motor cc de imán permanente simple.

Este motor cc se conoce como motor cc de imán permanente porque dichos imanes se utilizan para producir el campo magnético necesario para su funcionamiento.

El diagrama de la figura 21 muestra la construcción más simple de un motor cc de imán permanente. En los motores cc reales, el inducido, o armadura, está compuesto de múltiples bucles de alambre en lugar de uno solo y el colector cuenta con varios segmentos en lugar de un único par. Además, cada bucle de alambre está formado de numerosas vueltas en lugar de una única espira.



Figura 22. En los motores cc reales, el inducido (rotor) cuenta con múltiples bucles de alambre y el colector tiene varios segmentos.

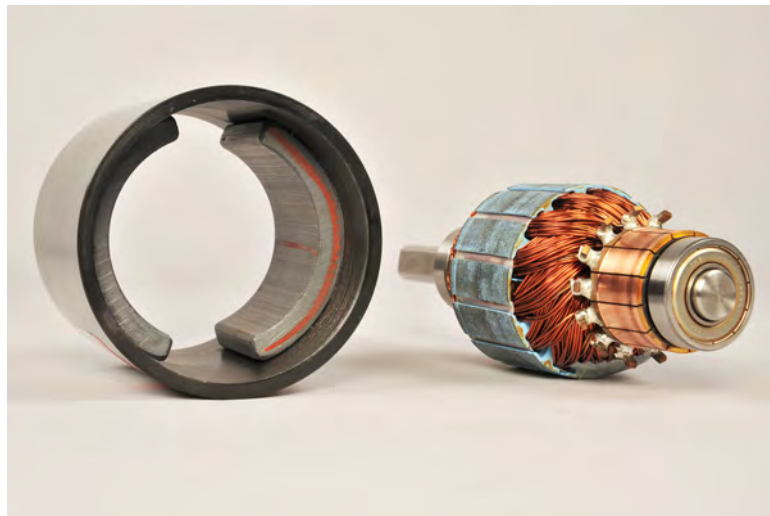


Figura 23. Estator y rotor del motor. El estator es la parte fija del motor, en la que gira el rotor. El estator consta de un par de imanes permanentes alineados de tal forma que los polos opuestos quedan enfrentados.

### Motor cc de imán permanente funcionando como generador

La figura 24 muestra un motor cc de imán permanente funcionando como generador. Cuando se hace girar el bucle de alambre del rotor dentro del campo magnético producido por los imanes permanentes del estator, el flujo magnético  $\phi$  que atraviesa el bucle varía y se induce una tensión  $E_1$  a través de sus terminales. Los dos segmentos del colector transfieren la tensión a las escobillas fijas ( $B+$  y  $B-$ ) conectadas a los terminales del motor.

- Como el bucle pasa de la posición 0 a la posición 4, el flujo magnético  $\phi$  pasa de un máximo negativo (flujo máximo del lado A al lado B del bucle) a un máximo positivo (flujo máximo del lado B al lado A del bucle). Durante este intervalo de rotación de  $180^\circ$ , la tensión  $E_1$  inducida a través del bucle tiene una polaridad positiva porque la variación  $\frac{\Delta\phi}{\Delta t}$  del flujo magnético tiene un valor positivo.
- Cuando el bucle llega a la posición 4, las conexiones de los dos segmentos del colector con las escobillas  $B^-$  y  $B^+$  se invierten. Como consecuencia, se invierten las conexiones entre los terminales del bucle de alambre y los del motor.
- A medida que el bucle pasa de la posición 4 a la posición 0, el flujo magnético  $\phi$  a través del mismo pasa de un máximo positivo (flujo máximo del lado B al lado A del bucle) a un máximo negativo (flujo máximo del lado A al lado B del bucle). Durante este intervalo de rotación de  $180^\circ$ , la tensión  $E_1$  inducida a través del bucle tiene una polaridad negativa porque la variación  $\frac{\Delta\phi}{\Delta t}$  del flujo magnético tiene un valor negativo.
- Cuando el bucle llega a la posición 0, las conexiones de los dos segmentos del colector con las escobillas  $B^-$  y  $B^+$  se invierten nuevamente. Como consecuencia, se invierten las conexiones entre los terminales del bucle de alambre y los del motor.

Estos ciclos se repiten mientras el rotor continúa girando, de manera que la polaridad de la tensión  $E_1$  generada a través del bucle de alambre del rotor alterna continuamente: es positiva durante media vuelta y negativa en la media vuelta siguiente, luego vuelve a ser positiva en media la vuelta siguiente y así sucesivamente. A raíz de esto, la tensión  $E_1$  generada a través del bucle de alambre del rotor se conoce como una tensión de **corriente alterna (ca)**. Debido a que el colector invierte las conexiones entre los terminales del bucle de alambre y los del motor para las posiciones 0 y 4 de dicho bucle, la tensión  $E_2$  en los terminales del motor siempre tiene la misma polaridad (positiva), como se muestra en la figura 24. La tensión  $E_2$  en los terminales del motor es entonces una tensión de **corriente continua (cc)** de pulso positivo (dos pulsos por rotación).



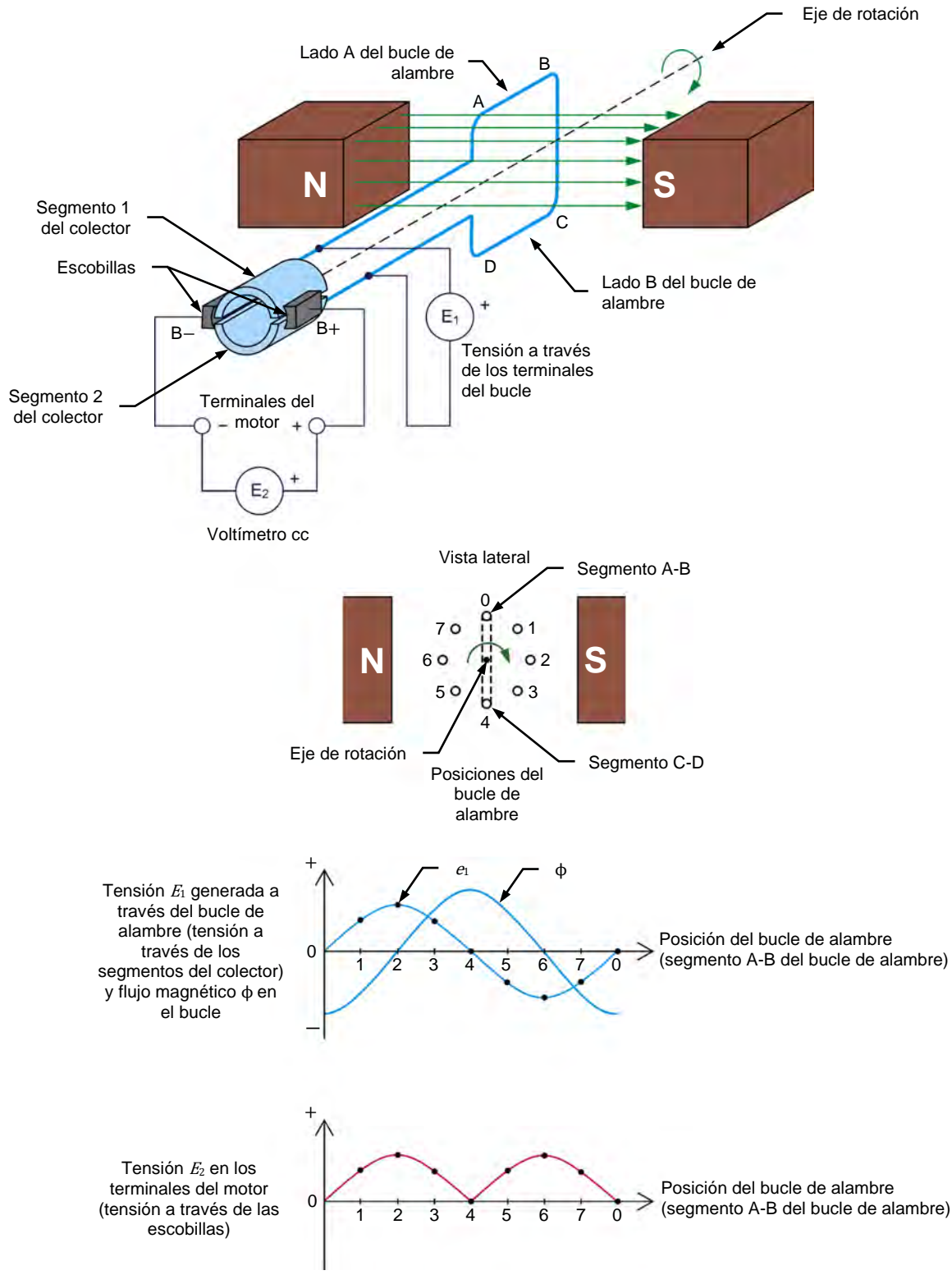


Figura 24. Motor cc de imán permanente funcionando como generador (rotación en sentido horario).

Cuando la dirección de rotación del bucle de alambre se invierte, la polaridad de la tensión cc  $E_2$  en los terminales del motor también se invierte, como se muestra en la figura 25. La tensión  $E_2$  en los terminales del motor es entonces una tensión cc de pulso negativo (dos pulsos por rotación).

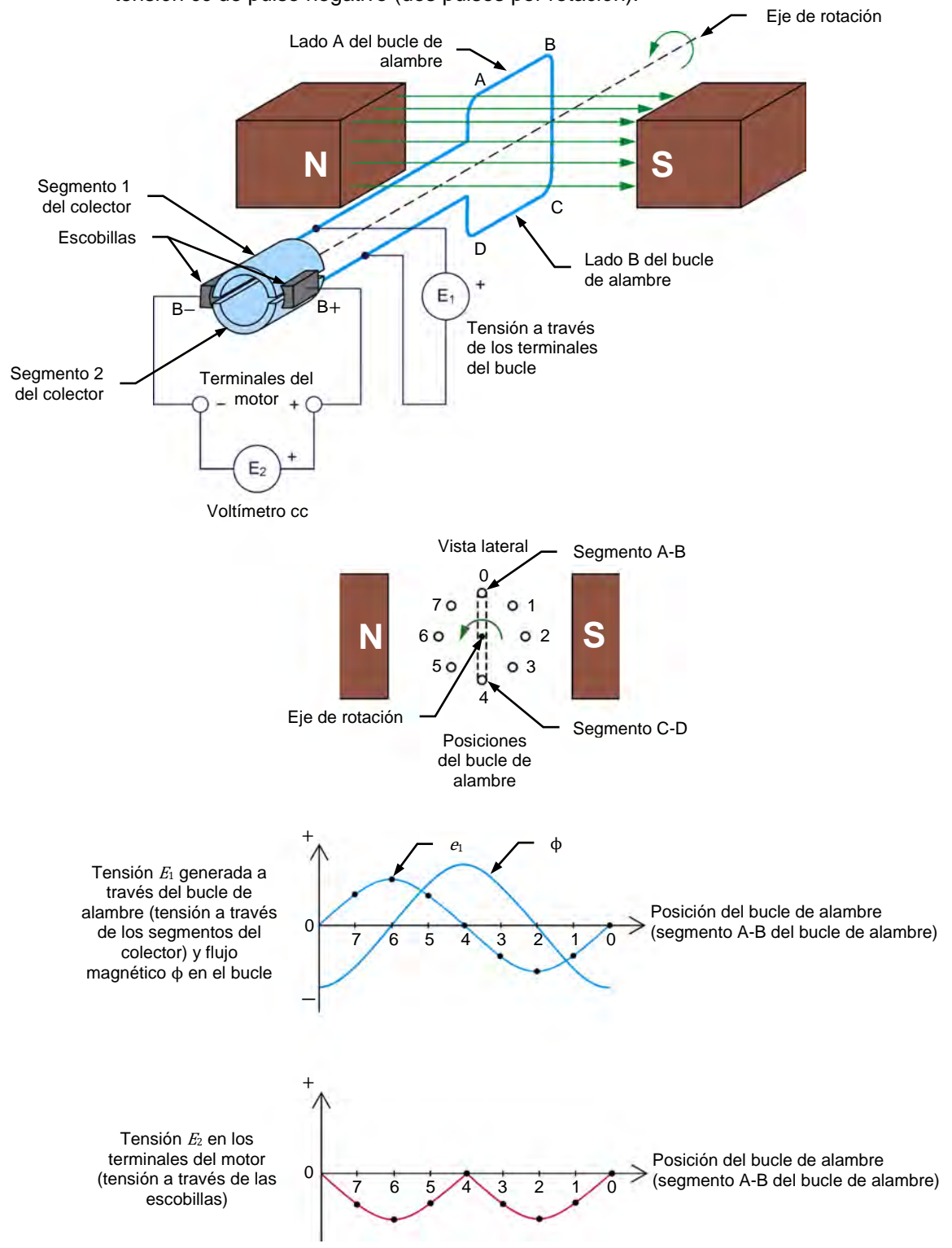


Figura 25. Motor cc de imán permanente funcionando como generador (rotación en sentido antihorario).

Property of Festo Didactic  
Sale and/or reproduction forbidden

### **Reducción de las fluctuaciones de la tensión cc generada**

Todos los motores cc de imán permanente tienen un inducido formado por múltiples bucles de alambre y numerosos segmentos de colector. Al aumentar el número de bucles de alambre y de segmentos del colector se logra reducir la fluctuación de la tensión en los terminales del motor cc debida al efecto pulsante (es decir, la tensión generada se aproxima a una tensión cc pura). La figura 26 muestra un ejemplo de la tensión generada en los terminales de un motor cc cuando se adiciona un segundo bucle de alambre al inducido. También se adicionan dos segmentos extras al colector para conectar el bucle de alambre adicional del inducido a los terminales del motor a través de las escobillas.

Como se muestra en la figura 26:

- Se generan dos tensiones de corriente alterna (ca),  $E_1$  y  $E_2$ , una a través de cada bucle de alambre.
- Sin embargo, la tensión en los terminales del motor,  $E_3$ , siempre tiene la misma polaridad. Esta tensión consta de cuatro pulsos por rotación del inducido en lugar de sólo dos. Como consecuencia, la fluctuación de la tensión cc generada, causada por el efecto pulsante, se reduce.

Mayor es el número de bucles de alambre en el inducido, mayor es el número de segmentos del colector y, por lo tanto, mayor es el número de pulsos por rotación y menor la fluctuación de la tensión en los terminales del motor cc.

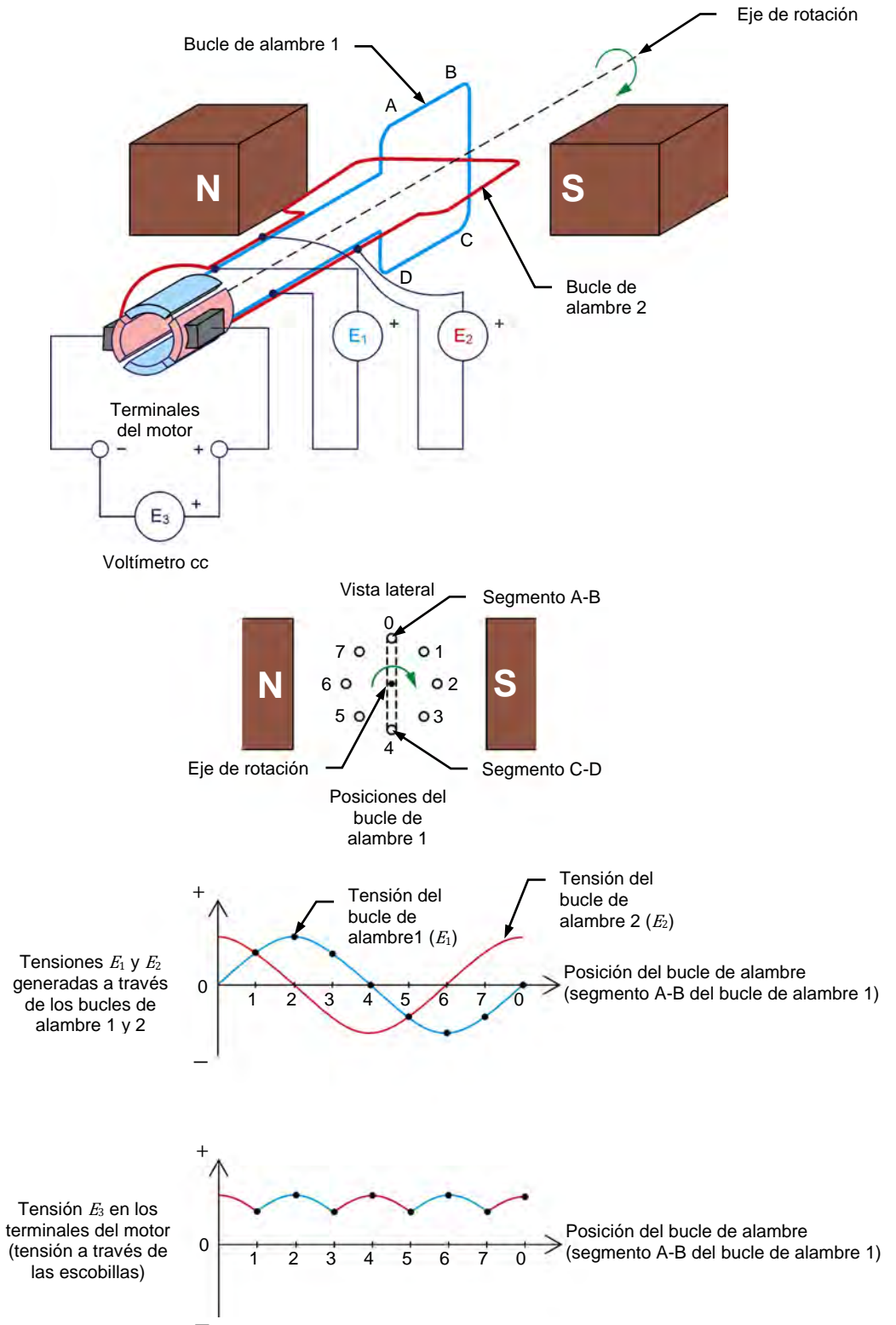


Figura 26. Adicionar bucles de alambre en el inducido del motor cc aumenta el valor de la tensión cc generada y reduce la fluctuación de la tensión causada por el efecto pulsante.

### Curva característica de la tensión generada en función de la velocidad de rotación

La figura 27 muestra la curva característica de tensión generada en función de la velocidad de un motor cc de imán permanente que opera como generador. Dicha tensión es proporcional a la velocidad de rotación del inducido. Esto se debe a que cuanto mayor es esa velocidad de rotación, mayor es la variación del flujo magnético ( $\frac{\Delta\phi}{\Delta t}$ ) en los bucles de alambre del rotor y, por lo tanto, mayor es la tensión generada. La polaridad de esta tensión depende de la dirección de rotación del inducido. Cuando éste gira en sentido horario (SH), la tensión generada es positiva. Por el contrario, cuando lo hace en sentido antihorario (SAH), la tensión generada es negativa.



La relación entre la polaridad de la tensión cc generada y la dirección de rotación del rotor se selecciona arbitrariamente. De esta forma, la polaridad de la tensión cc generada se puede considerar negativa cuando el rotor gira en sentido horario y positiva cuando lo hace en sentido antihorario.

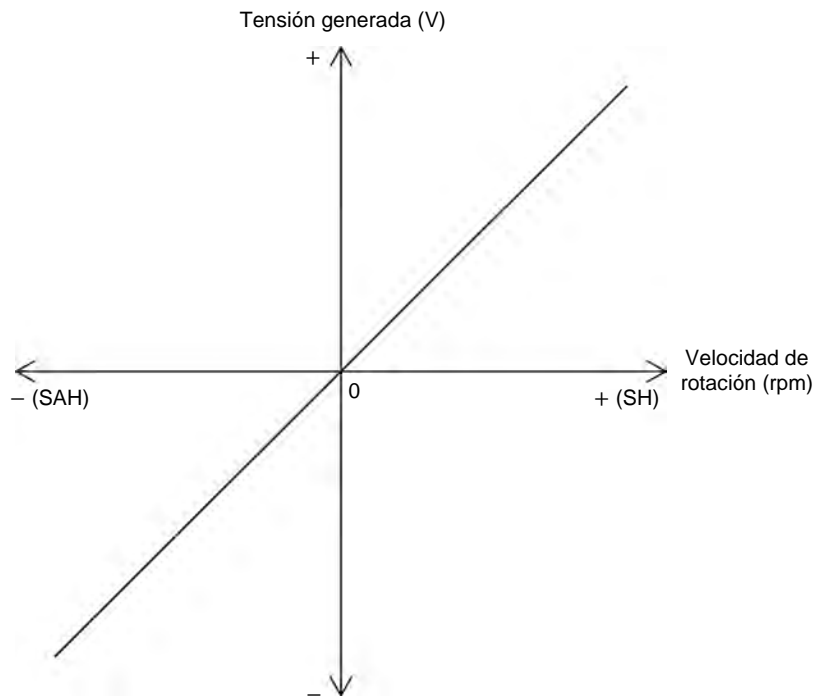


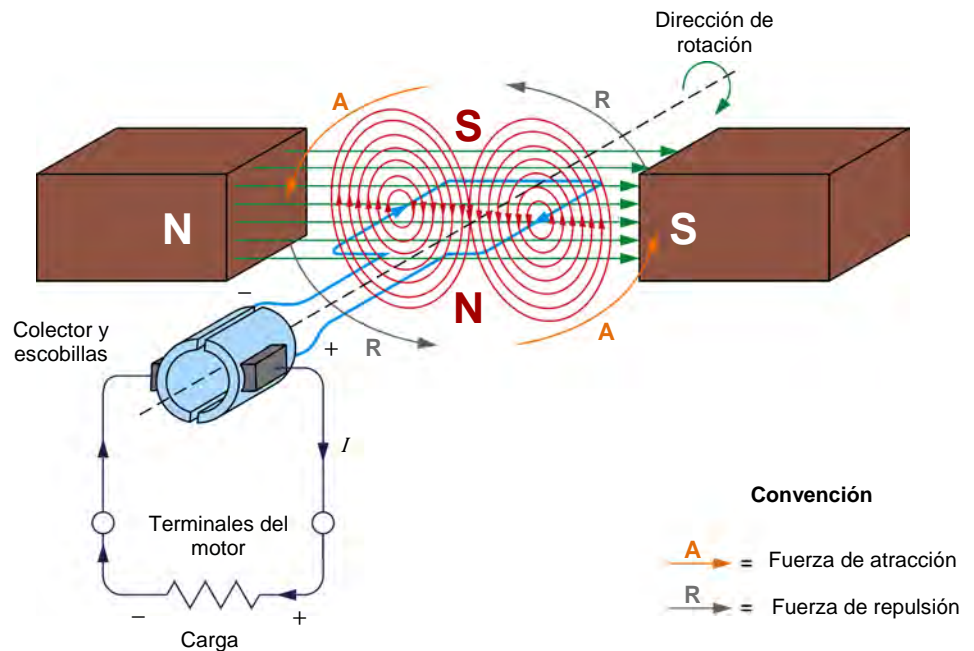
Figura 27. Curva característica de la tensión generada en función de la velocidad de un motor cc de imán permanente funcionando como generador.

### Par de oposición a la rotación en un motor cc de imán permanente que funciona como generador

El par es una fuerza que se utiliza para hacer que un objeto gire o, de manera inversa, una fuerza que se opone a la rotación de un objeto. Éste puede ser, por ejemplo, el rotor de un generador. En ese caso, el par se aplica al rotor del generador para hacerlo girar y, como reacción, el generador produce un par que se opone a la rotación. De manera inversa, un par se opone a la rotación del rotor cuando se aplica una carga al generador.

La figura 28 ilustra el ejemplo anterior utilizando un motor cc de imán permanente que funciona como generador. Cuando una carga, como una resistencia, se conecta a los terminales de un motor cc que funciona como generador, una corriente comienza a circular en el bucle de alambre del inducido a través de la carga. Esta corriente produce un campo magnético dentro del bucle de alambre con un polo norte y uno sur, como se lo muestran las líneas de fuerza rojas alrededor del bucle de la figura 28. Por su parte, las líneas verdes muestran el campo magnético producido por los imanes permanentes.

La ubicación de los polos del campo magnético producido en el bucle de alambre con respecto a los polos de los imanes permanentes del estator del motor crea fuerzas de **atracción y repulsión** que se oponen a la rotación del inducido, como se muestra en la figura 28. El efecto combinado de estas fuerzas es la aplicación de un par al eje del motor que se opone a la rotación. Cuanto mayor es la corriente que circula en el bucle, más intenso es el campo magnético producido en éste y más elevado es el par que se opone a la rotación.



**Figura 28.** La interacción entre el campo magnético producido por los imanes permanentes de un motor cc y el campo magnético producido en el bucle de alambre del inducido, cuando se conecta una carga eléctrica al motor cc, crea fuerzas de atracción y repulsión en el motor que resultan en un par que se opone a la rotación del inducido.

En la figura 28, los campos magnéticos producidos por el bucle de alambre y los imanes permanentes se muestran como dos campos separados para hacer más clara la explicación. Sin embargo, debido a que las líneas de fuerza magnética no se pueden intersectar entre sí, el campo magnético resultante en un motor cc real que funciona como generador, se asemeja al mostrado en la vista transversal del motor de la figura 29. Sin embargo, esto no cambia el resultado final, es decir, el efecto combinado de las fuerzas de atracción y repulsión resulta en un par que se opone a la rotación (par de oposición).

Debido a que el par de oposición producido por un motor cc de imán permanente que funciona como generador actúa en dirección opuesta a la dirección de rotación del inducido, su polaridad es opuesta a la polaridad de la velocidad de rotación. De ahí que, cuando el inducido gira en sentido horario (es decir, cuando la polaridad de la velocidad de rotación es positiva), la polaridad del par de oposición es negativa. De manera contraria, cuando el inducido gira en sentido antihorario (es decir, cuando la polaridad de la velocidad de rotación es negativa), la polaridad del par del generador es positiva.

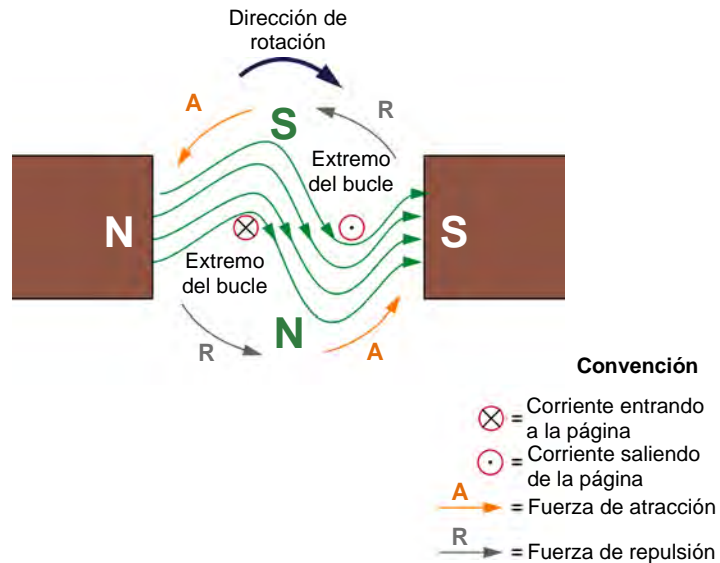


Figura 29. Campo magnético en un motor cc real funcionando como generador.

### Curva característica del par de oposición en función de la corriente

La figura 30 muestra la curva característica del par de oposición en función de la corriente de carga de un motor cc de imán permanente que funciona como generador. El par de oposición es proporcional a la corriente suministrada a la carga. Observe que el par de oposición está expresado con una polaridad negativa para indicar que se opone a la rotación del inducido (la velocidad de rotación se considera generalmente positiva).

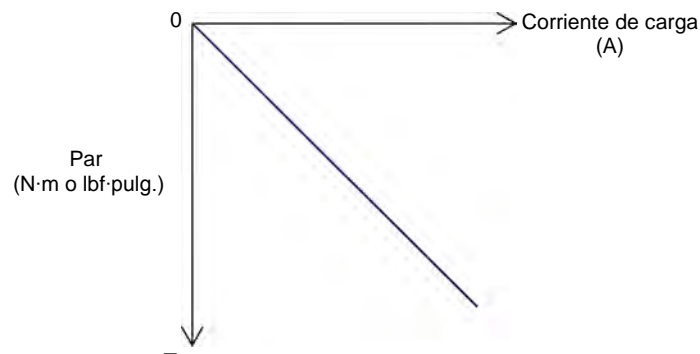


Figura 30. Curva característica del par de oposición en función de la corriente de un motor cc de imán permanente funcionando como generador.

**RESUMEN DEL PROCEDIMIENTO**

El Procedimiento está dividido en las siguientes secciones:

- Fenómeno de inducción electromagnética
- Oposición a la rotación
- Curva característica de la tensión en función de la velocidad de un motor cc de imán permanente que opera como generador  
*Rotación en sentido horario. Rotación en sentido antihorario.*
- Curva característica del par en función de la corriente de un motor cc de imán permanente operando como generador

**PROCEDIMIENTO**



En este ejercicio de laboratorio se trabaja con tensiones elevadas. No haga ni modifique ninguna conexión con las fichas tipo banana sin apagar la fuente de alimentación, al menos que se especifique lo contrario.

**Fenómeno de inducción electromagnética**

*En esta sección del ejercicio, conectará un voltímetro cc a través de los terminales del motor y observará la tensión desarrollada a través de éstos cuando el eje del motor se gira manualmente.*

1. Coloque el **Motor cc de imán permanente** en su superficie de trabajo. Conecte un voltímetro cc a los terminales del **Motor cc de imán permanente**. El terminal rojo del motor es el terminal positivo.
2. Haga girar con la mano el eje del **Motor cc de imán permanente** en sentido horario. Observe que una tensión cc de polaridad positiva aparece en los terminales del motor. Explique por qué se desarrolla dicha tensión en los terminales del motor cuando se gira su eje.

---

---

---

---

3. Haga girar con la mano el eje del **Motor cc de imán permanente** en sentido antihorario. ¿Aparece una tensión cc de polaridad negativa a través de los terminales del motor? ¿Por qué?

---

---

4. Desconecte el voltímetro cc del **Motor cc de imán permanente**.



### Oposición a la rotación

*En esta sección, observará la oposición a la rotación del Motor cc de imán permanente cuando los terminales del motor no están en cortocircuito y cuando sí lo están.*

5. Haga girar con la mano el eje del **Motor cc de imán permanente**. Observe que resulta fácil girar el eje del motor. Explique por qué.

---

---

---

6. Utilice un conductor para cortocircuitar los dos terminales del **Motor cc de imán permanente**.

Haga girar con la mano el eje del motor en sentido horario, luego hágalo en sentido antihorario. Observe que resulta más difícil girar el eje del motor cuando sus terminales están cortocircuitados. Explique por qué.

---

---

---

---

---

---

7. Retire el conductor que cortocircuita los terminales del motor.

### Curva característica de la tensión en función de la velocidad de un motor cc de imán permanente que opera como generador

*En esta sección, utilizará un motor de impulsión para accionar el Motor cc de imán permanente y lo hará funcionar como generador. Variará la velocidad de rotación del motor de impulsión por pasos y medirá la tensión cc generada a través de los terminales del motor.*

8. Consulte la Tabla de utilización del equipo que se encuentra en el Apéndice A para obtener la lista del material requerido para realizar este ejercicio.

Instale el equipo en el **Puesto de trabajo**.

Acople mecánicamente el **Dinamómetro/Fuente de alimentación de cuatro cuadrantes** al **Motor cc de imán permanente** utilizando una correa dentada.



Antes de acoplar las máquinas rotatorias, asegúrese bien de que la fuente está apagada para evitar que alguna de las máquinas arranque de manera repentina.

9. Asegúrese de que el interruptor principal de alimentación del **Dinamómetro/Fuente de alimentación de cuatro cuadrantes** está en la posición **O** (apagado), luego conecte su **Entrada de potencia** a un tomacorriente ca de pared.

Conecte la **Entrada de potencia** de la **Interfaz de adquisición de datos y de control** (DACI - por sus siglas en inglés *Data Acquisition and Control Interface*) a una fuente de alimentación ca de 24 V. Encienda dicha fuente.

10. Conecte el puerto USB del **Dinamómetro/Fuente de alimentación de cuatro cuadrantes** a un puerto USB de la computadora.

Conecte el puerto USB de la **Interfaz de adquisición de datos y de control** a un puerto USB de la computadora.

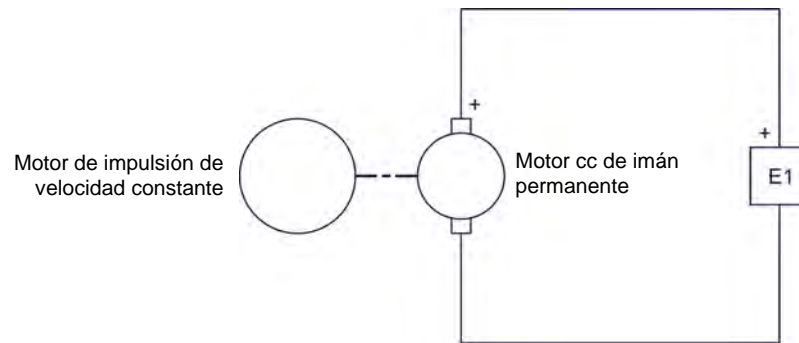
11. En el **Dinamómetro/Fuente de alimentación de cuatro cuadrantes**, lleve el interruptor **Modo de operación** a **Dinamómetro**. Este ajuste permite que el **Dinamómetro/Fuente de alimentación de cuatro cuadrantes** funcione como un motor de impulsión, un freno, o ambos, dependiendo de la función seleccionada.

Encienda el **Dinamómetro/Fuente de alimentación de cuatro cuadrantes** llevando el interruptor principal de alimentación a la posición **I** (encendido).

12. Encienda la computadora, luego inicie el software **LVDAC-EMS**.

En la ventana **Arranque de LVDAC-EMS**, asegúrese de que se detectan la **Interfaz de adquisición de datos y de control** y el **Dinamómetro/Fuente de alimentación de cuatro cuadrantes**. Asegúrese de que esté disponible la función **Instrumentación computarizada** para la **Interfaz de adquisición de datos y de control**. También, seleccione la tensión y frecuencia de red que corresponden a la red ca local, luego haga clic en el botón **Aceptar** para cerrar la ventana **Arranque de LVDAC-EMS**.

13. Conecte el equipo como se muestra en la figura 31. En este circuito, el motor del **Dinamómetro/Fuente de alimentación de cuatro cuadrantes** acciona el **Motor cc de imán permanente** mediante una correa dentada. **E1** es una entrada de tensión de la **Interfaz de adquisición de datos y de control**.



**Figura 31.** Configuración utilizada para trazar la curva característica de la tensión en función de la velocidad de un motor cc de imán permanente operando como generador.

### *Rotación en sentido horario*

**14.** En el software **LVDAC-EMS**, abra la ventana **Dinamómetro/Fuente de alimentación de cuatro cuadrantes**, luego haga los siguientes ajustes:

- Ajuste el parámetro *Función* en **Motor de impulsión/Freno de velocidad constante SH**. Este ajuste hace que el **Dinamómetro/Fuente de alimentación de cuatro cuadrantes** funcione como un motor de impulsión/freno en sentido horario con un ajuste de la velocidad que corresponde al parámetro *Velocidad*.
- Ajuste el parámetro *Relación de poleas* en 24:12. Estas cifras indican el número de dientes de la polea del **Dinamómetro/Fuente de alimentación de cuatro cuadrantes** y el número de dientes de la polea de la máquina bajo prueba (es decir, el **Motor cc de imán permanente**), respectivamente.
- Asegúrese de que el parámetro *Control de velocidad* esté en la posición **Perilla**. Esto permite controlar manualmente la velocidad del motor de impulsión/freno, sentido horario.
- Ajuste el parámetro *Velocidad* (es decir, el comando velocidad) en 1000 rpm entrando 1000 en el campo al lado de este parámetro. Observe que el comando velocidad es la velocidad específica en el eje de la máquina acoplada al motor de impulsión, es decir, la velocidad del **Motor cc de imán permanente** en este caso.



*El comando velocidad también se puede ajustar utilizando la perilla Comando de velocidad (rpm) en la ventana **Dinamómetro/Fuente de alimentación de cuatro cuadrantes**.*

**15.** En el software **LVDAC-EMS**, inicie la aplicación **Aparatos de medición**. Establezca el medidor **E1** como un voltímetro cc.

Haga clic en el botón **Regeneración continua** para activar la actualización continua de los valores indicados por los diferentes medidores de la aplicación **Aparatos de medición**.

16. En la ventana **Dinamómetro/Fuente de alimentación de cuatro cuadrantes**, encienda el **Motor de impulsión/Freno de velocidad constante SH** haciendo clic en el botón **En marcha/Parado** o llevando el parámetro **Estado** a **En marcha**.

Observe que el motor de impulsión comienza a girar y a accionar el eje del **Motor cc de imán permanente**.

El medidor **Velocidad** en la ventana **Dinamómetro/Fuente de alimentación de cuatro cuadrantes** indica la velocidad de rotación del **Motor cc de imán permanente**. ¿Esta velocidad es aproximadamente igual al valor del parámetro **Velocidad** (1000 rpm)?

Sí       No

El medidor **E1** en la ventana **Aparatos de medición** indica la tensión cc generada a través de los terminales del **Motor cc de imán permanente**. Escriba esta tensión a continuación.

Tensión cc generada = \_\_\_\_\_ V

17. En el software **LVDAC-EMS**, abra la ventana **Tabla de datos**. Configure la **Tabla de datos** para anotar la velocidad de rotación del **Motor cc de imán permanente** (indicada por el medidor **Velocidad** del **Dinamómetro/Fuente de alimentación de cuatro cuadrantes**) y la tensión cc generada a través de los terminales del motor (indicada por el medidor **E1** de la ventana **Aparatos de medición**).



*Para seleccionar los parámetros a registrar en la **Tabla de datos**, haga clic en el menú **Opciones** de la **Tabla de datos** y luego haga clic en **Parámetros de registro**. En la lista **Ajustes**, seleccione **Dinamómetro/Fuente de alimentación de cuatro cuadrantes**, luego active la casilla **Velocidad**. En la lista **Ajustes**, seleccione **Aparatos de medición**, luego active la casilla del medidor **E1**. Haga clic en **Aceptar** para cerrar el cuadro **Parámetros de registro**.*

18. Haga pasar la velocidad de rotación del **Motor cc de imán permanente** de 0 a 4000 rpm en pasos de 500 rpm ajustando el parámetro **Velocidad**. Para cada ajuste, registre la velocidad de rotación del motor (indicada por el medidor **Velocidad**) y la tensión cc (medidor **E1**) generada en los terminales del motor en la **Tabla de datos** haciendo clic en el botón **Guardar datos** de esta tabla.

#### **Rotación en sentido antihorario**

19. En la ventana **Dinamómetro/Fuente de alimentación de cuatro cuadrantes**, detenga el **Motor de impulsión/Freno de velocidad constante SH** haciendo clic en el botón **En marcha/Parado** o llevando el parámetro **Estado** a **Parado**. Luego haga los siguientes ajustes:

- Lleve el parámetro *Función* a *Motor de impulsión/Freno de velocidad constante SAH*. Este ajuste hace que el *Dinamómetro/Fuente de alimentación de cuatro cuadrantes* funcione como un motor de impulsión/freno, sentido antihorario, con un ajuste de la velocidad que corresponde al parámetro *Velocidad*.
  - Ajuste el parámetro *Relación de poleas* en 24:12.
  - Asegúrese de que el parámetro *Control de velocidad* esté en la posición *Perilla*.
  - Lleve el parámetro *Velocidad* a 0 rpm.
  - Encienda el *Motor de impulsión/Freno de velocidad constante SAH* haciendo clic en el botón *En marcha/Parado* o llevando el parámetro *Estado* a *En marcha*.
- 20.** Haga pasar la velocidad de rotación del *Motor cc de imán permanente* de 0 a -4000 rpm en pasos de aproximadamente -500 rpm ajustando el parámetro *Velocidad* en la ventana *Dinamómetro/Fuente de alimentación de cuatro cuadrantes*. Para cada ajuste, registre la velocidad de rotación del motor y la tensión cc (medidor *E1*) generada en los terminales del motor en la *Tabla de datos*.
- 21.** En la ventana *Dinamómetro/Fuente de alimentación de cuatro cuadrantes*, detenga el *Motor de impulsión/Freno de velocidad constante SAH* haciendo clic en el botón *En marcha/Parado* o llevando el parámetro *Estado* a *Parado*.
- 22.** Con los resultados registrados en la *Tabla de datos*, trace la curva de la tensión cc generada en los terminales del motor en función de la velocidad de rotación del motor.

De acuerdo con la curva obtenida, la tensión generada a través de un motor cc de imán permanente que funciona como generador, ¿es proporcional a la velocidad de rotación?

Sí       No

¿La polaridad de la tensión cc generada depende de la rotación, confirmando de esa manera lo observado al comienzo de este ejercicio cuando giró el eje del motor manualmente y midió la tensión generada con un voltímetro cc? Explique.

---

---

---

Guarde los datos registrados en la *Tabla de datos*, luego ciérrela.

### Curva característica del par en función de la corriente de un motor cc de imán permanente operando como generador

En esta sección, utilizará un motor de impulsión para accionar el Motor cc de imán permanente y lo hará funcionar como generador. Variará el par de oposición desarrollado en el eje del motor y medirá la corriente que fluye a través del inducido del generador.

23. Conecte el equipo como se muestra en la figura 32. Utilice el terminal de alta corriente (40 A) de la entrada de corriente *I1* en la *Interfaz de adquisición de datos y de control*.

En la ventana *Ajustes de la adquisición de datos y control* del software *LVDAC-EMS*, ajuste la *Gama* de la entrada de corriente *I1* en *Alta*.

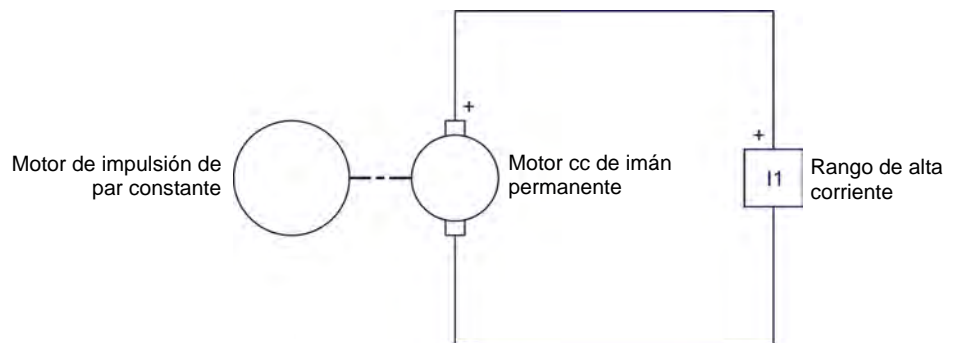


Figura 32. Configuración utilizada para trazar la curva característica del par en función de la corriente de un motor cc de imán permanente operando como generador.

24. En la ventana *Dinamómetro/Fuente de alimentación de cuatro cuadrantes*, haga los siguientes ajustes:

- Lleve el parámetro *Función* a *Motor de impulsión/Freno de par constante positivo*. Este ajuste hace que el *Dinamómetro/Fuente de alimentación de cuatro cuadrantes* funcione como un motor de impulsión/freno de velocidad constante con un ajuste del par que corresponde al parámetro *Par*.
- Ajuste el parámetro *Relación de poleas* en 24:12.
- Ajuste el parámetro *Par* en 0,3 N·m (2,7 lbf·pulg.) entrando 0,3 (2,7) en el campo al lado de este parámetro.

25. En la ventana *Aparatos de medición* del software *LVDAC-EMS*, ajuste el medidor *I1* para mostrar valores cc. Asegúrese de que el modo de regeneración continua de los medidores esté activado.

26. En la ventana *Dinamómetro/Fuente de alimentación de cuatro cuadrantes*, encienda el *Motor de impulsión/Freno de par constante positivo* llevando el parámetro *Estado* a *En marcha* o haciendo clic en el botón *En marcha/Parado*.

Property of Festo Didactic

Sale and/or reproduction forbidden

Observe que el motor de impulsión comienza a girar en sentido horario y a accionar el eje del **Motor cc de imán permanente**.

Los medidores *Velocidad* y *Par* en el **Dinamómetro/Fuente de alimentación de cuatro cuadrantes** indican la velocidad de rotación y el par en el eje del **Motor cc de imán permanente**. Observe que el par es de polaridad negativa, es decir, opuesto a la polaridad (positiva) de la velocidad de rotación. Esto se debe a que el **Motor cc de imán permanente** está funcionando como generador. El par (valor absoluto) indicado por el medidor *Par*, ¿es aproximadamente igual al valor del parámetro *Par*?

Sí       No

El medidor *I1* en la ventana **Aparatos de medición** indica la corriente cc que fluye en el inducido del **Motor cc de imán permanente**. Escriba esta corriente a continuación.

Corriente cc que fluye en el motor = \_\_\_\_\_ A

27. En el software **LVDAC-EMS**, abra la **Tabla de datos** y haga los ajustes requeridos para registrar el par desarrollado por el eje de este motor (indicado por el medidor *Par* en el **Dinamómetro/Fuente de alimentación de cuatro cuadrantes**) y la corriente cc que fluye en el inducido del **Motor cc de imán permanente** (indicada por el medidor *I1* en la ventana **Aparatos de medición**).



*Para seleccionar los parámetros a registrar en la **Tabla de datos**, haga clic en el menú **Opciones de la Tabla de datos** y luego haga clic en **Parámetros de registro**. En la lista **Ajustes**, seleccione **Dinamómetro/Fuente de alimentación de cuatro cuadrantes**, luego active la casilla **Par**. En la lista **Ajustes**, seleccione **Aparatos de medición**, luego active la casilla del medidor *I1*. Haga clic en **Aceptar** para cerrar el cuadro **Parámetros de registro**.*

28. Haga pasar el par desarrollado en el eje del **Motor cc de imán permanente** de 0 a -0,7 N·m (o de 0 a -6,0 lbf·pulg.) en pasos de -0,1 N·m (ó -1 lbf·pulg.) ajustando el parámetro *Par*. Para cada ajuste, registre la corriente que fluye en el inducido del motor cc (medidor *I1*) y el par desarrollado en su eje (indicado por el medidor *Par*) en la **Tabla de datos**.

### ATENCIÓN

Debido a que la salida del **Motor cc de imán permanente** está cortocircuitada por la entrada de corriente *I1*, pueden circular altas corrientes en el motor para pares y velocidades de rotación bajas. Asegúrese de no superar la corriente nominal del **Motor cc de imán permanente**. Realice lo que resta de esta manipulación en menos de 5 minutos.

29. En la ventana **Dinamómetro/Fuente de alimentación de cuatro cuadrantes**, detenga el **Motor de impulsión/Freno de par constante positivo**.

30. Con los resultados registrados en la [Tabla de datos](#), trace una curva del par desarrollado en el eje del motor en función de la corriente que fluye en el inducido del motor cc.

De acuerdo con la curva obtenida, el par desarrollado en el eje de un motor cc de imán permanente que funciona como generador, ¿es proporcional a la corriente que fluye en el inducido del motor?

Sí       No

31. Guarde los datos registrados en la [Tabla de datos](#), luego ciérrela. Apague el [Dinamómetro/Fuente de alimentación de cuatro cuadrantes](#) llevando el interruptor de alimentación principal a O (apagado). Cierre el software [LVDAC-EMS](#). Desconecte todos los cables y vuelva a colocarlos en su lugar de almacenamiento.

### CONCLUSIÓN

En este ejercicio, se familiarizó con un motor cc de imán permanente. Aprendió que este motor consta de un rotor (inducido) compuesto de múltiples bucles de alambre y un estator construido con imanes permanentes que producen un campo magnético fijo. Cuando un motor de impulsión acciona el rotor, éste atraviesa las líneas de fuerza del campo magnético del estator, generando una tensión cc en los terminales del motor: el motor cc funciona como generador cc. La magnitud de la tensión generada es proporcional a la velocidad de rotación, mientras que la polaridad de esa tensión depende de la dirección de rotación. Por ejemplo, cuando el rotor gira en sentido horario, la tensión cc es positiva y viceversa. Aprendió que cuando se conecta una carga en los terminales del motor, se produce una fuerza (par) opuesta a la rotación del motor. La dirección de este par es opuesta a la de rotación. Cuanto mayor es la corriente suministrada a la carga, más elevado es el par que se opone a la rotación.

### PREGUNTAS DE REVISIÓN

1. Refiriéndose a la figura 21, describa la construcción de un motor cc de imán permanente simple.

---

---

---

---

---

---

---



2. Refiriéndose a la figura 24, describa el funcionamiento de un motor cc de imán permanente simple utilizado como generador. Explique cómo se induce una tensión de corriente alterna (ca) en el bucle de alambre del inducido y por qué esta tensión es unipolar (es decir, por qué siempre tiene la misma polaridad) en los terminales del motor.

---

---

---

---

---

---

3. ¿Qué efecto tiene aumentar el número de bucles de alambre y segmentos del colector en la tensión generada por el motor cc de imán permanente que funciona como generador? Explique.

---

---

---

---

4. Describa la relación entre la tensión generada por un motor cc que funciona como generador en función de la velocidad de rotación del inducido. ¿Cuándo la tensión generada tiene polaridad positiva? ¿Cuándo es negativa?

---

---

---

---

---

---

5. Explique por qué cuando una carga eléctrica, como una resistencia, se conecta a los terminales del motor cc, una fuerza (par) se opone a la rotación de ese motor cc que funciona como generador. ¿Cuándo esta fuerza tiene polaridad positiva? ¿Cuándo es negativa?

---

---

---

---

---

---

---

Property of Festo Didactic  
Sale and/or reproduction forbidden

## Motor cc de imán permanente funcionando como motor

**OBJETIVO DEL EJERCICIO** Cuando complete este ejercicio, estará familiarizado con el funcionamiento de los motores cc de imán permanente utilizados como motores.

### RESUMEN DE LOS PRINCIPIOS

Los Principios de este ejercicio abarcan los siguientes puntos:

- Funcionamiento de un motor cc de imán permanente como motor
- Campo magnético producido en el inducido
- Rotación del inducido que resulta de la interacción entre los campos magnéticos del inducido y los imanes permanentes
- Diagrama equivalente de un motor cc de imán permanente

### PRINCIPIOS

#### Funcionamiento de un motor cc de imán permanente como motor

La figura 33 muestra un diagrama de un motor cc de imán permanente simple con dos bucles de alambre en el inducido. Cuando se conecta una fuente de alimentación cc a los terminales del motor, la corriente fluye en dichos bucles de alambre a través de las escobillas y se produce un campo magnético en los bucles. De esta forma, los bucles actúan como electroimanes. La interacción entre el campo magnético producido en los bucles de alambre del inducido y el campo magnético producido por los imanes permanentes del estator crea fuerzas de **atracción y repulsión** que hacen que el inducido gire. Esto se explica en detalle en las próximas secciones.

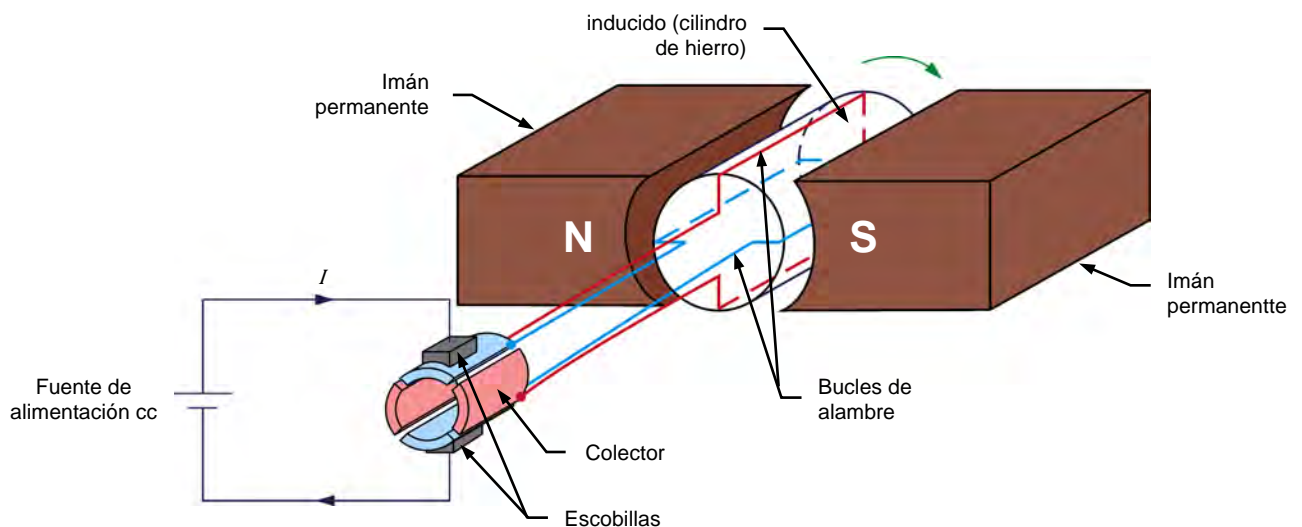


Figura 33. Construcción de un motor cc de imán permanente simple.

### Campo magnético producido en el inducido

La figura 34 y la figura 35 muestran qué le sucede a la polaridad del campo magnético producido en los bucles de alambre del inducido cuando gira el rotor del motor cc de imán permanente simple de la figura 33. En la figura 34(a), las escobillas hacen contacto con los segmentos A y B del colector. Por lo tanto, la corriente fluye desde la fuente de alimentación cc hacia el bucle de alambre A-B a través de las escobillas. No hay ningún flujo de corriente en el bucle de alambre C-D. Esto crea un electroimán A-B con polos norte y sur, como se muestra en la figura 34(a). Cuando el rotor gira un cierto ángulo en sentido horario, como en la figura 34(b), la corriente sigue circulando en el bucle de alambre A-B y los polos norte y sur del electroimán lo hacen en sentido horario. Cuando el rotor gira un cierto ángulo en sentido horario, como en la figura 34(c), la corriente sigue circulando en el bucle de alambre A-B y los polos norte y sur del electroimán lo hacen en sentido horario.

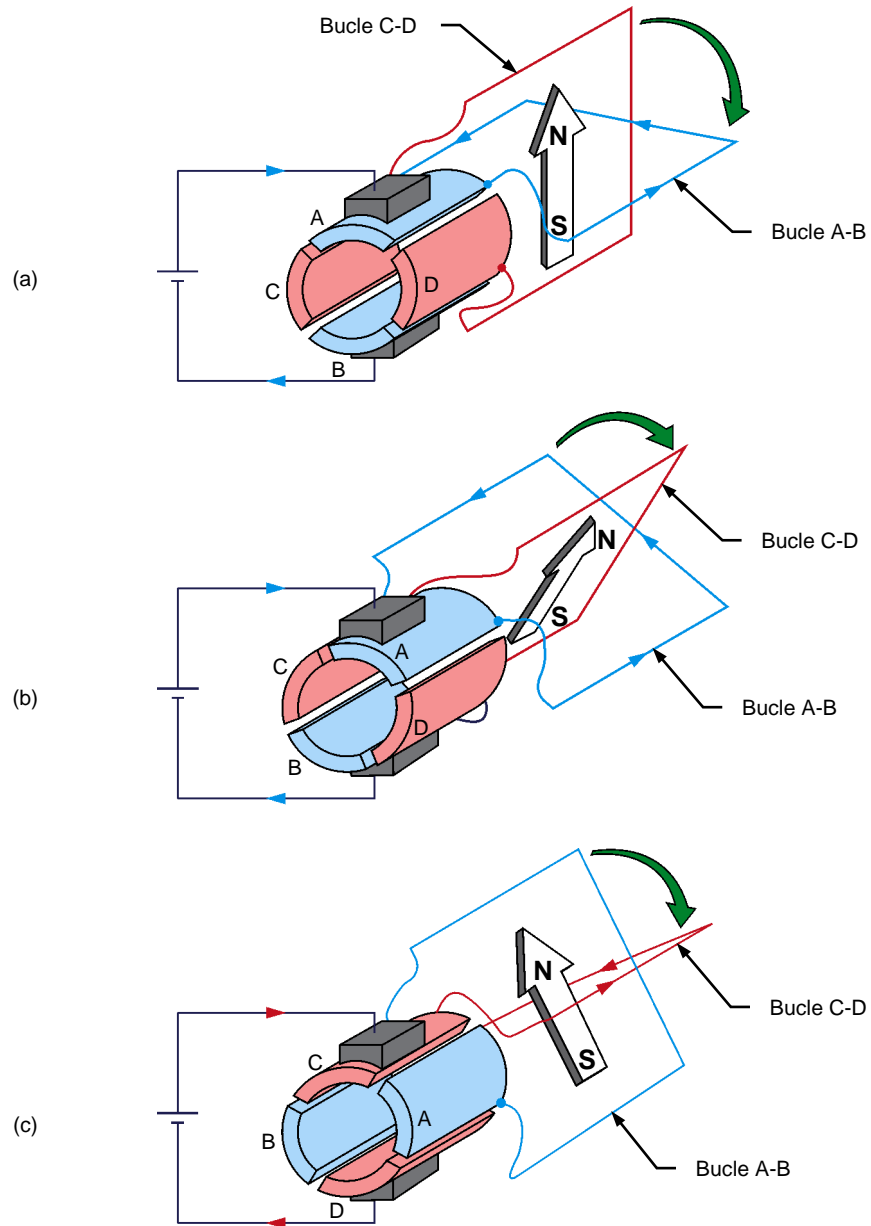
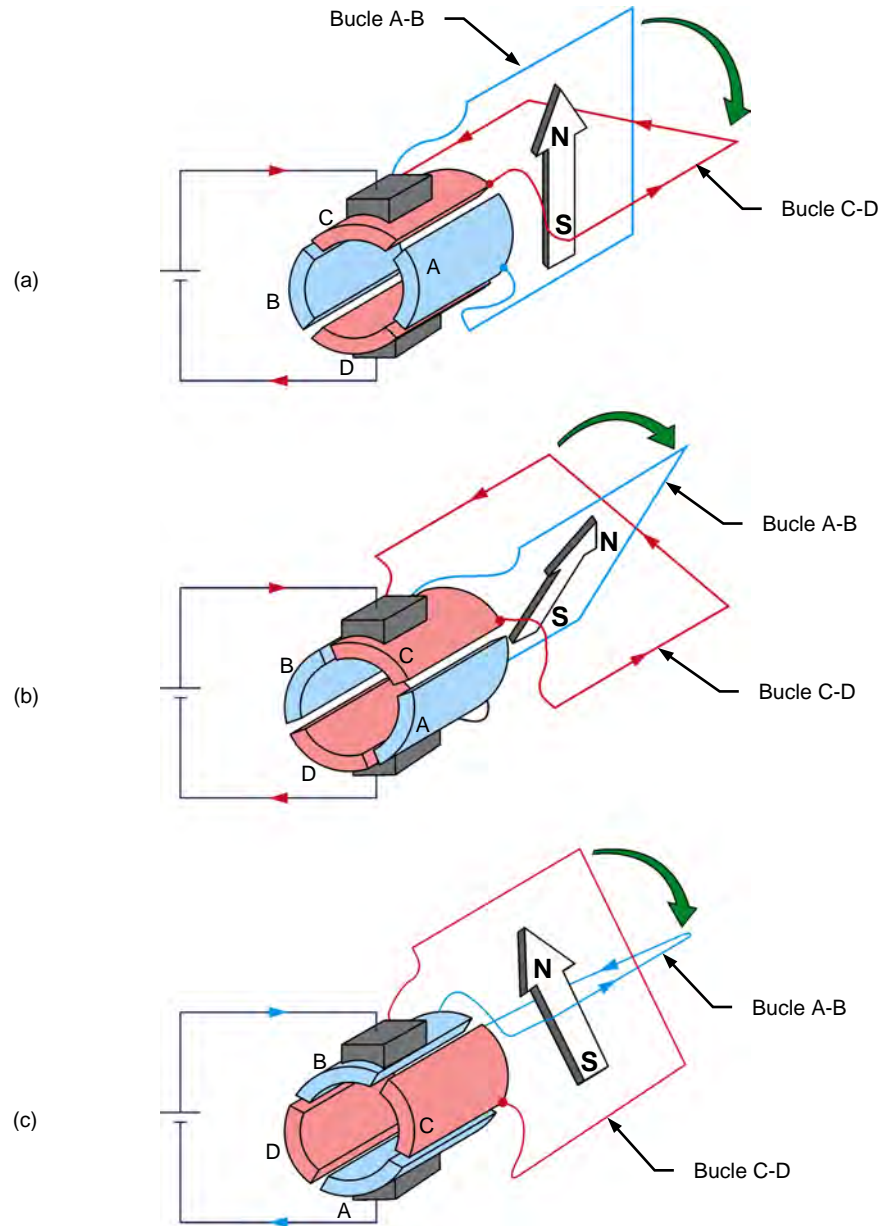


Figura 34. Campo magnético producido en el inducido cuando el rotor gira en sentido horario (parte I).

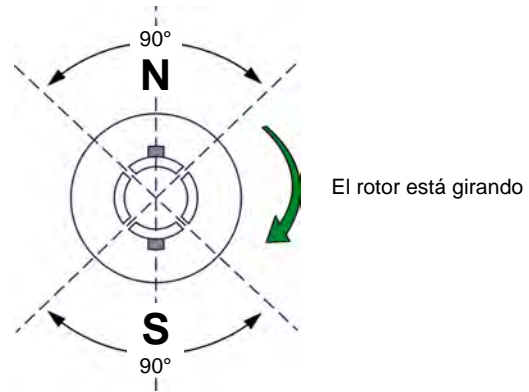
Como el rotor continúa girando en sentido horario, las ranuras del colector pasan por las escobillas y se produce una conmutación, es decir, las escobillas dejan de hacer contacto con los segmentos A y B del colector y en su lugar lo hacen con los segmentos C y D, como se muestra en la figura 34(c). Como consecuencia, la corriente deja de circular en el bucle de alambre A-B y comienza a hacerlo en el bucle C-D. Esto crea un electroimán C-D con polos norte y sur, como se muestra en la figura 34(c).

Una comparación de la figura 34(b) y la figura 34(c) muestra que, en la conmutación, los polos norte y sur del electroimán están girados  $90^\circ$  en sentido antihorario. Como el rotor continúa girando en sentido horario, el mismo fenómeno se repite cada rotación de  $90^\circ$  (es decir, en cada conmutación), como se muestra en la figura 35.



**Figura 35. Campo magnético producido en el inducido cuando el rotor gira en sentido horario (parte II).**

En resumen, cuando el rotor gira, los polos norte y sur del electroimán van y vienen (oscilan) dentro de un ángulo de  $90^\circ$ , como se muestra en la figura 36. En otras palabras, los polos norte y sur se pueden considerar como estacionarios, es decir, ellos no giran cuando el rotor lo hace. Esto es equivalente a tener un electroimán en el rotor que gira a la misma velocidad que éste, pero en dirección opuesta.



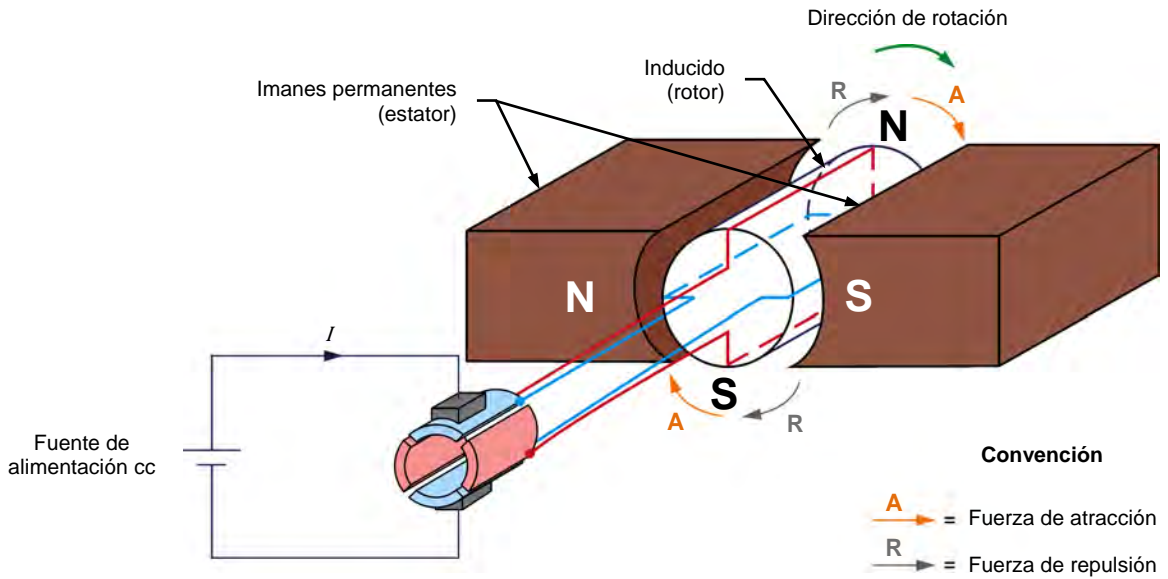
**Figura 36.** Los polos norte y sur del electroimán del inducido oscilan alrededor de una posición fija.

Cuanto mayor es el número de segmentos en el colector, menor es el ángulo de rotación entre cada conmutación y, por lo tanto, menor es el ángulo dentro del que oscilan los polos norte y sur del electroimán. Por ejemplo, si el colector mostrado en la figura 33, figura 34 y figura 35 hubiera tenido 32 segmentos en lugar de 4, los polos norte y sur oscilarían dentro de un ángulo de sólo 11,25° en lugar de 90°.

### **Rotación del inducido que resulta de la interacción entre los campos magnéticos del inducido y los imanes permanentes**

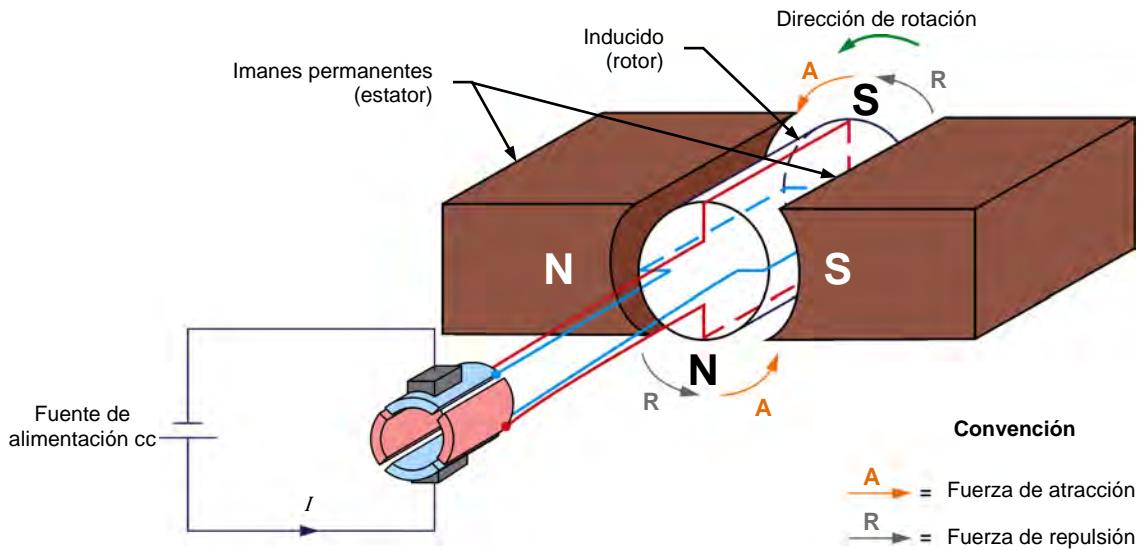
El rotor, del que ya se habló en la sección anterior, está localizado dentro de los imanes permanentes en un motor cc de imán permanente, como se muestra en la figura 37. Esto causa que el campo magnético producido por el electroimán del inducido interactúe con el campo magnético de los imanes permanentes. Como consecuencia, los polos de polaridades opuestas se atraen (con el fin de alinearse), mientras que los de igual polaridad se repelen, de tal forma que el rotor comienza a girar (en sentido horario en este caso). Una vez que el rotor ha girado cierto ángulo (90° en el presente caso), se produce una conmutación y los polos norte y sur del electroimán del inducido vuelven instantáneamente a su posición inicial. Una vez más, los polos de polaridades opuestas se atraen (con el fin de alinearse), mientras que los de igual polaridad se repelen, de manera que el rotor continúa girando en la misma dirección. Una vez que el rotor ha girado cierto ángulo (90° en el presente caso), se produce otra conmutación y los polos norte y sur del electroimán del inducido vuelven instantáneamente a sus posiciones iniciales una vez más. Este ciclo se repite una y otra vez. Las fuerzas que resultan de la interacción del campo magnético producido por el electroimán del inducido y el campo magnético de los imanes permanentes siempre actúan en la misma dirección (en sentido horario en este caso) y el rotor gira continuamente. De esta forma, se consigue una máquina rotatoria que convierte energía eléctrica en potencia mecánica, es decir, un motor eléctrico.





**Figura 37.** Rotación en sentido horario que resulta de la interacción entre el campo magnético producido por el electroimán del inducido y el campo magnético de los imanes permanentes.

La dirección de rotación del rotor depende de la polaridad de la tensión aplicada a las escobillas. Cuando se invierten las conexiones de la fuente de alimentación cc, como se muestra en la figura 38, se invierte la polaridad de la tensión aplicada a las escobillas. Esto invierte la dirección de la corriente que fluye en los bucles de alambre del inducido y hace cambiar la ubicación de los polos norte y sur del campo magnético producido por el electroimán del inducido. Como consecuencia, se invierte la dirección de las fuerzas que resultan de la interacción del campo magnético producido por el electroimán del inducido y el campo magnético de los imanes permanentes, invirtiendo por consiguiente la dirección de rotación del inducido.



**Figura 38.** Cuando se invierte la polaridad de la tensión aplicada a las escobillas, también se invierte la dirección de rotación del inducido.

### Diagrama equivalente de un motor cc de imán permanente

Cuando se aplica una tensión cc a un motor cc de imán permanente, éste comienza a girar, como se explicó en la sección previa. Debido a que los bucles de alambre del inducido están girando en el campo magnético producido por los imanes permanentes, se induce una tensión en el inducido, como cuando el motor funciona como generador. En el caso actual (es decir, cuando hablamos de un motor), la tensión inducida a través del inducido se debe a la **fuerza contraelectromotriz (FCEM)** (o CEMF - por sus siglas en inglés de *Counter-Electromotive Force*) y se representa comúnmente por la siguiente variable:  $E_{CEMF}$ .

La figura 39 muestra el diagrama equivalente de un motor cc de imán permanente.

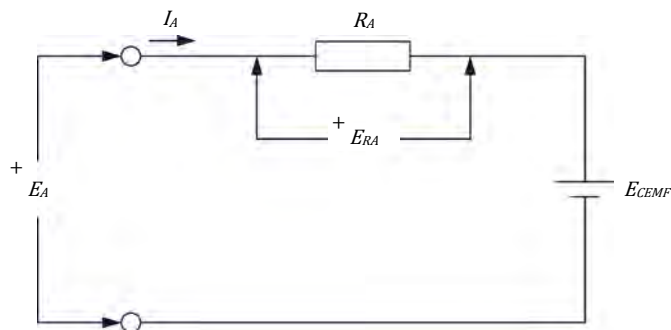


Figura 39. Diagrama equivalente de un motor cc de imán permanente.

En este circuito,  $E_A$  es la tensión aplicada a las escobillas del motor,  $I_A$  es la corriente que fluye en el inducido a través de dichas escobillas y  $R_A$  es la resistencia total de los bucles de alambre del inducido. Observe que  $E_A$ ,  $I_A$  y  $R_A$  por lo general se conocen como tensión, corriente y resistencia del inducido, respectivamente.  $E_{RA}$  es la caída de tensión a través de la resistencia del inducido. La fuente cc  $E_{CEMF}$  en el diagrama equivalente representa la tensión generada en el inducido cuando el motor gira, es decir, la tensión debida a la fuerza contraelectromotriz. La tensión  $E_{CEMF}$  es proporcional a la velocidad del motor. Observe que la polaridad de la tensión  $E_{CEMF}$  es tal que se opone a la tensión  $E_A$  aplicada al inducido, limitando de ese modo la corriente del inducido  $I_A$ . Aunque no está indicado en el diagrama equivalente de la figura 39, el motor también desarrolla un par  $T$  proporcional a la corriente  $I_A$  que fluye en su inducido.

El funcionamiento del motor se rige por las siguientes dos ecuaciones. La ecuación (8) indica la relación entre la velocidad  $n$  del motor y la tensión inducida  $E_{CEMF}$ . La ecuación (9) indica la relación entre el par  $T$  del motor y la corriente del inducido  $I_A$ .

$$n = K_1 \cdot E_{CEMF} \quad (8)$$

donde  $n$  es la velocidad de rotación del motor (rpm).  
 $K_1$  es una constante expresada en  $\frac{\text{rpm}}{\text{V}}$ .  
 $E_{CEMF}$  es la tensión inducida a través del inducido (V).

Property of Festo Didactic  
 Sale and/or reproduction forbidden

$$T = K_2 \cdot I_A \quad (9)$$

donde  $T$  es el par del motor (N·m o lbf·pulg.).  
 $K_2$  es una constante expresada en  $\frac{\text{N}\cdot\text{m}}{\text{A}}$  o  $\frac{\text{lbf}\cdot\text{pulg.}}{\text{A}}$ .  
 $I_A$  es la corriente del inducido (A).

Cuando se aplica una tensión  $E_A$  al inducido de un motor cc de imán permanente sin carga mecánica, la corriente del inducido  $I_A$  que fluye en el circuito equivalente de la figura 39 es constante y de muy bajo valor. Como consecuencia, la caída de tensión  $E_{RA}$  a través de la resistencia del inducido es tan baja que se puede despreciar y  $E_{CEMF}$  se puede considerar igual a la tensión del inducido  $E_A$ . La relación entre la velocidad de rotación del motor  $n$  y la tensión del inducido  $E_A$  es, por lo tanto, una línea recta, porque  $E_{CEMF}$  es proporcional a la velocidad de rotación del motor  $n$ . La figura 40 muestra esta relación lineal. La pendiente de dicha línea es igual a la constante  $K_1$ .

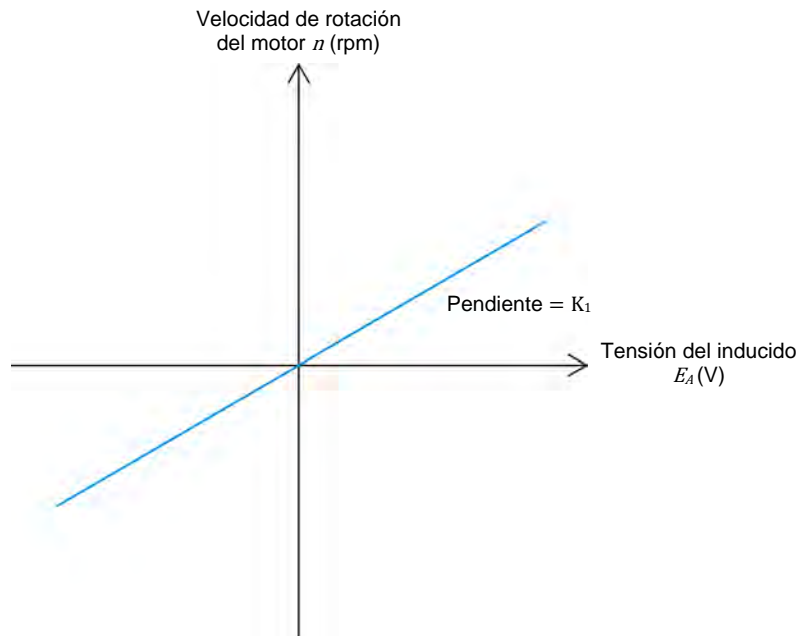


Figura 40. Relación entre la velocidad de rotación del motor y la tensión del inducido.

Debido a que la relación entre la tensión  $E_A$  y la velocidad de rotación del motor  $n$  es lineal, un motor cc se puede considerar como un convertidor de tensión a velocidad lineal, como se muestra en la figura 41.

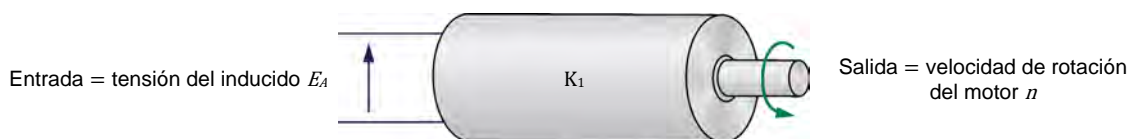


Figura 41. Un motor cc se puede considerar como un convertidor de tensión a velocidad lineal.

El mismo tipo de relación existe entre el par  $T$  del motor y la corriente del inducido  $I_A$ . Por lo tanto, la relación entre el par  $T$  del motor y la corriente del inducido  $I_A$  es una línea recta, como se muestra en la figura 42. La pendiente de dicha línea es igual a la constante  $K_2$ .

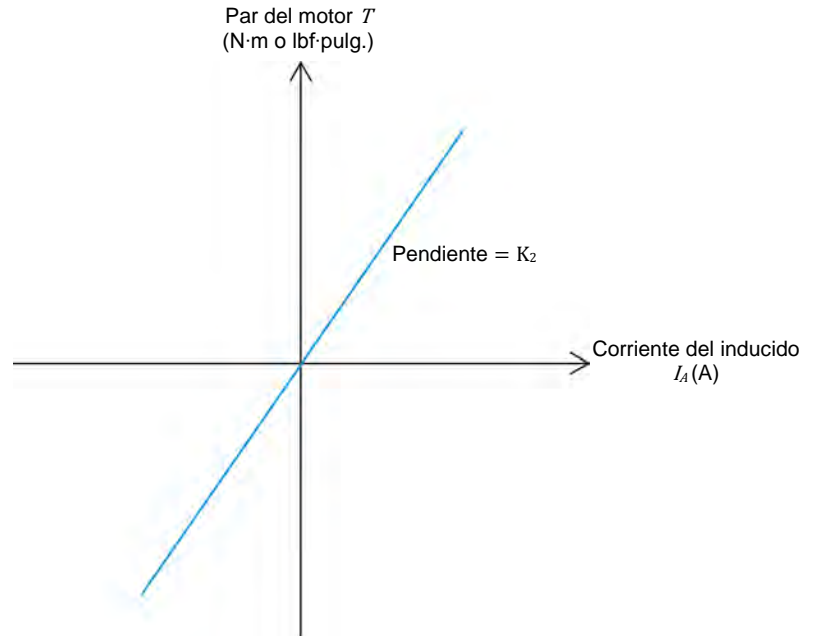


Figura 42. Relación entre el par del motor y la corriente del inducido.

Debido a que esta relación es lineal, un motor cc también se puede considerar como un convertidor de corriente a par lineal, como se muestra en la figura 43.

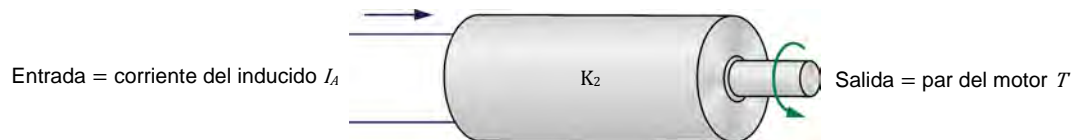


Figura 43. Un motor cc se puede considerar como un convertidor de corriente a par lineal.

Cuando el par  $T$  del motor aumenta, la corriente del inducido también lo hace y por lo tanto, la caída de tensión  $E_{RA}$  ( $R_A \cdot I_A$ ) a través de la resistencia del inducido también aumenta y ya no se puede despreciar. Como resultado, la tensión del inducido  $E_A$  deja de ser igual a  $E_{CEMF}$  y es más bien la suma de  $E_{CEMF}$  y  $E_{RA}$ , como lo muestra la ecuación (10):

$$E_A = E_{CEMF} + E_{RA} \quad (10)$$

Por lo tanto, cuando al inducido de un motor cc se le aplica una tensión fija  $E_A$ , la caída de tensión  $E_{RA}$  a través de la resistencia del inducido aumenta cuando lo

hace el par  $T$  del motor (es decir, cuando la corriente del inducido  $I_A$  aumenta) y por lo tanto, hace disminuir  $E_{CEMF}$ . Como consecuencia, la velocidad de rotación del motor  $n$  disminuye porque es proporcional a  $E_{CEMF}$ . Esto se muestra en la figura 44, la cual es una gráfica de la velocidad de rotación del motor  $n$  en función del par  $T$  del motor para una tensión fija en el inducido  $E_A$ .

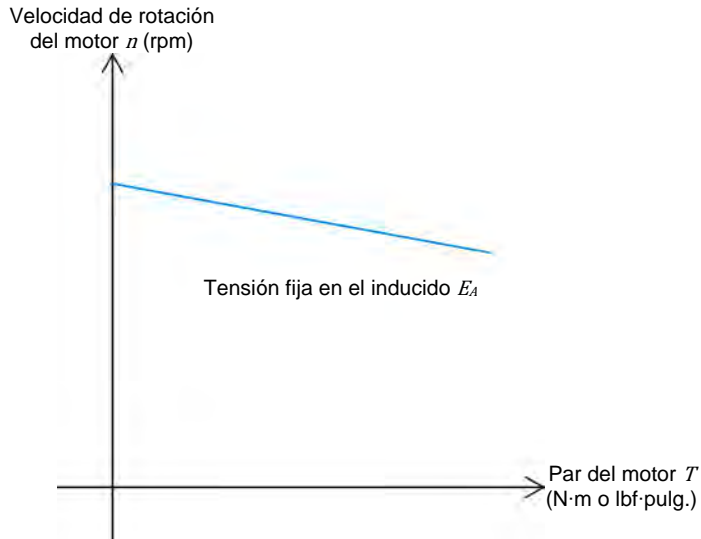


Figura 44. La velocidad de rotación del motor disminuye cuando el par del motor aumenta, para una tensión fija en el inducido  $E_A$ .

## RESUMEN DEL PROCEDIMIENTO

El Procedimiento está dividido en las siguientes secciones:

- Instalación y conexiones
- Curva característica de la velocidad en función de la tensión de un motor cc de imán permanente operando como motor  
*Rotación en sentido horario. Rotación en sentido antihorario.*
- Curvas características de par en función de la corriente y de la velocidad en función del par de un motor cc de imán permanente funcionando como motor  
*Rotación en sentido horario. Rotación en sentido antihorario.*

## PROCEDIMIENTO



En este ejercicio de laboratorio se trabaja con tensiones elevadas. No haga ni modifique ninguna conexión con las fichas tipo banana sin apagar la fuente de alimentación, al menos que se especifique lo contrario.



Antes de realizar este ejercicio, mida con un voltímetro la tensión de circuito abierto a través del **Bloque de baterías de plomo** (modelo 8802). Si dicha tensión es menor de 51,2 V, solicite ayuda a su profesor ya que probablemente el **Bloque de baterías de plomo** no está completamente cargado. El apéndice C de este manual indica cómo cargar completamente el **Bloque de baterías de plomo** antes de la práctica de laboratorio.

## Instalación y conexiones

En esta parte del ejercicio, configurará y conectará el equipo.

1. Consulte la Tabla de utilización del equipo que se encuentra en el Apéndice A para obtener la lista del material requerido para realizar este ejercicio.

Instale el equipo en el [Puesto de trabajo](#).

Acople mecánicamente el [Dinamómetro/Fuente de alimentación de cuatro cuadrantes](#) al [Motor cc de imán permanente](#) utilizando una correa dentada.



Antes de acoplar las máquinas rotatorias, asegúrese completamente de que la fuente está apagada para evitar que alguna de las máquinas arranque de manera repentina.

2. Asegúrese de que el interruptor principal de alimentación del [Dinamómetro/Fuente de alimentación de cuatro cuadrantes](#) está en la posición **O** (apagado), luego conecte su [Entrada de potencia](#) a un tomacorriente ca de pared.

Conecte la [Entrada de potencia](#) de la [Interfaz de adquisición de datos y de control](#) a una fuente de alimentación ca de 24 V. Encienda dicha fuente.

3. Conecte el puerto USB del [Dinamómetro/Fuente de alimentación de cuatro cuadrantes](#) a un puerto USB de la computadora.

Conecte el puerto USB de la [Interfaz de adquisición de datos y de control](#) a un puerto USB de la computadora.

4. En el [Dinamómetro/Fuente de alimentación de cuatro cuadrantes](#), lleve el interruptor *Modo de operación* a *Fuente de alimentación*. Este ajuste permite que el [Dinamómetro/Fuente de alimentación de cuatro cuadrantes](#) funcione como una fuente de tensión, fuente de corriente, cargador de batería o descargador de batería, dependiendo de la función seleccionada.

Encienda el [Dinamómetro/Fuente de alimentación de cuatro cuadrantes](#) llevando el interruptor principal de alimentación a la posición **I** (encendido).

5. Encienda la computadora, luego inicie el software [LVDAC-EMS](#).

En la ventana [Arranque de LVDAC-EMS](#), asegúrese de que se detectan la [Interfaz de adquisición de datos y de control](#) y el [Dinamómetro/Fuente de alimentación de cuatro cuadrantes](#). Verifique que esté disponible la función [Instrumentación computarizada](#) para la [Interfaz de adquisición de datos y de control](#). También, seleccione la tensión y frecuencia de red que corresponden a la red ca local, luego haga clic en el botón [Aceptar](#) para cerrar la ventana [Arranque de LVDAC-EMS](#).

Property of Festo Didactic

Sale and/or reproduction forbidden

### Curva característica de la velocidad en función de la tensión de un motor cc de imán permanente operando como motor

En esta parte del ejercicio, conectará una fuente de alimentación cc de tensión variable a los terminales del Motor cc de imán permanente para hacer que el motor gire. Variará la tensión aplicada al inducido del motor y medirá la velocidad de rotación en el eje del motor.

6. Conecte el equipo como se muestra en la figura 45. En este circuito,  $E_S$  es una fuente de tensión cc positiva implementada con el **Dinamómetro/Fuente de alimentación de cuatro cuadrantes**.  $E1$  e  $I1$  son entradas de tensión y corriente de la **Interfaz de adquisición de datos y de control (DACI)**. El **Motor cc de imán permanente** está acoplado al **Dinamómetro/Fuente de alimentación de cuatro cuadrantes** con una correa dentada para permitir la medición de la velocidad de rotación del motor usando el codificador de eje A/B en el **Dinamómetro/Fuente de alimentación de cuatro cuadrantes**.

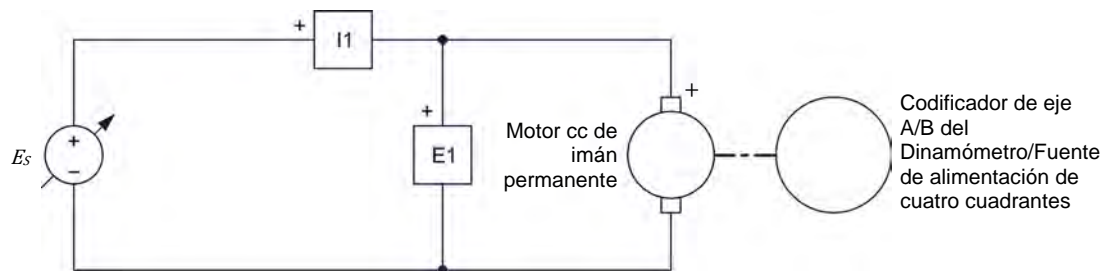


Figura 45. Configuración utilizada para trazar la curva característica de la velocidad en función de la tensión de un motor cc de imán permanente que funciona como motor.

7. Conecte las **Salidas del codificador de eje A y B** del **Dinamómetro/Fuente de alimentación de cuatro cuadrantes** a las **Entradas digitales del codificador A y B** de la **Interfaz de adquisición de datos y de control (DACI)**, respectivamente, con cables de 2 mm. Además, conecte el terminal común (blanco) de las **Salidas del codificador de eje** en el **Dinamómetro/Fuente de alimentación de cuatro cuadrantes** a uno de los dos terminales comunes (blancos) de las **Entradas digitales** de la DACI con un cable de 2 mm. Estas conexiones permiten medir la velocidad de rotación en el eje del **Dinamómetro/Fuente de alimentación de cuatro cuadrantes**, con el fin de determinar la velocidad de rotación del eje del **Motor cc de imán permanente**.

#### *Rotación en sentido horario*

8. En el software LVDAC-EMS, abra la ventana **Dinamómetro/Fuente de alimentación de cuatro cuadrantes**, luego haga los siguientes ajustes:
- Ajuste el parámetro **Función** en **Fuente de tensión cc**. Este ajuste hace que el **Dinamómetro/Fuente de alimentación de cuatro cuadrantes** funcione como una fuente de tensión cc con un ajuste de la tensión que corresponde al parámetro **Tensión**.

- Asegúrese de que el parámetro *Control de tensión* esté en la posición *Perilla*. Esto permite controlar manualmente la fuente de tensión cc.
- Ajuste el parámetro *Tensión* en 10 V entrando 10 en el campo al lado de este parámetro.



*La tensión de la fuente cc también se puede ajustar utilizando la perilla de control Tensión en la ventana Dinamómetro/Fuente de alimentación de cuatro cuadrantes.*

9. En el software *LVDAC-EMS*, inicie la aplicación *Aparatos de medición*. Establezca el medidor *E1* como un voltímetro cc y el medidor *I1* como un amperímetro cc. Además, establezca otro medidor para medir la velocidad de rotación utilizando las señales provistas por las *Salidas del codificador de eje A y B* del *Dinamómetro/Fuente de alimentación de cuatro cuadrantes* (estas salidas alimentan las *Entradas digitales del codificador A y B* de la *Interfaz de adquisición de datos y de control*).

Haga clic en el botón *Regeneración continua* para activar la actualización continua de los valores indicados por los diferentes medidores de la aplicación *Aparatos de medición*.

10. En la ventana *Ajustes de la adquisición de datos y control* del *LVDAC-EMS*, ajuste el parámetro *Entrada digital del codificador A/B* en 180 PPR (pulsos por revolución). Este ajuste permite que el medidor *Velocidad* de la ventana *Aparatos de medición* (establecido en la manipulación previa) mida la velocidad de rotación del *Motor cc de imán permanente*.



*El codificador de eje A/B del módulo Dinamómetro/Fuente de alimentación de cuatro cuadrantes provee 360 pulsos por revolución (PPR). Por lo tanto, cada vez que el eje de la máquina rotatoria de dicho módulo completa una vuelta, se producen 360 pulsos en las Salidas del codificador de eje A y B. Debido a que la relación de poleas entre el módulo Dinamómetro/Fuente de alimentación de cuatro cuadrantes y el Motor cc de imán permanente es 24:12, la máquina rotatoria de dicho módulo gira media vuelta cada vez que el motor lo hace una vez. Como consecuencia, sólo se producen 180 pulsos en las Salidas del codificador de eje A y B por cada revolución del Motor cc de imán permanente. Si se fija el parámetro Entrada digital del codificador A/B en 180 PPR se consigue por lo tanto medir directamente la velocidad de rotación de dicho motor utilizando el medidor Velocidad de la ventana Aparatos de medición.*

11. En la ventana *Dinamómetro/Fuente de alimentación de cuatro cuadrantes*, encienda la *Fuente de tensión cc* haciendo clic en el botón *En marcha/Parado* o llevando el parámetro *Estado* a *En marcha*.

Observe que el *Motor cc de imán permanente* comienza a rotar, haciendo girar asimismo el eje del *Dinamómetro/Fuente de alimentación de cuatro cuadrantes*.

El medidor *E1* de la ventana *Aparatos de medición* indica la tensión del inducido del *Motor cc de imán permanente*. Escriba esta tensión a continuación.

Property of Festo Didactic

Sale and/or reproduction forbidden



Tensión del inducido = \_\_\_\_\_ V

El medidor *Codificador AB* en la ventana *Aparatos de medición* indica la velocidad de rotación del *Motor cc de imán permanente*. Escriba esta velocidad de rotación más abajo.

Velocidad de rotación del *Motor cc de imán permanente* = \_\_\_\_\_ rpm

12. En el software *LVDAC-EMS*, abra la ventana *Tabla de datos*. Ajuste la *Tabla de datos* para registrar la tensión del inducido del *Motor cc de imán permanente* (indicada por el medidor *E1* de la ventana *Aparatos de medición*) y la velocidad de rotación de dicho motor (indicada por el medidor *Codificador AB* de la misma ventana).



*Para seleccionar los parámetros a registrar en la Tabla de datos, abra el cuadro de diálogo *Parámetros de registro* y luego seleccione el medidor *E1* y el medidor *Codificador AB*. Haga clic en *Aceptar* para cerrar el cuadro de diálogo *Parámetros de registro*.*

13. Haga pasar la tensión del inducido del *Motor cc de imán permanente* de 0 a +48 V en aproximadamente 8 a 10 pasos ajustando el parámetro *Tensión* en la ventana *Dinamómetro/Fuente de alimentación de cuatro cuadrantes*. Para cada valor de tensión, registre la tensión del inducido del motor y la velocidad de rotación del *Motor cc de imán permanente* en la *Tabla de datos* haciendo clic en el botón *Guardar datos* en esta tabla.

#### ***Rotación en sentido antihorario***

14. En la ventana *Dinamómetro/Fuente de alimentación de cuatro cuadrantes*, lleve el parámetro *Tensión* hasta 0 V para detener el motor.

Haga pasar la tensión del inducido del *Motor cc de imán permanente* de 0 a -48 V en aproximadamente 8 a 10 pasos ajustando el parámetro *Tensión* en la ventana *Dinamómetro/Fuente de alimentación de cuatro cuadrantes*. Para cada valor de tensión, registre la tensión del inducido del motor y la velocidad de rotación del *Motor cc de imán permanente* en la *Tabla de datos* haciendo clic en el botón *Guardar datos* en esta tabla.

15. En la ventana *Dinamómetro/Fuente de alimentación de cuatro cuadrantes*, lleve el parámetro *Tensión* hasta 0 V para detener el motor. Apague la *Fuente de tensión cc* haciendo clic en el botón *En marcha/Parado* o llevando el parámetro *Estado* a *Parado*.

Guarde los datos registrados en la *Tabla de datos*.

16. Con los resultados registrados en la *Tabla de datos*, dibuje la curva de la velocidad de rotación del eje del *Motor cc de imán permanente* en función de la tensión del inducido del motor.

De acuerdo con la curva obtenida, la velocidad de rotación de un motor cc de imán permanente que funciona como motor, ¿es proporcional a la tensión aplicada al inducido del motor?

Sí       No

La dirección de rotación del motor cc de imán permanente, ¿depende de la polaridad de la tensión aplicada al inducido del motor? Explique.

---

---

---

17. En el software LVDAC-EMS, cierre la [Tabla de datos](#).

**Curvas características de par en función de la corriente y de la velocidad en función del par de un motor cc de imán permanente funcionando como motor**

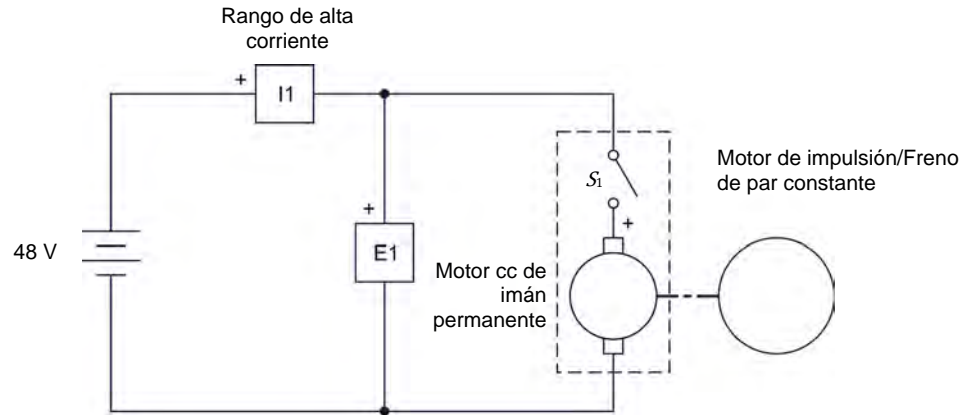
*En esta sección del ejercicio, utilizará una batería para hacer girar el Motor cc de imán permanente. Variará el par de oposición (carga) aplicado al eje del Motor cc de imán permanente y medirá la tensión y corriente del inducido, así como la velocidad de rotación y el par en el eje del motor.*

18. En el [Motor cc de imán permanente](#), asegúrese de que el interruptor  $S_1$  esté en la posición **O** (apagado).

En el [Dinamómetro/Fuente de alimentación de cuatro cuadrantes](#), lleve el interruptor *Modo de operación* a *Dinamómetro*.

19. Conecte el equipo como se muestra en la figura 46. Utilice el terminal de alta corriente (40 A) de la entrada **I1** en la [Interfaz de adquisición de datos y de control \(DACI\)](#).

En la ventana [Ajustes de la adquisición de datos y control](#) del LVDAC-EMS, ajuste la *Gama* de la entrada de corriente **I1** en *Alta*.



**Figura 46.** Configuración utilizada para trazar las curvas características del par en función de la corriente y de la velocidad en función del par de un motor cc de imán permanente que funciona como motor.

### *Rotación en sentido horario*

**20.** En la ventana *Dinamómetro/Fuente de alimentación de cuatro cuadrantes*, haga los siguientes ajustes:

- Lleve el parámetro *Función* a *Motor de impulsión/Freno de par constante negativo*. Este ajuste hace que el *Dinamómetro/Fuente de alimentación de cuatro cuadrantes* funcione como una máquina rotatoria que produce un par constante negativo, es decir, un par constante en sentido antihorario, con un ajuste correspondiente al parámetro *Par*. Como consecuencia, el *Dinamómetro/Fuente de alimentación de cuatro cuadrantes* está configurado para oponerse a la rotación del *Motor cc de imán permanente* (es decir, le aplica un par de carga a dicho motor).
- Ajuste el parámetro *Relación de poleas* en 24:12. El primer y segundo números de este parámetro especifican el número de dientes en la polea del *Dinamómetro/Fuente de alimentación de cuatro cuadrantes* y el número de dientes de la polea de la máquina bajo prueba (es decir, el *Motor cc de imán permanente*), respectivamente.
- Asegúrese de que el parámetro *Control del par* esté en la posición *Perilla*. Esto permite controlar manualmente el par del *Motor de impulsión/Freno de par constante negativo*.
- Ajuste el parámetro *Par* en -0,1 N·m (ó -0,9 lbf·pulg.) entrando este valor en el campo al lado de este parámetro. Esto establece el comando par del *Motor de impulsión/Freno de par constante negativo* en -0,1 N·m (ó -0,9 lbf·pulg.).

**21.** En la ventana *Dinamómetro/Fuente de alimentación de cuatro cuadrantes*, encienda el *Motor de impulsión/Freno de par constante negativo* llevando el parámetro *Estado* a *En marcha* o haciendo clic en el botón *En marcha/Parado*.

En el **Motor cc de imán permanente**, lleve el interruptor  $S_1$  a la posición I (encendido) para arrancar el motor.

En la ventana **Dinamómetro/Fuente de alimentación de cuatro cuadrantes**, el medidor *Velocidad* indica la velocidad de rotación del **Motor cc de imán permanente**, mientras que el medidor *Par* indica el par desarrollado en el eje del motor. Observe que la velocidad de rotación y el par del motor son de polaridad positiva, indicando que el motor está girando en sentido horario. Anote a continuación la velocidad de rotación y el par del motor.

Velocidad de rotación del motor = \_\_\_\_\_ rpm

Par del motor = \_\_\_\_\_ N·m o lbf·pulg

En la ventana **Aparatos de medición**, el medidor *E1* indica la tensión cc aplicada al inducido del **Motor cc de imán permanente**, mientras que el medidor *I1* indica la corriente cc que fluye en el inducido del motor. Registre a continuación la tensión y corriente del inducido.

Tensión del inducido del motor = \_\_\_\_\_ V

Corriente del inducido del motor = \_\_\_\_\_ A

22. En el software **LVDAC-EMS**, abra la ventana **Tabla de datos**. Configure la **Tabla de datos** para registrar la velocidad de rotación y el par del motor (indicado por los medidores *Velocidad* y *Par* en la ventana **Dinamómetro/Fuente de alimentación de cuatro cuadrantes**), así como la tensión y corriente del inducido del motor (indicado por los medidores *E1* e *I1* en la ventana **Aparatos de medición**).
23. Haga variar el par producido por el **Motor de impulsión/Freno de par constante negativo** desde 0 hasta -0,6 N·m (o desde 0 hasta aproximadamente -5,0 lbf·pulg.) en pasos de 0,1 N·m (o aproximadamente 1 lbf·pulg.) ajustando el parámetro *Par* en la ventana **Dinamómetro/Fuente de alimentación de cuatro cuadrantes**. Para cada ajuste de par, registre la tensión y corriente del inducido del motor, así como la velocidad de rotación y par del motor en la **Tabla de datos**.

**ATENCIÓN**

Asegúrese de no superar la corriente nominal del Motor cc de imán permanente por largos periodos de tiempo. Realice esta manipulación en menos de 5 minutos.

Guarde los datos registrados en la **Tabla de datos**.

### **Rotación en sentido antihorario**

24. En la ventana **Dinamómetro/Fuente de alimentación de cuatro cuadrantes**, detenga el **Motor de impulsión/Freno de par constante negativo** haciendo clic en el botón **En marcha/Parado** o llevando el parámetro **Estado** a **Parado**.

En el **Motor cc de imán permanente**, lleve el interruptor  $S_1$  a la posición **O** (apagado) para detener el motor.

En el **Bloque de baterías de plomo**, invierta las conexiones de la batería para invertir la polaridad de la tensión aplicada al **Motor cc de imán permanente**.



*Si se invierten las conexiones de la fuente de alimentación en los dos terminales de un motor cc, se invierte la dirección de rotación del motor.*

25. En la ventana **Dinamómetro/Fuente de alimentación de cuatro cuadrantes**, haga los siguientes ajustes:

- Lleve el parámetro **Función** a **Motor de impulsión/Freno de par constante positivo**. Este ajuste hace que el **Dinamómetro/Fuente de alimentación de cuatro cuadrantes** funcione como una máquina rotatoria que produce un par constante positivo, es decir, un par constante en sentido horario, con un ajuste correspondiente al parámetro **Par**. Como consecuencia, el **Dinamómetro/Fuente de alimentación de cuatro cuadrantes** está una vez más configurado para oponerse a la rotación del **Motor cc de imán permanente** (es decir, le aplica un par de carga a dicho motor).
- Ajuste el parámetro **Relación de poleas** en 24:12.
- Asegúrese de que el parámetro **Control del par** esté en la posición **Perilla**.
- Lleve el parámetro **Par** al valor mínimo (0,0 N·m ó 0,0 lbf·pulg.). Esto ajusta el comando par del **Motor de impulsión/Freno de par constante positivo** en 0,0 N·m (0,0 lbf·pulg.).
- Encienda el **Motor de impulsión/Freno de par constante positivo** haciendo clic en el botón **En marcha/Parado** o llevando el parámetro **Estado** a **En marcha**.

26. Encienda el **Motor cc de imán permanente** llevando su interruptor de alimentación  $S_1$  a la posición **I** (encendido).

Haga pasar el par producido por el *Motor de impulsión/Freno de par constante positivo* de 0 a 0,6 N·m (o de 0 a 5,0 lbf·pulg., aproximadamente) en pasos de 0,1 N·m (o de 1 lbf·pulg., aproximadamente) ajustando el parámetro *Par* en la ventana *Dinamómetro/Fuente de alimentación de cuatro cuadrantes*. Para cada ajuste del par, registre la tensión y corriente del inducido del motor, así como la velocidad de rotación y el par del motor en la *Tabla de datos*.

**ATENCIÓN**

Asegúrese de no superar la corriente nominal del Motor cc de imán permanente por largos periodos de tiempo. Realice esta manipulación en menos de 5 minutos.

Guarde los datos registrados en la *Tabla de datos*.

- 27.** En la ventana *Dinamómetro/Fuente de alimentación de cuatro cuadrantes*, detenga el *Motor de impulsión/Freno de par constante positivo* haciendo clic en el botón *En marcha/Parado* o llevando el parámetro *Estado* a *Parado*.

En el *Motor cc de imán permanente*, lleve el interruptor  $S_1$  a la posición **O** (apagado) para detener el motor.

- 28.** Con los resultados registrados en la *Tabla de datos*, trace la curva del par del motor en función de la corriente de su inducido.

De acuerdo con la curva obtenida, el par desarrollado en el eje de un motor cc de imán permanente, ¿es proporcional a la corriente que fluye en el inducido del motor?

- Sí       No

Cuando se invierte la polaridad de la corriente del inducido, ¿se invierte también la dirección del par desarrollado en el eje del motor? Explique.

---

---

---

- 29.** Con los resultados registrados en la *Tabla de datos*, trace la curva de la velocidad de rotación del motor en función del par del motor.

De acuerdo con la curva obtenida, ¿disminuye la velocidad del motor cuando el par desarrollado en el eje del motor aumenta? Explique por qué.

---

---

---

30. Cierre la **Tabla de datos**. Apague el **Dinamómetro/Fuente de alimentación de cuatro cuadrantes** llevando el interruptor de energía principal a la posición **O** (apagado). Cierre el software **LVDAC-EMS**. Desconecte todos los conductores y vuelva a colocarlos en su lugar de almacenamiento.

**CONCLUSIÓN**

En este ejercicio, se familiarizó con el funcionamiento de un motor cc de imán permanente utilizado como motor. Aprendió que cuando se conecta una fuente de alimentación cc a los terminales de dicho motor, la corriente fluye en los bucles de alambre del inducido y se produce un campo magnético en los mismos. La interacción entre este campo magnético y el campo magnético de los imanes permanentes del estator produce fuerzas que generan un par que hace que el rotor gire continuamente en la misma dirección. La velocidad de rotación del rotor es proporcional a la tensión aplicada al inducido del motor, mientras que la dirección de rotación depende de la polaridad de esa tensión. Por ejemplo, cuando la tensión aplicada es de polaridad positiva, el rotor gira en sentido horario y viceversa. Cuando se aplica un par de carga (oposición) al motor cc, se desarrolla un par en el eje del motor cuya dirección es la misma dirección que la de rotación. Cuando se incrementa el par de carga aplicado, la corriente que fluye en el inducido del motor también lo hace y, por lo tanto, el par desarrollado en el eje del motor aumenta. Para una tensión del inducido fija, la velocidad de rotación del motor disminuye mientras que el par desarrollado en el eje del motor aumenta.

**PREGUNTAS DE REVISIÓN**

1. Refiriéndose a la figura 34, figura 35 y figura 36, describa brevemente el campo magnético producido por el inducido de un motor cc cuando el rotor gira.

---

---

---

---

---

---

---

2. Observe la figura 37. Explique por qué el rotor comienza a girar cuando éste está ubicado dentro de los imanes permanentes del estator de un motor cc.

---

---

---

---

---

---

---

3. Observe la figura 37. Explique por qué el rotor gira continuamente en la misma dirección.

---

---

---

---

---

---

---

---

---

4. ¿Qué le sucede a la dirección de rotación del motor cc de la figura 37 cuando se invierten las conexiones de la fuente de alimentación cc? Explique.

---

---

---

---

---

---

---

---

5. Cuando se aplica una tensión fija al inducido de un motor cc de imán permanente, ¿qué le sucede a la corriente que fluye en el inducido, al par desarrollado en el eje del motor y a la velocidad de rotación del motor cuando el par de carga (oposición) aplicado al motor aumenta?

---

---

---

---



Property of Festo Didactic  
Sale and/or reproduction forbidden

## Tabla de utilización del equipo

Se requiere el siguiente equipo para desarrollar los ejercicios en este manual.

Equipo		Ejercicio		
Modelo	Descripción	1	2	3
8131 <sup>(1)</sup>	Puesto de trabajo – tres módulos	1	1	1
8213	Motor cc de imán permanente	1	1	1
8802	Bloque de baterías de plomo	1	1	1
8942	Correa dentada	1	1	1
8946-2	Multímetro digital	1	1	1
8951-L	Cables de conexión	1	1	1
8960-C <sup>(2)</sup>	Dinamómetro/Fuente de alimentación de cuatro cuadrantes	1	1	1
8990	Computadora personal	1	1	1
9063-B <sup>(3)</sup>	Interfaz de adquisición de datos y de control	1	1	1
30004-2	Fuente de alimentación ca de 24 V	1	1	1

<sup>(1)</sup> También se puede utilizar el Puesto de trabajo, modelo 8134-2 o el Puesto de trabajo móvil, modelo 8110-2.

<sup>(2)</sup> El modelo 8960-C consiste en el Dinamómetro/Fuente de alimentación de cuatro cuadrantes, modelo 8960-2, con los conjuntos Funciones estándares (control manual), modelo 8968-1, y Funciones estándares (control computarizado), modelo 8968-2.

<sup>(3)</sup> El modelo 9063-B consiste en la Interfaz de adquisición de datos y de control, modelo 9063, con el conjunto de funciones Instrumentación computarizada, modelo 9069-1.

Property of Festo Didactic  
Sale and/or reproduction forbidden

## Glosario de términos nuevos

<b>atracción y repulsión</b>	Los polos iguales de dos imanes se repelen, mientras que los polos diferentes se atraen. Por consiguiente, cuando un polo de un imán se mueve hacia un polo igual de otro imán, los imanes se repelen entre sí. De manera contraria, cuando un polo en un imán se mueve hacia un polo opuesto en otro imán, los imanes se atraen entre sí.
<b>colector</b>	Una disposición de segmentos conductores que conectan los bobinados del inducido a los terminales del estator del motor, a través de un par de escobillas.
<b>corriente alterna (ca)</b>	La corriente alterna es la de uso corriente en residencias y comercios. Este tipo de corriente cambia de dirección (polaridad) muchas veces por segundo. Los alternadores y los generadores ca son algunos ejemplos de dispositivos que producen corriente ca.
<b>corriente continua (cc)</b>	Este tipo de corriente se produce por medio de baterías y fuentes de alimentación cc. La corriente continua fluye en una dirección únicamente (dirección convencional): desde el terminal positivo (+) de la batería, o de la fuente de alimentación cc, hacia el terminal negativo (-).
<b>dinamómetro</b>	Dispositivo utilizado para medir la velocidad de rotación y el par producido por un motor que permite aplicar una fuerza de frenado variable (par de carga o par de oposición) al motor bajo prueba.
<b>electroimán</b>	Dispositivo que produce un campo magnético cuando una corriente eléctrica fluye a través del mismo. Un arrollamiento de alambre alrededor de un núcleo de hierro es un ejemplo corriente de un electroimán.
<b>escobillas</b>	Partes fijas fabricadas por lo general de carbono que conducen corriente entre los bobinados del inducido y los terminales del motor.
<b>estator</b>	Parte fija de una máquina rotatoria dentro de la que el rotor gira. El estator de un motor cc de imán permanente está compuesto de imanes permanentes alineados de tal forma que los polos opuestos quedan enfrentados entre sí. Por consiguiente, las líneas del campo magnético pasan de un imán permanente al otro a través de la parte metálica del inducido.
<b>fuerza contraelectromotriz (CEMF)</b>	Fuerza que induce una tensión en el inducido de un motor cc de imán permanente cuando el motor gira.
<b>imán permanente</b>	Pieza de metal rodeada por un campo magnético. Este campo magnético es constante, es decir, persiste naturalmente sin la necesidad de una corriente eléctrica. El imán tiene un polo norte (N) y uno sur (S). Estos polos están situados cerca de los extremos del imán donde la intensidad del campo magnético es mayor.
<b>inducción electromagnética</b>	Consiste en la producción de una fuerza electromotriz (es decir, una tensión inducida) en un circuito que resulta de un cambio en el flujo magnético que lo atraviesa.
<b>motor cc de imán permanente</b>	Máquina rotatoria que funciona utilizando corriente continua (es decir, están alimentados con dicha corriente). Se pueden utilizar como generadores o como motores.
<b>motor de impulsión</b>	Dispositivo que se utiliza para accionar una máquina rotatoria (es decir, para hacer que la máquina gire con el motor de impulsión).

**par**

El par  $T$  producido por una máquina rotatoria indica la magnitud de la fuerza de torsión que la máquina aplica a un objeto en rotación. El par se puede expresar en newtons por metro (N·m) o en libras-fuerza por pulgada (lbf·pulg.). Un motor gira debido al par producido por el mismo cuando se le suministra energía eléctrica, mientras que un generador gira debido al par aplicado al eje del generador por una fuerza externa (por ejemplo, un motor de impulsión).

**rotor (inducido)**

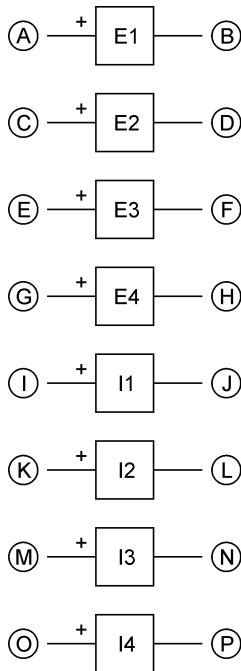
Parte giratoria de una máquina rotatoria. El rotor de un motor cc de imán permanente se compone de múltiples bucles de alambre y de numerosos segmentos del colector.

## Símbolos de los diagramas de circuitos

En los diagramas de circuitos de este manual se utilizan diferentes tipos de símbolos. Cada símbolo es la representación funcional de un dispositivo eléctrico específico que se puede implementar con los equipos. El empleo de estos símbolos simplifica de manera importante las interconexiones que se deben mostrar en los diagramas de los circuitos y, por lo tanto, facilita la comprensión del funcionamiento de esos circuitos.

Para cada símbolo, a excepción de los que representan fuentes de alimentación, resistores, inductores y condensadores, este apéndice da el nombre del dispositivo que el símbolo representa así como los equipos requeridos y las conexiones necesarias para conectar adecuadamente cada dispositivo al circuito. Observe que los terminales de cada símbolo están identificados mediante letras encerradas en un círculo. Esas mismas letras identifican los terminales correspondientes del diagrama de Equipos y conexiones. Tenga en cuenta además, que cuando el diagrama de Equipos y conexiones contiene cifras, éstas corresponden a los números de terminales serigrafados en el equipamiento real.

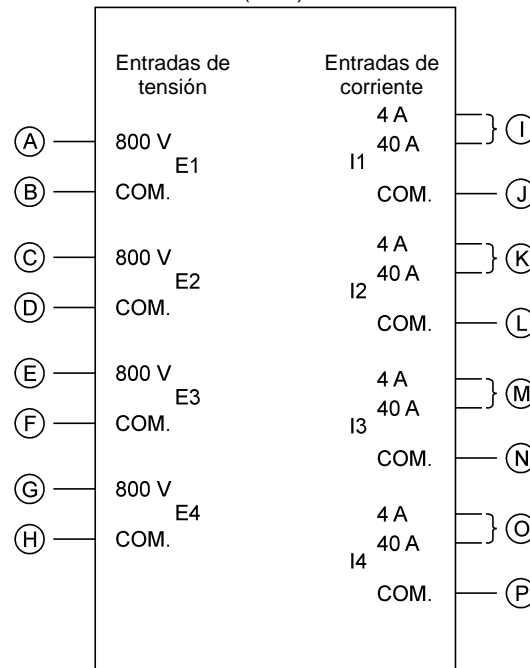
### Símbolo



Entradas aisladas para medición de tensión y corriente

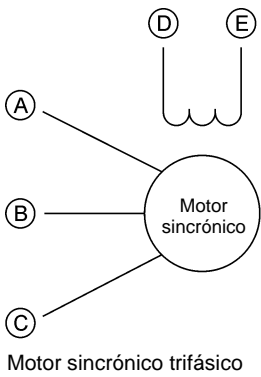
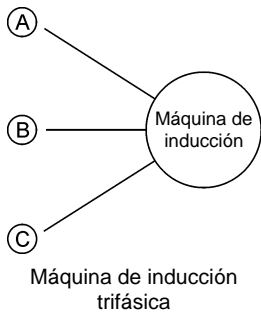
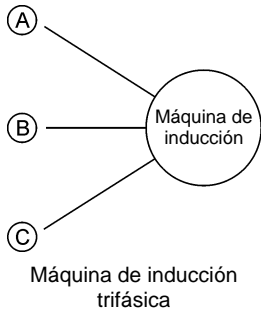
### Equipos y conexiones

Interfaz de adquisición de datos y de control (9063)

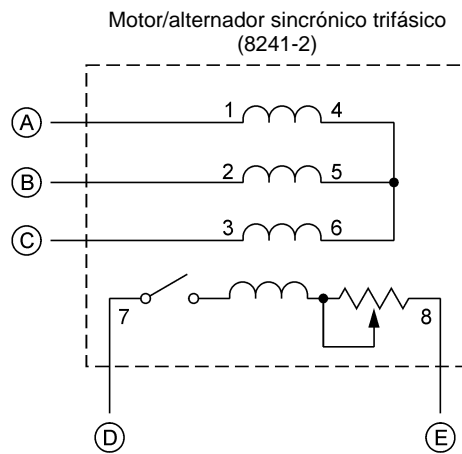
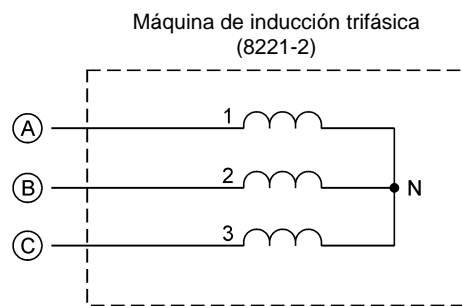
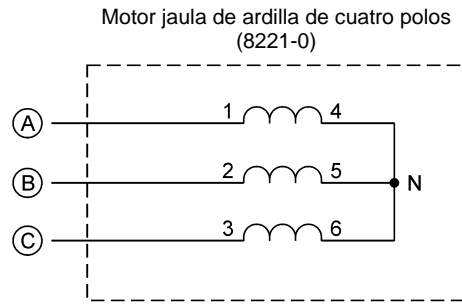


Cuando la corriente de una de las entradas I1, I2, I3 o I4 supera los 4 A de forma permanente o momentánea, utilice el terminal de entrada de 40 A y ajuste el parámetro Gama de la entrada correspondiente en Alta en la pantalla Ajustes de la Interfaz de adquisición de datos y de control del software LVDAC-EMS.

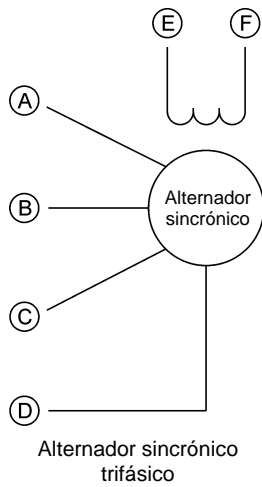
**Símbolo**



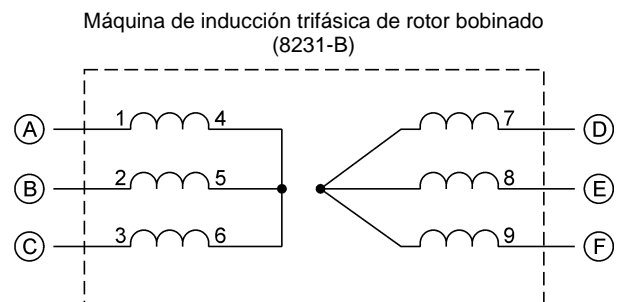
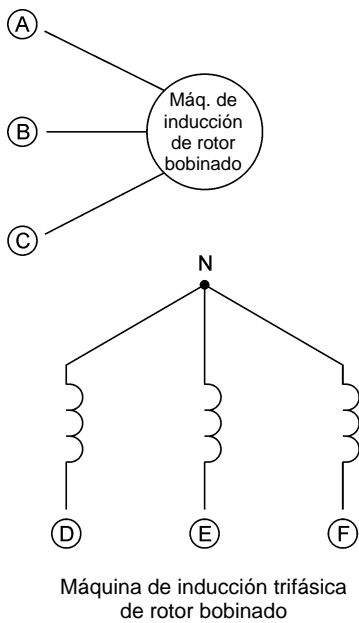
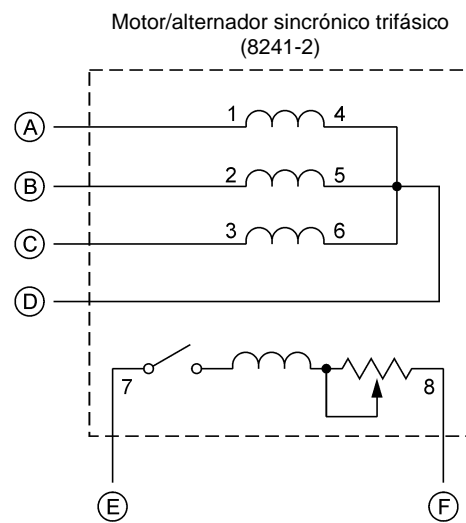
**Equipos y conexiones**



**Símbolo**

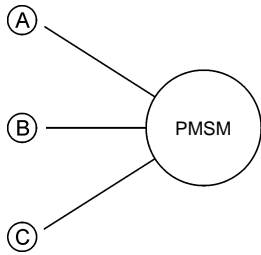


**Equipos y conexiones**





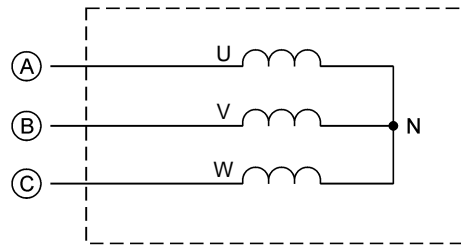
**Símbolo**



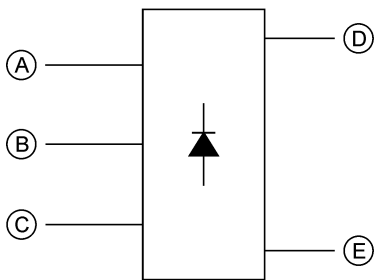
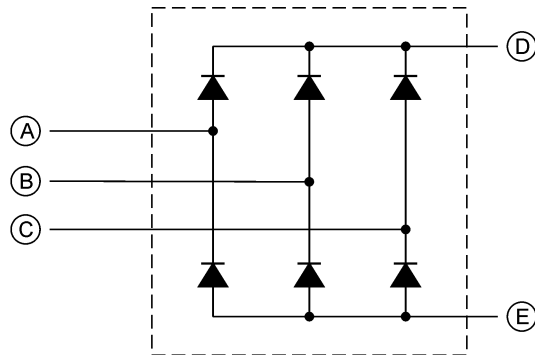
Máquina sincrónica de imán permanente

**Equipos y conexiones**

Máquina sincrónica de imán permanente (8245)

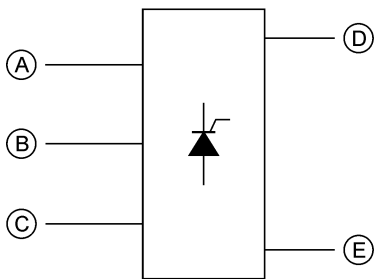
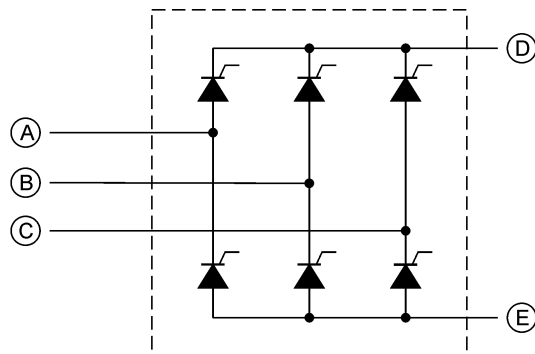


Rectificador y condensadores de filtrado (8842-A)



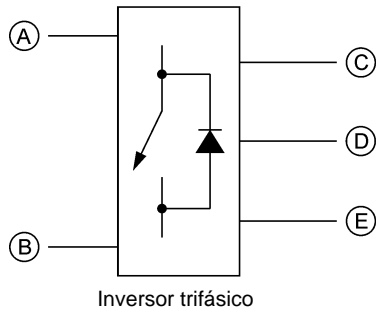
Rectificador trifásico de onda completa con diodos de potencia

Tiristores de potencia (8841)

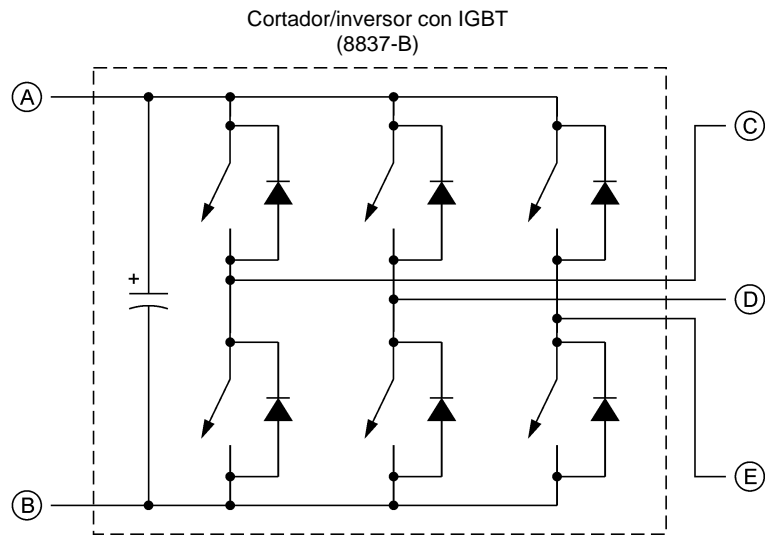


Puente trifásico de tiristores de potencia

**Símbolo**



**Equipos y conexiones**



Property of Festo Didactic  
Sale and/or reproduction forbidden

## Preparación del bloque de baterías de plomo

Este apéndice explica cómo preparar (cargar completamente) cada batería del módulo *Baterías de plomo*, modelo 8801-0, antes de cada clase de laboratorio. Para cargar uno o más de estos módulos a la vez (conectados en paralelo), se utiliza el *Dinamómetro/Fuente de alimentación de cuatro cuadrantes*, modelo 8960.

### Procedimiento de carga

El procedimiento de carga que se describe más abajo se puede realizar durante la noche de modo que el equipo esté listo para ser utilizado por otro grupo de estudiantes al día siguiente.

Realice los pasos siguientes:

1. Para cargar una sola batería del módulo *Baterías de plomo*, comience el procedimiento en la etapa 2. Para cargar más de uno de estos módulos al mismo tiempo (conectados en paralelo), pase a la etapa 3.
2. Conecte el terminal positivo (rojo) del módulo *Baterías de plomo* que se debe cargar al terminal amarillo de la *Fuente de alimentación* del *Dinamómetro/Fuente de alimentación de cuatro cuadrantes*. Conecte el terminal negativo (negro) del módulo *Baterías de plomo* que se debe cargar al terminal blanco de la *Fuente de alimentación* del *Dinamómetro/Fuente de alimentación de cuatro cuadrantes*. Pase a la etapa 4.
3. Conecte el terminal (rojo) de la *Entrada de carga en paralelo* de cada módulo *Baterías de plomo* al terminal amarillo de la *Fuente de alimentación* del *Dinamómetro/Fuente de alimentación de cuatro cuadrantes*. Conecte el terminal (negro) negativo de cada módulo *Baterías de plomo* al terminal blanco de la *Fuente de alimentación* del *Dinamómetro/Fuente de alimentación de cuatro cuadrantes*. Pase a la etapa siguiente.
4. Asegúrese de que el interruptor de alimentación principal del *Dinamómetro/Fuente de alimentación de cuatro cuadrantes* esté colocado en O (apagado), luego conecte la *Entrada de alimentación* a un tomacorriente ca de pared.
5. Coloque el interruptor *Modo de operación* del *Dinamómetro/Fuente de alimentación de cuatro cuadrantes* en la posición *Fuente de alimentación*.
6. Coloque el interruptor de alimentación principal en I (encendido) para encender el *Dinamómetro/Fuente de alimentación de cuatro cuadrantes*.

7. En el **Dinamómetro/Fuente de alimentación de cuatro cuadrantes**, utilice el botón **Función** para seleccionar la función **Cargador flotante de baterías de plomo** y luego ajuste la tensión de carga en 13,8 V utilizando la perilla **Comando**.
8. Pulse el botón **Marcha/Parada** para iniciar la carga de las baterías. En la pantalla aparece **En marcha** para indicar que la carga ha comenzado.
9. Una vez que las baterías se han cargado, pulse el botón **Marcha/Parada** para apagar el **Cargador flotante de baterías de plomo** y luego apague el **Dinamómetro/Fuente de alimentación de cuatro cuadrantes**. Desconecte todos los módulos **Baterías de plomo** del **Dinamómetro/Fuente de alimentación de cuatro cuadrantes**. Verifique la sulfatación de cada batería del módulo **Baterías de plomo** mediante la prueba de sulfatación que se describe en la sección siguiente de este apéndice.

### Prueba de sulfatación



*Esta prueba debe realizarse a una batería a la vez del módulo **Baterías de plomo**.*

Realice los pasos siguientes:

1. Conecte el terminal positivo (rojo) de la batería a probar al terminal (amarillo) de la **Fuente de alimentación** del **Dinamómetro/Fuente de alimentación de cuatro cuadrantes**. Conecte el terminal negativo (negro) de la batería a probar al terminal (blanco) de la **Fuente de alimentación** del **Dinamómetro/Fuente de alimentación de cuatro cuadrantes**.
2. Asegúrese de que el interruptor de alimentación principal del **Dinamómetro/Fuente de alimentación de cuatro cuadrantes** esté colocado en O (apagado), luego conecte la **Entrada de alimentación** a un tomacorriente ca de pared.
3. En el **Dinamómetro/Fuente de alimentación de cuatro cuadrantes**, haga los ajustes necesarios para que opere como fuente de corriente negativa [función **Fuente de corriente (-)**].
4. Fije el comando corriente en 1 A, luego encienda la fuente de corriente negativa.
5. Observe la tensión de la batería. Si dicha tensión no se puede mantener por encima de 12 V durante un minuto, es posible que la batería esté sulfatada.

6. Apague la fuente de corriente negativa.
7. Repita la prueba de sulfatación si tiene otra baterías para probar.
8. Apague el **Dinamómetro/Fuente de alimentación de cuatro cuadrantes**.
9. Las baterías sulfatadas se pueden desulfatar utilizando un desulfatador, de lo contrario se deben reemplazar.

#### **Mantenimiento de las baterías**

Para optimizar el ciclo de vida de las baterías y evitar que se sulfaten, cárguelas inmediatamente después de un ciclo de descarga. Las baterías nunca se deben almacenar descargadas durante un largo período de tiempo.

Property of Festo Didactic  
Sale and/or reproduction forbidden

# Índice de términos nuevos



El número de página en negrita indica la entrada principal. Consulte el Glosario de términos nuevos on page 79 para obtener las definiciones de los términos nuevos.

armadura.....	<b>33</b> , 38, 40, 41, 42, 55, 56, 59, 60, 61, 62, 63
atracción y repulsión .....	<b>41</b> , 55
colector.....	<b>33</b> , 34, 35, 38, 56, 57, 59
corriente alterna (ca) .....	<b>35</b> , 38
corriente continua (cc) .....	3, <b>35</b>
dinamómetro .....	<b>7</b>
electroimán.....	<b>28</b> , 56, 57, 58, 59, 60
escobillas .....	<b>5</b> , 33, 34, 35, 38, 55, 56, 57, 60, 61
estator .....	<b>33</b> , 34, 41, 55
fuerza contraelectromotriz (CEMF).....	<b>61</b>
imán permanente .....	<b>25</b> , 28, 33, 34, 38, 40, 41, 42, 55, 56, 59, 61, 62
inducción electromagnética .....	<b>29</b> , 31, 43
motor cc de imán permanente .....	<b>5</b>
motor de impulsión.....	<b>7</b>
par .....	<b>2</b> , 3, 7, 8, 9, 10, 33, 40, 41, 42, 61, 63, 64
potencia.....	<b>2</b>
rotor.....	3, <b>33</b> , 34, 35, 40, 56, 57, 58, 59, 60
trabajo .....	<b>1</b> , 2, 3



Property of Festo Didactic  
Sale and/or reproduction forbidden

# Bibliografía

Wildi, Theodore, *Electrical Machines, Drives, and Power Systems*, Segunda edición, New Jersey, Prentice Hall, 1991. ISBN 0-13-251547-4.